

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAZI ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Yusuf Furkan ÖZER**

**ARALIK 2012  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI**

**BAZI ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİ**

**Yusuf Furkan ÖZER**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04.12.2012  
Tezin Savunma Tarihi : 27.12.2012**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ**

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Anabilim Dalında**

**Yusuf Furkan ÖZER tarafından hazırlanan**

**BAZI ENDÜSTRİYEL ATIKLARIN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 11/12/2012 gün ve 4485 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan :Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU .....**

**Üye :Doç. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU .....**

**Üye :Yrd.Doç.Dr. Şirin KURBETÇİ .....**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Bazı Endüstriyel Atıkların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı bu çalışmada, konuyla ilgili deneysel çalışmaların tümü Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarımın değerlendirilmesi ve yorumlanmasında bilgi ve tecrübeleriyle yardım ve desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danışmanım Yrd. Doç.Dr. Şirin KURBETÇİ ye;

Eğitimim boyunca emeği geçen tüm hocalarıma;

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirebilmem için bana imkan sağlayan çalıştığım kurum TEİAŞ 14. İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğündeki tüm amirlerime ve iş yükümü hafiflettikleri için mesai arkadaşlarıma;

Çalışmalarım esnasında manevi desteklerini her an hissettiğim aileme ve sevgili eşim Züleyha ÖZER e minnet ve teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yusuf Furkan ÖZER

Trabzon 2012

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “ Bazı Endüstriyel Atıkların, Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

04/12/2012

Yusuf Furkan ÖZER

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON.....	2
2.1. Betonu Oluşturan Malzemeler ve Genel Özellikleri .....	2
2.1.1. Agrega .....	2
2.1.2. Su .....	3
2.1.3. Çimento .....	3
2.1.3.1. Çimentonun Ana Bileşenleri ve Özellikleri .....	3
2.1.3.2. Çimentonun Hidratasyonu .....	5
2.1.3.3. Çimento Tipleri .....	7
2.1.4. Beton Katkı Maddeleri .....	7
2.1.4.1. Mineral Katkı Maddeleri .....	8
2.1.4.1.1. Puzolanik Reaksiyon .....	10
2.1.4.1.2. Doğal Puzolanlar .....	12
2.1.4.1.2.1. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesi .....	12
2.1.4.1.3. Yapay Puzolanlar.....	12
2.1.4.1.3.1. Uçucu Küller.....	13
2.1.4.1.3.1.1. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri.....	13
2.1.4.1.3.1.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	14
2.1.4.1.3.1.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	15
2.1.4.1.3.2. Silis Dumanı .....	15
2.1.4.1.3.3. Yüksek Fırın Cürufu.....	16
2.1.4.2. Kimyasal Katkılar.....	17

2.1.5.	Filler Malzeme.....	18
2.1.5.1.	Taş Tozu .....	18
2.1.5.2.	Mermer Tozu .....	20
2.1.5.3.	Tuğla Tozu.....	21
2.2.	Betonun Genel Özellikleri .....	21
2.3.	Betonun İç Yapısı .....	22
2.3.1.	Sertleşmiş Çimento Hamuru İç Yapısı .....	23
2.4.	Taze Beton Özellikleri.....	24
2.4.1.	İşlenebilirlik.....	25
2.4.1.1.	İşlenebilirliğin Ölçülmesi .....	26
2.4.1.2.	İşlenebilirliğe Etki Eden Faktörler .....	26
2.4.2.	Kıvam .....	27
2.5.	Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	28
2.5.1.	Dayanım .....	28
2.5.1.1.	Basınç Dayanımı .....	29
2.5.1.1.1.	Basınç Dayanımına Etkiyen Faktörler.....	31
2.5.1.1.1.1.	Karışım Oranlarının Etkisi.....	31
2.5.1.1.1.1.1.	Su/Çimento Oranının Etkisi .....	31
2.5.1.1.1.1.2.	Agrega/Çimento Oranının Etkisi .....	33
2.5.1.1.1.2.	Çimento Hamurundaki Jel/Boşluk Oranının Etkisi .....	34
2.5.1.1.1.3.	Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	35
2.5.1.1.1.3.1.	Çimento Özelliklerinin Beton Dayanımına Etkisi.....	35
2.5.1.1.1.3.2.	Agrega Özelliklerinin Beton Dayanımına Etkisi.....	36
2.5.1.1.1.3.3.	Karma Suyu Kalitesinin Beton Dayanımına Etkisi .....	36
2.5.1.1.1.4.	Betona Uygulanan Sıkıştırma İşleminin Beton Dayanımına Etkisi .....	36
2.5.1.1.1.5.	Beton Kür Ortamının Beton Dayanımına Etkisi.....	38
2.5.1.1.1.6.	Zararlı Çevre Koşullarının Beton Dayanımına Etkisi .....	38
2.5.1.2.	Eğilme Dayanımı .....	39
2.5.1.3.	Çekme Dayanımı .....	40
2.5.2.	Dayanıklılık .....	41
2.5.2.1.	Betonda Hasar Oluşumu .....	43
2.5.2.1.1.	Karbonatlaşma.....	43
2.5.2.1.2.	Asit Etkisi .....	43

2.5.2.1.3.	Sülfat Etkisi .....	44
2.5.2.1.3.1.	Deniz Suyu Etkisi .....	47
2.5.2.1.4.	Betondaki Çelik Donatının Korozyonu (Paslanma .....	48
2.5.2.1.5.	Alkali-Silika Reaksiyonu.....	49
2.5.2.1.6.	Klorür Etkisi .....	49
2.5.2.1.7.	Donma-Çözülme Etkisi .....	50
2.5.2.1.8.	Aşınma.....	50
2.5.2.2.	Geçirimsizlik.....	51
2.5.2.2.1.	Su Emme .....	53
2.5.2.2.1.1.	Betonda Kılcal Yolla Su Emme Miktarının Belirlenmesi .....	53
3.	YAYIN TARAMASI .....	55
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	62
4.1.	Çalışmanın Amacı .....	62
4.2.	Deney Programı.....	62
4.3.	Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar.....	63
4.3.1.	Malzemeler .....	63
4.3.1.1.	Agrega .....	63
4.3.1.2.	Çimento .....	64
4.3.1.3.	Su .....	65
4.3.1.4.	Uçucu Kül.....	65
4.3.1.5.	Tuğla Tozu, Mermer Tozu ve Taş Tozu.....	65
4.3.2.	Ekipmanlar .....	66
4.3.2.1.	Betoniyer .....	66
4.3.2.2.	Terazi .....	66
4.3.2.3.	Etüv.....	67
4.3.2.4.	Beton Eğilme ve Basınç Test Presi .....	68
4.3.2.5.	Böhme Yüzey Aşındırma Test Cihazı .....	69
4.4.	Üretilen Betonların Bazı Fiziksel Özellikleri .....	69
4.5.	Beton Üretimi ve Yapılan Deneyler .....	70
4.5.1.	Beton Üretimi .....	70
4.5.2.	Yapılan Deneyler .....	72
4.5.2.1.	Çökme (Abrams Hunisi) Deneyi .....	72
4.5.2.2.	Basınç Dayanımı Deneyi .....	72



4.5.2.3.	Eğilme Dayanımı Deneyi .....	72
4.5.2.4.	Kılcal Su Emme (Kılcallık) Deneyi.....	73
4.5.2.5.	Aşınma (Böhme) Deneyi .....	73
5.	DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR .....	75
5.1.	Taze Beton Deneyi .....	75
5.1.1.	Çökme (Abrams Hunisi) Deneyi .....	75
5.2.	Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	76
5.2.1.	Basınç Dayanımı .....	76
5.2.2.	Eğilme Dayanımı .....	79
5.2.3.	Kılcal Su Emme (Kılcallık Katsayıları) .....	81
5.2.4.	Aşınma Dayanımı .....	84
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	87
7.	KAYNAKLAR.....	89
8.	EKLER .....	98
ÖZGEÇMİŞ		

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

#### BAZİ ENDÜSTRİYEL ATIKLARI BETA ÜMEKALİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Yusuf Furkan ÖZER

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Anabilim Dalı  
Danışman Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ  
2012, 97 Sayfa, 9 Ek Sayfa

Bu çalışmada endüstriyel atık malzemelerinden tuğla tozu, mermer tozu, uçucu kül ve taş tozunun, mineral katkı malzemeleri olarak; betonun, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kılcallık ve aşınma gibi özelliklerine etkileri karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan deneylerde, kontrol karışımı ve sırasıyla tuğla tozu, mermer tozu, uçucu kül ve taş tozu çimentoyla ağırlıkça 10, 20, ve 0 oranlarında ikame edilerek karışımlar üretilmiş, elde edilen karışımların ve 2 günlük basınç dayanımları, eğilme dayanımları, kılcallık değerleri ve aşınma dayanımları bulunup, sonuçlar üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmeler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kontrol karışımı, diğer toz malzemeli karışımlara göre tüm deneylerde daha iyi sonuçlar vermiş, tuğla tozlu karışımların, diğer toz malzemeli karışımlara oranla eğilme dayanımının yüksek, mermer tozlu karışımlarla beraber kılcallık kat sayılarının daha düşük olduğu görülmüştür. Uçucu kül 10 UK 10 karışımı ile kontrol karışımının basınç dayanımı hemen hemen aynı değerlerde çıkmış ve Uçucu kül ün betonun işlenebilirliğini artırdığı görülmüştür. Betonun erken dayanım kazanmasında, taş tozu 10 TŞT 10 ve mermer tozu 10 MT 10 karışımlarının etkin olduğu, tuğla tozu 10 T T 10 ve uçucu kül 10 UK 10 karışımlarının ise betonun geç dayanım kazanmasında etkili oldukları görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tuğla Tozu, Mermer Tozu, Uçucu Kül, Taş Tozu, Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Kılcallık, Aşınma Dayanımı

Master Thesis

SUMMARY

EFFECTS OF SOME INDUSTRIAL WASTE MINERAL ADDITIVES ON THE  
MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Yusuf Furkan ÖZER

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Department

Supervisor: Asst. Prof. Şirin KURBETÇİ

2012, 97 Pages, 9 Pages Appendix

In this study, the effects of some industrial waste mineral additives such as brick powder, marble powder, stone powder, and fly ash on the compressive strength, flexural strength, capillarity, and abrasion resistance of concrete was comparatively investigated. In the testing program, brick powder, marble powder, stone powder, and fly ash were replaced with cement by mass at ratios of 10%, 20%, and 30%, respectively. Mixtures without mineral additives were also prepared for making comparisons. Evaluation and comparisons were performed on the measurements obtained at the end of 7 and 28 days. Based on the measurements obtained, control mixtures have performed better than those produced using industrial waste mineral additives. The flexural strengths obtained from the mixtures of brick powder were higher than those produced with the rest of mineral additives. It was also monitored that mixtures of brick powder yielded almost similar capillary coefficients with those produced using marble powder. On the other hand, mixtures of 10% fly ash yielded almost equal compressive strength compared to those of control mixtures. It is been observed that mixtures of 10% stone powder and 10% marble powder were found to be effective regarding the early strength gain of concrete while mixtures of 10% brick powder and 10% fly ash were found to be more effective on later strength gain.

**Key Words:** Brick powder, Marble powder, Stone powder, Fly ash, Compressive strength, Flexural strength, Capillarity, Abrasion resistance

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 2.1.	Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı .	11
Şekil 2.2.	Beton özelliklerini etkileyen faktörler .....	22
Şekil 2.3.	Betonun basınç altındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi .....	30
Şekil 2.4.	Betonun dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	32
Şekil 2.5.	Agrega hacmi ile silindir beton numunelerin (100 mm çapında ve 200 mm boyunda) basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	34
Şekil 2.6.	Çimento harcının jel/boşluk oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	35
Şekil 2.7.	Vibrasyonun betonun hava içeriği üzerindeki etkisi .....	38
Şekil 2.8.	Bir beton numunenin üçte bir noktalarından yüklenmiş basit giriş yönteminin şematik olarak gösterimi .....	40
Şekil 2.9.	Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimsizliği arasındaki ilişki .....	45
Şekil 2.10.	Sülfat etkisiyle betonun bozulması .....	46
Şekil 4.1.	Agrega karışımına ait granülometrik eğri ve sınır eğrileri .....	64
Şekil 4.2.	Betoniyer .....	66
Şekil.4.3.	Arşimet terazisi .....	67
Şekil.4.4.	0,1 gr hassasiyeti bulunan terazi .....	67
Şekil 4.5.	Etüv.....	68
Şekil.4.6.	Eğilme ve basınç test presi .....	68
Şekil 4.7.	Böhme yüzey aşındırıcı test cihazı .....	69
Şekil 4.8.	Hazırlanan karışımların kalıplara yerleştirilmesi.....	71
Şekil 4.9.	Kür havuzu .....	71
Şekil 4.10.	Çökme (abrams huni) deneyi.....	72
Şekil 4.11.	Kılcallık deney düzeneği .....	73
Şekil 5.1.	Kontrol karışımı çökme değeri ve çimento ile ağırlıkça ikame oranlarına göre toz malzemeli karışımların çökme değerleri değişimleri .....	75
Şekil 5.2.	Kontrol karışımı ve toz malzemeli karışımların ikame oranlarına göre 7 günlük ortalama basınç dayanımları .....	77
Şekil 5.3.	Kontrol karışımı ve toz malzemeli karışımların ikame oranlarına göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları .....	77

Şekil 5.4.	7 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara oranları .....	78
Şekil 5.5.	28 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımı dayanımına oranları .....	79
Şekil 5.6.	Kontrol karışımı ve çimento ile ağırlıkça ikame oranlarına göre toz malzemeli karışımların ortalama eğilme dayanımları.....	80
Şekil 5.7.	Toz malzeme ikame oranına bağlı olarak eğilme dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına oranı .....	81
Şekil 5.8.	Kontrol karışımının ve %10 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi .....	82
Şekil 5.9.	Kontrol karışımının ve %20 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi .....	83
Şekil 5.10.	Kontrol karışımının ve %30 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi.....	83
Şekil 5.11.	Kontrol karışımı ve çimento ile ikame edilme oranlarına göre toz malzemeli karışımların kılcallık katsayıları.....	84
Şekil 5.12.	Kontrol karışımı ve çimento ile ağırlıkça ikame edilme oranlarına göre toz malzemeli karışımların aşınma kaybı değerleri .....	85
Şekil 5.13.	Toz malzeme ikame miktarına bağlı olarak aşınma kaybı değişim oranları .....	86
Ek Şekil 1.	Kontrol karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	100
Ek Şekil 2.	Tuğla tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	101
Ek Şekil 3.	Tuğla tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	101
Ek Şekil 4.	Tuğla tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	102
Ek Şekil 5.	Mermer tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	102
Ek Şekil 6.	Mermer tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	103
Ek Şekil 7.	Mermer tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı .....	103
Ek Şekil 8.	Uçucu kül 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	104
Ek Şekil 9.	Uçucu kül 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	104
Ek Şekil 10.	Uçucu kül 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	105
Ek Şekil 11.	Taş tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	105
Ek Şekil 12.	Taş tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	106
Ek Şekil 13.	Taş tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı.....	106

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 2.1.	Normal portland çimentosunun tipik kompozisyonu.....	4
Tablo 2.2.	Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri .....	4
Tablo 2.3.	Portland çimentosu bileşenlerinin hidratasyon ısıları .....	6
Tablo 2.4.	Puzolanların sınıflandırılması ve puzolan türleri.....	9
Tablo 2.5.	F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve pç'nun kimyasal özellikleri.....	14
Tablo 2.6.	TS EN 206-1 standardına göre kıvam sınıfları .....	27
Tablo 2.7.	Beton sınıfları ve dayanımları TS EN 206-1 .....	29
Tablo 4.1.	Agregalara ait özgül ağırlık, su emme ve su muhtevası değerleri .....	63
Tablo 4.2.	Deneylerde kullanılan çimentoya ait laboratuvar analiz raporu .....	64
Tablo 4.3.	Deneylerde kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları.....	65
Tablo 4.4.	Tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozuna ait elek analizi sonuçları .....	65
Tablo 4.5.	Tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozuna ait birim hacim ağırlıkları.....	66
Tablo 4.6.	Üretilen betonların bazı fiziksel özellikleri.....	70
Tablo 5.1.	Karışımların 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri .....	76
Tablo 5.2.	Karışımların eğilme dayanımı değerleri .....	79
Tablo 5.3.	Karışımların kılcallık kat sayısı değerleri.....	82
Tablo 5.4.	Aşınma (böhme) deneyi sonrası karışımlara ait hacimsel kayıp değerleri .....	85
Ek Tablo 1.	1m <sup>3</sup> 'lük kontrol karışımının malzeme oranları .....	98
Ek Tablo 2.	1m <sup>3</sup> 'lük tuğla tozlu karışımların malzeme oranları .....	98
Ek Tablo 3.	1m <sup>3</sup> 'lük mermer tozlu karışımların malzeme oranları .....	99
Ek Tablo 4.	1m <sup>3</sup> 'lük uçucu küllü karışımların malzeme oranları.....	99
Ek Tablo 5.	1m <sup>3</sup> 'lük taş tozlu karışımların malzeme oranları .....	99

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	Numunenin ağırlığındaki değişim
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CaCO <sub>3</sub>	Kalker
CaMg(CO <sub>3</sub> )	Dolomit kalker
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum hidroksit(Sönmüş kireç)
C-S-H	Kalsiyum silikat hidratlar
CSH <sub>2</sub>	Kalsiyum sülfat dihidrat(Alçı taşı)
C <sub>2</sub> S	Dikalsiyum silikat
C <sub>3</sub> A	Trikalsiyum alüminat
C <sub>3</sub> S	Trikalsiyum silikat
C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	Mikrokristal hidrat
C <sub>4</sub> AF	Tetrakalsiyum alimino ferrit
Fe <sup>++</sup>	Demir iyonu
Fe(OH) <sub>2</sub>	Ferro hidroksit
Fe(OH) <sub>3</sub>	Ferik hidroksit
H <sub>2</sub> S	Hidrojen sülfid
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfirik asit
k	Kılcallık katsayısı
MT 10	Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım
MT 20	Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım
MT 30	Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım
OH <sup>-</sup>	Hidroksil iyonu
pH	Asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimidir
Psi	pound/inçkare
SD	Silis dumanı
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
td	Son okumanın yapıldığı zamanı temsil etmektedir (dk)

TĞT 10	Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım
TĞT 20	Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım
TĞT 30	Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TŞT 10	Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen taş tozlu karışım
TŞT 20	Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen taş tozlu karışım
TŞT 30	Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen taş tozlu karışım
UK	Uçucu kül
UK 10	Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen uçucu küllü karışım
UK 20	Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen uçucu küllü karışım
UK 30	Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen uçucu küllü Karışım
YFC	Yüksek fırın cürufu
$\Delta M$	16 periyot sonrası kütle kaybı
$\Delta Q$	Numune ağırlığındaki değişim
$\Delta V$	Hacimsel kayıp
$\sigma_E$	Eğilmede çekme dayanımı
$\sigma_R$	Örnek birim hacim ağırlığı



## 1.GİRİŞ

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

Çeşitli endüstriyel atıklar betonda puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Puzolanlar tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak ince öğütülüp, normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme olarak tanımlanmaktadır. Puzolanlar betonlarda mineral katkı olarak kullanılmaktadır (Subaşı vd., 2008).

Mineral katkı olarak suni puzolanların kullanılması, betonda kullanılan çimentoyu azaltarak, ekonomiye katkı sağladığı gibi çevresel atıklar değerlendirildiği için de ekolojik fayda sağlamaktadırlar. Ekonomik ve ekolojik faydaları yanı sıra betona teknik olarak da katkıları vardır (Sun, 2004; Neville, 1995).

Mineral katkılar, harç ve beton üretiminde genellikle ikinci bağlayıcı madde olarak portland çimentosunun bir kısmı yerine ya da ilave olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılmaktadırlar.

Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri, portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahiptirler. Buna rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık özelliği yoktur. Bu maddeler puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirmektedirler. Puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri, betonun boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşumunu sağlarlar (Özcan, 2005). Mineral katkılar betonun dayanımını arttırarak, akıcılığını sağlamak için kullanılmaktadır. Beton veya çimento içerisine puzolanik malzeme eklenmesinin hidrasyon ısısını düşürmesi, yüksek hedef dayanımı ve düşük permeabilite sağlaması, alkali silika reaksiyonunu ve sülfat etkisini kontrol altına alması gibi bir çok yararlar sağladığı bilinmektedir (Subaşı vd., 2008).

## **2. BETON**

Beton; imento, su, agrega ve gerektiğinde kimyasal ve/veya mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasıyla oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, şekil verilebilen zamanla katılaşıp sertleşerek mukavemet kazanan kompozit bir malzemedir (Akman, 1987; Özkul vd., 1999).

### **2.1.Betonu Oluşturan Malzemeler ve Genel Özellikleri**

#### **2.1.1. Agrega**

Beton içerisinde doldurma etkisi gören, herhangi bir kimyasal etkileşim içinde bulunmayan, genellikle doğal kaynaklardan elde edilen taneli malzemelere agrega denir.

Agregaların boşluk yapısı, şekli, yüzey durumu ve dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri, beton özellikleri üzerinde kimyasal ve mineralojik özelliklerine kıyasla daha etkilidir. Betonun hacim bazında %60-%80'ini, ağırlıkça da 4/5'ini oluşturan agregalar tane boyut büyüklüğüne göre ince ve iri olmak üzere ikiye ayrılır. İnce agregalar 4 mm'den küçük boyuttaki doğal ve kırma kumu, iri agregalar ise 4 mm'den büyük boyuttaki kırma taşı ve çakılı kapsar (Doğan, 2008).

Beton agregası doğal kum ve çakıl karışımlarından, ayrıca yapay kırma taş (mıcır) malzemedен meydana gelir. Doğal agregalar taş ocaklarından, kurak mevsimlerde dere yataklarından, deniz ve nehir tabanlarından elde edilirler. İstenen agrega boyutlarının elde edilebilmesi için büyük taş kütleleri konkasörde kırılırlar. Bu şekilde oluşan köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip malzemelere mıcır adı verilir ve mıcır bu özelliğiyle doğal kum ve çakıldan ayrılır.

Taze ve sertleşmiş beton özellikleri, karışım oranları ve maliyet, agreganın özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir (Ağar vd.; 1998).

### 2.1.2. Su

Beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılan su, mümkün olduğu kadar temiz olmalı ve içerisinde taze ve sertleşmiş betonun özelliklerine zararlı etki yapabilecek miktarda kil, silt, organik madde, asit, klorür, sülfat, yağ ve endüstriyel atıklar bulundurmamalıdır. İçilebilir nitelikteki sular, içinde yüksek oranda zararlı madde bulunmayan kuyu suları, içine yağ vb. maddeler karışmamış ve çökeltme havuzlarında çamurundan arındırılmış yıkama suları karışım suyu olarak kullanılabilir.

Beton üretiminde kullanılan suyun pH derecesi 7'nin üstünde olmamalıdır. Suyu kanalizasyon karışması durumunda ve suyun nişasta, şeker gibi organik maddeler içermesi söz konusu olduğunda betonda priz geciktirici etki meydana gelmektedir (Neville, 2004).

### 2.1.3. Çimento

Su ile karıştırıldıklarında havada veya su altında sertleşebilen (kitle oluşturan) ve sertleştikten sonra suda çözünmeyen bağlayıcı maddelere hidrolik bağlayıcılar denir. Çimento, kireç ve alçı taşı birer hidrolik bağlayıcıdır.

Çimento; başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin sinterleşme derecelerine kadar pişirilmesiyle elde edilen yarı mamul madde klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi katılarak öğütülmesiyle üretilen hidrolik bağlayıcı maddelere denir. Genel anlamda ise, havada ve suda sertleşen bağlayıcı özellikteki maddelerdir (Özgür, 1996).

#### 2.1.3.1. Çimentonun Ana Bileşenleri ve Özellikleri

Tipik bir normal portland çimentosunun ana bileşenleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Normal portland çimentosunun tipik kompozisyonu (Mindess ve Young, 1981).

Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	Notasyon	Ağırlık (%)
Trikalsiyum siliat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	25
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	12
Tetrakalsiyum alümino ferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8
Kalsiyum sülfat dihidrat (alçı taşı)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$	3,5

$\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$  çimentonun en reaktif ana bileşenleridir.  $\text{C}_2\text{S}$  ise çok daha yavaş reaksiyona girer. Alçı taşı  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın hızlı reaksiyona girmesini engeller. Alit olarak adlandırılan  $\text{C}_3\text{S}$ 'in yüksek oranlarda bulunması çimentolarda erken dayanımın daha yüksek oluşmasına neden olur. Belit olarak adlandırılan  $\text{C}_2\text{S}$ 'in erken dayanıma katkısı ise çok yüksek değildir, ancak son dayanıma katkısı yüksektir.  $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$ 'in portland çimentosunda hidratasyonu sonucunda kalsiyum silikat hidratlar ile kalsiyum hidroksit oluşur. Her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkardığı ısı ve oluşan ürünün dayanıma katkısı farklı olmaktadır (Mindess ve Young, 1981; Mehta ve Monteiro, 2006; Erdoğan, 2003; Nawy, 2001).

Tablo 2.2'de portland çimentosunun ana bileşenlerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Portland çimentosu ana bileşenlerinin özellikleri (Erdoğan, 2003; Nawy, 2001).

Bileşen	Reaksiyon Hızı	Hidratasyon Isısı	İlk Dayanıma Katkısı	Son Dayanıma Katkısı
Trikalsiyum siliat, ( $\text{C}_3\text{S}$ )	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek
Dikalsiyum silikat ( $\text{C}_2\text{S}$ )	Yavaş	Düşük	Düşük	Yüksek
Trikalsiyum alüminat ( $\text{C}_3\text{A}$ )	Hızlı	Çok Yüksek	Düşük	Düşük
Tetrakalsiyum alüminoferrit ( $\text{C}_4\text{AF}$ )	Yavaş	Düşük	Düşük	Düşük

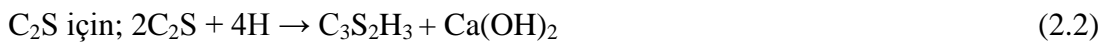
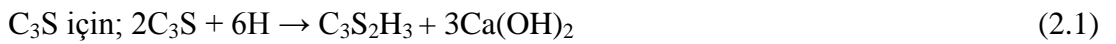
Kalsiyum silikatlar ( $C_3S$  ve  $C_2S$ ) hidrate olmuş çimento hamurunun dayanımından sorumlu en önemli bileşenlerdir. Dayanıma katkısının çok az olmasına karşın, çimentoda  $C_3A$  varlığı, çimento hamuru sülfat atağına maruz kaldığında kalsiyum sülfat alüminat ve etrenjit oluşumuna neden olarak dayanıklılığı olumsuz etkilemesinden dolayı istenmeyen bir durumdur. Ancak, kireç ve silikanın kombinasyonunu sağladığından çimento üretiminde  $C_3A$  oldukça gereklidir.  $C_4AF$  çimentoda çok düşük miktarda yer alır. Diğer ana bileşenler ile kıyaslandığında çimento özelliklerini ciddi oranda etkilemez, ancak  $C_4AF$  alçı taşı ile reaksiyona girerek kalsiyum sülfat ferrit oluşturur ve kalsiyum sülfat ferrit varlığı silikatların hidratasyonunu hızlandırabilir (Neville ve Brooks, 2004).

### 2.1.3.2. Çimentonun Hidratasyonu

Çimentonun su ile gerçekleştirdiği reaksiyonlar, çimentonun hidratasyonu olarak tanımlanır ve hidratasyon sonucu oluşan yeni katılar hidratasyon ürünleri olarak adlandırılır (Mehta ve Monteiro, 2006; Mindess ve Young, 1981).

Portland çimentosu hamurunun kıvam kaybı ve priz alma özellikleri alüminatları içeren hidratasyon reaksiyonları ile belirlenir. Normal portland çimentosunun % 75'ini oluşturan silikatlar dayanım kazanmada önemli rol oynarlar (Mehta ve Monteiro, 2006).  $C_3A$  ve  $C_3S$  en reaktif bileşenlerdir ve  $C_2S$  çok daha az reaktiftir.  $C_3A$ 'nın suyla reaksiyonu çok hızlı gerçekleşir. Ancak, alçı taşının varlığı  $C_3A$ 'nın erken hidratasyonunu yavaşlatır.  $C_4AF$ -alçı taşı-su reaksiyonu  $C_3S$  reaksiyonundan daha yavaştır.  $C_4AF$ 'nin alçı taşı olmadan hidratasyonu daha hızlıdır (Mindess ve Young, 1981).

$C_3S$ 'in hidratasyon ürünü mikrokristal hidrat olan  $C_3S_2H_3$  ve kristal  $Ca(OH)_2$ ' dir.  $C_2S$ 'in hidratasyonu sonucunda benzer ürünler oluşur. Kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) olarak tanımlanır. Kalsiyum silikatların sadeleştirilerek gösterilebilen hidratasyon reaksiyonları aşağıdaki gibidir (Neville ve Brooks, 2004; Erdoğan, 2003).



$C_3A$ 'nın suyla reaksiyonu çok hızlıdır ve ani prize sebep olur. Bu sorun klinkerin öğütülmesi aşamasında alçı taşı eklenmesi ile çözülür.  $C_3A$ 'nın alçı taşı olmadığı ve olduğu durumlardaki hidratasyon reaksiyonları şu şekildedir (Neville ve Brooks, 2004).



Yukarıdaki denklemlerden de görüleceği üzere,  $C_3A$ 'nın hidratasyonu için gerekli su  $C_3S$ 'in hidratasyonu için gerekli sudan daha fazladır.

Portland çimentosu hidratasyon reaksiyonlarının tümü ekzotermiktir, yani reaksiyonlar sonucunda ısı açığa çıkar. Betonda ısı artışının miktarı, ısının betondan dışarıya nasıl ve ne hızla dağıldığına bağlıdır. Bundan dolayı hidratasyon ısısı önem kazanmaktadır.

Tablo 2.3'de portland çimentosu bileşenlerinin hidratasyon ısıları kal/g cinsinden özetlenmiştir.

Tablo 2.3. Portland çimentosu bileşenlerinin hidratasyon ısıları (Mehta ve Monteiro, 2006).

Bileşen	Hidratasyon Isısı (kal/g)		
	3 gün	90 gün	13 yıl
$C_3S$	58	104	122
$C_2S$	12	42	59
$C_3A$	212	311	324
$C_4AF$	69	98	102

Hidratasyon ısısı çimentonun kimyasal kompozisyonuna bağlıdır ve yaklaşık olarak ana bileşenlerin hidratasyon ısıları toplamına eşittir.  $C_3A$  ve  $C_3S$  oranlarının azaltılmasıyla çimentonun hidratasyon ısısı azaltılabilir. Ayrıca, çimentonun fiziksel özelliklerinden olan inceliği ısının ortaya çıkma hızını etkiler. Hidratasyon ısısı ile ana bileşenlerin bağlayıcılık özellikleri arasında herhangi bir ilişki yoktur (Neville ve Brooks, 2004).

### 2.1.3.3. Çimento Tipleri

Çimento içindeki ana bileşenleri ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  ve  $C_4AF$ ) farklı oranlarda bulundurmak suretiyle çeşitli amaçlara yönelik farklı çimentolar elde edilebilmektedir (Erdoğan, 1995). Çimentonun kullanım amaçlarına ve daha ekonomik olarak üretilmesine yönelik çeşitli tipleri üretilmiştir. Birkaç tipin haricinde katkısız ve katkılı çimentolarda daima portland çimentosu klinkeri kullanılmaktadır (Targan, 1998).

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM) beş ana tip içerisinde toplamaktadır. Bunlar;

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland Kompoze Çimento
- CEM III Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimento
- CEM IV Puzolanik Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

Portland çimentosu klinkeri, kalker ve kil gibi hammaddelerin  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  gibi oksitlerini içeren, hassas bir orantı ile birleştirilip ince öğütülmüş karışımının (farinin) döner fırında  $1400-1500^\circ C$  sıcaklıkta sinterleşmesi sonucu elde edilen, yaklaşık 1-3 cm çapında granüle malzemedir. Kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikat içermeli,  $CaO/SiO_2$  orantısı 2,0 den az olmamalıdır. Ayrıca  $MgO$  içeriği en fazla %5 olarak sınırlanmaktadır (Yeniboğalı ve Ertün, 2005).

### 2.1.4. Beton Katkı Maddeleri

Genel olarak katkı malzemeleri, harç ve betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştiren malzemelerdir (Akyüz, 1991).

Uçucu kül, silis dumanı, lifler mineral katkı sınıfına girmekle beraber son ACI (American Concrete Institute) çalışmalarında mineral katkı tabiri kaldırılmış, yerine bağlayıcı maddeler deyimi getirilmiştir. (cementitious materials). Bunun nedeni olarak ise bu katkılarda dozajın %5'i aşması olarak gösterilmektedir. Bu nedenle ACI' ya göre katkı malzemesi sadece kimyasal katkıları kapsamaktadır (FIB/CEB, 1990).

Betonda kullanılan ve kullanımını gün geçtikçe artan katkı malzemelerinin önemi ve sağladığı yararları şu şekilde sıralayabiliriz.

- Sabit su/çimento oranında işlenebilirliğin artırılması
- Su miktarının azaltılması ile mukavemet artışının sağlanması
- Segregasyonun azaltılması
- Beton yüzeyinde terlemenin azaltılması ve kılcal çatlakların minimuma indirilmesi
- Dayanıklılığın artırılması
- Geçirimsiz beton elde edilmesi
- Donatı korozyonuna engel olunması
- Donma-çözünme olayında betonun dayanıklılığının artırılması
- Kür süresinin azaltılması
- Yoğun donatılı kesitlerde kolay beton dökümünün sağlanması
- İşçilikten tasarruf sağlanması

Her katkı malzemesi her betona uygulanmaz. Her betonun özelliklerini katkı maddeleri iyileştirmez. Katkı maddeleri kullanılmadan önce, katkı maddelerinin betonu oluşturan elemanlarla uyumuna ve ekonomikliğine bakılır.

Katkı maddeleri, iyi üretilmiş bir betonun özelliklerini daha geliştirici yönde kullanılan malzemelerdir. Tekniğine göre üretilmemiş niteliksiz betonların iyileştirilmesi gibi bir özelliği bulunmamaktadır (FIB/CEB, 1990).

#### **2.1.4.1. Mineral Katkı Maddeleri**

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcı özelliğine sahip olmayan, ancak ince öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve nemli ortamlarda kalsiyum hidroksitle  $\text{Ca(OH)}_2$  reaksiyona girerek, bağlayıcı özelliğe sahip bileşikler oluşturan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Aruntaş ve Tokyay, 1996).

TS EN 197-1 2002'de puzolan özellikleri şöyle tanımlanmaktadır; puzolanlar, silissi, ve alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Su ile karşılaştığında kendi kendine sertleşmezler fakat ince öğütüldüklerinde ve suyun bulunduğu ortamlarda normal çevre sıcaklığında çözülmüş  $\text{Ca(OH)}_2$  ile dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat hidrat bileşiklerini oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Esasen silisyum di oksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer oksitlerdir. Reaktif  $\text{SiO}_2$  miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır.



Bileşiminde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  içeren puzolanlar, portland çimentosuna benzemelerine rağmen genellikle kendi başlarına bağlayıcılık özelliği içermezler. Günümüzde portland çimentosu içerisinde veya beton karışımına katılarak kullanılan puzolanlar, betonun fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmektedirler. Çimentoya oranla daha ucuz olmaları, kullanımlarını cazip hale getirmekte, ayrıca beton özelliklerini olumlu yönde değiştirebilmektedirler. Beton içerisinde katkı olarak kullanılmaları, mineral katkı olarak adlandırılmalarına neden olmuştur (Ramachandran, 1984).

Puzolanlara puzolanik özellik kazandıran;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ün miktarı, amorf yapısı ve puzolanın inceliğidir (Bidin vd., 1984). Puzolanik aktivite, kimyasal, mekanik ve fiziksel deneyler ile araştırılır. Puzolanik aktiviteyi belirleyen ya da buna önemli ölçüde katkıda bulunan faktörler, maddenin kimyasal bileşimi ve özgül yüzeyidir (Neville, 1990). Puzolanların sınıflandırılması ve puzolan türleri Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

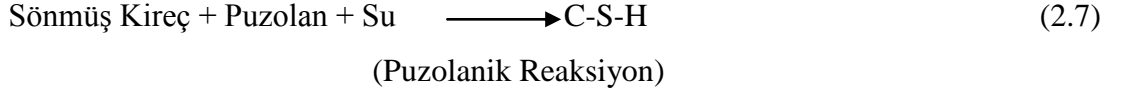
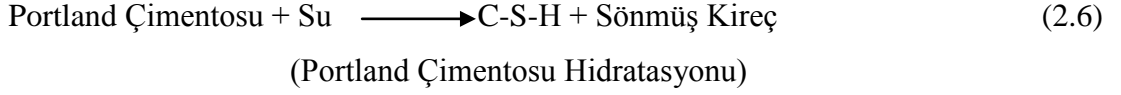
Tablo 2.4. Puzolanların sınıflandırılması ve puzolan türleri

Puzolanlar	
Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diatome Toprağı	Yüksek Fırın Cürufu
Ponza Taşı	Silis Dumanı
Volkanik Tüfler	Demirli Olmayan Cüruf
Traslar	Pirinç Kabuğu Külü
Opalin Silika	

### 2.1.4.1.1. Puzolanik Reaksiyon

$C_2S$  ve  $C_3S$  olarak adlandırılan  $2CaO.SiO_2$  ve  $3CaO.SiO_2$  silikatları, çimentonun esas iskeletini oluşturmaktadır. Bu silikatlar, su ile birleştiğinde C-S-H (kalsiyum silikat hidrate ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ )) ve sönmüş kireç ( $Ca(OH)_2$ ) oluşturmaktadırlar. Bu reaksiyon sonucu oluşan C-S-H, yani tobermorit jeli betona asıl bağlayıcılık özelliğini vermektedir. Çimento içerisinde kullanılan veya betona mineral katkı olarak eklenen puzolanlar ise bağlayıcı özelliğini veren C-S-H'ı üretmek için sönmüş  $Ca(OH)_2$ 'e ihtiyaç duyarlar.

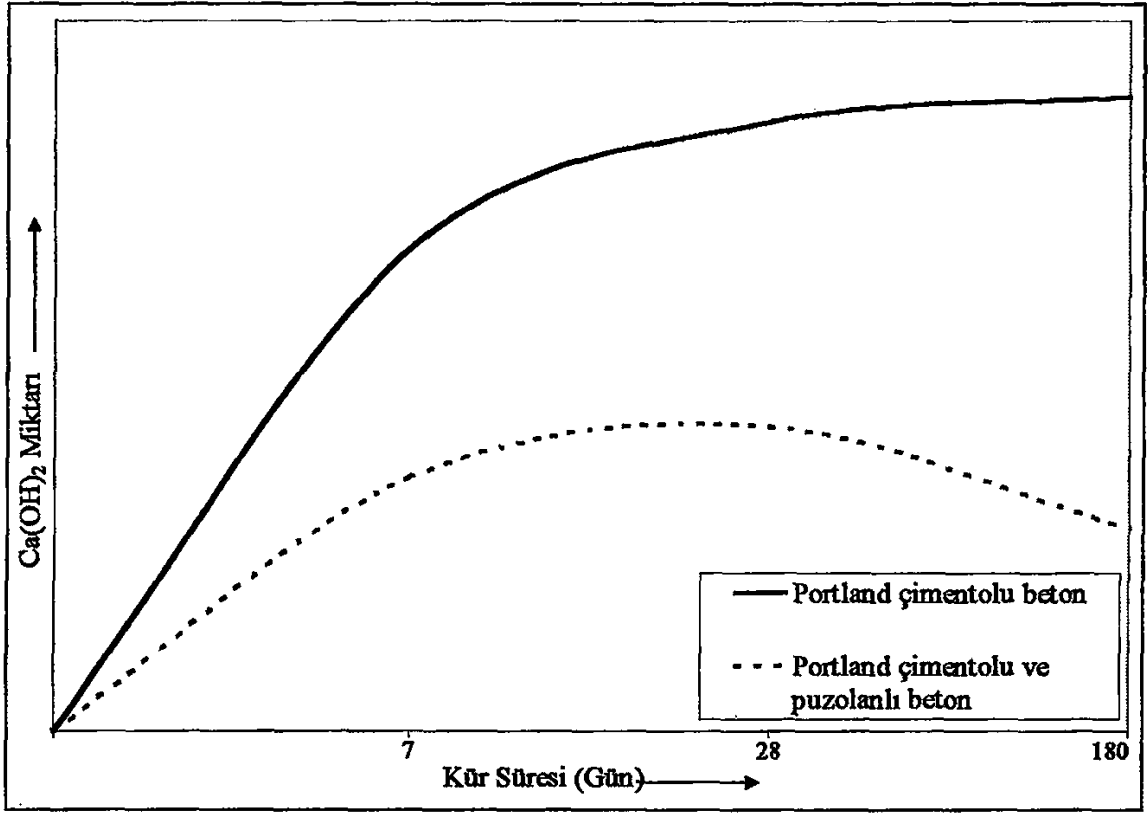
Portland çimentosu ve puzolanlar için bu denklemler şöyledir (Hodson, 1990).



Denklemlerden görüldüğü gibi portland çimentosu, bağlayıcılık özelliği veren C-S-H ile birlikte serbest kireç üretmekte, puzolanlar ise kireci kullanarak C-S-H üretmektedir. Bu nedenle, beton içerisindeki puzolanlar, portland çimentosunun hidratasyonu ile üretilen kireci kullanabilmektedir (Hodson, 1990).

Portland çimentosu içerisinde bulunan  $C_2S$  ve  $C_3S$ , hidratasyon sonucu çok miktarda  $Ca(OH)_2$  çıkarır. Bu kirecin varlığı ise beton için iyi anlam ifade etmez. Kireç su içinde çözünür, yeri boş kalır ve betonun mukavemeti boşluklu yapısından dolayı düşer. Su beton içerisine kolaylıkla girer ve hasara yol açar. Bu açıdan bakıldığında, puzolanların bu kireci kullanarak, betona bağlayıcılık özelliği veren C-S-H üretmesi, puzolanların beton karışımı içerisinde kullanımı açısından bir avantajdır. Ancak, puzolanik reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu, puzolanik reaksiyon etkisi nedeniyle mukavemet kazanımı da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artırılması, bazı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması ile bu reaksiyon hızlandırılabilir. Zamana bağlı olarak, puzolan ve portland çimento karışımı ile yalnız portland çimentosunun kullanıldığı beton karışımlarındaki serbest kireç miktarı değişimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Akman, 1987; Özturan, 1991).

Puzolan katkılı üretilen betonlarda daha çok bağlayıcı ürün oluşması, mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi, geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır. Ayrıca puzolanik reaksiyon sonucu oluşan C-S-H daki C/S oranı daha düşük olmaktadır. Puzolanların betonun zararlı kimyasallara dayanıklılığını arttırması ve alkali-agrega reaksiyonunda zarar görme riskini azaltması, bu faktöre bağlanmaktadır (Akman, 1987; Özturan, 1991).



Şekil 2.1. Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidratasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı

Puzolanik reaksiyonun yavaş olması ve hidratasyon ısını düşürmesi, kütle beton üretiminde puzolanların kullanımını cazip kılmaktadır. Maliyet olarak da çimentodan daha ucuz olan puzolanların inşaat teknolojisinde kullanımı yaygınlaşmaktadır.

### 2.1.4.1.2. Doğal Puzolanlar

Doğada bulunan ve ince taneli duruma getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve suyla birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren silisli ve alüminli malzemelere “doğal puzolanlar” denilmektedir (Erdoğan, 2003). Türkiye’de “tras” olarak adlandırılırlar. TS EN 197-1’ e göre doğal puzolanlarda reaktif silis miktarı en az %25 olmalıdır. Doğal puzolanlar, mineral katkı maddesi olarak doğrudan çimento ile karıştırılarak kullanıldıkları gibi uygun oranlarda portland çimentosu ile birlikte öğütülerek katkılı çimento üretiminde de kullanılabilirler (Karataş, 2002).

#### 2.1.4.1.2.1. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesi

Puzolanik aktivite, puzolanların özelliklerine, içerisinde bulunan aktif fazların kütle ve miktarına bağlıdır (Erdoğan vd., 1999).

- Diğer özellikleri aynı kalmak üzere puzolanların bağladığı  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif madde miktarının da fazlalığına işarettir.
- Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına, buna karşılık uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
- Bir puzolanın bağladığı  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarı, puzolanın aktif fazları içerisindeki  $\text{SiO}_2$  miktarı ile ilişkilidir.
- Belirli sınırlar dâhilinde kireç-puzolan karışımlarında kireç/puzolan oranının artması  $\text{Ca(OH)}_2$  bağlanmasını artırır.
- Zeolitik puzolanlar camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.
- Puzolan-kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır (Targan, 2001).

#### 2.1.4.1.3. Yapay Puzolanlar

Çeşitli fabrikalardan ve endüstriyel proseslerden yan ürün olarak ortaya çıkan ve şu an atık olarak kabul edilen, yine aynı şekilde yalnız başına kullanıldığı zaman bağlayıcı madde olmayan, fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ile yaptığı reaksiyon

sonucunda bağlayıcılık özelliği kazanan silis veya silis-alümin içeren maddelerdir (Duman, 2010).

#### **2.1.4.1.3.1. Uçucu Küller**

En önemli yapay puzolanlardan biri olan uçucu kül, enerji üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde toz halinde veya pulverize (öğütülmüş) taş kömürü ya da linyitin yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazlarıyla sürüklenen elektro filtre ve siklonlarla havaya çıkışı engellenerek biriken toz halindeki puzolanik niteliğe sahip silisli ve alümino silisli atık maddesidir. Uçucu kül termik santrallerin yan ürünü olup, kömürün içindeki inorganik maddelerin fırın ortamında erimesi ve bacadan atılması esnasında soğuyarak genellikle küresel tanecikler halinde oluşmaktadır (TS EN 450, 1998).

TS EN 450-2'ye göre uçucu küller pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  den meydana gelen, reaktif  $\text{SiO}_2$  muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur.

Uçucu küller, silisli ve amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik gösterirler. Su ortamında kalsiyum hidroksitle birleştiklerinde hidrolitik bağlayıcılık özellik gösterirler. Bu nedenle hem portland puzolan tipi üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar (Erdoğan, 2003).

##### **2.1.4.1.3.1.1. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri**

- Taze beton karışımının su ihtiyacını azaltır. Karışımda bulunan çimentonun %20-30'u yerine uçucu kül ilave edildiğinde, uçucu küllerin küresel şekilli olması ve daha az sürtünmeye yol açtıkları için su ihtiyacını azaltmaktadır. Fakat çimentodan 1 birim kesilip de, 2 birim kül ilave edilirse bu durum değişebilir ve su ihtiyacı artar, zaten pratikteki uygulama da ikinci şekilde yapılır ve su ihtiyacı artmış olur.
- Betonda terlemeyi, hidrasyon ısını ve geçirimliliği azaltarak, betonun durabilitesini artırır.
- Betonun ekonomik olmasını sağlar.
- İlk dayanımın düşük olmasına neden olur ve daha uzun süre kür işlemi gerektirir.

- Uçucu külün yoğunluğu az ve belli bir ağırlıktaki çimentoya karşılık gelen külün hacmi daha fazla olduğu için bağlayıcı madde daha fazla hacim kaplar ve betonun çok daha iyi işlenmesine neden olur (Erdoğan, 2003).

#### 2.1.4.1.3.1.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller TS EN 197-1 ve ASTM C 618 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır. TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller, silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) den oluşan, geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  den oluşan, geri kalanın demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir (TS EN 197-1, 2002).

ASTM C618'e göre uçucu küller, F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küllerde  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazladır ve CaO %10'un altındadır. C sınıfı uçucu küllerde ise  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %50'den fazladır ve CaO %10'un üzerindedir (Şengül vd., 2003). Tablo 2.5'de C ve F sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine örnek verilmiştir (Hodson, 1990).

Tablo 2.5. F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve pç'nun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	Portland Çimentosu (%)	F Sınıfı Uçucu Kül (%)	C Sınıfı Uçucu Kül (%)
$\text{SiO}_2$	19,8	43,4	32,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,1	18,5	21,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,5	26,9	5,1
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	28,4	88,8	59,5
CaO	63,7	4,3	27,4
$\text{SO}_3$	2,2	1,2	2,8
MgO	3,5	0,9	4,8
Toplam Alkaliler ( $\text{Na}_2\text{O}$ Eşdeğer)	0,9	0,6	1,1

“Tablo 2.5’in devamı”

Kızdırma Kaybı	1	3,2	1,2
Rutubet	-	0,2	0,8

#### 2.1.4.1.3.1.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

UK’ün fiziksel özellikleri, genel olarak termik santrallerde yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sistemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. UK, genellikle gri renktedir ve rengi içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. UK, %60-90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneciklerden meydana gelmektedir (Lea, 1956; Gani, 1997). UK’ün tane şekli yuvarlaktır ve çapları 1-200  $\mu\text{m}$  arasında değişir (Mehta, 1986; Erdoğan, 1993). Taneciklerin yaklaşık %75’inin çapı 45  $\mu\text{m}$ ’den, %50’den çoğu ise 20  $\mu\text{m}$ ’den daha küçüktür (Mehta, 1986; Erdoğan, 1993). UK’ün özgül ağırlığı 2,2-2,7  $\text{g/cm}^3$  dolayındadır (Erdoğan, 1993). UK’ün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup, öğütme yapmadan kullanılabilmesini göstermektedir (Tokyay, 1993).

#### 2.1.4.1.3.2. Silis Dumanı

Silis dumanı; silisyum metali veya ferro silisyum (fesi) alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kok kömürü ve odun parçacıkları ile redüksiyonu sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur. Yüksek sıcakta gaz haline geçen  $\text{SiO}$ , elektrik ark fırınının daha düşük sıcaklıktaki üst kısımlarında ya da sisteme ilave edilen kollektörlerde hızla okside olur ve amorf yapıda  $\text{SiO}_2$  olarak yoğunlaşır. Yüzey alanı 220.000-300.000  $\text{cm}^2/\text{g}$  olan silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturan silis dumanının çimentoda katkı olarak kullanılması 1969 yılında Norveç’de denenmiş ancak, betonda katkı olarak kullanılmaya başlanması beton akışkanlaştırıcıların kullanıma girmesiyle olmuştur (Yeniboğalı, 2003; Yüzer, 1998).

Normal portland çimentosundan yaklaşık 100 kat daha ince olan silis dumanı, bu sayede çimento taneleri arasında kalan boşlukları doldurur ve ince boşluklardaki suyun serbest suya dönüşmesini sağlar. Buna karşılık normal portland çimentosuyla kıyaslandığında çökme değerinde yaklaşık %70 oranında bir azalma durumu meydana

gelir. Bu olumsuzluğu bertaraf etmek için günümüzde süper ya da hiper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır (Yeniboğalı, 2003).

Silis dumanının süper akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanımı ile beton dayanımlarında yüksek değerlere ulaşılabileceği kanıtlanmıştır. Bu durum azalan boşluk oranı ve silis dumanının geçiş zonundaki aktivitesi ile açıklanabilir. Silis dumanı betonda kullanıldığında, çimentonun hidratasyonu esnasında ortaya çıkan serbest kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrateyi (C-S-H) oluşturur. Ayrıca, ince silis dumanı taneleri agrega-çimento hamuru ara yüzeyini sıkılayıp güçlendirerek yüksek dayanımlara ulaşabilen betonlar elde edilmesini sağlar (Mazloom vd., 2004; Yeniboğalı, 2003; Yüzer, 1998).

Silis dumanı, betonda geçirimsizliği azaltması ve zararlı kimyasalların girişini yavaşlatması sebebiyle durabilitenin ön plana çıktığı durumlarda tercih edilmektedir. Betonda geçirimsizlik, silis dumanı kullanıldığında da bileşenlerin özelliklerine, yerleştirme koşulları ve bakım gibi koşullarla ilişkilidir. Silis dumanı çimento hamurundaki gözenekleri doldurmak suretiyle geçirimsizliği azaltmaktadır (Yeniboğalı, 2003).

#### **2.1.4.1.3.3. Yüksek Fırın Cürufu**

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu (YFC) yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı ham demirin üstünde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC'yi meydana getirirler (Tokyay ve Erdoğan, 2003).

Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi esas olarak  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Ancak cürufun kimyasal bileşimi kadar kristal yapısı da önemlidir.

Yüksek fırın cürufunun kalsiyum içeriklerine ilave olarak, tane boyutu ve karakteristikleri ile camsı madde bileşimi ve oranı, aktivitelerinde etkin olan temel faktörlerdir (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003).

Yüksek fırın cürufunun fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{SiO}_2$  miktarları toplamı yine en az 2/3 oranında ve  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$  oranının ise 1'den fazla olması istenmektedir.

YFC'nin çimento ve beton sektöründe çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. YFC inşaat endüstrisinde genel olarak çimento ile ikame etmek suretiyle değerlendirilmektedir. Literatürde YFC ikameli betonların, kullanılan YFC'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak erken yaş dayanımlarının düşük (7 ile 28 gün arası) ileri



yaş dayanımlarının yüksek olduğu (28 günden sonra), betonda işlenebilirliği artırdığı, priz süresini uzattığı, terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirimsizliğini azalttığı yüksek alkali-silika direnci sağladığı ve donatı korozyonuna karşı direnci artırdığı bildirilmektedir (Yazıcıoğlu vd., 2005).

#### 2.1.4.2. Kimyasal Katkı Maddeleri

ASTM C 125 katkı maddesini, betonun geleneksel bileşenleri olan su, çimento ve agrega dışında hemen karıştırma öncesi veya karıştırma sırasında beton harmanına ilave edilen maddeler olarak tanımlamaktadır. Bu maddeler organik ya da inorganik esaslı olup, beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının % 5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir. Genellikle sıvı halde olan bu maddeler literatürde “kimyasal katkı maddeleri” olarak bilinirler.

TS EN 934-2’de ise beton kimyasal katkısını, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento kütlesinin % 5’ini geçmemek üzere eklenen madde olarak tanımlanmaktadır.

Kimyasal katkı maddelerinin betonda kullanımı genellikle taze ve sertleşmiş haldeki betonun bir ya da birden fazla özelliğini iyileştirmek amacıyla yöneliktir.

Kimyasal katkı maddelerinin kullanımıyla taze beton özelliklerinde sağlanan iyileştirmeler;

- Su miktarını arttırmaksızın işlenebilirliğini arttırmak,
- Belli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını azaltmak,
- Priz süresini uzatmak ya da kısaltmak,
- Su kusmayı önlemek,
- Ayrışmayı (segregasyon) azaltmak,
- Pompalanabilirliği iyileştirmek,
- Kıvam kaybı hızını azaltmak, olarak sıralanabilir.

Kimyasal katkı maddelerinin kullanılması suretiyle sertleşmiş betonda sağlanan iyileştirmeleri sıralayacak olursak;

- Hidrasyon ısısını erken yaşlarda azaltmak ya da hidrasyonu geciktirmek,
- Dayanım gelişimini erken yaşlarda hızlandırmak,
- Dayanımı arttırmak,

- Zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı (durabiliteyi) arttırmak,
- Geçirimsizliği azaltmak,
- Alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmek,
- Donatı-beton aderansını güçlendirmek,
- Betonun dayanımı yanında, pek çok mekanik özelliklerini iyileştirmek,
- Donatı korozyonunu bastırmak veya engellemek,
- Ekonomi temin etmek şeklinde sıralanabilir (Erdoğan, 1997).

Literatürde bileşimleri ve dolayısıyla işlevleri birbirinden farklı çok sayıda kimyasal beton katkısı vardır (Akman, 1996).

- Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkıları,
- Yüksek oranda su azaltıcı/ süper akışkanlaştırıcı katkıları,
- Su tutucu (terlemeyi önleyen) katkıları,
- Hava sürükleyici katkıları,
- Priz hızlandırıcı katkıları,
- Sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları,
- Priz geciktirici katkıları,
- Su geçirimsizlik katkıları,
- Çok işlevli katkıları olarak sınıflandırılmıştır.

### **2.1.5. Filler Malzeme**

Toz malzemenin tanımı standart eleklerin boyutlarındaki farklılıklara bağlı olarak ülkeden ülkeye değişmektedir. Filler malzeme için Avrupa'da genel olarak kullanılan maksimum tane boyutları 0,075 mm ve 0,125 mm dir. Japonya'da en büyük boyut 0,090 mm dir (Gürses, 2008).

#### **2.1.5.1. Taş Tozu**

Kırma taş tozu kayaktan öğütülerek elde edilebilir. Ayrıca, taş ocaklarında üretimin %1'lik kısmını oluşturan atık bir malzemedir. Filtrasyonla tutulması halinde istenen gradasyonda stoklanması mümkündür. Geleneksel betonda taş tozu kullanımı, agrega

yüzeylerine yapışarak aderansı azaltıcı etki oluşturması nedeniyle standartlarca sınırlandırılmıştır (Felekoğlu, 2003).

Doğal agregaya kaynaklarının sınırlı olması ya da uygun olmaması, çevrenin korunması ve yüksek dayanımlı betona olan talep betonda kırma taş kullanımını gerekli kılmaktadır. Kırma taşda 75 µm elekten geçen taş tozunun bulunması kaçınılmazdır (Ramyar vd., 1995). Uygulamada, agregası içerisinde 200 numaralı elekten geçen malzeme miktarının verilen limitlerin üzerinde bulunması durumunda agregası yıkandıktan sonra kullanılmaktadır. Bu uygulamanın nedeni ise 200 numaralı elekten geçen malzemenin kil olduğu düşüncesidir. Bilindiği gibi kil, çimento hamuru ile agregası arasındaki aderansı zayıflatır, çimentonun hidrasyonunu geciktirir ve betonun hacimsel kararlılığını bozar (Uğurlu, 1993). TS EN 706'da 0,25 mm açıklı kare gözlü elekten geçen ve ince malzeme olarak tanımlanan taş tozunun kil gibi davranmamasına karşın beton karma suyunu ve dolayısıyla su/çimento oranını arttıracığı düşüncesiyle zararlı kabul edilmekte ve agregası içerisinde bulunması istenmemektedir. Taş tozunun kil olarak düşünülmemeyeceği bir gerçek olmasına rağmen belli bir miktardan sonra kullanılan taş tozu beton kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Bununla beraber betonda taş tozunun az miktarda bulunmasının betonun işlenebilirliği ve geçirimsizliği üzerinde faydalı etkisi olduğu bilinmektedir (Postacıoğlu, 1987).

Özellikle kırma taş agregası ile üretilen düşük dozajlı betonların işlenebilirliği ve kohezyonu zayıftır. Bu betonlar, düşük kompoziteli olmaları ve suyu tutacak yeterli ince malzemeye sahip olmamaları nedeniyle yerleştirildikten sonra karışım suyunu kusarlar, bunun sonunda betonda rötre çatlakları meydana gelmektedir. Bu şekilde elde edilen betonların porozitesi yüksek ve basınç dayanımları düşük olmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için çimento dozajı artırılabilir ya da katkı maddesi kullanılabilir. Ancak bu işlem ek bir maliyeti de beraberinde getirecektir (Uğurlu, 1993). ASTM C 33'e göre taş tozunun ince agregası içerisinde %7 oranında bulunmasına izin verilmektedir. TS 706 EN 12620/AC'de ise ince agregası genel olarak 63 µm açıklı elekten geçen kil, silt ve taş unu gibi yıkanabilir maddeler olarak sınıflandırılmakta ve bunların ince agregası içerisinde maksimum %4 oranında bulunmasına müsaade edilmektedir.

### 2.1.5.2. Mermer Tozu

Mermerler, kalker ( $\text{CaCO}_3$ ) ve dolomitik kalkerin ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ ) sıcaklık ve basınç altında metamorfizmaya uğrayarak tekrar kristalleşmesi sonucunda yeni bir yapı kazanmalarıyla meydana gelen taşlardır. Bu genel metamorfizma oldukça derinlerde şiddetli basınç ve sıcaklığın etkisiyle olmaktadır.  $\text{CaCO}_3$  kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral kalsittir. Aynı zamanda az miktarda silis, silika, feldspat, demir oksit, mika, florin ve organik maddeler bulunabilir. Renkleri genellikle beyaz ve grimsidir. Fakat yabancı maddeler nedeniyle sarı, pembe, kırmızı, mavimsi, esmerimsi ve siyah gibi renklerde de olabilirler. Mikroskop altında incelendiğinde, birbirine iyice kenetlenmiş “Kalsit Kristalleri”nden oluştuğu görülür (Gürü vd., 2005).

Dünya nüfusunun devamlı artışına paralel olarak artan tüketim anlayışı, sınırlı olan ham madde kaynaklarının daha ekonomik olarak kullanılabilirliği dünyamız açısından önem kazanmıştır. Mermerlerin gerek çıkarılışı gerekse işlenişi sırasında önemli miktarda kayıp olmaktadır. Çoğu mermer işletmelerinin bu konuda yeterli bilgiye sahip olmaması gelişen teknolojiyi izleyememesi ve ocaklarda patlayıcı madde ve kompresör gibi ilkel metotların kullanılması bu kaybın artmasına yol açan başlıca nedenlerdir. (Bilgin ve Çakır, 1998).

Türkiye’de mermer işletmeciliğinde elde edilen  $1 \text{ m}^3$  bloğun işlenmesi sırasında makinelerin toz haline getirdiği miktar yaklaşık  $0,481 \text{ m}^3$  tür. Bu durumda ürün miktarının toplam %48’i toz halinde üretim atığı olarak ortaya çıkmaktadır. 2005 yılı Türkiye mermer üretimi yaklaşık  $2.000.000 \text{ m}^3$ ’dür. Türk standartlarında belirtilen mermer birim hacim ağırlığı ortalama  $2,7 \text{ t/m}^3$  olduğuna göre, Türkiye’de 2005 yılında üretilen mermer miktarı  $2.000.000 (\text{m}^3/\text{yıl}) \times (2,7\text{t/m}^3) = 5.400.000 (\text{t/yıl})$ ’dır. Türkiye genelinde 2005 yılında ortaya çıkan atık mermer miktarı  $= 5.400.000 (\text{t/yıl}) \times 0,48 = 2.592.000 (\text{t/yıl})$ ’dır (Önenç, 1998; Kırgız, 2007; Özdamar vd., 2005).

Mermer atıkları parça boyutu olarak işleme tesisinden iki farklı ürün olarak çıkabilmektedir. Birinci ürün iri boyutlu parça mermer atıkları, ikinci ürün ise koloidal yapıda büyük miktarı 150 mikronun altında olan maksimum parça boyutu  $2 \text{ mm}$ ’ye ulaşabilen kesim toz atığı olmaktadır. Bu toz mermer atıkların betonda ince malzeme olarak da kullanıldığı bilinmektedir (Ersoy, 2005).

### 2.1.5.3. Tuğla Tozu

Tuğla tozu, tuğla fabrikalarında pişmiş olan tuğlaların nakliyesi, taşınması sırasında veya inşaatlarda kırılması sonucu kullanılamaz hale gelen atık tuğlaların öğütülmeleri sonrasında elde edilen silis esaslı bir malzemedir (Şahmaran vd., 2006).

Pişirilerek üretilen yapı malzemeleri sektöründe, üretim sırasında atık olarak ortaya çıkan tuğla tozunun yapısı, hammadde olarak ocaklardan çıkarılarak fabrikada kullanıma hazır hale getirilen kildir. Kil minerallerinin temel özelliği kimyasal bileşimlerinde alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) bulunmasıdır. Pişmiş kil veya şeyl atıkları en çok tuğla fabrikalarında ortaya çıkmaktadır. Türkiye'nin yıllık tuğla üretim kapasitesi 6 milyar adettir. Ağırlık olarak kapasite  $19 \times 10^6$  ton dur. Ocaktan pişmiş tuğlaya kadar olan süreçte tuğla tozu olarak ortaya çıkan kaybın %20-25 olduğu tahmin edilmektedir. 2005 yılı Türkiye tuğla üretim kapasitesi yaklaşık  $15,2 \times 10^6$  ton dur. Tuğla üretiminde toplam atık miktarı %20-25 arasında olduğunda, Türkiye genelinde ki yaklaşık tuğla atık miktarı  $15,2 \times 10^6$  (t/yıl)  $\times 0,25 = 3,8 \times 10^6$  (t/yıl) dir (Önenç, 1998; Kırgız, 2007; Özdamar vd., 2005).

## 2.2. Betonun Genel Özellikleri

Beton, gevrek bir malzeme olup mukavemet değerleri arasında en yükseği basınç, en düşüğü ise çekme dayanımıdır. Betonların, mukavemet gibi birçok özelliği; karışım içindeki malzeme oranı, sıkıştırma şekli ve uygun bir şekilde kür yaptırılıp yaptırılmaması gibi daha birçok etkene bağlıdır (Postacıoğlu, 1987).

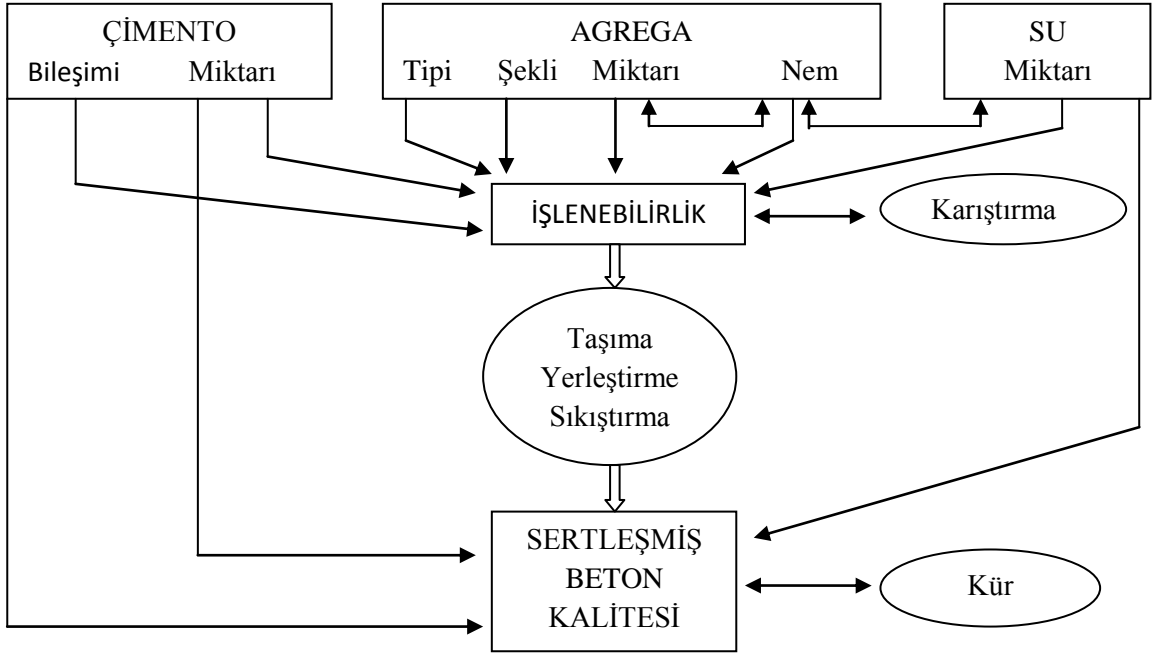
Çimento ve su karıştırıldığı andan itibaren kimyasal bir reaksiyon olan hidrasyona başlar. Başlangıçta plastik yapıdaki beton zamanla sertleşir ve istenilen boyut ve şekilde adeta yapay bir taşa dönüşür (Öztürk, 1996).

Taze (plastik haldeki) beton; kolayca karıştırılabilme, kendi içinde üniform olma, döküm esnasında segregasyon (tane boyutlarına göre ayrışma) yapmama, yüzeyde mastarlanmaya engel teşkil etmeme, kısaca işlenebilme özelliğine sahip olmalıdır (Kantar, 1998; Özcan, 1999).

İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir (Akman, 1987; Özkul vd., 1999). Bağlayıcı malzeme olan çimento hamuru betonun aktif bileşenidir. Çimento su ile reaksiyona girdiğinde bağlayıcılık özelliği olan ürünler oluşur ve bu ürünler agregalar

arasındaki boşlukları doldurarak iri taneli malzemeleri birbirine bağlar. Beton yapımında kullanılan agregaların ise üç önemli fonksiyonu vardır. Bunlar; agregaların çimento-su bağlayıcı malzemesi içerisinde, nispeten daha ucuz dolgu malzemeleri olmaları sayesinde önemli ölçüde ekonomi sağlamaları, uygulanan yüklere ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturmaları ve çimento hamurunun nem değişiklikleri sonucu göstereceği hacim değişikliklerini azaltmaları olarak özetlenebilir (Neville, 1994; Erdoğan, 2003). Betonlardan, en genel anlamda beklenen üç ana nitelik; işlenebilme, dayanım ve dayanıklılıktır (durabilite) (Akman, 1987; Özkul vd., 1999). Bu özelliklerden dayanım ve dayanıklılık sertleşmiş beton için işlenebilme ise taze beton için geçerlidir.

Beton özelliklerini etkileyen faktörler Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Beton özelliklerini etkileyen faktörler (Tattersal, 1991).

### 2.3. Betonun İç Yapısı

Malzemelerin davranışları genel olarak iç yapılarına bağlıdır. Günümüzde tam olarak anlaşılmayan birçok mekanizmaların çözümü malzemelerin içyapılarının daha iyi anlaşılmasıyla bulunabilir. Yüksek derecede heterojen bir yapıya sahip olan betonun içyapısının, çimento hamuru, agrega ve bunların ara yüzeylerinden oluştuğu söylenebilir.

Makro düzeyde değerlendirildiğinde çimento hamuru içerisine dağılmış agregalardan oluşan beton, mikro düzeye inildiğinde anlaşılması oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Beton içerisindeki diğer bileşenlere göre daha zayıf bir yapıda olan, kapladığı hacimsel orana nazaran betonun mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini birinci dereceden etkilediği düşünülen agrega-çimento hamuru ara yüzeyi uzun yıllardır üzerine çalışılan içyapı konularından biridir.

### 2.3.1. Sertleşmiş Çimento Hamuru İç Yapısı

Sertleşmiş çimento hamuru, kristal ve amorf haldeki katı kısımları olan boşluklu bir yapıya sahiptir. Katı kısmın ana unsuru yaklaşık hacimce yarısını kapsayan, amorf haldeki kalsiyum silikat hidratlerdir. Bu nedenle içyapısı düzensiz ve tam olarak tanımlanamayan parçalardan oluşur. İçeriğindeki Ca/Si oranı 1,5 ile 2 arasında, su miktarı daha büyük oranda değişir. Özellikleri yaşına, sıcaklığa, su/çimento oranına ve içerisindeki diğer oksitlerin miktarına bağlıdır. İçerdiği kristal yapıların düzensiz yapısı nedeniyle tam olarak çözülmemiştir. Buna rağmen malzemelerin özelliklerini tanıyabilmek amacıyla birkaç model önerilmiştir. Powers-Brauner modeline göre (Powers, 1958; Brauner, 1962). Kalsiyum silikat hidrate bileşikleri çok yüksek yüzey alana sahip tabakalı bir yapıdadır.

Feldman-Serade modeline göre ise (Feldman ve Serade, 1970). C-S-H'ler düzensiz, kıvrımlı ve aralarında rastgele boşluklar içeren tabakalı bir yapıdan oluşmaktadır.

Hacimsel olarak ikinci sırada, sertleşmiş çimento hamurunun yaklaşık dörtte birini meydana getiren  $\text{Ca(OH)}_2$  kristalleri bulunur. Bağlayıcının içeriği, sıcaklık ve boşluk durumuna göre değişmekle birlikte genellikle hegzogonal düzlemler halindedir. Geriye kalan katılar ise prizma şeklinde olan iğnemsiz kristal yapıdaki etrenjit, yine hegzogonal düzlem şeklinde olan hidrate mono sülfü alüminatlar ve kalsiyum alümine hidratlerle anhidr çimento tanelerinden meydana gelmektedir.

İlk yaşlarda sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki boşlukların neredeyse tamamı su ile kaplıdır. Bunlar, kılcal boşluklarda, C-S-H tabakaları arasında ve hidrate ürünlerin içinde yapısal olarak bulunurlar. Birincisi sürekli olarak azalır ve su ile temas durumu söz konusu olmazsa tamamen kaybolur. Bu suyun kaybı, genel olarak hacimde herhangi bir değişikliğe neden olmaz. Tabakalar arasındaki su, ancak ortam bağıl neminin %11'in altına düşmesi halinde kaybolur (Powers, 1960). Ve bu durumda önemli ölçüde büzülme

görülür. Hidrate ürünlerin içindeki kimyasal olarak bağlanmış su hiçbir durumda kaybolmaz.

#### 2.4. Taze Beton Özellikleri

Çimentonun, suyun, agreganın (ve gerektiğinde, katkı maddelerinin) birlikte karılması sonucunda elde edilen beton karışımı, şekil verilebilir yumuşak bir karışımdır. Ancak çimento ve suyun birleştiği anda başlayan hidrasyon devam ettikçe, çimento hamuru (ve beton) giderek daha katı bir durum almakta ve bir süre sonra şekil verilemez olmaktadır (Erdoğan, 2002).

Taze beton, henüz tamamen katılaşmamış, şekil verilebilir durumdaki betondur. Betonun taşınıp kalıplardaki yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyin düzeltilmesi gibi işlemler beton şekil verilebilir durumdayken yapılabilmektedir.

Sertleşmiş durumdaki betondan istenilen büyüklükteki dayanımın, dayanıklılığın ve hacim sabitliliğinin elde edilebilmesi için, taze betonun aşağıda sıralanan özellikleri göstermesi gerekmektedir:

- Beton üretimi için bir araya getirilen malzemeler, betonun içerisinde üniform bir dağılım gösterecek tarzda, “kolayca karılabilir” olmalıdır.
- Taze beton üniformitesi bozulmadan “kolayca taşınabilir” olmalıdır.
- Kalıplardaki yerine yerleştirilecek taze beton, üniformluğu bozulmadan, kalıp içerisindeki her noktaya ulaşabilecek tarzda, “kolayca yerleştirilebilir” olmalıdır.
- Yerine yerleştirilen taze beton üniformluğu bozulmadan, “kolayca sıkıştırılabilir” olmalıdır.
- Yerine yerleştirilip sıkıştırılan taze beton içerisinde bulunan su, hidrasyonun devam edebilmesi için, mümkün olabildiği kadar beton içerisinde kalmalı, yüzeye çıkarak kaybolmamalıdır. (Suyun beton yüzeyine çıkma eğilimi, terleme olarak adlandırılır) Taze beton “mümkün olabildiği kadar az terleme” göstermelidir.
- Kalıba yerleştirilen ve sıkıştırma işlemi yapılan taze betonun “yüzeyi kolayca düzeltilebilir” olmalıdır.
- Taze betonun priz süresi betonun kullanılacağı ortama uygun uzunlukta olmalıdır (Erdoğan, 2002). Malzemenin karılmasıyla şekil verilebilir bir durum kazanan taze



betonun karıldığı andan katılaşmaya başladığı ana kadar geçen süre priz süresi olarak adlandırılır.

#### 2.4.1. İşlenebilirlik

Taze betonun kolayca karılabilmesi, segregasyon yapmadan taşınabilmesi, yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi, betonun ne ölçüde işlenebilir olduğunu göstermektedir. O nedenle, bu özelliklerin tümü, “işlenebilme” adı altında tek bir özellik olarak ifade edilmektedir.

İşlenebilme taze betonun katılaşma göstermeden önceki durumuyla ilgili bir özellik olduğundan, betonun karılma işleminden itibaren ne kadar süre içerisinde katılaşma göstereceği (yani, priz süresi), betonun kullanılacağı yapı tipi için oldukça önemli olmaktadır. Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların yer alma hızı (hidratasyon hızı), priz süresinin kısalığını veya uzunluğunu etkileyen önemli bir faktördür (Erdoğan, 2002).

İşlenebilme taze betonun en önemli özelliğidir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan taze beton, sertleştiğinde yeterli dayanım ve dayanıklılığı gösteremez.

İşlenebilme özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir:

- Taze beton kütesinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı),
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık),
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış oldukları böylece, segregasyona karşı göstereceği direnç (kohezyon),
- Yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık.

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklık, taze betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği ve yüzeyinin düzeltilebilirliği gibi kavramların tümü, betonun işlenebilme özelliği içinde yer alan kavramlardır. Betonun bu özelliklerini tek bir isim altında ve tek bir özellik olarak hassas bir şekilde ifade edilebilmesi mümkün değildir. Başka bir deyişle, işlenebilme özelliği rölatif bir özelliktir.

Taze betonda bulunması istenilen yeterli ölçüdeki işlenebilme, betonun kullanılacağı yapının tipi ile betonu taşımada ve yerleştirmede uygulanacak yöntem ile ve beton kütle boyutları ile doğrudan ilgili olan bir husustur. Örneğin içerisinde su miktarı az olan taze bir

beton, kütle betonu olarak büyük bir hacim içerisinde kullanıldığı takdirde yeterli işlenebilirliği gösterebilmektedir; fakat aynı beton dar bir kalıp içerisinde kullanıldığı takdirde yeterince işlenebilir olmayabilmektedir. Vibratör kullanılarak sıkıştırıldığında yeterli işlenebilmeye sahip bir beton, elle sıkıştırma uygulanan bir yapıda yeterli işlenebilirliği gösteremeyebilmektedir.

Hava alanı veya beton yol kaplamaları için yeterli işlenebilmeye sahip bir beton, sık donatılı ve dar bir yapı kalıbı içinde kullanıldığında yeterli işlenebilmeyi gösterememektedir (Erdoğan, 2002).

#### **2.4.1.1. İşlenebilirliğin Ölçülmesi**

Taze betonun ne ölçüde işlenebilir olduğunu anlatabilmek için kullanılan “yüksek, orta, düşük işlenebilirlikli” ya da “ıslak, plastik veya kuru kıvamlı” gibi terimler insanlar için çok fazla belirleyici anlam taşımaz. Bu nedenle betonun işlenebilme özelliğinin bir takım yöntemlerle deneysel olarak belirlenebilmesi ve sayısal olarak belirtilmesi gerekir. Ancak işlenebilme tanımında yer alan kolayca karılabilme, taşınabilme, ayrışmadan yerleştirilebilme, sıkıştırılabilme ve yüzeyin düzeltilmesi gibi taze betonda aranılan özelliklerin tümünü deneysel olarak belirleyebilecek bir yöntem henüz mevcut değildir. Betonun işlenebilme özelliğini belirlemek amacıyla deneye dayalı birkaç yöntem belirlenmiştir.

Taze betonun kıvamının ve işlenebilirliğinin araştırılabilmesi için kullanılan deney yöntemleri arasında gerek çeşitli ülke standartlarında yer alan ve gerekse beton teknolojisi ile ilgili olan kimseler tarafından en çok kullanılan deney yöntemleri şunlardır:

- 1.Çökme Deneyi
- 2.Ve-Be Süresi Deneyi
- 3.Sıkıştırma Faktörü Deneyi ve
- 4.Akıcılık Deneyi (Sarsma Tablası Deneyi)

#### **2.4.1.2. İşlenebilirliğe Etki Eden Faktörler**

Taze betonun işlenebilirliğine etki eden faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- Çimento miktarı ve özellikleri
- Karma suyu miktarı

- Agrega granülometrisi, en büyük agrega tane boyutu ve tane şekli
- İnce agrega miktarı ve tane dağılımı oranı
- Beton üretiminde kullanılan kimyasal ve mineral katkıları
- Hava sürüklenmiş betonda sürüklenmiş hava miktarı
- Hava koşulları ve beton karışımının sıcaklığı
- Betonun karıldığı andan kıvamın ölçüleceği ana kadar geçen süre (Arslantürk, 2007).

#### 2.4.2. Kıvam

Taze beton karışımının ıslaklık derecesi anlamına gelmektedir. Kıvam teriminin taze betondaki su miktarı olarak tanımlanması yanlıştır. Kıvam, betonun ne ölçüde ıslak veya kuru olduğunu tanımlamaktadır.

Kıvamı çok yüksek olan bir taze beton, düşük kıvamdaki bir betona göre daha rahat karılabilmekte, daha rahat pompalanabilmekte ve çoğu kez daha rahat yerleştirilebilmektedir. Ancak, beton kıvamının çok yüksek olması, betonun işlenebilirliğinin mutlaka yeterli olduğu anlamına gelmemektedir. Zira aşırı derecede sulu bir beton karışımının kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinde betondaki çimento harcı ile iri agregalar kolayca segregasyon gösterebilmektedir; yani, bu tür betonlar yeterli işlenebilmeye sahip olmamaktadır.

Betonun kıvamı, sadece taze beton kütleindeki kayma kuvvetleri tarafından etkilenmektedir. Taze beton kütleinin akıcılığı ve kohezyonu, kıvam kavramı içerisinde yer almaktadır (Erdoğan, 2002).

TS EN 206-1 standardına göre çökme deneyi sonucu taze beton için tanımlanan kıvam sınıfları Tablo 2.6'de verilmiştir (İskenderoğlu, 2007).

Tablo 2.6. TS EN 206-1 standardına göre kıvam sınıfları

Kıvam Sınıfı	Çökme Değeri
S1	$10 \leq \text{çökme} < 40$
S2	$50 \leq \text{çökme} < 90$
S3	$100 \leq \text{çökme} < 150$

“Tablo 2.6’nin devamı”

S4	$160 \leq \text{çökme} < 210$
S5	$220 \leq \text{çökme}$

## 2.5. Sertleşmiş Beton Özellikleri

### 2.5.1. Dayanım

Betonun dayanımı terimi, basınç, çekme ve kesme (kayma) gerilmesi oluşturan tüm dış etkilere karşı beton dayanımlarını kapsamaktadır. Bu dayanımlar değer olarak büyükten küçüğe doğru basınç, kesme ve çekme dayanımı şeklinde sıralanabilir. Betonun kesme dayanımı basınç dayanımının %35-%80’i, çekme dayanımı ise basınç dayanımının %10’u civarındadır (Ersoy, 1985).

Mühendislik uygulamalarında, tüm yapıların esas fonksiyonu üzerlerine uygulanan yüklere ve kuvvetlere karşı dayanım göstermeleridir (Troxell vd., 1968).

Bir çok pratik durum için, betonun durabilite ve geçirimsizlik gibi özellikleri her ne kadar önemli olsa da, beton dayanımı betonun diğer özellikleri açısından da önemli bir gösterge olduğundan, beton malzemesinin değerlendirilmesinde, genellikle basınç dayanımı öne çıkmaktadır (Neville, 1981; Troxell vd., 1968).

Ayrıca, beton basınç dayanımının belirlenmesi, betonun çekme ve eğilme dayanımları hakkında bir fikir vermekte ve beton basınç dayanımlarının bilinmesiyle, betonun su geçirimsizliği ve zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı gibi diğer özellikleri konusunda da nitel (kalitatif) bir bilgi elde edilebilmektedir (Erdoğan, 2003).

Böylece, dayanım testlerinin nispeten daha kolay uygulanabiliyor olması nedeniyle beton dayanımı; beton kalitesi denetiminde, beton karışımında kullanılan malzemelerin karışım oranlarının ve üretim ekipmanının belirlenmesinde ve betona uygulanan kür koşulları etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir kıstastır (Troxell vd., 1968).

### 2.5.1.1. Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (eksenel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme)” olarak tanımlanmaktadır.

Betonun tüm mekanik özellikleri arasında en önemli olanı ve değeri en büyük olanı basınç dayanımıdır. Ancak, betonun çekme dayanımı oldukça zayıftır. Malzemenin bu özelliği göz önüne alınarak betonarme yapı sistemi doğmuştur. Betonarme yapılar kesit içindeki basınç gerilmelerini betonun, çekme gerilmelerini çelik malzemesinin alarak, iki malzemenin ortaklaşa çalışma ilkelerine göre düzenlenir. Çekme dayanımının çok düşük olması nedeniyle pratikte beton yalnızca basınca çalışır.

Basınç dayanımı, betonun tüm olumlu nitelikleriyle paralellik gösterir. Örneğin yüksek basınç dayanımına sahip olan bir betonun; kompasitesi fazladır, serttir, geçirimsizdir, dış etkilere dayanır ve aşınması azdır. Bu nedenle basınç dayanımını saptamak suretiyle betonun kalitesini global olarak değerlendirmek mümkündür. Ayrıca, beton kalitesi basınç dayanımı ile tanımlanır (Baradan, 1998).

Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı zamanla artan bir fonksiyondur ve dayanım artımı yıllarca sürebilir. İlk yedi günde çok hızlı olan dayanım kazanımı, yavaşlayarak devam eder. Bu nedenle standart dayanımın belirli bir beton yaşı ile ifade edilmesi zorunlu olmuştur. Betonarme elemanlarda 28 günlük dayanım esas alınarak, emniyet gerilmeleri saptanmaktadır. Bugün tüm uluslararası ve ulusal yönetmeliklerde 28 günlük dayanım, standart dayanım kabul edilmiştir.

TS EN 206-1'e göre beton sınıfları ve dayanımları Tablo 2.7'de gösterilmektedir.

Tablo 2.7. Beton sınıfları ve dayanımları TS EN 206-1

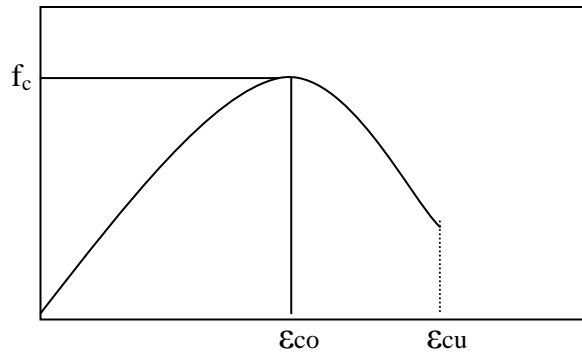
Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck,sil},(N/mm^2)$	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{ck,küp},(N/mm^2)$
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30

“Tablo 2.7’nin devamı”

C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Betonun davranışını anlayabilme ve gerçekçi bir şekilde modelleyebile açısından, malzemenin gerilme-birim deformasyon özellikleri büyük önem taşır. Betonarme sistemlerde betonun çekme dayanımı hesaplarda dikkate alınmadığından, beton için önemli olan basınç altındaki gerilme-birim deformasyon ilişkisidir.

Betonun basınç altındaki davranışını belirleyen bu eğriler, standart beton numunelerin aksel basınç altında denenmesinden elde edilir. Şekil 2.3’de gösterilen gerilme-birim deformasyon eğrisi, betonun davranışı hakkında bir fikir vermektedir (Ersoy, 1985).



Şekil 2.3. Betonun basınç altındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi

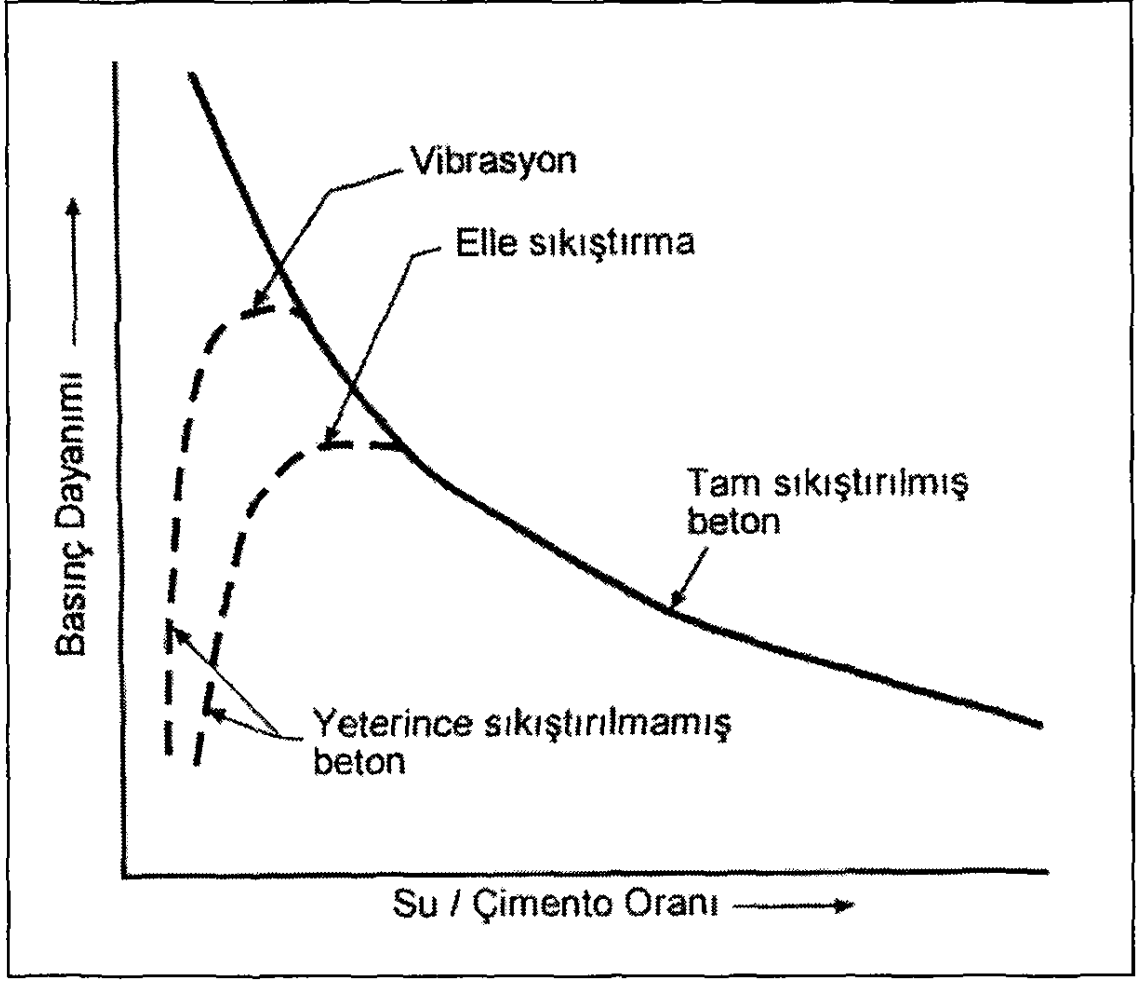
### **2.5.1.1.1. Basınç Dayanımına Etkiyen Faktörler**

#### **2.5.1.1.1.1. Karışım Oranlarının Etkisi**

Beton; agrega, çimento ve su ile yapılan kompozit bir malzeme olduğundan, beton içerisinde yer alan her bir malzemenin özelliği ile beraber bu malzemelerin karışım oranları da taze ve sertleşmiş beton özellikleri açısından çok önemlidir. Betonda kullanılan su/çimento oranı, dolayısıyla çimento hamurundaki jel/boşluk oranı ve agrega/çimento oranı beton dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir.

##### **2.5.1.1.1.1.1. Su/Çimento Oranının Etkisi**

Mühendislik uygulamalarında, uygun sıcaklıklarda ve suda kür edilmiş olan betonun her hangi bir yaştaki dayanımını etkileyen iki ana faktörden, su/çimento oranı ve beton dökümünden sonra sıkıştırılma derecesi olduğu kabul görmektedir.



Şekil 2.4. Betonun dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki (Neville ve Erdoğan, 2003).

Dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişkiyi gösteren eğrinin genel formu Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

Betonun çok iyi sıkıştırıldığı durumda dayanımı karışımdaki su/çimento oranı ile ters orantılı olarak değişmektedir (Neville ve Erdoğan, 2003).

Su/çimento oranı yükseldikçe beton içerisinde oluşan gözenekler artacağından, dayanımı da düşük olacaktır. Genelde su/çimento oranı azaldığında, beton dayanımında artma gözlenmektedir. Ancak, çok düşük su/çimento oranlarında, betonun sıkıştırılması çok zor olmakta ve beton içerisinde istenilmediği halde boşluklar kalmaktadır. Bu da beton dayanımının düşmesine neden olur (Erdoğan, 2003).

Su/çimento oranı, hidrasyonun herhangi bir kademesinde, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki gözenek miktarını belirlemektedir. Böylece karışımdaki su/çimento



oranı ve betonun sıkıştırılma derecesi, sertleşmiş beton içerisindeki oluşabilecek boşlukların hacmini etkilemektedir (Neville, 1981).

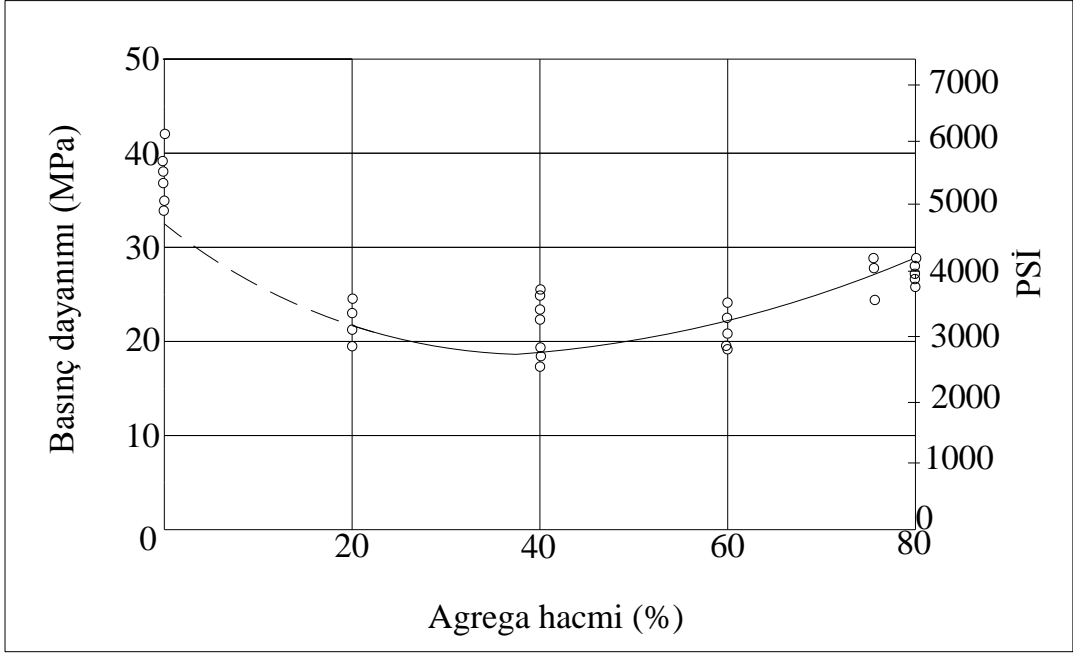
#### **2.5.1.1.1.2. Agregâ/Çimento Oranının Etkisi**

Agregâ/çimento oranı beton dayanımını etkileyen ikincil bir unsurdur. Ancak sabit su/çimento oranlarında çimento dozajı düşük karışımların daha yüksek dayanım gösterdikleri gözlenmiştir. Bunun nedeni açık olmamakla birlikte, bazı durumlarda karışım suyunun bir kısmı agregâ tarafından emilmekte ve agregâ miktarı fazlaştığında ise emilen su miktarı fazla olmakta ve bu da etkili su/çimento oranının azalmasına yol açmaktadır. Sonuçta beton dayanımını artırmaktadır. Diğer bir neden ise, yüksek agregâ içeriğinin betonda meydana gelebilecek büzülme ve terlemenin (su salma) daha az olmasına yol açması böylelikle agregâ ile çimento hamurunun arasındaki bağın daha az hasar görmesini sağlamasıdır. Böylelikle, çimentonun hidratasyonu sonucu meydana gelen ısı değişikliklerinin etkisi de azalmaktadır. Bu da beton dayanımını artırmaktadır.

Beton karışımındaki agregâ içeriğinin dayanım üzerindeki etkisi Şekil 2.5’de gösterilmektedir.

Agregâ hacminin toplam beton hacmine oranı sıfırdan %20’ye kadar arttığında, beton basınç dayanımında keskin bir azalma olmakta ancak, bu oran %40 ile %80 arasıdayken, beton basınç dayanımında bir artma gözlenmektedir. Bu sonuçların nedenleri çok açık olmasa da değişik su/çimento oranlarında da aynı etki gözlenmiştir.

Doğal olarak agregâ oranı arttığında beton dayanımı da artmaktadır. Ancak, bu durumda agregâ-çimento hamuru ara yüzeyi de arttığından ve bu bölge betonda zayıf bir bölge olduğundan beton basınç dayanımı da düşebilmektedir. Böylelikle basınç dayanımı dengelenmektedir.



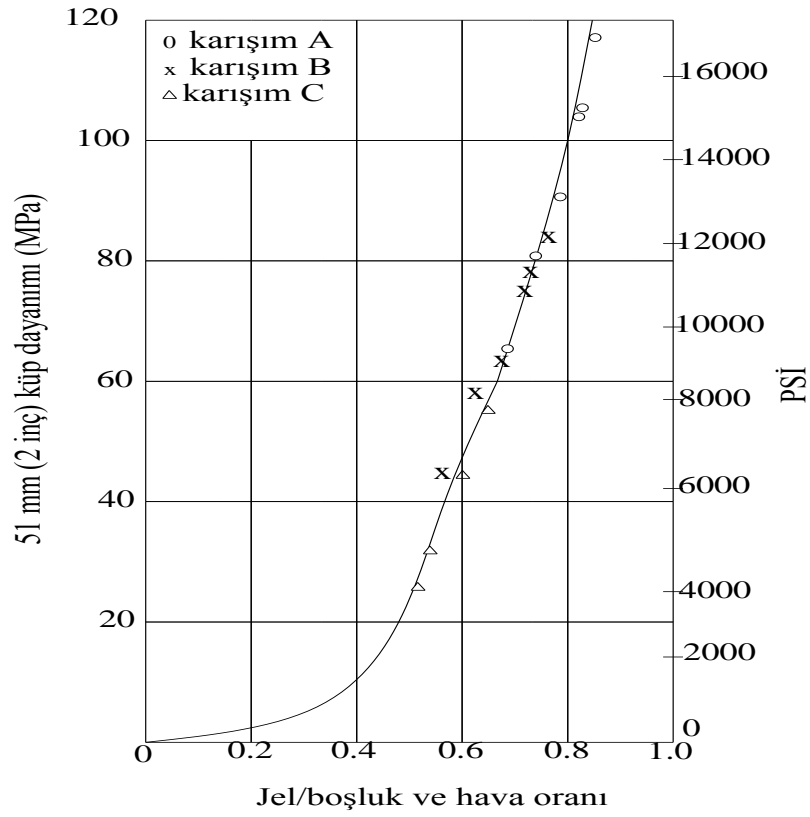
Şekil 2.5. Agreganın hacmi ile silindirik beton numunelerin (100 mm çapında ve 200 mm boyunda) basınç dayanımı arasındaki ilişki (Neville, 1981).

#### 2.5.1.1.1.2.Çimento Hamurundaki Jel/Boşluk Oranının Etkisi

Çimento hamurunun dayanımında en büyük pay C-S-H jellerine aittir. Hatta çimento hamuru dayanımının C-S-H jellerinin oluşmasıyla meydana geldiği söylenebilmektedir. Çimento hacmindeki, jel hacminin, jel oluşumu için mümkün olan boşluk hacmine oranı jel/boşluk oranı olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki gibi gösterilebilmektedir (Erdoğan, 2003).

$$\text{Jel/Boşluk Oranı} = \frac{\text{Jel hacmi}}{\text{Jel hacmi} + \text{Kapiler boşluk hacmi}} \quad (2.8)$$

Harcın basınç dayanımı ile jel/boşluk oranı arasındaki gerçek ilişki Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Elde edilen sayısal değerler farklı portland çimentosu tipleri için küçük farklılıklar gösterebilir.



Şekil 2.6. Çimento harcının jel/boşluk oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (Neville, 1981).

### 2.5.1.1.3. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Beton kompozit bir malzemedir ve agrega, çimento, su ve bazen katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla üretilmektedir. Böyle olunca, betonu oluşturan malzemelerin özellikleri de taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Arıöz, 2004).

#### 2.5.1.1.3.1. Çimento Özelliklerinin Beton Dayanımına Etkisi

Çimentoların kimyasal kompozisyonu ve çimento tanelerinin inceliği çimento tipini de belirleyen unsurlardır.

Bu özellikler, hidrasyon olarak da bilinen, su ile çimento arasındaki reaksiyonun hızını etkilemektedir. Dolayısıyla, çimento hamurunun dayanım kazanma hızı ve ne ölçüde dayanım kazandığı da çimentoların bahsedilen özellikleriyle yakından ilgilidir (Erdoğan, 1995-2003).

#### **2.5.1.1.1.3.2. Agreganın Özelliklerinin Beton Dayanımına Etkisi**

Agrega, beton hacminin kabaca dörtte üçünü oluşturduğundan, agreganın özellikleri de taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Agreganın maksimum tane boyutu, tane şekli, yüzey özellikleri, dayanımı ve agreganın üzerinde bulunabilecek zararlı maddeler beton dayanımını etkileyen önemli unsurlardır (Erdoğan, 1995-2003). Dolayısıyla agreganın çeşidi de beton dayanımını etkilemektedir. Basınç dayanımı 30 MPa civarında olan betonlar için bu etki az olmasına karşın, yüksek dayanımlı betonlarda agreganın çeşidi önem kazanmaktadır (Özturan vd., 1997; Beshr, 2003; Yaşar, 2004). Çünkü yüksek dayanımlı betonlarda çekme dayanımı harç tarafından kontrol edilirken basınç dayanımı agreganın dayanımı ve yüzey karakteristikleri tarafından belirlenmektedir (Özturan vd., 1997).

#### **2.5.1.1.1.3.3. Karma Suyu Kalitesinin Beton Dayanımına Etkisi**

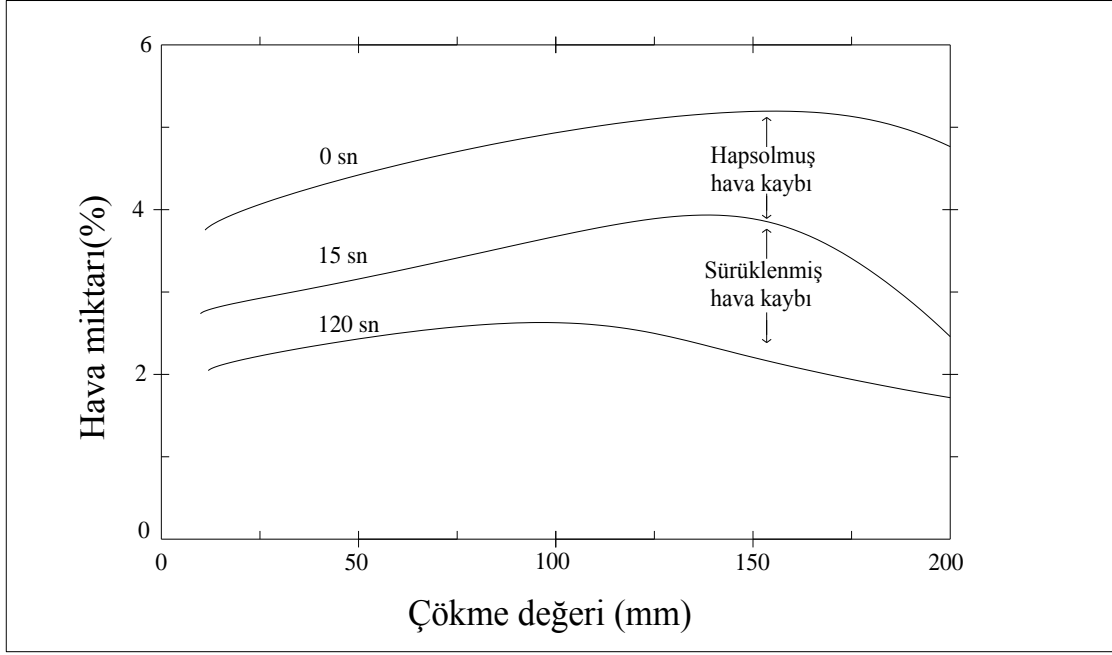
Betondaki karışım suyu, agreganın ve çimento ile birlikte betonu oluşturan temel malzemelerden birisidir. Karışım suyu, taze betonda agreganın tanelerinin üzerini ıslatarak betonda yağlayıcı etki oluşturmakta ve betonun işlenebilirliği olarak ifade edilen karma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kolaylaşmasını sağlamaktadır. Karışım suyu aynı zamanda çimento ile reaksiyona girerek, sertleşmiş çimento hamuruna dayanım veren ürünler oluşturmaktadır (Erdoğan, 1995). Bu nedenle, beton yapımında karışım suyu olarak kullanılacak su, çok temiz olmalı ve içerisinde sertleşmiş betonun özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek kil, şist, asit, klorür, sülfat, yağ gibi zararlı maddeler bulunmamalıdır (Erdoğan, 1995).

#### **2.5.1.1.1.4. Betona Uygulanan Sıkıştırma İşleminin Beton Dayanımına Etkisi**

Beton üretimi esnasında malzemeler karılırken ve taze betonun kalıplara yerleştirilmesi işlemleri yapılırken bazen beton içerisinde bir miktar hava kalmaktadır (Erdoğan, 2003). Bu miktar, yüksek işlenebilirliğe sahip bir betonda hacimsel olarak yaklaşık %5-20 arasındadır (Neville, 1981). İçerisinde hava bulunan beton sertleştiğinde boşluklar içermekte ve bu yüzden dayanımı ve dayanıklılığı düşük bir beton elde

edilmektedir (Erdoğan, 2003). Bu nedenle taze beton kalıplara yerleştirildikten sonra içerisindeki hava dışarı çıkarılmalı, beton, kalıbın köşelerinde ve tüm donatı çeliklerinin çevresinde sıkıştırılmalıdır (Mindess ve Young, 1981). Beton içerisindeki hapsolmuş havanın çıkarılabilmesi için beton taze haldeyken sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem elle tokmaklayarak veya mekanik yöntemlerle yapılabilmektedir (Erdoğan, 2003).

Taze betonun elle sıkıştırıldığı yöntemde bir çubukla, kısa aralıklarla yukardan aşağıya doğru darbe uygulanır. Bu yöntem daha çok akıcı kıvamdaki betonlara uygulanmakta, kuru veya çok kuru kıvamdaki betonlara uygulandığında iyi sonuç alınmamaktadır. Çökme değeri 50 mm'den az olan kuru kıvamdaki betonlar daha çok mekanik yöntemler kullanılarak sıkıştırılmaktadır (Mindess ve Young, 1981; Erdoğan, 2003; Taylor, 1977). Mekanik yöntemler içerisinde en çok kullanılanı betonun vibrasyon (titreşim) vasıtasıyla sıkıştırıldığı yöntemdir. Bu yöntemde betonun sıkıştırılması iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada vibrasyon etkisiyle betondaki harç sıvılaşarak dibe doğru gitmekte, ikinci aşamada ise beton içerisinde kalmış hava kabarcıkları dışarı çıkmaktadır (Neville, 1981; Erdoğan, 2003). Vibrasyon etkisiyle beton karışımı sıvı özellik göstermekte böylece kalıbı tamamıyla doldurmakta, betonarme demirleri arasındaki boşluklara iyi bir şekilde yerleşmekte ve iri agregalar arasındaki boşluklar harçla dolmaktadır. Beton içerisindeki hava kabarcıkları da betonu terk ettiğinden beton dayanım ve dayanıklılığı da artmaktadır (Erdoğan, 2003). Ancak, fazladan yapılan vibrasyon işlemi çimento hamurunu yüzeye taşır, su salmayı artırır ve sürüklenmiş hava kaybına neden olur. Vibrasyonun hava içeriği üzerindeki etkisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Vibrasyonun betonun hava içeriği üzerindeki etkisi (Mindess ve Young, 1981).

#### 2.5.1.1.1.5. Beton Kür Ortamının Beton Dayanımına Etkisi

Betonda özellikle erken yaşlarda, yeterli hidrasyonun sağlanması ve bu ortamın korunması işlemine betonun kür edilmesi adı verilmektedir. Betonun kürü için beton sıcaklığının belirli bir ısıdan aşağı düşmemesi ve hidrasyon için yeterli miktarda su bulunması gerekmektedir (Erdoğan, 2003). Standart kür koşulu  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de kirece doymuş sulu ortamdır.

Kür sıcaklığının etkisi her sıcaklık için karşılaştırıldığında,  $4^{\circ}\text{C}$  kür sıcaklığının erken yaşlarda bir miktar daha düşük ancak, sonuçta oldukça yüksek bir basınç dayanımının elde edilmesini sağladığı görülmektedir (Mindess ve Young, 1981; Erdoğan, 2003).

#### 2.5.1.1.1.6. Zararlı Çevre Koşullarının Beton Dayanımına Etkisi

Beton, servis süresi boyunca bünyesinde yıpranmaya yol açacak bir çok kimyasal ve fiziksel etkilere maruz kalabilmektedir. Beton içerisine sızan asitli, sülfatlı sular veya klor gibi maddeler betonda kimyasal olayların meydana gelmesine neden olmakta ve betonu yıpratmaktadır (Erdoğan, 2003).

Betonun zarar görme oranı, kimyasal etkinin sudaki konsantrasyonuna, bu etkiye maruz kalınan süreye ve betonun direncine bağlıdır (Shannag ve Shaira, 2003).

### 2.5.1.2. Eğilme Dayanımı

Betonun eğilme dayanımı kiriş numuneler üzerinde;

1-Üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş yöntemi,

2-Orta noktasından yüklenmiş basit kiriş yöntemleri ile belirlenir.

Bunlardan birincisi daha gerçekçi sonuç verir (Özkul vd., 1999). Şekil 2.8’de üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Bir beton numunenin eğilme dayanımı aşağıdaki formüller kullanılarak bulunur.

Üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş yönteminde, kırılma orta üçtebirlik kısmında meydana gelmişse;

$$\delta_E = P \times L / b \times h^2 \quad (2.9)$$

Kırılma orta üçte birlik kısmın dışında meydana gelmişse;

$$\delta_E = 3PL \times a / b \times h^2 \quad (2.10)$$

Burada;

$\delta_E$ = Eğilmede çekme dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)

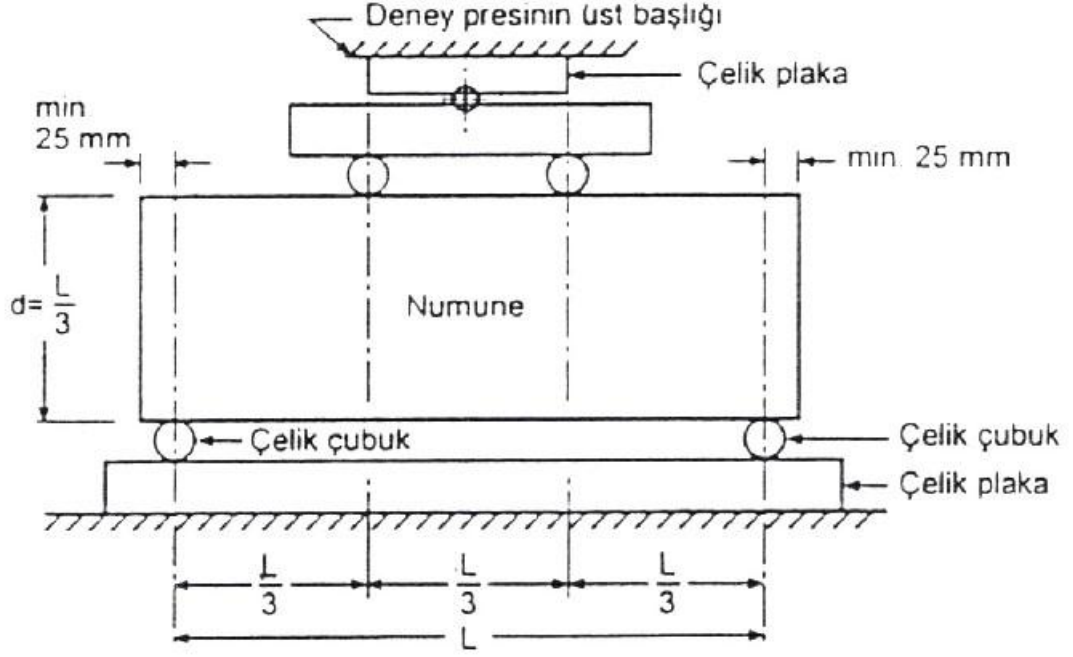
P=Deney presinde kırılma anındaki en büyük yük (kgf)

L=Yüklemeye tablası mesnetleri arasındaki açıklık (cm)

h= Kırılma kesitinin ortalama yüksekliği (cm)

b=Kırılma kesitinin ortalama genişliği (cm)

a=Kırılma çizgisi ile yakındaki mesnet arasındaki ortalama mesafe (cm)



Şekil 2.8. Bir beton numunenin üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş yönteminin şematik olarak gösterimi

### 2.5.1.3. Çekme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, betonda çekme etkisi oluşturacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Betonun dayanım değerleri arasındaki en yüksek olanı basınç dayanımı, en düşük olanı da çekme dayanımıdır. Betonda basınç ve çekme dayanımları birbiriyle yakından ilgilidir. Genel olarak, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %9-%10'u kadardır, beton kalitesine ve yaşına bağlı olarak bu oran %7 ile %17 arasında değişebilmektedir.

Genellikle yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Betonda oluşan çekme kuvvetleri, betonun çatlamasına ve kırılmasına yol açan en önemli neden olarak kabul edilmektedir (Koç, 2010).

Betonun çekme dayanımını etkileyen faktörler, basınç dayanımını etkileyen faktörlerin aynısıdır. Yalnız burada bağlayıcı madde ile agrega taneleri arasındaki aderans



daha önemlidir. Aderansın zayıf olmasına neden olan faktörler, örneğin kil ve silt fazlalığı betonun çekme dayanımını düşürür (Baradan, 1998).

Betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$F_{ctk}=0,35\sqrt{f_{ck}} \quad (2.11)$$

### 2.5.2. Dayanıklılık

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini uzun yıllar boyu bozulmadan yerine getirebilmelerine dayanıklılık, kalıcılık veya durabilite adı verilir. Başka bir ifadeyle betonun durabilitesi; betonun hava tesirlerine, kimyasal etkilere, aşınmaya ve diğer bozulmalara karşı gösterdiği dayanıklılık olarak tanımlanır (Tulmin, 2000).

Beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturan agreganın betonun performansında etkisi belirgindir. Maksimum su/çimento oranı ile minimum çimento içeriğindeki sınırlamalar betonun dayanımı ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Bu iki sınırlamanın gerçekleşmesinde agreganın kaliteli ve boyut dağılımının uygun olması zorunludur. Genel olarak betonun çevresel etkilere diğer bir deyişle durabiliteye göre tasarımı bu iki parametreye göre yapılır. Betondaki maksimum su/çimento oranı ve minimum çimento dozajı gibi kısıtlamaların ne ölçüde gerçekleşebileceği (yani çevresel etki sınıfına bağlı olarak maksimum su/çimento oranı belirli bir değeri aşamaz ve çimento dozajı da öngörülen minimum değer altına düşemez.) doğrudan beton agregasının türüne, granülometrisine ve standartlara uygun olmasına bağlıdır (Taşdemir, 2000).

Betonun, hizmet gördüğü süre boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi, yani yeterince dayanıklı olması en az betonun basınç dayanımı kadar, hatta çoğu zaman bundan daha önemlidir (Öner ve Yıldız, 2003).

Uzun yıllar boyunca betonun dayanımı, uygun bir beton üretimi için yeterli bir koşul sayılmıştır ve ufak onarımlarla çıkabilecek sorunların üstesinden kolayca gelinebileceği düşünülmüştür. Ancak; günümüzde “betonun kendisinden beklenen performansı hizmet süresince göstermesi” olarak tanımlanan dayanıklılık kavramı, yapının bulunduğu ortam şartlarına göre malzeme seçimi ile en uygun bileşimin belirlenmesi, buna ek olarak asgari bakımın (kür) ihmal edilmemesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Yüksek dayanımlı bir betonun yüksek performanslı beton anlamına geleceği ilk bakışta mantıklı görünse de her zaman geçerli olmadığı gerçekleştirilen bir çok çalışmada gösterilmiştir.

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik boşluk yapısı ve oranıdır (Uyan vd., 2003). Betonun uygun şekilde yerleştirilmesi ve ardından yeterli kür uygulanması dayanıklılığının sağlanabilmesinin önemli temel koşullarındandır. Çünkü her ikisi de beton boşluk yapısı ve böylece dayanım ve dayanıklılığı etkileyen şantiye uygulamalarıdır (Doğan, 2008).

Su kürünün yeterince yapılmaması betonda basınç dayanımına benzer şekilde dayanıklılık özelliklerini de etkilemektedir. Çimentonun su ile yaptığı reaksiyon sonucu ortaya çıkan hidrate ürünler (C-S-H) kapiler boşlukları doldurmakta ve ortamda yeterli nem bulunduğu sürece bu olay sürmektedir. Böylece zamanla en azından kapiler boşluklardaki süreklilik azalarak beton geçirimsizliği düşmektedir. Ancak betonda yeterli geçirimsizlik sağlanabilmesi için kapiler boşlukların miktarının çok yüksek olmaması gerekir, dolayısıyla su/çimento oranının yüksek olduğu karışımlarda bu boşlukları hidrate elemanlarla doldurmak ve geçirimsiz bir beton elde etmek olası değildir (Doğan, 2008).

Yukarıdaki ifadelerle birlikte bir genelleme yapacak olursak, Betonun durabilitesi; betonun kalitesine bağlı olup, performansta bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, beton bakım ve kürü gibi süreçler ile çevre koşulları etkilidir. Beton uygun şekilde kür edilmemişse mukavemet yaklaşık %30 düşebilir, ancak durabilite daha da olumsuz etkilenir; kür edilmemiş betonun geçirimsizliği yaklaşık 10 kat artabilir, bu da korozyonu olumsuz şekilde etkiler ve durabilite önemli ölçüde azalır. Uygun beton durabilitesi için amaca uygun malzeme seçilmeli, su da dahil bütün bileşenler standartlara uygun olmalı, karışım iyi tasarlanmalı ve taze betonun yeterli biçimde yerine yerleştirilmesi sağlanmalı, özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılmalı, beton iyi korunmalı ve gerekli kür işlemleri aksatılmadan yapılmalıdır. Tüm bunlar yapılırsa betonda oluşabilecek oturma çatlaklarının, plastik rötre çatlaklarının ve kısıtlanmış rötre çatlaklarının önüne geçilebilir. Bu çatlakların önlenmesi betonun durabilitesi açısından yararlıdır (Tullmin, 2000).

### **2.5.2.1. Betonda Hasar Oluşumu**

Beton bir çok yoldan hasar görebilir. Çevresel etkilerden kaynaklanan hasarların kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştiği düşünülebilir. Donatı korozyonu ise bu iki süreç sonunda gerçekleşen elektrokimyasal bir olaydır. Kimyasal hasarda yabancı bir madde ile beton bileşenleri arasında gerçekleşen bir reaksiyon sonucunda açığa çıkan ürünlerin genişmesi ya da beton bileşenlerinin çözülerek bütünlüğünün kaybolması söz konusudur. Asit ve sülfat etkisi, alkali-agrega reaksiyonu, karbonatlaşma gibi en çok görülen hasarlar bu gruptadır. Fiziksel hasarların başında donma etkisi ve çözücü tuz etkisi gelir. Bunların yanında yangın etkisi ile aşınma sonucu görülen hasarlarda fiziksel hasar sınıfında değerlendirilir.

#### **2.5.2.1.1. Karbonatlaşma**

Karbondioksitin difüzyonu ile serbest kireçle arasındaki kimyasal tepkimenin bir arada gerçekleştiği sürece denir. Atmosferde %0,03 oranında bulunan CO<sub>2</sub>, kapalı mekânlarda %1'e kadar yükselebilmektedir. Bu nedenle betonarme binaların iç kısımlarında başta olmak üzere her an karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşmektedir. Temel olarak su ile birleşerek karbonik asit oluşturan karbondioksitin hidrasyonunun en zayıf unsuru olan Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyonu sonucu CaCO<sub>3</sub> meydana getirmesi anlamına gelen karbonatlaşmanın, yüzeyde sertlik ve dolayısıyla dayanım artışı ile geçirimsizliği azalttığı görülse de asıl olarak alkalitenin azalması sonucu donatı korozyonuna neden olması en belirgin özelliğidir (Claisse vd., 1999).

#### **2.5.2.1.2. Asit Etkisi**

Beton, alkali yapısı nedeniyle asit etkisine karşı duyarlıdır (Doğan, 2008). Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda bulunan asitler, betonun genişip hasar görmesine yol açan kimyasal olayların oluşmasına neden olmaktadır. Asitlerin betonda oluşturduğu yıpratıcı etki, "asit hücumu" olarak adlandırılmaktadır.

Sertleşmiş betonun içerisine giren sularda yer alan asitler, değişik kaynaklı olabilmektedirler.

Havadaki karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), suyun içerisinde çözünerek, zayıf bir karbonik asit ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) oluşturmaktadır. Kırıllardaki akarsular ve kar suları bu tür bir asit içerebilmektedirler.

Organik atık maddelerin taşıdığı kanalizasyon sistemlerinde, atıklı maddelerin içerdiği kükürtlü bileşenler anaerobik bakterilerle (serbest oksijene ihtiyaç olmadan yaşayabilen bakterilerle) birleşerek, nemli ortamda önce hidrojen sülfid ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ve daha sonrada sülfirik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) oluşturmaktadırlar. Aslında, hidrojen sülfid gazının betonda yıpratıcı etkisi yoktur. Ancak, bu gazın, beton yüzeyindeki nemli tabakanın içerisine girmesi ve anaerobik bakteriler tarafından sülfirik aside dönüştürülmesiyle, bu asitin betona zararlı etkileri olmaktadır. Kanalizasyon sistemindeki pis su seviyesinin hemen üstündeki bölgede yer alan betonun bu tür asitli sularla karşılaşmasına çok sık rastlanmaktadır.

Yakıtlardan atmosfere salınan kükürt dioksit ( $\text{SO}_2$ ), su içerisinde çözündüğünde, sülfüröz asit ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) ve sülfirik asit oluşturmaktadır. Havadaki kükürt dioksitin beton yüzeyindeki ıslaklıkla birleşerek sülfüröz asit veya sülfirik asit oluşturması da çok sık rastlan bir olaydır. Döşemelerde, bacalarda, buharlı trenlerin geçtiği tünellerde kullanılan betonlar, bu tür asitli sularla karşı karşıya gelebilmektedirler.

Asit hücumu sonucunda, sertleşmiş betonun içerisindeki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerinde çözülme yer almaktadır. Beton yüzeyinde yumuşak (çamur gibi) ince bir tabaka oluşmaktadır. Beton daha gözenekli duruma gelmekte, dayanımı ve dayanıklılığı daha az olmaktadır (Nergiz, 2007).

### **2.5.2.1.3. Sülfat Etkisi**

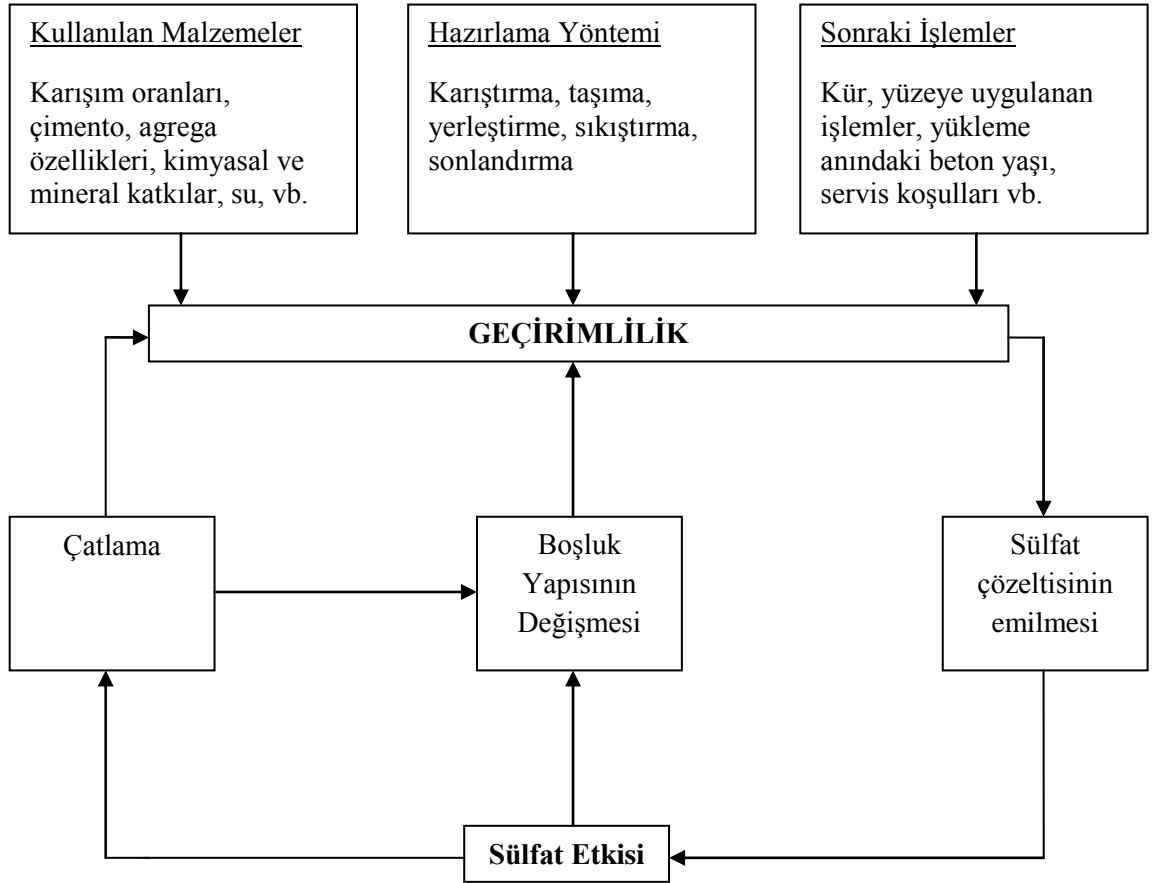
Betonun sülfatlı ve nemli ortamlara maruz kalması durumunda sülfat iyonlarıyla çimento hamuru arasında gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyonu tanımlamak için “Sülfat Etkisi” tanımı kullanılır. Dış ortamlarda bulunan sülfatların beton içerisine girmesi halinde, çimentonun  $\text{C}_3\text{A}$  bileşeni (daha doğrusu monosulfoaluminat) ile reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna neden olurlar. Sertleşmiş betonda, bu bileşiğin oluşumu sırasında meydana gelen hacim artışı sonucu çatlama, dağılma ve parçalama gibi önemli hasarlar görülür. Yer altı ve deniz suyu gibi beton yüzeyine temas eden ve sülfat içeren ortamlarda en çok sodyum sülfat, potasyum sülfat, magnezyum sülfat ve kalsiyum sülfat şeklinde bulunur.

Bunlar arasında en etkili olanın C-S-H ile iyon değişimine yol açan magnezyum sülfat olduğu bilinmektedir (Neville, 2004).

Sülfat etkisini doğrudan etkileyen parametreleri sıralayacak olursak;

- 1-Etkilenme koşulları ( $SO_4^{-2}$  içeriği, ortam koşulları)
- 2-Betonun geçirimliliği (zararlı madde taşınımı)
- 3-Betonun yapısı (imentonun kimyasal yapısı)
- 4-Suyun varlığı

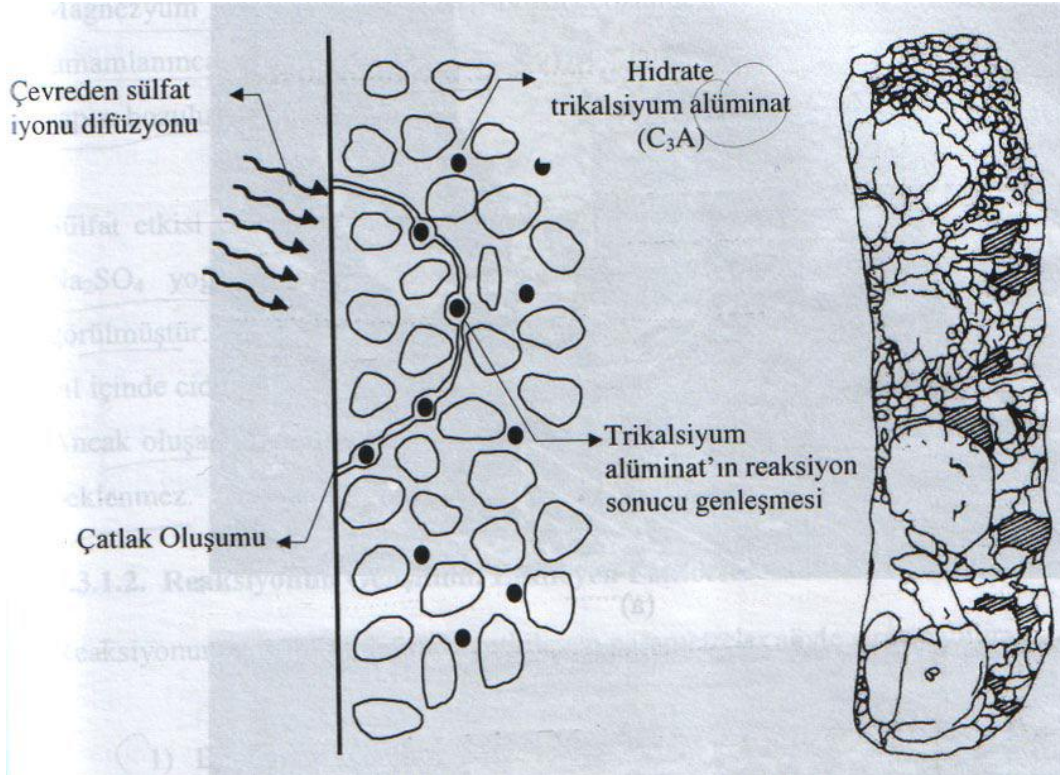
Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata dayanıklılığı da büyük oranda geçirimliliğe bağlıdır. Betonun geçirimliliğini etkileyen malzeme özellikleri, karışım oranları, çatlak durumu, taze betonun sıkıştırılması, kürü, vb. tüm parametreler aslında sülfata dayanıklılığı da dolaylı olarak etkilemektedir.



Şekil 2.9. Betonun sülfat dayanıklılığı ile geçirimliliği arasındaki ilişki (Baradan vd., 2002).

Şekil 2.9’da dikkat edilecek en önemli nokta sülfat etkisi ile betonun geçirimliliği arasındaki döngünün varlığıdır. Bir başka deyişle, sülfat etkisine maruz kalan betonun boşluk yapısı değişmekte, gözenekliliği artmakta, çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu durum, betonun geçirimliliğinin artmasına dolayısıyla yıpranma sürecinin kendi kendini hızlandırmasına neden olmaktadır (Göktepe, 2008).

Sülfat hücumuna maruz kalan betonların yüzeyi, karakteristik olarak beyazımsı bir görünüm almaktadır. Sülfatların yıpratıcı etkisi, genel olarak, beton blokların kenarından ve köşelerinden başlamaktadır. Daha sonra bu etki, betonun iç kısımlarına doğru yoğunlaşarak, beton yüzeyinin tabaka tabaka büyük parçalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır. Şekil 2.10’da sülfat etkisine maruz betonun bozulması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Sülfat etkisiyle betonun bozulması (Baradan vd., 2002).

Yapıların temel betonları, istinat duvarı betonları, kanal kaplama betonları ve beton borular, sülfat hücumunun çok sık rastlandığı betonlardır (Nergiz, 2007).

Betonun sülfat dayanımını sağlamak için alınacak önlemleri, betonun geçirimsizliğinin sağlanması, çimentonun  $C_3A$  ve  $Ca(OH)_2$  içeriğinin sınırlandırılması, puzolanik katkı maddeleri kullanılması, gerektiğinde betonun kaplamalarla dıştan sülfatlara karşı izole edilmesi şeklinde özetlemek mümkündür. Bu önlemlerden hangilerinin ne zaman uygulanacağını kararı çevresel etkinin şiddetine göre verilir (Göktepe, 2008).

#### **2.5.2.1.3.1. Deniz Suyu Etkisi**

Deniz suyunda da önemli miktarda sülfat bulunmaktadır. Deniz sularında değişik türlerde ve miktarlarda tuzlar yer almaktadır. Deniz sularının içerisindeki sülfatların betonda oluşturduğu yıpratıcı etki, topraktaki ve yer altı sularının içerisindeki sülfatların etkisi kadar şiddetli olmamaktadır. Deniz sularının içerisinde klorür iyonunun bulunuyor olması, sülfat reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ürünlerin daha az genişleme yapmasına neden olmaktadır. Zira klorür, sülfat hücumu sonunda beton içerisinde oluşan alçı taşının ve etrenjitin bir miktarının çözünerek, betonun yüzeyine çıkmasına yol açmaktadır. Böylece alçıtaşı ve etrenjitin sertleşmiş beton içerisinde genişleme oluşturucu etkileri azalmış olacaktır.

Deniz suyu etkisine maruz kalan betonlar, sülfat hücumunun yanı sıra, gözeneklerinde çökelen (biriken) tuz kristallerinin oluşturduğu basınç nedeniyle de genişip yıpranabilmektedirler. Sertleşmiş betonun gözeneklerinde tuz birikmesi, betonun içerisine giren deniz suyunun kapiler hareketle yukarı çıkması ve buharlaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu olay, betonun, su seviyesi üzerinde kalan bölgelerinde gelişmektedir. Deniz sularının gel-git hareketiyle yükselip alçalması sonucunda beton yüzeyinin bir bölümü, ıslanma- kuruma devirlerinin etkisinde kalmaktadır. Bu tür ıslanma-kuruma durumu ile karşı karşıya kalan beton, devamlı olarak su içerisinde bulunan betona göre daha çok hasar görmektedir. Öte yandan deniz suyunun içerisinde bulunan magnezyum sülfat, betonda bağlayıcı özellikteki kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jelinin çözülmesine neden olmakla birlikte, bu çözülme oldukça yavaş tempoda oluşmaktadır.

Deniz sularının beton yapılara esas zararı, bu tür sularda bulunan klordan kaynaklanmaktadır. Deniz suyundaki klor, betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu (paslanmasını) hızlandırmakta, betonun parçalanmasına yol açabilmektedir (Nergiz, 2007).

#### 2.5.2.1.4. Betondaki Çelik Donatının Korozyonu (Paslanma)

Beton elemanın çekme ve eğilme gerilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için, çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerine (örneğin beton kirişlerin tabanına yakın bir konuma) çelik çubuklar yerleştirilmektedir. Çelik ve beton arasında iyi bir aderans olduğu takdirde, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Çekme dayanımı yüksek olan çelik çubuklar, çekme dayanımı düşük olan betonu takviye etmektedir.

Yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan çelik donatı, zamanla “paslanma” da denilen “korozyon” olayı ile karşı karşıya kalmaktadır. (Korozyon sözcüğü, Latince kemirmek anlamına gelen con rodere sözcüğünden türetilmiştir.)

Betonun içerisindeki çelik çubuğun korozyonu, galvanik pildeki gibi elektro kimyasal bir olayla gerçekleşmektedir.  $Fe^{++}$  (demir iyonu) ile  $OH^-$  (betondaki hidroksil iyonu) arasındaki reaksiyonlar sonucunda,  $Fe(OH)_2$  (ferro hidroksit) ve  $Fe(OH)_3$  (ferik hidroksit) gibi korozyon ürünleri oluşmaktadır. Korozyon ürünleri, “pas” olarak da adlandırılmaktadır.

Korozyon ürünlerinin oluşması için  $Fe^{++}$  iyonlarını kaybeden çelik çubuğun kesitinde küçülme olmaktadır. Ortaya çıkan korozyon ürünleri ise, çelik çubuğun yüzeyine yerleşmektedir.

Betonun içerisindeki çelik çubukların korozyonu çok sakıncalı durumlara yol açmaktadır.

- Korozyona uğrayan donatının kesitinde küçülme olduğu için, belirli bir çekme yükü, daha küçük bir çubuk üzerine binmiş olmaktadır. Yani, çelik çubuğun üzerindeki çekme gerilmesi artmış olmaktadır. Çelik çubuk yük taşıyamaz duruma gelmekte, beton elemanda çatlama, kırılmalar olmaktadır.
- Korozyon ürünlerinin (pasın) hacmi, korozyonda rol alan demirin hacminden yaklaşık 2,5-3 kat daha büyüktür. Bu ürünler çelik çubukların yüzeyine yerleştiği için, sertleşmiş betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşmaktadır. Artan iç gerilmeler karşısında, sertleşmiş beton çatlayıp parçalanmaktadır.
- Çelik çubukların korozyonunun ilk safhalarında betonun yüzeyinde paslı noktalar oluşmaktadır. Korozyon ilerledikçe, pas lekeleri çelik çubuğun boyunca beton yüzeyinde görülmektedir. Korozyonun ileri safhasında ise, beton yüzeyinde parçalanma olmaktadır. Çelik çubuğun korozyonunun çok ilerlemiş olmadığı



durumda dahi, beton yüzeyinde pas lekelerinin oluşmuş olması betonun görünümünü bozmaktadır (Erdoğan, 2002).

#### **2.5.2.1.5. Alkali-Silika Reaksiyonu**

Çimentoda bulunan alkali hidroksitler ile genellikle agregadan gelen reaktif silisin oldukça yavaş bir şekilde birleşmesi ile meydana gelen alkali-silikat jellerinin ortamda su bulunması durumunda şişerek beton yüzeyinde “harita” şeklinde tanımlanan, rast gele ve yaygın çatlakların görülmesiyle sonlanan sürece alkali-silika reaksiyonu denir. Gecikmiş etrenjit oluşumu, agregaların ısı genleşmesi, kuruma rötresi gibi nedenlerle de benzer çatlak oluşumu görüldüğünden tespit edilmesi oldukça zordur (Lawrence, 2004).

Alkali agrega reaksiyonunun, alkali karbonat reaksiyonu (AKR), alkali silikat reaksiyonu (yavaş ilerleyen alkali-silika reaksiyonu) ve alkali-silika olmak üzere bilinen üç oluşum şekli vardır. Alkali-karbonat reaksiyonu, dolomit ve/veya kil mineralli ve ince taneli kireç taşı içeren agregalardan imal edilmiş betonlarda meydana gelmektedir. Alkali-silikat reaksiyonu ise fillosilikat grubu minerallerden oluşmuş agrega içeren betonlarda görülmektedir (Çorbacıoğlu, 2008; Mays, 1991).

#### **2.5.2.1.6. Klorür Etkisi**

Klorürler, beton içerisine üretim sırasında bileşenler aracılığıyla girebildiği gibi genellikle dışarıdan çözücü tuzlardan veya deniz suyundan gelir. Beton içerisine giren klorür ilk olarak  $C_3A$  bileşeni tarafından bağlanarak Friedel tuzunu oluşturur. Friedel tuzu oluşumunun, betona herhangi bir zararı söz konusu değildir.  $C_3A$ 'nın klorür bağlama özelliğini göstermektedir.

Deniz suyu etkisi altında olup içerisinde çelik donatı bulunmayan betonların performanslarında hizmet süreleri boyunca beklenmeyen bir değişiklik görülmeyebilir. Ancak, betonarme yapıların hizmet sürelerini belirleyen en önemli etkenler klorür girişi ve karbonatlaşmadır. Klorür iyonlarının etkisinde meydana gelen korozyon, karbonatlaşma etkisinden farklı olarak bölgesel ve çukur oluşumu şeklinde gelişir. Bu nedenle kısa zamanda büyük miktarda donatı kesit kayıplarıyla karşılaşmaktadır (Doğan, 2008).

### 2.5.2.1.7. Donma-Çözülme Etkisi

Su donduğunda hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Soğuk iklim bölgelerinde ve kısmen veya tamamen suya doygun halde bulunan beton elemanlarda söz konusu genleşme sırasında meydana çıkan iç gerilmelerle kılcal çatlaklar beton içerisine doğru ilerler. Sıcaklığın yükselmesinin ardından yeni oluşan çatlaklar da suya doygun hale gelir ve her donma aşamasında aynı olaylar tekrarlanır. Bir süre sonra beton yüzeyinde dökülmeler şeklinde hasar görülür.

Betonun, donma-çözülme etkisine karşı dirençli olması için alınması gereken en önemli önlem standartlara uygun şekilde beton içinde hava kabarcıkları oluşturmaktır (hava sürüklemek). Hava sürüklenmiş betonlarda donma sırasında suya doygun boşluklardaki gerilmeye bağlı olarak ilerleyen çatlaklar, sürüklenmiş hava kabarcıklarına rastladığında gerilme yok olacağından hasarın etkisi ve hızı azalmaktadır (Eglinton, 2004).

### 2.5.2.1.8. Aşınma

Beton yüzeyinde sürtünme ve çarpma oluşturarak, yüzeyin erozyonuna neden olacak etkenler karşısında betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti “aşınma dayanıklılığı” olarak adlandırılmaktadır.

Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler, betonun yüzeyinde adeta törpülercesine etki oluşturmakta, yüzeyin aşınmasına neden olmaktadır. Aşınma yavaş tempoda yer alan fiziksel ve mekanik bir olaydır. Aşınmanın yer aldığı başlıca beton yapılar şunlardır.

- Üzerinde insan trafiği (ayakların oluşturduğu sürtünme) hafif trafik veya kayarak sürtünmenin olabileceği kaldırım ve döşeme betonları.
- Üzerinde ağır trafik bulunan özellikle zincirli tekerlekleri olan kamyonların veya çivili lastikli otoların hareket ettiği beton yollar.

Yukarıda sıralanan yapılardaki aşınmanın dışında, barajlarda, dolu savaklarda, tünellerde ve bazı su taşıyan sistemlerdeki betonlarda oluşan kavitasyon hasarı da aşınma konusu ile ilgili bir olaydır.

Betondaki kavitasyon, hızlı akan suların (sıvıların) akış yönlerindeki ani değişiklikten kaynaklanmaktadır bu durum değişikliğin yer aldığı bölgenin hemen

altındaki bir bölgedeki suda düşük basınç oluşturmakta ve bu bölgedeki suda, buhar ceplerinin oluşmasına neden olmaktadır. Buhar cepleri içeren suyun akmaya devam edip biraz ileride yüksek basınçlı bir bölgeye gelmesiyle, buhar patlaması yer almakta ve buradaki betonun yüzeyinde çok büyük bir gerilme oluşturmaktadır. Beton yüzeyinde oyulma, aşınma olmaktadır. En iyi kalitedeki betonlar dahi, kavitasyon olayı ile büyük hasar görebilmektedir kavitasyonu önlemenin birinci koşulu su taşıyan sistemlerin tasarımının ani değişikliklere yol açmayacak tarzda yapılmasıdır (Nergiz, 2007).

### 2.5.2.2. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, suyun ve dolayısıyla suyun içindeki zararlı kimyasal maddelerin beton içerisindeki hareket edebilme kabiliyetlerini ifade eder. Suyun beton içerisindeki hareketi; boşluk cinsine, boşluk büyüklüğüne, boşluk dağılımına ve mikro ve makro çatlaklara bağlıdır. Boşlukların yapısı ve çatlakların oluşmasında çimentonun kimyasal bileşimi ve beton içerisindeki agregaların özellikleri de etkilidir (Page, 2007).

Betonun içyapısında gözle görülen ya da görülmeyen büyük, küçük, sürekli veya süreksiz boşluklar bulunur. Boşlukların özellikle büyük ve sürekli olanları malzeme içerisinde sıvı ve gazların geçmesine ya da dış yüzeyleri tarafından gaz ve sıvıların emilmesine neden olurlar. Malzeme içerisindeki boşluk yapısı düzensiz ve çok karışık olduğundan tam bir sınıflandırma yapmak zordur, ancak boşlukları genel olarak sürekli (açık) ve süreksiz (kapalı) boşluklar olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür.

Betonun içyapısını değerlendirmek amacıyla boşluklar boyutlarına göre sınıflandırıldığında mikro, mezo ve makro boşluklar olarak isimlendirilir.

Ancak boşlukları, çimento hamuru içerisindeki konumuna göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabiliriz;

- Agregatanelerinin kendi yapıları içindeki boşluklar: Agregat boşlukları genelde küçük çaplı olup; agreganın cinsine, çap ve şekline göre değişir.
- Sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar: Sertleşmiş çimento hamuru içinde (10-35)A° boyutundaki boşluklar jel boşlukları, (60-160)A° boyutundaki boşluklar da kılcal boşluklar olarak tanımlanır. Bu boşlukların miktar, çap ve şekilleri betonun su/çimento oranına, hidrasyon derecesine, agreganın en büyük tane boyutuna, çimento cinsine vs. bağlı olarak değişir. Donma-çözünme olayı büyük

ölçüde bu sistem üzerinde gerçekleşir. Genellikle birbirine bağlı olan kılcal boşluklar, zamanla hidrasyon olayının gelişmesi sonucunda tıkanarak sürekliliklerini kaybedebilirler.

- Agreganın içerisinde kalan boşluklar: Bu boşluklar özellikle betonun iyi yerleştirilmemesinden kaynaklanır, kuru kıvamdaki betonlarda görülür. Agreganın taneleri arasındaki boşlukları ince malzeme doldurmadığı durumlarda ortaya çıkar.
- Plastik kıvamdaki betonun çimento hamurunun agreganın tanelerinin arasını doldurması sırasında meydana gelen küresel biçimdeki hava boşluklarıdır. Betonda ayrıca rötre neden olduğu çatlak ve boşluklar da bulunur. Hidrasyon ilerledikçe çimento ve suyun mutlak hacmi kademeli olarak azalır. Hidrasyon sonunda herhangi bir su/çimento oranına sahip çimento hamuru, taze çimento hamurunun başlangıçta doldurduğu hacmi tamamen doldurmaz ve rötre çatlakları oluşur (Uyan, 1975; Povers, 1956; Auskern, 1973; Postacıoğlu, 1969). Yukarıda belirtilen bu boşluk sistemlerinin sürekli ve büyük olması betonun permeabilitesi, basınç dayanımı ve durabilitesi bakımından önemlidir.

Daha önce de değinildiği üzere dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik, betonun boşluk yapısı ve oranıdır. Bu durum betonun geçirimsizliği ile doğrudan bağlantılıdır. Suyun veya diğer akışkanların beton içindeki iletimi bu yolla olur ve zararlı maddeler bu şekilde betonun içinde taşınır (Akman, 1989; Young, 1998). Bu açıdan beton içindeki rutubet hareketinin mekanizmasını iyi anlamak gerekir. Betonda akışkan hareketi üç şekilde gerçekleşir. Bunlar;

1-) Malzemenin boşluklarının tamamının suya doygun olduğu ve mevcut su basıncı etkisi ile meydana gelen doymuş akım.

2-) Betonun boşluklarının kısmen suyla dolu olduğu, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle meydana gelen doymamış akım (kılcallık)

3-) Betonun boşluklarında iki bölge arasındaki mevcut buhar basıncı farkı dolayısıyla meydana gelen su buharı akımıdır (Uyan, 1975; Uyan, 1988; Kocataşkın, 1957; Kocataşkın, 1995; Neville, 1995).

Betonun bileşimi ile ilgili olarak, su/çimento oranı, çimento cinsi ve miktarı betonun geçirimsizliğini etkileyen önemli faktörlerdir.

Geçirimsiz beton üretebilmek için dikkat edilmesi gereken kuralları sıralayacak olursak;

- Beton üretiminde kullanılacak çimento standartlara uygun olmalıdır.

- Küttele betonlarının üretiminde hidrasyon ısı yüksek olan çimento kullanılmamalıdır.
- Su/çimento oranı düşük tutulmalıdır.
- Kimyasal katkıları kullanılmalıdır.
- Uçucu kül, Öğütölmüş tras gibi ince taneli mineral katkıları kullanılmalıdır.
- Beton, segregasyona uğramamalıdır.
- Betonun sıkıştırılmasına önem verilmelidir.
- Beton dökümünün bitirilmesinden hemen sonra kür uygulanmalıdır (Baradan vd., 2002).

#### **2.5.2.2.1. Su Emme**

Sertleşmiş betonun içindeki boşlukların tümü suyla dolu değil ise, ıslak ortamda, betonun içerisindeki boşluklara dışarıdan su girebilmektedir. Bu işlem, betonun suya doygun duruma gelebilmesine kadar devam edebilmektedir.

Beton tarafından, içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekilmesi işlemine su emme denir.

Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmi ile ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise, su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, beton elemanının boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir.

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır. Ayrıca, betonun dayanıklılığı da betondaki su emme özelliği tarafından etkilenmektedir (Göktepe, 2008).

##### **2.5.2.2.1.1. Betonda Kılcal Yolla Su Emme Miktarının Belirlenmesi**

Betonda kılcal su emme, betonun suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı ile belirlenir. Çok küçük çaplı boşluklar içerisinde emilen su kılcallık etkisi ile yükselir. Betonarme yapılarda istenmeyen bu durumun kontrolü için, betonda kılcal su emme deneyi yapılır. Bu deneyde üretilen beton, prizma şeklinde kalıplara yerleştirilir, deney zamanı geldiğinde numuneler önce 70°C lik etüvde 24 saat bekletilerek tamamen kurumaları sağlanır. Numunelerin su yüzüne temas eden yüzeyi haricindeki yüzeylerinden su

emilmesini önlemek için parafinle kaplanır ve kuru ağırlığı belirlenir. Daha sonra numunenin bir yüzü su ile temas edecek şekilde tepsiye yerleştirilir ve belirli aralıklarla ağırlığı ölçülür. Yapılan çalışmalarda emilen suyun hacminin, zamanın kara kökü ile doğru orantılı olduğu belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik kabul edilmiştir (Onaran, Güner vd., 2000).

$$\Delta Q = A\sqrt{kxt} \quad (2.12)$$

$\Delta Q$ =Numune ağırlığındaki değişim

$A$ =Numunenin su yüzüne temas eden taban alanı ( $\text{cm}^2$ )

$k$ =Kılcallık katsayısı

$t$ =Son okumanın yapıldığı zamanı temsil etmektedir (dk).

### 3. YAYIN TARAMASI

Tanyıldızı, H.ve Coşkun, A. (2011), elazığ yöresine ait vişneçürüğü mermer tozu, agrega olarak pomza taşı kullanarak elde ettikleri taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımını ve ultrasonik ses geçirgenliğini araştırmışlardır. Deneylede kullanılan vişneçürüğü mermer tozu, çimento ağırlığının %0, %10, %20'si oranında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında maksimum dane çapı 16mm olan pomza taşı kullanılmıştır. Basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliği deneyleri için 150x150x150 mm ölçülerindeki küp numuneler hazırlayarak, numunelere 7, 14, 28 ve 90 gün 20°C de standart su kürü uygulamışlardır. Kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve ultrasonik ses geçirgenlik hızlarını ölçmüştür. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlara göre, %10 mermer tozu katkılı beton numuneler 28. günden sonra kontrol betonuna göre daha iyi dayanım özelliği göstermeye başlamıştır. Ayrıca %20 mermer tozu katkılı hafif beton basınç dayanımı değerleri kontrol betonuna göre daha düşük dayanım özelliği göstermiştir.

Demirel, B. ve Yazıcıoğlu, S. (2010), mermerlerin fabrikalarda işlenmesi sırasında açığa çıkan atık mermer tozlarının betonda ince malzeme olarak kullanımını incelemiştirlerdir. Bu amaçla atık mermer tozlarını %0, %25, %50 ve %100 oranlarında 0,25mm'lik elekten geçen ince malzeme ile ağırlıkça yer değiştirilerek farklı beton serileri oluşturmuşlardır. Çalışmalarında kür yaşına bağlı olarak numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişimi gözleyebilmek için tüm serilerin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerini de belirlemişlerdir. Ayrıca serilerin ultrases geçiş hızları poroziteleri, birim ağırlıkları ve dinamik elastisite modülleri tespit edilerek, sonuçlar birbirleriyle ve basınç dayanımı değerleriyle kıyaslanmıştır.

Araştırmacılar yapılan çalışmaların sonucunda, betona 0,25mm lik elekten geçen ince malzeme ile ikame olacak şekilde belirli oranlarda atık mermer tozu ilavesinin tüm kür yaşlarında basınç dayanımını artırıcı etkisi olduğunu gözlemlemiştirlerdir. Bu nedenle, mermer işletme tesislerinin atığı olan ve büyük çaplı çevresel kirlilik oluşturan mermer tozunu, normal dayanımlı betonlarda ince malzeme yerine kullanarak özellikle mermer üretiminin fazla olduğu bölgelerde çevresel kirliliği önlemek ve doğal kaynakları daha az tüketmek mümkün olacaktır sonucuna varmışlardır.

Özdemir, A. (2009), çalışmasında farklı oranlardaki filler içerikleri kullanımının, betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hazırladığı tez kapsamında, farklı oranlarda bağlayıcı ve filler içeren beton numuneleri hazırlamış, bu numuneler üzerinde taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri gerçekleştirmiş ve elde edilen deney sonuçlarını inceleyerek, seçilen filler oranları için beton numuneleri üzerinde performans analizleri yapmıştır. Çalışmasının sonucunda filler içeriğinin belirli oranlarda kullanımının betonun mekanik karakteristiğini olumlu yönde geliştirdiğini bulmuştur.

Özdemir, E. (2006), portland çimentosu (PÇ) ile birlikte uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) gibi mineral katkı maddelerinin, ikili, üçlü, ve dörtlü kombinasyonları, harç numunelerinin işlenebilirlik, basınç, eğilme, aşınma ve rötre özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Çalışmasında araştırmacı, tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranını 0,50 olarak belirlemiştir. Basınç, eğilme, aşınma dayanımı sonuçlarına göre tekli mineral karışımlarda %5-%30 mertebesinde UK, %5-%20 mertebesinde SD ve %5-%50 mertebesinde GYFC'nun çimento katkı maddesi olarak kullanılabilceği kanaatine varmıştır. Araştırmacı çalışmasında bir yılın sonunda ikili mineral karışımlardan SD+UK içeren numuneler %1-%13, SD+GYFC içeren numuneler %1-%9 ve üçlü mineral karışımlar içeren numuneler ise %2-%15 arasında şahit numuneden daha yüksek basınç değerleri geliştirdiğini bulmuştur. Harç numunelerinin aşınma değerlerinin genel olarak uzun dönemde daha iyi olduğunu tespit etmiş, tüm karışımlarda özellikle UK'ün rötreyi azalttığını ve SD'ın ise rötreyi artırdığını tespit etmiştir.

Özgan, E. (2005), kırma taş agregası içerisinde bulunan taş ununun betonun basınç mukavemetine olan etkisini araştırmıştır. Bu amaçla araştırmacı kırma taş agregadan elde edilen 200 dozlu beton içerisine, ince agregadan %0, %5, %10 ve %15 oranlarında azaltılmak suretiyle yerine taş unu ilave etmiş ve basınç dayanımlarını araştırmıştır. Beton uygulamalarında agregası içerisindeki ince malzeme belirli miktarları aştığında agregası yıkanarak kullanılmaktadır. Kırmataş agregası içerisinde taş-unu bol miktarda bulunmaktadır. Bu malzemelerin betonun özelliklerine olumsuz bir etkisinin görülmemesi agreganın yıkanması gereğini ortadan kaldıracaktır. Bu araştırmada elde edilen sonuçlara göre taş unu'nun kırma taş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilediği saptanmıştır.



Ünal, O. ve Kibici, A. (2001), mermer tozu atıklarının (havuz çökeltisi) beton karışımı içerisinde ince malzeme olarak kullanılması durumunda beton basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında kum olarak kırma taş malzeme, çimento olarak da PKÇ 32,5 tipi katkılı portland çimentosu kullanmışlardır. Araştırma kapsamında tüm beton karışımlarının s/ç oranlarını ve slump değerlerini sabit tutmuşlardır. Mermer tozu (havuz çökeltisi) katkılı beton bileşimlerinde çimento dozajı 300 ve 350 kg olmak üzere iki seri karışım amaçlamışlardır. Karışıma ekledikleri mermer tozu miktarını da hacimce %0, %10, %15 ve %20 oranlarında değiştirmişlerdir. Araştırmacılar taze beton üzerinde birim hacim ağırlık, çökme ve hava boşluğu tayini deneylerini, sertleşmiş beton numuneler üzerinde de 28 günlük basınç mukavemet deneyi, ultrases hızı deneyi, su emme deneyi ve çekme deneyi yapmışlardır.

Araştırmacılar sonuç olarak, mermer tozlarının beton karışımında kullanılmasının beton kalitesine olumsuz bir etki yapmadığını, mermer atıklarının beton tesislerinde ince malzeme olarak değerlendirilebileceğini böylece ekonomiye katkısının yanında çevresel kirliliğin de azalmasını sağlayabileceğini söylemişlerdir.

Hürbaş, M. vd. (2003), üretilen ince agregaların, betonda doğal agregaların yerine ne şekilde ikame edilebileceğini araştırmışlardır.

Çalışmalarında Çatalca bölgesi beyaz kalkerinden faydalanmışlar ve farklı kırma prensibiyle çalışan kırıcılar ile kırma kum üretmişlerdir. Çalışmalarında üretilen kırma kumlar ve betonda doğal agrega olarak kullanılan deniz kumu numunelerinden alınan ince kesitleri mikroskopta inceleyerek şekilsel özelliklerini belirlemişlerdir. Ürettikleri kırma kumlar, deniz kumu ve yine Çatalca beyaz kalkerinden üretilen taş tozu ile fiiliyatta beton santrallerinde uygulanan beton dizaynı baz alınarak toplam 24 adet beton denemesi yapmışlardır. Tüm denemelerde aynı yığından alınan agregalar kullanılmış, etkin su/çimento oranını ve çimento dozajını, tüm denemeler için sabit tutmuşlardır. Yapılan denemelerde her bir beton numunesine üretildiği anda çökme deneyi yapılarak, işlenebilirlikleri hakkında bilgi edinmişler ve beton numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç mukavemetlerini belirleyerek şahit beton dizaynının işlenebilirliği ve basınç mukavemetleri ile diğer beton numunelerinin işlenebilirlik ve mukavemetlerini kıyaslamışlardır. Çalışmalarında farklı kırma prensibiyle çalışan kırıcılarla üretilen kırma kumların, benzer miktarda köşeli, yassı ve kübik taneler içerdiği ve bu kırma kumların beton içerisinde de farklı etkilere yol açmadıklarını belirlemişlerdir. Taş tozu ve kırma kum taneleri arasındaki şekil farklılığının betonun işlenebilirliğine olumsuz bir etkisinin

olmadığını belirlemiş betonda taş tozu kullanım oranının artmasıyla diğer beton dizaynlarına kıyasla betonun su ihtiyacını artırdığını, buna rağmen şahit beton dizaynlarına göre beton mukavemetlerinin yükseldiği sonucuna varmışlardır.

Taşdemir, C. ve Atahan, H. N., (1996), filler malzemelerin betonun mekanik özelliklerine ve durabilitesine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmalarında, PÇ 32,5 çimento, agrega olarak doğal ve kırma taş agrega, kalker filleri, akışkanlaştırıcı olarak naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı kullanmışlardır. Araştırmalarında çimento ağırlığının %10'u oranında mineral filler malzeme (kalker filleri veya silis dumanı) kullanmışlardır. Her beton serisinde su/(çimento+filler malzeme) oranını ve hazırlanan beton karışımların çökme değerlerini (80-90mm) sabit tutmuşlardır.

Hazırlanan beton numuneler üzerinde çökme deneyi, hava içeriği tayini deneyi, kompozite deneyi, taze beton birim hacim ağırlık deneyi, basınç dayanımı deneyi, eğilme dayanımı deneyi ve gevreklik indisi tayini deneyi yapılmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda araştırmacılar çimento ağırlığının %10'u kadar kalker filleri kullanımının betonun mekanik dayanımlarını fazla etkilemediğini, kalker fillerinin çimentonun klinkeriyle birlikte öğütülerek veya çimentoya doğrudan katılarak kullanılmasının yakıt tasarrufu sağlayacağını ve çevrenin daha az kirlenmesine katkıda bulunacağını, kalker fillerinin ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabileceğini, böylece betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-harç ara yüzündeki boşlukların doldurulmasında kalker fillerinin önemli rol oynayacağını, betonun geçirimsizliğinin ve durabilitesinin olumlu yönde etkileneceğini belirlemişlerdir.

Tuygun, C. S., (2002), yapmış olduğu tez çalışmasında uçucu küllerin, betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmış olup, basınç dayanımına ve yerleştirme yüzdesine bağlı olarak uçucu külün etkinlik faktörünü incelemiştir.

Çalışma sırasında Çayırhan termik santralinden elde edilen ASTM C 618'e göre C sınıfı uçucu kül ve PÇ 42,5 çimento kullanmıştır. Beton karışımından belirli oranda çıkarılan (%10, %30 ve %50) çimentonun yerine aynı miktarda uçucu kül eklenerek farklı oranlarda su/bağlayıcı madde oranına sahip (0,50, 0,60, 0,70, 0,80 ve 0,90) betonlar üretilmiştir. 350 kg/m<sup>3</sup> dozlu bağlayıcı madde kullanılarak yapılmış olan çalışmada kontrol betonu olmak üzere 4 farklı uçucu kül yerleştirme yüzdesi ve 5 farklı su/bağlayıcı madde oranı kullanılarak 20 seri beton üretilmiştir. Üretilmiş olan bu betonlar 23°C su içerisinde ve 20°C ile 65 rutubetli ortam olmak üzere iki farklı kür koşulunda saklanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, uçucu külün betondaki işlenebilirliği artırdığını ve su ihtiyacını azalttığını gözlemlemiştir. Uçucu küllü betonların kontrol betonuna oranla erken yaşlarda düşük dayanım verdiği, rutubetli kür koşullarında etkinliğinin azaldığını görmüştür. k etkinlik faktörünün ise uçucu küllerin ikame yüzdesine bağlı olduğu bulunmuştur. Böylece uçucu küller için basit bir k değil yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak değişen bir k etkinlik faktörünün belirlenmesi bu çalışmadan çıkan sonuçlardan biridir. Özellikle düşük yüzdeli uçucu kül kullanımı ile betondaki 28. gün ve sonrasındaki basınç dayanımı değerleri, kontrol betonunkine yakın veya üzerinde değerler almaktadır. Ultrases deneyleri sonucunda ise uçucu küllerin betondaki boşluk miktarını azalttığı ve daha dolu bir beton üretilmesine neden olduğunu gözlemlemiştir. %50 yüksek yüzdeli uçucu kül kullanımının ise beton üzerinde mekanik özellikler açısından olumsuz sonuçlar doğurduğunu saptamıştır.

Christiano, H., (2004), kimyasal ve mineral katkıların kendiliğinden yerleşen harçların taze durumdaki özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, dört farklı mineral katkı, üç farklı süper akışkanlaştırıcı katkı ve iki farklı viskozite iyileştirici katkıyı değişik oranlarda kullanarak, kendiliğinden yerleşen harç üretilmiştir. Mineral katkı olarak uçucu kül, tuğla tozu, kalker tozu ve kaolin kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda, uçucu külün ve kalker tozunun işlenebilirlikleri artırmasına rağmen bu mineral katkıların çimento yerine kullanılması durumunda basınç dayanımını azalttığını ancak ince agrega olarak kullanılacaklarını belirlemiştir.

Yıldız, E., (2006), yaptığı çalışmada, puzolanik katkı malzemesi olarak diyatomit, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla; puzolanları, çimento yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame ederek beton karışımları üretmiştir. Ürettiği betonlar ile 10x10x10 cm boyutlarında küp numuneler hazırlamış ve bu numunelere 28, 90 ve 180 gün kür uyguladıktan sonra basınç ve aşınma dayanımı deneyleri yapmıştır. Ürettiği betonlar, hem birbirleri ile hem de PÇ 42,5 kullanılan kontrol betonu ile karşılaştırmıştır.

Deney sonuçlarına göre üretilen betonlar arasında en yüksek basınç ve aşınma dayanımları %10 Çankırı diyatomit ikameli betonda elde etmiştir.

Haberal, Y., (2010), betonun dayanımını ve dayanıklılığını arttırmak, akıcılığını geliştirmek, geçirimsiz ve kaliteli beton üretmek amacıyla standart bağlayıcı malzeme olarak bilinen çimento yerine kullanılabilen düşünen uçucu külün, klor iyon geçirgenliği ve donatı korozyonu üzerine araştırma yapmıştır.

Klor iyon geçirgenliğine ve korozyona karşı daha etkili beton üretmek amacıyla yapılan çalışmada CEM I 42,5 R çimento ve uçucu kül (çimento yerine) %15, %30 ve %45 oranlarında kullanılmak suretiyle beton karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca numunelere 28 ve 56 günlük olmak üzere dış ortam koşullarında ve suda bekletilmek üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Toplamda 16 farklı seri üretim yapılarak bu betonların mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Araştırma sonucunda, çimento yerine belirli oranda uçucu kül kullanımının hem klor iyon geçirimsizliğini azaltmada hem de korozyona karşı dayanıklılık açısından oldukça yararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Temizbaşıoğlu, N., (1996), kırma taş tozunun betonda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada agrega olarak kırma-taş, çimento olarak da CEM I 32,5 tipindeki çimento ve kimyasal katkı olarak da normal akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Araştırmacı deneysel çalışmasında kum ve kırma taş tozu yüzdeleri arasındaki değişimi, ince agrega olarak tamamen kırma-taş tozunda başlayıp (%100 kırma-taş tozu), %10 artırımlarla tamamen kuma kadar yapmıştır. Çimento dozajı ve çökme değerleri sabit 11 seri olarak üretim yapmıştır.

Çalışmalar sonucunda, kırma taş miktarı arttıkça aynı kıvama getirmek için gereken karışım suyu miktarının arttığını, betonun işlenebilirliğinin olumsuz yönde etkilendiğini ancak, kırma taş tozu miktarı ile basınç dayanımlarının arttığını, beton karışımında kırma taş tozu miktarı arttıkça taze beton birim hacim ağırlığının da arttığını, bu durumda kırma taş tozunun betonun daha boşluksuz daha az geçirgen hale getirdiğini belirlemiştir.

Akın, M., (2009), mikro silika ve uçucu kül muadili olarak 5 ve 20 µm'lik tane boyutlarına sahip kalsit kullanılarak beton numuneler üreterek numunelerin mekanik özellikleri ve durabilite davranışlarını karakterize etmiştir. Çalışmada kalsit ilavesinin, beton numunelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemediğini gözlemlemiştir. Durabilite deney sonuçları incelendiğinde ise, kalsit ilavesinin özellikle klor difüzyon geçirimsizlik katsayısını yaklaşık 15 katı kadar artırdığını gözlemlemiştir. Ucuz ve temini kolay, yerli üretim olan kalsitin, betona ilavesinin mekanik özellikleri değiştirmediği, ancak durabilite davranışlarını olumsuz etkilediğini gözlemlemiş, dolayısıyla dolgu malzemesi olarak kalsit içeren betonların baraj gibi yoğun kütle beton uygulamalarında kullanılmasının uygun ancak donatılı betonlarda uygulanmasının klor geçirimsizliğinin yüksek olması dolayısıyla uygun olmayacağı sonucuna varmıştır.

Günindi, İ., (2005), çalışmada, yüksek oranda Yumurtalık Sugözü uçucu külü içeren betonun basınç, eğilme ve aşınmaya karşı direnci deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada değişik miktarlarda uçucu kül kullanılarak farklı beton karışımları elde edilmiş ve süper akışkanlaştırıcı yardımı ile sabit su/çimento oranında betonlar üretilmiştir. Çalışmada uçucu kül ile çimento miktarlarından tasarruf sağlanmıştır. Beton basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığı görülmüştür. Uygun uçucu kül kullanımı ile ağırlıkça %10 yer değiştirme oranında normal beton dayanımına eşdeğer dayanım elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Uçucu kül içeren betonların dayanım özellikleri ile normal betonun özellikleri arasındaki ilişkinin benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Laboratuarda elde edilen verilere dayanarak mevcut uçucu külün çimentoyu %10-%40 oranında ikame edebileceği ve incelenen betonun, uygun bir şekilde dizayn edildiği takdirde özellikle beton yol kaplaması olarak kullanılabileceği kanaati oluşmuştur.

Çorbacıoğlu, C.U., (2008), yüksek performanslı betonları durabilite açısından inceleyebilmek için yaptığı bu çalışmada, betonun durabilitesine etki eden kılcallık, klor, geçirimsizlik ve rötre gibi faktörler için literatür çalışması yapmış ve betonda geçirimsizlik ve kısıtlanmış rötre ile ilgili deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneysel çalışmalarda pompalanabilir beton ve prekast beton adlarıyla iki farklı tür beton dizaynı, agrega ağırlıkları ve çökme değerleri sabit tutularak yedi farklı su/çimento oranı için hazırlamıştır.

Deneysel sonuçta, kılcal su emme ve klor geçirimsizliği incelendiğinde, mineral katkı betonların, mineral katkısız betonlara göre daha geçirimsiz olduğunu saptamıştır.

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Çalışmanın Amacı**

Günümüzde sanayileşme ve buna paralel inşaat sektörü hızla gelişme sürecindedir. Sanayideki bu gelişme, atık ürünlerin depolanması ve atıkların doğal çevreye atılması sonrası çevre kirliliği sorunlarını ortaya çıkarmaktadır.

İnşaat sektöründeki gelişme neticesinde de kaliteli beton ihtiyacı doğmuştur. Bilindiği üzere betonun bileşenleri arasında bağlayıcılık özelliği gösteren malzeme çimentodur. Çimentoyla birlikte kullanıldığında, betonun bazı özelliklerini olumlu yönde değiştirebilen, mineral katkı malzemeleri de bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel üretim ve imalat sonrası ortaya çıkan atık ürünlerden uçucu kül, mermer tozu, tuğla tozu ve taş tozunun betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılmasını araştırmak ve bu toz malzemelerin, betonun; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma dayanımı ve kılcallık gibi özellikleri üzerinde ne gibi değişiklik oluşturduğunu karşılaştırmalı olarak incelemektir.

### **4.2. Deney Programı**

Deneysel çalışmalar için 1 dökümü kontrol karışımı olmak üzere toplam 13 adet döküm yapıldı. Her bir dökümde 4 adet 15x15x15cm'lik küp numune, 2 adet 10x10x10cm'lik küp numune ve 1 adet de 10x10x40cm'lik kiriş numune hazırlanmıştır.

Bu numunelerden; 2 adet 15x15x15 cm lik küp numune 7 günlük basınç dayanımı deneyinde, 2 adet 15x15x15 cm lik küp numune 28 günlük basınç dayanımı deneyinde, 1 adet 10x10x40 cm lik kiriş numune eğilme dayanımı deneyinde, bu kiriş numunesinden kesilen 2 adet 71x71x71 mm lik küp numune aşınma deneyinde ve son olarak 2 adet 10x10x10 cm lik küp numune de kılcallık deneyinde kullanılmıştır.

Kontrol karışımındaki çimento miktarı  $350 \text{ kg/m}^3$ , su/çimento oranı 0,50 olarak seçilmiştir. Diğer karışımlardaki çimento miktarları, ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında azaltılarak yerlerine azaltılan çimento ağırlığı kadar tuğla tozu, mermer tozu, uçucu kül ve taş tozu kullanılmış, tüm karışımlardaki karışım suyu miktarı sabit tutulmuştur.

### 4.3. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

#### 4.3.1. Malzemeler

##### 4.3.1.1. Agregalar

Deneyleerde agrega olarak, Rize İlinin İkizdere İlçesinde, Cevahir hazır beton santralinin, dere yataklarından elde ederek kırıldığı ve beton üretiminde kullandığı kırma agrega ve doğal kum kullanılmıştır.

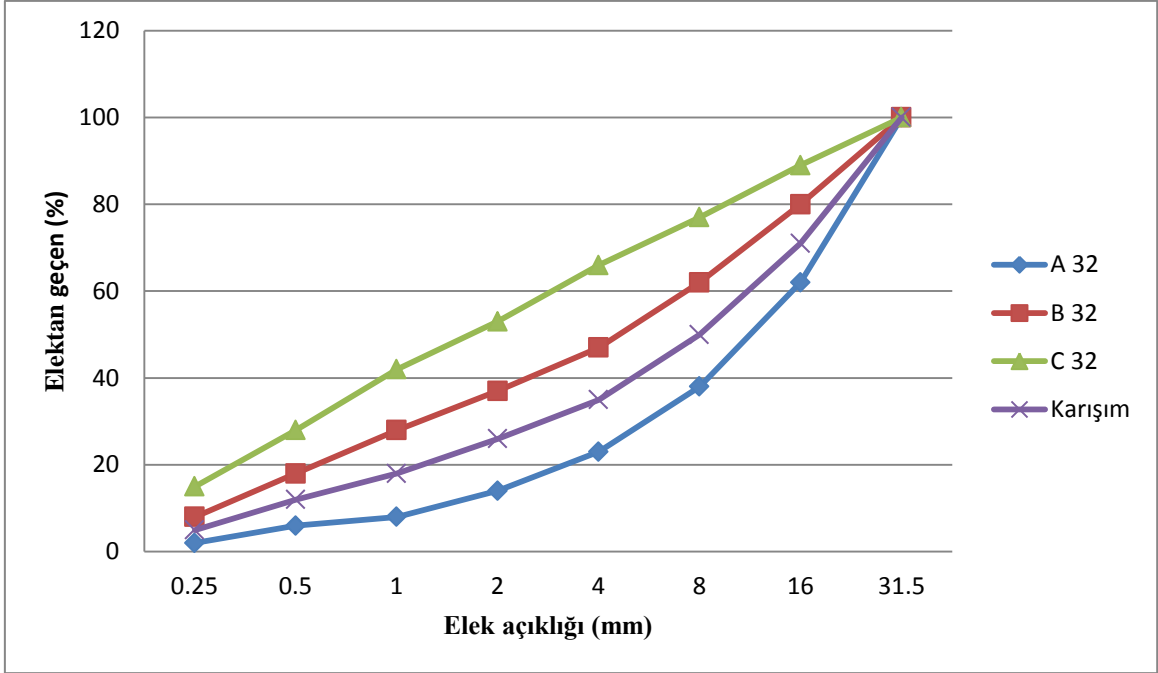
Her bir dökümde, karışım oranlarının değişkenlik göstermemesi ve sağlıklı yorum yapılabilmesi için agregalar; 0,00-4,00mm, 4,00-8,00mm, 8,00-16,00mm ve 16,00-31,5mm'lik boyutlara ayrılmıştır. Şekil 4.1'de agregalara ait sınır eğrileri ile birlikte agrega karışım eğrisi gösterilmiştir.

Agregalara TS 3526 standardına göre, özgül ağırlık ve su emme miktarı deneyleri ile TS EN 1975-5 standardına göre, su muhtevası deneyleri yapılmıştır.

Tablo 4.1'de agregalar için özgül ağırlık, su emme ve su muhtevası değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Agregalara ait özgül ağırlık, su emme ve su muhtevası değerleri

Agrega Sınıfları (mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Su Emme (%)	Su Muhtevası (%)
0,00-4,00	2,55	2,86	0,64
4,00-8,00	2,67	1,89	0,52
8,00-16,00	2,66	1,31	0,63
16,00-31,50	2,69	1,10	0,60



Şekil 4.1. Agrega karışımına ait granülometrik eğri ve sınır eğrileri

#### 4.3.1.2. Çimento

Deneylerde Aşkale Çimento fabrikasının TS EN 197-1 standartlarına göre ürettiği CEM I 42,5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait laboratuvar analiz raporu Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan çimentoya ait laboratuvar analiz raporu

Kimyasal Analiz		Fiziksel Analiz	
	Sonuçlar (%)		Sonuçlar(%)
SiO <sub>2</sub>	20,48	45 mikron elek üstü	7,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,29	32 mikron elek üstü	14,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,72	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	4089
CaO	62,47	Priz başlama süresi (dak.)	135
MgO	1,71	Priz sona erme süresi (dak.)	200
SO <sub>3</sub>	2,81	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,12
Kızdırma kaybı	2,82	Genleşme (mm)	1
Na <sub>2</sub> O	0,21	Standart kıvam su miktarı	29,30
K <sub>2</sub> O	0,88	Basınç dayanımı 1.gün (N/mm <sup>2</sup> )	14,2
Cl <sup>-</sup>	0,021	Basınç dayanımı 2.gün (N/mm <sup>2</sup> )	25,8
		Basınç dayanımı 7.gün (N/mm <sup>2</sup> )	39,9
		Basınç dayanımı 28.gün (N/mm <sup>2</sup> )	49,6



#### 4.3.1.3. Su

Çalışmalarımızda Trabzon şehir şebekesine ait içme suyu kullanılmıştır.

#### 4.3.1.4. Uçucu Kül

Deneylelerimizde, Sugözü termik santralinden elde edilerek Deriner Barajı inşaatında kullanılan F sınıfı , TS EN 450-1, TS EN 196-2 ve TS EN 196-6 standartlarını sağlayan uçucu kül kullanılmıştır. Tablo 4.3'de uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Deneylelerde kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO <sub>2</sub> (Silisyum Dioksit %)	58,75	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2,32
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %)	29,17		
S+A+F %	87,92		
CaO (Kalsiyum Oksit %)	3,36	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3050
MgO (Magnezyum Oksit %)	1,45		
Cl <sup>-</sup> (Klorür %)	0,002		
SO <sub>3</sub> (Kükürt Trioksit %)	0,15	45 mikron elek üstünde kalan yüzde (incelik)	16,1
Kızdırma kaybı %	1,37		
Çözünmeyen kalıntı %	87,56		

#### 4.3.1.5. Tuğla Tozu, Mermer Tozu ve Taş Tozu

Deneylelerimizde kullanılan tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozuna ait elek analiz sonuçları Tablo 4.4'de, birim hacim ağırlıkları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozuna ait elek analizi sonuçları

Elek Açıklığı	Elekten Geçen Yığışım Yüzde (%)		
	Tuğla Tozu	Mermer Tozu	Taş Tozu
1mm(milimetre)	100	100	100
500 mikron	65,24	77,6	100
250 mikron	62,76	76,28	99,68
125 mikron	48,50	53,4	96,54
63 mikron	25,58	17,7	84,68

Tablo 4.5. Tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozuna ait birim hacim ağırlıkları

Toz Malzemeler	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )
Tuğla Tozu	2,62
Mermer Tozu	2,82
Taş Tozu	2,44

### 4.3.2. Ekipmanlar

#### 4.3.2.1. Betoniyer

Üretimlerde Şekil 4.2’de gösterilen 60 lt kapasiteli pan tipi betoniyer kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Betoniyer

#### 4.3.2.2. Terazi

Karışımlardaki agrega, çimento, su ve toz malzemelerin tartımı ile beton numunelerinin su içerisinde tartılmasında Şekil 4.3’de gösterilen, 1 gr hassasiyetinde 30 kg tartma kapasiteli, Mettler markalı Arşimet terazi kullanılmıştır.



Şekil.4.3. Arşimet terazisi

Agregaların birim hacim ağırlıklarının bulunmasında, kılcallık ve aşınma deneylerinde beton numunelerinin tartılmasında Şekil 4.4’de gösterilen, 0,1 gr hassasiyeti bulunan 10 kg tartma kapasiteli Radway markalı terazi kullanılmıştır.



Şekil.4.4. 0,1 gr hassasiyeti bulunan terazi

#### 4.3.2.3. Etüv

Agregaların birim hacim ağırlıkları, su emme miktarları ve su muhtevalarının bulunması ve üretilen beton numunelerinin, kılcallık ve aşınma deneyleri öncesinde kurutulması işlerinde kullanılan Geniar markalı etüv Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Etiv

#### 4.3.2.4. Beton Eğilme ve Basınç Test Presi

Numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesinde Şekil 4.6'da gösterilen, basınç deneyi için 250 ton kapasiteli, eğilme deneyi için 20 ton kapasiteli Dinç Makine üretimi beton test presi kullanılmıştır.



Şekil.4.6. Eğilme ve basınç test presi

#### 4.3.2.5. Böhme Yüzey Aşındırma Test Cihazı

Beton numuneler üzerinde aşınma deneyleri için Şekil 4.7’de gösterilen, 30 devir/dk.  $\pm 1$  devir/dk hızla dönen, yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş bir aşındırma diski bulunan ve numuneye dönen disk üzerinde belirli bir kuvvet uygulayan, her 22 devirde cihazı otomatik olarak durduran tertibata ve bir numaratóre sahip böhme aşındırma test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Böhme yüzey aşındırıcı test cihazı

#### 4.4. Üretilen Betonların Bazı Fiziksel Özellikleri

Ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında çimento yerine toz malzeme kullanılarak yapılan karışımlar için şu kısaltmalar kullanılmıştır.

TĞT 10=Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım.

TĞT 20= Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım.

TĞT 30= Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen tuğla tozlu karışım.

MT 10= Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım.

MT 20= Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım.

MT 30= Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen mermer tozlu karışım.

UK 10= Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen uçucu küllü karışım.

UK 20= Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen uçucu küllü karışım.

UK 30= Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen uçucu küllü karışım.

TŞT 10= Çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen taş tozlu karışım.

TŞT 20= Çimento ile ağırlıkça %20 oranında ikame edilen taş tozlu karışım.

TŞT 30= Çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilen taş tozlu karışım.

Üretilen beton numunelerine ait bazı fiziksel özellikler Tablo 4.6’da verilmiştir. Her bir üretimin 1 m<sup>3</sup>’üne karşılık gelen karışım oranları ek tablolarda gösterilmiştir

Tablo 4.6. Üretilen betonların bazı fiziksel özellikleri

Beton Numuneler	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	Görünen Porozite (%)	Su Emme (%)
KK	2,276	12,478	5,482
TĞT 10	2,264	12,986	5,737
TĞT 20	2,263	12,638	5,584
TĞT 30	2,248	13,314	5,923
MT 10	2,289	11,863	5,183
MT 20	2,287	12,228	5,346
MT 30	2,262	13,347	5,91
UK 10	2,288	11,899	5,201
UK 20	2,260	12,874	5,696
UK 30	2,259	13,061	5,783
TŞT 10	2,265	12,872	5,683
TŞT 20	2,272	13,168	5,795
TŞT 30	2,253	13,994	6,211

#### 4.5. Beton Üretimi ve Yapılan Deneyler

##### 4.5.1. Beton Üretimi

Üretimlerde, agregalar betonyere yerleştirildikten sonra doyma suyu eklenmiş ve 2-3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra çimento ve kullanılacak toz malzeme ilave edilerek karışım suyu dökülmüş karışım homojen hale gelinceye kadar yaklaşık 5 dakika karıştırılmıştır.

Hazırlanan karışımlar, sarsma tablası yardımıyla Şekil.4.8.’de gösterilen daha önceden yağlanarak hazır hale getirilmiş olan kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 4.8.Hazırlanan karışımların kalıplara yerleştirilmesi

Üretilen numuneler 24 saat bekleldikten sonra kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna yerleştirilmiştir. Şekil 4.9.



Şekil 4.9.Kür havuzu

## 4.5.2. Yapılan Deneyler

### 4.5.2.1. Çökme (Abrams Hunisi) Deneyi

Hazırlanan numunelerin işlenebilirliğini belirlemek için Şekil 4.10'da gösterildiği üzere çökme (Abrams hunisi) deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.10. Çökme (Abrams hunisi) deneyi

### 4.5.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Üretim tarihinden itibaren 7. ve 28. günlerde kür havuzundan çıkarılan 15x15x15 cm'lik küp numuneler, basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

### 4.5.2.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Üretim tarihinden sonra 28. günde kür havuzundan çıkarılan 10x40x40 cm'lik kiriş numuneler orta noktasından yüklenmiş basit kiriş yöntemi deneyine tabi tutulmuş ve eğilme dayanımları belirlenmiştir.



#### 4.5.2.4. Kılcal Su Emme (Kılcallık) Deneyi

Üretim tarihinden 27 gün sonra kür havuzundan çıkarılan 2 adet 10x10x10 cm'lik küp numuneler etüve konulmuş ve 24 saat boyunca 70°C de kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler 20 °C deki klimatize odada soğumaları beklenmiş ve kuru ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır.

Deney sırasında numunelerin yan yüzeylerinden su girişinin engellenmesi için izolasyon amaçlı bantlarla çevrilmiş, Şekil 4.11'de görüldüğü üzere plastik küvet içerisine yerleştirilerek 5.dk, 10.dk, 20.dk, 30.dk, 45.dk, 60.dk, 120.dk, 24 saat ve 48 saat sonraki ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır.



Şekil 4.11.Kılcallık deney düzeneği

Yapılan tartımlar sonrası TS EN 772-11 standardına göre, suya temas etme süresinin kareköküne karşılık gelen, emilen su miktarının kesit alanına bölüm değeri işaretlenerek grafik çizilmiş ve grafiğin başlangıçtaki doğrusal parçasının eğimi kılcallık katsayısı olarak hesaplanmıştır. Her bir karışımın kılcallık katsayısının hesaplanmasında çizilen grafikler ekteki şekillerde verilmiştir.

#### 4.5.2.5. Aşınma (Böhme) Deneyi

Yüzey aşınmasını bulabilmek için Böhme aşınma deneyinden faydalanılmıştır. Üretilen kırıç numunelerden, 71x71x71mm boyutlarında yeni numuneler kesilmiş, bu numunelerin birim hacim ağırlıklarının bulunabilmesi için doygun halde havada ve suda

tartımları yapılmış daha sonra 100°C’de 24 saat kurutulmuşlardır. Klimatize odada soğutulan numuneler aşındırıcı diske, temas eden yüzeyi ve ona karşılık gelen yüzü paralel ve düz olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneyde aşındırıcı yüzeye 20 gr  $\pm$  0,5 gr zımpara tozu (korundum) serpilmiş ve numune üzerine 294  $\pm$  3 N yük uygulanarak disk 22 tur çevrilmiştir. Her 22 tur sonrası disk yüzeyi temizlenip, tekrar 20 gr  $\pm$  0,5 gr zımpara tozu serpilerek numune aynı yüzeyi üzerinde 90° döndürülmüş ve bu işlem iki numune üzerinde 16 defa tekrarlanmıştır.

Deney sonrası numunelerin hacimsel aşım kaybı, aşağıda belirtilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$DV=Dm/ \delta R \quad (4.1)$$

Burada;

DV=Hacimsel kayıp (cm<sup>3</sup>/50cm<sup>2</sup>)

Dm=16 periyot sonrası kütle kaybı (gr)

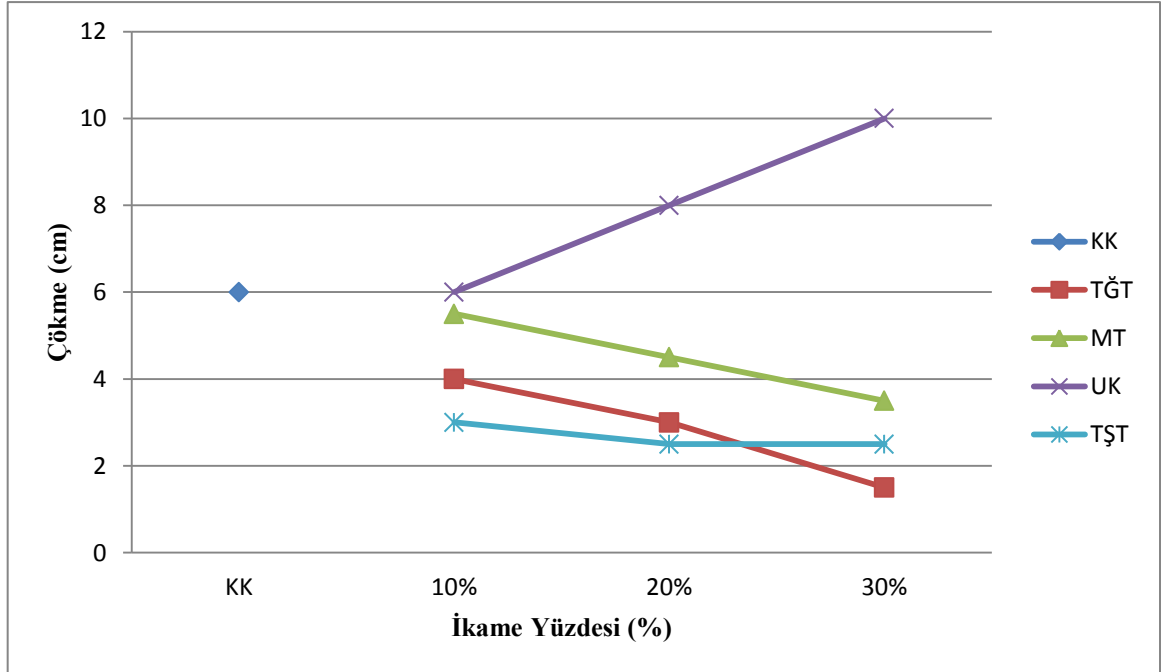
$\delta R$ =Örnek birim hacim ağırlığı (gr/cm<sup>3</sup>)

## 5. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR

### 5.1. Taze Beton Deneyi

#### 5.1.1.Çökme (Abrams Hunisi) Deneyi

Kontrol karışımının çökme değeri ve çimento ile ağırlıkça ikame edilen toz malzemeli karışımların ikame oranlarına göre çökme değerlerindeki değişim Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kontrol karışımı çökme değeri ve çimento ile ağırlıkça ikame oranlarına göre toz malzemeli karışımların çökme değerleri değişimleri

Yukarıdaki şekil incelendiğinde, karışımlarda kullanılan toz malzeme oranı attıkça, sadece uçucu küllü karışımların çökme değerlerinin arttığı, diğer karışımların çökme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çökme değerlerindeki değişimlere bakıldığında kontrol karışımına göre değerlendirecek olursak; uçucu külün betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkilediği

diğer toz malzemelerin betonun işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

## 5.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

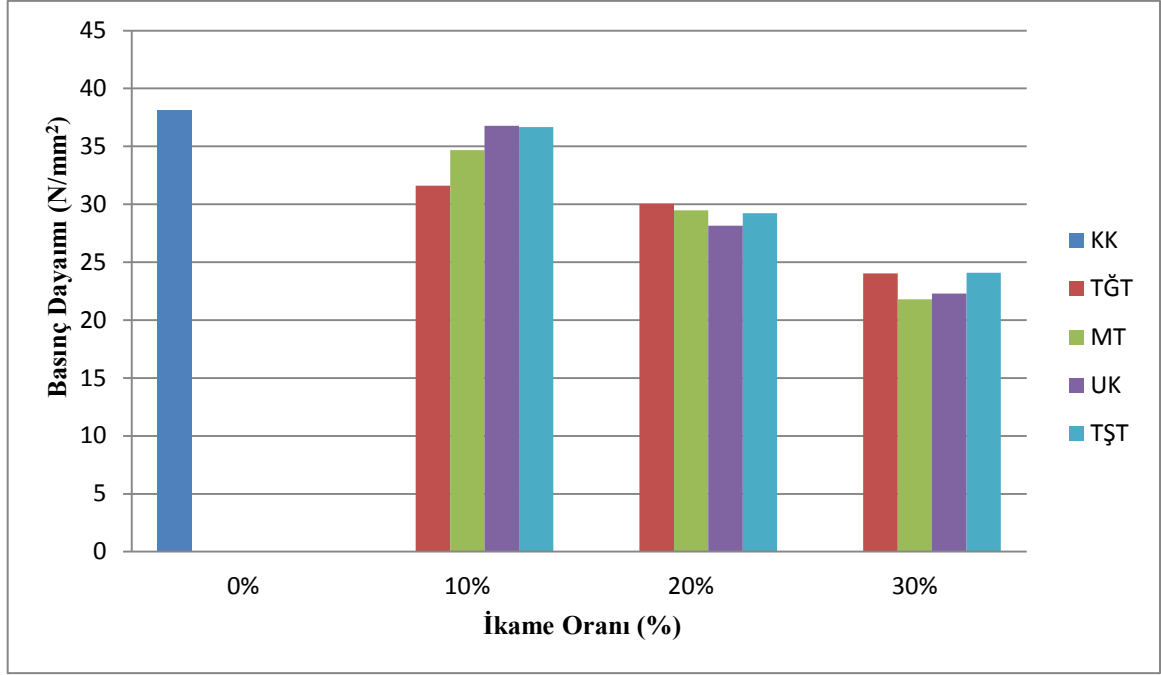
### 5.2.1. Basınç Dayanımı

Üretilen numunelerin 7 günlük ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

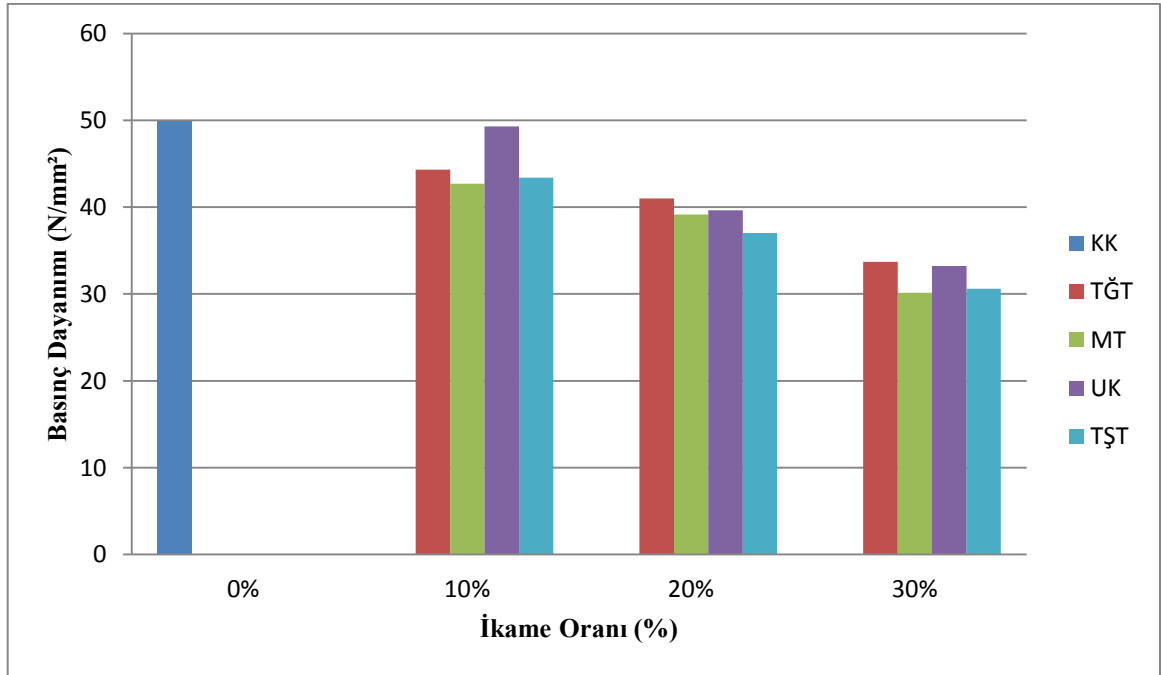
Tablo 5.1. Karışımların 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri

İkame Oranları (%)		7 Günlük Basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )				28 Günlük Basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )			
		%0	%10	%20	%30	%0	%10	%20	%30
Karışım Kodu	KK	38,16				49,9			
	TĞT		34,62	30,02	24,02		44,3	41,01	33,70
	MT		34,68	29,47	21,79		42,71	39,15	30,14
	UK		36,78	28,16	22,28		49,28	39,62	33,22
	TŞT		36,67	29,23	24,09		43,41	37,01	30,62

Şekil 5.2’de kontrol karışımı ve çimento ile ağırlıkça ikame edilen karışımların 7 günlük basınç dayanımları, Şekil 5.3’de aynı karışımların 28 günlük basınç dayanımları değerlerini bir arada gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 5.2. Kontrol karışımı ve toz malzemeli karışımların ikame oranlarına göre 7 günlük ortalama basınç dayanımları

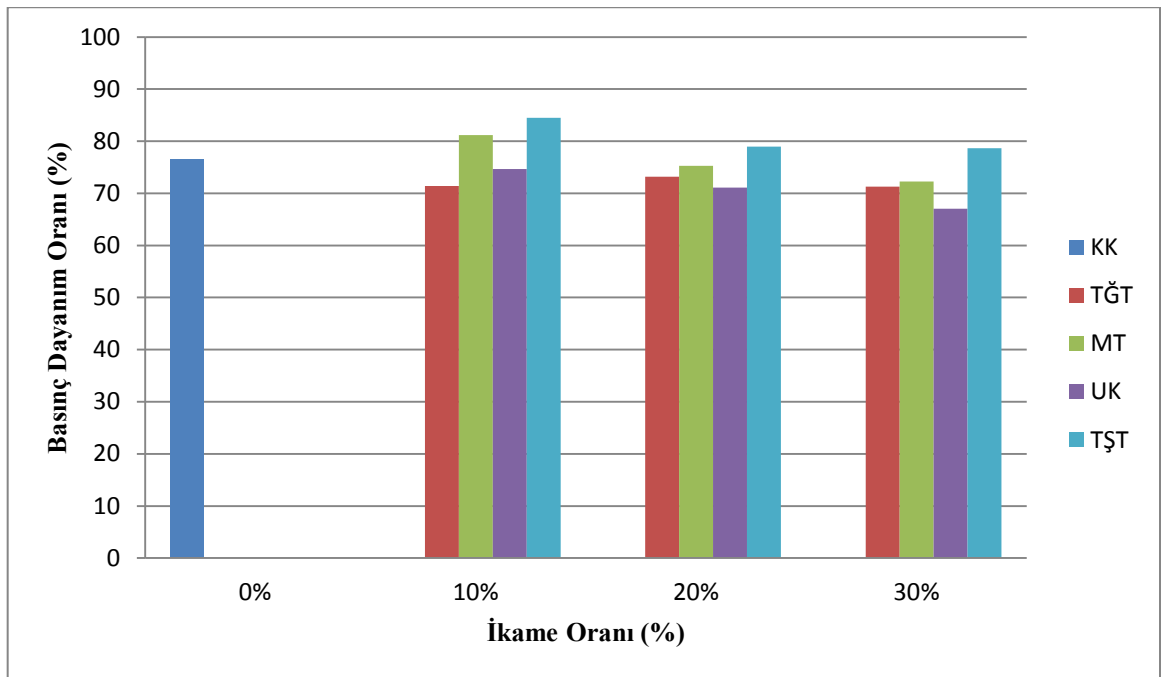


Şekil 5.3. Kontrol karışımı ve toz malzemeli karışımların ikame oranlarına göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları

Şekil 5.3'deki grafikte de görüldüğü üzere kontrol karışımının 28 günlük basınç dayanımı değerleri, diğer karışımların basınç dayanımı değerlerinden yüksek çıkmıştır.

Sadece çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilen karışımlar içerisinde kontrol karışımı ile uçucu küllü karışımın basınç dayanımı değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. İkame oranı arttıkça, basınç dayanımı değerleri düşmüştür. Kontrol karışımının 28 günlük basınç dayanımı 50 N/mm<sup>2</sup> iken, % 30 ikame düzeyindeki dayanımlar 30 N/mm<sup>2</sup> düzeyine inmiştir.

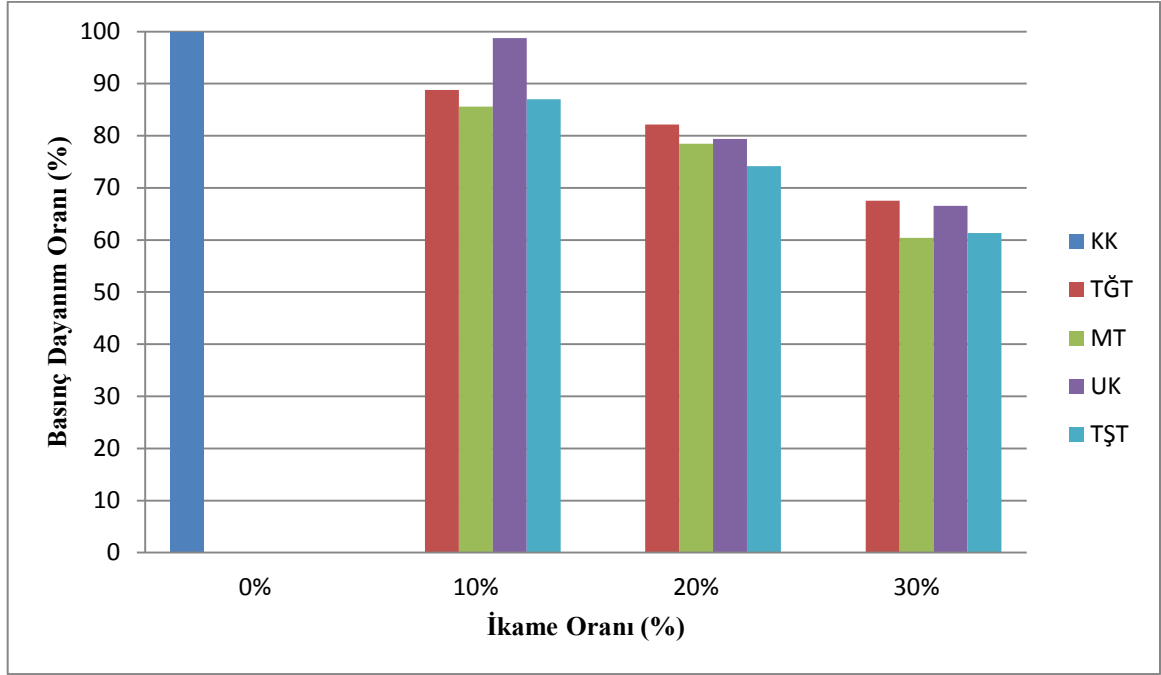
Şekil 5.4'de kontrol karışımı ve diğer karışımların çimento ile ağırlıkça ikame edilme oranlarına göre 7 günlük dayanımlarının 28 günlük dayanımlarına oranları grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.4. 7 günlük dayanımların 28 günlük dayanımlara oranları

Kontrol karışımı 7 günde 28 günlük dayanımının yaklaşık % 76'sını kazanmıştır. Genel olarak ikame oranı arttıkça, 7 gündeki dayanım kazançları azalmıştır. Kontrol karışımı ve diğer toz malzemeli karışımların 28 günlük basınç dayanımları baz alınarak erken dayanım kazanma hızlarına bakıldığında, tüm ikame oranlarında taş tozlu karışımların erken dayanım kazanma hızının diğer karışımlardan daha hızlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, taş tozlu betonlarda 28 günlük dayanımın düşük oluşudur. Tüm betonların erken dayanım oranları kontrol karışımından çok farklı olmamıştır.

Şekil 5.5’de ağırlıkça çimento ile ikame edilme oranları %10, %20 ve %30 olan karışımların kontrol karışımına göre basınç dayanım yüzdeleri verilmiştir. Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere kullanılan toz malzeme oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinde düşüşler olmuştur. % 10 ikame oranında basınç dayanımları tüm toz malzemelerde % 85 ‘in üzerinde iken, bu oran % 20 ikame oranında % 80’e % 30 ikame oranında ise % 60’a düşmüştür.



Şekil 5.5. 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol karışımı dayanımına oranları

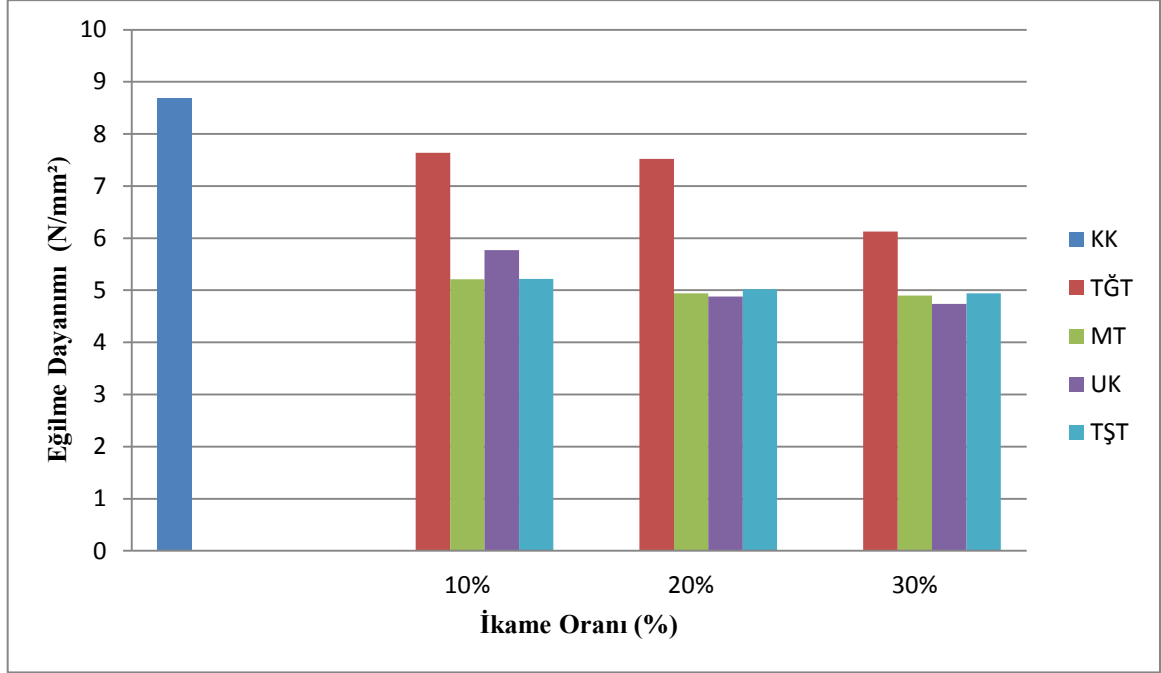
### 5.2.2. Eğilme Dayanımı

Karışımlara ait eğilme dayanımı değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2.Karışımların eğilme dayanımı değerleri

İkame Oranları (%)		Eğilme Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )			
		%0	%10	%20	%30
Karışım Kodu	KK	8,69			
	TĞT		7,64	7,52	6,13
	MT		5,21	4,94	4,90
	UK		5,77	4,88	4,74
	TŞT		5,22	5,02	4,94

Şekil 5.6'daki grafikten de anlaşılacağı üzere kontrol karışımının eğilme dayanımı değeri, diğer karışımlardan fazla olmakla beraber, tuğla tozlu karışımların eğilme dayanımlarının, diğer toz malzemeli karışımlara oranla daha yüksek olduğu görülmektedir.



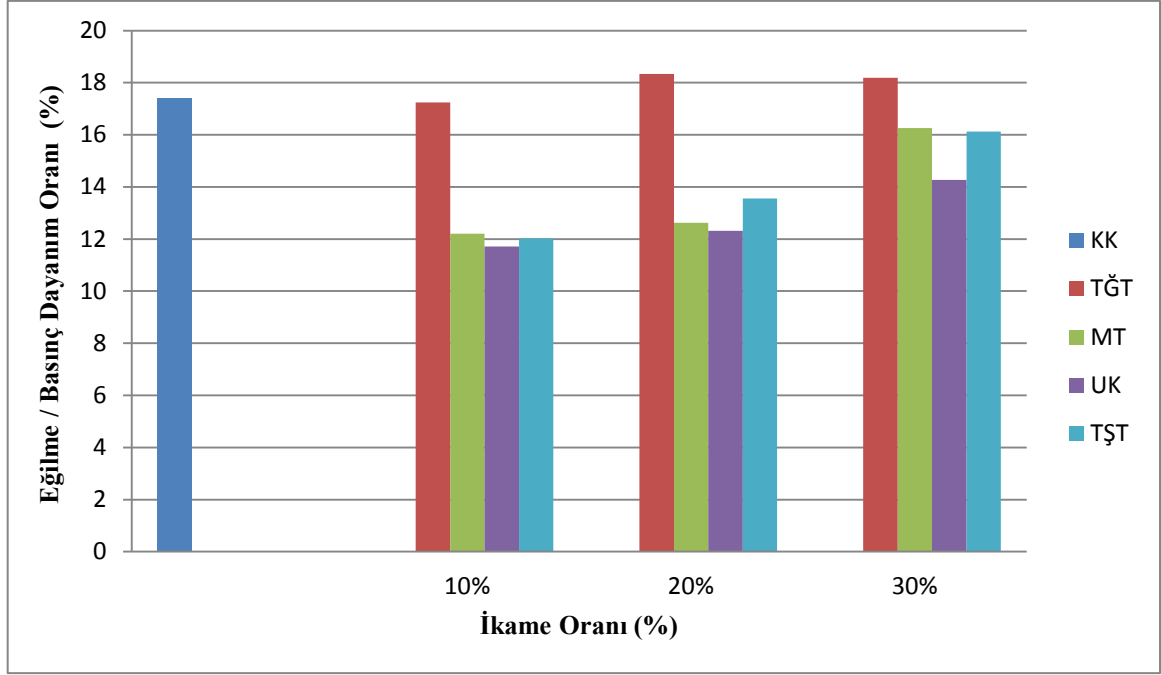
Şekil 5.6. Kontrol karışımı ve çimento ile ağırlıkça ikame oranlarına göre toz malzemeli karışımların ortalama eğilme dayanımları

Eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasında ilişki kurduğumuzda tuğla tozlu karışımlar dikkat çekmektedir. Kontrol karışımı hariç tutularak, tuğla tozlu karışımlardan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip karışımlar olmasına rağmen tuğla tozlu karışımların eğilme dayanımlarının daha fazla olduğu görülmüştür.

Karışımları kendi bünyelerinde değerlendirdiğimizde basınç dayanımının artışına bağlı olarak eğilme dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 5.7' de kontrol karışımının ve toz malzemeli betonların eğilme dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına oranları görülmektedir. Şekilden, tuğla tozlu betonların eğilme dayanımlarının basınç dayanımının yaklaşık % 18'i düzeyinde ve kontrol betonuyla aynı mertebede hatta biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak, toz malzeme miktarı arttıkça eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranının da arttığı söylenebilir.





Şekil 5.7. Toz malzeme ikame oranına bağlı olarak eğilme dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına oranı

### 5.2.3. Kılcal Su Emme (Kılcallık Katsayıları)

Kılcallık katsayısının belirlenmesi TS EN 772-11’de belirtilen şekilde yapıldı.

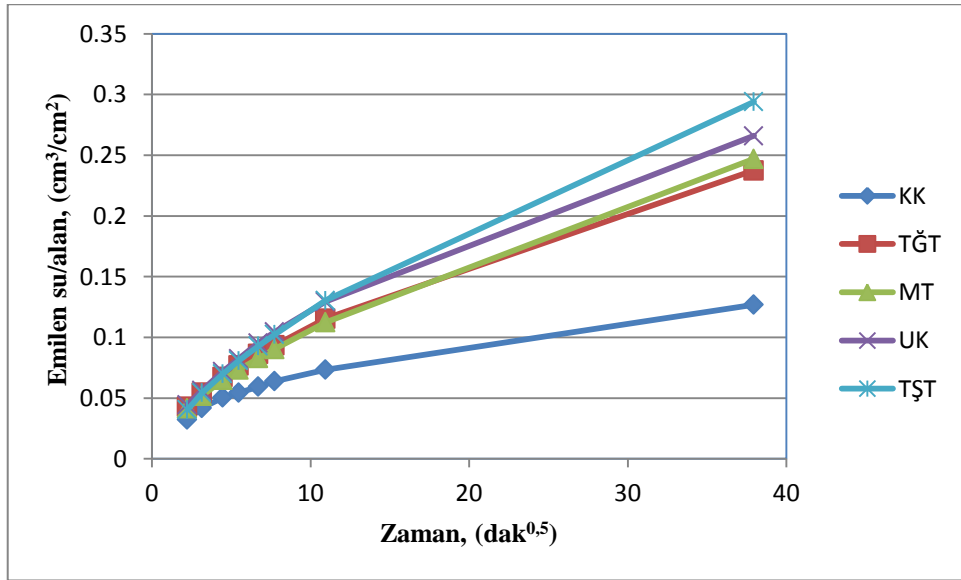
Üretilen betonların kılcallık katsayılarının bulunabilmesi için düşey eksende emilen suyun kesit alanına oranı, yatay eksende zamanın karekökünün yer aldığı grafik çizilerek başlangıçtaki doğrusal kısmın eğiminden faydalanılmıştır. Başlangıçtaki doğrusal kısmın eğimi, elde edilen noktaların arasından “En Küçük Kareler Metoduna” göre en uygun geçirilen doğrunun eğiminden (S) faydalanarak belirlendi. Tablo 5.3.’te betonların kılcallık katsayıları verilmiştir.

Tablo 5.3’de ki değerler incelendiğinde kontrol karışımının kılcallık katsayısının, diğer karışımların kılcallık kat sayılarından düşük olduğu ve kullanılan toz malzeme oranı arttıkça tüm karışımların kendi içlerinde kılcallık kat sayılarının arttığı görülmektedir

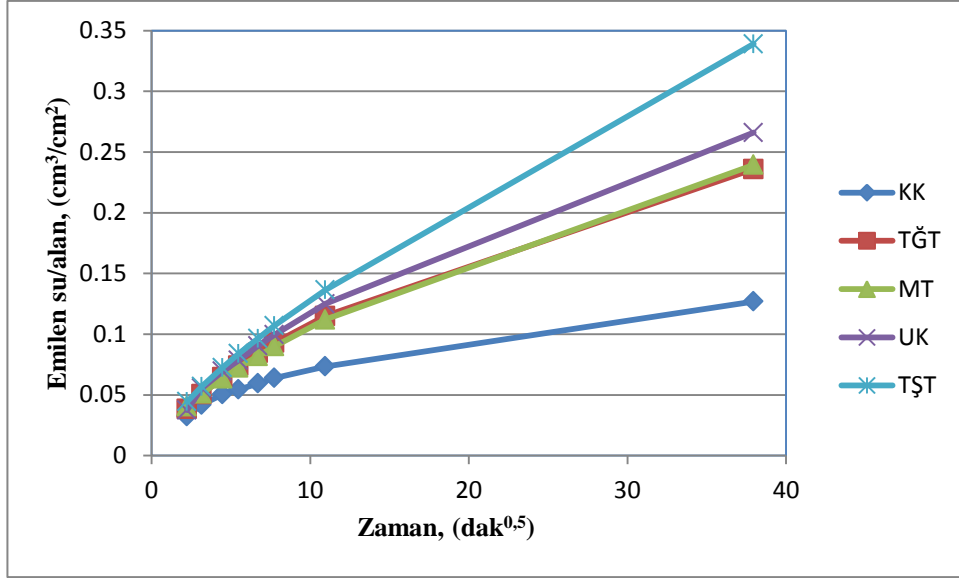
Tablo 5.3. Karışımların kılcallık katsayıları değerleri

		Kılcallık Katsayıları (cm/dk <sup>0,5</sup> )			
İkame Oranları (%)		%0	%10	%20	%30
Karışım Kodu	KK	54x10 <sup>-4</sup>			
	TĞT		91x10 <sup>-4</sup>	98x10 <sup>-4</sup>	108x10 <sup>-4</sup>
	MT		88x10 <sup>-4</sup>	89x10 <sup>-4</sup>	113x10 <sup>-4</sup>
	UK		109x10 <sup>-4</sup>	131x10 <sup>-4</sup>	137x10 <sup>-4</sup>
	TŞT		111x10 <sup>-4</sup>	132x10 <sup>-4</sup>	156x10 <sup>-4</sup>

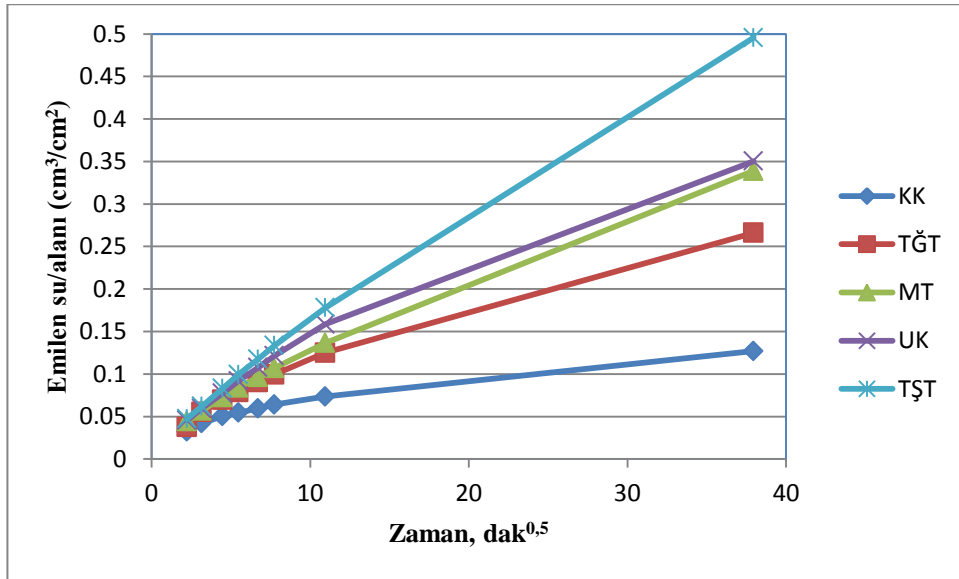
Şekil 5.8, Şekil 5.9, ve Şekil 5.10'da sırasıyla toz malzeme ikame miktarı % 10, % 20 ve % 30 olan betonlardaki kılcal su emme-zaman grafikleri gösterilmektedir. Bu grafiklerde düşey eksen kılcallık deneyinde emilen su miktarlarının kesit alanına bölümü (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>=cm) birimi ile, yatay eksen ise zamanın karekökü ( $\sqrt{\text{dak}}$ ) birimi ile gösterilmiştir. Grafiklerden tüm ikame oranlarında en fazla kılcal yolla su emiliminin taş tozlu betonlarda gerçekleştiği görülmektedir. % 10 ve % 20 ikame oranlarında bunu uçucu küllü betonlar izlemiştir. Kontrol betonunun kılcal yolla su emilimi ise en düşük olanıdır.



Şekil 5.8. Kontrol karışımının ve %10 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi



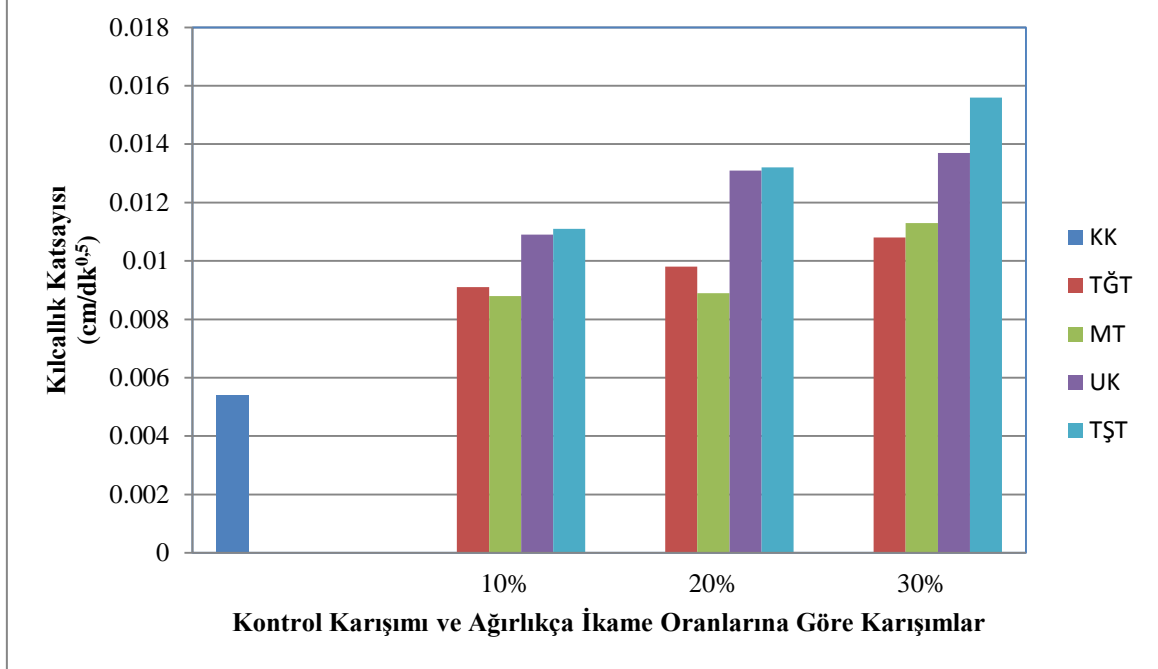
Şekil 5.9. Kontrol karışımının ve %20 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi



Şekil 5.10. Kontrol karışımının ve %30 toz malzeme ikameli betonların kılcal su emme-zaman ilişkisi

Şekil 5.11'de kontrol karışımının ve diğer karışımların kullanılan toz malzeme oranlarına göre kılcallık katsayıları grafik halinde verilmiştir. Bu grafikteki değerler incelendiğinde, tuğla tozlu ve mermer tozlu betonların kılcallık katsayılarının hem daha düşük hem de kullanılan toz malzeme oranına göre kılcallık katsayısındaki artış miktarının, diğer toz malzemeli karışımlara oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca taş tozu

kullanılan karışımlarda özellikle %30 oranında taş tozu kullanılan karışımlarda, kılcallık katsayısının diğer karışımlara oranla daha büyük değer aldığı gözle çarpılmaktadır.



Şekil 5.11. Kontrol karışımı ve çimento ile ikame edilme oranlarına göre toz malzemeli karışımların kılcallık katsayıları

Genel olarak basınç dayanımındaki artışlara bağlı olarak kılcallık katsayıları azalmıştır. Ancak tuğla tozlu ve mermer tozlu karışımların, kendinden daha yüksek basınç değerine sahip toz malzemeli karışımlardan, daha düşük kılcallık katsayısına sahip olması dikkat çekicidir.

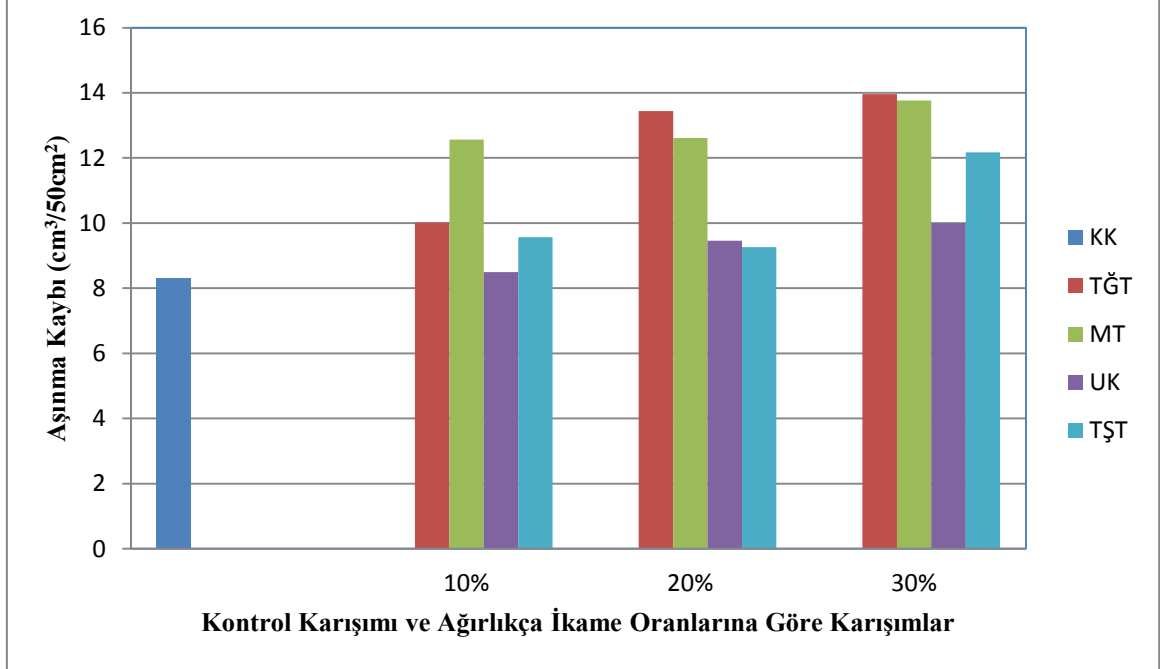
#### 5.2.4. Aşınma Dayanımı

Karışımların, aşınma (böhme) deneyleri sonrası hacimsel kayıp değerleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Aşınma (böhme) deneyi sonrası karışımlara ait hacimsel kayıp değerleri

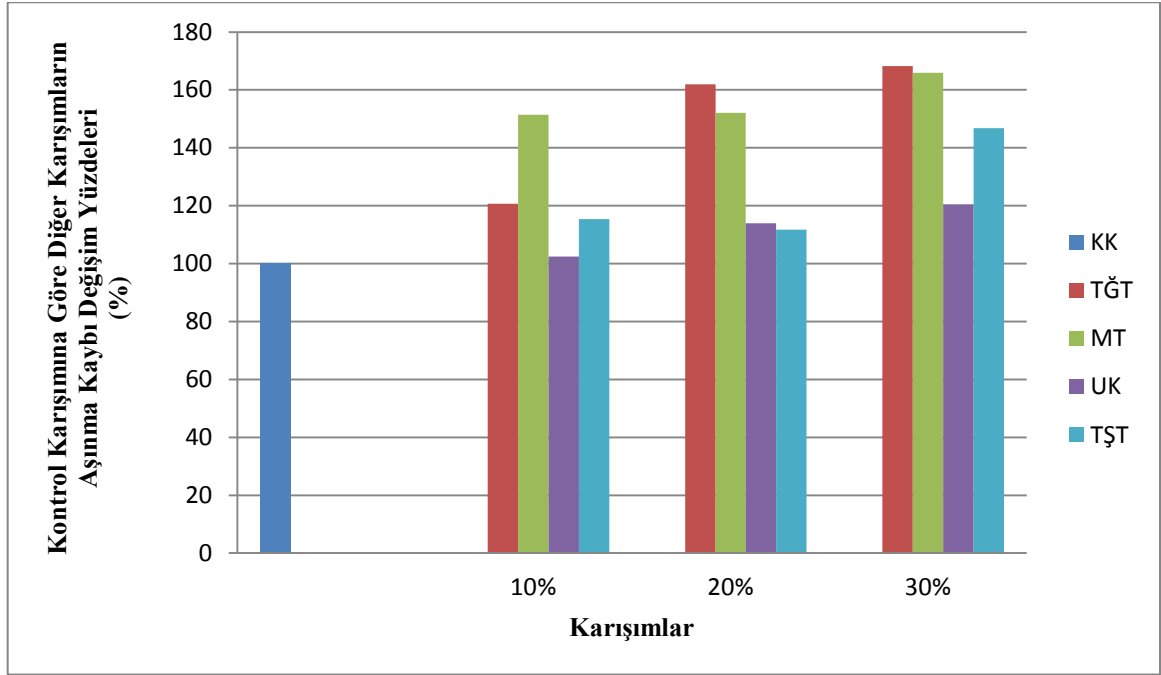
İkame Oranları (%)		Hacimsel Kayıp ( $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ )			
		%0	%10	%20	%30
Karışım Kodu	KK	8,298			
	TĞT		10,017	13,437	13,957
	MT		12,568	12,618	13,768
	UK		8,497	9,459	9,999
	TŞT		9,570	9,266	12,176

Kontrol karışımının aşınma kaybı değeri diğer karışımlardan daha düşük olmakla beraber uçucu küllü karışımların, kontrol karışımı hariç diğer karışımlara göre daha düşük aşınma kaybı değerine sahip olduğu Şekil 5.12'deki grafikten de anlaşılmaktadır. Şekil 5.13'de ise kontrol karışımının hacimsel kaybı baz alınarak, çimento ile ikame edileme oranlarına göre diğer karışımların aşınma deneyi sonrası hacimsel kayıp değişim yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 5.12. Kontrol karışımı ve çimento ile ağırlıkça ikame edilme oranlarına göre toz malzemeli karışımların aşınma kaybı değerleri

Karışımların, kendi içlerinde kullanılan toz miktarına göre, aşınma kayıpları değerlendirildiğinde, çimento yerine ikame edilen toz miktarı arttıkça aşınma kayıplarında da artışlar görülmüştür. Tüm ikame oranlarında mermer tozu ve tuğla tozu içeren betonların aşınma kayıpları diğerlerinde yüksek çıkmıştır. % 10 ve % 20 ikame oranlarında uçucu kül ve taş tozlu betonlar kontrol karışımına yakın aşınma kaybı vermiştir.



Şekil 5.13. Toz malzeme ikame miktarına bağlı olarak aşınma kaybı değişim oranları

Basınç dayanımının diğerlerine oranla daha yüksek olduğu karışımlarda, aşınma deneyi sonrası meydana gelen hacimsel kayıp değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varabiliriz.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen önemli sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1-Çimento ile ikame edilen toz malzemelerden, uçucu kül hariç, tuğla tozu, mermer tozu ve taş tozunun betonun işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği, uçucu külün ise betonun işlenebilirliğini artırdığı görülmüştür.

2-Tüm karışımlar için, basınç dayanımı arttıkça, eğilme dayanımlarının arttığı, kılcallık katsayılarının azaldığı ve aşınmaya karşı dayanıklılığın arttığı görülmüştür.

3-Çimento ile ağırlıkça ikame edilen toz malzemelerin kullanılma oranları arttıkça, basınç dayanımları ve eğilme dayanımlarında azalmalar, kılcallık katsayıları ve yüzeysel aşınma kayıplarında artışlar olmuştur.

4-Beton için, erken dayanımın önem kazandığı yerlerde ve hava şartlarının soğuk olduğu bölgelerde taş tozu ve mermer tozunun, çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilerek kullanılmasının, kontrol karışımına göre, basınç dayanımında büyük değerde düşüşe neden olmaması ve kontrol karışımına oranla daha erken dayanım kazandırmasından dolayı daha avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır.

5-Beton için, sıcaklık yükselmesinin ve termal genleşmenin önlenmesi açısından, hidrasyon ısısının düşük olması istenen, baraj gibi büyük beton hacmine sahip yapılarda ve hava şartlarının sıcak olduğu bölgelerde, uçucu kül ve tuğla tozunun, çimento ile ağırlıkça %10 oranında ikame edilerek kullanılmasının kontrol karışımına göre, basınç dayanımında büyük değerde düşüşe neden olmaması ve kontrol karışımına oranla daha geç dayanım kazandırmasından dolayı daha avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır.

6-Çimento ile ağırlıkça ikame edilen tuğla tozlu karışımların, eğilme dayanımlarının diğer toz malzemeli karışımların eğilme dayanımlarından fazla olduğu görülmüştür. Eğilme/Basınç oranlarına bakıldığında tuğla tozlu karışımların, kontrol betonunun düzeyinde bir oran (yaklaşık %18) sağladığı görülmektedir.

7-Kontrol karışımının kılcallık katsayısı tüm toz malzemeli karışımların kılcallık katsayılarından önemli ölçüde düşüktür. En yüksek katsayı ise tüm ikame oranları için taş tozlu karışımlarda görülmüştür. Tuğla tozlu ve mermer tozlu karışımların, kılcallık katsayılarının diğer toz malzemeli karışımların kılcallık katsayılarından daha düşük olduğu yapılan deneyler sonrası ortaya çıkmıştır.

8-Taş tozunun, çimento ile ağırlıkça %30 oranında ikame edilmesi ile oluşan karışımların kılcallık katsayılarının, diğer karışımlara oranla çok büyük değerler aldığı görülmüştür.

9-Uçucu kül'ün çimento yerine ağırlıkça %10 oranında kullanılmasıyla oluşan karışımlarda, aşınma deneyi sonrası meydana gelen hacimsel kayıp, kontrol karışımı ile hemen hemen aynı değere sahip olduğundan, UK 10 karışımının, aşınmanın önem arz ettiği yerlerde kullanılmasının faydalı olacağı görüşüne varılmıştır.

10-Özellikle tuğla tozlu ve mermer tozlu karışımların aşınmaya karşı dayanıklılığının diğer toz malzemeli karışımlara oranla daha az olduğu görülmüştür.



## 7. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Öztaş, G. ve Süttaş, İ., 1998. Beton Yollar (Rijit Yol Üst Yapıları), İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, Yayın No.1594, İstanbul.
- Akın, M., 2009. Kalsit Katkılı Betonların Geçirimlilik ve Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akbulut, H. ve Gürer, C., 2006. “ Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi”, İ.M.O. Teknik Dergi, 261, 3943-3960.
- Akman, M.S., 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, Sayı:1408 İstanbul.
- Akman, M.S., 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yayını, İstanbul, 161s.
- Akman, M.S., 1989. Betonda Dayanıklılık Özelliği ve Önemi, 1. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs, İstanbul, Bildiri no 4, 53.
- Akman, M.S., 1996. Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, 4. Ulusal Beton Kongresi, Ekim, İstanbul, Maya Basın Yayını: 1-11.
- Akyüz, S., 1991. Betonun Dünü Bugünü Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs, İstanbul, Kardeşler Matbaası, 53-67.
- Altoubat, S.A. ve Lange, D.A., 2001. Creep Shrinkage and Cracking of Restrained Concrete at Early Age, ACI Materilas Journal, 98, 323-331.
- Amparano, F.E., XI, Y. ve Roh, Y.S., 2000. Experimental Study on the Effect of Aggregate Content on Fracture Behavior of Concrete, Engineering Fracture Mechanics, 67, 65-84.
- Arıöz, Ö., 2004. Betonda Dayanımın Standart, Tahribatlı, Yarı Tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Arslantürk, C., 2007. Uzun Süre Karıştırmaya Maruz Uçucu Kül ve Silis Dumanlı Betonlarda Süper Akışkanlaştırıcı ile Kıvam İyileştirmesi, Yüksek Lisans Tezi K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aruntaş, H.Y. ve Tokyay, M., 1996. Katkılı Çimento Üretimi Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği, Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, 1,4,33-41.
- ASTM., 1994. Standart Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM C 125, Annual Book of ASTM Standarts., Pennsylvania.

- ASTM., 2007. Standart Specification for Concrete Aggregates, ASTM C 33, Annual Book of ASTM Standarts., Pennsylvania.
- Auskern, A. ve Harn, W., 1973. Caoillary Prosimy in Hardaned Cement Paste, Jornal of Testing and Eualuation , 29,2,13-24.
- Baradan, B., 1998. Yapı Malzemesi II, DEÜ Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 92-106,154-158.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 89-185.
- Beshr, H., Almusallam, A.A. ve Maslehuddin, M., 2003. Effect of Coarse Aggregate Quality on The Mechanical Properties of High Strength Concrete, Construction and Building Materilas, 17, 97-103.
- Bilgin, M. ve Çakır, E., 1998. Mermer Araştırması, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, No.1998-1, İstanbul.
- Branuer, S., 1962. Tobermorite Gel: The Heart of Concrete, Am Scientist, 50, 211-229.
- Claisse, P.A., El-Sayad, H.I. ve Shaaban, I.G., 1999. Permeability and Pore Volume of Carbonated Concrete, ACI Materials Journal, 96,3, 378-381.
- Christiano, H., 2004. Effect of Chemical and Mineral Admixtures on The Fresh Properties of Self Compacting Mortars and Applied Sciences.
- Collepordi, M., Baldini, G., Pauri, M. ve Corradi, M., 1978. Tricalcium Aluminate Hydration in The Presence of Lime, Gypsum or Sodium Sulfate, Cement and Concrete Research, 8,5, 571-580.
- Çelik, Ö., 2004. “Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Çamur Katkılarının Çimento Dayanımlarına Etkileri”, Beton 2004 Hazır Beton Kongresi, Haziran, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 657-663
- Çorbacıoğlu, C.U., 2008. Beton Karışım Tasarımının Geçirimsizliğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu, S., 2010. İnce Malzeme Olarak Kullanılan Atık Mermer Tozunun Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, International Sustainable Buildings Semposium, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı: 172-175.
- Doğan, Ü.A., 2008. Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri ve Gömülü Çelik Korozyonuna Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duman, R., 2010. Silis Dumanının Betonun Performansına ve Klor Geçirimsizliğine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Eglinton, M., 2004. Resistance of Concrete to Destructive Agencies, in Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 299-342.
- Erdoğan, T.Y., 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Kasım, Ankara, Bildiriler Kitabı: 1-8.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Agregalar, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Çimentolar, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Karışım ve Bakım Suları, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Türkiye'de Üretilen Çimentolar, Özellikleri ve Kullanımları, Sempozyumu, TMMOB İnşaat ve Kimya Mühendisleri Odası, Ankara, 67-80.
- Erdoğan, T.Y., 1997. Admixtures for Concrete, Middle East Technical University, Ankara, 188 s.
- Erdoğan, T.Y., 2002. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 1-757.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 741 s.
- Erdoğdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P., 2003. Traslara ve Traslı Çimentolar, TÇMB, AR-GE, Y99-2.
- Ersoy, B., 2003. Mermer İşleme Tesisi Atık Su Arıtımında Kullanılan Flokların Tanıtımı, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, Aralık, Afyon, Bildiriler Kitabı: 449-462.
- Ersoy, U., 1985. Betonarme - Temel İlkeler ve Taşıma Gücü, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 643 s.
- Ersoy, U., 1985. . Betonarme - Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 18-40.
- Feldman, R.F. ve Sereda, P., 1970. A New Model for Hydrated Portland Cement and Its Practical Implications, Eng. JCan. 53,8-9, 53-59.
- Göktepe, M., 2008. C<sub>3</sub>A Oranı Farklı Çimentolarla Üretilmiş Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimsizliği, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güner, S. ve Süme, V., 2000. Yapı Malzemesi ve Beton, Aktif Yayınevi, Erzurum, 1, 136-137

- Günindi, İ., 2005. Yumurtalık Su Gözü Uçucu Küllü İçeren Betonların Basınç, Eğilme, ve Aşınma Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gürses, O., 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gürü, M., Akyüz, V. ve Akın, E., 2005. Mermer Tozu Polyster Kompozitlerde Dolgu Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi, Politeknik Dergisi, 8,3, 271-275.
- Haberal, Y., 2010. Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Hodson, V., 1990. Concrete Admixtures, Newyork, 211.
- Hürbaş, M., Koruç, Ş. ve Sönmez, R., 2003. Betonda Taş Tozu ve Kıрма Kum Kullanımı, III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Aralık, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 307-316.
- İnce, H.H., 2005. Mineral Kimyasal Katkılı ve Polipropilen Fiber Takviyeli Taze Betonun Basınç Altındaki Davranışının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kaya, G. ve Turan, S., “ Yüksek Fırın Cürufunun Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Eldesinde Kullanılması” Mühendis ve Makine, 45,536.
- Kantar, E., 1998. İzmir ve Yöresinde Üretilen Hazır Betonların Sınıf Dayanımlarına Göre İstatiksel İncelenmesi ile Kür Şartlarının Beton Dayanımlarına Olan Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karataş, E., 2002. Sülfat Etkisine Maruz Betonun Performansı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılınç, C., 2007. Katkı Dozajı ve Taze Beton Sıcaklığının Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kırgız, M.S., 2007. Mermer ve Tuğla Endüstrisi Atıklarının Çimento Üretiminde Mineralojik Katkı Olarak Kullanılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kocataşkın, F., 1957. Vapour Permeability of Concrete, Bul of The Technical University of İstanbul, 10-1, 53-59.
- Kocataşkın, F., 1995. Permeability of Concrete, Bul of The Technical University of İstanbul, 8, 50-56.
- Lawrence, C.D., 2004. The Constitution and Specification of Portland Cements, in Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 131-194.

- Lea, F.M., 1956. The Chemistry of Cement and Concrete, Chemical Publishing Co., New York, 367p.
- Mehta, P.K., 1986. Concrete – Structure, Properties and Materials, Prentice – Hall, New Jersey.
- Nergiz, V., 2007. Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Neville, A.M., 1981. Properties of Concrete, Pitman Books Limited, London, 544p.
- Neville, A.M., 1995. Properties of Concrete, 4<sup>th</sup> Edition Longman Group Limited, 844p.
- Neville, A.M., 2004. Properties of Concrete, Pearson Education Limited Fourth Edition, England.
- Onaran, K., 2000. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Öner, A. ve Yıldız, R., 2003. Betonun iç ve Dış Ortam Etkilerine Dayanıklılığı Üzerine Genel Bir Bakış, Kocaeli Teknik Bülten.
- Örenç, D.İ., 1998. Sedimanter Kaya Mermerciliğinde Bloklarda Ürün Alınmasını Engelleyen Jeolojik Oluşumlar, Maden Tektik ve Arama Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 1-2, 61-63.
- Özcan, F., 2005. Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Adana.
- Özdamar, Z. ve Yavuz, B., 2005. Türk Yapı Sektörü Raporu, Yapı-Endüstri Merkezi, İstanbul 70-77, 100-102, 147-160
- Özdemir, A., 2009. Filler İçeriğinin Portland Çimentosu Betonunun Mekanik Özelliğine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, İzmir.
- Özdemir, B., 2001. Tunçbilek Termik Santrali Uçucu Küllerinin Karakterizasyonu ve Yan Ürünlerinin Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Özdemir, E., 2006. PÇ ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Özgan E., 2005. Kırmataş Agrega İçerisindeki Taş-Unu Miktarının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21, 1-2, 198-205.
- Özgür, S., 1996. Türkiye Çimento Sanayii ve Üretilen Çimento Türleri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M., 1999. Her Yönüyle Beton, THBB Yayını, İstanbul, 121s.
- Özturan, T., 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 280-282.
- Özturan, T. ve Çeçen, C., 1997. Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes with Different Strengths, Cement and Concrete Research, 27, 165-70
- Öztürk, A., 1996. Betonun Hızlandırılmış Rötresinin İç Yapıyla İlişkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Page, C.L. ve Page, M.M., 2007. Durability of Concrete and Cement Composites, Woodhead Publishing Ltd., U.K.
- Pommersheim, J. ve Chang, J., 1998. Kinetics of Hydration of Tricalcium Aluminate in The Presence of Gypsum, Cement and Concrete Research, 18-6, 911-922.
- Postacıoğlu, B., 1987. Beton Bağlayıcı Maddeler Agregalar Beton, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Teknik Kitaplar Yayınevi, Cilt2.
- Powers, T.C., 1956. The Physical Structure of Cement and Concrete, Cement and Lime Manufacture, 29-2, 13-24.
- Powers, T.C., 1958. The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, Portland Cem. Assoc. R&D Bull.90.
- Ramachandran, V.S., 1984. Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, New Jersey, 626.
- Ramyar, K., Çelik, T. ve Marar, K., 1995 Taş Tozunun Beton Özelliklerine Olan Etkisi Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Kasım, Ankara, Bildiriler Kitabı: 227.
- Şahmaran, M., Christianto, H.A. ve Yaman, İ.Ö., 2006. The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on The Properties of Self- Compacting Mortars, Cement&Concrete Composites 28, 432-440.
- Schiessl, P., 1984. Protection of Rein for Cement, in Durability of Concrete Structures, 241-297, Ed. Rostam, S., Technical University of Denmark, Lyngby.
- Subaşı, S., Kap, T., Beycioğlu, A., ve Emiroğlu, M., 2008. Hafif Betonlarda Basınç Dayanımlarının Tahmin Edilmesinde Kullanılan Farklı Tahmin Metodlarının Karşılaştırılması, Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, Ekim, Eskişehir, Bildiriler Kitabı: 1053-1063.
- Sun, W. et al., 2004. “ The Influence of Mineral Admixtures on Resistance to Corrosion of Steel Bors in Green High-Performance”, Cement and Concrete Research, No:34, 1781-1785,

- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R., 2003. Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, V.Ulusal Beton Kongresi, Ekim İstanbul, Bildiriler Kitabı: 75-76.
- Shannag, M.J. ve Shaia, H.A., 2003. Sulfate Resistance of High Performance Concrete, Cement and Concrete Composites, 25, 363-369.
- Tanyıldızı, H. ve Coşkun, A., 2011. Elazığ Yöresi Vişne Mermer Tozu Katkılı Hafif Betonun Basınç ve Ultrasonik Ses Geçirgenliği Özelliğinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27, 2, 150-154.
- Taşdemir, M.A., 2000. Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi, Yapı Malzemesi Ders Notları, İTÜ.
- Taylor, W.H., 1997. Concrete Technology and Practice, Mc Graw-Hill Book Company, Sydney.
- Troxell, G.E., Davies, H.E. ve Kelly, J.W., 1968. Composition and Properties of Concrete, Mc Graw-Hill Book Company, Newyork, pp.528.
- T.S.E., 1985. Beton Agregaları, TS 706-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 1998. Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan Uçucu Küller, TS EN 450, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Beton, Özellik, Performans, İmalat, Uygunluk, TS EN 206-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Kagir Birimler- Deney Metotları Bölüm 11: Betondan, Yapay ve Doğal taştan yapılmış kagir birimlerde kapiler su emme ve kil kagir birimlerde ilk su emme hızının tayini, TS EN 772-11, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2002. Kimyasal Katkılar- Beton Harç ve Şerbet İçin Bölüm 2: Beton Katkıları Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, TS EN 934-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E. 2008. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, TS EN 450-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- T.S.E., 2006. Beton Agregaları, TS 706 EN 12620/AC, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Taşdemir, C. ve Atahan, H.N., 1996. Filler Malzemelerinin Betonun Mekanik Özelliklerine ve Durabilitesine Etkisi, 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 251.

- Taşdemir, M.A., 2002. Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi, İMO İstanbul Şubesi Sürekli Eğitim Seminerleri, Kasım, İstanbul, 2-3.
- Tattersal, G.H., 1991. Rheology of Fresh Cement and Concrete, E&F.N Spon Publisher, London, 262.
- Targan, Ş., 2001. Kula Cürufu ve Bentonit ile Termik Santral ve Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Temizbaşoğlu, N., 1996. Kırmataş Tozunun Betonda Kullanılabilirliği, 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Ekim, İstanbul.
- Tokyay, M., 1993. Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi), Ed., Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Kasım, Ankara, Bildiriler Kitabı: 29-36.
- Tullmin, M., [http:// www.corrosion-club.com/concrete intro4 html](http://www.corrosion-club.com/concrete_intro4.html), 2000.
- Tuygun, C.S., 2002. Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal, O. ve Kibici, A., 2001. Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması, Türkiye 3. Mermer Sempozyumu, Mayıs, Afyon, Bildiriler Kitabı 317-325.
- Uğurlu, A., 1993. Taş Unu Kullanımının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Mühendislik Haberleri, TMMOB Yayını, Ankara.
- Uğurlu, A., 1995. Taş Unu Kullanımının Beton Özellikleri Üzerinde Etkisi, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet ve Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı yayın No MLZ 849, Ankara.
- Uyan, M., 1988. Boşluklu Ortam Olarak Betonda Rutubet Hareketleri, Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Ekim, İstanbul Bildiriler Kitabı: 266-273.
- Uyan, M., Pekmezci, B. ve Yıldırım, H., 2003. Akışkanlaştırıcı Katkı Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimlilik Özellikleri Üzerine Etkileri, Sika Teknik Bülten, I, 10-14.
- Winslow, D.N. ve Diamond, S., 1974. Specific Surface of Hardened Cement Paste as Determined by American Ceramic Society, 57-5, 193-97.
- Vokl, J. J., Beddoe, R. E. ve Setzer, M., J., 1987. The Specific Surface of Hardened Cement Paste by Small-Angle X-Ray Scattering-Effect of Moisture Content and Chlorides, Cement and Concrete Research, 17, 81-87.



- Yaşar, E., Erdoğan, Y. ve Kılıç, A., 2004. Effect of Limestone Aggregate Type and Water- Cement Ratio on Concrete Strength, Materilas Letters, 58, 772-77.
- Yeniboğalı, A. ve Ertün, T., 2005. Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, TÇMB, Ar-Ge Enstitüsü, Şubat, Ankara, YO4-01 .
- Yıldız, E., 2006. Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Young, J.F., 1998. A Review of The Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Insluence On Permeability, S.P.108, Permeability of Concrete, ACI.

## 8. EKLER

Ek Tablo 1. 1m<sup>3</sup>'lük kontrol karışımının malzeme oranları

Karışıma Giren Malzemeler	Miktarları (kg/m <sup>3</sup> )
Çimento	350
Su	175
Doyma Suyu	21,43
0-0,25 mm	90,37
0,25-0,50mm	126,52
0,50-1,00mm	108,45
1,00-2,00mm	145,51
2,00-4,00mm	163,78
4,00-8,00mm	273,47
8,00-16,00mm	358,53
16,00-32,00mm	533,36

Ek Tablo 2. 1m<sup>3</sup>'lük tuğla tozlu karışımların malzeme oranları

Karışıma Giren Malzemeler	Karışımlar ve Malzeme Miktarları(kg/m <sup>3</sup> )		
	TĞT 10	TĞT 20	TĞT 30
Çimento	315	280	245
Tuğla Tozu	35	70	105
Su	175	175	175
Doyma Suyu	21,37	21,30	21,26
0-0,25 mm	90,10	89,82	89,55
0,25-0,50mm	126,14	125,75	125,35
0,50-1,00mm	108,12	107,80	107,45
1,00-2,00mm	145,06	144,62	144,20
2,00-4,00mm	163,28	162,78	162,28
4,00-8,00mm	272,63	271,80	270,97
8,00-16,00mm	384,35	383,20	382,00
16,00-32,00mm	531,74	530,12	528,048

Ek Tablo 3. 1m<sup>3</sup>'lük mermer tozlu karışımların malzeme oranları

Karışıma Giren Malzemeler	Karışımlar ve Malzeme Miktarları(kg/m <sup>3</sup> )		
	MT 10	MT 20	MT 30
Çimento	315	280	245
Mermer Tozu	35	70	105
Su	175	175	175
Doyma Suyu	21,42	21,37	21,34
0-0,25 mm	90,21	90,07	89,91
0,25-0,50mm	126,30	126,10	125,87
0,50-1,00mm	108,26	108,10	107,89
1,00-2,00mm	145,26	145,00	144,77
2,00-4,00mm	163,51	163,22	162,95
4,00-8,00mm	273,00	272,53	272,10
8,00-16,00mm	384,87	384,22	383,60
16,00-32,00mm	532,45	531,56	530,64

Ek Tablo 4. 1m<sup>3</sup>'lük uçucu küllü karışımların malzeme oranları

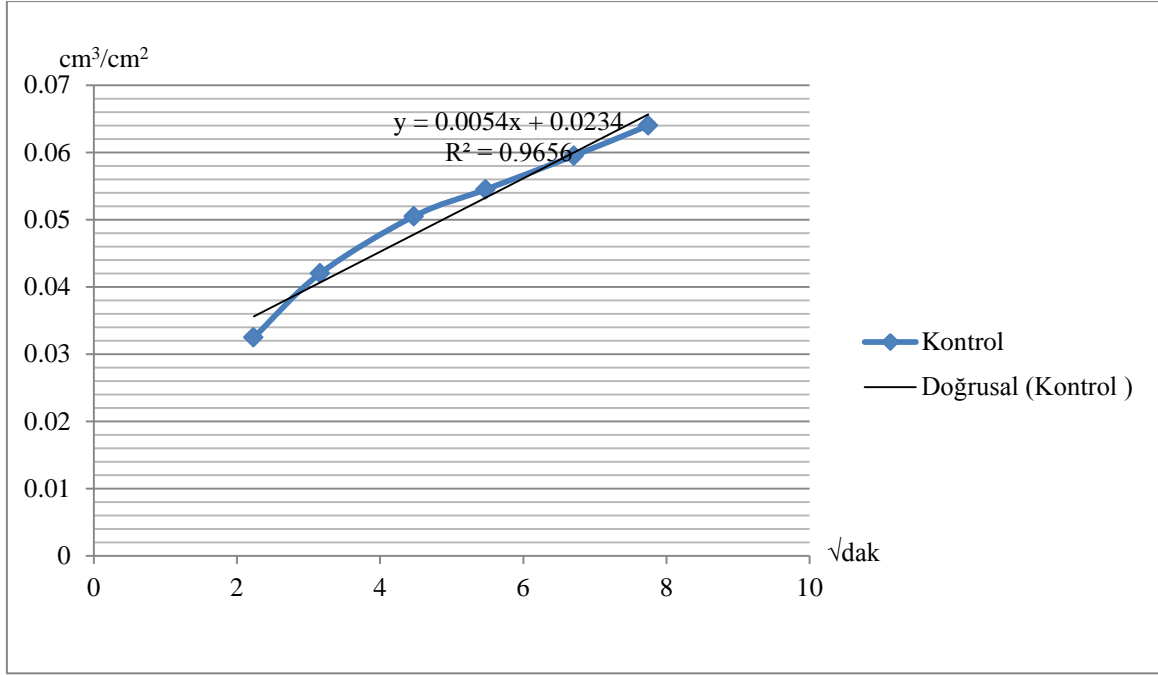
Karışıma Giren Malzemeler	Karışımlar ve Malzeme Miktarları(kg/m <sup>3</sup> )		
	UK 10	UK 20	UK 30
Çimento	315	280	245
Uçucu Kül	35	70	105
Su	175	175	175
Doyma Suyu	21,33	21,21	21,09
0-0,25 mm	89,87	89,37	88,87
0,25-0,50mm	125,82	125,20	124,43
0,50-1,00mm	107,84	107,30	106,65
1,00-2,00mm	144,71	143,91	143,10
2,00-4,00mm	162,88	161,98	161,08
4,00-8,00mm	271,96	270,46	268,94
8,00-16,00mm	383,41	381,28	379,16
16,00-32,00mm	530,42	527,50	524,54

Ek Tablo 5. 1m<sup>3</sup>'lük taş tozlu karışımların malzeme oranları

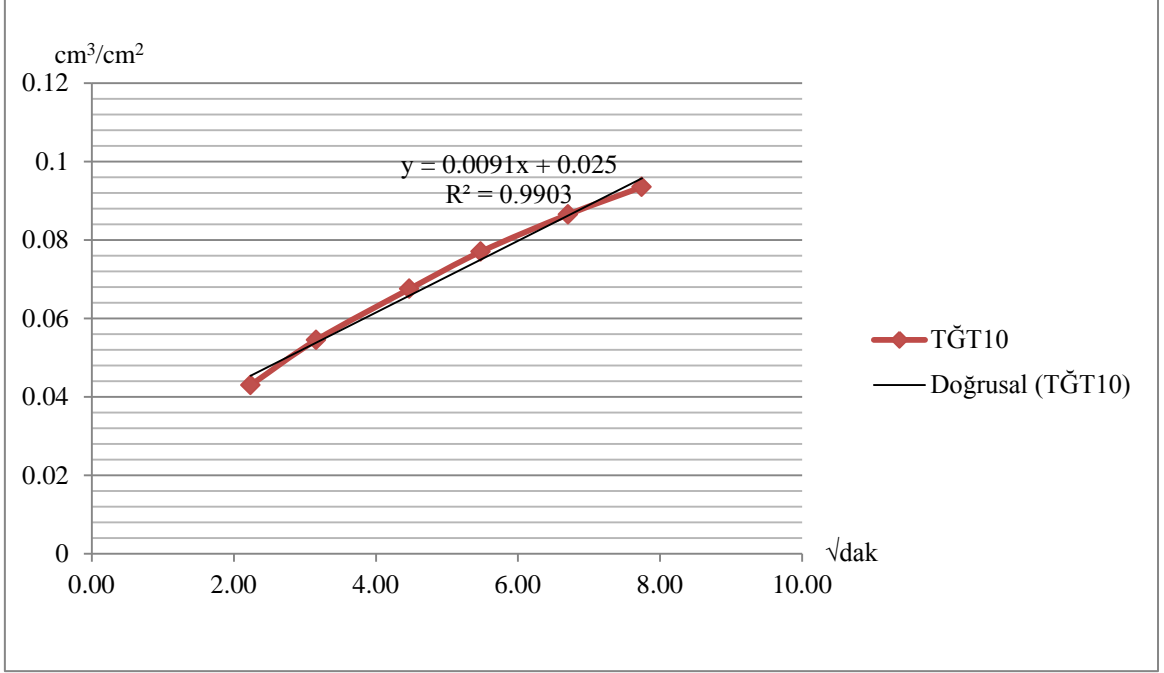
Karışıma Giren Malzemeler	Karışımlar ve Malzeme Miktarları(kg/m <sup>3</sup> )		
	TŞT 10	TŞT 20	TŞT 30
Çimento	315	280	245
Taş Tozu	35	70	105
Su	175	175	175
Doyma Suyu	21,36	21,26	21,15
0-0,25 mm	89,96	89,58	89,19
0,25-0,50mm	125,96	125,41	124,86
0,50-1,00mm	107,95	107,50	107,02
1,00-2,00mm	144,87	144,24	143,60

“ Ek Tablo 5’in devamı”

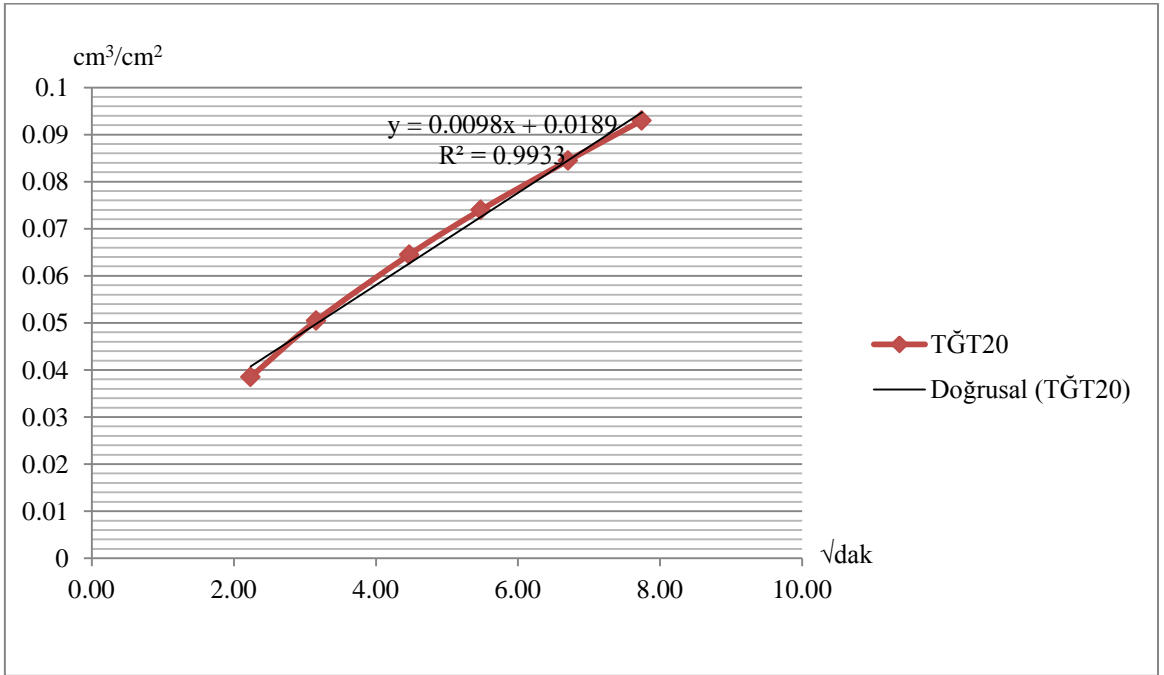
2,00-4,00mm	163,06	162,35	161,64
4,00-8,00mm	272,27	271,08	269,88
8,00-16,00mm	383,84	382,16	380,48
16,00-32,00mm	531,03	528,70	526,70



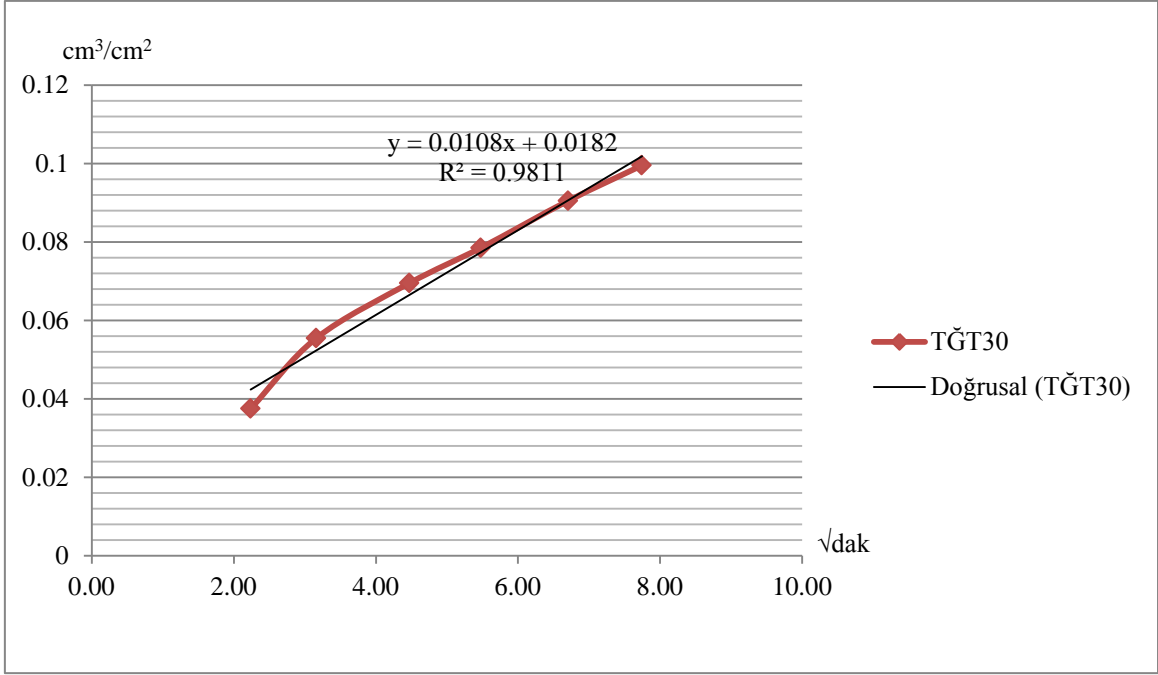
Ek Şekil 1. Kontrol karışımının zamana bağlı su emme miktarı



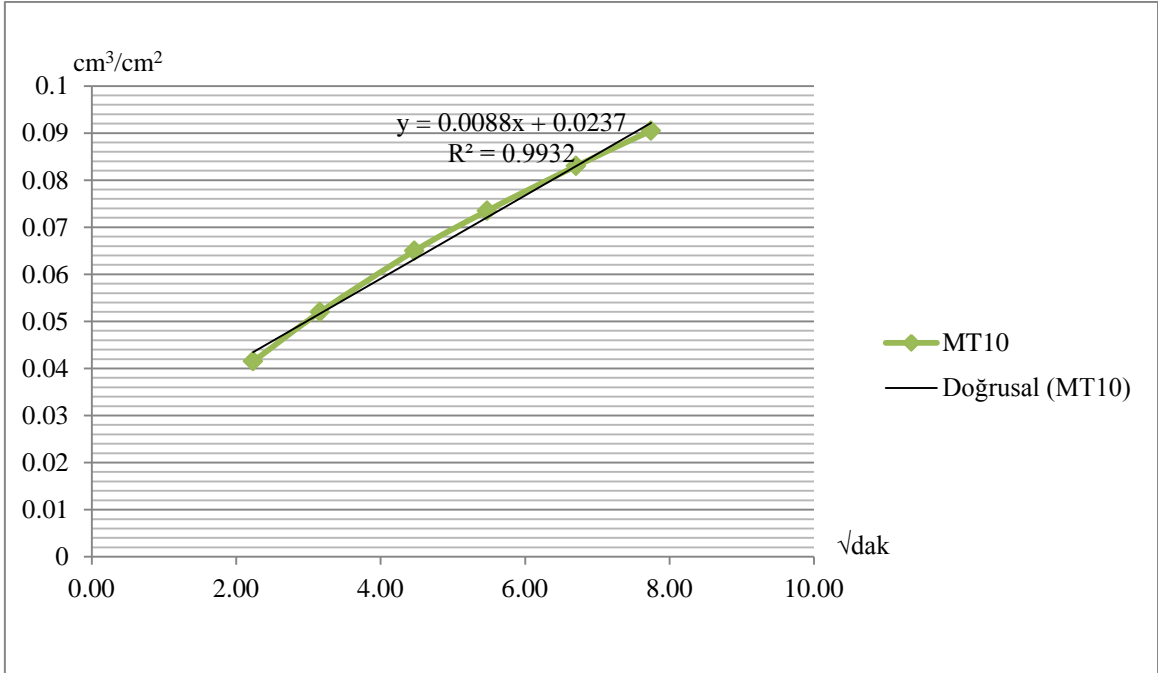
Ek Şekil 2. Tuğla tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



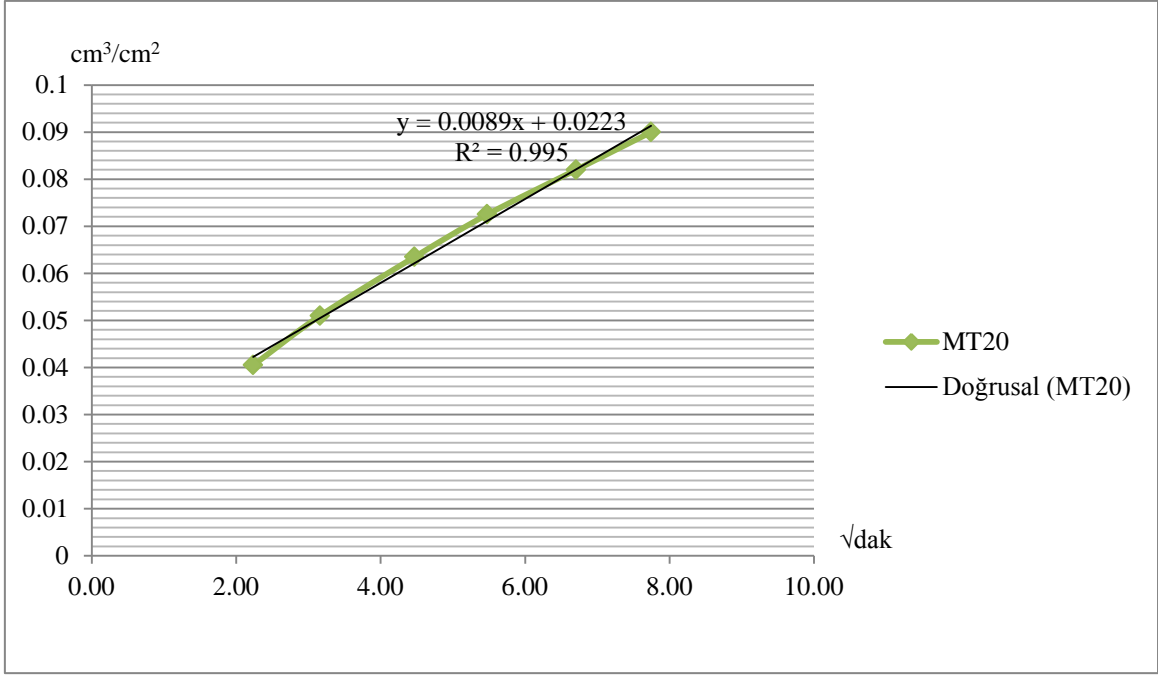
Ek Şekil 3. Tuğla tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



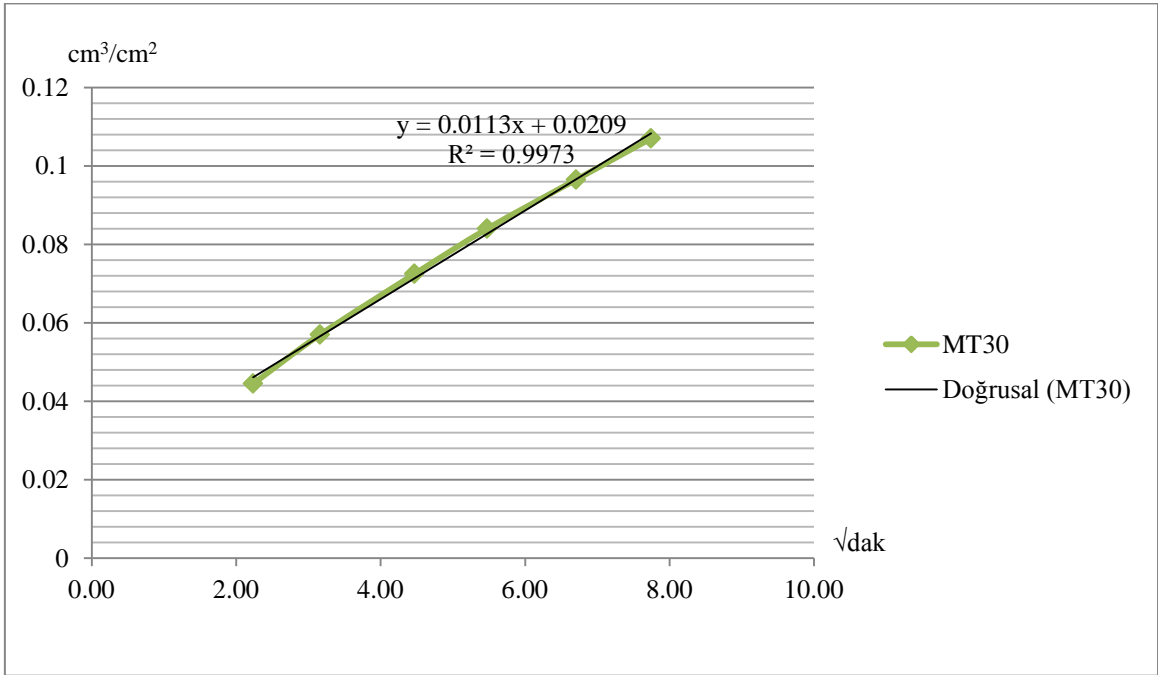
Ek Şekil 4. Tuğla tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



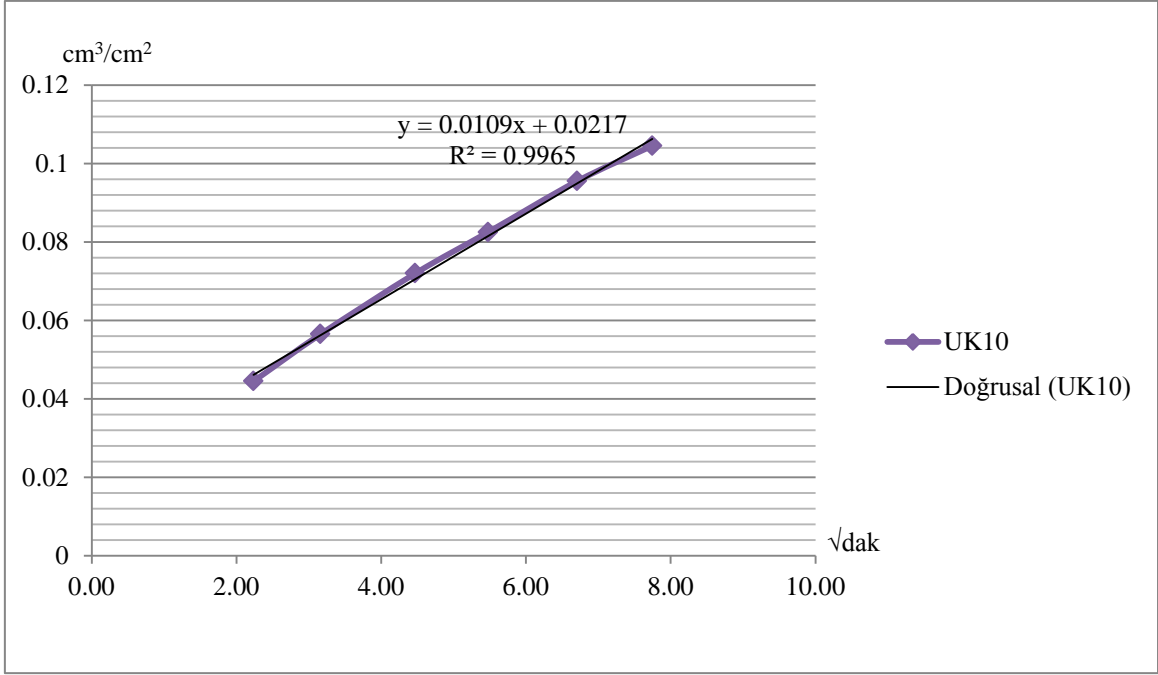
Ek Şekil 5. Mermer tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



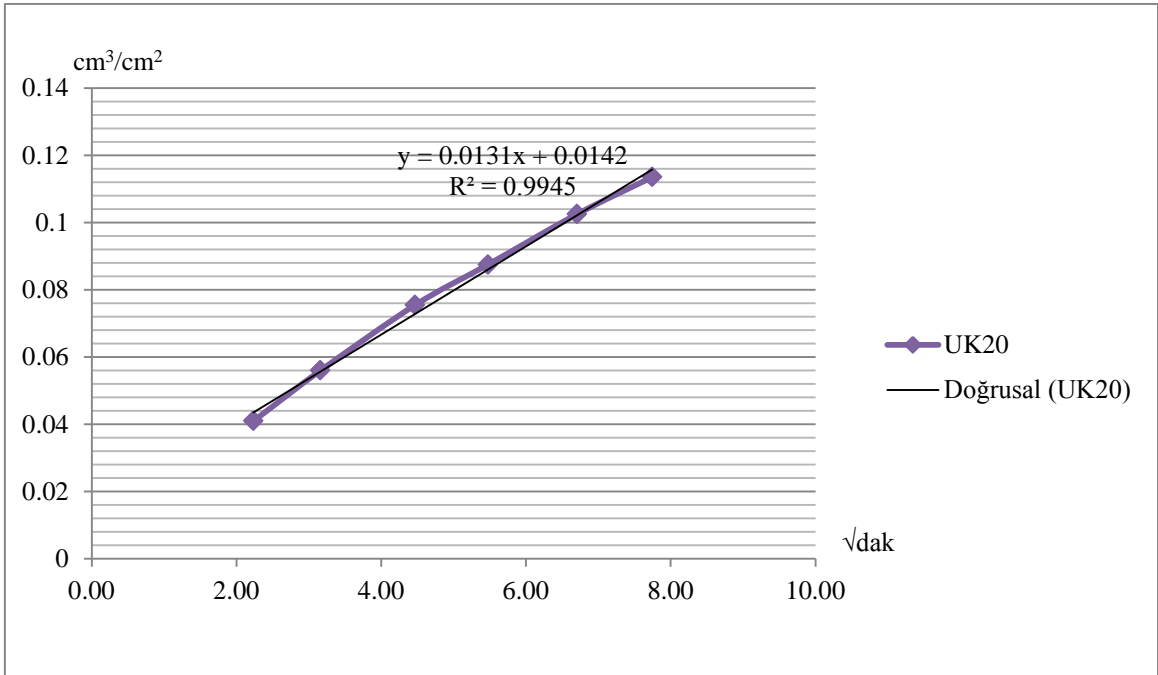
Ek Şekil 6. Mermer tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



Ek Şekil 7. Mermer tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı

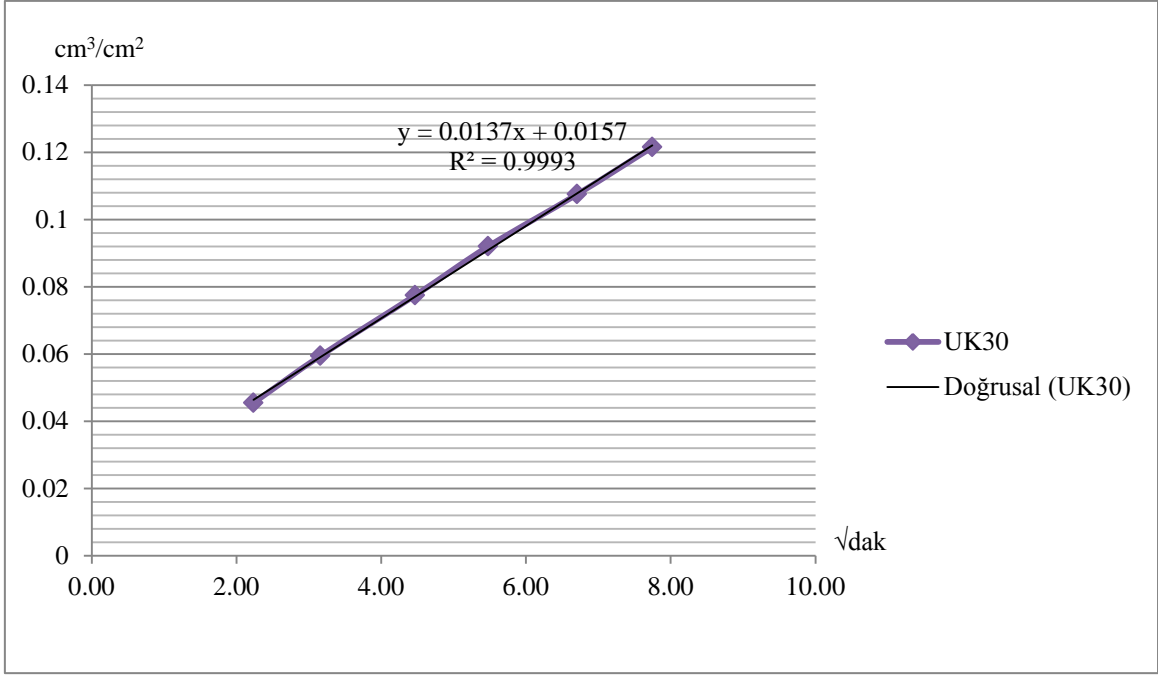


Ek Şekil 8. Uçucu kül 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı

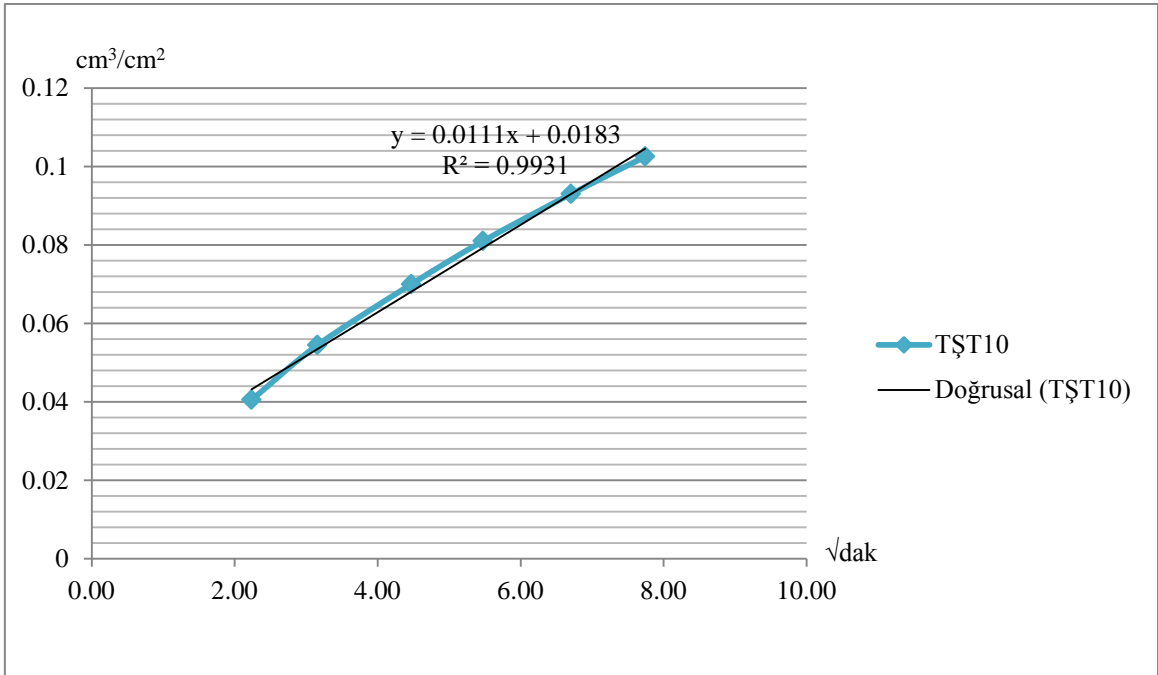


Ek Şekil 9. Uçucu kül 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı

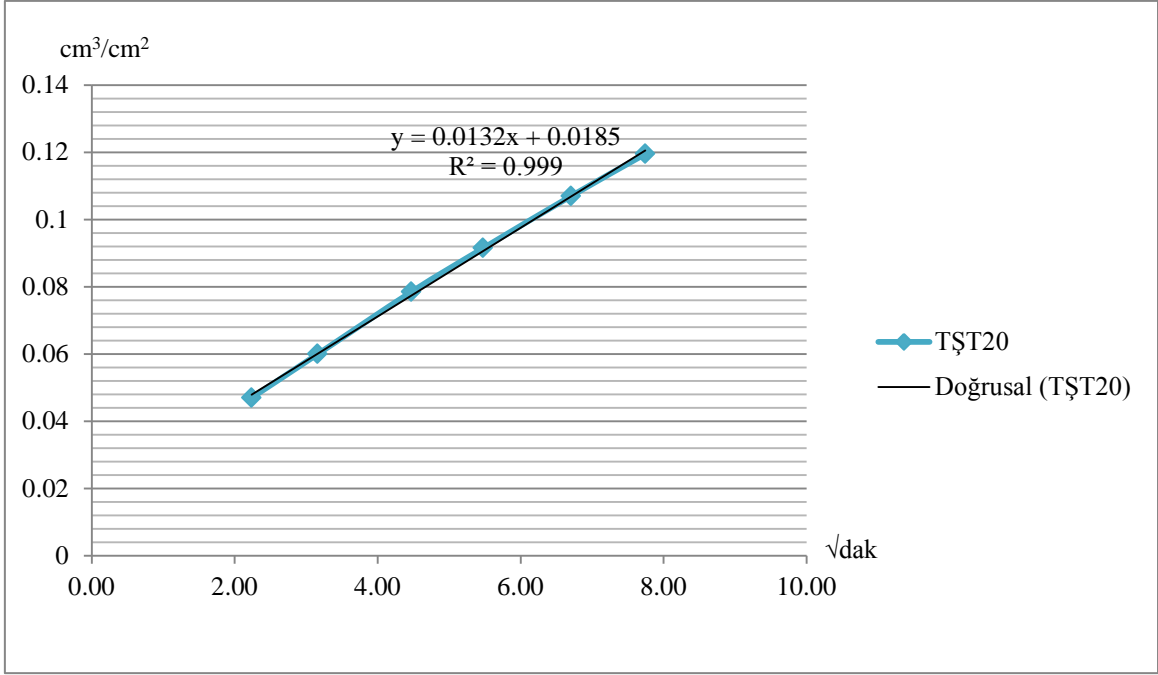




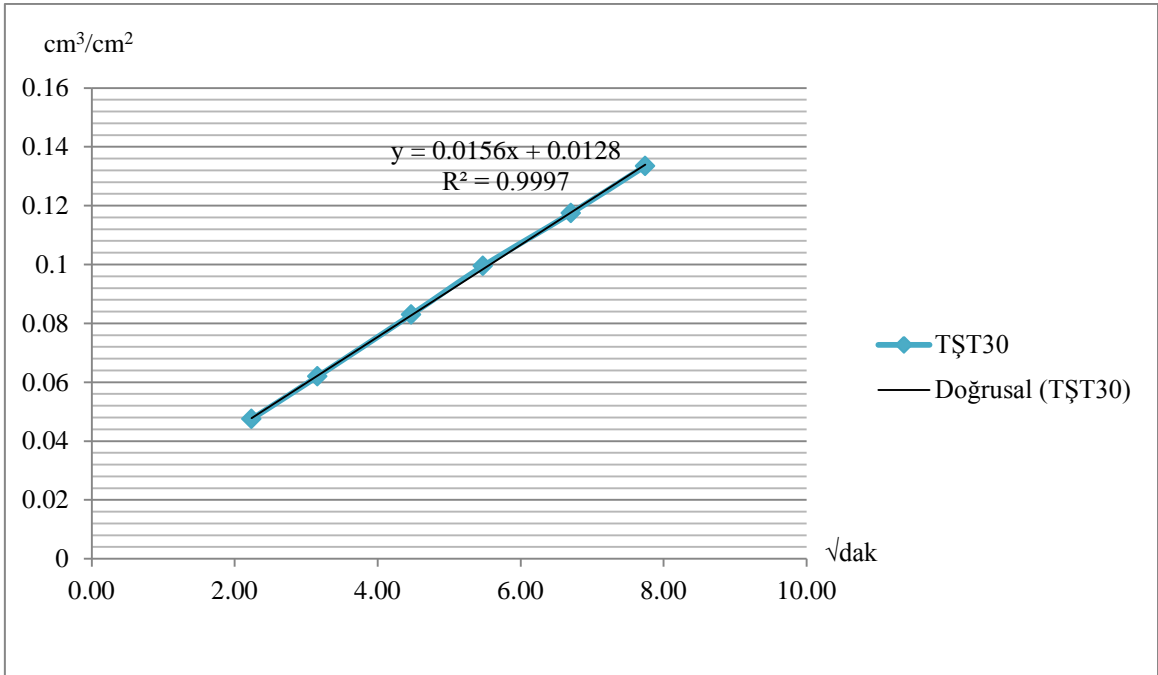
Ek Şekil 10. Uçucu kül 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



Ek Şekil 11. Taş tozu 10 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



Ek Şekil 12. Taş tozu 20 karışımının zamana bağlı su emme miktarı



Ek Şekil 13. Taş tozu 30 karışımının zamana bağlı su emme miktarı

## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 Yılında Erzurum'da doğan Yusuf Furkan ÖZER, ilk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamlamıŐtır. 2001 Yılında başladığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2005 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başlamıştır.