

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ZEOLİT VE METAKAOLİN İÇEREN BETONLARIN BAZI DAYANIM VE
DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Memduh NAS

**ARALIK 2015
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmada zeolit ve metakaolinin içeren betonların dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır.

Saygıdeğer danışmanım, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ, tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde, çalışmanın yürütülmesinde ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında yol gösterici olmuştur. Her zaman değerli vaktini ayıran kendisine sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmanın önemli anlarında bilgileriyle çalışmaya ışık tutan ve değerli zamanını benimle paylaşmaktan çekinmeyen Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU' ya teşekkür ederim.

Ayrıca, yardımlarından dolayı Arş. Gör. Safa NAYIR, Arş. Gör. Ufuk KANDİL ve diğer araştırma görevlisi arkadaşlarıma ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Memduh NAS
Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Zeolit ve Metakaolin içeren Betonların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/12/2015

Memduh NAS

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Beton Oluşturan Malzemeler ve Genel Özellikleri	2
1.2.1. Agrega	2
1.2.2. Su	2
1.2.3. Çimento	2
1.2.3.1. Çimento Tipleri	4
1.2.4. Beton Katkı Maddeleri	5
1.2.4.1. Kimyasal Katkı Maddeleri	5
1.2.4.2. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar)	6
1.2.4.2.1. Doğal Puzolanlar	7
1.2.4.2.1.1. Doğal Zeolit	7
1.2.4.2.1.2. Metakaolin	9
1.2.4.2.2. Yapay Puzolanlar.....	11
1.2.4.2.2.1. Uçucu Küller.....	11
1.2.4.2.2.2. Silis Dumanı	12
1.2.4.2.2.3. Yüksek Fırın Cürufu.....	13
1.2.5. Taze Beton Özellikleri.....	14
1.2.6. Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	14
1.2.6.1. Dayanım	14

1.2.6.2.	Dayanıklılık	15
1.2.6.2.1.	Karbonatlaşma	15
1.2.6.2.2.	Asit Etkisi	16
1.2.6.2.3.	Sülfat Etkisi	16
1.2.6.2.4.	Alkali-Silika Reaksiyonu.....	17
1.2.6.2.5.	Klorür Etkisi	18
1.2.6.2.6.	Donma-Çözülme Etkisi	18
1.2.6.2.7.	Yüksek Sıcaklık Etkisi	19
1.2.6.2.8.	Aşınma.....	20
1.2.6.2.9.	Geçirimsizlik.....	20
1.2.6.2.10.	Su Emme	21
1.3.	Literatür Taraması	22
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
2.1.	Çalışmanın Amacı	29
2.2.	Deney Programı.....	29
2.3.	Kullanılan Malzemeler	30
2.3.1.	Malzemelerin Özellikleri.....	30
2.3.1.1.	Çimento	30
2.3.1.2.	Agreganın Özellikleri	31
2.3.1.3	Zeolit	32
2.3.1.4	Metakaolin.....	34
2.3.1.5.	Su.....	34
2.3.1.6.	Süperakışkanlaştırıcı	34
2.4.	Yapılan Deneyler ve Kullanılan Ekipmanlar	35
2.4.1.	Beton Üretimi	35
2.4.2.	Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri	37
2.4.3.	Kılcal Su Emme Deneyi	37
2.4.4.	Aşınma (Böhme) Deneyi	39
2.4.5.	Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi	40
2.4.6.	Ultrases Hızlarının Belirlenmesi	42
2.4.7.	Donma-Çözülme Deneyi	42
2.4.8.	Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi	44
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	46

3.1	Çökme Deneyi	46
3.2.	Basınç Dayanımı	46
3.3.	Eğilme Dayanımı.....	48
3.4.	Kılcalık Su Emme Deneyi (Kılcallık Katsayıları).....	50
3.5.	Aşınma (Böhme) Deneyi.....	52
3.6.	Hızlı Klorür Geçirirliiği.....	54
3.7.	Donma-Çözülme Deneyi	56
3.7.1.	Donma-Çözülmenin Ağırlık Üzerindeki Etkisi.....	56
3.7.2.	Donma-Çözülmenin Ultrases Hızları Üzerindeki Etkisi	58
3.7.3.	Donma-Çözülmenin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi	60
3.8.	Yüksek Sıcaklık Etkisi	62
3.8.1.	Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	62
3.8.2.	Yüksek Sıcaklığın Ultrases Hızları Üzerindeki Etkisi	67
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
5.	KAYNAKLAR.....	73
6.	EKLER	77

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ZEOLİT VE METAKAOLİN İÇEREN BETONLARIN BAZI DAYANIM VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Memduh NAS

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ
2015, 76 Sayfa, 15 Sayfa Ek

Betonun dayanıklılığın en az dayanım kadar önemli olduğu bilinmektedir. Betonun bozulması genellikle tek bir nedene bağlanamaz. Mineral katkı maddeleri, betonun boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir hamur elde edilmesini sağlarlar. Puzolanların bu özellikleriyle de betonun dayanım ve dayanıklılığı artırılabilir.

Bu çalışmada zeolit ve metakaolinin betonun dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda zeolit ve metakaolin ikamesiyle üretilen betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı; aşınma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı, hızlı klor geçirimsizlikleri ve kılcalık katsayıları belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar için üretilen betonlarda toplam bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3 ve 400 kg/m^3 seçilerek su/bağlayıcı oranı 0.6 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen betonlarda puzolan olarak zeolit ve metakaolin çimentoyla ağırlıkça ikameli olarak kullanılmıştır. İkame oranları zeolit için için %10, %15, %20; metakaolin içinse %5, %10 ve %20'dir. Karşılaştırma amacıyla mineral katkı içermeyen kontrol numuneleri üretilmiştir.

Sonuç olarak zeolit ve metakaolinin mineral katkı olarak betonda kullanımının özellikle basınç ve eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik, hızlı klor geçirimsizliği ve donma dayanıklılık gibi özellikler üzerinde olumlu etki yapmış; aşınma ve yüksek sıcaklığa karşı olumlu etki etmemiştir. Zeolitin ve metakaolinin en uygun ikame oranlarının sırasıyla %10 ve %20 olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Zeolit, Metakaolin, Puzolan, Dayanım, Dayanıklılık, Donma-çözülme, Yüksek Sıcaklık, Klorür Geçirimsizliği

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION ON STRENGTH AND DURABILITY PROPERTIES OF
CONCRETE CONTAINING ZEOLITE AND METAKAOLIN

Memduh NAS

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şirin KURBETÇİ
2015, 76 Pages, 15 Pages Appendix

It is well known that durability of concrete is as important as strength. Deterioration of concrete cannot be attributed to only one factor. Mineral additives can provide a denser body by improving the internal structure of concrete. By doing so, the strength and durability properties of concrete can be substantially improved.

In this study, the effects of zeolite and metakaolin on the strength and durability properties of concrete were investigated. For this purpose, the compressive and bending strengths; abrasion, freeze-thaw, and elevated temperature resistance; rapid chloride permeability and sorptivity coefficients were determined on concretes containing different zeolite and metakaolin replacement ratios.

In the experimental program, the total cementitious material contents for the concrete mixes were chosen as 300 kg/m^3 and 400 kg/m^3 with water to cement ratio of 0.60. Zeolite and metakaolin were replaced with cement by mass at ratios of %10, %15, %20 for zeolite; %5, %10 ve %20 for metakaolin. For comparison, mixtures without mineral additives were also prepared.

Consequently, the use of zeolite and metakaolin as mineral additives to the concrete is found to be beneficial especially on compressive and bending strengths, sorptivity, rapid chloride permeability and freeze-thaw action. However, these minerals are not found to be beneficial on abrasion and elevated temperatures. It can be concluded that the optimum replacement ratios for zeolite and metakaolin are %10 and 20%, respectively.

Key Words: Zeolite, Metakaolin, Pozzolan, Strength, Durability, Freeze-Thaw, Elevated Temperature, Chloride Permeability

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Agrega karışım granülometri eğrisi ve sınır eğrileri.....	32
Şekil 2.2.	Deneyel çalışmada kullanılan çimeto, zeolit ve metakaolin	33
Şekil 2.3.	45 lt kapasiteli pan tipi betoniyer	35
Şekil 2.4.	Kür havuzunda bekletilen numuneler	36
Şekil 2.5.	Kür havuzundan çıkarılmış numunelerden bir seri.....	36
Şekil 2.6.	Dinç Makine Yapımı 300 ton kapasiteli hidrolik pres	37
Şekil 2.7.	3 nokta eğilme testi ve kırılan bir numune	37
Şekil 2.8.	Numuneleri kurutmak için kullanılan Geniar markalı etüv	38
Şekil 2.9.	Kılçak su emme (kılcallık) deney düzeneği.....	39
Şekil 2.10.	0.1 gr hassasiyetinde 10 kg kapasiteli Radway marka terazi	39
Şekil 2.11.	Böhme Yüzey Aşındırma Test Cihazı.....	40
Şekil 2.12.	Deneye hazır haldeki hızlı klorür deney düzeneği	42
Şekil 2.13.	Matest marka ultrases ölçüm cihazı.....	42
Şekil 2.14.	Yüksel Kaya Makine yapımı donma-çözülme kabini ve su tankı	43
Şekil 2.15.	Numunelerin ultrases geçiş hızlarının ölçümü	43
Şekil 2.16.	800°C’de 1 saat bekletilen beton numuneler	44
Şekil 2.17.	800°C’de 1 saat bekletilen bir numunenin görünüşü.....	45
Şekil 3.1.	300 ve 400 dozajlı zeolit ikameli küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları	48
Şekil 3.2.	300 ve 400 dozajlı metakaolin ikameli küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları	48
Şekil 3.3.	Zeolit ikameli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri.....	50
Şekil 3.4.	Metakaolin ikameli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri.....	50
Şekil 3.5.	Zeolit ikameli numunelerin kılcallık katsayı değişimleri	52
Şekil 3.6.	Metakaolin ikameli numunelerin kılcallık katsayı değişimleri	52
Şekil 3.7.	Zeolit ikameli numunelerin aşınma deneyi sonrası hacimsel kayıp değişimleri	54
Şekil 3.8.	Metakaolin ikameli numunelerin aşınma deneyi sonrası hacimsel kayıp değişimleri	54

Şekil 3.9. Zeolit ikameli betonların toplam geçen yük değerleri.....	56
Şekil 3.10. Metakaolin ikameli betonların toplam geçen yük değerleri	56
Şekil 3.11. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık değişimleri	58
Şekil 3.12. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık değişimleri	58
Şekil 3.13. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases hızı değişimi.....	60
Şekil 3.14. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases hızı değişimi	60
Şekil 3.15. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası Basınç dayanımı değişimi	62
Şekil 3.16. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi basınç dayanımı değişimi.....	62
Şekil 3.17. Zeolit içeren 300 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi.....	65
Şekil 3.18. Zeolit içeren 400 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi.....	65
Şekil 3.19. Metakaolin içeren 300 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi.....	66
Şekil 3.20. Metakaolin içeren 400 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi.....	66
Şekil 3.21. Zeolit içeren 300 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi	69
Şekil 3.22. Zeolit içeren 400 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi	69
Şekil 3.23. Metakaolin içeren 300 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi.....	70
Şekil 3.24. Metakaolin içeren 400 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi	70
Ek Şekil 1. 300-R kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	77
Ek Şekil 2. 300-10Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	77
Ek Şekil 3. 300-15Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	78
Ek Şekil 4. 300-20Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	78
Ek Şekil 5. 300-5M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	79
Ek Şekil 6. 300-10M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	79
Ek Şekil 7. 300-20M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	80
Ek Şekil 8. 400-R kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	80
Ek Şekil 9. 400-10Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği	81

Ek Şekil 10. 400-15Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği.....	81
Ek Şekil 11. 400-20Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği.....	82
Ek Şekil 12. 400-5M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği.....	82
Ek Şekil 13. 400-10M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği.....	83
Ek Şekil 14. 400-20M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği.....	83

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Portland çimentosunun tipik kompozisyonu	3
Tablo 2.1. Beton bileşimleri ve çökme değerleri	30
Tablo 2.2. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri.....	31
Tablo 2.3. Agregaların fiziksel özellikleri	31
Tablo 2.4. Agregaların Granülometreleri.....	32
Tablo 2.5. Zeolit XRF Spektrofotometresi ile kimyasal analizi	33
Tablo 2.6. Zeolitlerin bazı fiziksel özellikleri	33
Tablo 2.7. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler	34
Tablo 2.8. Kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler.....	35
Tablo 2.9. ASTM C 1202'ye göre klorür geçirimsizlik sınıflandırması	41
Tablo 3.1. 15'lik küp numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanım değerleri	47
Tablo 3.2. Prizma numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri.....	49
Tablo 3.3. Numunelerin kılcallık katsayı değerleri.....	51
Tablo 3.4. Numunelerin aşınma (böhme) deneyi sonrası hacimsel kayıp değerleri	53
Tablo 3.5. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyine ait toplam geçen yük değerleri ve geçirimsizlik sınıfları	55
Tablo 3.6. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ağırlık ve ağırlık değişimleri	57
Tablo 3.7. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ait ultrases hızı değişimi.....	59
Tablo 3.8. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ait basınç dayanımları	61
Tablo 3.9. 300 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları	63
Tablo 3.10. 400 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları	64
Tablo 3.11. 300 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası ultrases hızı, ultrases hızlarının referans numunesine göre değişimleri oranları	67
Tablo 3.12. 400 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası ultrases hızı, ultrases hızlarının değişimleri	68
Ek Tablo 1. 300-R kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları.....	84
Ek Tablo 2. 300-10Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	85
Ek Tablo 3. 300-15Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	85
Ek Tablo 4. 300-20Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları	86

Ek Tablo 5. 300-5M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	86
Ek Tablo 6. 300-10M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	87
Ek Tablo 7. 300-20M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	87
Ek Tablo 8. 400-R kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	88
Ek Tablo 9. 400-10Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	88
Ek Tablo 10. 400-15Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	89
Ek Tablo 11. 400-20Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	89
Ek Tablo 12. 400-5M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	90
Ek Tablo 13. 400-10M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği akım okumaları.....	90
Ek Tablo 14. 400-20M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsiliği	91

SEMBOLLER DİZİNİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
C	: Coulomb
CaCO ₃	: Kalker
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit(Sönmüş Kireç)
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
C ₂ S	: Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	: Trikalsiyum Silikat
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat
C ₃ S ₂ H ₃	: Mikrokristal Hidrat
CO ₂	: Karbon Dioksit
Dm	: 16 Periyot Sonrası Kütle Kaybı
DV	: Hacimsel Kayıp
PÇ	: Portland Çimentosu
pH	: Asitlik veya Bazlık Derecesini Tarif Eden Ölçü Birimi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
T50	: T50 Süresi Deneyi
XRD	: X Işını Difraktometresi(Kırınımı)
XRF	: X Işını Floresans
δR	: Örnek Birim hacim ağırlığı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton; çimento, su, agrega ve bazı katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Beton, ahşap gibi yanmaz, çelik gibi paslanmaz kısacası olumsuz çevresel etkilere karşı büyük dayanıklılık gösterir. Bunun yanı sıra ekonomik ve az enerji ile üretilebilir olması inşaat sektöründe tercih edilen bir yapı malzeme olmasını sağlamaktadır. Sertleşmiş betonun bakım masrafları yok denebilecek kadar azdır ve çimento haricindeki birçok birleşeni kolayca temin edilebilir. Betonun bu özellikleri onu üretimi kolay ve ekonomik kılmaktadır (Erdoğan, 2013).

Yapılardan beklenen en önemli özellikler dayanım, dayanıklılık, estetiklik ve ekonomik olmasıdır. Betonun uygulanan yükleri taşımasının yanı sıra durabil (dayanıklı) olması zorunludur. Betonun durabilitesi, iç veya dış nedenler sonucunda oluşan bozulmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir.

Betonun bozulması genellikle tek bir nedene bağlanamaz. Birkaç etkinin ardı sıra birbirini tetikleyerek etkimesiyle beton ve betonarme yapılarda hasar görülmesi mümkündür. Hem beton bünyesinde hem de betonun bulunduğu ortam ile olan etkileşimlerde sıcaklığın, nemin ve kimyasalların birlikte taşınımı ve bu taşınım mekanizmalarını kontrol eden parametreler durabilitenin temel unsurunu oluştururlar.

Yapılarda meydana gelen hasarlar fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Fiziksel etkenler, yüzey aşınması sebebiyle oluşan kütle kaybı, betonda çatlama gibi etkenlerdir. Kütle kaybına yol açan etkenlerin bazıları, aşınma, erozyon ve oyulma iken; çatlama yol açanlar ise ıslanma-kuruma, boy ve hacim değişimleri, yüksek sıcaklıklar ve yangın, donma-çözülme, aşırı yükleme vb. etkenlerdir. Fiziksel ve kimyasal etkenler birbirini tetikler özelliktedir. Beton hizmet ömrü boyunca fiziksel ve kimyasal birçok etkiye maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerinin gelişimini hızlandırabilmektedir. Betonun fiziksel etkenlerle çatlaması sonucu geçirimsizliğin artması ve buna bağlı olarak betonun kimyasal nedenlerle bozulmasının kolaylaşması bu durumuma bir örnektir.

Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri (puzolanlar), portland çimentosuna benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu maddeler, puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını geliştirmektedirler. Puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri, betonun boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir hamur elde edilmesini sağlarlar. Puzolanların bu özellikleriyle de betonun dayanım ve dayanıklılığı artırılabilir.

1.2. Betonu Oluşturan Malzemeler ve Genel Özellikleri

1.2.1. Agregalar

Değişik boyutlardaki mineral kökenli sert tanelerden oluşan agregalar, en önemli yapı malzemelerinden biri olan betonun hacimsel olarak %60-%80'ini oluşturur. Agregalar, çimento hamurunda zamanla oluşan hacim değişikliklerini kısıtlayarak betonda oluşacak çatlakları azaltır, sert ve yüksek mukavemetli olmaları nedeniyle de betonun dayanımını artırır. Betonun birçok özelliğini, betonda kullanan agregalar belirler.

1.2.2. Su

Beton üretiminde kullanılacak olan karışım suyu mümkün olduğunca temiz olmalı ve içerisinde betonun taze ya da sertleşmiş halindeki özelliklerini kötü etkileyecek miktarda kil, silt, organik madde, asit, klorür, sülfat, yağ ve endüstriyel atıklar bulunmamalıdır. İçilebilir nitelikteki sular ve içerisinde yüksek oranda zararlı madde bulunmayan kuyu suları karma suyu olarak kullanılabilir. Beton üretiminde kullanılan suyun pH derecesi 7'nin üstünde olmamalıdır (Neville, 2004).

1.2.3. Çimento

Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen ve sertleştikten sonra suda tekrar erimeyen hidrolik bir bağlayıcıdır. Portland çimentosu; kireç, alümin, demir oksit ve silis bileşimli hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, yüksek fırında pişirilmeleri sonucu elde edilen klinkerin öğütülmesiyle ortaya çıkan hidrolik bir bağlayıcıdır (Baradan vd., 2012).

Tipik bir normal portland çimentosunun ana bileşenleri Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Portland çimentosunun tipik kompozisyonu (Erdoğan, 2013).

Bileşimin Adı	Kimyasal Formülü	Notasyon	Ağırlık (%)
Trikalsiyum silikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	25
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	12
Tetrakalsiyum alümino ferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8
Kalsiyum sülfat dihidrat (alçı taşı)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2	3.5

C_3A ve C_3S , çimentonun en reaktif ana bileşenleridir. C_2S ise çok daha yavaş reaksiyona girer. Çimentoya katılan alçı taşı C_3A 'nın hızlı reaksiyon yapmasını engeller. C_3S 'in çimentoda yüksek oranda bulunması çimentoda erken dayanım sağlar. C_2S erken dayanım sağlamaz fakat ilerleyen aşamalarda dayanıma katkısı yüksektir (Young, 1998; Erdoğan, 2013).

Çimentonun su ile gerçekleştirdiği reaksiyonlara çimentonun hidratasyonu denir ve bu reaksiyon sonucu oluşan yeni reaksiyon ürünlerine çimentonun hidratasyon ürünleri denilmektedir.

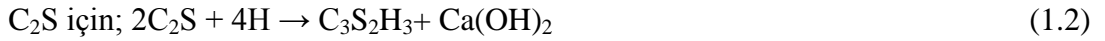
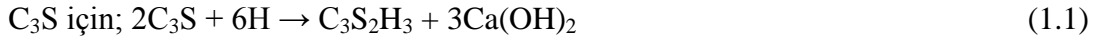
Çimentonun hidratasyon olayı çok kısa sürede sona eren bir olay değildir. Tam aksine senelerce süren bir olaydır. Zaman içinde gelişen bu hidratasyon olayı genellikle üç şekilde izlenebilir:

- Hidratasyon sonucunda oluşan C-S-H adı verilen hidrate elemanlar ile sönmüş kireç, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, meydana getirir. Bu reaksiyonların sonucunda silikatların anhidrit türleri çimento içinde azalır. Azalan bu anhidrit elemanlarının miktarının ölçülmesiyle hidratasyon izlenebilir. Çimentonun su ile birleşmesinden sonra

geçen belirli bir süre sonunda çimentodaki C_3S miktarı ne kadar az ise hidrasyon o kadar ilerlemiş demektir.

- Diğer bir yöntem, oluşan kireç miktarının saptanmasıdır. Bu miktarın fazla olması hidrasyon olayının ilerlediğini gösterir.
- Üçüncü yöntem ise hidrasyon ısısının ölçülmesiyle hidrasyon sinetiğinin izlenmesidir. Hidrasyon ısı hidrasyon devam ettiği sürece artar ve hidrasyon tamamlanınca bu artış sona erer (Baradan vd., 2012).

Trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum alüminatın (C_3A) hidrasyonu aşağıda verilen denklemlerle gerçekleşmektedir (Baradan vd., 2012).



C_3A 'nın suyla yaptığı reaksiyon çok hızlıdır ve ani prize sebep olmaktadır. Bu sorunu aşmak için klinkerin öğütülmesi sırasında alçı taşı ilavesi yapılır.

1.2.3.1 Çimento Tipleri

Çimentonun içindeki ana bileşenlerinin miktarlarını değiştirerek çeşitli kullanım amaçlarına yönelik çimentolar elde edilebilmektedir. TS EN 197-1 "Genel Çimentolar" standardı kapsamında çimentolar 5 ana tip olarak gruplandırılmıştır. Çimento tipi, yapının kullanım yeri, amacı ve olası dayanıklılık problemleri dikkate alınarak seçilmelidir (Erdoğan, 2013).

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland Kompoze Çimento
- CEM III Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
- CEM IV Puzolanlı Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

1.2.4. Beton Katkı Maddeleri

Beton katkı maddeleri, betonun bazı niteliklerini değiştirip performansını artırmak veya daha ekonomik olmasını sağlamak için karışımdan önce veya karışım esnasında betona az miktarda ilave edilen organik veya inorganik maddelerdir.

1.2.4.1. Kimyasal Katkı Maddeleri

Kimyasal katkı maddeleri, mineral katkı maddelerine göre betonda çok daha az miktarda (toplam bağlayıcı ağırlılığının %0.1-5'i) kullanılırlar. Kimyasal katkı maddeleri önerilen miktardan daha fazla kullanıldığında betonun taze ve sertleşmiş halini olumsuz etkileyebilmektedir.

Betonda kullanılan katkı malzemelerinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Katkı maddelerinin, betonda sabit su/çimento oranında işlenebilirliğin artmasında, su miktarının azaltılmasıyla mukavemet artışının sağlanmasında, ayrışmanın azaltılmasında, dayanıklılığın artırılmasında donatı korozyonunun engellenmesinde ve kür süresinin azaltılmasında önemli faydaları bulunmaktadır. Bunun yanında işçilikten tasarruf sağlama yönünden de yararı vardır.

Kullanılan katkı maddeleri her betonun özelliğini iyileştirmez. Katkı maddeleri, iyi üretilmiş bir betonun özelliklerini daha geliştirici yönde kullanılan malzemelerdir.

Kimyasal katkı maddeleri TS EN 934-2'de aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (TS EN 934-2, 2002).

1. Su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar
2. Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkılar
3. Su tutucu katkılar
4. Hava sürükleyici katkılar
5. Priz hızlandırıcı katkılar
6. Sertleşmeyi hızlandırıcı katkılar
7. Priz geciktirici katkılar
8. Su geçirimsizlik katkıları
9. Priz geciktirici/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar
10. Priz geciktirici/yüksek orandasu azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar
11. Priz hızlandırıcı/su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar

Kimyasal katkıların çalışma mekanizmaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal olarak linyosülfonat, hidroksikarboksilik asit ve karbonhidrat yapıdadırlar. Betonun karma suyu gereksinimini %6.5'ten daha yüksek oranda azaltabilirler. Bunun yanında beton basınç dayanımını %10'dan fazla artırabilmektedir.
- Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri: Kimyasal olarak modifiye linyosülfonatlar, akrilik kopolimerler, amino aromatik sülfoneik asit, silfene melamin formaldehit yapıdadırlar. Betonun karma suyu gereksinimini %12'den daha yüksek oranda azaltıp basınç dayanımını %15'den daha fazla artırabilmektedir.
- Priz hızlandırıcı katkıları: Bu tip kimyasal katkıların temel bileşenleri lükonat, salisik asit, kalsiyum linyosülfonatlarıdır. Sıcak havala koşullarında betonun çatlamasını engellemek ve priz süresini azaltmak için kullanılırlar.
- Hava sürükleyiciler: Temel bileşimleri ağaç reçine tuzları, yağlı asit tuzları ve silfene hidrokarbonik asit tuzlarıdır. Betonun donma-çözülme direncini artırıcı etkileri vardır (Akman, 1996)

1.2.4.2. Mineral Katkı Maddeleri (Puzolanlar)

Beton üretiminde kullanılan mineral katkı maddeleri farklı kaynaklardan elde edilir. Elde edildikleri kaynaklara göre mineral katkı maddelerini üç sınıfa ayırabiliriz. Bu sınıflar: doğal malzemeler (volkanik tüfler, traslar vd.), beton üretimiyle doğrudan ilgisi olmayan endüstriyel atıklar (uçucu küller, silis dumanı, granüle yüksek fırın cürüfu vd.), ısıtılmış işlem uygulanmış malzemelerdir (pişirilmiş kil vb.) (Erdoğan, 2013).

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda ve sulu ortamdayken kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan, silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (ASTM C125).

Puzolanların yapısı büyük ölçüde silis ve alüminlerden oluşmaktadır. İnce öğütülmüş puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde bu malzemeler arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyon tıpkı portland çimentosunun hidratasyonunda

olduğu gibi, hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açar (Erdoğan, 2013).

Bir puzolanın bağlayabileceği en fazla kireç (Ca(OH)_2) miktarı ve bağlanma işleminin hızı puzolanik aktivite olarak ifade edilir. Puzolanik aktivite büyük ölçüde, puzolanın özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların kalitesine ve miktarına bağlıdır.

1.2.4.2.1. Doğal Puzolanlar

Doğada bulunan ve ince taneli hale getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve su ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren silis ve alüminli malzemelere doğal puzolan denilmektedir.

Volkanik orjinli cam ve tüfler, traslar, diatomlu topraklar ve bazı pişirilmiş kil ve şeyler doğal puzolanlardır.

1.2.4.2.1.1. Doğal Zeolit

Zeoliti 1576'da İsveçli mineralog Cronstedt keşfetmiştir. Zeolit kelime olarak kaynayan taş anlamına gelmektedir. Suyla birleştiiğinde dağılması nedeniyle bu şekilde adlandırılmıştır. Bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi SiO_4 veya AlO_4 tetraederleridir (dört yüzeyle). Bu birimler üç boyutta değişik şekillerde dizilerek mikro gözeneklere sahip zeolit iskeletini oluştururlar. Bu iskelete bağlanan ikincil ve üçüncül yapı birimleri arasında boşluklar/kanallar oluşur. Sonuç olarak zeolitin boşluk miktarı toplam hacminin %20'si ile %50'si arasındadır. Zeolit minerallerinin en önemli özelliği bu boşluklu yapısıdır. Bu boşluklara sıvı ve gaz molekülleri kolayca girebilmektedir (Karaüç, 2008).

Doğal zeolit, Çin'de çimento katkısı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çin'de her yıl üretilen 200 milyon ton çimento için yaklaşık 30 milyon ton zeolit çimento katkısı olarak üretilmektedir (Öz, 2006).

Zeolitler, alkali ve toprak alkali metallerin kristal yapısına sahip, içerisinde sulu alüminyum silikatları barındıran yapısı sebebiyle son 30 yıldır katalizör, adsorbent ve iyon değiştirici olarak kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. Kullanım alanı, yüksek iyon değiştirme kapasitesi, mikro gözenekli yapısı, moleküler elek işlevi, bünyesinde tutabildiği su gibi özelliklerine göre değişir (Öter, 2002).

Zeolitin geniş alanlarda kullanılmasını sağlayan karakteristik özellikleri şu şekilde özetlenebilir;

- Yüksek hidrasyon enerjisi
- Hidrate olduklarında sahip oldukları düşük yoğunluk ve boşluk hacmi
- Dehidarte olmuş kristaller içerisindeki moleküler boyuttaki kanal sistemi
- Elektriksel iletkenlik
- Su buharı ve gaz adsorpsiyonu (Kurama, 1994).

Zeolit, Çin'de betonun performansını yükseltmek için mineral bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Çimentonun bir bölümünün zeolit ile yer değiştirmesi, alkali-agrega reaksiyonunun kötü sonuçlarını engelleyip beton dayanımını yükseltici özellikleri vardır (Feng vd., 2002). Zeolit katkılı betonun mekanik ve mikroyapısal özelliklerini, dayanım ve dayanıklılığını geliştirmektedir. Ayrıca zeolit, çimento pastası ve agreganın ara yüzey yapısını geliştirmektedir. Zeolitin betonun dayanımına katkısı tıpkı diğer puzolanlar gibidir. Zeolit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile girdiği puzolanik reaksiyon sonucu betonun iç yapısını iyileştirir (Öz, 2006).

Büyük doğal zeolit yatakları bulunduktan sonra zeolit kullanımı artmıştır. Son yıllarda termal ve kimyasal yolla modifiye edilen doğal zeolitler özel endüstriyel amaçlarla kullanılmaktadır. Günümüzde 40'a yakın doğal zeolit, 150'nin üzerinde de sentetik zeolit vardır (Kurama, 1994).

Günümüzde zeolitler, kimyasal elek, gıda sektörü, yem katkısı, koku ve gaz emici olarak kullanılırlar. Tarımda, gübre etkinliğini artırıp bitkinin büyümesi için kullanılırlar. Tarım ve hayvancılık sektörü dışında endüstriyel amaçlarla da kullanılabilirler. İnşaat sektöründe çimento katkısı, tuğla yapımında yapı malzemesi olarak kullanılırlar. Yapı sektöründe korozyon önleyici boyalarda, endüstriyel atıkların depolanması gibi çeşitli kullanımları da mevcuttur. İnşaat ve endüstri sektöründe en çok kullanılan türü klinoptilolittir (URL-1).

Zeolitler inşaat sektöründe puzolan üretiminde, hafif agrega üretiminde ve boyutlandırılmış taş üretiminde kullanılırlar.

İlk puzolanlı çimento; yol, su geçidi ve kamu binalarının yapımında İtalya'da kullanılmıştır. Zeolitik puzolan çimentolar, sürekli su ile temas eden yapılarda etkili bir

şekilde kullanılmaktadır. Almanya’da büyük miktarda zeolitik tüf, puzolanlı çimento üretiminde kullanılmaktadır (Sarıkaya, 2006).

Zeolitler 200 yıldan beri yapı sektöründe kullanılmaktadır. Zeolitli tüflerin hafif ve işlenebilir oluşu, binalarda yapı taşı olarak kolaylıkla kullanılabilmesini sağlamıştır. Güney Meksika’da birçok bina klinoptilolit zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan yapılmıştır. Zeolitler Japonya’nın Otsunomiyo kentinde yüzlerce yıldır yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Buradaki zeolitler %80-85 klinoptilolit, az miktarda da volkanik cam içerirler. Orta İtalya’daki Napoli kentinin çoğu binası farklı tür zeolit tüflerinden yapılmıştır. Ayrıca Avrupa’nın birçok yerinde Almanya’nın Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılmıştır.

Klinoptilolit, perlit gibi 1200-1400 °C’ye kadar ısıtıldığında içerdiği suyun ani olarak buhara dönüşmesiyle genleşir. Bu anda soğuma sağlanırsa hafif ve gözenekli bir silikat malzemesi elde edilir. Böylece geliştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0.8g/cm³e kadar düşürülebilmektedir. Dünyadaki zeolit rezervleri 1950’lerden sonra saptanmaya başlanmış ve hemen hemen bütün kıtalarda yaygın olarak görülmüştür. Yeryüzündeki sedimanter kayalarda en fazla klinoptilolit mevcuttur. Dünyanın en büyük zeolit rezervleri Küba, Rusya, A.B.D, Japonya, İtalya, Güney Afrika, Macaristan ve Bulgaristan olduğu söylenebilir (Sarıkaya, 2006).

Ülkemiz doğal zeolit oluşumu açısından ideal jeolojik ortama sahip olmasına rağmen, ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpaazarı-Göynük civarında zeolite rastlanmıştır. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde Türkiye’nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiştir. Daha sonra yapılan araştırmalarda Manisa/Gördes havzasındaki kayalar içerisinde zeolit bulunmuştur ve kayalardaki zeolit oranı ortalama %80 civarındadır (Şen, 2006). Burada çıkan zeolit türü klinoptilolittir ve %95 saflığa sahiptir. Beton üretiminde puzolanik madde olarak kullanılabilir. Zeolit, yer altı suyuna maruz kalan yapıların korozyonunu azaltıcı etkileri vardır. Aynı zamanda perlit ve diğer volkanik camlar gibi zeolitler de genleşmeye uygundur (URL-2 ve 3).

1.2.4.2.1.2.Metakaolin

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle elde edilen beyaz renkli amorf yapılı bir alümina silikattır. Pişirilen kil genellikle 100 ile 200°C arasında bünyesinde barındırdığı suyu kaybetmeye başlar. Kaolin kilinin metakaoline dönüştüğü

sıcaklık ise 500 ile 900 °C aralığındadır. Kaolin kili bu sıcaklık aralığında içindeki suyun büyük kısmını kaybederek yüksek oranda puzolanik aktiviteye sahip olan metakaoline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alümina ve silikalar kristal yapılarındaki düzeni kaybederek kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Kaolin kili aşırı miktarda sıcaklığa maruz kalırsa (900 °C'nin üstü) reaktivitesini kaybederek farklı bir faza dönüşür. Başarılı bir ısıl işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik aktiviteye sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir. Kilin kalsinasyon ya da yanma sıcaklığı, açığa çıkan ürünün puzolanik aktivitesini etkilemektedir. Beton için üretilen metakaolinin en iyi kalsinasyon sıcaklığı 600-800°C'dir (Sun vd., 2005).

Metakaolin üretiminde hammadde olarak kaolin kili kullanılır. Kaolin kili; ince, beyaz, geleneksel porselen üretiminde kullanılabilen bir kildir. Kaolin kelimesi Çince'de beyaz tepe anlamına gelir ve Avrupa'ya gönderilen ilk kaolinlerin Kaoling dağından elde edildiği düşünülmektedir. Günümüzde metakaolin, yüksek performanslı beton üretiminde puzolanik malzeme olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Metakaolin yüksek performanslı beton elde etmek için kullanılan bir puzolanik malzemedir. Metakaolinin çimento harcında puzolan olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanır. Bu tarihten itibaren sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır (Siddique, 2008).

Metakaolinin portland çimentosunun bir kısmı ile ikameli olarak betonda kullanılması ilk olarak 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı'nın inşaatında kullanılmıştır. Burada metakaolinin kullanım amacı betonun dayanıklılığının artırılmasıydı. Bu tarihten sonra metakaolinin çimento ve beton içerisinde kullanımında artış olmuştur. Günümüzde ise betona ek olarak metakaolin, yüksek performanslı beton ve harç içerisinde de kullanılmaktadır. Metakaolinle ilgili yapılan çalışmalar genellikle en uygun metakaolin katkı oranının belirlenmesine yöneliktir (Özer, 2009).

Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ve CH arasında çimentonun hidratasyonu ile oluşan ana reaksiyon, suyun varlığında meydana gelir. Bu reaksiyon CSH jeline ilave olarak kalsiyum alümina hidrate ve alümina silikat hidrate bileşenler içeren kristalin ürünler de meydana getirir.

Metakaolinin silis dumanıyla rekabet edebilecek özelliklere sahip olması, metakaolin ile ilgili araştırmaları hızlandırmıştır. Metkaolinin betonun performansı üzerinde üç önemli etki mekanizması vardır. Bu etkiler; filler etkisi, portland çimentosunun hidratasyonunu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon özelliği olarak sıralanabilir. Metakaolin, diğer

puzolanlarda olduğu gibi kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimentoya ilave bağlayıcı özellik kazandırır. Literatürde metakaolinin çimentoyla ikameli kullanıldığında mekanik özellikleri, kılcal su emmeyi, permeabiliteyi, dayanıklılığı iyileştirdiği ve alkali silika reaksiyonunun oluşumunu azalttığı rapor edilmiştir (Siddique, 2008).

1.2.4.2.2. Yapay Puzolanlar

Çeşitli fabrikalar ve endüstriyel uygulamalardan sonra oluşan, diğer puzolanlar gibi tek başına bağlayıcı özelliği olmayıp kireç veya çimentoyla karıştırıldığında su ile reaksiyona girip bağlayıcı özellik gösteren silis veya silis-alümin içeren atık/yan ürünlere yapay puzolan denir. Beton üretiminde en sık kullanılan yapay puzolanlardan bazıları uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufudur (Duman, 2010).

1.2.4.2.2.1. Uçucu Küller

Elektrik enerjisi üretimi için, termik santrallerde çoğunlukla yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük miktarı çok ince olan, bir miktarı ise nispeten daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince olan küller, yakıt gazlarıyla birlikte uçarak bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Nispeten daha ağır olan iri kül taneleri ise taban külü olarak ocağın tabanında birikmektedir.

Atık malzeme olarak oluşan bu küllerin yaklaşık %75-80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere "uçucu kül" denir. Atık gazlarla birlikte çok büyük miktarda kül dışarı çıkması durumunda, termik santralin etrafı kısa sürede küllerle kaplanacağından bu küller bacadan çıkmadan önce bir takım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler yardımıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolarda biriktirilmektedir. Silolarda biriktirilen bu küller çeşitli yöntemlerle santralin uzağında ayrı bir yerde atık olarak depolanmaktadır.

Uçucu küllerde çok yüksek miktarda oksitler bulunur. Bu oksitler SiO_2 , Al_2O_3 , ve Fe_2O_3 'dür. Bunların yanı sıra bir miktar CaO , MgO , C (çok ince durumda yanmış kömür) ve Na_2O 'da bulunabilmektedir.

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60-%90) amorf durumdadır. Genellikle küresel olan uçucu kül tanelerinin boyutları 1 – 150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Yoğunlukları ortalama 2.4 g/cm³'dür. Renkleri açık griden koyu griye değişkenlik gösterebilmektedir. Daha çok karbon içeren küller daha koyu renklidir, daha fazla demir içerenler ise açık gri renktedir. Silisli ve alüminli amorf yapıda oldukları için, çok ince öğütüldüklerinde tıpkı ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik gösterebilmektedirler. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde hidrolik bağlayıcı özelliği göstermektedirler. Bu nedenle puzolanlı çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Beton karışımlarında kullanılan uçucu kül miktarı genellikle çimento ağırlığının %15-%50'si civarında değişebilmektedir (Erdoğan, 2013).

1.2.4.2.2.2. Silis Dumanı

Silisyum metalinin ve silisyumlu metal alaşımlarının üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars kok kömürü yardımıyla yaklaşık 2000°C sıcaklıktaki elektrikli fırınlarda indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Bu işlem sırasında çok büyük miktarda SiO₂ içeren gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO₂'in hızlıca soğutulup yoğunlaştırılmasıyla, gazın içerisindeki SiO₂, amorf yapıya dönüşmektedir. %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıdaki çok ince katı partiküllerden oluşan bu malzemeye "silis dumanı" adı verilmektedir. Silis dumanı amorf yapıda ve çok ince taneli bir malzemedir. İçerdiği yüksek miktardaki SiO₂ sayesinde mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanlar gibi Ca(OH)₂ ile sulu ortamda birleşerek hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Silis dumanı, portland çimentosu üretiminde klinker ve az miktarda alçıyla birlikte öğütülerek silis dumanlı çimento üretiminde kullanılmaktadır. Ancak asıl kullanımı beton katkı malzemesi şeklindedir.

Silis dumanı, genellikle beton üretiminde beton karışımındaki toplam çimento miktarının yaklaşık %10'u ile ikame edilerek kullanılır. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO₂ içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda gerekse nihai olarak yüksek dayanımlı beton üretilmesini sağlamaktadır.

Silis dumanı çok ince taneli olduğundan, taze betonun işlenebilirliğini azaltmakta ve su ihtiyacını arttırmaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılacak olan silis dumanı ile birlikte betona su azaltıcı katkı maddesi de eklenmelidir.

Silis dumanının rengi açık ve koyu gri tonlarındadır. Karbon içeriği arttıkça daha koyu renkte olmaktadır. Silis dumanının tane boyutu 0.1–0.2 µm kadardır. 45 µm boyutlu elek üzerinde kalan taneler aşırı büyük taneler olarak kabul edilmektedir. Silis dumanının özgül yüzeyi 130.000–280.000 cm²/g arasında değişmektedir. Betonda kullanılan silis dumanının özgül yüzeyi genellikle 200.000 cm²/g civarındadır. Silis dumanının özgül ağırlığı 2.2–2.3 g/cm³ kadardır. Silis dumanının gevşek birim ağırlığı 240–300 kg/m³ civarındadır. Sıkıştırılmış durumda ise 1200 kg/m³ kadardır.

1.2.4.2.2.3. Yüksek Fırın Cürufu

Demir üretiminde, demir cevherlerinin yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda yaklaşık 1600°C'ye kadar ısıtılarak içindeki oksijen ve yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Bu tip fırınlarda yakıt olarak kok kömürü kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kok kömüründeki karbon ile demir oksitteki oksijen birleşip karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırını terketmektedir. Bu işlemler sonunda geriye eriyik durumda demir ve eriyik durumda olan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler kalmaktadır. Demirin yoğunluğu diğer maddelerden daha fazla olduğu için eriyik durumdaki demir fırının en alt kısmına, eriyik diğer maddeler ise demirin üstünde yer almaktadır. Demir ve diğer maddeler fırından farklı çıkışlardan dışarıya alınmaktadır. Elde edilen bu yabancı maddeler topluluğu yüksek fırın cürufu olarak adlandırılmaktadır.

Yüksek fırından malzemeler dışarıya alınırken bu malzemeler yaklaşık 1500°C sıcaklıktadır. Eriyik durumdaki cüruf havada yavaş soğutulursa kristal yapıya sahip olmaktadır. Ancak eriyik cüruf basınçlı suyla çok hızlı bir şekilde soğutulursa hem irili ufaklı kum taneleri boyutunda hem granüle durumda büyük oranda amorf yapılı olmaktadır.

Amorf yapıda olan ve büyük miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren granüle yüksek fırın cürufu, öğütülüp çok daha ince taneli duruma getirildiğinde diğer puzolanlar ile benzer özellik göstermektedir. Çok ince taneler haline öğütülen bu yüksek fırın cürufu büyük miktarda CaO içermesi nedeniyle kendiliğinden de bir miktar bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır. Havada yavaş soğutulan kristal yapılı cürufun puzolanik özelliği bulunmamaktadır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu tıpkı doğal puzolanlar ve uçucu küller gibi betonda kullanılmaktadır. Granüle yüksek fırın cürufu kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleşerek hidrolik bağlayıcılık özeliği gösterir. Cürufu portland çimentosu üretiminde kullanılır (Erdoğan, 2013).

1.2.5. Taze Beton Özellikleri

Beton taze haldeyken; kolayca karıştırılabilir, taşınabilir, yerleştirilebilir ve sıkıştırılabilir olması istenir. Beton kalıba yerleştirilirken çimento harcı ve agregası arasında ayrışma olmaması gerekmektedir. Bu özelliklere kısaca betonun işlenebilmesi denir. Betonun yerine yerleştirilmesi sırasında terleme olayı mümkün olduğu kadar az olmalıdır ve betonun homojen yapısı korunmalıdır. Ayrıca malzemeler karıldıktan sonra, beton sertleşmeye başlamadan kalıba yerleştirilebilmesi için priz süresinin yeterli seviyede olması istenir.

1.2.6. Sertleşmiş Beton Özellikleri

Beton üretiminde üretici ve kullanıcının son hedefi, sertleşmiş haldeki betonun kendisinden istenen özellikleri gösterebilecek kalitede olmasıdır. Sertleşmiş betonun herhangi bir yaş için hedeflenmiş asgari beton dayanımını sağlaması gerekmektedir. Çevrede bulunan betona zarar verebilecek sıvıların beton içerisine nüfuz ederek olumsuz etkiler yaratmaması için beton yeterince geçirimsiz olmalıdır. Beton, hizmet ömrü boyunca agresif çevresel etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu çevresel etkiler: donma-çözülme, aşınma etkisi, asit ve sülfat etkisi, alkali- silika reaksiyon gibi özetlenebilir.

1.2.6.1. Dayanım

Betonun dayanımı terimi: basınç, çekme ve kesme (kayma) gerilmesi oluşturan tüm etkilere karşı dayanımlarını kapsamaktadır (Ersoy, 1985). Betonun tüm mekanik özellikleri arasında en önemli olan ve değeri en büyük olanı basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı, betonun tüm özellikleriyle paralellik gösterir. Örneğin yüksek basınç dayanımına sahip olan

bir beton sert, geçirimsiz ve dış etkilere karşı dayanıklılığı fazladır. Bu nedenle basınç dayanımı betonun kalitesinin genel bir göstergesidir (Baradan, 1998).

Betonun çekme dayanımı, betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Genelde, yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerlerine gelen basınç veya eğilme kuvvetleri betona dolaylı olarak çekme kuvvetinin uygulanmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2. Dayanıklılık

Betonun içerisine sızan su ve bazı kimyasal maddeler, betonda değişik kimyasal reaksiyonların oluşmasına neden olmaktadır. Bu reaksiyonlar betonu daha boşluklu bir hale getirip betonun kalitesini olumsuz etkiler. Bilindiği gibi, yapıların tasarımında betonun istenilen dayanımdan daha düşük dayanıma sahip olmaması istenir. Aynı zamanda betonun planlanan hizmet süresi boyunca karşılaştığı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında yeterli direnci gösterebilmesi; yani yeterince dayanıklı olması, en az betonun dayanımı kadar önemlidir.

Çeşitli tür yapılarda kullanılan beton, hizmet süresi boyunca bünyesinde yıpranmalara yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etkenlerle karşılaşmaktadır. Bu etkenler doğa koşullarından, betonun kullanıldığı ortamdan, betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır.

1.2.6.2.1. Karbonatlaşma

Havadaki karbondioksit beton yüzeyiyle temas ederek beton içerisine girip beton içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek karbonatlaşmaya yol açmaktadır.



Karbonatlaşma, havadaki karbon dioksit miktarının çok az olduğu durumlarda dahi gerçekleşebilir ancak böyle bir durumda reaksiyon çok yavaş seyredir.

Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülür ve betonda çatlaklar oluşur. Kalsiyum hidroksitinin çözünmesi nedeniyle beton içerisinde mevcut olan alkali ortam daha düşük düzeye iner ve bunun sonucunda karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki donatılar korozyona uğrar (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2.2. Asit Etkisi

Sertleşmiş beton içerisine nüfuz eden sularda bulunan asitler, betonun genişip hasar görmesine yol açan kimyasal tepkimelerin oluşmasına neden olur. Asitlerin betonda yaptığı bu yıpratıcı etkiye “asit hücumu” denilmektedir. Sertleşmiş betonun içerisine giren sulardaki asitler havadaki karbon dioksit, organik atık, araçlardan salınan yakıt atığı gibi farklı kaynaklı olabilmektedir.

Portland çimentosu yüksek derecede alkali olduğu için, beton güçlü asitlerin ya da asit oluşturan maddelerin saldırısına karşı dayanıksızdır. Kimyasal saldırı, çimento hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve oluşan yeni ürünlerden eriyebilir olanların betondan ayrılması, erimez olanların betonu parçalaması şeklinde görülür. Asit saldırısına en hassas bileşen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'dir. C-S-H'lar da saldırıya uğrayıp zarar görebilir. Asit reaksiyonlarının hızı ve şiddeti; asit tipine, etkilenme süresine ve asit yoğunluğuna göre değişir. Ancak en önemli etken oluşan kalsiyum tuzunun çözünürlüğüdür. Çözünürlük arttıkça, su ile taşınan maddeler zararı artırmaktadır. Reaksiyonların gelişimine bağlı olarak sertleşmiş betonun yüzeyinden başlamak suretiyle bünyesinde yumuşama ve gözenekler oluşur. Ayrıca, biyolojik oluşumlar sonucu, kanalizasyon borularında olduğu gibi, zayıf asitler de kuvvetli asit haline dönüşebilir. Asit etkisi yüzeyden içeriye doğru olduğundan, dış yüzeyin izolasyonu zorunludur. Geçirimsiz beton üretmek yeterli değildir. Bu amaçla bitümlü malzemeler, poliüretan, sentetik reçineler, özel yağlar, boya ve vernikler, sentetik lastik gibi maddeler kullanılabilir.

1.2.6.2.3. Sülfat Etkisi

Yer altı sularında, bazı killi topraklarda ve cürufulla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarlarda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat ve potasyum sülfat gibi tuzlar bulunabilmektedir.

Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularla birlikte gelen sülfatlar, betonun genişip çatlamasına yol açan kimyasal reaksiyonların oluşmasına neden olmaktadır. Sülfatların yaptığı bu yıpratıcı etkiye “sülfat atağı” denilmektedir.

Sülfat atağına maruz kalan betonların yüzeyleri beyazımsı bir görünüm almaktadır. Sülfat etkisi genel olarak, beton blokların kenarlarında ve köşelerinde başlamaktadır ve bu etki betonun iç kısımlarına doğru ilerleyerek beton yüzeyinin tabakalar halinde parçalanmasına neden olmaktadır.

Yapıların temel betonları, istinat duvarları, kanal betonları gibi suyla temas halinde olan yerlerde sülfat hücumu oldukça sık rastlanmaktadır. Diğer tüm dayanıklılık problemlerinde olduğu gibi betonun sülfata karşı direnci betonun geçirimsizlik seviyesine bağlıdır (Erdoğan, 2013). Sülfat etkisinin şiddeti arttıkça geçirimsizliği artırmanın yanı sıra, C₃A oranı düşük çimento kullanmak veya puzolanik katkılı beton üretmek gibi ek önlemler alınması zorunludur. Çimentonun kimyasal yapısı, özellikle C₃A içeriği betonun sülfata dayanıklılığında önemli bir parametredir. Bu nedenle ASTM standartları C₃A içeriği %8 ve altında olan çimentoları sülfata karşı orta seviye dayanıklı, %5 ve altında olan çimentoları ise sülfata yüksek dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Normal Portland çimentolarında C₃A oranı %8-11 arasında olduğundan bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir.

1.2.6.2.4. Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali-silika reaksiyonu, sertleşmiş betonun içerisindeki alkalilerle reaktif silika içeren agregalar arasında oluşan bir reaksiyondur. Portland çimentosu bünyesinde bir miktar Na₂O ve K₂O gibi alkaliler bulundurmaktadır. Betonun içerisinde yer alan alkaliler, genellikle çimento içerisinde bulunan alkalilerden kaynaklanmaktadır.

Beton üretiminde kullanılan bazı agregalarda ise bir miktar reaktif silis bulunmaktadır. Bu reaktif silika minerallerinin alkalilerle arasındaki reaksiyonların etkisiyle önce reaktif silika mineralleri çözünür. Daha sonra bu mineraller, ortamdaki bir miktar su alarak sodyum-silika-hidrat (N-S-H) ve potasyum-silika-hidrat (K-S-H) gibi alkali-silika jelleri oluşmaktadır.

Bu jellerin çok büyük miktarda su emme özelliği bulunmaktadır. Bu nedenle su emen jeller sertleşmiş betonun içerisinde çok büyük genleşmelere sebep olmaktadır.

Alkali-Silika reaksiyonu çok yavaş ilerleyen bir reaksiyondur ve bu reaksiyonun oluşması aylar hatta yıllar alabilmektedir (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2.5. Klorür Etkisi

Klorürler, beton içerisine betonun üretimi sırasındaki malzemeler ile ya da sertleşmiş haldeyken dışarıdan çözücü tuzlar ya da deniz suyundan gelir. Klorür iyonları beton içerisine girdikten sonra C_3A bileşeniyle bağlanarak Friedel tuzunu oluşturur. Bu tuzun betona herhangi bir zararı yoktur ancak C_3A 'nın klorür iyonlarını bağlayıcı özelliği olduğunu göstermektedir.

Deniz suyu etkisine maruz betonlarda hizmet ömrü boyunca bir değişiklik gözlemlenmeyebilir. Ancak içerisinde çelik donatı bulunan betonarme yapıların ömürlerinin en önemli belirleyicisi klorür girişi ve karbonatlaşmadır. Klorür iyonlarının etkisiyle meydana gelen korozyon, karbonatlaşma etkisinden farklı olarak bölgesel ve çukur oluşumu şeklinde gelişir. Bu nedenle kısa zamanda donatıların kesit alanlarında azalmalar görülmektedir (Doğan, 2008).

1.2.6.2.6. Donma-Çözülme Etkisi

Betonun içerisindeki su, açıktaki su gibi $0^{\circ}C$ sıcaklıkta donmamaktadır. Beton içerisindeki sulara eriyik halde bulunabilen tuzların etkisiyle bu sular $0^{\circ}C$ 'den biraz daha düşük sıcaklıklarda donmaktadır.

Ayrıca bu suların donma sıcaklığını etkileyen en önemli faktörlerin biri de suların içerisinde bulunduğu kapiler boşlukların çapıdır. Büyük kapiler boşluklardaki su $0^{\circ}C$ veya biraz daha düşük sıcaklıkta donarken, çok küçük kapiler boşluklardaki su $-15^{\circ}C$ veya $-20^{\circ}C$ gibi sıcaklıklarda donmaktadır. Jel boşlukları çok daha küçük olduğu için buradaki sular çok daha düşük sıcaklıkta ($-78^{\circ}C$ 'de) donmaktadır. Kısacası betonun içindeki suların donma noktası olarak belirtilebilecek tek bir değer yoktur.

Buza dönüşen suyun hacmi %9 kadar artmaktadır. Donma olayı başlayıp suyun bir miktarı buz haline dönüşünce ortaya çıkan bu hacimsel genişleme, boşluklarda henüz donmamış durumdaki suyu boşluklardan dışarıya itmektir. Boşluklardan dışarıya

çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyük gerilmeler yaratmaktadır.

Betonun sıcaklığı artınca, beton soğukken oluşmuş olan buzlar çözülmekte böylece betonun içindeki gerilmeler ortadan kalkmış olmaktadır. Ancak bir başka zamanda oluşan soğuma karşısında aynı olaylar tekrar etmektedir.

Donma-çözülme olayı fiziksel bir etkidir. Islanıp doygun hale gelen beton donma-çözülme devirlerine maruz kalınca kısa sürede hasar görmektedirler. Park alanlarında, hava alanlarında, kaldırımlarda, yollarda kullanılan betonlar bu tür hasarlara maruz kalabilecek betonlardır. Tekrar eden donma-çözülme olayları beton içerisinde gerilmeler yaratarak beton içerisindeki çatlakların büyümesine sebep olur ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelir.

Betonun donma-çözülme olayı karşısında yeterli dayanıklılığı gösterebilmesi için mutlaka hava sürüklenmiş olarak tasarlanmalıdır. Hava sürüklenmiş beton, genellikle hava sürükleyici katkıları ile üretilmektedir. Karma suyu içerisine ilave edilen bu katkıları çimento hamuru içerisinde 0.005-1.125 mm çaplı ve küresel şekilli milyonlarca hava kabarcığı oluşturur. Donma-çözülme olayı sırasında oluşan hidrolik basınçla kapiler boşlukların dışarısına itilen suyun bu boşluklara girip betondaki iç gerilmeleri azaltması sağlanmaktadır (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2.7. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık ve yangın, betonda fiziksel etkenler sınıfına girmektedir. Yüksek sıcaklık altında beton belirli bir süre önemli zarar görmez. Genelde beton belirli sıcaklık derecelerine (250°C) bir süre için dayanabilmektedir. Betonarme yapı elemanının yüksek sıcaklığa dayanıklılığını etkileyen parametreler arasında pas payı tabakasının kalınlığı, ısı transferine karşı direnç yer almaktadır. Bunun yanında kullanılan çimentonun türüne, betonun geçirimsizliğine ve ortam koşullarına bağlı olarak serbest su beton içerisinde büyük mertebelere ulaşabilmektedir. Sıcaklığın artışına bağlı olarak beton içerisindeki serbest suyun kaybı ile oluşabilecek büzülme ve beton içinde oluşabilecek buhar basıncı, pas payı tabakasının çatlamasına ve ufalanarak dökülmesine yol açabilir.

Farklı sıcaklıkların beton üzerinde oluşturduğu etkilere bakıldığında, sıcaklık 100-150°C civarlarında iken kılcal boşluklardaki ve jel boşluklarındaki suyun buharlaşması olayı gerçekleşirken, bir aşama ileri sıcaklık 150-200°C civarlarında betonda büzülme,

kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş gerçekleşir. Sıcaklığın 250-300°C civarında olması basınç dayanımında düşüş meydana getirir. Sıcaklığın 400°C civarlarına çıkması sonucunda hacimde yaklaşık %33 civarında azalma görülür. Betonun daha yüksek sıcaklıklara (400-600°C) çıkarılması durumunda ise %80'lere varan dayanım azalması ve tobermorit jelinin yapısının bozulması şeklinde hasarlar meydana gelmektedir (Baradan vd., 2012).

1.2.6.2.8. Aşınma

Beton yüzeyinde sürtünme ve çarpma şeklinde oluşan kuvvetler betonun yüzeyini adeta törpüleme etkisi yaratmakta, yüzeyin aşınmasına yol açmaktadır. Bu aşınma yavaş gerçekleşen fiziksel ve mekanik bir olaydır. Aşınma olayı genellikle üzerinde insan trafiği bulunan kaldırım ve döşeme betonlarında, üzerinde ağır trafik bulunan beton yollarda, akarsuların taşıdığı kum çakıl gibi parçacıkların aşındırdığı baraj, tünel boru, köprü ayağı betonlarında sık görülmektedir.

Beton yüzeylerinin aşınmaya karşı dayanıklı olabilmesi için betonun basınç dayanımı yüksek, agregaların aşınma olayına dayanıklı olması gerekmektedir. Taze betondaki terleme ve plastik rötre çatlaklarının minimum seviyede tutulması gerekmektedir (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2.9. Geçirimsizlik

Sertleşmiş betonun yüzeyiyle temas eden sıvı ve gazlar betonun içerisine geçebilmektedir. Geçirimsizlik, sıvı ve gazların betonun içerisine akış gösterebilmelerine imkân tanıyan özelliktir. Sıvı ve gazların beton içerisine girebilmesi için betondaki boşlukların birbiriyle bağlantılı olması gerekmektedir.

Geçirimsiz betonların içerisine sızan sular bünyelerinde yabancı maddeler de taşıyabilmektedir ve bu maddeler betonda bazı kimyasal ve fiziksel olaylara yol açabilmektedir.

Çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan ve sertleşmiş çimento hamurunun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit, dışarıdan sızan suların etkisiyle çözünerek yüzeye çıkarak betondaki boşluk miktarını artırır.

Betonun içerisine sızan sularda bulunan sülfat ve asitler betonun içerisinde genleşme yaratabilecek kimyasal ürünlerin oluşmasına yol açmaktadır. Betona giren suların içlerinde bulunan oksijen ve klor, betonun içerisindeki demirlerin paslanmasına neden olmaktadır. Paslanma sonucunda donatıların kesit alanları küçülür ve korozyon ürünleri betonun içerisinde genişip betona zarar vermektedir.

Kapiler boşluklar içerisindeki su donarak beton içerisinde çok büyük gerilmeler oluşturur. Kısacası, betonun boşluklu olması, betonun içerisine su girmesine ve bu suyun akış göstererek daha iç bölgelere ulaşip betonun hasar görmesine neden olmaktadır. Betonun bu şekilde hasar görmemesi için olabildiğince geçirimsiz olması gerekmektedir (Erdoğan, 2013).

1.2.6.2.10. Su Emme

Sertleşmiş betonun içerisindeki boşlukların tamamı suyla dolu değilse, ıslak ortamda bu boşluklar içine dışarıdan su girebilmektedir. Bu işlem beton doygun hale gelene kadar sürebilmektedir.

Beton tarafından, içerisindeki boşluklara su çekilme işlemine su emme denilmektedir. Beton içerisine çekilen su önce büyük kapiler boşluklara daha sonra da küçük olanlara girmektedir. Dolayısıyla betondaki su emme ilk zamanlarda büyük bir hızla, daha sonra da giderek azalan bir hızla devam eder ve beton doygun hale gelene kadar su alma işlemi sürmektedir. Su emme hızı ve suyun miktarı, betonun ne ölçüde kuru olduğuyula alakalıdır.

Betonun emebileceği toplam su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmiyle ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise betonda kullanılan su/bağlayıcı oranı, agreganın cinsi, kür koşulları ve beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir.

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanım ve dayanıklılıkları da düşük olmaktadır. Örneğin kapiler boşluklara giren su donma sırasında genişerek betonu çatlatabilmektedir. Su emmesi yüksek olan beton, sülfat, asit, klor ve benzeri zararlı maddelerden daha fazla etkilenebilmektedir. Bu da betonda zararlı kimyasal olayların başlamasına ve betonun dayanım ve dayanıklılığında azalmaya sebep olabilmektedir.

Betonun geçirimsizliği ile betonun su emmesi farklı özelliklerdir ancak su emme, betonun geçirimsizliğini de etkileyen önemli bir özelliktir (Erdoğan, 2013).

1.3. Literatür Taraması

Bu kısımda zeolit ve metakaolin içeren betonlarla gerçekleştirilen akademik çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

Güneyisi ve Gesoğlu (2008), çimento yerine %10-20 metakaolin ikame ederek su/bağlayıcı oranı 0.35 ve 0.55 olan betonlar üretmiş ve bunların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, su emmeleri, kuruma büzülmesi, kuruma sırasındaki ağırlık kayıplarını araştırmışlardır. Civa porozimetre deneyiyle poroziteyi ve boşluk büyüklüklerinin dağılımını belirlemişlerdir. Metakaolin ikamesi betonun büzülmesini azaltmış, basınç dayanımını ise artırmıştır. 28 günlük numunelerde %20 metakaolin ikamesiyle basınç dayanımlarında %14, yarmada çekme dayanımlarında ise %8 civarında artış gözlemlenmiştir. Yapılan su emme deneylerinde de %10 ve %20 metakaolin ikamesiyle su emmelerinin %75-95 arasında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Ramezianpour vd., (2012), çimentoyla %0-10-12.5-15 metakaolin ikamesinin betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada betonların basınç dayanımları, su işleme derinliği, kılcallıkları, hızlı klorür geçirimsizliği ve elektriksel dirençleri belirlenmiştir. Bunlara ilaveten çimento pastası üzerinde XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. Üretilen betonlarda su/bağlayıcı oranı 0.35/0.4/0.5 olarak belirlenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı ise 400kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. 28 günlük betonların basınç dayanımları metakaolin ikamesiyle %15 ile %77 arasında artış olmuştur. Basınç dayanımlarındaki en olumlu sonuç 0.4 su/bağlayıcı oranlı ve %12.5 metakaolin ikameli betonlarda gözlemlenmiştir. 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen kılcallık deneylerinde ise kılcallık katsayılarının metakaolin ikamesiyle azaldığı görülmüştür. Kılcallık katsayılarındaki en olumlu sonuçlar tüm su/bağlayıcı oranları için %10 metakaolin ikamesinde gözlemlenmiştir. 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen hızlı klorür geçirimsizliği deneyiyle, metakaolin ikamesinin beton içerisine geçen toplam klorür iyonlarının miktarında belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. En verimli sonuçlar %12.5 ve %15 metakaolin oranlarında gözlemlenmiştir. Toplam geçen coulomb değerleri %53 mertebesinde azalmıştır.

Poon vd. (2006), metakaolin ve silika dumanı içeren betonların bazı mekanik ve durabilite özelliklerini, boşluk yapılarını incelemiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.3 ve 0.5 olan betonlar üretilmiştir. 28 günlük betonlarda %10 metakaolin ikamesinin basınç dayanımına maksimum etkiyi sağladığı bulunmuştur. 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilen

hızlı klorür geçirimsizliği deneyine göre de düşük su/bağlayıcı oranlı betonda %10 metakolin, su/bağlayıcı oranının 0.5 olduğu betonda ise %20 metakolin ikamesinin optimum ikame oranı olduğu belirlenmiştir. Bu betonlarda hızlı klorür geçirim değerleri referans değerinin %19 ve %21.5'i olmuştur.

Güneyisi (2007), havada ve suda kür edilmiş metakaolin içeren betonların bazı dayanım ve geçirimsizlik özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen betonların su/bağlayıcı oranları 0.35 ve 0.55 olarak seçilmiştir. Çimento yerine ikame edilen metakaolinin ikame oranları %0 ile %20 arasında seçilmiştir. 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde yapılan deneylere göre metakaolinin referans betona göre daha iyi sonuç verdiği fakat kötü kür edilen betonlarda ise metakaolinli betonların referans betonuna göre daha çok etkilendiği gözlemlenmiştir. 28 günlük numunelerde metakaolin ikame oranı arttıkça basınç dayanımlarının da sistematik bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yine aynı yaştaki numunelerde yapılan kılcallık deneyinde, ikame oranı arttıkça kılcallık katsayılarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Güneyisi vd., (2012), metakaolin ve silika dumanı içeren betonların mekanik özelliklerini, rötresini, geçirimsizlik özelliklerini araştırmışlardır. Mekanik özellikler olarak basınç dayanımları ve yarmada çekme özellikleri araştırılmıştır. Geçirimsizlik özellikleri için kılcallık ve gaz geçirim deneyi yapılmıştır. Rötire ve büzülme için, serbest rötire gerilmeleri incelenmiş, kuruma sırasındaki ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Kısıtlanmış rötire özelliği araştırılmış, çatlak yapısı ve dağılımları belirlenmiştir. Çimentonun %5 ve %15'i oranında metakaolin ve silika dumanı ikamesi yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.25 ve 0.35 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak metakaolin ve silika dumanı oranı arttıkça sistematik olarak basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Metakaolin içeren su/bağlayıcı oranı 0.35 olan betonların basınç dayanımı; referans ve silis dumanlı betonlardan hep daha yüksek çıkmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.25 olan betonlarda, metakaolin ve silis dumanlı betonların dayanım gelişimleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. En düşük kılcallık katsayısı ve su emme; en yüksek basınç dayanımı %15 metakaolin ile silis dumanı içeren betonlarda gözlemlenmiştir. Metakaolinli betonlara göre silis dumanlı betonlar, su/bağlayıcı oranından daha fazla etkilenmektedir.

Güneyisi vd. (2013), metakaolin ikameli, karma suyuna klor eklenmiş betonların içerisindeki donatı çeliğinin korozyon davranışını incelemiştir. Klor kirlenmesi için betondaki toplam bağlayıcının ağırlıkça %0-1.5-3-5 oranında NaCl ikamesi yapılmıştır. Toplam bağlayıcının %5-15 'i metakaolin ile ikame edilmiştir. Betona saplanan demirlerin

korozyonunun incelenmesi için hızlandırılmış paslanma testi uygulanmıştır. Lineer polarizasyon tekniğiyle o anki pas yoğunluğu ve korozyon oranları bulunmuştur. Betonların elektriksel dirençleri belirlenmiş ve sonuçta metakaolinin tüm bu etkilere karşı olumlu sonuç gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Qian ve Li (2001), çimento yerine %0-5-10 ve 15 oranlarında, özgül yüzey alanı 12000 m²/kg, ortalama tane çapı 2.23µm olan metakaolin içeren beton numuneleri üzerinde 4 nokta eğilme deneyi yaparak bu betonların eğilme dayanımlarını araştırmıştır. Bu deney, 80 güne kadar farklı yaşlardaki 400x100x100 mm boyutlarındaki prizmalar üzerinde yapılmıştır. Sonuç olarak, %5 metakaolin ikamesinin etkisi çok az olmuştur. 28 günlük, %10 ve %15 metakaolinli betonların eğilme dayanımları sırasıyla %13 ve %10 artış göstermiştir.

Breddy vd. (1989) ve Kostuch vd. (1993), metakaolin içeren betonların ve çimento pastalarının mikroyapılarını ve difüzyon özelliklerini incelemiştir. Çimento yerine %20 oranında metakaolin ikamesiyle üretilen betonların ortalama boşluk büyüklüğünün belirgin bir şekilde azaldığı sonucuna varılmıştır. Çimento yerine metakaolin ikameli çimento pastalarındaki ortalama boşluk çapının ikamesiz olanlardan daha ufak olduğunu rapor etmişlerdir. Çimento yerine %20 metakolin içeren pastaların boşluklarının 0.03µm'den küçük olduğunu ve bu küçük boşlukların betonun donma çözülme direncini iyileştirebileceği önerilmiştir.

Kostuch vd. (1993), metakaolin ikamesinin harçların geçirimsizliğini iyileştirdiği böylece sodyum ve klor iyonlarının harç içerisine geçişlerinin belirgin bir şekilde azaldığını gözlemlemişlerdir.

Caldarone vd. (1994), çimento yerine %5 ve %10 metakaolin ikameli betonlar üretmiş ve bu betonların basınç dayanımlarının 365 gün boyunca artış gösterdiğini rapor etmiştir. Metakaolin ikameli betonlarda, aynı oranda silika dumanı içeren betonlara göre az da olsa daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

Sabir (1998), kür sıcaklığının %5 ile %15 oranında metakaolin ikameli betonların basınç dayanımı gelişimini incelemiştir. 50°C'de 7 gün boyunca kür gören numunelerin, standart kür gören aynı yaştaki betonlara göre daha üstün basınç dayanımı gösterdiği saptanmıştır. Yüksek sıcaklıkta erken yaşta elde edilen bu dayanım üstünlüğünün, daha uzun süreli kür ile basınç dayanımındaki olumlu etkinin azaldığı belirlenmiştir. 20°C'de kür gören metakaolinli numunelerin basınç dayanımları için optimum metakaolin ikame oranının %10 olduğunu bulunmuştur.

Coleman vd. (1997), çimento yerine %10 ve %20 metakaolin içeren çimento pastalarının, karma suyuna klorür bulaşması durumunda, hamur boşluklarındaki klorür konsantrasyonunun azaldığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda metakaolinli pastaların uzun dönemde boşluklardaki hidroksit iyonlarının konsantrasyonunda azalma gözlemlenmiştir. Boşluk çözeltisi pH'ında azalma gözlemlenmesine rağmen Cl/OH oranının metakaolinsiz pastalarinkine yakın olduğu görülmüştür. Sonuç olarak %20 metakaolin ikamesinin beton içerisindeki donatının korozyonunu önlemede az da olsa riskli olacağı sonucuna varılmıştır.

Sabir vd. (1996), metakaolin içeren betonların işlenebilirliğini araştırmışlardır. Slump, sıkışma faktörü, vebe süresi sonuçlarına göre düşük su/bağlayıcı oranlı betonlarda (0.35) literatürün aksine belirgin bir işlenebilirlik azalışına rastlanmamıştır. Düşük su/bağlayıcı oranlı betonlar nispeten kuru bir görünüme sahip olsalar da titreşim uygulandığında kalıplara çok iyi yerleştiği belirtilmiştir.

Morsy vd. (2012), yüksek sıcaklığın nano metakaolin içeren harçların üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada 28 gün standart kür ortamında bekletilen harçlar, kür işemi bittikten sonra 250, 450, 600 ve 800°C'de 2 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler üzerinde termogravimetrik analiz ve elektron mikroskobu incelemesi yapılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın numunelerin basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak 250°C'ye kadar basınç ve eğilme dayanımlarının arttığı, sıcaklık yükseldikçe dayanımların düştüğü gözlemlenmiştir. %15 oranında nanometakaolin içeren numunenin içyapısı ve dayanımının diğer numunelere göre daha üstün olduğu belirtilmiştir.

Bilim (2011), toplam bağlayıcının %0-5-10-15-20-30 oranında zeolit ikameli harçların özelliklerini araştırmışlardır. Zeolit oranı arttıkça çimento pastasının sertliğinin, priz süresinin, basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını gözlemlemişlerdir. %5 oranında zeolit ikameli harçların donma çözülme dayanıklılığının diğerlerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu harçların yüksek sıcaklıktan nasıl etkilendiği incelenmiş, hızlı ve normal hızda soğutma yöntemleriyle harçların soğuma hızına karşı nasıl tepki verdiği gözlemlenmiştir. 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı deneylerine göre %15 ve %20 zeolit ikameli harçların dayanım artışları sırasıyla %20 ve %15 oranında olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında yavaş soğumaya maruz kalan harçlar içinde en iyi sonucu %20 zeolit içeren numuneler göstermiştir. 50 çevrimlik donma-çözülme etkisinden sonra %5

zeolit içeren harçlar haricinde diğer tüm numuneler referans harcına göre kötü basınç dayanımı göstermiştir.

Canpolat vd. (2004), çimento üretiminde zeolit, taban külü ve uçucu külün çimento yerine ikamesinin etkilerini araştırmıştır. Bu malzemelerle farklı kombinasyonlarla ürettikleri çimento pastası ve harçlarda priz süresi, hacimce genişleme, basınç dayanımı, kıvam gibi özellikler incelenmiştir. Sonuç olarak %15'e kadar zeolit ikamesinin basınç dayanımını artırdığı ancak priz süresini azalttığı gözlemlenmiştir.

Feng vd. (2002), ASTM C1202-97'ye göre ultra ince mineral tozlarının betondan geçen toplam yük değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 28 gün standart kür uygulanan farklı su/bağlayıcı oranlı ve farklı toz mineraller içeren betonların toplam geçen klorür iyon yükleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak minerallerin en iyiden en zayıfa doğru sıralamasının silis dumanı, uçucu kül, doğal zeolit ve yüksek fırın cürufu olduğu sonucuna varılmıştır. Su/bağlayıcı dozajı azaldıkça ve mineral oranı arttıkça geçen yük miktarı azalmıştır. %10 ve %15 zeolit ikamesi olumlu sonuç vermiştir.

Chan vd. (1999), zeolit katkılı çimentolarla üretilmiş betonların performansının silika dumanı ve uçucu kül ile karşılaştırılmasını yapmıştır. Deneysel su/bağlayıcı oranı 0.28 olarak sabit tutulmuş ve tüm puzolanlar %5-10-15 ve 30 oranlarında çimento yerine ikame edilerek betonlar üretilmiştir. Sonuç olarak zeolit ikamesinin terlemeyi azalttığı, betonun slump değerini fazla değiştirmeden viskoziteyi artırdığı gözlemlenmiştir. 28 günlük numunelerde %15 oranında zeolit ikamesinin betonun basınç dayanımını %14 artırdığı görülmüştür. Zeolit klor difüzyonunu azaltıcı etkisinin uçucu külden daha fazla, silika dumanından ise daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Ranjbar vd. (2013), doğal zeolit içeren kendiliğinden yerleşen betonların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemiştir. Taze beton üzerinde akma tablası, T50, V hunisi ve L kutusu deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş betonlar üzerinde de basınç dayanımı, yarmada çekme, ultrasonik hız ve su emme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak zeolit miktarı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Zeolit, sertleşmiş betonların basınç dayanımlarını artırmış, ultrases hızlarında ise belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. Betonların su emme özellikleri, zeolit miktarı ve ilerleyen numune yaşı ile iyileşmiştir.

Ahmadi ve Shekarchi (2010), yerel bir ocaktan alınan zeolit beton üzerindeki etkinliğini araştırılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında doğal zeolit ve silika dumanının puzolanik aktivitesi belirlenmiş, zeolit aktivitesinin yüksek olduğu fakat silika dumanı

kadar iyi olmadığı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında farklı oranlarda zeolit ve silika dumanı çimento yerine ikame edilerek betonlar üretilmiş ve bu numunelerin bazı fiziksel, mekanik ve dayanıklılıkla ilgili özellikleri incelenmiştir. Betonların slump, basınç dayanımı, su emme, oksijen geçirimsizliği, klor difüzyonu ve elektriksel direnç özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, zeolit içeren numunelerin referans betona göre daha olumlu sonuçlar verdiği hatta bazı durumlarda silika dumanından daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. En son olarak da zeolit ve silika dumanı içeren harçların alkali-silika genleşme etkisi üzerindeki rolü araştırılmıştır ve genleşme azaltma konusunda zeolitin silis dumanı kadar etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Yılmaz vd. (2007), yaptıkları çalışmada portland çimentosu yerine zeolit ikame edilen harçların fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak zeolitin kimyasal reaktivitesinin betonda puzolan olarak kullanılabilen seviyede olduğu görülmüştür. Zeolitin yapısındaki mikro boşluklardan dolayı harcın su ihtiyacını artırdığı gözlemlenmiştir. Zeolit ikameli harçların erken dayanımlarının, zeolitin blaine değeriyle ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Sabet vd. (2013), doğal zeolit, silika dumanı ve uçucu kül içeren kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Betonların çökme sonrası yayılımları, süper akışkanlaştırıcı ihtiyaçları, basınç dayanımları, elektriksel dirençleri, su emmeleri ve klorür geçirimsizliği incelenmiştir. %10 ve %20 zeolit içeren betonlar kontrol betonlarına göre %0.8 ve %1.6 (toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça yüzdesi) daha fazla süper akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duymuştur. 28 günlük numunelerde %10 zeolit ikamesi kontrol numunesine yakın basınç dayanımı değeri vermiştir. %20 zeolit ikamesi ise %8 basınç dayanımı kaybına sebep olmuştur. %10 ve %20 zeolit kullanımı 90 günlük numunelerin elektriksel direncini belirgin bir şekilde artırmıştır. %10 zeolit kullanımı su emmeyi yaklaşık %20 oranında azaltmıştır. %10 ve %20 zeolit ikamesi etkili difüzyon katsayısını azaltmakta etkili olmuştur. Sonuç olarak zeolitin, silika dumanı kadar etkili bir puzolan olmadığına fakat ucuz ve iyi performans sağlayan bir puzolan olduğu sonucuna varılmıştır.

Vejmelkova vd. (2015), çimentonun ağırlıkça %60'ına kadar zeolit ikame edilerek üretilen betonların birçok özelliği incelenmiştir. Bu özelliklerden bazıları fiziksel, mekanik, kırılma, dayanıklılık ve son olarak termal özellikleridir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre beton için optimum zeolit oranı %20'dir. Bu ikame oranında; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, etkili kırılma tokluğu, birim kırılma enerjisi geleneksel portland çimentosuyla

Üretilen betonlardan çok az bir miktar düşük çıkmıştır. Betonların donma direnci, buz çözücü tuzlara karşı direnci, zararlı kimyasal çözeltilere karşı dirençleri iyilemitir. %20 oranında zeolit ikamesi, geçirimlilik özelliklerini de tatmin edici seviyede tutmuştur.

Karakurt ve Topçu (2012), farklı puzolanların betonda donatı korozyonu ve yüksek sıcaklık üzerindeki etlilerini aratırmılardır. Puzolan olarak doğal zeolit, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu korozyonu engellemekte olumlu etki yaptığı grlmtir. Mikroyapısal incelemelere göre bu üç puzolan arasında en etkili olanın uçucu kül olduğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık deneyleri sonuçlarına göre zeolit uçucu külün yanında çok vasat sonuçlar vermiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışmanın Amacı

Deneysel çalışmada doğal puzolan olan zeolit ve metakaolinin betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda zeolit ve metakaolin ikamesiyle üretilen betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı; aşınma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı, klor geçirimsizlikleri ve kılcallık katsayıları belirlenmiştir.

2.2. Deney Programı

Deneysel çalışmalar için üretilen betonlarda toplam bağlayıcı dozajı 300 ve 400 kg/m³ seçilmiştir. Tüm üretimlerde çimento olarak CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmış olup su/bağlayıcı oranı 0.6 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen betonlarda çökme değeri 10-15 cm arasında tutulmaya çalışılmıştır.

Üretilen betonlarda, doğal puzolan olarak zeolit ve metakaolin kullanılmıştır. İkame oranları zeolit için %10, %15, %20; metakaolin içinse %5, %10 ve %20'dir. Karşılaştırma amacıyla mineral katkı içermeyen referans numuneleri de üretilmiştir. Tablo 2.1'de beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları, süper akışkanlaştırıcı/toplam bağlayıcı oranı ve betonların çökme değerleri verilmiştir.

Her bir üretimde 6 adet 15 cm'lik küp, 2 adet 10x10x40 cm'lik prizma, 12 adet 10 cm'lik küp ve bir adet 10 cm çapında 20 cm yüksekliğinde silindir numune dökülmüştür. Üretilen beton numuneleri üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, aşınma, donma-çözülme, yüksek sıcaklık etkisi ve kılcal su geçirimi deneyleri yapılmıştır.

Tablo 2.1. Beton bileşimleri ve çökme değerleri

Kodlama	Su (kg/m ³)	İkame Oranı (%)	Çimento (kg/m ³)	Zeolit (kg/m ³)	Metakaolin (kg/m ³)	Agrega (kg/m ³)	Katkı (kg/ m ³)	S.A(%)	Çökme (cm)
300-R	180	-	300	-	-	1847.68	8.11	2.70	14.0
300-10Z	180	10	290	30	-	1844.30	12.04	4.01	10.0
300-15Z	180	15	255	45	-	1838.52	12.38	4.13	9.0
300-20Z	180	20	240	60	-	1832.60	12.89	4.30	9.0
300-5M	180	5	285	-	15	1855.10	9.49	3.16	12.0
300-10M	180	10	270	-	30	1853.72	10.82	3.61	11.0
300-20M	180	20	240	-	60	1850.95	11.46	3.82	9.0
400-R	240	-	400	-	-	1616.47	7.27	1.82	16.0
400-10Z	240	10	360	40	-	1600.37	8.40	2.1	15.5
400-15Z	240	15	340	60	-	1592.37	9.37	2.34	14.5
400-20Z	240	20	320	80	-	1584.38	10.96	2.74	13.0
400-5M	240	5	380	-	20	1614.51	7.52	1.88	16.0
400-10M	240	10	360	-	40	1612.65	7.67	1.92	14.5
400-20M	240	20	320	-	80	1608.92	8.28	2.07	13.0

2.3. Kullanılan Malzemeler

2.3.1. Malzemelerin Özellikleri

2.3.1.1. Çimento

Bu çalışmada Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fabrikadan temin edilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşenler	(%)	45 µm elek üstünde kalan (%)		9.8
SiO ₂	19.46	90 µm elek üstünde kalan (%)		1.0
Al ₂ O ₃	5.11	Özgül Yüzey (Blaine) (m ² /kg)		412.6
Fe ₂ O ₃	3.31	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3.12
CaO	60.23	Priz Süresi (Vicat) (dak.)	Başlangıç	140
MgO	2.08		Bitiş	200
SO ₃	3.05	Su İhtiyacı (%)		29.2
Na ₂ O	0.27	Hacim Genleşmesi (mm)		1.0
K ₂ O	0.69	Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	28.0
Cl ⁻	0.02		7 gün	40.4
Kızdırma Kaybı	3.00		28 gün	51.5

2.3.1.2. Agreganın Özellikleri

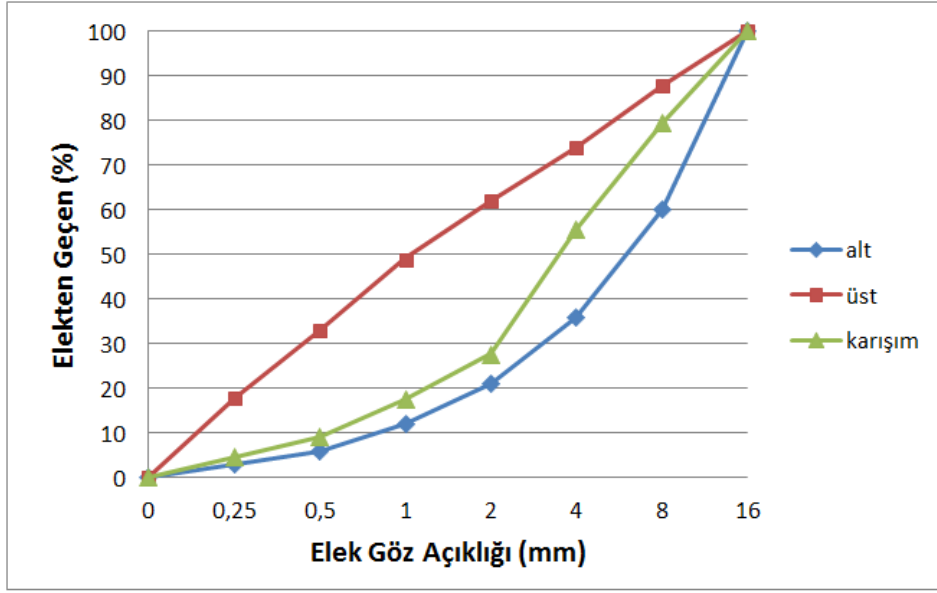
Deneysel çalışmada kalker kökenli kırma taş ve dişli kum agrega kullanılmıştır. Bu iki agreganın karışım oranları iri için %35, ince içinse %65'tir. Agregalara ait fiziksel özellikleri ve granülometreleri Tablo 2.3 ve 2.4'te verilmiştir. Şekil 2.1'de ise karışımın granülometri eğrisi gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	İri Agrega	İnce Agrega
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.73	2.59
Su emme (%)	1.13	3.23
Nem İçeriği (%)	0.155	1.306

Tablo 2.4. Agrega Granülometrileri

Elek Açıklığı (mm)	Yığılımlı Geçen (%)						
	0.25	0.5	1	2	4	8	16
İri Agrega	0	0	2	3	5	41	100
İnce Agrega	7	14	26	41	83	100	100



Şekil 2.1. Agrega karışım granülometri eğrisi ve sınır eğrileri

2.3.1.3. Zeolit

Deneylerde kullanılan zeolitin maksimum tane çapı 50 mikron olup Gordes Zeolite Madencilik San. Ve Tic. A.Ş. 'den temin edilmiştir. Kullanılan zeolite ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.5 ve 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.2'de kullanılan çimento, zeolit ve metakaolin gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel çalışmada kullanılan çimento, zeolit ve metakaolin

Tablo 2.5. Zeolit XRF Spektrofotometresi ile kimyasal analizi

Bileşik adı	Bileşik miktarı (%)
SiO ₂ (%)	64.7
Al ₂ O ₃ (%)	11.21
Fe ₂ O ₃ (%)	1.38
MnO (%)	0.02
MgO (%)	0.79
CaO (%)	2.08
K ₂ O (%)	3.78

Tablo 2.6. Zeolitin bazı fiziksel özellikleri

Tane boyutu	< 50µm
Mineralojik içerik	Minimum %85 klinoptilolit, yantaşları kil ve mikadır.
Özgül ağırlık	2 g/cm ³
pH	6.5 – 7.5
Su tutma kapasitesi	%25 – 40
Porozite	%35 ortalama
Özgül yüzey alanı (BET)	40.79 m ² /g

2.3.1.4. Metakaolin

Deneyleerde kullanılan metakaolin Aryum Makine Kimya ve Ticaret Limited Şirketinden sağlanmıştır. Metakaolinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikleri

325 No’lu elek üzerinde kalan (%)	7.8
Özgül yüzey (cm ² /g)	23.965
Yoğunluk (g/cm ³)	2.79
SiO ₂ (%)	54.93
Al ₂ O ₃ (%)	41.0
Fe ₂ O ₃ (%)	2.0
CaO (%)	0.04
MgO (%)	0.06
Na ₂ O (%)	0.0
K ₂ O (%)	0.21
SO ₃ (%)	0.03
Nem içeriği	0.21
Yanma kaybı	0.08

2.3.1.5. Su

Deneyleerde Trabzon şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı

Deneyleerde betonun istenen kıvam özelliklerini sağlaması için BASF Yapı Kimyasalları’ndan temin edilen Glenium 51M adlı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu kimyasal ürün, polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan, erken ve nihai yüksek dayanım ve dayanıklılığa gereksinim duyulan hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı malzemesidir. Tablo 2.8’de kullanılan süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.8. Kullanılan süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Amber
Yoğunluk	1.082–1.142 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1

2.4. Yapılan Deneyler ve Kullanılan Ekipmanlar

2.4.1. Beton Üretimi

Beton üretimlerinde Şekil 2.3'te gösterilen 45 lt kapasiteli pan tipi betoniyer kullanılmıştır.



Şekil 2.3. 45 lt kapasiteli pan tipi betoniyer

Beton üretiminde, önceden ıslatılmış betoniyere iri ve ince agrega sırasıyla döküldükten sonra üzerine doyma suyu eklenip 1-2 dakika karıştırılmış ve bağlayıcı madde betoniyere ilave edilmiştir. Malzemeler homojen bir hale gelene kadar karıştırılmış ve karıştırma işlemi devam ederken karma suyunun %75'i yavaşça ilave edilmiştir.

Karıştırma işlemi devam ederken karma suyunun kalan %25'ine akışkanlaştırıcı kimyasal katkı eklenerek istenen çökme değeri sağlanmıştır. Hazırlanan taze betonun üzerinde çökme (abrams hunisi) ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Hazırlanan beton, kalıplara yerleştirilip 1 gün bekletilmiş daha sonra kalıplardan çıkarılarak standart kür havuzuna koyulmuştur. 28 gün standart kür ortamında bırakılan numuneler kür süreci bittikten sonra kür havuzundan alınarak deneylere tabi tutulmuştur. Kürde bekleyen numuneler ve üretilen bir seri numune Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kür havuzunda bekletilen numuneler



Şekil 2.5. Kür havuzundan çıkarılmış numunelerden bir seri

2.4.2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri

28 gün standart kür uygulanan 15 cm ve 10 cm'lik küp numuneler üzerinde basınç dayanımı, prizmalar üzerinde de eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Deneylerde Şekil 2.6'da görülen Dinç Makine yapımı 250 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Şekil 2.7'de ise eğilme deneyinden fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 2.6. Dinç Makine Yapımı 250 ton kapasiteli hidrolik pres



Şekil 2.7. 3 nokta eğilme testi ve kırılan bir numune

2.4.3. Kılcal Su Emme Deneyi

Eğilme deneyine tabi tutulan kiriş numuneler deney sonunda orta noktasından ikiye ayrılmıştır. İkiye ayrılan bu parçalar düzgünce kesilerek 10 cm'lik küp numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerden ikisi deney gününden önce 48 saat 70°C' de kurutulmuş ve kurutma işlemi bittikten sonra klimatize odada 20 °C' de soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan

numuneler hassas terazide tartılarak numunelerin kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kurutma işlemlerinde kullanılan etüv Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Numuneleri kurutmak için kullanılan Geniar markalı etüv

Kuru ağırlıkların belirlenmesi işleminden sonra numunelerin suyla temas edecek yan yüzeyleri sıvı geçirimini engellemek amacıyla izolasyon bandıyla sıkıca sarılmıştır. Şekil 2.9’da görülen plastik küvet içerisine mesnetlerin üzerini kapatacak kadar su koyulmuştur. Numuneler suya 2 mm batacak şekilde mesnetlerin üzerine yerleştirilerek 5, 10, 20, 30, 45, 60 dk. sonraki ağırlıkları hassas teraziyle bulunmuştur. Deneyleerde kullanılan terazi Şekil 2.10’da görülmektedir.

TS EN 771-11 standardına göre, yapılan tartımlar sonrasında yatay eksene deney süresince tartım yapılan zamanların karekökü, düşey eksene de emilen su miktarının numunenin suya değen kesit alanına bölümü işaretlenerek grafik çizilip, grafikte oluşan eğrinin eğimi kılcallık katsayısı olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Kılçak su emme (kılcallık) deney düzeneği



Şekil 2.10. 0.1 gr hassasiyetinde 10 kg kapasiteli Radway marka terazi

2.4.4. Aşınma (Böhme) Deneyi

Aşınma deneyi için eğilme dayanımı deneyinde kullanılan kiriş numunelerinin kırılan iki parçasından ikişer adet 71x71x71 mm boyutunda yeni küp numuneler kesilmiştir. Bu numuneler, doymun halde havada ve suda tartılarak birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra 70°C'de 48 saat kurutulmuştur. Klimatize odada soğuyan numuneler aşındırıcı diskin üzerine yerleştirilmiş aşındırıcı disk üzerine zımpara tozu

serpilerek disk 22 tur çevrilmiştir. Her 22 tur sonrasında disk yüzeyi temizlenmiş ve tekrar zımpara tozu eklenmiştir. Aynı numune 90° döndürülmüş ve aşındırma işlemi aynı yüzey üzerinde toplam 16 kere tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan Böhme test cihazı Şekil 2.11’de görülmektedir.

Aşındırma işlemleri bittikten sonra, hacimsel aşınma kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$DV = Dm / \delta R$$

Burada;

$$DV = \text{Hacimsel kayıp (cm}^3\text{/50cm}^2\text{)}$$

$$Dm = \text{16 periyot sonrası kütle kaybı (gr)}$$

$$\delta R = \text{Örnek Birim hacim ağırlığı (gr/cm}^3\text{)}$$



Şekil 2.11. Böhme Yüzey Aşındırma Test Cihazı

2.4.5. Hızlı Klorür Geçirimsiliği Deneyi

Numunelerin hızlı klorür geçirimsiliğini incelemek için ASTM C1202 standardına uygun olarak tasarlanmış olan deney aleti kullanılmıştır. Bu deneyde çözeltilerin betona nüfuz etme seviyesine göre betonun elektriksel iletkenliği ölçülmüştür. ASTM C 1202’ye göre betonların hızlı klorür geçirimsiliği sınıflandırması Tablo 2.9’da verilmiştir.

Deneyde 10 cm çapında 20 cm yüksekliğindeki silindir numuneler kullanılmıştır. Kür havuzundan alınan numuneler yüzeyleri kuruyana kadar klimatize odada bekletilmiştir. Numunelerin iki ucundan 2.5 cm'lik dilimler kesildikten sonra numunelerin kalan kısmından 5 cm yüksekliğinde yeni bir dilim kesilmiştir. Son kesilen 5 cm'lik deney hücrelerinin içindeki kauçuk halkaların üzerine oturtularak deney hücreleri arasına yerleştirilmiştir. Deney hücrelerinin civataları sıkılarak daha sonra konacak olan çözeltinin hücre dışına sızmaması sağlanmıştır. Civatalar sıkıldıktan sonra numunelerin açıkta kalan yüzeyi ve deney hücresiyle birleşim yeri beyaz silikonla hiç boşluk kalmayacak şekilde kaplanmıştır. Silikon uygulamasının amacı, çözeltinin numunenin yüzeylerinden ilerlemeyip sadece silindirik kesiti boyunca nüfuz etmesini sağlamaktır. Silikon uygulanan numune laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır.

Silikonlar kuruduktan sonra, silikonlu yüzeylerin etrafı lastikle sıkıca sarılmıştır. Bu işlemin amacı deney sırasında akımla ısınan numunenin yüzeyindeki silikonun numune yüzeyinden ayrışmasını engellemektir. Numuneler üzerinde hızlı klorür deneyini uygulamak için ASTM C 1202 standardına uygun olarak tasarlanmış olan ve Şekil 2.12'de gösterilen cihaz kullanılmıştır.

Test hücrelerinin (+) kutbuna 3M NaOH, (-) kutbuna da %3 NaCl çözeltisi doldurulmuştur. 60 V potansiyel fark oluşturan aparatın kabloları hücrelerin kutuplarına bağlanmıştır.

Deney başlatıldıktan sonra 6 saat boyunca her yarım saatte bir devreden o an geçen akım değerleri ölçülüp kaydedilmiştir.

Tablo 2.9. ASTM C 1202'ye göre klorür geçirimsizlik sınıflandırması

Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirimsizlik Sınıfı
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 2.12. Deneye hazır haldeki hızlı klorür deney düzeneği

2.4.6. Ultrases Hızlarının Belirlenmesi

Beton numunelerinin donma-çözülme ve yüksek sıcaklıktan ne kadar etkilendiğini belirlemek için kullanılan Matest marka ultrases ölçüm cihazı Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Matest marka ultrases ölçüm cihazı

2.4.7. Donma-Çözülme Deneyi

Beton numunelerinin donma-çözülme deneyine tabi tutmak için Şekil 2.14'te gösterilen Yüksel Kaya Makine yapımı donma kabini ve sıcak su tankı olmak üzere iki parçadan oluşan donma-çözülme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.14. Yüksel Kaya Makine yapımı donma-çözülme kabini ve su tankı

Deneylerde 15 cm'lik küpler kullanılmıştır. Donma-çözülme deneyinden önce ve sonra numunelerin ağırlıkları ve ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Ultrases hızı ve ağırlık değişimi ölçümleri, çevrimler sırasında numunelerde oluşan hasarları tespit etmek için kullanılmıştır. Ağırlık ölçümü numunelerde oluşan pullanma hasarının seviyesini tayin etmek amacıyla yapılmıştır. Ultrases hızı ölçümleri de numunelerin içsel hasarlarının seviyesinin tespiti için kullanılmıştır. Donma-çözülme deneyleri öncesinde ve sonrasında küplerin basınç dayanımları bulunmuştur. Uygulanan çevrimde numuneler 4 saat boyunca $+20^{\circ}\text{C}$ 'den -20°C 'ye $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hızla soğutulmuştur. -20°C 'de 4 saat bekletilen numuneler, su tankından soğutma kabinine dolan sıcak su yardımıyla tekrar $+20^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılarak çözülmüştür. Her bir donma-çözülme çevrimi 12 saat sürmüştür. Toplam 100 çevrim uygulanmıştır. Şekil 2.15'te ultrases hızı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Numunelerin ultrases geçiş hızlarının ölçümü

2.4.8. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Yüksek sıcaklık etkisini belirlemek amacıyla ultrases hızları belirlenen 10 cm'lik küp numuneler önce 48 saat boyunca 70 °C'deki etüvlerde bekletilerek ön kurutma yapılmıştır. Isıtma hızı 6-10°C/dk olan fırınlara yerleştirilen numuneler hedeflenen sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Numunelere uygulanan sıcaklıklar 200°C, 500°C ve 800°C'dir. Her bir sıcaklık için 3 numune kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulaması Şekil 2.16'da görülen Ref-San marka fırında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.16. 800°C'de 1 saat bekletilen beton numuneler

Yüksek sıcaklık uygulaması bittikten sonra etüvden alınan numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma süreci tamamlanınca numunelerin ultrases hızları ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar, sıcaklığa maruz kalmamış referans numuneleriyle karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunenin dıştan görünüşü Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. 800°C’de 1 saat bekletilen bir numunenin görünüşü

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Çökme Deneyi

Deneyleler için üretilen betonlar taze haldeyken çökme değerleri ölçölmüştür. Tüm karışımlar için hedeflenen çökme değeri 10-15 cm'dir. Ölçölen çökme değerleri ve kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı/toplam bağlayıcı oranı Tablo 2.1.'de verilmiştir.

3.2. Basınç Dayanımı

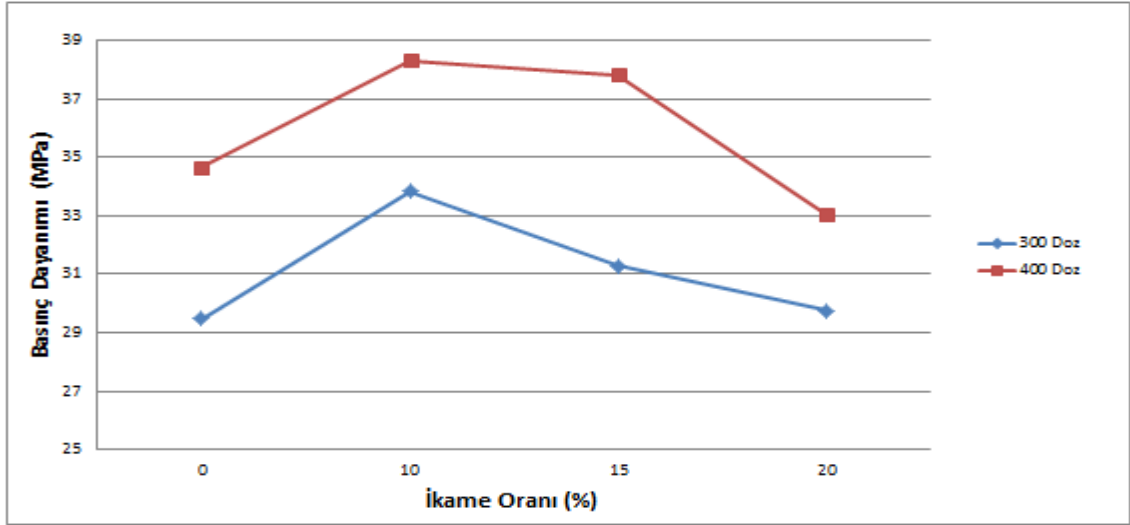
Üretilen 15 cm'lik küp numunelerin birim ağırlıkları ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Şekil 3.1 ve 3.2'de zeolit ve metakaolin içeren 28 günlük 15cm'lik küp numunelerin basınç dayanımı-ikame oranı ilişkisi verilmiştir. Şekil 3.1'de göröldüğü gibi her iki dozajda da en yüksek dayanım %10 zeolit ikamesiyle sağlanmıştır. 300 dozda %10 zeolit ikamesi basınç dayanımını yaklaşık %15, 400 dozda ise %10 oranında arttırmıştır. Her iki dozajda da ikame oranı %10'u geçince dayanım artışı daha az olmuştur. Maksimum zeolit ikame oranı olan % 20 için, 300 dozda dayanım artışı olmazken 400 dozda yaklaşık % 5 lik bir kayıp oluşmuştur. Bu sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarla da paraleldir. Chan vd. (1999), zeolit ikame oranının %15'e kadar basınç dayanımında artış sağladığını ve bu artışın da %14 seviyesinde olduğunu bildirmiştir. Canpolat vd. (2004), zeolitin %15 ikame oranına kadar basınç dayanımını yükselttiğini; Sabet vd. (2013), %20 zeolitin %8 dayanım kaybına yol açtığını gözlemlemişlerdir. %10-15 ikame oranında dayanımda görölen artışın, zeolitin yüksek puzolanik aktivitesinden kaynaklandığı düşünölmektedir. İkame oranının daha fazla olması durumunda dayanımın düşmesinin sebebi ise muhtemelen ortamdaki $Ca(OH)_2$ 'in tükenmiş olmasıdır.

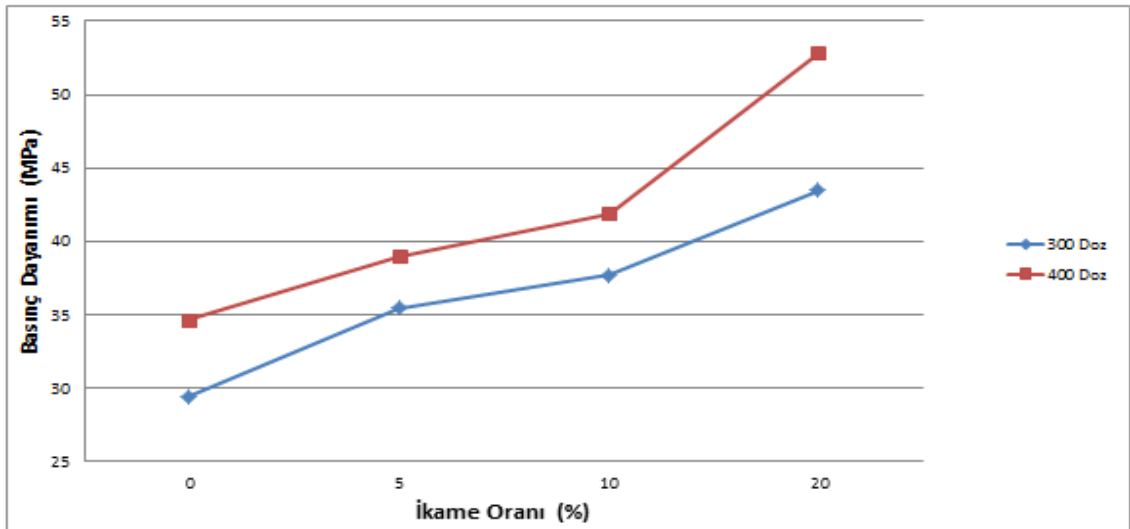
Tablo 3.1. 15'lik küp numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerleri

Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimi (%)
300 – R	0	2.34	29.49	100.00
300 -10Z	10	2.36	33.82	114.68
300 - 15Z	15	2.35	31.30	106.14
300 - 20Z	20	2.35	29.77	100.95
300 - 5M	5	2.36	35.44	120.18
300 - 10M	10	2.35	37.73	127.94
300 - 20M	20	2.34	43.48	147.44
400 – R	0	2.34	34.67	100.00
400 - 10Z	10	2.30	38.32	110.53
400 - 15Z	15	2.27	37.81	109.06
400 - 20Z	20	2.25	33.03	95.27
400 - 5M	5	2.33	38.96	112.37
400 - 10M	10	2.29	41.93	120.94
400 - 20M	20	2.27	52.82	152.35

Şekil 3.2, metakaolin ikamesinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi metakaolin ikamesi her iki dozda da düzenli bir dayanım artışı sağlamıştır. %20 metakaolin ikameli 300 dozajlı numunelerin basınç dayanım artışı yaklaşık %47 iken 400 dozajlı numunelerinki %52 civarında olmuştur. Bu duruma, çok ince olan metakaolin partiküllerinin fiziksel bir dolgu görevi yapıp ince boşlukları doldurması ve ayrıca puzolanik bir malzeme olması nedeniyle ilave C-S-H'lar üretmesinin neden olduğu belirtilmiştir (Khatip vd., 1996).



Şekil 3.1. 300 ve 400 dozajlı zeolit ikameli küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları



Şekil 3.2. 300 ve 400 dozajlı metakaolin ikameli küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

3.3. Eğilme Dayanımı

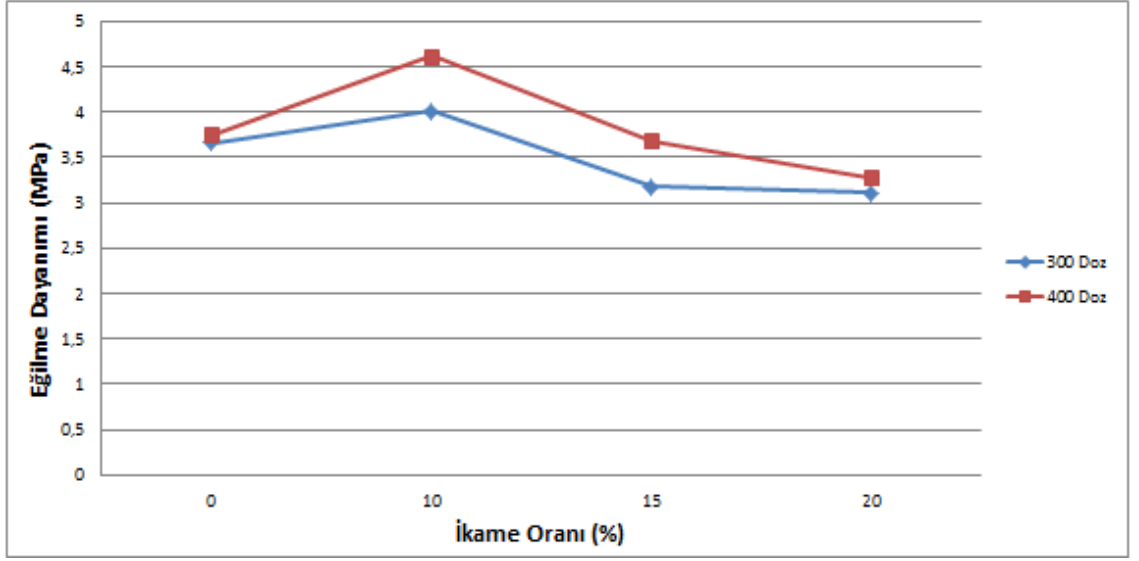
Üretilen prizma numunelerin 28 günlük üç nokta eğilme dayanımı değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Prizma numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değerleri

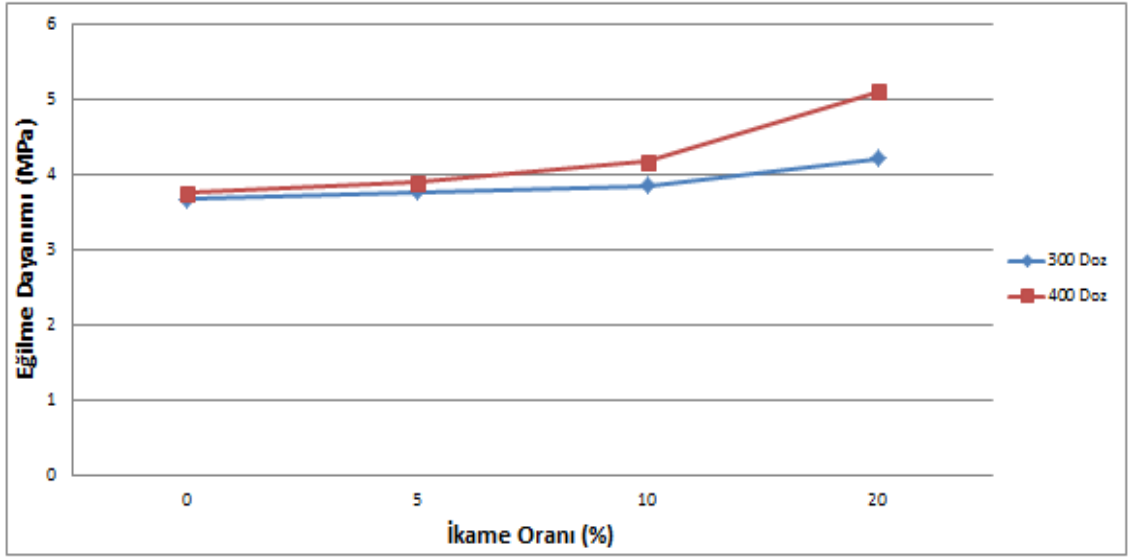
Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı Değişimi (%)
300 - R	0	3.66	100.00
300 - 10Z	10	4.01	109.56
300 - 15Z	15	3.18	86.89
300 - 20Z	20	3.11	84.97
300 - 5M	5	3.76	102.73
300 - 10M	10	3.84	104.92
300 - 20M	20	4.21	115.03
400 - R	0	3.75	100.00
400 - 10Z	10	4.62	123.20
400 - 15Z	15	3.68	98.13
400 - 20Z	20	3.28	87.47
400 - 5M	5	3.89	103.73
400 - 10M	10	4.17	111.20
400 - 20M	20	5.10	136.00

Şekilde 3.3'te zeolit ikameli numunelerin eğilme dayanımlarının ikame oranıyla değişimi görülmektedir. 300 ve 400 dozlu betonlarda %10 oranında zeolit ikamesi, eğilme dayanımında sırasıyla %9.56 ve %23.2'lik bir artış sağlamıştır. İkame oranı arttıkça dayanımda kayıp oluşmaya başlamıştır. %20 zeolit ikamesinde ki dayanım kayıpları 300 ve 400 doz için sırasıyla %15 ve %12.5'tir. Yani %10'dan yüksek ikame oranlarında, numunelerin dayanım değerlerinin referans değerlerinden daha düşük olmuştur.

Şekil 3.4 metakaolin ikamesinin beton eğilme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu grafiğe göre metakolin ikame oranıyla eğilme dayanımlarının orantılı olduğu görülmektedir. İkame oranı arttıkça dayanımdaki artış daha belirginleşmiştir. %20 oranında metakaolin ikameli 300 ve 400 dozajlı betonların eğilme dayanımı artışı sırasıyla %15 ve %36 civarında olmuştur.



Şekil 3.3. Zeolit ikameli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri



Şekil 3.4. Metakaolin ikameli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değişimleri

3.4. Kılcal Su Emme Deneyi (Kılcallık Katsayıları)

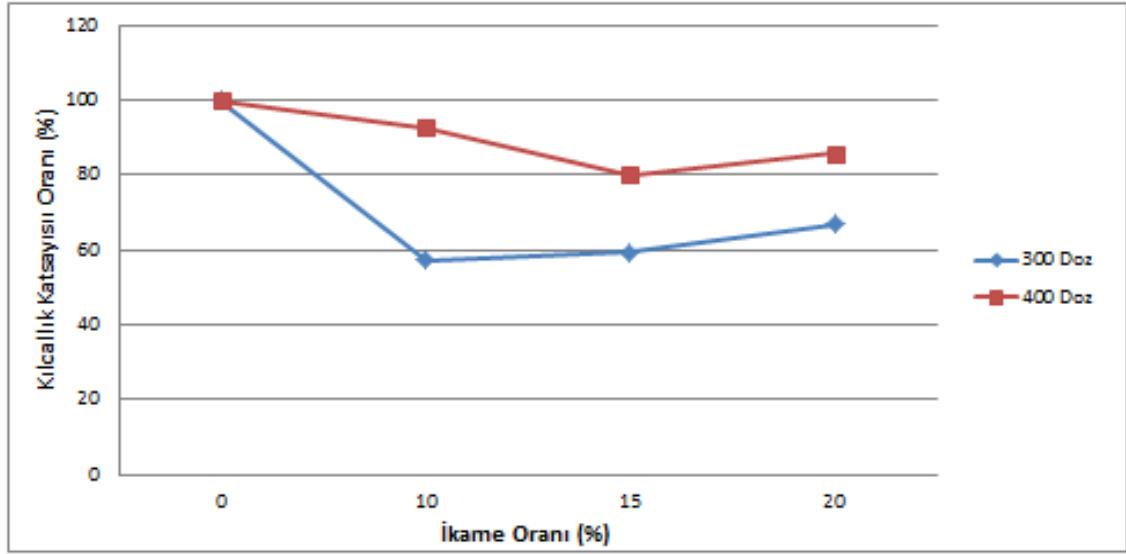
28 günlük 10cm'lik küpler üzerinde TS EN 722-11'e göre yapılan kılcal su emme deneyinden elde edilen kılcallık katsayıları Tablo 3.3'te verilmiştir. Kılcallık katsayılarının belirlenmesinde kullanılan grafikler Ek 1'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Numunelerin kılcallık katsayısı değerleri

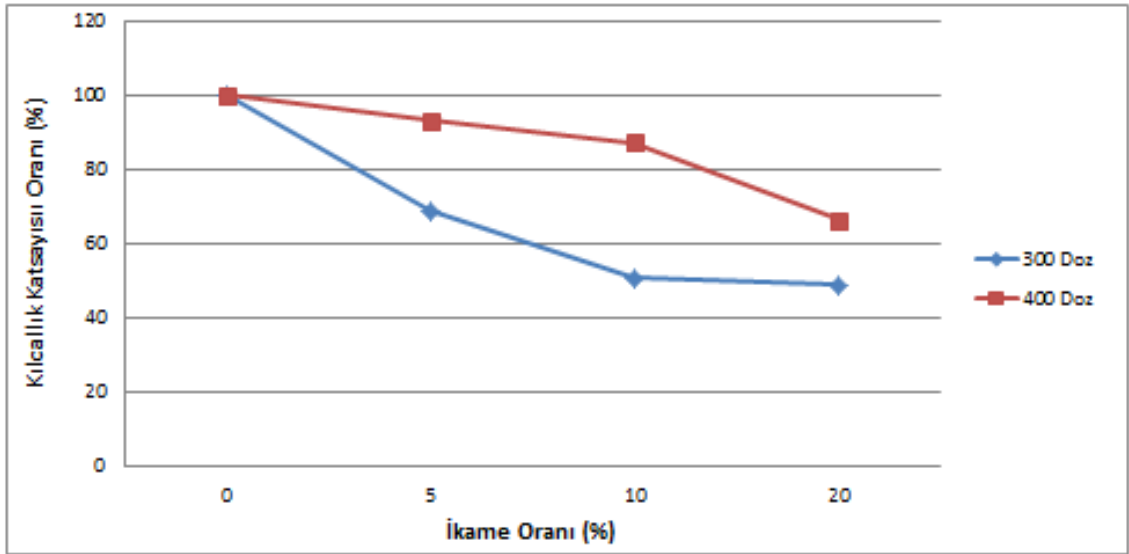
Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Kılcallık Katsayıları (cm/dk ^{0.5})	Kılcallık Katsayısı Değişimi (%)
300 - R	0	0,0250	100.00
300 - 10Z	10	0,0144	57.29
300 - 15Z	15	0,0148	59.24
300 - 20Z	20	0,0167	66.75
300 - 5M	5	0,0173	68.94
300 - 10M	10	0,0127	50.82
300 - 20M	20	0,0123	49.02
400 - R	0	0,0210	100.00
400 - 10Z	10	0,0195	92.53
400 - 15Z	15	0,0169	80.21
400 - 20Z	20	0,0181	85.87
400 - 5M	5	0,0196	93.24
400 - 10M	10	0,0184	87.30
400 - 20M	20	0,0140	66.56

Şekil 3.5'te zeolit ikame oranına bağlı olarak kılcallık katsayılarındaki değişimi görülmektedir. Her iki dozajlı betonlarda da zeolit ikamesinin kılcallık katsayısını azalttığı görülmektedir. 300 dozlu betonlarda katsayıdaki azalma daha fazla olmuştur. %10-15 zeolit ikamesi kılcallıkla su emiliminin azaltılmasında en uygun ikame oranları olarak görülmektedir.

Şekilde 3.6'da metakaolin ikamesinin kılcallık üzerindeki etkisini görülmektedir. 300 dozlu numunelerde metakaolin ikame oranı arttıkça kılcallık katsayılarında düzenli bir azalma görülmektedir. En düşük kılcallık katsayıları %20 metakaolin ikamesiyle sağlanmıştır.



Şekil 3.5. Zeolit ikameli numunelerin kılcallık katsayısı değişimleri



Şekil 3.6. Metakaolin ikameli numunelerin kılcallık katsayısı değişimleri

3.5. Aşınma (Böhme) Deneyi

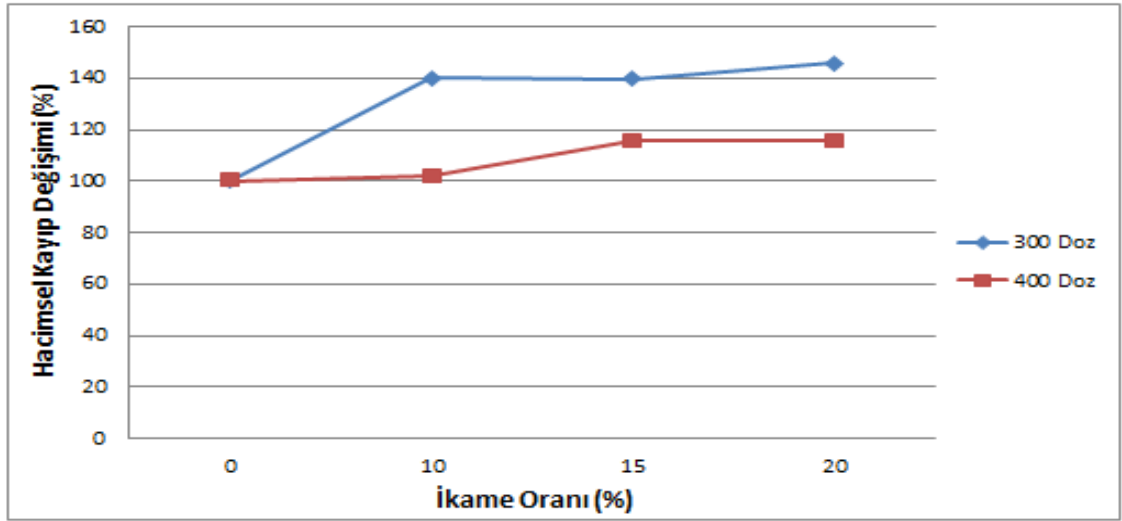
Numunelerin aşınma (böhme) deneyleri sonrası hacimsel kayıp değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Numunelerin aşınma (böhme) deneyi sonrası hacimsel kayıp değerleri

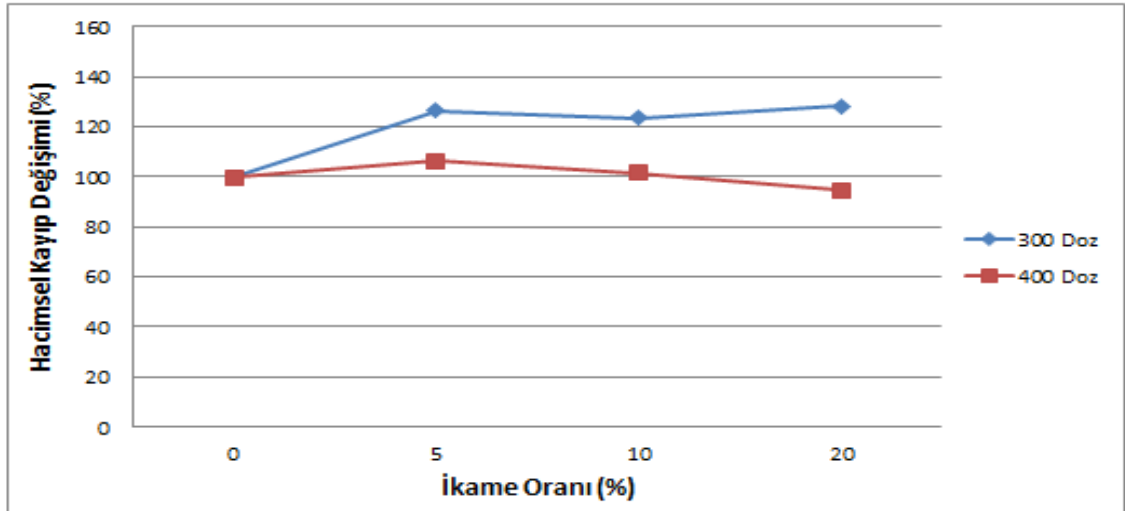
Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Hacimsel Kayıp ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)	Hacimsel Kayıp Değişimi (%)
300 - R	0	4.13	100.00
300 -10Z	10	5.79	140.11
300 – 15Z	15	5.76	139.55
300 – 20Z	20	6.02	145.66
300 – 5M	5	5.23	126.64
300 – 10M	10	5.10	123.55
300 – 20M	20	5.30	128.35
400 – R	0	5.75	100.00
400 – 10Z	10	5.85	101.87
400 – 15Z	15	6.65	115.75
400 – 20Z	20	6.64	115.53
400 – 5M	5	5.66	106.37
400 – 10M	10	5.85	101.77
400 – 20M	20	5.45	94.86

Şekilde 3.7’de görüldüğü gibi her iki dozda da zeolit ikamesiyle numunelerin hacimsel aşınma kayıplarında artış gözlemlenmiştir. 300 ve 400 dozajlı referans numunelerinin hacimsel aşınma kayıpları sırasıyla 4 ve 5 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ iken %20 oranında zeolit ikameli numunelerde ise bu değerler yaklaşık 6 ve 6.5 $\text{cm}^3/50\text{cm}^2$ ’dir.

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi metakaolin ikamesi arttıkça 300 dozajlı numunelerin aşınma kayıpları artmıştır. 400 dozajlı numunelerin aşınma kayıplarında %5 ve %10 oranında metakaolin ikamesiyle belirgin bir değişiklik gözlemlenmiştir. %20 ikameli numuneler ise referans betonuna göre daha az aşınmıştır.



Şekil 3.7. Zeolit ikameli numunelerin aşınma deneyi sonrası hacimsel kayıp değişimleri



Şekil 3.8. Metakaolin ikameli numunelerin aşınma deneyi sonrası hacimsel kayıp değişimleri

3.6. Hızlı Klorür Geçirirliği

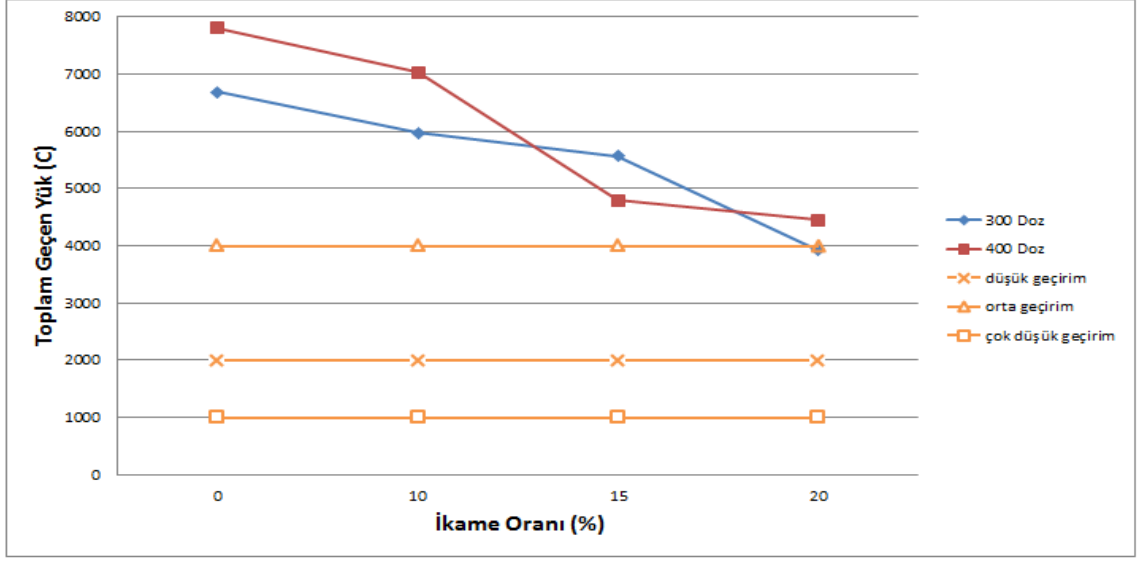
ASTM C 1202 standardına göre yapılan hızlı klorür geçirirliği deneylerinden elde edilen toplam geçen yük değerleri Tablo 3.5'te görülmektedir. Her bir deneye ait zaman-amper değerleri Ek 2'de verilmiştir.

Tablo 3.5. Hızlı klorür geçirimsizliği deneyine ait toplam geçen yük değerleri ve geçirimsizlik sınıfları

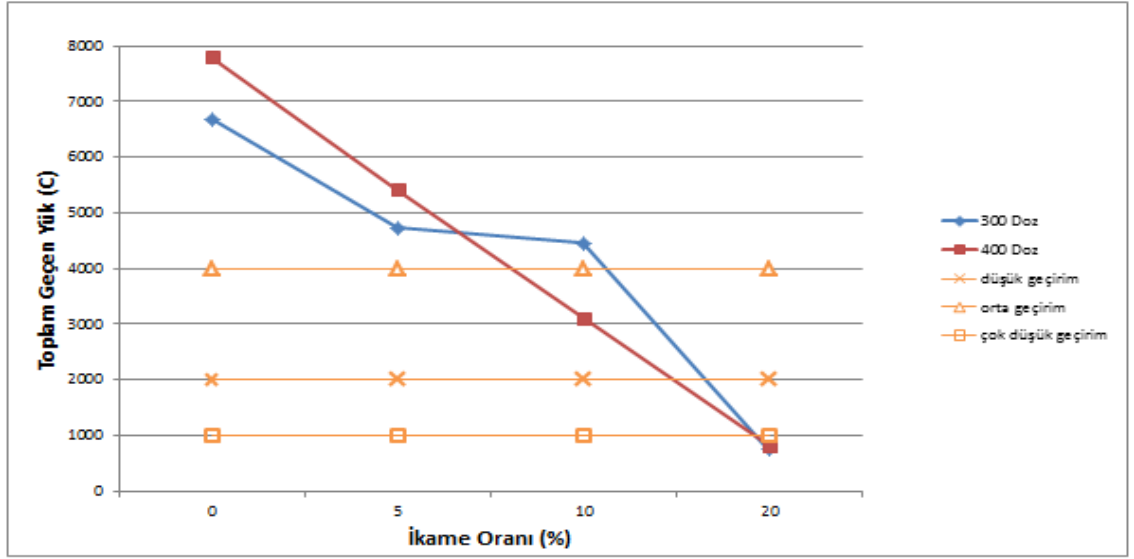
Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Toplam Geçen Yük Değeri (C)	Geçen Yük Değişimi (%)	Geçirgenlik Sınıfı
300 - R	0	6685	100.00	Yüksek
300 - 10Z	10	5967	89.26	Yüksek
300 - 15Z	15	5563	83.22	Yüksek
300 - 20Z	20	3918	58.61	Orta
300 - 5M	5	4737	70.86	Yüksek
300 - 10M	10	4451	66.58	Yüksek
300 - 20M	20	755	11.29	Çok Düşük
400 - R	0	7796	100.00	Yüksek
400 - 10Z	10	7032	90.20	Yüksek
400 - 15Z	15	4795	61.51	Yüksek
400 - 20Z	20	4451	57.09	Yüksek
400 - 5M	5	5418	69.50	Yüksek
400 - 10M	10	3110	39.89	Orta
400 - 20M	20	824	10.57	Çok Düşük

Şekil 3.9’da hızlı klor geçirimsizliği deneyinde zeolit ikamesine bağlı olarak toplam geçen yük değerlerindeki değişim görülmektedir. Grafik üzerinde geçirimsizlik düzeyi sınır değerleri de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hem 300 kg/m³ hem 400 kg/m³ dozlu betonlarda zeolit ikamesi klorür geçirimsizliği deneyinde olumlu sonuç vermiştir. Her iki dozda da geçirimsizliği çok yüksek olan beton, zeolit ikamesiyle orta geçirimsizlik sınıfına girmiştir. %20 oranında zeolit ikamesi, referans numunelerine göre toplam geçen klor iyon değerlerini ortalama %42 oranında azaltmıştır.

Şekil 3.10’da metakaolin ikamesine bağlı olarak betonların toplam geçen yük değerlerindeki değişimi görülmektedir. Metakaolin ikame oranı arttıkça toplam geçen yük değerleri düzenli bir şekilde azalmıştır. Bu iyileşme her iki dozajda da %10 ikame oranında yaklaşık %30’dan başlayarak %20 ikame oranında %90 gibi önemli bir düzeyde olmuştur. Çok yüksek geçirimsizliği olan betonlar, metakaolin ikamesiyle çok düşük geçirimsizlik sınıfına girebilmiştir. Bunun nedeni metakaolinin hem puzolanik etkisi hem de dolgu etkisi nedeniyle oluşturduğu geçirimsiz yapıdır.



Şekil 3.9. Zeolit ikameli betonların toplam geçen yük değerleri



Şekil 3.10. Metakaolin ikameli betonların toplam geçen yük değerleri

3.7. Donma-Çözülme Deneyi

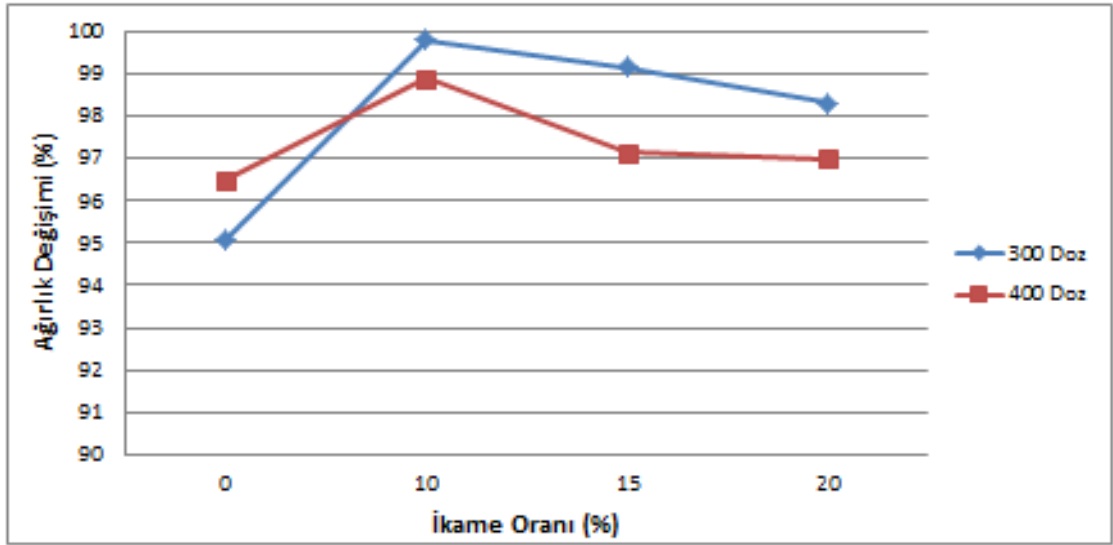
3.7.1. Donma-Çözülmenin Ağırlık Üzerindeki Etkisi

Donma-çözülme çevrimleri öncesinde ve sonrasında belirlenen ağırlıklar ve ağırlık değişimleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

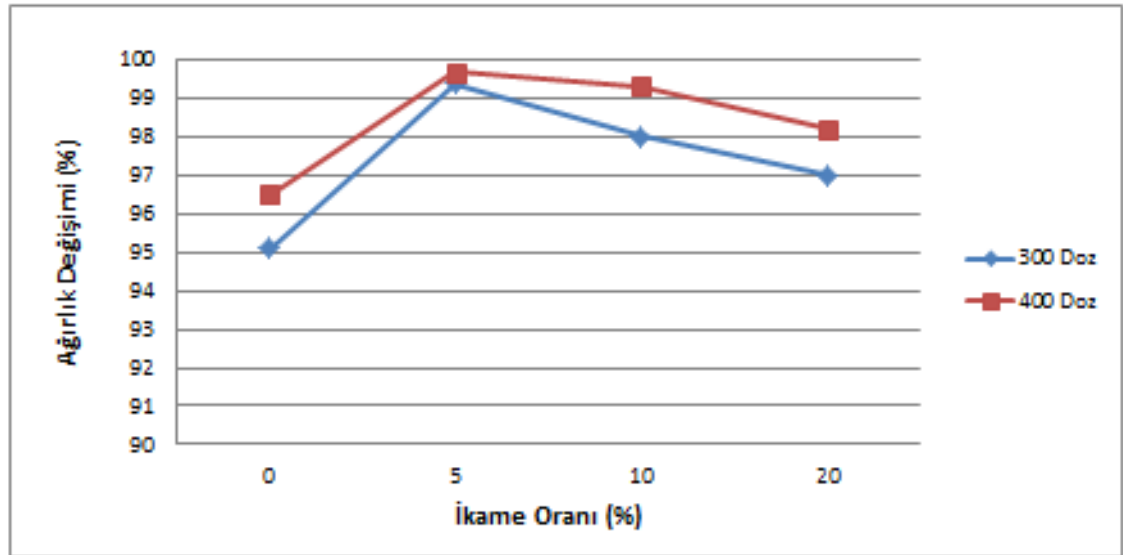
Tablo 3.6. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ağırlık ve ağırlık değişimleri

Numune İsmi	İkame Oranı (%)	İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Ağırlık Değişimi (%)
300 - R	0	8065.33	7670.13	95.10
300 - 10Z	10	7984.00	7968.03	99.80
300 - 15Z	15	7932.67	7865.24	99.15
300 - 20Z	20	7885.33	7751.28	98.30
300 - 5M	5	7939.00	7887.39	99.35
300 - 10M	10	7983.67	7823.99	98.00
300 - 20M	20	7887.67	7651.04	97.00
400 - R	0	7893.33	7617.06	96.50
400 - 10Z	10	7790.67	7704.69	98.90
400 - 15Z	15	7753.00	7532.04	97.15
400 - 20Z	20	7665.33	7435.70	97.00
400 - 5M	5	7791.00	7764.00	99.65
400 - 10M	10	7772.33	7717,92	99.30
400 - 20M	20	7776.33	7636.36	98.20

Donma-çözülme çevrimleri sonunda numunelerde oluşan ağırlık kayıpları zeolit ikameli betonlar için Şekil 3.11’de metakaolin ikameli betonlar için Şekil 3.12’de görülmektedir. Zeolit, tüm ikame oranlarında ağırlık kaybının azalmasını sağlamıştır. 300 dozda referans numunesinde yaklaşık %5’lik bir ağırlık kaybı oluşurken zeolit ikameli betonlarda ortalama kayıp %0.9 düzeyine inmiştir. Şekil 3.12’den metakaolin ikameli numunelerdeki ağırlık kayıplarının da, referans betonuna göre daha az olduğu görülmektedir. Her iki dozda da en verimli ikame oranının %5’tir.



Şekil 3.11. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık değişimleri



Şekil 3.12. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık değişimleri

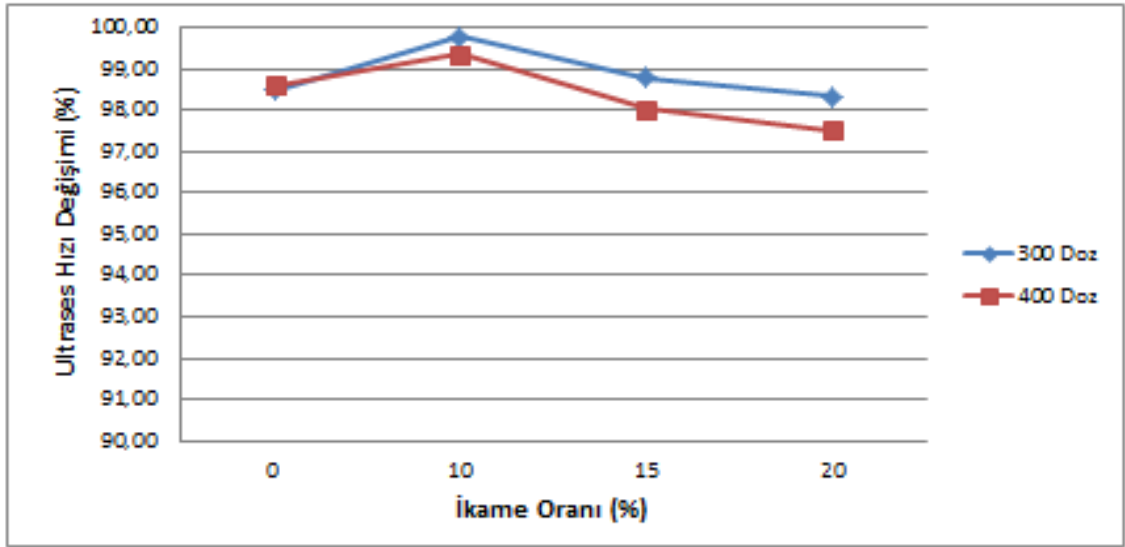
3.7.2. Donma-Çözülmenin Ultrases Hızları Üzerindeki Etkisi

Donma-çözülme deneyinden önceki ve sonraki ultrases hızı değerleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

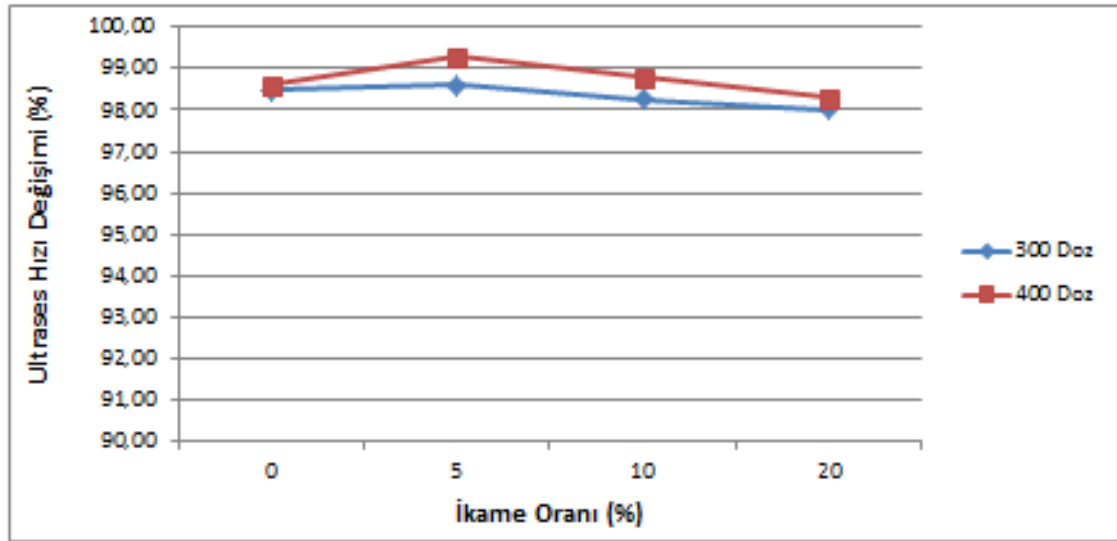
Tablo 3.7. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ait ultrases hızı değişimi

Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Donma Öncesi Ultrases Hızları (Km/Sn)	Donma Sonrası Ultrases Hızları (Km/Sn)	Ultrases Hızı Değişimi (%)
300 - R	0	3.32	3.27	98.49
300 - 10Z	10	3.36	3.35	99.80
300 - 15Z	15	3.33	3.29	98.80
300 - 20Z	20	3.31	3.25	98.32
300 - 5M	5	3.38	3.33	98.60
300 - 10M	10	3.35	3.29	98.26
300 - 20M	20	3.37	3.30	98.00
400 - R	0	3.29	3.24	98.60
400 - 10Z	10	3.30	3.28	99.36
400 - 15Z	15	3.22	3.16	98.02
400 - 20Z	20	3.22	3.14	97.51
400 - 5M	5	3.27	3.25	99.30
400 - 10M	10	3.26	3.22	98.80
400 - 20M	20	3.31	3.25	98.30

Şekil 3.13 ve 3.14'te zeolit ile metakaolin ikamesinin 100 donma-çözülme çevrimine maruz kalan betonların ultrases hızı değişimini göstermektedir. Her iki dozajda da referans betonlarının donma çözülme çevrimleri sonrasındaki ultrases hızları yaklaşık %1.5 düzeyinde azalmıştır. Hem zeolit hem de metakaolin ikamesi ultrases hızlarında çok az değişiklik oluşturmuşlardır.



Şekil 3.13. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases hızı değişimi



Şekil 3.14. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases hızı değişimi

3.7.3. Donma-Çözülmenin Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

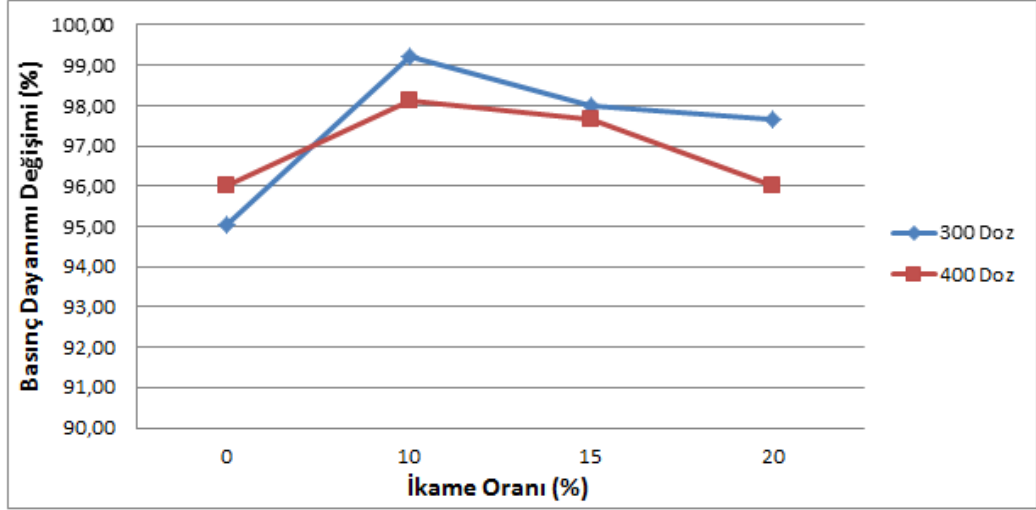
Donma-çözülme etkisinden önceki ve sonraki basınç dayanımları, basınç dayanım değişimleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasına ait basınç dayanımları

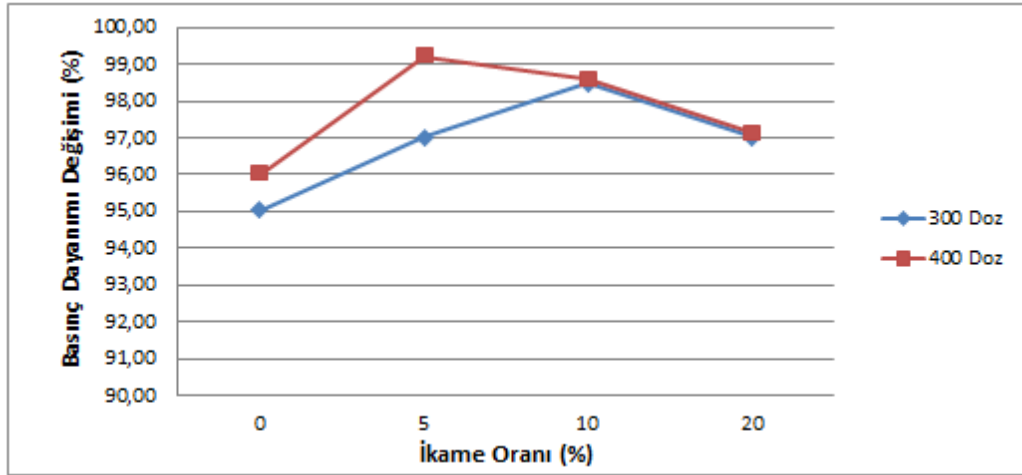
Numune İsmi	İkame Oranı (%)	Referans Basınç Dayanımları (MPa)	Donma Sonrası Basınç Dayanımları (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
300 - R	0	29.49	28.03	95.05
300 - 10Z	10	32.82	32.56	99.21
300 - 15Z	15	31.3	30.67	97.99
300 - 20Z	20	29.77	29.07	97.65
300 - 5M	5	35.44	34.38	97.01
300 - 10M	10	37.73	37.16	98.49
300 - 20M	20	43.48	42.18	97.01
400 - R	0	30.03	28.83	96.00
400 - 10Z	10	38.32	37.6	98.12
400 - 15Z	15	37.81	36.92	97.65
400 - 20Z	20	33.03	31.71	96.00
400 - 5M	5	38.96	38.65	99.20
400 - 10M	10	41.93	41.34	98.59
400 - 20M	20	52.82	51.3	97.12

Zeolit ve metakaolin ikameli betonların bu deney sonrası referans örneklerine göre basınç dayanımlarının değişimleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da görülmektedir. 300 ve 400 dozlu referans numunelerinin basınç dayanımları 100 donma-çözülme çevrimi sonucunda ilk dayanımlarının sırasıyla %95 ve %96’sı seviyelerine düşmüştür. 300 ve 400 dozlu %10 oranında zeolit içeren numunelerin basınç dayanımı değişimleri sırasıyla %99.7 ve %97 olmuş ve en az dayanım kaybını bu ikame oranında görülmüştür.

Metakaolin ikamesinin de betonda donma-çözülme sonucunda oluşan dayanım kaybını azaltıcı yönde etkisi olmuştur. 400 dozda en az kayıp %5 oranında ikameyle görülmüştür. Her iki dozda da %20 oranında metakaolin ikamesi dayanım kaybını %3’e indirmiştir.



Şekil 3.15. Zeolit ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı değişimi



Şekil 3.16. Metakaolin ikameli betonların 100 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı değişimi

3.8. Yüksek Sıcaklık Etkisi

3.8.1. Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımları, basınç dayanımlarının değişimi 300 ve 400 dozlu numuneler için Tablo 3.9 ve Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9. 300 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları

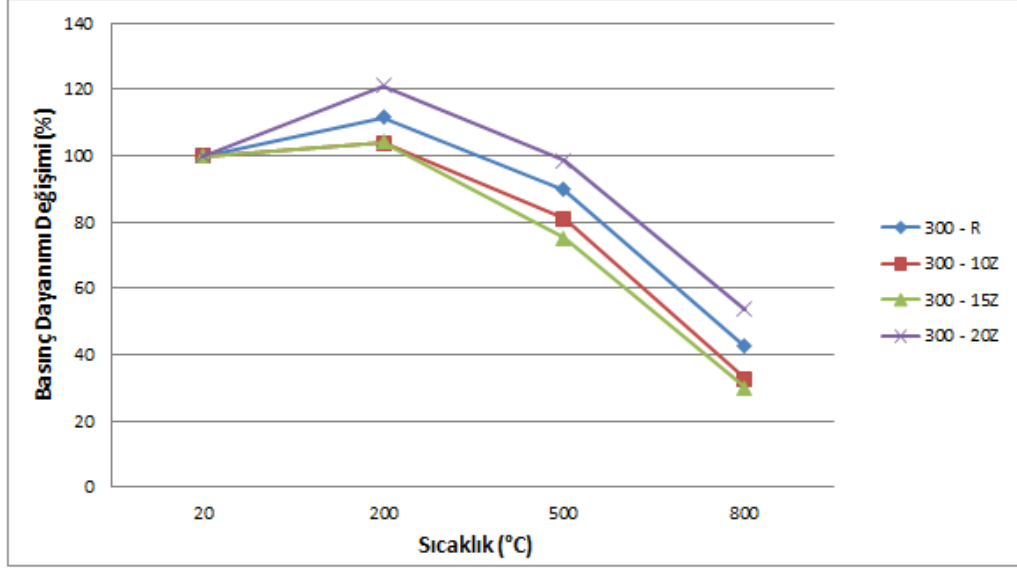
Numune İsmi	Uygulanan Sıcaklık (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimi (%)
300 - R	20	34.39	100.00
300 - R	200	38.36	111.54
300 - R	500	30.87	89.76
300 - R	800	14.62	42.51
300 - 10Z	20	34.91	100.00
300 - 10Z	200	36.29	103.95
300 - 10Z	500	28.35	81.21
300 - 10Z	800	11.44	32.77
300 - 15Z	20	34.81	100.00
300 - 15Z	200	36.25	104.14
300 - 15Z	500	26.16	75.15
300 - 15Z	800	10.47	30.08
300 - 20Z	20	32.53	100.00
300 - 20Z	200	39.42	121.18
300 - 20Z	500	32.06	98.56
300 - 20Z	800	17.46	53.67
300 - 5M	20	38.90	100.00
300 - 5M	200	32.40	83.29
300 - 5M	500	23.63	60.75
300 - 5M	800	11.71	30.10
300 - 10M	20	39.88	100.00
300 - 10M	200	40.29	101.03
300 - 10M	500	25.22	63.24
300 - 10M	800	18.29	45.86
300 - 20M	20	48.00	100.00
300 - 20M	200	40.96	85.33
300 - 20M	500	27.24	56.75
300 - 20M	800	17.00	35.42

Tablo 3.10. 400 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası basınç dayanımları

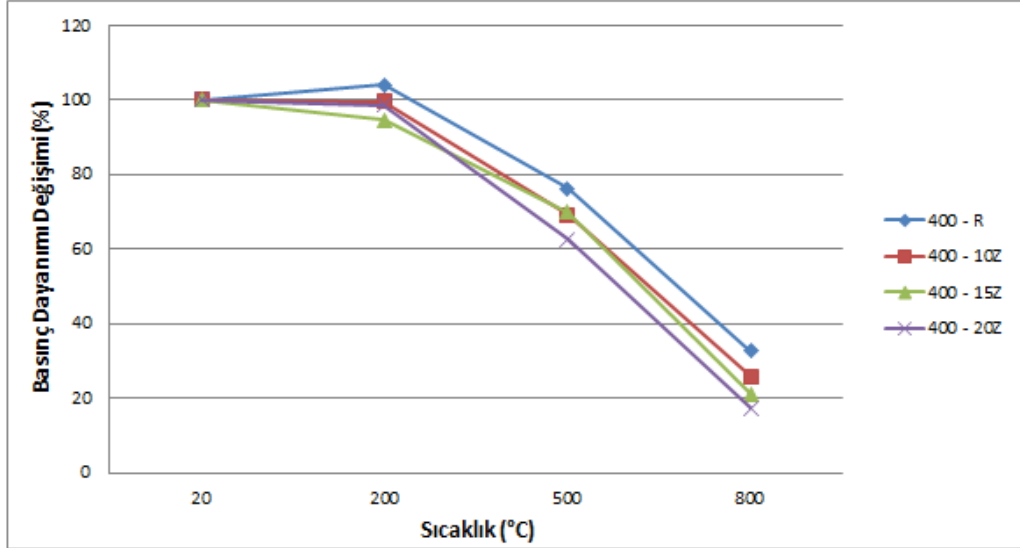
Numune İsmi	Uygulanan Sıcaklık (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Değişimi (%)
400 - R	20	37.95	100.00
400 - R	200	39.49	104.06
400 - R	500	28.92	76.21
400 - R	800	12.40	32.68
400 - 10Z	20	38.49	100.00
400 - 10Z	200	38.31	99.53
400 - 10Z	500	26.65	69.24
400 - 10Z	800	9.96	25.88
400 - 15Z	20	38.29	100.00
400 - 15Z	200	36.27	94.72
400 - 15Z	500	26.75	69.86
400 - 15Z	800	8.13	21.23
400 - 20Z	20	36.57	100.00
400 - 20Z	200	36.05	98.58
400 - 20Z	500	22.88	62.57
400 - 20Z	800	6.40	17.501
400 - 5M	20	43.39	100.00
400 - 5M	200	36.65	84.47
400 - 5M	500	21.79	50.22
400 - 5M	800	9.60	22.13
400 - 10M	20	46.50	100.00
400 - 10M	200	38.44	82.67
400 - 10M	500	20.72	44.56
400 - 10M	800	8.20	17.63
400 - 20M	20	54.60	100.00
400 - 20M	200	42.82	78.43
400 - 20M	500	27.95	51.19
400 - 20M	800	8.30	15.20

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de zeolit ikameli numunelerin sıcaklık etkisiyle basınç dayanımlarının değişimi görülmektedir. 200°C’de zeolit içeren 300 dozlu tüm betonların basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Bu artış, literatüre göre de beklenen bir durumdur. 200°C’de hidrate olamamış çimento taneleri, kapiler boşluklardaki basınçlı su buharının etkisiyle hidrate olup daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir (Baradan, B. vd.,2010). 200°C’den yüksek sıcaklıklarda beton dayanımlarında azalma görülmüştür. 300 dozlu numunelerde %20 zeolit ikamesi en az dayanım kaybını sağlamıştır. 400 dozlu

betonların dayanım kayıpları daha fazla olmuştur. Bilim, C., (2011)'in, zeolit içeren harçlar üzerinde yaptığı çalışmada; yüksek sıcaklığa maruz kalıp yavaş soğumaya bırakılan harçlarda en olumlu sonucu %20 oranında zeolit ikamesi göstermiştir. Bu sonuç yaptığımız çalışmayla paralellik göstermektedir.

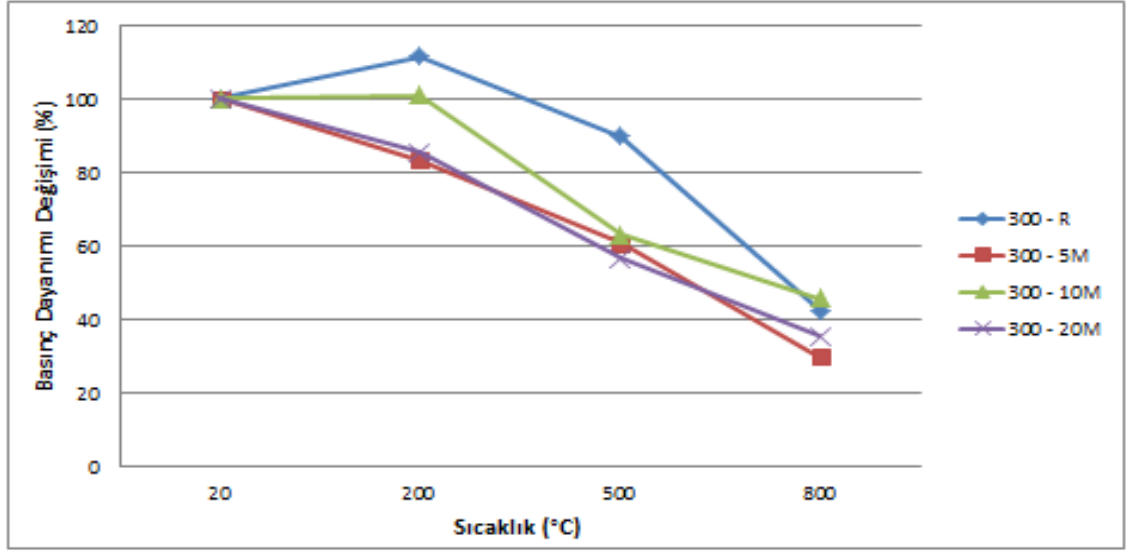


Şekil 3.17. Zeolit içeren 300 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi

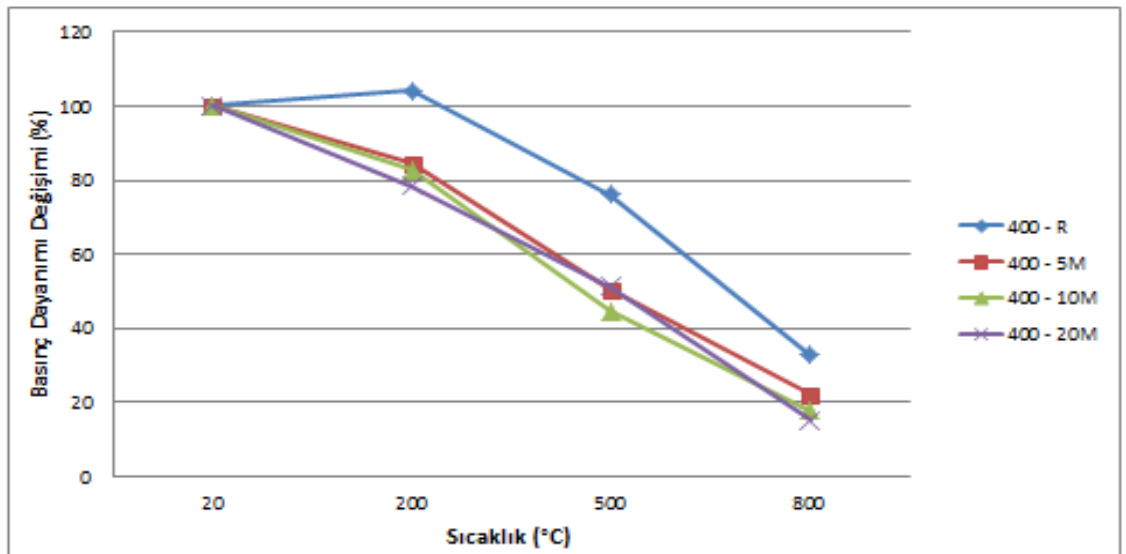


Şekil 3.18. Zeolit içeren 400 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi

Şekil 3.19 ve 3.20’de metakaolin içeren numunelerin sıcaklık-basınç dayanımı değişimi görülmektedir. Her iki dozajlı betonlarda metakaolin ikamesi, yüksek sıcaklığa karşı olumlu bir etki gösterememiştir. 200°C’de sadece referans betonunda dayanım artışı görülmüştür. Sıcaklık arttıkça en az dayanım kaybı görülen numuneler, referans numuneleri olmuştur. 300 dozlu %10 metakaolin ikameli betonda 200°C’de dayanım kaybı görülmemiştir.



Şekil 3.19. Metakaolin içeren 300 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi



Şekil 3.20. Metakaolin içeren 400 dozlu betonların basınç dayanımı değişimi-sıcaklık ilişkisi

3.8.2. Yüksek Sıcaklığın Ultrases Hızları Üzerindeki Etkisi

Yüksek sıcaklığa etkisine maruz kalan numunelerin deneyden önceki ve sonraki ultrases hızı, ultrases hızlarının referans numunesine göre değişimleri Tablo 3.11 ve 3.12’de verilmiştir.

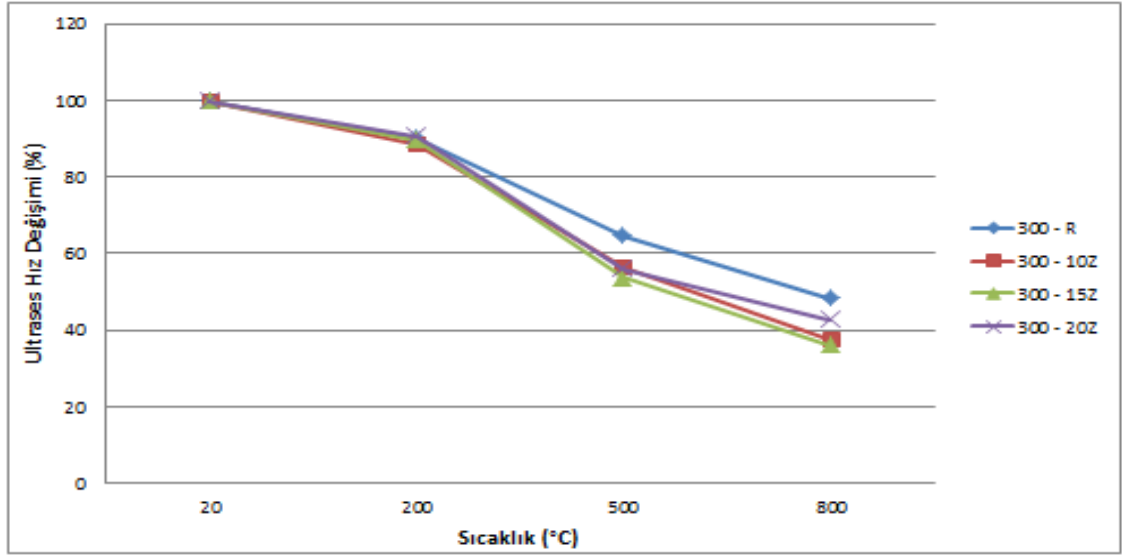
Tablo 3.11. 300 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası ultrases hızı, ultrases hızlarının referans numunesine göre değişimleri

Numune İsmi	Uygulanan Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Öncesi Ultrases Hızı (km/sn)	Sıcaklık Sonrası Ultrases Hızı (km/sn)	Ultrases Hızı Değişimi (%)
300 - R	20	3.13	3.13	100.00
300 - R	200	3.00	2.71	90.12
300 - R	500	3.03	1.96	64.80
300 - R	800	2.99	1.45	48.41
300 -10Z	20	3.05	3.05	100.00
300 -10Z	200	3.07	2.72	88.64
300 -10Z	500	3.03	1.71	56.52
300 - 10Z	800	3.10	1.17	37.71
300 - 15Z	20	2.98	2.98	100.00
300 - 15Z	200	3.03	2.71	89.69
300 - 15Z	500	3.00	1.61	53.75
300 - 15Z	800	2.92	1.06	36.22
300 - 20Z	20	2.99	2.99	100.00
300 - 20Z	200	3.00	2.72	90.76
300 - 20Z	500	3.03	1.70	56.11
300 - 20Z	800	3.00	1.28	42.85
300 - 5M	20	2.97	2.97	100.00
300 - 5M	200	3.05	2.72	89.25
300 - 5M	500	3.04	1.44	47.46
300 - 5M	800	3.04	1.34	43.96
300 - 10M	20	3.05	3.05	100.00
300 - 10M	200	3.08	2.69	87.29
300 - 10M	500	3.05	1.59	52.06
300 - 10M	800	3.04	1.38	45.60
300 - 20M	20	3.03	3.03	100.00
300 - 20M	200	3.03	2.64	87.10
300 - 20M	500	3.03	1.61	52.91
300 - 20M	800	3.08	1.26	40.94

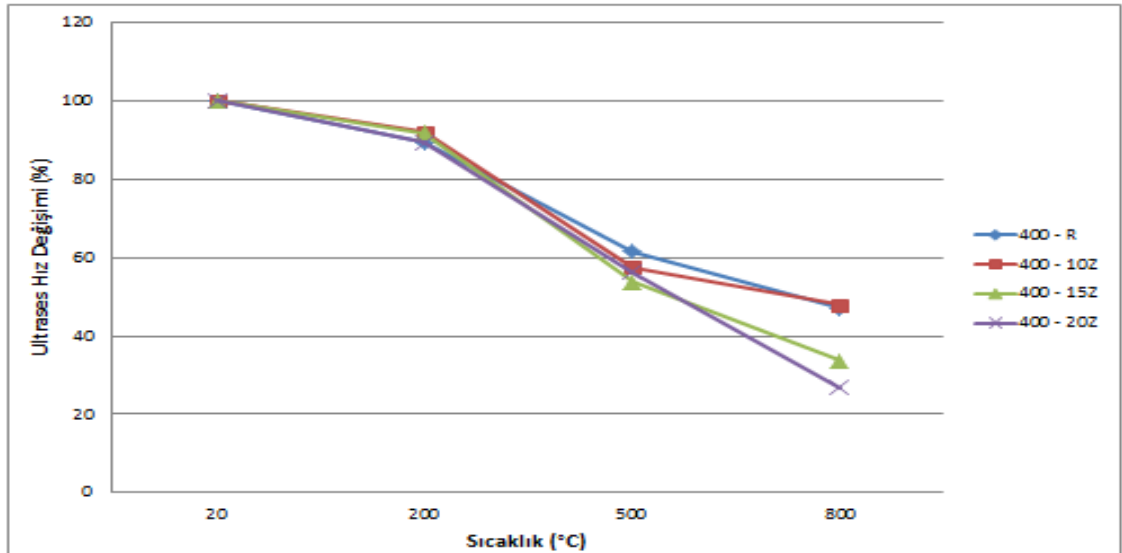
Tablo 3.12. 400 dozlu numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası ultrases hızı, ultrases hızlarının değışimleri

Numune İsmi	Uygulanan Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Öncesi Ultrases Hızı (km/sn)	Sıcaklık Sonrası Ultrases Hızı (km/sn)	Ultrases Hızı Değişimi (%)
400 - R	20	2.99	2.99	100.00
400 - R	200	2.99	2.68	89.35
400 - R	500	2.99	1.84	61.47
400 - R	800	2.96	1.39	47.03
400 - 10Z	20	2.73	2.73	100.00
400 - 10Z	200	2.89	2.66	92.00
400 - 10Z	500	2.96	1.70	57.42
400 - 10Z	800	2.93	1.40	47.97
400 - 15Z	20	2.86	2.86	100.00
400 - 15Z	200	2.88	2.65	91.79
400 - 15Z	500	2.88	1.55	53.80
400 - 15Z	800	2.93	0.99	33.73
400 - 20Z	20	2.94	2.94	100.00
400 - 20Z	200	2.94	2.62	89.25
400 - 20Z	500	2.92	1.64	56.06
400 - 20Z	800	2.92	0.78	26.73
400 - 5M	20	2.99	2.99	100.00
400 - 5M	200	2.96	2.60	87.79
400 - 5M	500	2.98	1.62	54.26
400 - 5M	800	2.97	1.22	40.99
400 - 10M	20	2.95	2.95	100.00
400 - 10M	200	2.81	2.43	86.41
400 - 10M	500	2.92	1.42	48.47
400 - 10M	800	2.93	0.85	28.86
400 - 20M	20	3.01	3.01	100.00
400 - 20M	200	3.01	2.43	80.58
400 - 20M	500	3.01	1.33	44.30
400 - 20M	800	3.01	0.78	26.01

Şekil 3.21 ve 3.22’de zeolit ikameli betonların yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan ultrases hızı değışimleri görülmektedir. Tüm numunelerde sıcaklık arttıkça ultrases hızları azalmıştır. Her iki dozajlı numunelerde 200°C’de birbirlerine yakın değışim gözlemlenmiştir. Sıcaklık arttıkça içsel hasarlar da artmış, bağlayıcı hamur yapısı bozulmuş ve beton daha boşluklu olmuştur. Boşlukta ses, daha zor iletildiğinden ultrases hızları da düşmüştür.



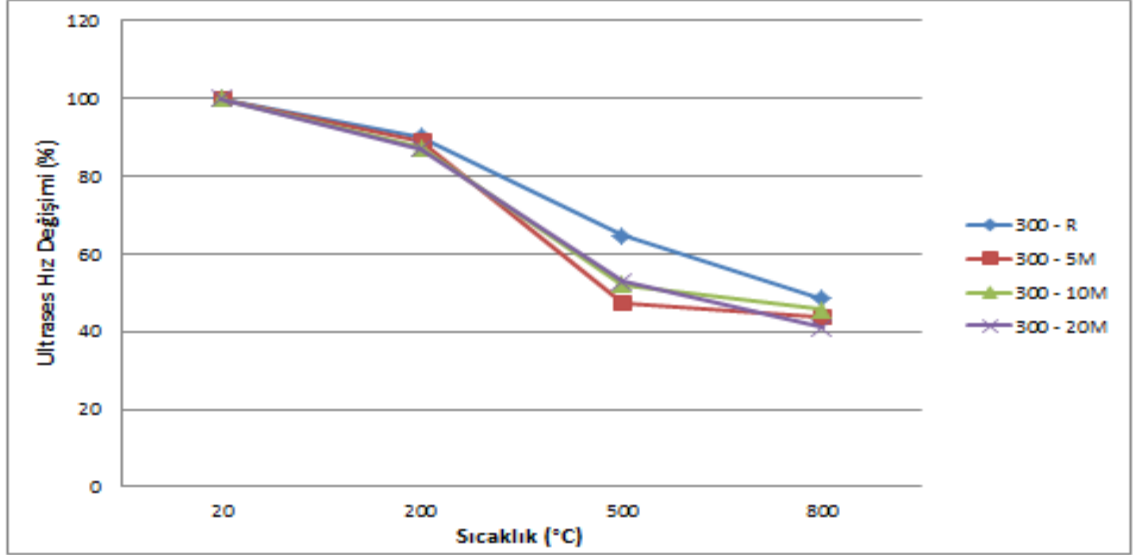
Şekil 3.21. Zeolit içeren 300 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi



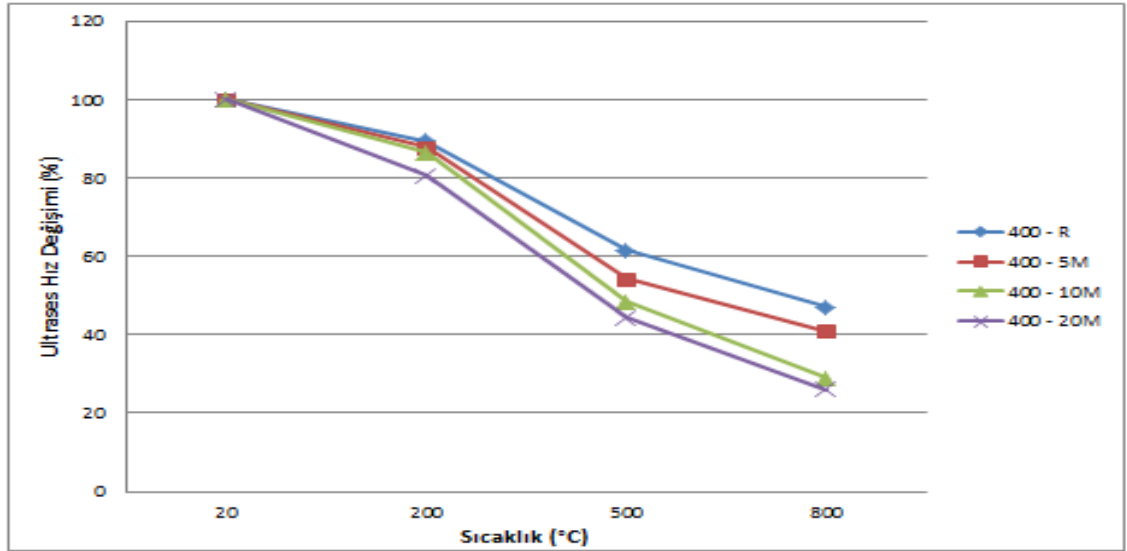
Şekil 3.22. Zeolit içeren 400 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi

300 ve 400 dozlu numunelerde referans numunelerinde sıcaklık sonucunda oluşan ultrases hızı değişimlerinin metakaolin ikameli olanlara göre daha az olduğu Şekil 3.23 ve 3.24'te görülmektedir. 300 dozlu numunelerde 200°C'de ultrases hızı değişimleri birbirlerine yakın çıkmıştır. 500°C'de ise metakaolin miktarı arttıkça ultrases hızı kayıpları nispeten azalmıştır. Bunun sebebi 500°C'de dehidrate olup betonda büzüşme ve çatlak oluşturması beklenen Ca(OH)_2 miktarının puzolanik reaksiyon sonucu azalmış olmasıdır (Baradan vd., 2010). 300 dozlu betonların 800°C'deki ultrases hızı değişimleri birbirlerine yakın olup referans numunesi en olumlu sonucu vermiştir. 400 dozlu numunelerde ise

metakaolin ikamesiyle ultrases hızlarındaki değişikliklerin daha belirgin olduğu görölmektedir. Genel olarak metakaolin ikame oranı arttıkça ultrases hızlarındaki değişim artmaktadır. Bu değişiminin, sıcaklık arttıkça büyüdüğü görölmektedir.



Şekil 3.23. Metakaolin içeren 300 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi



Şekil 3.24. Metakaolin içeren 400 dozlu betonların ultrases hızı değişimi-sıcaklık ilişkisi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zeolit ve metakaolinin betonun dayanıklılığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda zeolit ve metakaolin ikamesiyle üretilen betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı; aşınma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı, klor geçirimsizlikleri ve kılcallık katsayıları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen önemli sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. Hem 300 kg/m³ hem de 400 kg/m³ dozajda %10 ve %15 oranında zeolit ikamesi 28 günlük basınç dayanımlarında artış oluşturmuştur. En yüksek dayanım %10 ikame oranında elde edilmiştir.
2. Metakaolin ikamesi arttıkça betonların 28 günlük basınç dayanımları da artmıştır. Bu artış %20 ikame oranında %50'ye varmıştır.
3. Zeolitin %10 oranında ikamesi, her iki dozda da referans numunelerine göre daha yüksek eğilme dayanımı sağlamıştır. Artan ikame oranlarında ise eğilme dayanımlarında kayıp oluşmuştur.
4. Metakaolin ikamesi eğilme dayanımlarını iyileştirmiş, %20 oranında ikame edildiğinde 300 kg/m³ ve 400 kg/m³ dozajlı numunelerde sırasıyla %10 ve %22 oranlarında artış sağlamıştır.
5. Her iki dozajda da hem zeolit hem de metakaolin ikamesi kılcallık katsayılarını azaltmıştır. Zeolitin %10 ve %15 oranında ikamesi, metakaolinin ise %20 oranında ikamesi kılcal su geçirimsizliğinin azaltılmasında en uygun oranlar olarak belirlenmiştir.
6. Hem zeolit hem de metakaolin ikamesi ile 300 kg/m³ dozajlı betonlarda aşınma kayıpları artmıştır. 400 kg/m³ dozajlı betonlarda ise aşınma miktarları referans betonuna göre fazla değişmemiş, metakaolin ikameli olanlarda referans betonu ile hemen hemen aynı olmuştur.

7. Metakaolin ikamesi arttıkça hızlı klor geçirimsizliğini önemli miktarda azaltmıştır. “Çok yüksek geçirimli” sınıfta olan referans betonları %20 zeolit ikamesiyle “orta geçirimsizlik sınıfı” düzeyine inmiştir. %20 metakaolin ikamesi ile ise “çok düşük geçirim” sınıfında beton elde edilmiştir.
8. Her iki mineral katkının ikamesi tüm oranlarda 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında referans betonuna göre oluşan ağırlık kayıplarının azalmasını sağlamıştır.
9. %10 oranında zeolit ikamesi 100 donma-çözülme çevrimi sonunda oluşan dayanım kaybını en az düzeye indirgemıştır. Metakaolin ikameli tüm betonlarda da referans betona kıyasla az kayıp gerçekleşmiştir.
10. Düşük dozajlı numunelerde %20 zeolit ikamesi sıcaklık etkisine karşı en iyi sonucu göstermiştir. Bu olumlu etki 400 dozajlı numunelerde görülmemiştir.
11. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan zeolitli betonlar genel olarak referans betonuna benzer davranış göstermişlerdir. Dayanım kayıpları genellikle referans betonundan daha fazla olmuş, aradaki fark maksimum %15 düzeyinde kalmıştır.
12. Metakaolin ikame edilen betonlar tüm sıcaklıklarda referans betonundan yaklaşık ortalama %30 daha fazla zarar görmüşlerdir. İkame oranlarının değişimi dayanım kaybı açısından önemli bir fark oluşturmamıştır.
13. Sonuç olarak zeolit ve metakaolinin mineral katkı olarak betonda kullanımının özellikle basınç ve eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik, hızlı klor geçirimsizliği ve dona dayanıklılık gibi özellikler üzerinde olumlu etki yaptığı, zeolitin %10 oranında metakaolinin ise %20 oranında ikamesinin uygun olduğu söylenebilir.
14. Bu çalışmada kullanılan metakaolin maksimum ikame oranının daha artırılması, 0.60 olarak sabit tutulan su/çimento oranının daha düşük bir düzeyi için de özelliklerin denenmesi, donma-çözülme çevrimlerinin ASTM C666 standardında önerildiği gibi 300 çevrime çıkartılarak denenmesi sonraki çalışmalar için önerilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, B. ve Shekarchi, M., 2010. Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, Cement & Concrete Composites, 32, 134-141.
- Akman, M. S., 1996 Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 1-11.
- Al-Akhras, N.M., 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, Cement and Concrete Research, 36, 1727–1734. Ankara.
- ASTM C 125, Annual Book of ASTM Standarts., Pennsylvania.
- ASTM C 494., 1994. Standart Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM C 125, Annual Book of ASTM Standarts., Pennsylvania.
- ASTM C 494 - 99a, 2002. Standart Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.
- Baradan, B., 1998. Yapı Malzemesi II, DEÜ Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, 92-106, 154-158.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve ÜN, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., 2012. Beton, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bilim, C., 2011. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, Construction and Building Materials, 25, 3175-3180.
- Bredy, P., Chabannet, M. ve Pera J., 1989. Microstructure and porosity of metakaolin blended cements, Proc Mater Res Soc Symp, 137, 431-436.
- Caldarone, M.A., Gruber, K.A. ve Burg, R.G., 1994. High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture, Modern Steel Construction, 16, 11 ,37-40.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M. ve Yurdusev, M.A., 2004. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, Cement and Concrete Research, 34, 731-735.
- Chan, S.Y.N. ve Ji, X., 1999. Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, Cement & Concrete Composites, 21, 293-300.

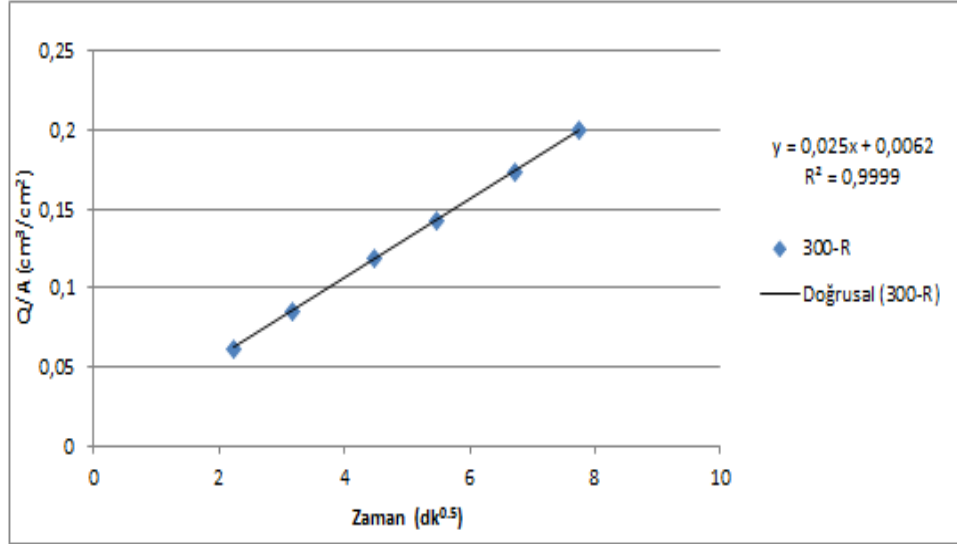
- Doğan, Ü.A., 2008. Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsizlik Özellikleri ve Gömülü Çelik Korozyonuna Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Duman, R., 2010. Silis Dumanının Betonun Performansına ve Klor Geçirimsizliğine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Erdoğan, T.Y., 2013. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Ersoy, U., 1985. Betonarme - Temel İlkeler ve Taşıma Gücü, Bizim Büro Basımevi.
- Feng, N., Feng, X., Hao, T. ve Xing, F., 2002. Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete, Cement and Concrete Research, 32, 623-627.
- Gruber, K.A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R.D. ve Thomas M.D.A., 2001. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, Cement & Concrete Composites, 23, 479-484.
- Güneyisi, E. ve Gesoğlu, M., 2008. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, Materials and Structures, 41, 937-949.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaboğa, F. ve Mermerdaş, K., 2013. Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in chloride contaminated concretes with and without metakaolin, Composites: Part B, 45, 1288-1295.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S. ve Mermerdaş, K., 2012. Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes, Construction and Building Materials, 34, 120-130.
- Güneyisi, E., ve Mermerdaş, K., 2007. Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin, Materials and Structures, 40, 1161-1171.
- Karakurt, C. ve Topçu, B.B., 2011. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete, Construction and Building Materials, 25, 1789-1795.
- Karaüç, E., 2008. Uçucu kül ve zeolitin kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kostuch, J.A., Walters, G.V. ve Jones, T.R., 1993. High performance concrete incorporating metakaolin-a review, University of Dundee, Concrete 2000, 1799-1811.

- Khatip, J.M. ve Wild, S., 1996. Pore Size Distribution of Metakaolin Paste, Cement and Concrete Research, 26, 11, 1545-1553.
- Kurama, H., 1994. Doğal Zeolit (Klinoptilolit) ile Atık Sulardan Ağır Metal İyonlarının Uzaklaştırılması, Doktora Tezi, Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Morsy, M.S., Al-Salloum, Y.A., Abbas, H. ve Alsayed, S.H., 2012. Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures, Construction and Building Materials, 35, 900-905.
- Neville, A.M., 2004. Properties of Concrete, Pearson Education Limited Fourth Edition, England.
- Öter, Ö., 2002. Zeolitin Asit-Baz Modifikasyonu ve Modifiye Zeolitin Çevre Koruma Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öz, A., 2006. Yüksek Fırın Cürufu ve Doğal Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo-mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özer, E., 2009. Niğde Yöresi Feslegen Yayla Kaolin Kilinden Metakaolin Üretilirliğinin Arastırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.
- Poon, C.S., Kou, S.C. ve Lam, L., 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, Construction and Building Materials, 20, 858-865.
- Qian, X. ve Li, Z., 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin, Cement and Concrete Research, 31, 1607-1611.
- Ramezaniapour, A.A. ve Jovein, H.B., 2012. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, Construction and Building Materials, 30, 470-479.
- Ranjbar, M.M., Madandoust, R., Mousavi, S.Y. ve Yosefi, S., 2013. Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete, Construction and Building Materials, 47, 806-813.
- Sabet, F.A., Libre, N.A. ve Shekarchi M., 2013. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, Construction and Building Materials, 44, 175-184.

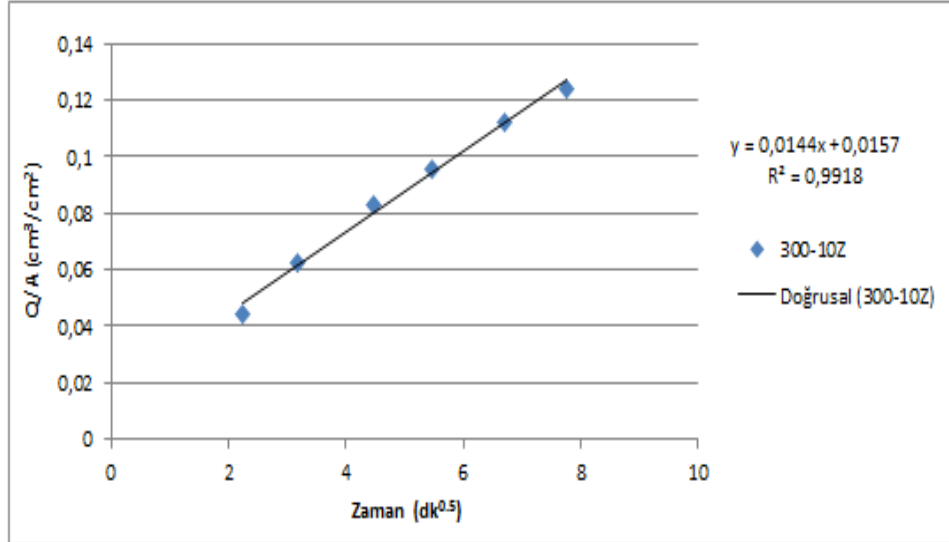
- Sabir B.B., 1998. The effects of curing temperature and water/binder ratio on the strength of metakaolin concrete, Sixth CANMET/ ACI International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and NaturalPozzolansinConcrete Supplementary volume, 493-506, Bangkok, Thailand.
- Sabir, B.B., Wild, S. ve Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, Cement & Concrete Composites, 23, 441-454.
- Sarıkaya, H., 2006. Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Siddique, R.,2008. Waste Materials and by-products in Concrete, Berlin, Almanya.
- Sun, S.H., Ma, J.T., Pang, X.M., Sun, Y.T. and Wang, S.L., 2005. Sulfur reduction additive prepared from acid - modified kaolin, Bulletin of the Catalysis Society of India, 4, 72 – 78.
- Topçu, İ. B., Demir, A. ve Boğa, A. R., 2004. Akışkanlaştırıcı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Taze Beton Özelliklerine Etkisi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 434, 38-40.
- TS EN 934-2, 2002. Kimyasal Katkılar-Beton Harç ve Şerbeti İçin-Bölüm 2: Beton Katkıları, T.S.E., Ankara.
- Vejmelková, E., Konáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Zumár, J., Rovnaníková, P., Keršner, Z., Sedlmajer, M. ve Cerny, R., 2015. Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance, Cement & Concrete Composites, 55, 259-267.
- Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B. ve Uz, V., 2007. Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, Building and Environment, 42, 3808-3815.
- Young, J.F., 1998. A Review of The Pore Structure of Cement Paste and Concrete and Its Influence On Permeability, S.P.108, Permeability of Concrete, ACI.
- URL-1, <http://www.gordeszeolite.com>. 15 Mayıs 2015.
- URL-2, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Zeolit>. 23 Mayıs 2015.
- URL-3, <http://www.mta.gov.tr>. 15 Mayıs 2015.

6. EKLER

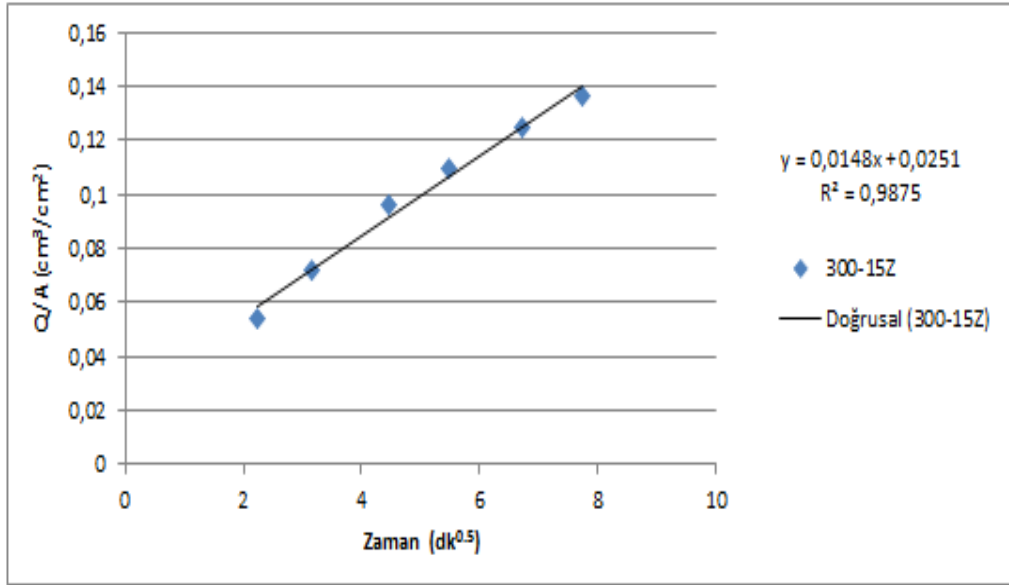
Ek 1. Üretilen betonların kılcalık katsayılarının hesaplanması ((Q/A) – (t^{0.5}) grafikleri)



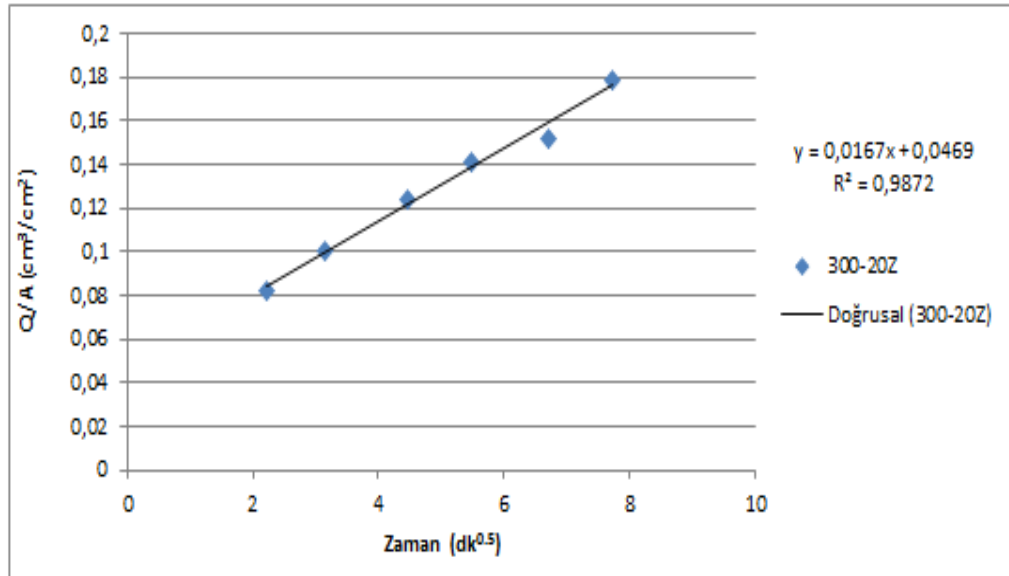
Ek Şekil 1. 300-R kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



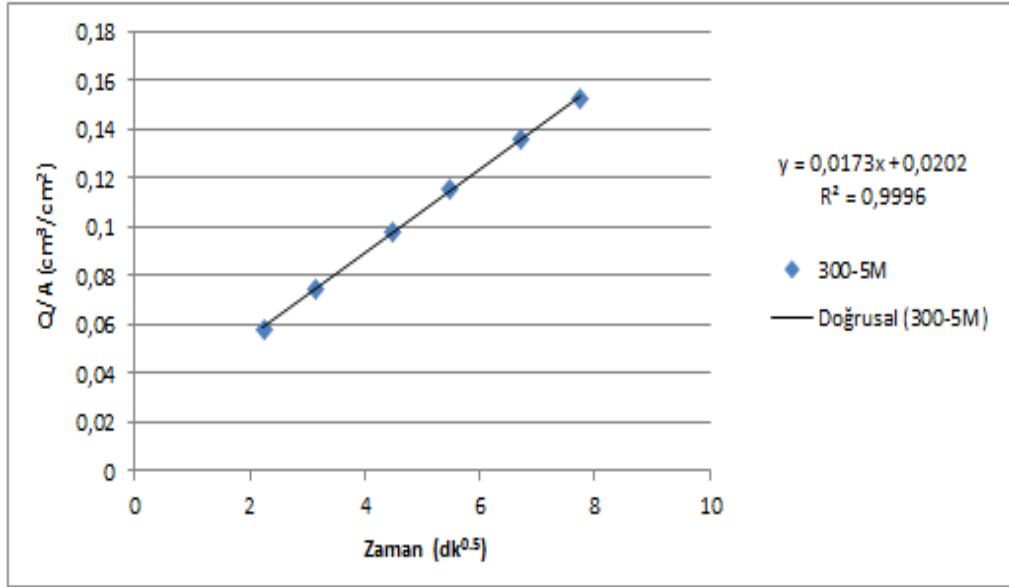
Ek Şekil 2. 300-10Z kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



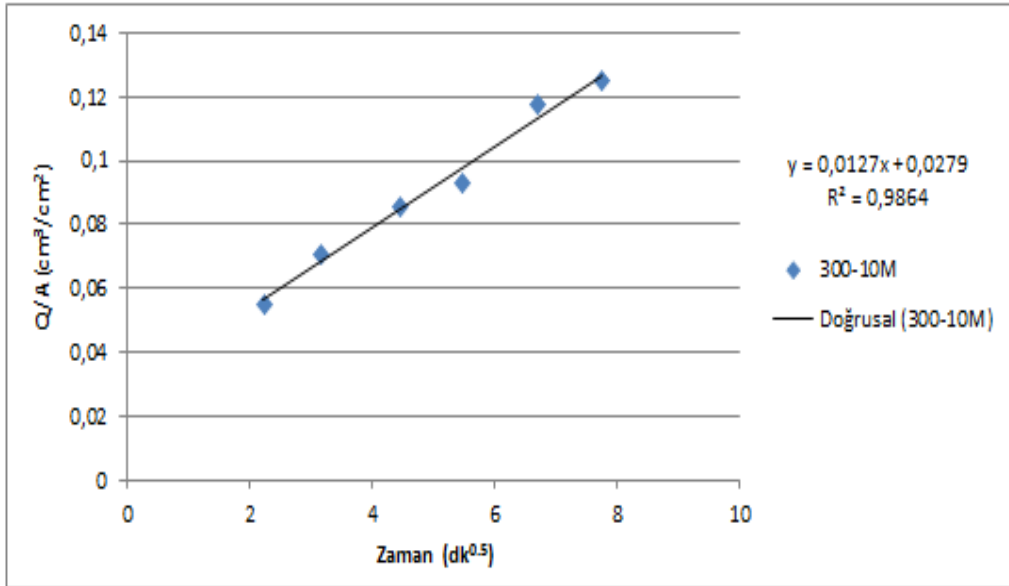
Ek Şekil 3. 300-15Z kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



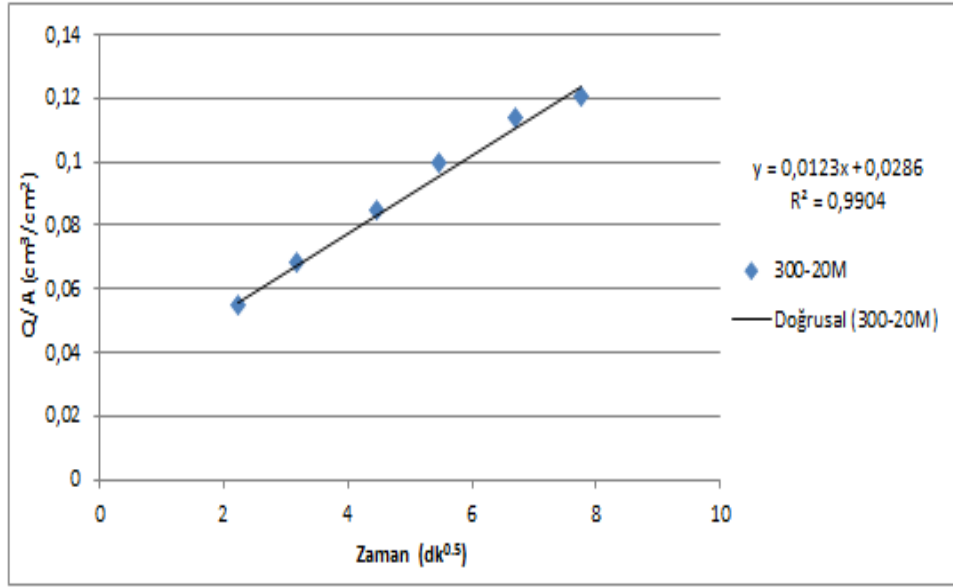
Ek Şekil 4. 300-20Z kodlu betonun (Q/A) – (t^{0.5}) grafiği



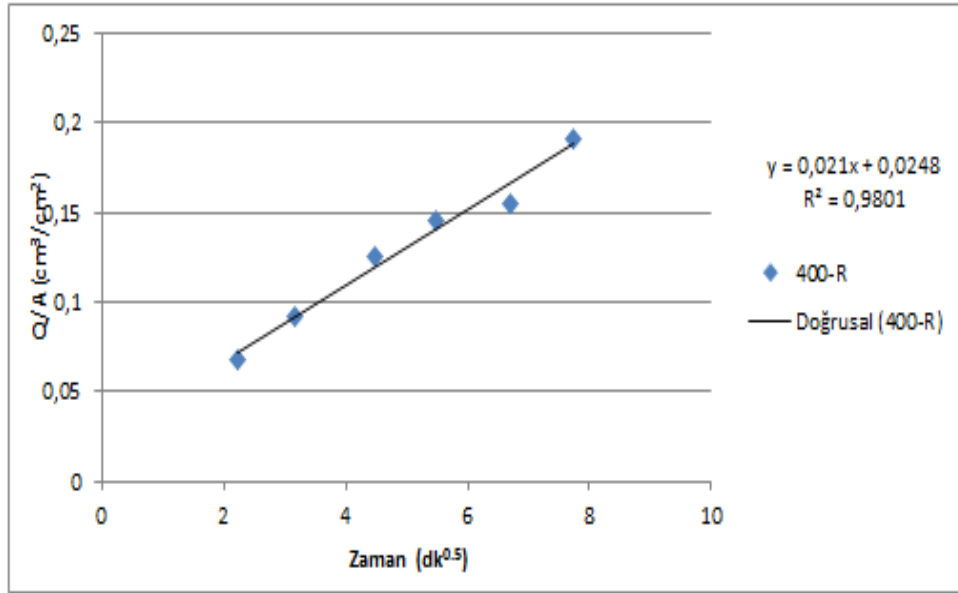
Ek Şekil 5. 300-5M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



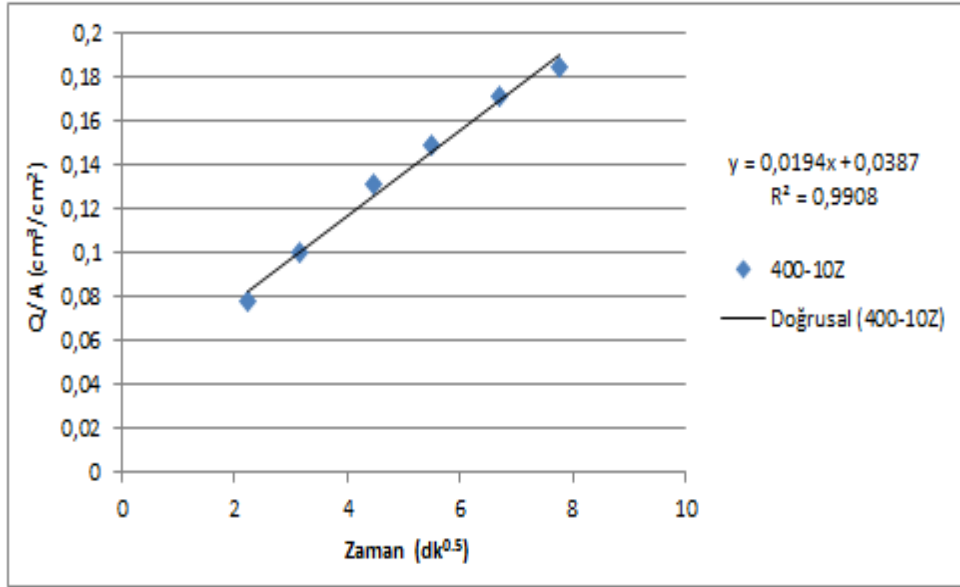
Ek Şekil 6. 300-10M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



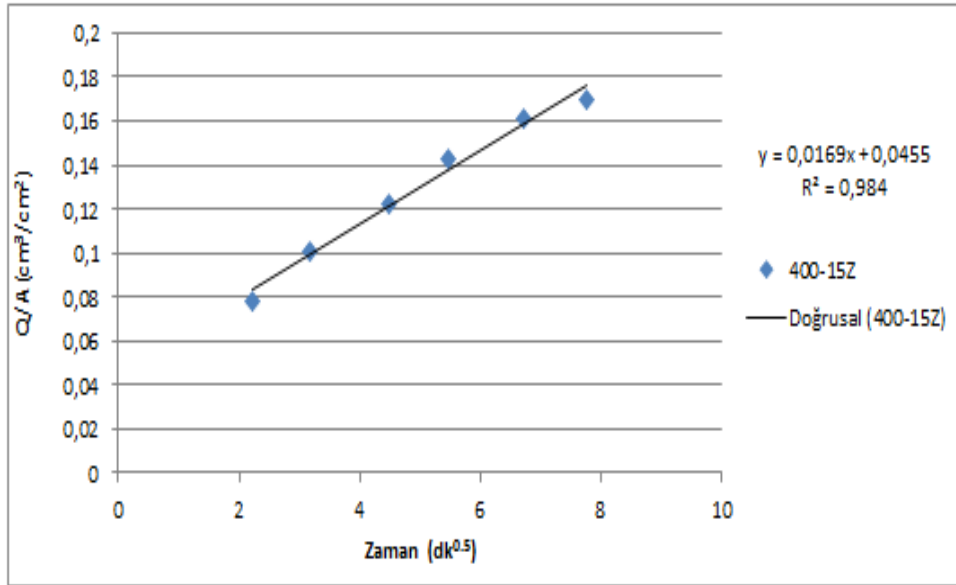
Ek Şekil 7. 300-20M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



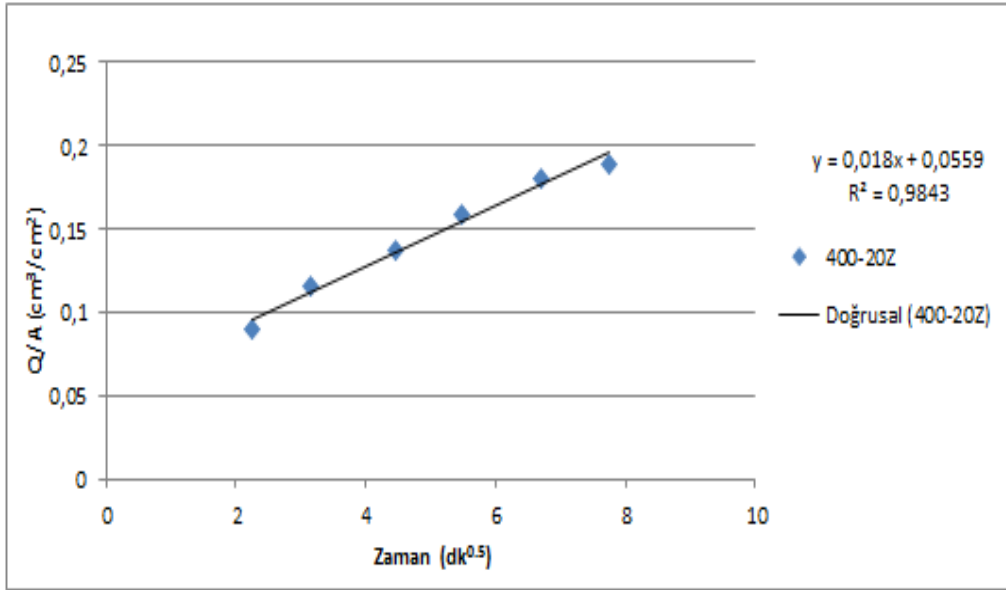
Ek Şekil 8. 400-R kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



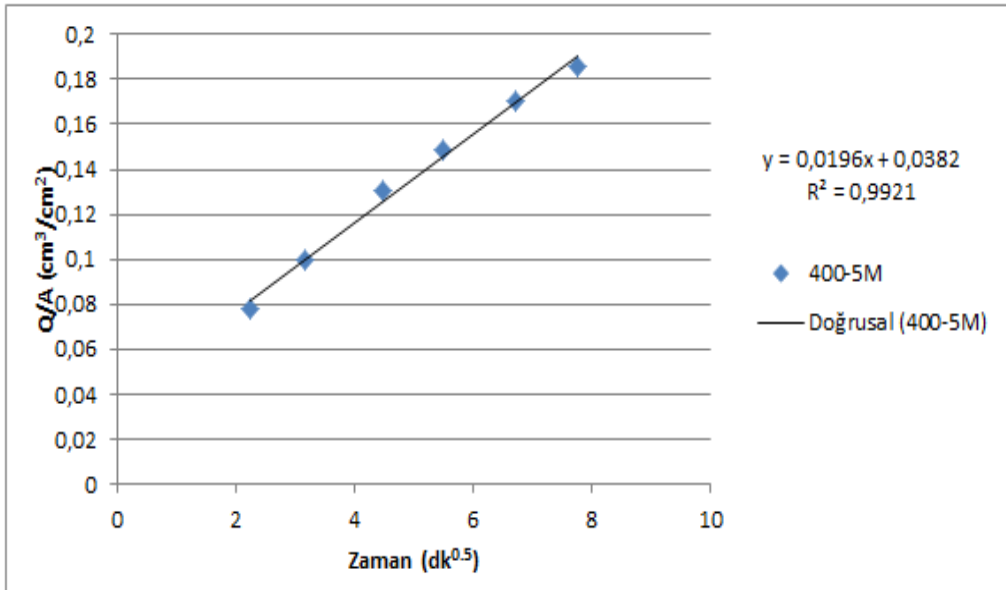
Ek Şekil 9. 400-10Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



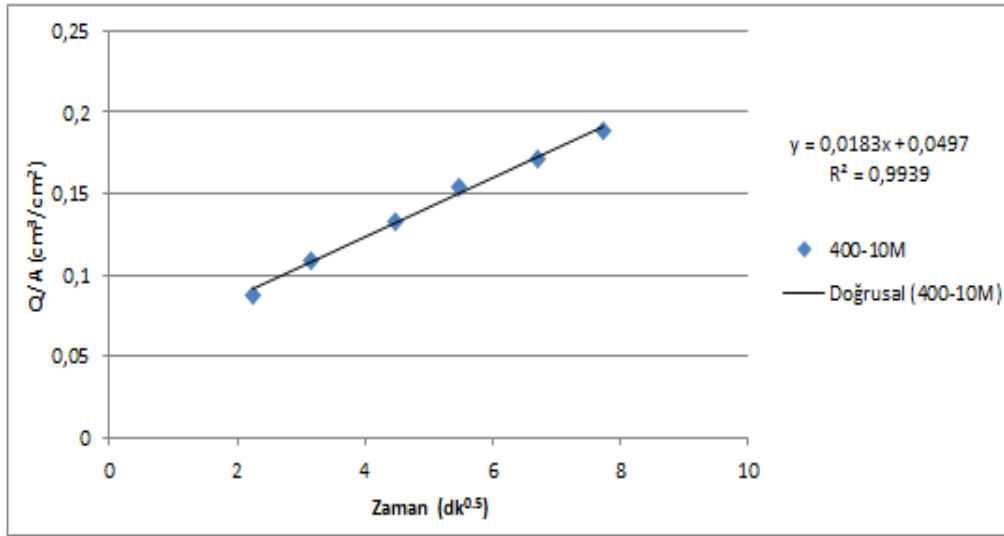
Ek Şekil 10. 400-15Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



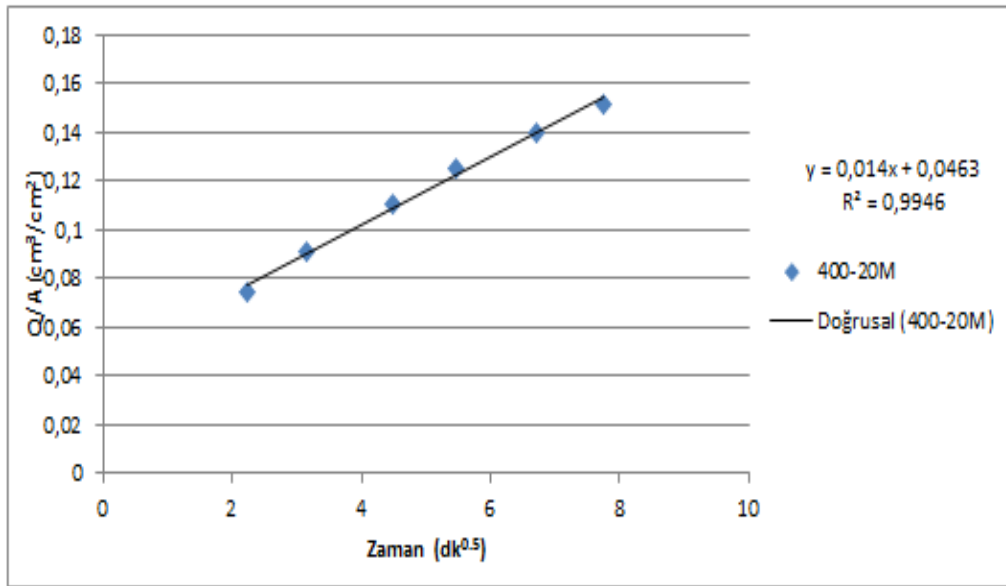
Ek Şekil 11. 400-20Z kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 12. 400-5M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 13. 400-10M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği



Ek Şekil 14. 400-20M kodlu betonun $(Q/A) - (t^{0.5})$ grafiği

Ek 2. Üretilen betonlara ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

Ek Tablo 1. 300-R kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.396
30	0.460
60	0.514
90	0.578
120	0.606
150	0.626
180	0.636
210	0.648
240	0.650
270	0.666
300	0.692
330	0.730
360	0.720

Ek Tablo 2. 300-10Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.168
30	0.220
60	0.226
90	0.248
120	0.272
150	0.288
180	0.294
210	0.312
240	0.316
270	0.326
300	0.316
330	0.306
360	0.307

Ek Tablo 3. 300-15Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.138
30	0.159
60	0.168
90	0.174
120	0.180
150	0.191
180	0.198
210	0.209
240	0.220
270	0.280
300	0.234
330	0.246
360	0.256

Ek Tablo 4. 300-20Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.120
30	0.150
60	0.164
90	0.170
120	0.182
150	0.184
180	0.194
210	0.194
240	0.196
270	0.200
300	0.202
330	0.203
360	0.204

Ek Tablo 5. 300-5M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.162
30	0.172
60	0.180
90	0.196
120	0.220
150	0.220
180	0.240
210	0.240
240	0.244
270	0.254
300	0.280
330	0.254
360	0.270

Ek Tablo 6. 300-10M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.108
30	0.112
60	0.118
90	0.122
120	0.128
150	0.132
180	0.138
210	0.147
240	0.156
270	0.157
300	0.166
330	0.172
360	0.175

Ek Tablo 7. 300-20M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimliliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.024
30	0.028
60	0.028
90	0.030
120	0.031
150	0.032
180	0.034
210	0.034
240	0.038
270	0.040
300	0.040
330	0.040
360	0.042

Ek Tablo 8. 400-R kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.180
30	0.195
60	0.220
90	0.243
120	0.264
150	0.280
180	0.295
210	0.310
240	0.335
270	0.340
300	0.344
330	0.352
360	0.360

Ek Tablo 9. 400-10Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.200
30	0.246
60	0.265
90	0.298
120	0.322
150	0.346
180	0.372
210	0.392
240	0.364
270	0.358
300	0.350
330	0.342
360	0.354

Ek Tablo 10. 400-15Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirirnililiği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.162
30	0.172
60	0.196
90	0.194
120	0.212
150	0.225
180	0.238
210	0.242
240	0.244
270	0.254
300	0.256
330	0.262
360	0.268

Ek Tablo 11. 400-20Z kodlu betona ait hızlı klorür geçirirnililiği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.136
30	0.156
60	0.172
90	0.192
120	0.212
150	0.240
180	0.238
210	0.220
240	0.222
270	0.235
300	0.232
330	0.234
360	0,236

Ek Tablo 12. 400-5M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.168
30	0.186
60	0.232
90	0.252
120	0.260
150	0.265
180	0.272
210	0.280
240	0.290
270	0.290
300	0.300
330	0.301
360	0.302

Ek Tablo 13. 400-10M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.116
30	0.122
60	0.128
90	0.128
120	0.136
150	0.141
180	0.150
210	0.148
240	0.156
270	0.162
300	0.160
330	0.170
360	0.179

Ek Tablo 14. 400-20M kodlu betona ait hızlı klorür geçirimsizliği akım okumaları

t (dk)	Geçen Akım (A)
0	0.025
30	0.032
60	0.036
90	0.038
120	0.038
150	0.038
180	0.038
210	0.038
240	0.038
270	0.039
300	0.040
330	0.041
360	0.041

ÖZGEÇMİŞ

Memduh NAS, 21.02.1989'da Trabzon'da doğdu. İlköğretimi Dumlupınar İlköğretim okulunda, ortaöğretimi Trabzon Kanuni Anadolu Lisesinde tamamladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesini İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Bir süre özel sektörde çalıştıktan sonra 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevliliğine başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.