

T.C.
İSTANBUL NİŞANTAŞI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ (TEZLİ) YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

FARKLI TİP AGREGALAR İLE ÜRETİLEN ULTRA YÜKSEK
PERFORMANSLI BETONLARIN (UHPC) MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Şenol KEMALOĞULLARI

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TİP AGREGALAR İLE ÜRETİLEN ULTRA YÜKSEK
PERFORMANSLI BETONLARIN (UHPC) MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Şenol KEMALOĞULLARI

T.C.
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği (Tezli) Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

ORCID ID: 0009-0004-7427-6752

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN

İstanbul
Temmuz 2024

KABUL VE ONAY

Şenol KEMALOĞULLARI tarafından hazırlanan “Farklı Tip Agregalar ile Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UHPC) Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, 23 Temmuz 2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesi: **Dr. Öğr. Üyesi Ferruh MAHNAMFAR** _____
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Dr. Öğr. Üyesi Metin MEHMETOĞLU** _____
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN** _____
İstanbul Nişantaşı Üniversitesi

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Enstitü Yönetim Kurulu;

Karar Tarihi :

Karar Numarası :

Dr. Öğr. Üyesi Şerafettin SEVGİLİ
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını tezimin/projemin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

23 Temmuz 2024

**Şenol
KEMALOĞULLARI**



SAVUNMA ÖNCESİ ONAYLAR

BENZERLİK ONAYI

Başlık	Farklı Tip Agregalar ile Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UHPC) Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması	
Savunma Tarihi	23 Temmuz 2024	
Sayfa Sayısı	114	
Benzerlik Yüzdesi (%)	16	
Benzerlik Yüzdesi (%) (Kaynakça Hariç)	14	
Taranan Program	Turnitin	
Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, özet, ana bölümler ve sonuç kısımlarından oluşan çalışmam için şahsım ve tez danışmanım/Enstitü Sorumlusu tarafından intihal tespit programında taraması yapılmıştır. Tez Danışmanımın gözetiminde tamamladığım çalışmamın azami benzerlik oranlarına göre intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.		
Öğrenci	Danışman	Enstitü Sorumlusu
Şenol KEMALOĞULLARI	Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN	

TEZDEN ÇIKARILAN YAYIN		
Yayın Künyesi	Kemaloğulları, Ş. (2024). Farklı Tip Agregalar ile Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UHPC) Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Nişantaşı Üniversitesi II. Disiplinlerarası Seminerleri. İstanbul, Türkiye.	
Yayın Türü	☐ Ulusal Hakemli Dergide Makale ☐ Uluslararası Hakemli Dergide Makale ☒ Ulusal Kongre/Sempozyumda Bildiri ☐ Uluslararası Kongre Sempozyumda Bildiri	
	Enstitü Sekreteri	

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimde bana bilgi ve birikimleriyle yol gösteren Sayın Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Furkan ŞAHİN'e, deneylerin yapımı için gerekli imkanları sağlayan HYH Metro KG/KK Müdürü Sayın Engin SÜRÜCÜ'ye, laboratuvar olanakları konusunda yardımlarını esirgemeyen İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Sayın Prof. Dr. Hasan YILDIRIM hocama, bilgi ve birikimleriyle bana destek olan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi'nden Sayın Prof. Dr. Atiye TUĞRUL ve Ar. Gör. Dr. Erdi AVCI hocalarıma, deneylerde desteğini esirgemeyen iş arkadaşlarım Kenan ERDEM ve Yasir ATAMAN'a, İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Ar. Gör. Sayın Sidar Nihat BIÇAKÇI hocama, başarılı çalışmalarımda benimle gurur duyan ve her daim destek olan kıymetli aileme, ayrıca varlığıyla bana güç veren sevgili kızım ve eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Şenol KEMALOĞULLARI

Temmuz, 2024



ÖZET

Şenol KEMALOĞULLARI

Farklı Tip Agregalar ile Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Betonların (UHPC)

Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması

Yüksek Lisans Tezi

İstanbul, 2024

Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UHPC), son 20 yıl içerisinde, alt yapı ve üst yapı bileşenlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli gelişmeler sağlamıştır. Köprüler, bina bileşenleri, yüksek katlı yapılar, endüstri ve açık deniz yapıları gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. UHPC karışımlarında agrega olarak genelde silis kumu kullanılmaktadır. Bu çalışmamızda silis kumu yerine alternatif olarak doğal kum, granit, dolomit, kumtaşı ve bazalt olmak üzere 5 farklı tip ince agreganın ultra yüksek performanslı betonlarda kullanılması araştırılmıştır. Bu çalışmada her bir agrega tipi için harç numuneleri üretilmiştir.

Üretimlerde su/toplam bağlayıcı oranı 0,18’de sabit tutulup %34,5 CEM I 42,5 R tipi çimento, %8,5 yoğunlaştırılmış mikro silika, %3 kimyasal katkı ve %49 tek tip ince agrega kullanılmıştır. Her bir üretimde 6 set 50 mm küp ve 6 set 40x40x160 mm prizma numuneler alınmıştır. Numunelerden 4 seti 20±2°C su havuzlarında muhafaza edilmiştir. Ayrıca durabilite davranışlarını belirlemek için 1 set asit ve 1 set baz ortamında 90 gün bekletilmiştir.

Taze harç deneyleri olarak mini çökme-yayılma deneyi ve sıcaklık ölçümü, sertleşmiş numunelerde ise 7, 28, 56 ve 90. günlerin sonunda, yoğunluk, porozite, UPV testi, basınç ve eğilme dayanımı gerçekleştirilmiştir. Mikro analiz için SEM ve XRD deneyleri yapılmıştır.

Taze harç deneylerinde en iyi işlenebilirliği granit ile üretilen numuneler verirken en düşük işlenebilirliği kumtaşı ile üretilen numuneleri vermiştir. Numunelerin sıcaklık değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Sertleşmiş harç deneylerinde en iyi sonuçları dolomit ile üretilen numunelerden elde edilirken en düşük sonuçlar kumtaşıyla üretilen numuneler vermiştir. Asidik ortamın bazik ortama göre numunelere daha fazla zarar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

UHPC, agrega, durabilite, mukavemet

ABSTRACT

Şenol KEMALOĞULLARI

Investigation of Mechanical and Durability Properties of Ultra High Performance
Concretes (UHPC) Produced with Different Types of Aggregates

Master's Thesis

Istanbul, 2024

Ultra High Performance Concretes (UHPC) have provided significant improvements in the sustainability of infrastructure and superstructure components in the last 20 years. Its use is becoming widespread in many areas such as bridges, building components, high-rise, industrial and offshore structures. Silica sand is generally used as aggregate in UHPC mixtures. In this study, the use of 5 different types of fine aggregates, natural sand, granite, dolomite, sandstone and basalt, in ultra-high performance concretes was investigated as an alternative to silica sand. In this study, mortar samples were produced for each aggregate type.

In production, the water/total binder ratio was kept constant at 0.18 and 34.5% CEM I 42.5 R type cement, 8.5% condensed microsilica, 3% chemical additives and 49% single type fine aggregate were used. In each production, 6 sets of 50 mm cube and 6 sets of 40x40x160 mm prism samples were taken. 4 sets of samples were stored in water pools at 20±2°C. Additionally, it was kept in 1 set of acid and 1 set of basic environments for 90 days to determine its durability behavior.

As fresh mortar tests mini slump-flow test and temperature measurement were performed and in hardened samples density, porosity, UPV test, pressure and bending strength were performed at the end of 7, 28, 56 and 90 days. SEM and XRD experiments have been conducted for micro analysis.

In fresh mortar tests, the samples produced with granite gave the best workability, while the samples produced with sandstone gave the lowest workability. The temperature values of the samples gave similar results. In hardened mortar tests, the best results were obtained from samples produced with dolomite, while the lowest results were obtained from samples produced with sandstone. It has been observed that acidic environment causes more damage to samples than basic environment.

Keywords

UHPC, aggregate , durability , strength

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
ETİK BEYAN	ii
SAVUNMA ÖNCESİ ONAYLAR	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER DİZİNİ.....	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
GİRİŞ	1
BİRİNCİ BÖLÜM: GENEL TANIMLAR	4
1.1. Beton	4
1.2. Beton Çeşitleri	4
1.2.1. Basınç Dayanımına Göre Betonlar	4
1.2.2. Yoğunluklarına Göre Betonlar	6
1.2.3. Özel Betonlar	7
1.3. Ultra Yüksek Performanslı Beton	14
1.4. Çimentolar	17
1.5. Agregalar	20
1.5.1. Agregaların Özellikleri	20
1.5.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	20
1.5.3. Agregaların Mekanik Özellikleri	23
1.6. Beton Agregaların Sınıflandırılması	23
1.6.1. Elde Ediliş Şekline Göre Agregalar.....	24
1.6.2. Yoğunluklarına Göre Agregalar	25
1.6.3. Tane Boyutlarına Göre Agregalar	25
1.6.4. Tane Şekline Göre Agregalar	27
1.6.5. Yüzey Dokularına Göre Agregalar	27
1.6.6. Jeolojik Orijinlerine Göre Agregalar	27
1.6.7. Mineralojik Yapısına Göre Agregalar	27

1.7. Agrega Türünün Beton Özelliklerine Etkisi ile İlgili Çalışmalar.....	27
1.8. Mineral Katkılar	28
1.8.1. Puzolanik Malzemeler	29
1.8.2. Doğal Puzolanlar	30
1.8.3. Uçucu Küller.....	32
1.8.4. Silis Dumanı	35
1.8.5. Öğütülmüş Granülü Yüksek Fırın Cürufu	37
1.9. Kimyasal Katkılar.....	39
1.9.1. Piriz Hızlandıran veya Geciktiren Katkılar	40
1.9.2. Antifiriz, Piriz Hızlandırıcı, Su Azaltıcı, Akışkanlaştırıcı Özellik Gösteren Katkılar	41
1.9.3. Hava Sürükleyici Katkılar	41
1.9.4. Su Azaltıcı ve Akışkanlaştırıcı Katkılar	42
1.9.5. Betonda Su Geçirimsizlik Katkısı	42
1.9.6. Betondaki Donatının Korozyon Hızını Yavaşlatan Katkılar	43
1.9.7. Hafif Beton Elemanları İçin Köpük Yapıcı Katkılar	43
1.9.8. Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Hiper Akışkanlaştırıcı Katkılar.....	44
1.9.9. Yüksek Oranda Su Azaltıcı Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkıları	44
İKİNCİ BÖLÜM: MATERYAL VE METOD	45
2.1. Materyal.....	45
2.1.1. Çimento.....	45
2.1.2. Mikrosilika.....	48
2.1.3. Agregalar	48
2.1.4. Kimyasal Katkılar	51
2.1.5. Karışım Suyu	52
2.2. Karışım Tasarımı	52
2.3. Karışımların Kalıplanması	54
2.4. Numunelerin Kür İşlemleri	54
2.5. Deney Yöntemleri	56
2.6. Taze Harç Deneyleri.....	56
2.6.1. Sıcaklık ölçümü	56
2.6.2. Mini Çökme-Yayıma Deneyi	56
2.7. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	57
2.7.1. Yoğunluk, Su Emme ve Porozite Tayini	57

2.7.2. Ultrases Geçiş Hız Deneyi.....	59
2.7.3. Basınç Deneyi.....	60
2.7.4. Eğilme Deneyi	60
2.7.5. SEM Analizi	62
2.7.6. XRD Analizi	62
2.7.7. Durabilite Deneyi.....	62
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	66
3.1. Taze Harç Deney Sonuçları.....	66
3.1.1. Mini Çökme-Yayıma Deney Sonuçları	66
3.1.2. Sıcaklık Ölçüm Sonuçları	67
3.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları.....	68
3.2.1. Yoğunluk Tayini, Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları	68
3.2.2. Basınç Deney Sonuçları.....	70
3.2.3. Eğilme Deney Sonuçları	71
3.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları	72
3.2.5. Ultrases ve Basınç Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi.....	74
3.2.6. Ultrases ve Yoğunluk Değerlerinin İlişkilendirilmesi.....	75
3.2.7. Basınç ve Eğilme Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi	76
3.3. Durabilite Deney Sonuçları	77
3.3.1. Basınç Deney Sonuçları.....	77
3.3.2. Eğilme Deney Sonuçları	78
3.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları	79
3.3.4. Basınç ve Eğilme Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi	80
3.3.5. SEM Analiz Sonuçları	82
3.3.6. XRD Analiz Sonuçları.....	84
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM: SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKÇA.....	94

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı Cins Liflere Ait Fiziksel Özellikler	9
Tablo 2. Bazı Doğal Puzolanlardaki Oksitlerin Miktarı (%)	31
Tablo 3. Doğal Puzolanların Beton Üzerindeki Etkisi	32
Tablo 4. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri	34
Tablo 5. Silis Dumanının Beton Üzerindeki Etkileri	37
Tablo 6. Yüksek Fırın Cürufu Beton Üzerindeki Etkileri	39
Tablo 7. Piriz Hızlandırıcı ve Piriz Geciktirici Katkıların Kullanım Alanları	40
Tablo 8. Antifiriz, Piriz Hızlandırıcı, Su Azaltıcı, Akışkanlaştırıcı Özellik Gösteren Katkılar Kullanım Alanları	41
Tablo 9. Hava Sürükleyici Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları	42
Tablo 10. Su Geçirimsiz Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları	42
Tablo 11. Korozyon Hızını Yavaşlatan Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları	43
Tablo 12. Köpük Yapıcı Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları	43
Tablo 13. Hiper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkıların Kullanım alanları	44
Tablo 14. CEM I 42.5 Çimentonun Mekanik Özellikleri	46
Tablo 15. CEM I 42.5 Çimentonun Fiziksel Özellikleri	46
Tablo 16. CEM I 42.5 Çimentonun Kimyasal Özellikleri	47
Tablo 17. Agregaların Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri	49
Tablo 18. Agregaların Elek Analizi Sonuçları	50
Tablo 19. Tasarım Kodları ve Malzeme Miktarları	53
Tablo 20. Taze Harç Grupların Yayılma Değerleri	66
Tablo 21. Taze Harç Sıcaklık Değerleri	67
Tablo 22. Yoğunluk, Su Emme ve Porozite Sonuçları	68
Tablo 23. Basınç Mukavemet Sonuçları	70
Tablo 24. Eğilme Mukavemet Sonuçları	71
Tablo 25. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları	73
Tablo 26. Basınç ve Ultrases Geçiş Hız Değerleri	74
Tablo 27. Harç Etüv Kurusu Yoğunluk ve Ultrases Geçiş Hızı Değerleri	75
Tablo 28 Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri	76
Tablo 29. Referans, HCI ve NaCIO Ortam Numunelerinin Mukavemet Değerleri	77
Tablo 30. Referans, HCI Asit ve NaCIO Baz Ortam Numunelerinin Eğilme Mukavemetleri	78

Tablo 31. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin UPV Sonuçları	79
Tablo 32. Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri.....	80
Tablo 33. Basınç ve Eğilme Mukavemet Sonuçları.....	81



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Normal ve Ağır Beton İçin Basınç Dayanım Sınıfı	5
Şekil 2. Hafif Betonlar İçin Basınç Dayanımı Sınıfları	5
Şekil 3. Hafif Beton Birim Hacim Kütle Sınıfları.....	7
Şekil 4. Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Sınıflandırma.....	8
Şekil 5. Çelik Lif Tipleri ve Şekiller.....	10
Şekil 6. Çelik Lif En Kesitleri.....	10
Şekil 7. Bazı Çelik Liflerin Geometrik Ölçülendirmeleri.....	11
Şekil 8. Ferrocement Uygulamasından Fotoğraf	12
Şekil 9. Geçirimli Beton.....	13
Şekil 10. Genel UHPC Bileşenleri	15
Şekil 11. Su/Bağlayıcı Oranına Göre Basınç Dayanımları	16
Şekil 12. Lifsiz UHPC Bileşenleri	17
Şekil 13. Çimento Çeşitleri	19
Şekil 14. Çimentonun Mekanik Dayanımları ve Fiziksel Özellikleri	19
Şekil 15. Agrega Su İlişkisi.....	21
Şekil 16. En Yüksek Donma-Çözülme Direnç Değerlerine Göre Sınıflama	22
Şekil 17. MgSO ₄ Dayanıklılığı Değerlerine Göre Sınıflandırılması	22
Şekil 18. Agrega Tane Sınıfı Belirlenmesinde Kullanılan Elek Göz Açıkları.....	26
Şekil 19. ASTM Göre Uçucu Kül Sınıfları	33
Şekil 20. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları.....	34
Şekil 21. Silis Dumanlarının Kimyasal Kompozisyonları	36
Şekil 22. Yüksek Fırın Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonları.....	38
Şekil 23. MasterRoc® MS 610 Yoğunlaştırılmış Mikrosilikanın Teknik Özellikleri	48
Şekil 24. Agregaların Genel Görünümü	49
Şekil 25. Agregaların Gradasyon Eğrisi	51
Şekil 26. MasterGlenium ACE 450 Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri.....	51
Şekil 27. Harç Üretim Çalışmaları	54
Şekil 28. Kalıplanmış Numune Örnekleri.....	55
Şekil 29. Numunelerin Su, HCl Asit ve NaClO Baz Kaplarına Alınması.....	55
Şekil 30. Sıcaklık Ölçümü	56
Şekil 31. Mini Yayılma Deneyi	57
Şekil 32. Arşimet Terazisi ve Hava Dolaşım Etüv	58

Şekil 33. UPV Test Düzenegi	59
Şekil 34. Numunelerde UPV Ölçümü	59
Şekil 35. Basınç Dayanımı	60
Şekil 36. Eğilme Deney Düzenegi	61
Şekil 37. Eğilme Deneyi	61
Şekil 38. (a) Su, (b) HCl Asit ve (c) NaClO Baz, Ortamlarına Maruz Bırakılan Küp Numuneler	63
Şekil 39. (a) Su, (b) NaClO Baz ve (c) HCl Asit Ortamlarına Maruz Bırakılan Prizma Numuneler	63
Şekil 40. pH Ölçümü ve Numunelerin Seyreltilmiş HCl Asit içine Alınması	64
Şekil 41. pH Ölçümü ve Numunelerin Seyreltilmiş NaClO Baz İçine Alınması	65
Şekil 42. Taze Harç Grupların Yayılma Değerlerinin Karşılaştırılması	66
Şekil 43. Taze Harç Numunelerin Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması	67
Şekil 44. Harç Grupların Yoğunluk Değerlerinin Karşılaştırılması	68
Şekil 45. Su Emme ve Porozite Değerlerinin Karşılaştırılması	69
Şekil 46. Basınç Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırılması	71
Şekil 47. Eğilme Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırılması	72
Şekil 48. Ultrases Geçiş Hız Değerlerin Karşılaştırılması	73
Şekil 49. Ultrases Geçiş Hız ve Basınç Dayanım Sonuçlarının İlişkilendirilmesi	74
Şekil 50. Ultrases Geçiş Hızı ve Yoğunluk İlişkisi	75
Şekil 51. Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerlerinin İlişkilendirilmesi	76
Şekil 52. Referans, NaClO Baz ve HCl Asit Ortam Numunelerin Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırması	78
Şekil 53. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırması	79
Şekil 54. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin UPV Sonuçlarının Karşılaştırması	80
Şekil 55. HCl Asit Ortamına Maruz Bırakılan Numunelerin Basınç ve Eğilme Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi	81
Şekil 56. NaClO Baz Ortamına Maruz Bırakılan Numunelerin Basınç ve Eğilme Mukavemetlerinin İlişkilendirilmesi	82
Şekil 57. DAH Numunelerin Sem Görüntüleri 5000 Kez Büyütülmüş	83
Şekil 58. KAH Numunelerin Sem Görüntüleri 5000 Kez Büyütülmüş	84
Şekil 59. Referans DAH Numunenin XRD Grafiği	85
Şekil 60. NaClO Ortama Maruz Bırakılan DAH Numunenin XRD Grafiği	85
Şekil 61. HCl Ortama Maruz Bırakılan DAH Numunenin XRD Grafiği	86

Şekil 62. Referans KAH Numuneninin XRD Grafiği.....	86
Şekil 63. NaClO Ortama Maruz Bırakılan KAH Numuneninin XRD Grafiği	87
Şekil 64. HCl Ortama Maruz Bırakılan KAH Numuneninin XRD Grafiği.....	87



SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
Al_2	Alüminyum
Al_2O_2	Alüminyum dioksit
Al_2O_3	Alüminyum trioksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyum oksit
Cl	Klor
Fe_2O	Demir oksit
Fe_2O_3	Demir trioksit
$F_{ck, cyl}$	En düşük karakteristik silindir dayanımı (MPa)
$F_{ck, cube}$	En düşük karakteristik küp dayanımı (MPa)
HCl	Hidroklorik asit
MnO	Mangan oksit
$MgSO_4$	Magnezyum sülfat
MgO	Magnezyum oksit
Na_2O	Sodyum oksit
NaClO	Sodyum hipoklorit
SiO_2	Silisyum dioksit
μ	Mikro
W_1	Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g)
W_2	Numunenin su içindeki ağırlığı (g)
W_3	Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g)
σ	Basınç dayanımı (MPa)
σ_f	Eğilme dayanımı (MPa)

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
ASR	Alkali silika reaksiyonu
AAH	Akdağlar doğal kumlu harç
BAH	Bazalt agregalı harç
CRI	Çatlama direnci indeksi
DAH	Dolomit agregalı harç
EDX	Enerji Dağıtıcı X-Işını
FI	Esneklik indeksini
GAH	Granit agregalı harç
GF	Cam elyaf
HPC	High Performance Concrete
KAH	Kumtaşı agregalı harç
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
MPa	Megapascal
RPC	Reaktif pudra betonu
SENB	Tek Kenarlı Çentikli Kirişler
SEM	Scanning electron microscopy
SSB	Silindirle sıkıştırılmış beton
SL	Çelik lif
SP	Süperakışkanlaştırıcılar
UHPC	Ultra High Performance Concrete
UPV	Ultrases geçiş hızı
XAR	X-ray powder diffraction

GİRİŞ

Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UHPC), son 20 yıl içerisinde, alt yapı ve üst yapı bileşenlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli gelişmeler sağlamıştır. Köprüler, bina bileşenleri, yüksek katlı yapılar, endüstri yapılar ve açık deniz yapılar gibi birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ayrıca UHPC betonunun, mimari alanda dış cephelerde dekoratif amaçlı kullanılması, popülerliğini artırmıştır. UHPC’lerde dolgu malzemesi olarak genelde standart silis kumu (kuvars kumu) kullanılmaktadır. Farklı tip agregaların geleneksel betonlarda kullanılması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, UHPC’de kullanılması ile alakalı çalışmalar sınırlıdır. Literatürde çok sayıda kuvars dolgulu UHPC çalışmaları bulunmaktadır. Ancak doğada bol miktarda bulunan granit, dolomit, kumtaşı, doğal kum ve bazalt gibi agregalar ile üretilen UHPC çalışmaları oldukça azdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında; granit, dolomit, kumtaşı, doğal kum ve bazalt gibi ince agregaların aynı şartlar altında UHPC’lerde kullanılabilirliği araştırılarak, mekaniksel özellikleri ile durabilite özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

UHPC; yüksek dayanım, durabilite ve süneklik özellikleriyle önem kazanan yeni nesil bir beton türüdür. Geleneksel betondan farklı olarak içeriğinde yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar, ince agrega, silis dumanı ve çelik lifler barındırmaktadır. Geleneksel beton ile arasındaki en önemli fark ise, sünek davranış göstermesidir. Bu özelliği sayesinde, normal betonlara göre, çok yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Beton karışımında maksimum doluluk oranına ulaşmak ve tane optimizasyonunu sağlamak amacıyla silis kumu ve silis pudrası içermektedir. Süper akışkanlaştırıcılar sayesinde betonun işlenebilmesi için gerekli su miktarı en aza indirilerek, oluşabilecek boşluklar minimuma düşürülmektedir. Liflerin ilavesi ise süneklik için gereklidir. Ayrıca ısıtma işlemi uygulanarak silis dumanı aktive edilir.

Literatürde UHPC ile ilgili yapılan çalışmalar; Richard ve Cheyrezy (1995) tarafından ultra yüksek performanslı türü olan reaktif pudra betonlarla (RPC) ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda saha koşullarında basınç dayanımları 600 MPa’ dan 810 MPa’ a ulaşabilecek betonların elde edilebileceği gösterilmiştir. Bonneau ve arkadaşları (1997) çelik lifli ve lifsiz olmak üzere reaktif pudra betonunu (RPC) üreterek numuneler almışlardır. Her iki durumda da numunelerin 200 MPa basınç dayanımına ulaşabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca numuneleri donma-çözünme etkilerine maruz bırakmışlardır,

betonda bir azalma olmadığını, mükemmel dayanıma sahip olduğu tespit etmişlerdir. Cheyrey ve arkadaşları (1995) düşük su/çimento ve yüksek silis dumanı ile reaktif pudra betonunu üreterek mükemmel mekanik özellikler ve dayanım elde etmek için granülometri ve ısıtma işlemi optimize ederek mikroskobik yapının daha iyi olduğunu, civalı porozimetre deneyi uygulayarak porozitenin %9'u geçmediğini gözlemlemişlerdir. Dehghanpour ve arkadaşları (2022) 18 aylık %0,7 V, %1,3 V ve %2,0 V PVA elyaf, cam elyaf (GF) ve çelik lif (SL) takviyeli ultra yüksek performanslı betonlar üzerinde kırılma enerjisi, tahribatsız muayene, bazı fiziksel ve mekanik testler ile mikroyapısal incelemeler yapmışlardır. UHPC'lerin kırılma enerjisini, absorbe edilen enerjiyi, bükülme mukavemetini, çatlama direnci indeksini (CRI) ve esneklik indeksini (FI) araştırmak için Tek Kenarlı Çentikli Kirişler (SENB) üzerinde kırılma testleri gerçekleştirmişlerdir. UHPC'lerin dinamik elastisite modülü ve sönüm oranlarını, SENB numuneleri üzerinde ASTM C215 standardına göre rezonans frekans testleri yaparak hesaplamışlardır. Ayrıca silindirik numunelere basınç dayanımı, statik elastisite modülü, elektriksel direnç, ultrasonik darbe hızı (UPV), Leeb sertliği, Schmidt çekici ve yoğunluk testleri de uygulanmıştır. UHPC matrisi ile farklı fiberler arasındaki etkileşimi incelemek için Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ve Enerji Dağıtıcı X-Işını (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımlar arasında, SF'lerin UHPC'lerin tüm mekanik özellikleri üzerinde son derece olumlu bir etkisi gözlemlenmiştir. Dinamik test sonuçları, fiber oranındaki artışın fiber tipine bakılmaksızın UHPC'lerin sönüm oranını artırdığını göstermiştir. UPV ve elektriksel direnç sonuçları, UHPC'lerin iç yapısına ilişkin umut verici sonuçlar sunmuştur. Sanjuán ve Antrede (2021) UHPC çeşidi olan RPC ile ilgili literatür çalışmaları gözden geçirerek RPC ile HPC arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Yaya köprüleri ve yapısal onarım uygulamalarından bazı örnekler vererek; hava geçirgenliği, gözeneklilik, su emme, karbonatlaşma hızı, korozyon hızı ve direnç üzerine yapılan deneysel ölçümleri baz alarak RPC'nin HPC'ye göre daha iyi performans gösterdiğinin kanıtına varmıştır. Erten ve arkadaşları (2017) farklı ortamda lifli ve liffsiz iki tip UHPC üreterek erken yaşta (24 saat) bükülme oranını inceleyerek numunelerde oluşan çatlaklarda çelik donatının korozyonun meydana geldiği deneysel yöntemlerle tespit etmişlerdir. Su çimento oranının düşürülmesiyle, numunelerde yüzey çatlakların oluşmasına rağmen çelik donatıların korozyonda etkilenmediği sonucuna ulaşmışlardır.

UHPC’ların geçirimsiz yapısı sayesinde üstün durabilite sağladığı yünde olumlu sonuç almışlardır.



BİRİNCİ BÖLÜM: GENEL TANIMLAR

1.1. Beton

Beton literatürlerde en sık kullanılan tanımı ile; su, çimento, agrega ve ihtiyaca göre bazı katkıları kullanılarak, belli kurallara diziliminde dizayn edilen, kalıplara boşluksuz ve kademeli olarak yerleştirilebilen, şekillendirilebilen ve zamanla çimentonun hidrasyon ısıyla pürüz alıp taşlaşan kompozit bir malzemedir.

1.2. Beton Çeşitleri

Betonlar; basınç dayanımlarına, yoğunluklarına göre ve özel betonlar olmak üzere üç farklı biçimde sınıflandırılmaktadır. Beton çeşitleri farklı başlıklar altında aşağıda anlatılmıştır.

1.2.1. Basınç Dayanıma Göre Betonlar

Sertleşmiş beton dayanımı, betonun yaş alıp 28. günde basınç tayiniyle belirlenir. Basınç tayini; 150x300mm silindir ve 150x150x150mm küp numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Basınç dayanımına göre betonlar: C8/10'dan C20/25'e kadar dayanım veren betonlar düşük, C20/25'den C55/60'a kadar dayanım veren betonlar normal ve C55/60'tan sonrası dayanım veren betonlar ise yüksek mukavemetli betonlar olarak adlandırılır (TS EN 206:2013+A1, 2017).

Karakteristik basınç dayanımı, 150x300mm silindir ve 150x150x150mm küp numuneler kullanılarak 28. günde basınç testiyle belirlenir. Basınç dayanımı; birim alana uygulanan maksimum yükü ifade eder ve birimi Megapascal (MPa) cinsinden ölçülür. Betonun basınç dayanımı, aşağıda verilen sebepler için belirlenir.

- Beton elemanlar basınca karşı daha çok işlev görmektedir.
- Basınç testi daha kolay ve maliyet açısından uygundur.
- Yapıların tasarım kodları basınç dayanımını esas almaktadır.
- Betonun birçok farklı özelliği hakkında bilgi vermektedir.

Basınç dayanımına göre betonlar; normal beton, ağır beton ve hafif betonlar olarak sınıflandırılmaktadır (Şimşek, 2020). Şekil 1'de normal beton, ağır beton ve Şekil 2'de hafif betonların karakteristik basınç dayanımları gösterilmiştir.

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck,cyl}$ N/mm ²	En düşük karakteristik küp dayanımı $f_{ck,cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Şekil 1. Normal ve Ağır Beton İçin Basınç Dayanım Sınıfı

Kaynak: TS EN 206:2013+A1, 2017

Basınç dayanım sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı $f_{ck,cyl}$ N/mm ²	En düşük karakteristik küp dayanımı ^a $f_{ck,cube}$ N/mm ²
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

^a Bu değerlerle referans silindir dayanımları arasında ilişki kurulması ve bu ilişkinin yazılı hâle getirilmesi durumunda başka değerler de kullanılabilir.

Şekil 2. Hafif Betonlar İçin Basınç Dayanımı Sınıfları

Kaynak: TS EN 206:2013+A1, 2017

1.2.2. Yoğunluklarına Göre Betonlar

Sertleşmiş betonun yoğunluğu, etüvde kurutularak bulunan ve havada ölçülen kuru kütleinin, betonun görünür hacmine oranıdır. Yoğunluklarına göre betonlar normal beton, hafif beton ve ağır beton olmak üzere üç farklı başlık altında tanımlanmaktadır.

1.2.2.1. Normal Betonlar

Etüv kuru birim hacim kütlesi $2,0-2,6 \text{ kg/dm}^3$ olan betonlardır. Betonun yoğunluğu kullanılan agregaların özelliklerine ve granülometrik özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Maliyetinin düşük olması, yüksek dayanım sağlaması ve kolay işlenebilirliği sayesinde tercih edilir. Genellikle bina inşaatlarında kullanılmaktadır (Şimşek, 2020).

1.2.2.2. Hafif Betonlar

Etüv kuru birim hacim kütlesi $0,80-2,00 \text{ kg/dm}^3$ aralığında olan betonlardır. Yapıda hafiflik, ses ve ısı yalıtımı sağlaması yönünden önemli teknik özelliklere sahiptir. Öz ağırlığın az olması sayesinde yapı kesitlerin küçük olması ve daha az donatıya gereksinim sağlanması yönünden avantajlıdır. Hafif betonlar içerdikleri boşluklar sayesinde donma-çözülme etkilerine ve yangına karşı dayanıklıdır. Bu betonlar hafif agregalarla, çeşitli kimyasal köpüklerle, ince agrega kullanmadan iri agregalarla ve kimyasal yöntemlerle gaz oluşturarak üretilirler. Maliyetinin düşük olması nedeniyle genellikle hafif agrega kullanımı tercih edilir. Hafif betonlara örnek olarak bims betonu ve genleştirilmiş kil betonu örnek verilebilir. Hafif betonlar, dayanıklılık ve birim hacim ağırlığına göre üç kategori altına toplamak mümkündür.

- Yalıtımlı betonlar; ısı geçirgenlik katsayısı küçüktür. Etüv kuru birim hacim kütlesi $0,8-1,14 \text{ kg/dm}^3$ aralığında ve basınç dayanımı 10 MPa 'dan düşük olan betonlardır.
- Yarı taşıyıcı hafif betonlar; etüv kuru birim hacim kütlesi $1,14-1,6 \text{ kg/dm}^3$ aralığında ve basınç dayanımı 15 MPa 'a yakın betonlardır.
- Taşıyıcı hafif betonlar; etüv kuru birim hacim kütlesi $1,9 \text{ kg/dm}^3$ düşük ve mukavemet değeri C18 sınıfındaki betonlardır (Şimşek, 2020).

Hafif betonların birim hacim kütle sınıflandırılması Şekil 3'te gösterilmiştir.

Birim hacim kütle sınıfı	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
EN 12390-7'ye uygun olarak belirlenen birim hacim kütle aralığı (kg/m ³)	≥ 800 ve ≤ 1 000	≥ 1 000 ve ≤ 1 200	≥ 1 200 ve ≤ 1 400	≥ 1 400 ve ≤ 1 600	≥ 1 600 ve ≤ 1 800	≥ 1 800 ve ≤ 2 000

Şekil 3. Hafif Beton Birim Hacim Kütle Sınıfları

Kaynak: TS EN 206:2013+A1, 2017

1.2.2.3. Ağır Betonlar

Etüv kurusu birim hacim kütlesi 2,6 kg/dm³ 'den büyük olan betonlardır. Barit, magnetit, limonit demir gibi birim hacim ağırlığı 3,2 kg/dm³ 'den yüksek agregaların kullanımıyla oluşturulur. Çatlak oluşumu meydana gelmemesi için su/çimento miktarı 0,50'den küçük ve çimento miktarı 350 kg/m³ den yüksek tutulur. Genellikle nükleer santraller, hastanelerin ışın tedavisi yapılan kısımları ve askeri mühimmat depoları gibi, yüksek mukavemet istenen ve özel güvenlik gerektirilen yapılarda kullanılmaktadır (Şimşek, 2020).

1.2.3. Özel Betonlar

Özel betonlar; tasarım, üretim ve uygulama yöntemleri yönünden normal betonlardan farklı olarak tasarlanan betonlardır. Özel betonlar kullanım yeri ve amacına göre şu şekilde sıralanabilir.

1.2.3.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB); diğer betonlardan farkı olarak kendi ağırlığıyla yayılabilen özel tasarıma sahip bir beton türüdür. Genellikle güçlendirme projelerinde, estetik kalıp tasarımlarında, donatıların yoğun olduğu, vibrasyonun mümkün olmadığı ve dar derin kesitlerde kullanılmaktadır. Normal betonlara göre maliyeti oldukça yüksek olmakla beraber, ince taneli malzeme miktarı oldukça fazladır. Su/çimento oranını

azaltmak ve işlenebilirliği artırmak için hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılarak üretilmektedir (Kılınç, 2012). KYB, kullanılacak yapının özelliğine göre tasarlanmalıdır. Yayılma yeteneği 60-90 cm arasında olmalı, kıvamını 90 dakika boyunca korumalı, segregasyon ve terleme olmamasına özen gösterilecek şekilde tasarlanmalıdır. Normal bir KYB karışımı; hacimsel olarak, %30 ince agrega ve %40 kaba agrega, %15 su ve %15 çimento içermelidir. KYB'ler taze haldeyken; kıvam, vizkozite, doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği gibi özellikleri iyi düzeyde tutulmalı ve sık sık kontrol edilmelidir (Şimşek, 2020). KYB sınıflandırması Şekil 4'te gösterilmiştir.

Viskozite sınıfları - t 500		Viskozite sınıfları - t v		Geçiş yeterliliği sınıfları - L-kutusu		Geçiş yeterliliği sınıfları - J-halkası		Geçiş yeterliliği sınıfları - J-halkası	
Sınıf	TS EN 12350-8'e göre t 500 a s	Sınıf	TS EN 12350-9'a göre t v a s	Sınıf	TS EN 12350 -10'a göre L-kutusu oranı	Sınıf	TS EN 12350- 12' ye göre J-halkası adımı a mm	Sınıf	TS EN 12350 -11' e göre ayrışan kısım a %
VS1	< 2,0	VF1	< 9,0	PL1	≥ 0,8 (2 Çubukla)	PJ1	≤ 10 (12 Çubukla)	SR1	≤ 20
VS2	≥ 2,0	VF2	9,0 – 25,0	PL2	≥ 0,8 (3 Çubukla)	PJ2	≤ 10 (16 Çubukla)	SR2	≤ 15
a Sınıflandırma Dmax = 40 mm'yi aşan betonlara uygulanmaz		a Sınıflandırma Dmax = 22,4 mm'yi aşan betonlara uygulanmaz				a Sınıflandırma Dmax = 40 mm' yi aşan betonlara uygulanmaz.		a Sınıflandırma Dmax = 40 mm'yi aşan betonlara uygulanmaz .	

Şekil 4. Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Sınıflandırma

Kaynak: Şimşek, 2020

1.2.3.2. Lifli Beton

Lifli beton; yapılarda, dayanım ve dayanıklılığı sağlamak için kullanılan özel bir beton türüdür. Betonda çatlak ve süneklik kontrolü, lifler sayesinde sağlanmaktadır. Betonda kullanım amacına uygun olarak; karbon, çelik, polipropilen, asbest ve cam esaslı malzeme tipleri kullanılmaktadır. Örneğin; çelik lifler yüksek enerjiyi emmek için kullanılırken, polipropilen lifler ise rötre çatlakların oluşumunu engellemek için kullanılmaktadır. Genellikle hacimsel olarak %0,5-%2 arasında lif kullanılabilir. Lifli betonların

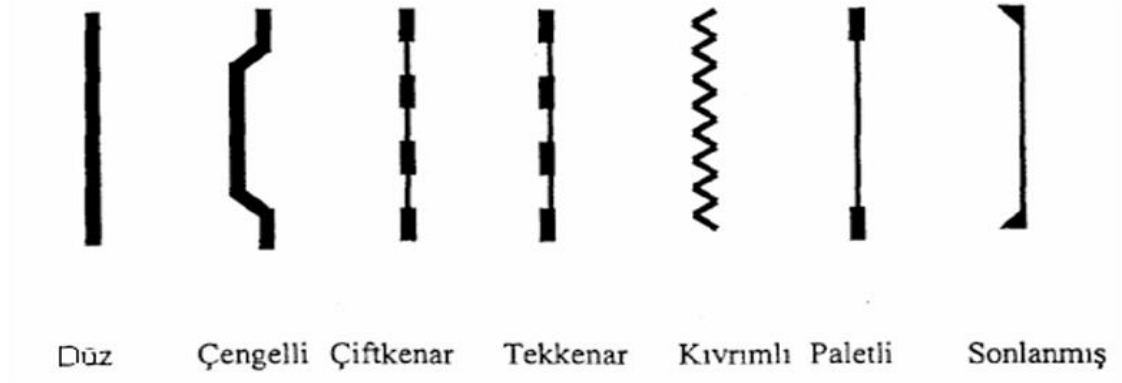
işlenebilirliği, geleneksel betonlara göre oldukça zordur. Bu nedenle üretiminde çok hassas davranmayı gerektirir. Genelde depreme dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, terör saldırılarına karşı set duvarları ve prefabrike gibi yapılarda kullanılmaktadır (Şimşek, 2020). Farklı cins liflerin özellikleri, Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Farklı Cins Liflere Ait Fiziksel Özellikler

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10^3.MPa)	Maksimum Uzama (%)	Yoğunlukları (g/cm^3)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	522-966	83-138	0,6	3,2
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1.4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8

Kaynak: Şimşek, 2020

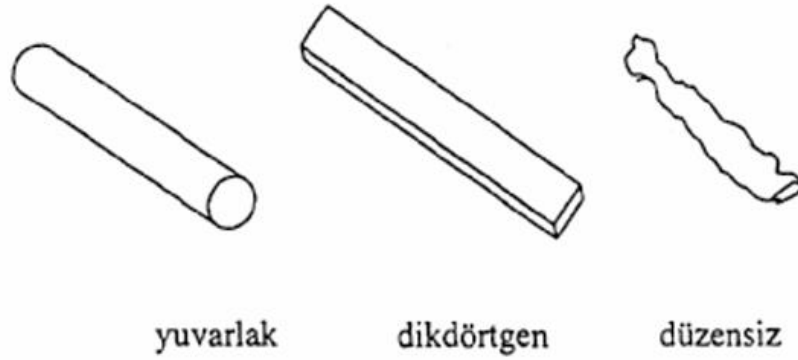
Uygulama alanlarına göre üretilen çelik lif tipleri, Şekil 5’te görülmektedir. Bunlar düz, çengelli, çift kenar, tek kenar, kıvrımlı, paletlenmiş ve sonlanmış hallerde bulunmaktadır (Sancak, 1998).



Şekil 5. Çelik Lif Tipleri ve Şekiller

Kaynak: Sancak, 1998

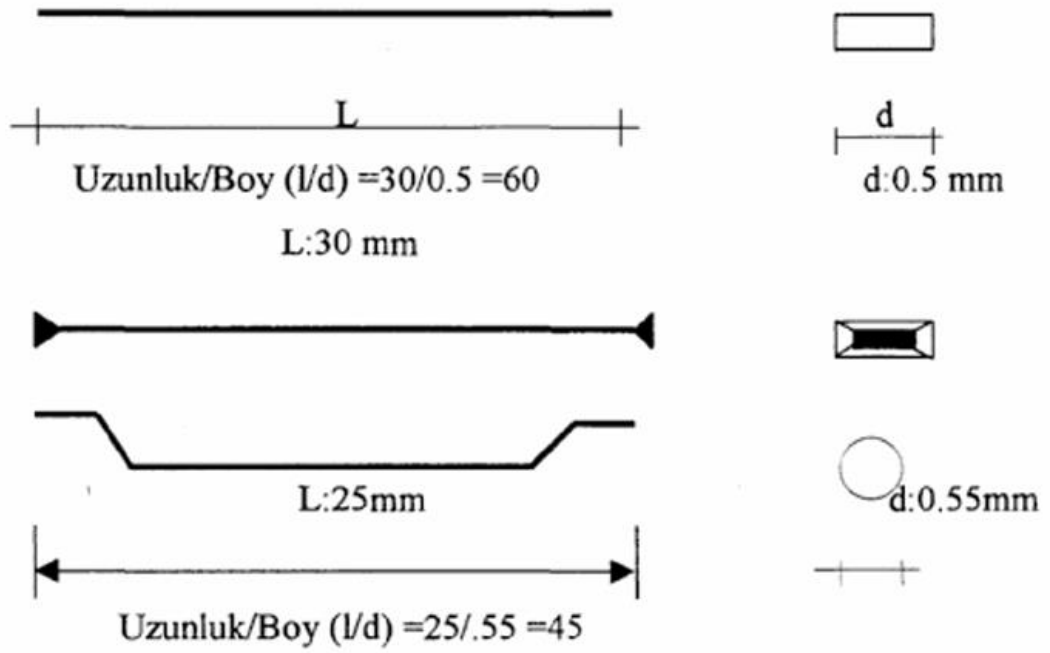
Çelik liflerin geometrileri biçimlerindeki farklılıklar Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6. Çelik Lif En Kesitleri

Kaynak: Sancak, 1998

Çelik liflere ait bazı geometrik ölçülendirmeler Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Bazı Çelik Liflerin Geometrik Ölçülendirmeleri

Kaynak: Sancak, 1998

1.2.3.3. Püskürtme Beton

Kuru ve yaş olmak üzere iki tip püskürtme betonu mevcuttur. Tasarımı geleneksel betonlardan oldukça farklıdır. Püskürtme beton üretiminde, priz hızlandırıcı ve aderans artırıcı kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Hızlı priz alma özeliği sayesinde, kalıp kurulmadan imalat gerçekleştirilir. Bu sayede zamandan ve işçilikten kazanç sağlanmaktadır. Özel robotlarla, belirli bir basınç ile püskürtme yöntemiyle yerleştirilmesi gerçekleştirilir. Uygulama esnasında, geri sıçramayla malzeme kaybı gibi dezavantajları da vardır. Genellikle tünel kaplama inşaatlarında, şev stabilitesinde, tamir-onarım işlerinde, boru ve kanalizasyonlar gibi işlerde kullanılan özel bir beton türüdür (İnce ve diğerleri, 2015).

1.2.3.4. Vakumlu Beton

Yeterince geniş alanlarda, taze beton sertleşmeden önce, içindeki hava ile suyun kontrollü bir şekilde vakum ile alınmasıyla oluşturulan özel bir beton tipidir. Havaalanlarında, akaryakıt istasyonlarında, endüstriyel yapılarda ve karayolu kaplamalarında

kullanılmaktadır (Şimşek, 2020). Vakum uygulaması, betonun mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilemekte ve daha hızlı kullanıma hazır hale getirmektedir (Şimşek, Sancak ve Yaprak 2005).

1.2.3.5. Ferrocement Beton

Ferrocement beton çimento harcında oluşan bir yapı malzemesidir. Su/çimento oranı 0,40-0,50 arasında olmakla birlikte, dane çapı 2mm olan kum agrega içermektedir. Sık aralıklarla serilmiş, göz açıklığı 9mm olan küçük çaplı tel örgülerle donatılmış, ince yapılı imalatlarda kullanılır. Uygulama kalınlığı 10mm ile 40mm civarında ve pas payı ise 2mm ile 3mm arasındadır (Şimşek, 2020). Şekil 8’de Ferrocement beton uygulamasından bir fotoğraf gösterilmiştir.

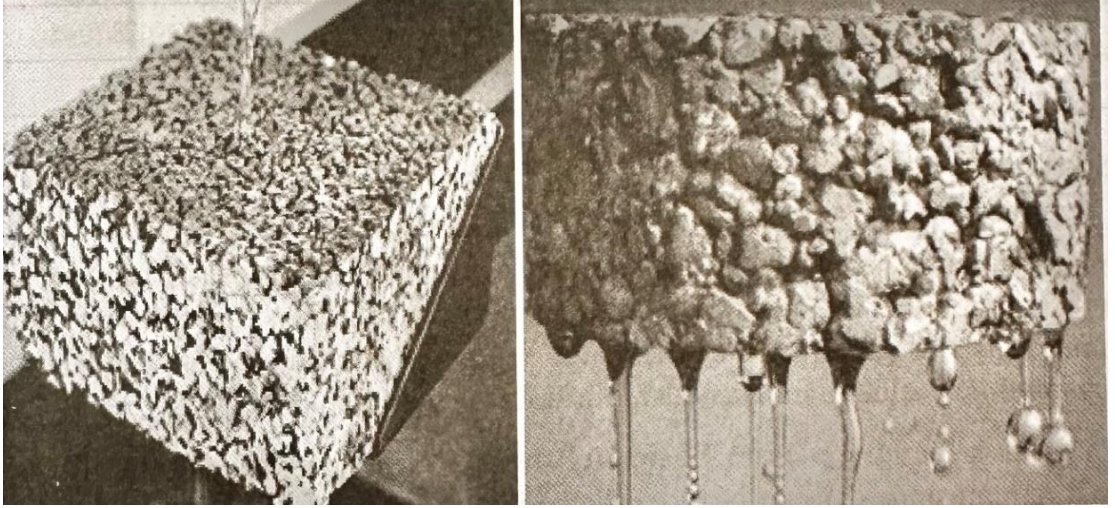


Şekil 8. Ferrocement Uygulamasından Fotoğraf

1.2.3.6. Su Geçiren Beton

Su, çimento, iri agrega, kimyasal katkı ve az miktarda ya da hiç ince agrega kullanılmayarak üretilen betonlardır. Poroz bir yapıya sahip olması ve boşluk oranının yüksek olması sayesinde, suyu rahatlıkla drene etme özelliğine sahiptir. Genelde su yönetimi yapılarda kullanılmaktadır.

Geçirimli beton, boşluklu bir yapıya sahip olduğundan, 28 günlük basınç dayanımları genelde 3,5 MPa ile 28 MPa arasındadır. Boşluk oranı ve basınç dayanımı ters orantılıdır (Şimşek, 2020). Şekil 9’da geçirimli betonlara bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 9. Geçirimli Beton

Kaynak: Şimşek, 2020

1.2.3.7. Silindirle Sıkıştırılan Beton

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), özel teknikle üretilen genelde yol ve barajlarda kullanılan bir beton çeşididir. Düşük miktarda çimento ve en büyük tane boyutu 150-200 mm çapına varan agregalarla tasarlanabilmektedir. Puzolanik malzeme kullanılması, çimento tasarrufu ve beton hidratasyon ısısı düşürmesi yönünden katkılar sağlar. Betonun yerleştirilmesi, lastikli kepçeler ve buldozer gibi lastikli iş makinalarıyla 30cm serilip 10 tonluk vibrasyonlu silindirlerle sıkıştırılarak gerçekleştirilir. Maliyetinin normal betonlara göre oldukça düşük olması açısından avantajlıdır (Erdoğan, 2016).

1.2.3.8. Polimer Beton

Polimer betonlar; kimyasal etkenlere karşı geçirimsiz, aşınmaya karşı dayanıklı ve süneklik özelliği gösteren bir beton türüdür. Genelde, kimyasal etkenlere karşı geçirimsizliğin arandığı işlerde, tamirat ve kaplama imalatlarında, süneklik ve aşınmaya karşı dayanıklılığın arandığı yapılarda kullanılır. Polimer çimento, agregaların çevresini polimerle sararak kılcal boşlukları polimerle doldurularak geçirimsizlik sağlar (Türkel, 2007).

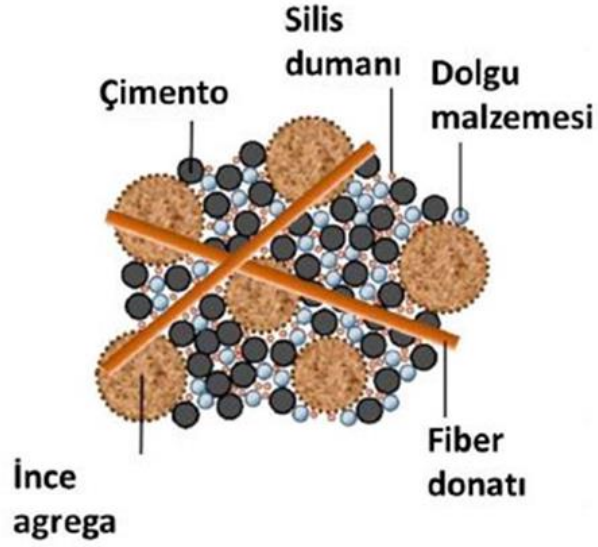
1.2.3.9. Yüksek Performanslı Beton

Yüksek performanslı beton (HPC); yüksek dayanıklılık, yüksek mukavemet ve yüksek performans özelliklerine sahip olan özel bir beton tipidir. HPC betonlarında su/bağlayıcı oranının düşük olması sayesinde yoğun ve dayanıklıdır. Yüksek performanslı beton betonlar genellikle 50 MPa üzerinde bir basınç dayanımı vermektedir. Bazı durumlarda basınç dayanımı, 100 MPa kadar çıkabilmektedir (TS EN 206:2013+A1, 2017).

Yüksek performanslı beton özel bağlayıcı, agrega ve katkı maddeleri içerir. Yüksek dayanıklılığı sayesinde kimyasal, fiziksel ve termal etkilere karşı dirençlidir. Yüksek dayanım gerektiren binalarda ve zorlu çevre koşullarına maruz kalan yapılarda kullanılırlar.

1.3. Ultra Yüksek Performanslı Beton

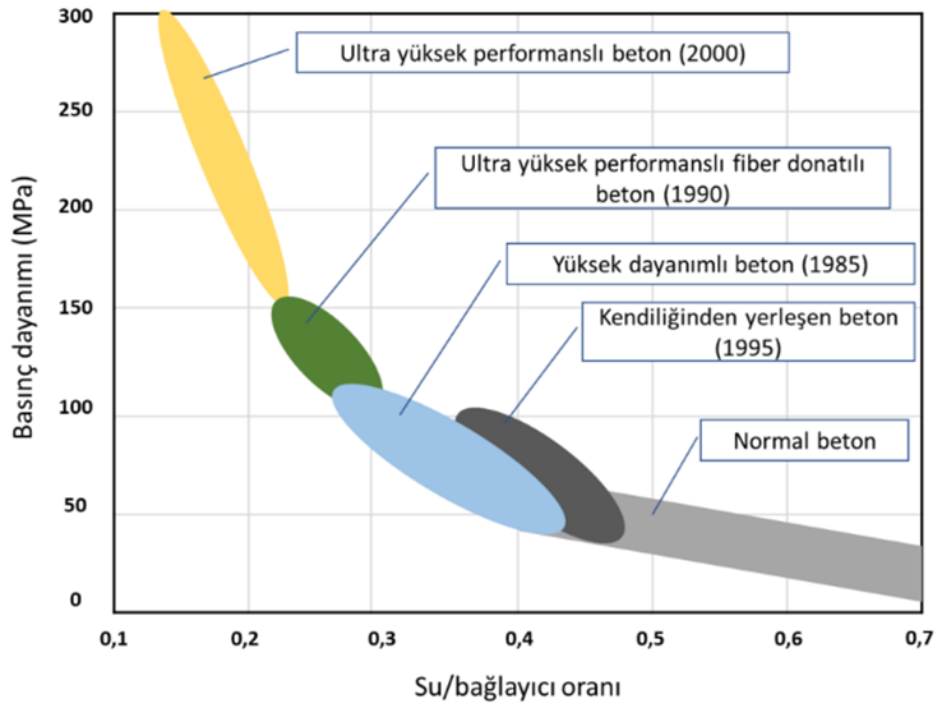
Ultra yüksek performanslı beton (UHPC Ultra High Performance Concrete) olağanüstü dayanımı, süneklik ve mükemmel dayanıklılığa sahip yeni nesil bir beton çeşididir. UHPC; çelik fiber takviyesiyle çekme esnasında sünek davranış gösteren, karakteristik basınç mukavemeti minimum 150 MPa olan beton olarak tanımlanır. Çelik fiber veya diğer fiber takviyeleriyle 130-150 MPa basınç mukavemetine sahip UHPC'ler, daha düşük dayanımlı UHPC olarak kabul görülür. Normalde UHPC terimi; çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip, Şekil 10'de gösterildiği gibi fiber takviyeli ve silis dumanı gibi mineral katkı içeren beton tasarımları için tanımlanır. Karışımda sıradan agregalar yerine 0,15-0,60 mm arasında değişkenlik gösteren çok ince kuvars kumu kullanılmaktadır. Bazı araştırmacılar, iri agrega içeren UHPC'nin beton olmadığını beyan etmektedir. Sünekliği arttırmak için ince çelik lifler güçlendirilen UHPC'yi belirtmek için harç yerine beton terimi kullanmıştır.



Şekil 10. Genel UHPC Bileşenleri

Kaynak: Türkiye Hazır Beton Birliği, 2024

İnşaat sektöründe dünyada en çok tercih edilen beton, gelecekte de önemini koruyacaktır. Dünyadaki beton üretiminin yıllık 10 milyar metreküp olduğu bilinmektedir. Mükemmel dayanıklılık ve dayanım özelliklerini barındırması, istenilen şekle kolayca sokulması ve fiyatın uygun olması, betonun inşaat sektöründeki popülarlığını korumuştur. Yüksek basınç dayanımı sağlaması sayesinde, vazgeçilmez bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Şekil 11’de su/bağlayıcı oranına göre mukavemet değerleri ve beton teknolojisindeki önemli gelişmeler gösterilmiştir.

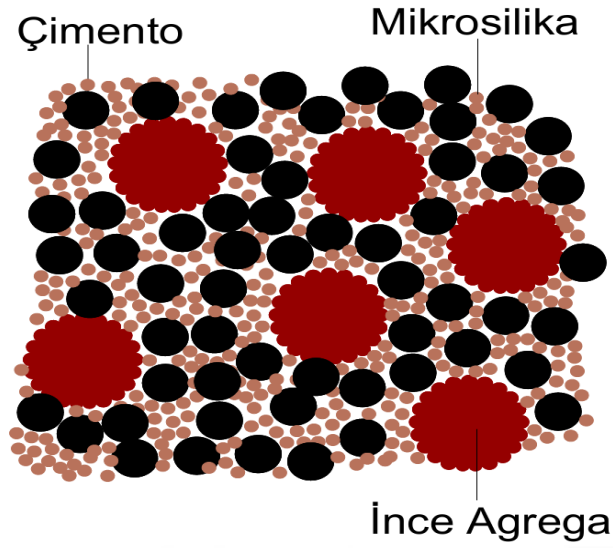


Şekil 11. Su/Bağlayıcı Oranına Göre Basınç Dayanımları

Kaynak: Türkiye Hazır Beton Birliği, 2024

Süperakışkanlaştırıcılar (SP) olarak adlandırılan yüksek miktarda su azaltıcılar, 1980’li yıllarda su/çimento oranı aşamalı olarak 0,30’a kadar düşürülmüştür. Yüksek miktarda süper akışkanlaştırıcı ve silis dumanı kullanılarak su/çimento oranını 0,16’ya düşürülebileceği kanıtlanana kadar bu oran değişmezliğini korumuştur. Granül tanelerin boyut dağılımı en uygun hale getirilip sıkıştırılarak beton basınç dayanımı 280 MPa’a kadar ulaşılmıştır. Maksimum direnç ve dayanıklılık artışını sağlamak için gözenek boşlukları ve mikro çatlaklar gibi kusurlar minimum hale getirilmiştir (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2024)

Bu çalışmada; Şekil 12’de gösterildiği gibi, herhangi bir lif ve ince dolgu malzemesi kullanmadan; silis kumu yerine doğal kum, bazalt, granit, dolomit ve kum taşı olmak üzere ince agrega kullanılmıştır.

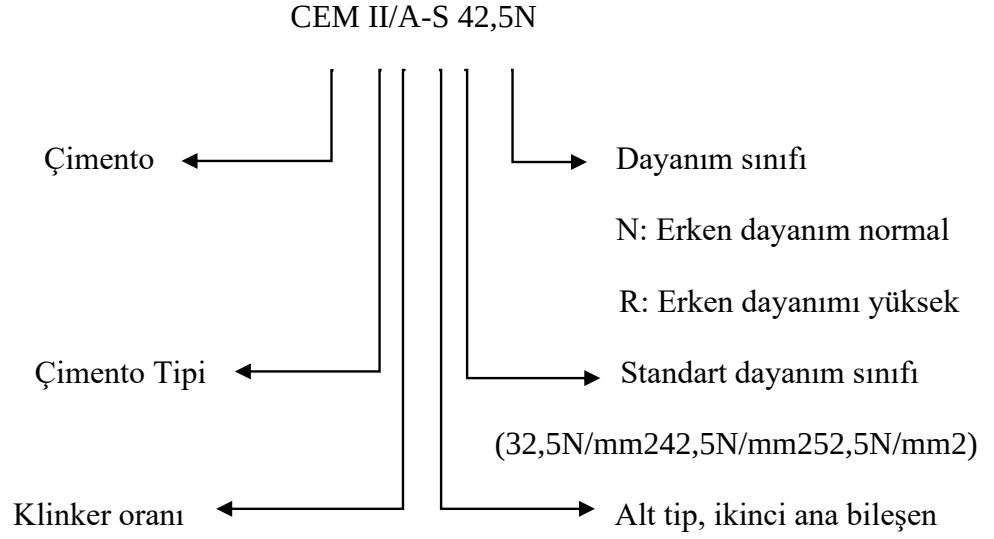


Şekil 12. Lifsiz UHPC Bileşenleri

1.4. Çimentolar

Çimentolar; kil ve kalkerin boyutlarının uygun hale getirilip belirli oranlarda karıştırılarak, 1350-1500 santigrat dereceye kadar özel çimento fırınlarında pişirilmesiyle, klinker elde edilir. Elde edilen klinkere %3-6 arasında alçı taşı ile gereksinime bağlı olarak bazı oksitler (Fe_2O_3 , CaO , Al_2O_3 , SiO_2) karıştırılıp çimento değirmeninde öğütülerek toz haline getirmesiyle çimento üretilir.

Çimento, su ile karıştırıldıktan sonra jelimsi hamur haline gelip hidrasyon reaksiyonu ile sertleşip mukavemet alan inorganik bir yapı malzemesidir. Çimentolar hidrolik bağlayıcı malzemelerdir. Gerek kendi başına gerekse çakıl, kum gibi malzemeler ile su ilave edilerek karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra, hava ve suda piriz alarak sertleşir ve taş haline dönüşürler. TS EN 197-1 standardına göre genel amaçlı çimentolar sırasıyla CEM I Portland çimentosu, CEM II Portland kompoze çimento, CEM III Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimento, CEM IV Puzolanik çimento ve CEM V Kompoze çimento olmak üzere 5 ana tip içerisinde toplamaktadır. Türkiye’de TS EN 197-1 standartta uygun olarak üretilen 27 tip çimento bulunmaktadır. TS EN 197-1 standardına göre üretilen çimentolar, CEM olarak adlandırılmaktadır.



CEM çimentosunda, reaktif özellik gösteren silisyum dioksit (SiO_2) ve Kalsiyum oksit (CaO) oranları kütlece en az %50 olmalıdır. Magnezyum oksit (MgO) oranı ise %0,1-%4 arasında olmalıdır. Aksi takdirde magnezyum oksit (MgO) miktarı %5 fazla olursa taze veya nemli betonlarda aşırı genleşme meydana getirebilir. Betonda hacimde genleşmeyi etkileyen diğer bir birleşen ise kireçtir (CaO). Hacimce genleşme kısa ya da uzun vadede gerçekleşebilir (Şimşek, 2020; TS EN 197-1, 2012).

Çimento çeşitleri, Şekil 13'te ve Çimentonun mekanik dayanımları ve fiziksel özellikleri Şekil 14'te verilmiştir.

Ana Tipler	Genel Çimento Tipleri		Bileşim (kütlece ¹⁾) % olarak											Minör ilave Bileşenler
			Ana Bileşenler											
			K	S	D ²⁾	P	Q	V	W	T	L	LL		
CEM I	Portland Çimentosu	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-				0-5
CEM II	Portland-Curufllu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35										0-5
	Portland-Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6-10									0-5
	Portland-Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94			6-20								0-5
		CEM II/B-P	65-79			21-35								0-5
		CEM II/A-Q	80-94				6-20							0-5
		CEM II/B-Q	65-79				21-35							0-5
	Portland- Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94					6-20						0-5
		CEM II/B-V	65-79					21-35						0-5
		CEM II/A-W	80-94						6-20					0-5
		CEM II/B-W	65-79						21-35					0-5
	Portland-Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94							6-20				0-5
		CEM II/B-T	65-79							21-35				0-5
	Portland-Kompoze Çimento ³⁾	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufllu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	0-5									0-5
		CEM III/B	20-34		66-80									0-5
		CEM III/C	5-19		81-95									0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento ³⁾	CEM IV/A	65-89		-	11-35								0-5
		CEM IV/B	45-64		-	36-55								0-5
CEM V	Puzolanik Çimento ³⁾	CEM V/A	40-64		18-30	-	18-30						0-5	
		CEM V/B	20-38		31-50	-	31-50						0-5	
1) Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamı ile ilgilidir.														
2) Silis dumanının oranı %10'la sınırlandırılmıştır.														
3) Portland kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik Çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze Çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin yanındaki diğer ana bileşenler ana bileşenler çimentoya ait işaretler çimentoya ait işaretlerle beyan edilmelidir.														
K: Klinker, S: Yüksek Fırın curufu, D: Silis dumanı, P: Doğal puzolan, Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan, V: Silisli uçucu kül, W: Kalkerli uçucu kül, T: Pişmiş Şist, L: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0.50 aşmayan kalker, LL: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0.20 aşmayan kalker.														

Şekil 13. Çimento Çeşitleri

Kaynak: TS EN 197-1, 2012

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (Mpa)				Priz başlama süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük			
32.5 N	-	≥16.0	≥32.5	≤ 52.5	≥75	
32.5 R	≥10.0					
42.5 N	≥10.0		≥42.5	≤ 62.5	≥60	≤ 10
42.5 R	≥20.0					
52.5 N	≥20.0		≥52.5		≥45	
52.5 R	≥30.0					

Şekil 14. Çimentonun Mekanik Dayanımları ve Fiziksel Özellikleri

Kaynak: TS EN 197-1, 2012

1.5. Agregalar

Agregalar, beton iskeletinin yaklaşık olarak %75'ini oluşturmaktadır. Agregalar, doğada doğal ya da yapay kırılmış ya da kırılmamış, 63mm'ye kadar çeşitli büyüklerde bulunabilen taneler yığımıdır. Agregalar, suyla temas ettiğinde yumuşamamalı, parçalanmamalı, çimento ile etkileşime girdiğinde zararlı bileşenler meydana getirmemeli ve donatıların korozyona maruz bırakacak özellikte olmamalıdır. Kullanım şekli ve amacına göre agregalar; tane şekli, granülometri, tane dayanımı, aşınmaya karşı direnç, donmaya karşı dayanıklılık ve içeriğindeki zararlı maddeler bakımından uluslararası standartların sınırları içerisinde olmalıdır (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.5.1. Agregaların Özellikleri

İyi bir beton üretimi için agregalarda bulunması gereken özellikler; dayanıklı olmalı, aşınmamalı, suyla temas ettiğinde yumuşamamalı, çimento içeriğiyle uyumlu olmalı, demir donatılarda korozyona sebep olacak birleşikler içermemeli, tanelerin şekil dokusu uygun olmalı, tane dağılımı amaca ve standartlara uygun olmalı ve zararlı maddeler içermemelidir (TS 706 EN 12620+A1, 2009)

1.5.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri; agreganın dayanıklılığı, kökeni, boyutları, toplam boşluk hacmi ve boşlukların sürekliliğine bağlıdır (Şimşek, 2020).

1.5.2.1. Agregaların Porozitesi

Agregaların boşluklu olma özelliğine, porozite denilmektedir. Agreganın porozitesi; kaynağına, yapısına ve içeriğine göre farklılıklar göstermektedir. Porozite, su emme deneyi ile tespit edilir (Şimşek, 2020).

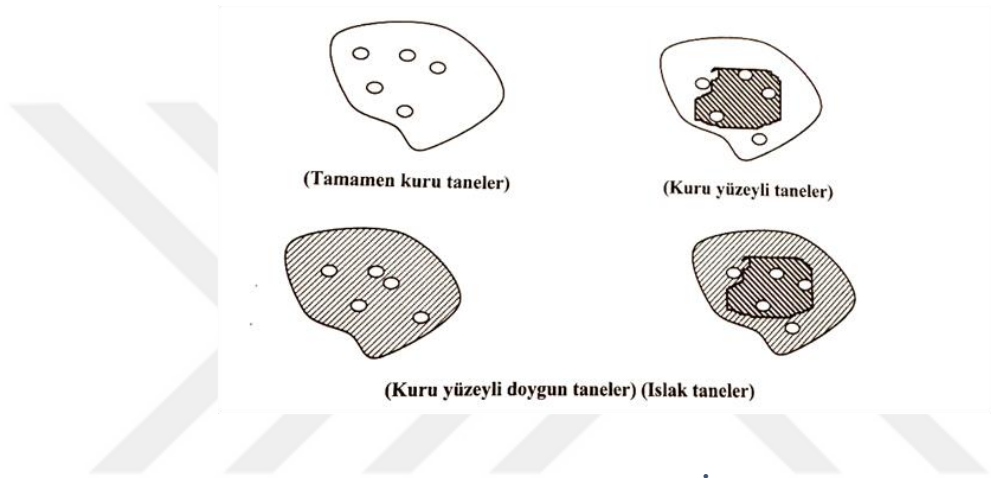
1.5.2.2. Agreg-Su İlişkisi

Agregaların su ile ilişkisini şu şekilde sıralayabiliriz.

1. Etüv kurusu taneler; etüvde $105\pm 50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 24 saate kurutulan malzemedir.

2. Tamamen kuru taneler; tanelerin içerisinde ve yüzeyinde hiçbir şekilde su bulunmaması halidir.
3. Kuru yüzeyli doygun taneler; agregataneleri içerisindeki boşlukların tamamının su ile dolu olup yüzeylerinin ise tamamen kuru olma halidir.
4. Islak taneler; agregaların boşluklarının tamamının su ile dolu olduğu gibi yüzeyinin de tamamen su ile kaplanmış olması halidir (Şimşek, 2020).

Agregaların su ile bağlantıları Şekil 15’te gösterilmiştir.



Şekil 15. Agregat Su İlişkisi

Kaynak: Şimşek, 2020

1.5.2.3. Birim Ağırlık

Birim ağırlık, belirli bir hacmi dolduran malzemenin ağırlığına denir. Birim ağırlık beton tasarımı için gereklidir.

1.5.2.4. Yoğunluk

Belirli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin havadaki ağırlığının, aynı hacim ve sıcaklıktaki suyun havadaki ağırlığına oranıdır. Yoğunluk, agregaların özelliği hakkında bilgi verir. Yoğunluğu yüksek olan kaliteli agregalar betonda iyi sonuçlar verirken, düşük kaliteli olan agregalar kötü sonuçlar verir. Ayrıca, düşük yoğunluklu agregaların su emme oranı daha fazla iken donma-çözünme direnci ise daha azdır (Şimşek, 2020).

1.5.2.5. Agregaların Hava Tesirine Karşı Dayanıklılığı

Boşluklu yapıya sahip olan agregalar boşluklarına su alır. Donmanın etkisiyle su hacmi %9 genişler ve agregayı parçalayarak zarar verir. Beton agregası olarak kullanılacak agregaların su emme miktarı %1'den az olmalıdır (Şimşek, 2020).

Donma çözülme etkisi; TS 10088 EN 932-3'e göre, petrografik TS EN 1367-1'e göre ve su emme tayini TS EN 1367-2'ye göre, magnezyum sülfat tayini ile agregaların donma çözülme etkisi hakkında bilgi edinilmektedir.

TS EN 1367-1 veya TS EN 1367-2'ye belirlenen agrega donma direnci Şekil 16'da ve Na₂SO₄ ile yapılan magnezyum sülfat donma karşı dayanıklı değeri

Şekil 17'de verilmiştir.

Donma-çözülme (Kütlece yüzde kaybı ^{a)})	Kategori F
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 4	F ₄
> 4	F _{Beyan}
Serbest	F _{NR}
^{a)} Aşırı soğuk hava ve/veya tuzluluk veya buz çözücü tuz doygunluğu durumlarında, EN 1367-1:2007 Ek B'de ayrıntısı verilen ve bir tuz çözeltisi veya üre kullanılan deneylerin yapılması daha uygun olabilir. Bu durumda, bu çizelgede verilen sınırlar uygulanmaz.	

Şekil 16. En Yüksek Donma-Çözülme Direnç Değerlerine Göre Sınıflama

Kaynak: TS 706 EN 12620+A1, 2009

Magnezyum sülfat değeri (Kütlece yüzde kaybı)	Kategori MS
≤ 18	MS ₁₈
≤ 25	MS ₂₅
≤ 35	MS ₃₅
> 35	MS _{Beyan}
Serbest	MS _{NR}

Şekil 17. MgSO₄ Dayanıklığı Değerlerine Göre Sınıflandırılması

Kaynak: TS 706 EN 12620+A1, 2009

1.5.3. Agregaların Mekanik Özellikleri

Agregaların en önemli mekanik özellikleri, basınç mukavemeti, aşınmaya karşı gösterdiği direnç ve çarpma mukavemetidir (Şimşek, 2020).

1.5.3.1. Agregaların Basınç Mukavemeti

Betonda kullanılan agregaların mukavemetinin, en az 60 MPa olması istenir. Basınç mukavemetinin, poroziteyle yakından ilişkisi bulunmaktadır. Porozitenin az olması malzemenin mukavemetini olumlu yönde etkilemektedir (Şimşek, 2020).

1.5.3.2. Agregaların Aşınma Mukavemeti

Bir malzemenin yüzeyinin, sürtünme kuvveti esnasında oluşacak aşınmaya karşı gösterdiği direnç, aşınma mukavemeti denir. Aşınma dayanıklılığı, Los Angeles ve BÖHME deneyi ile belirlenir. Kıрма agregaların basınç mukavemeti, 100 MPa'dan az olmamalıdır. Aksi takdirde şüpheli durumlarda Los Angeles deneyine bakılır. Los Angeles deney tayini 500 dönüşte malzemenin aşınma değeri, ağırlıkça %50'den az olmamalıdır. Aşınma etkisi altında olan betonlarda, agregaların aşınma değeri ağırlıkça %30 mertebesinde ve diğer betonlarda ise bu değer %45'in altındadır (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.5.3.3. Agregaların Çarpmaya Dayanıklılığı

Agregaların çarpmaya karşı dayanıklılığı; agregaların çelik bir silindir içine yerleştirilerek, belirli bir mesafeden, belirli bir ağırlıkla, belirli sayıda çarpma etkisi altında tutulduktan sonra elenmesiyle bulunur. Bu deney, çarpma etkisine maruz kalacak olan betonlarda yapılmaktadır (Şimşek, 2020).

1.6. Beton Agregaların Sınıflandırılması

Agregalar; elde ediliş biçimine, birim ağırlıklarına, boyutlarına, tane şekline, yüzey doku özelliğine, kaynaklarına, jeolojik ve mineralojik oluşumlarına göre sınıflandırılmaktadır (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.1. Elde Ediliş Şekline Göre Agregalar

Bu agregalar, tabi, suni, geri kazanılmış ve geri dönüşümlü agregalar olmak üzere dört farklı şekilde tanımlanmaktadır (Şimşek, 2020).

1.6.1.1. Tabi (Doğal) Agregalar

Akarsu, deniz, buzul, çöl ortamlarından temin edilen agregalardır. Yapısal özellikleri çok karışık olduğunda beton üretiminde kalite açısından sıkıntı yaratmaktadırlar (Şimşek, 2020).

1.6.1.2. Suni (Yapay) Agregalar

Yüksek fırın cüruf taşı, yüksek fırın cüruf kumu ve izabe cürufu olarak bulunan, kırılmış ya da kırılmamış yoğun yapıli sanayi agregalarıdır. Üretim sırasında işlem gürmüş ya da bir sanayinin atık maddesi olarak elde edilmiş agregalardır. İkinci bir işlem sonucu, betonda kullanıma hazır hale getirilir (Şimşek, 2020).

1.6.1.3. Geri Kazanılmış Agrega

Geri kazanılarak elde edilen ve imalatçılar tarafından ticari amaç gözetmeksizin, sadece kendi işlerinde kullanacakları betonun üretiminde kullanılan agregalardır. Tane sınıflarına ayrılmamış biçimde geri kazanılan agrega %5'ten fazla kullanılmamalıdır. Yıkılarak elde edilen geri kazanılmış agregalar toplam agreganın %5'inden fazlaysa, iri ve ince olarak iki farklı sınıfa ayrılmalıdır. TS EN 12620 kriterlerine uygun olmalıdır (Şimşek, 2020).

1.6.1.4. Geri Dönüşümlü Agrega

Geri dönüşümlü agregalarda herhangi bir sınırlama yoktur. Fiziksel ve mekanik özellikleri, TS EN 12620 Standardının sınırların dahilinde olması gerekir. Genellikle bunlar; yassılık indeksi $\leq F50$ veya $\leq SI55$, parçalanma direnci $\leq LA50$ veya $\leq SZ32$, etüv kurusu tane tane yoğunluğu, PRD; A tipi için $\geq 2,10 \text{ kg/dm}^3$, B tipi için $\geq 1,70 \text{ kg/dm}^3$, suda çözülebilen sülfat içeriği SS 0,2 ve priz süresi başlangıç etkisi $\leq A40$ olması gerekmektedir (Şimşek, 2020).

1.6.2. Yoğunluklarına Göre Agregalar

Bu agregalar; hafif, normal ağırlıklı ve ağır agregalar olmak üzere üç farklı şekilde tanımlanmaktadır.

1.6.2.1. Hafif Agregalar

Organik ve mineral kökenli yoğunlukları 1,20-2,00 arasında olan agregalardır. Ses ve ısı yalıtım özelliğinden dolayı, genellikle hafif beton üretiminde tercih edilen agrega tipidir. Su emmeleri ve boşluk oranları, diğer agregalara göre oldukça yüksek; basınç mukavemeti, çarpma dayanıklılığı ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri ise daha düşüktür. Volkanik cüruf, sünger taşı, tuf gibi doğal taşlar, cam köpüğü, pullanmış mineral kili, genişlemiş perlit, atık tuğla, parçaları gibi yan ürünler ve granülü yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel işlemler sonucunda meydana gelen ikincil ürünler de bu tip agregalara dahildir (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.2.2. Normal Ağırlıklı Agregalar

Doğal akarsu yataklarından ve kırma taşlardan elde edilir. Etüv kurusu yoğunlukları 2,00 kg/dm³ büyük 3,00 kg/dm³ küçük olan agrega tipidir (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.2.3. Ağır Agregalar

Etüv kurusu 3,00 kg/dm³'ten büyük ve genellikle ağır betonlarda kullanılan agrega tipidir. Barit, limonit, manyetit, hematit gibi doğal ve çelik demir hurdası gibi yapay ağır agregalar, bu agrega tipine örnek olarak verilebilir (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.3. Tane Boyutlarına Göre Agregalar

Tane sınıfı temel elek serisi kullanılarak belirlen agrega tipidir. Boyutlarına göre ince agrega, iri agrega ve tüvanan agrega olmak üzere üç tip tane sınıfına ayırmak mümkündür. Tane sınıfı; herhangi iki elek sınıfı arasında kalan agrega tanelerin yığını olarak tanımlanır.

TS 706 EN 12620 standartlarına göre dolgu malzemesi hariç tüm beton agregaları d/D oranını kullanılarak tane sınıfı tipi belirlenir (Şimşek, 2020).

Agrega tane sınıflarının belirlenmesinde kullanılan elek göz açıkları Şekil 18’de gösterilmiştir.

Temel elek serisi mm	Temel elek serisi + seri 1 mm	Temel elek serisi + seri 2 mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63
Not - Parantez içinde gösterilen yuvarlatılmış büyüklükler, agregata tane büyüklüklerinin basitleştirilmiş gösterilişi olarak kullanılabilir.		

Şekil 18. Agregata Tane Sınıfı Belirlenmesinde Kullanılan Elek Göz Açıkları

Kaynak: TS 706 EN 12620+A1, 2009

1.6.3.1. İnce Agregalar

Doğal kum, kırma kum veya bunların karışımından elde edilen, 4 mm kare elek göz açıklığından geçen agregata grubudur (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.3.2. İri Agregalar

Kırma taş, doğal çakıl veya bunların karışımında temin edilen ve göz açıklığı 4 mm ile 63 mm arasında olan eleklerin üstünde kalan agregata grubudur (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.4. Tane Şekline Göre Agregalar

Doğal agregalar ocaklarından temin edilen ve geometrik şekline göre sınıflandırılan agregalar tipleridir. Yuvarlak, şekilsiz, köşeli, prizmatik, yassı ve uzun olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Betonda kullanılacak olan yassı ve uzun agregalar miktarı ne kadar az ise beton kalitesi de o kadar iyi olur (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.5. Yüzey Dokularına Göre Agregalar

Granüle, düzgün, kristalli, pürüzlü ve petekli olmak üzere; yüzey dokusuna göre sınıflandırılan agregalardır. Betonda yüzeyi pürüzlü ve su emme özelliği az olan agregaların kullanımı daha iyidir. Yüzeyi pürüzsüz ve kaygan olan agregalar beton için pek elverişli değildir. Kaygan yüzeyli agregaların çimento hamuruyla yapışması zor olup bir kuvvet altında kolayca sıyrılırlar (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.6.6. Jeolojik Orijinlerine Göre Agregalar

Jeolojik orijinlerine göre agregalar magmatik, metamorfik ve tortul kayalardan elde edilen agregalardır (Şimşek, 2020).

1.6.7. Mineralojik Yapısına Göre Agregalar

İçerdikleri minerallerin türüne ve bileşimine göre sınıflandırılan agregalardır. Silis, karbonat ve mika gibi maddeler, mineral grubuna örnek verilebilir (Şimşek, 2020; TS 706 EN 12620+A1, 2009).

1.7. Agregalar Türünün Beton Özelliklerine Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Alexander ve Milne (1995) dört farklı çimento karışımı ile agregaların beton mukavemetine olan etkisini incelenmemişlerdir. Değişen su/çimento oranına ve agregalar türüne göre, numunelerde basınç dayanımının 20MPa'ya kadar değişim gösterdiği, Portland çimento kullanarak dolomit ve andezit agregayla üretilen betonun mukavemet değerlerinin yüksek çıktığı, kuvarsit ve granit ile üretilen betonun elastisite modülünün erken yaşlarda nispeten daha düşük çıktığı sonucuna varmışlardır.

Apaydın (2017) kumtaşı, bazalt, dolomit beyaz kalker ve mavi kalker olmak üzere beş farklı kökenli agregalar üzerinde çalışma yapmıştır. Her bir agrega tipi için yalnızca doğal kum, yalnızca kırma kum ve belirli oranda doğal kum ve kırma kum kullanarak karışımlar gerçekleştirmiştir. 7 ve 28 günlük performans değerleri kıyaslayarak, en yüksek mukavemeti bazalt agregasıyla elde etmiş, basınç dayanımı artıkça elastisite modülünün arttığı, aynı agrega grubu içinde basınç dayanımları ve elastisite modüllerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varmıştır.

Karadağ (2008) çimento miktarını sabit tutarak dolomit, kalker, bazalt ve kuvarsit olmak üzere dört farklı kökenli agrega ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu agregaların kırma kumları ve kırma taşları kullanarak, bunlara ilaveten her bir beton tasarımı için doğal kumdan faydalanmıştır. Dolomit ve bazalt içeren beton numuneleri kalker ve kuvarsit içeren beton numunelerine göre daha yüksek ultra ses hızına sahip olduğu sonucuna varmıştır. Tüm agrega gruplarının su/çimento oranının azalmasıyla 28. gün mukavemet değerleri ve elastisite modüllerinin azaldığını tespit etmiş, basınç değerlerinin ise 84,47 MPa ile 112,97 MPa aralığında bir değişim gösterdiğini belirtmiştir. Özgül ağırlığı en düşük olan kuvarsit agregalar içeren betonların, yüksek mukavemet değerlere ulaşabileceğini görmüştür. Dolomit agregasıyla en yüksek mukavemeti yakaladıklarını, ayrıca kalker kumtaşı ve kırma kum içeren betonların elastisite modülünün, diğer agregalarla kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

1.8. Mineral Katkılar

Beton üretiminde kullanılan çok sayıda mineral katkı maddesi bulunmaktadır. Elde edilmiş biçimine göre üç grup altında toplanabilmektedirler.

- Doğada direkt bulunan malzemeler (diatomlu topraklar, volkanik küller ve taş unu).
- Beton üretimiyle doğrudan ilgisi olmayan bir endüstrinin, yan kolundan üretilen malzemeler (Silis dumanı, uçucu küller ve granülü yüksek fırın cürufu).
- Isıl işlem uygulanarak elde edilen malzemeler. (Pişirilmiş şeyl ve pişirilmiş kil).

Beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılacak mineral malzemelerin çok ince taneli olması gerekmektedir.

Yan ürün olarak temin edilen uçucu küller ve silis dumanı, çok ince taneli malzemelerdir. Diğer yandan doğada bulunan volkanik tuf, pişirilmiş kil ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin betonda kullanılabilmesi için, öğütülerek en az Portland çimento boyutuna kadar inceltilmelidir. İnce taneli mineral katkıları, betonun diğer bileşenleri gibi (agrega, çimento ve su), beton karışımına doğrudan ilave edilmekte ve diğer malzemelerle beraber kırıştırılmaktadır. Bu mineraller, genelde kullanılan çimentonun %10-%50'si kadardır. Genellikle çimento miktarını azaltmakta ve azaltılan çimento miktarı kadar karışıma ikame edilmektedirler.

Mineral katkı maddeleri; kullanılan malzemenin tipi ve oranına göre, taze ve sertleşmiş betonun birçok özelliğini etkileyebilmektedirler. Mineral malzemeler kullanılarak elde edilen betonlar, aşağıda sıralanan bir ya da birden fazla etkenlere neden olabilmektedir.

- Taze betonun işlenebilirliğini artırmak,
- Terleme ve segregasyon gibi uygun olmayan durumları azaltmak,
- Hidratasyon ısını düşürmek,
- Alkali-silika reaksiyonu (ASR) azaltmak,
- Su geçirgenliğini düşürmek,
- Nihai dayanımı yükseltmek,
- Sülfatlara karşı direnci sağlamak,
- Daha ekonomik bir beton üretimi sağlamak.

Taş unu dışında, beton da ince taneli olarak kullanılan mineral malzemelerin hemen hepsi, puzolanik malzemelerdir (Erdoğan, 2016).

1.8.1. Puzolanik Malzemeler

Puzolanlar, tek başlarına bağlayıcı özeliği olmayan veya çok az bağlayıcılık özeliği sergileyen, ancak ince taneli olduklarında ve sulu ortamlarda kalsiyum hidroksitle bir araya geldiklerinde, hidrolik bağlayıcı özellik kazanan silisli ya da alüminli malzemeler olarak bilinmektedirler. Puzolanlar, büyük ölçüde içerdikleri silis ile alüminin yanı sıra; demir oksit, alkaliler, karbon ve kalsiyum oksit barındırırlar. Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Erdoğan, 2016).

1.8.2. Doğal Pozolanlar

Doğada tabi halde bulunup öğütülerek ince taneli şekle getirildikten sonra kalsiyum hidroksit ve su ile bir araya getirildiklerinde hidrolik bağlayıcı niteliği kazanan, silisli ve alüminli malzemelere, doğal pozolanlar denilmektedir. Volkanik orjinli malzemeler (volkanik camlar ve volkanik tüfler) öğütülerek en az Portland çimento boyutuna getirilmelidirler. Diğer yandan killer şeyller ve diatomlu topraklar önce ısıtılma tabi tutularak ve öğütüldükten sonra pozolanik özellik kazanırlar (Erdoğan, 2016).

1.8.2.1. Doğal Pozolan Tipleri

Volkanik orjinli pozolanlar; doğal pozolanların çoğunluğu, volkanik orjinli pozolanlardan oluşmaktadır. Silisli ve alüminli bileşimlerinden oluşan magma, volkanik faaliyetlerin sonucunda yüzeye lav halinde çıktığında, hızla kristalleşerek amorf bir yapıya sahip olur. Püskürtme faaliyeti sırasında ortaya çıkan gazlar, malzemenin gözenekli ve geniş yüzey alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Yüzey alanların geniş ve düzensiz olması sebebiyle alüminli silisler sulu ortamda kalsiyum iyonlarıyla rahatlıkla reaksiyona girebilmektedirler.

Pişirilmiş kil ve şeyl; silisli ile alümin içeren kil ve şeyl minareleri kristal bir yapıya sahiptirler. Ancak pozolanik özellik taşımazlar. Bu malzemeler, bir-iki saat süresince, 700-900 °C sıcaklığa tabi tutularak, amorf ya da yarı amorf hale getirilirler ve pozolanik özellik kazandırılır.

Diatomlu Topraklar; silisli diatom kalıntıları sayesinde amorf bir yapıya sahiptirler. Bazı diatomlu topraklar, 760-1000°C sıcaklıkta pişirildikten sonra, öğütülmeden ya da öğütülerek pozolanik katkı hale getirilebilmektedir (Erdoğan, 2016).

1.8.2.2. Doğal Puzolanların Kimyasal Bileşenleri

Doğada bulunan bazı puzolanların oksit miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi, doğada bulunan puzolanların yapısında bulunan temel oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ile Fe_2O_3 ’dir. Bu oksitlere ek olarak %20 civarında CaO bulunmaktadır (Erdoğan, 2016).

Tablo 2. Bazı Doğal Puzolanlardaki Oksitlerin Miktarı (%)

Oksitler	Volkanik cam	Volkanik tuf	Diatomlu topraklar	Pişirilmiş kil
SiO_2	65.1	52,1	86	42.2
Al_2O_3	14.5	18.3	2.3	16.1
Fe_2O_3	5.5	5.8	1.8	7
CaO	3	4.9	-	21.8
MgO	1.1	1.2	0.6	1.9
Alkali	6.5	6.6	0.4	1.3

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.8.2.3. Doğal Puzolanların Beton Özelliklerine Etkileri

İnce tane durumundaki puzolan katkıları; taze betonun işlenebilirliği, priz süresi, terleme ve kıvam gibi özellikleri ile sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkilemektedir (Erdoğan, 2016).

Puzolan katkıları taze beton ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Doğal Puzolanların Beton Üzerindeki Etkisi

Beton Üzerindeki Olumlu Etkileri
• Taze haldeki betonda işlenebilirliği artırır. • Taze betonda terlemeyi düşürür. • Taze betonda hidratasyon ısınısını düşürür ve kütle betonlarda çatlak oluşumunu engellemektedir. • Sertleşmiş betonda permeabilityi düşürmektedir. • Sertleşmiş betonda alkali-silika reaksiyonunu (ASR) düşürmektedir. • Sertleşmiş betonda sülfatlara karşı dayanıklılığı artırmaktadır. • Daha ekonomik beton üretimi sağlamaktadır.
Beton Üzerindeki Olumsuz Etkileri
• Taze betonda, özellikle soğuk havalarda, piriz süresini geciktirmektedir. • Betonun erken yaştaki dayanım hızını düşürmektedir. • Betonda belirli bir oranda sürüklenmiş hava sağlamak için daha fazla sürükleyici katkı maddesi ihtiyacına sebep olmaktadır.

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.8.3. Uçucu Küller

Elektrik enerjisi üretimi esnasında oluşan bir yan ürün malzemesidir. Nükleer santrallerde Elektrik enerji üretimi için pulverize kömür kullanılmaktadır. Pulverize kömürün yanmasıyla, çoğunluğu ince ve bir miktar biraz daha iri kül oluşumu gerçekleşmektedir. İnce küller yakıt gazlarıyla beraber uçarak bacadan dışarı çıkma eğilimi gösterirken, biraz daha iri olan küller ise ocağın tabanına taban külü olarak düşmektedirler. Atık malzeme olarak oluşan uçucu küller yaklaşık %75-%80 arasında gazlarla birlikte dışarıya çıkma eğilimi gösteren taneciklerden oluşur. Uçucu küllerde yüksek miktarda bulunan oksitler $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ile Fe_2O_3 'dir. Bu oksitlere ilaveten bir miktar CaO-MgO-C ve Na_2O bulunmaktadır. Uçucu küller büyük oranda amorf turlar ve bu oran %60~%90 civarındadır. Geri kalanı kristal yapı özelliğine sahiptirler. Tane şekilleri ise küresel ve

boyutları 1-150 µm arasında değişkenlik göstermektedir. Yoğunlukları ise 2,1- 2,7 g/cm² arasında yer almaktadır (Erdoğan, 2016).

1.8.3.1. Uçucu kül Sınıfları

ASTM C 618 no'lu standartta uçucu küller, F ve C olarak iki farklı grupta değerlendirmektedir. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları Şekil 19' da gösterilmiştir.

Ancak uçucu küller %10'dan daha az CaO içerirse düşük kireçli, %10'dan daha fazla CaO ihtiva ederse yüksek kireçli olarak bilinmektedir.

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğe sahip.
C	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \%50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerde elde edilmekte; puzolanik özeliğin yansıra kendiliğinde bir miktar bağlayıcı özeliğine sahip

Şekil 19. ASTM Göre Uçucu Kül Sınıfları

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.8.3.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Uçucu küllerin kimyasal bileşenleri kullanılan kömürün yapısı, jeolojik oluşumu, kömür hazırlama, yanma şekli, toz kaplama ve desülfürizasyon gibi yapı ve koşullarına bağlıdır. Şekil 20'de farklı termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşenleri gösterilmektedir (Akyüncü, 2012).

F tipi uçucu küller CaO oranı %10'dan daha düşüktür. Bu nedenle sadece puzolanik özellik gösterirler. C tipi ucu küllerde ise CaO oranı %10'dan fazladır. Bu nedenle bir miktar bağlayıcılık özelliği göstermektedirler (Erdoğan, 2016).

Bileşen	F Sınıfı Kül (%) (CaO < % 10)	C Sınıfı Kül (%) (CaO > % 10)
SiO ₂	43.6-64.4	23.1-50.5
Al ₂ O ₃	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe ₂ O ₃	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na ₂ O	0-2.8	0.4-1.9
KK	0.4-7.2	0.3-1.9

Şekil 20. Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Kaynak: Akyüncü, 2012

1.8.3.3. Uçucu Küllerin Beton Üzerindeki Etkileri

Uçucu küllerin; taze betonun işlenebilirliği, piriz süresi, terleme, kıvam özelliklerine, sertleşmiş betonun ise dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerine etkisi bulunmaktadır. Uçucu küllerin taze beton ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri

Beton Üzerindeki Olumlu Etkileri
- Taze haldeki betonda işlenebilirliği artırır. - Taze betonda terlemeyi düşürür. - Taze betonda hidratasyon ıslısını düşürür ve kütle betonlarda çatlak oluşumunu engellemektedir. - Sertleşmiş betonda permeabiliteyi düşürmektedir. - Sertleşmiş betonda sülfatlara karşı dayanıklılığı artırmaktadır. - Daha ekonomik beton üretimi sağlamaktadır.
Beton Üzerindeki Olumsuz Etkileri
- Taze betonda piriz süresini geciktirmektedir. Soğuk havalarda priz süresi daha fazla sorun yaratabilmektedir. - Betonun erken yaşta dayanım hızını düşürmektedir. - Daha fazla kür ihtiyacına sebebiyet vermektedir. - Betonda belirli bir oranda sürüklenmiş hava sağlamak için daha fazla sürükleyici katkı maddesi ihtiyacına sebep olmaktadır.

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.8.4. Silis Dumanı

Silis dumanı, silikon metalleri veya silikonlu metal alaşımların imalatları esnasında meydana gelmektedir. Bu metallerin üretiminde yüksek miktarda gazlar meydana gelmektedir. Bu gazlar %85-%95 civarında silis içermektedir ve bu gazların hızla soğutulup yoğunlaştırmasıyla amorf yapılı çok küçük tanecikli malzemeler oluşmaktadır. Oluşan bu malzemelere yoğunlaştırılmış silis dumanı ya da mikrosilis denilmektedir. Bu malzemelere mikrosilis, silis tozu, silika fume gibi isimler de verilmektedir. Silis dumanı amorf yapısı sayesinde ve SiO_2 içermesiyle çok iyi puzolanik bir malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi kalsiyum hidroksit sulu ortamda bir araya geldiğinde mükemmel hidrolik bağlayıcılık gösterirler. Genellikle beton karışımlarındaki çimento miktarını, yaklaşık %10 oranında azaltmaktadır. Azaltılan çimento yerine bu puzolanik malzeme kullanılmaktadır. Betonların gerek erken yaş dayanımını gerek nihai mukavemetini artırmaktadır (Erdoğan, 2016).

1.8.4.1. Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri

- Açık griden koyu griye kadar değişkenlik gösterirler. Karbon miktarın artırmasıyla koyuluk miktarı da artmaktadır.
- Silis dumanının tanecik boyutları 0,1 – 0,2 μm kadardır.
- Silis dumanı 2,2 – 2,3 civarında özgül ağırlığına sahiptir.
- Silis dumanı gevşek birim ağırlığı 240 – 300 kg/m^3 civarındadır (Erdoğan, 2016).

1.8.4.2. Silis Dumanının Kimyasal Kompozisyonu

Silis dumanının içerdiği SiO_2 miktarı, genellikle %85'in üzerindedir. Bununla beraber çok az oranlarda başka maddeler de içermektedir. Şekil 21'de; ABD, Norveç ve Türkiye'de üretilen betonlarda, silis dumanının kimyasal kompozisyonu gösterilmektedir.

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	90.0 - 93.0	90.0 - 96.0	93.0 - 95.0
C	1.3 - 2.6	0.5 - 1.4	0.8 - 1.0
Fe ₂ O ₃	0.4 - 0.7	0.2 - 0.8	0.4 - 1.0
Al ₂ O ₃	0.5 - 1.6	0.5 - 3.0	0.4 - 1.4
MgO	0.3 - 0.5	0.5 - 1.5	1.0 - 1.5
CaO	0.5 - 0.8	0.1 - 0.5	0.6 - 1.0
Na ₂ O	0.1 - 0.3	0.2 - 0.7	0.1 - 0.4
K ₂ O	1.0 - 1.2	0.4 - 1.0	0.5 - 1.0
S	0.1 - 0.2	0.1 - 0.4	0.1 - 0.3
(kızdırma kaybı)	1.4 - 2.8	0.7 - 2.5	0.5 - 1.0

Şekil 21. Silis Dumanlarının Kimyasal Kompozisyonları

Kaynak: Erdoğan, 2016

Silis dumanlarında SiO₂ + Al₂ + Fe₂O₃ oranı yüksek olması puzolanik özelliği daha iyi olması sağlamaktadır (Erdoğan, 2016).

1.8.4.3. Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Silis dumanının beton üzerinde birçok olumlu ve olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu etkiler Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. Silis Dumanının Beton Üzerindeki Etkileri

Olumlu Etkileri
• Beton basınç mukavemetini artırır. • Taze betonda terleme ile ayrışmayı düşürür. • Hidratasyon ısını düşürür. • Sertleşmiş betonda permeabiliteyi düşürür. • Sertleşmiş betonda ASR’yi azaltmaktadır. • Sertleşmiş betonda sülfatlara karşı dayanımını artırır.
Olumsuz Etkileri
• Beton üretimi esnasında yüksek miktarda suya ihtiyaç duyulur ve su ihtiyacını telafi etmek için daha fazla kimyasal katkı kullanımı gerektirir. • Silis dumanı çok tanecikli yapıda olduğundan betonda terlemeyi azaltır. Bu da beton yüzeyinin düzeltilmesini zorlaştırmaktadır. • Plastik büzülme oluşur ve çatlak miktarını artırır. • Silis dumanı, betonun rengini etkilemektedir. Daha koyu bir beton üretilmesine neden olur.

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.8.5. Öğütülmüş Granülü Yüksek Fırın Cürufu

Demir üretmek için demir cevheri yüksek fırınlarda yaklaşık 1600°C de ısıtılmaktadır. Bu şekilde oksijen ve diğer yabancı maddelerden arındırılmaktadır. Kok kömürüyle ısıtılan cevherle beraber kalker taşı da kullanılmaktadır. Bu sayede bazı yabancı maddeler artırılmaktadır. Sıcaklığın etkisiyle kullanılan kömürün karbonu ile demir oksitteki oksijen

birleşerek karbon monoksit ile karbon dioksit gazları oluşturarak fırın dışına çıkmaktadır. Geriye demir ile eriyik halde olan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO ve S yabancı maddeler kalmaktadır. Demirin yoğunluğu yüksek olduğunda, fırının alt bölümünde ve yoğunluğu düşük olan yabancı maddeler, demirin üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer maddeler ayrı ayrı fırının dışına çıkartılmaktadır. Elde edilen yabancı maddeler topluluğuna, yüksek fırın cürufu denilmektedir. Yüksek fırın cürufu, fırında atık malzeme olarak çıkartılan yaklaşık sıcaklığı 1500°C derece civarındır. Yavaş ya da hızlı soğutulmaya bırakıldığında kristal bir yapıya sahip olurlar. Ancak eriyik cüruf, suyla hızla soğuk işleme tabi tutulduğunda iri ve ufak boyutlu kum boyutunda granül hale gelmekte bu işlem sırasında amorf bir yapı kazanmaktadır. Amorf yapılı bu malzeme, büyük oranlarda SiO₂ ile Al₂O₃ içermektedir. Granül halde olan bu malzeme öğütülerek çok küçük boyutlara getirildiğinde uçucu küller ve puzolanların özelliklerine benzer özellik göstermektedir. CaO içermesi, bir miktar bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır (Erdoğan, 2016).

1.8.5.1. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu

ABD ve Kanada, Güney Afrika, Avusturalya ile Türkiye'deki yüksek cürufun kimyasal kompozisyonu % olarak Şekil 22'de verilmiştir.

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye
CaO	29 - 50	30 - 40	39 - 44	34 - 41
SiO ₂	30 - 40	30 - 36	33 - 37	34 - 36
Al ₂ O ₃	7 - 18	9 - 16	15 - 18	13 - 19
Fe ₂ O ₃	0.1 - 1.5	-	0 - 0.7	0.3 - 2.5
MgO	0 - 19	8 - 21	1 - 3	3.5 - 7
MnO	0.2 - 1.5	-	0.3 - 1.5	1.0 - 2.5
S	0 - 2.0	1.0 - 1.6	0.6 - 0.8	1 - 2

Şekil 22. Yüksek Fırın Cürufalarının Kimyasal Kompozisyonları

Kaynak: Erdoğan, 2016

Şekil 22’de görüldüğü gibi yüksek fırın cüruflarında en çok CaO, SiO₂ ve AlO₃ oksitleridir. CaO %30- %40 civarlarında yer almakta bu da yüksek fırın cürufu bir miktar bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır.

1.8.5.2. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkileri

Yüksek fırın cürufun beton üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri bulunmaktadır. Tablo 6’da öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkileri kısaca gösterilmiştir.

Tablo 6. Yüksek Fırın Cürufu Beton Üzerindeki Etkileri

Yüksek Fırın Cürufun Beton Üzerindeki Olumlu Etkileri
• Taze betonda işlenebilirliği daha iyi hale getirmektedir. • Taze betonda priz süresini uzatmaktadır. • Betonda terleme miktarını düşürmektedir. • Betonda hidrasyon esnasında oluşan ıstıyı düşürmektedir. • Sertleşmiş betonda permeabiliteyi düşürmektedir. • Sertleşmiş betonda sülfatlara karşı direncini artırmaktadır.
Yüksek Fırın Cürufun Beton Üzerindeki Olumsuz Etkileri
• Soğuk havalarda betonun priz süresini uzatmaktadır. • Betonda daha çok hava sürükleyici katkı kullanmasına neden olmaktadır. • İlk zamanlarda beton dayanım artışını yavaşlatmaktadır.

Kaynak: Erdoğan, 2016

1.9. Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkılar çoğunlukla sıvıdır. Toz halde olan kimyasal katkı maddeleri de bulunmakla birlikte kullanımı oldukça azdır. Sıvı kimyasal katkı maddeleri, beton karışım suyuna, çimentonun ağırlıkça yüzdesi kadar ilave edilir. Kimyasal katkı malzemeleri, Lignin Melas, Naftalin, Sülfonat, Melamin Sülfonat, Vinil Kopolimer ve Modifiye Karboksilat esaslı olarak sınıflanmaktadır.

Kimyasal katkıları; betonun piriz süresini hızlandırmak, piriz süresini geciktirmek, karışım suyunu düşürmek, akışkanlık sağlamak, sertleşmiş betonda su geçirimsizliği sağlamak, donatılarda korozyonu yavaşlatmak ve basınç dayanımı artırmak gibi birçok özelliklerini etkilemektedir (Şimşek, 2020).

1.9.1. Piriz Hızlandıran veya Geciktiren Katkılar

Piriz hızlandırıcı veya piriz geciktirici kimyasal katkıları, uygun olmayan hava şartlarında imalatı gerçekleştirilecek betonlarda kullanılır. Sıcak havalarda ve uzun mesafeye taşınacak betonun kıvam kaybını önlemek için geciktirici piriz süresini geciktirecek kimyasal katkıları kullanılır. Kış aylarında ise betonun erken piriz alması için piriz süresini azaltan kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Piriz hızlandırıcı ve piriz geciktirici kimyasal katkıların kullanım alanları Tablo 7’de kısaca belirtilmiştir (Şimşek, 2020; TS EN 934-2, 2011).

Tablo 7. Piriz Hızlandırıcı ve Piriz Geciktirici Katkıların Kullanım Alanları

Piriz Geciktirici Katkı Maddelerin Kullanım Alanları	Piriz Hızlandırıcı Katkıların Kullanım Alanları
Uzun mesafeye taşınan betonlarda,	Erken kalıp açma durumunun söz konusu olduğu donatılı ve donatısız betonlarda,
Zor yerleştirilen betonlarda,	Su/çimento oranı az ve belli miktarda akışkanlık istenilen betonlarda,
Soğuk derzlerin oluşumu önlemek için,	Çimento hidrasyonunun hızlandırılarak, betonun piriz süresinin azaltılması erken yaş mukavemetinin artırılması istenen betonlarda,
Hava sıcaklığının yüksek olduğu zamanlardaki beton dökümlerinde,	
Beton döküm süresinin uzun olduğu yapılarda.	Prefabrik beton imalatlarında.

Kaynak: Şimşek, 2020

1.9.2. Antifiriz, Piriz Hızlandırıcı, Su Azaltıcı, Akışkanlaştırıcı Özellik Gösteren Katkılar

Dört tip özelliğe sahip bu kimyasal katkılar, soğuk havalarda beton dökümlerinde, betonu donma-çözülme etkilerinden korumak için kullanılmaktadır. Su çimento arasındaki reaksiyonu hızlandırıp çimento hidratasyon ısısını artırarak hızlandırır. Bu sayede beton piriz süresi kısılır, suyun donma noktası düşer ve beton erken yaşta mukavemet kazanır (Şimşek, 2020; TS EN 934-2, 2011).

Antifiriz, piriz hızlandırıcı, su azaltıcı, akışkanlaştırıcı özellik gösteren kimyasal katkıların kullanım alanları Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Antifiriz, Piriz Hızlandırıcı, Su Azaltıcı, Akışkanlaştırıcı Özellik Gösteren Katkılar Kullanım Alanları

Kullanım Alanları
• Ön germeli yapılar, prefabrik yapılar, hazır betonlarda ve normal betonlarda, • Pompalanabilir beton imalatlarında, • Soğuk havalarda imalatı gerçekleştirilen betonlarda, • Erken yaşta mukavemet gerektiren imalatlarda, • Erken kalıp açma durumlarında.

1.9.3. Hava Sürükleyici Katkılar

Hava sürükleyici kimyasal katkılar; betonun içinde çok küçük boyutlarda ve eşit dağılımda boşluklar oluşturarak betonun donmaya karşı direncini, geçirimsizliğini ve taze betonda işlenebilirliğini artırmaktadır (TS EN 934-2, 2011; Babadağ, 2009). Hava sürükleyici kimyasal katkıların kullanım alanları Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Hava Sürükleyici Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları

Kullanım Alanları
• Su geçirimsizliği istenen yapılarda (Su depolarında, barajlarda, arıtma tesisleri ve havuzlarda), • Pompalanabilir beton imalatlarında, • Kütle beton imalatlarında, • Suyu maruz yapılarda (köprü, tünel vb.), • Kimyasal etkilere maruz yapılarda. • Donma çözülmeye maruz yapılarda

1.9.4. Su Azaltıcı ve Akışkanlaştırıcı Katkılar

Belirli bir beton karışımında, kıvamı değiştirmeden su miktarını azaltan veya su miktarı değiştirmeden betonda çökme ya da yayılmayı veya her ikisini beraber artıran kimyasal katkılardır. Ayrıca betonun priz almaya başlama ve bitiş sürelerini uzatan katkı türleridir (Şimşek, 2020; TS EN 934-2, 2011).

1.9.5. Betonda Su Geçirimsizlik Katkısı

Sertleşmiş betonun kılcal su emmesini azaltan kimyasal katkılardır. Organik modifiye işlemi görmüş sentetik maddeler içermektedir. Su ve rutubet geçirgenliği azaltan iki farklı tipleri bulunmaktadır (Şimşek, 2020; TS EN 934-2, 2011). Su geçirimsiz kimyasal katkıların kullanım alanları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Su Geçirimsiz Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları

Kullanım Alanları
• Suyu dayanıklı yapılarda, • Donma çözülmeye karşı dayanıklı yapılarda, • Kimyasal ve çevresel etkilere karşı dirençli yapılarda, • Geçirimsiz beton tercih edilen yapılarda.

1.9.6. Betondaki Donatının Korozyon Hızını Yavaşlatan Katkılar

Bu tip kimyasal katkıları, organik ve inorganik maddeler içerir. Bu katkılardaki moleküller dağılarak betonda var olan gözeneklerin içini kaplar. Ayrıca betonarme çeliğın etrafını sararak koruyucu bir tabaka oluşturup korozyona karşı korur (Şimşek, 2020). Bu tip kimyasal katkıların kullanım alanları Tablo 11’de kısaca gösterilmiştir.

Tablo 11. Korozyon Hızını Yavaşlatan Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları

Kullanım Alanları
• Her türlü betonarme çeliğı bulunan yapılarda, • Prefekt beton yapılarında, • Öngermeli beton yapılarında, • Agresif ortamlardan etkilenebilecek betonlu yapılarda.

1.9.7. Hafif Beton Elemanları İçin Köpük Yapıcı Katkıları

Bu tip sentetik köpük yapıcılar hafif ve taşınabilir beton elemanlarında kullanılmaktadır (Şimşek, 2020). Başlıca kullanım alanları Tablo 12’de kısaca gösterilmiştir.

Tablo 12. Köpük Yapıcı Kimyasal Katkıların Kullanım Alanları

Kullanım Alanları
• Tavanların ısı yalıtımında, • Endüstriyel yapıların termik ısı yalıtımlarında, • Akustik ve yalıtım yapılarının tümünde, • Endüstriyel yapıların zeminlerinde beton ağırlığının az olmasının istenildiğı durumda, • Ağır yüklere maruz kalmayacak zeminlerde ve şap betonların yerine, • Yangına doğrudan maruz alanlarda, • Yüksek ve/veya düşük ısılara maruz alanlarda, • Hafif prefekt yapı elemanlarında.

1.9.8. Kendiliğinden Yerleşen Beton İçin Hiper Akışkanlaştırıcı Katkılar

Bu tip kimyasal katkıları; genellikle kendiliğinden yerleşen yüksek mukavemetli beton üretimlerinde kullanılmaktadır. Bu katkıları, modifiye edilmiş polikarboksilik eter polimerlerden oluşturulan yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılarıdır (Şimşek, 2020). Kullanım alanları kısaca Tablo 13’te gösterilmiştir.

Tablo 13. Hiper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkılarının Kullanım alanları

Kullanım Alanları
• Prefabrik yapı elamanların imalatında kullanılacak betonlarda, • Erken yaşta mukavemet kazanması istenilen yapı elamanların betonlarında (özellikle kış aylarında), • Hazır betonlarda.

1.9.9. Yüksek Oranda Su Azaltıcı Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkıları

Moleküler ağırlıkları yüksek ve yüksek miktarda akışkanlaştırıcı sağlayan sentetik polimer içerikli kimyasal beton katkılarıdır. Bu katkıları arttırılmış dağıtma özelliği sayesinde reoplastik beton elde edilmektedir. Soğuk havalarda hidrasyon ısını artırarak, yazın ise hidrasyon ısını düşürerek su/çimento oranını azaltmaktadır (Şimşek, 2020).

İKİNCİ BÖLÜM: MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında; agregaların özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 (2022), elek analizi TS EN 933-1 (2012), taze harç numuneleri için mini çökme–yayılma deneyi ASTM C 1611/C 1611M 205AD (2021), sertleşmiş numuneler de, doymuş kuru yüzey yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk, görünür yoğunluk, porozite ve toplam su emme değerleri ASTM C642 (2013), ultrases geçiş hız deneyi ASTM C597 (2016), tek eksenli basınç dayanımı ASTM C109/109M (2023), prizmatik numunelerde üç nokta eğilme dayanımı TS EN 196-1(2009), standartları baz alınarak yapılmıştır. Ayrıca iç yapı için SEM analizi ve XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

2.1. Materyal

Bu çalışmada; bazalt, Akdağlar doğal kum, dolomit, granit ve kum taşı olmak üzere beş farklı tip ince agrega, Portland çimento CEM I 42.5, yoğunlaştırılmış mikrosilika MasterRoc® MS 610 ve yüksek oranda su azaltıcı ve süperakışkanlaştırıcı kimyasal beton katkısı MasterGlenium ACE 450 kullanılmıştır.

2.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında karışımların tamamında Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasında temin edilen CEM I 42.5 R çimento kullanılmıştır. Çimentonun mekaniksel özellikleri Tablo 14’te, fiziksel özellikleri Tablo 15’te ve kimyasal özellikleri ise Tablo 16’da verilmiştir. Dayanım deneyleri TS EN 196-1 (2009), fiziksel deneyler TS EN 196-3 (2017) ile TS EN 196-6 (2020) ve kimyasal analiz deneyleri TS EN 196-2 (2013) standartlarına göre yapılmıştır. Karışımında kullanılan çimento TS EN 197-1 (2012) standardına uygundur.

Tablo 14. CEM I 42.5 Çimentonun Mekanik Özellikleri

Gün	Standart	Basınç dayanım Sonuçları
2. Gün	$\geq 20,0$ MPa	32,1
7. Gün	-----	48,3
28. Gün	$\geq 42,5$ MPa < 62,5 MPa	

Tablo 15. CEM I 42.5 Çimentonun Fiziksel Özellikleri

		Standart	Sonuçlar
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)			3.12
Piriz (vicat)	Başlama (dak.)	≥ 60	127
	Bitiş (dak.)		175
Hacim Genleşme mm (mm)		≤ 10	1
İncelik	Özgöl Yüzey (cm ² /gr)		3600
	45 µm elek kalıntısı (%)		4.0
	90 µm elek kalıntısı (%)		0.2

Tablo 16. CEM I 42.5 Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Analiz		Standartlar	Analiz Sonuçları
SiO ₂			19.1
Çözünmez Kalıntı (%)		≤ 5,0	0.67
Al ₂ O ₃ (%)			4.97
Fe ₂ O ₃ (%)			3.27
CaO (%)			63.37
MgO (%)			1.25
SO ₃ (%)		≤ 4,0	3.28
Kızdırma Kaybı (%)		≤ 5,0	3.27
Cl		≤ 0,10	0,0397
Na ₂ / K ₂ O			0.25/0.60
Tayin edilmeyen			0.59
S.CaO- Free Lime			1.30
Mineralojik Bileşim	C3 S		59.97
	C2 S		9.63
	C3 A		7.64
	C4 AF		9.95

2.1.2. Mikrosilika

Bu çalışmada, karışımların tamamı Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. firmasından temin edilen MasterRoc® MS 610 adlı, yoğunlaştırılmış mikrosilika kullanılmıştır. Bu malzeme, betonun ara yüzey özelliklerini ve çimento hamurunun mikro yapısını daha iyi hale getirerek basınç ile eğilme dayanımlarını, kırılma mekaniği ve geçirimsizlik gibi teknik özelliklerini artıran, normal ve püskürtme betonlarda kullanılan bir mineral katkıdır. Teknik özellikleri Şekil 23'te gösterilmiştir.

Malzemenin Yapısı	Yoğunlaştırılmış Mikrosilika
Renk	Gri
Yoğunluk	0,55-0,70 kg/litre
Klor Miktarı (EN 480-10)	<0,1 %
Blain (incelik)	>15000 m ² /kg
SIO ₂ Oranı	>%85
CaO Oranı	<%1
SO ₃ Oranı	<%2
0,045 mm'den <Partikül Oranı	<%40
Aktivite Endeksi	<%95
Özgül Ağırlık	2300 kg/m ³

Şekil 23. MasterRoc® MS 610 Yoğunlaştırılmış Mikrosilikanın Teknik Özellikleri

2.1.3. Agregalar

Deneylerde dolgu malzemesi olarak doğal kum, bazalt, dolomit, kumtaşı ve granit olmak üzere beş farklı tipte 0-1 mm boyutlarında ince agregalar kullanılmıştır. Kırklareli ili Vize ilçesi Okçular bölgesinden granit, Tekirdağ ili, Çorlu ilçesi, Kartepe bölgesinden bazalt, Kırklareli ili, Dereköy bölgesinden Dolomit, İstanbul ili, Eyüpsultan ilçesi, Kemerburgaz semti Cendere bölgesinden Kumtaşı ve İstanbul ili, Çatalca ilçesi Ormanlı köyü bölgesinden Doğal Kum temin edilmiştir. Agregaların genel görünümü Şekil 24'te gösterilmiştir.



Şekil 24. Agregaların Genel Görünümü

Agregaların özgül ağırlıkları TS EN 1097-6 (2022) standardına uygun olarak bulunmuştur. Agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri Tablo 17’de gösterilmiştir.

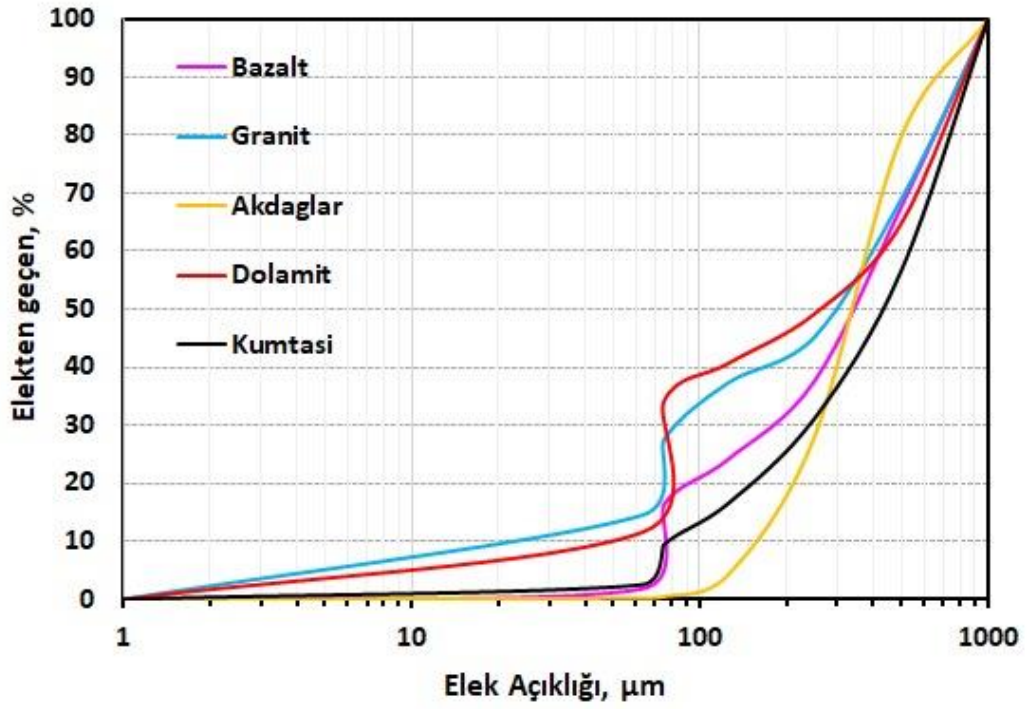
Tablo 17. Agregaların Özgül Ağırlık ve Su Emme Değerleri

Malzemeler	Özgöl ağırlık	Su emme
Akdağlar Doğal Kum	2.60	1.30
Bazalt	2.85	1.83
Dolomit	2.78	1.11
Kumtaşı	2.69	1.98
Granit	2.63	0.66

Tablo 18. Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Agrega cinsi	Elek Açıklığı (mm)					
	Elekte Geçen Malzeme Yüzdesi (%)					
	1	0.5	0.25	0.125	0.075	0.063
Akdağlar Doğal Kum	100	80	28	4	0	0
Bazalt	100	68	38	24	16	2
Dolomit	99	65	49	41	34	12
Kumtaşı	99	57	31	16	9	3
Granit	100	69	45	37	28	14

Deneylerde kullanılan agregaların elek analizi (TS EN 933-1, 2012) göre yapılmış olup sonuçları Tablo 18’de, agregaların gradasyon eğrisi ise Şekil 25’te gösterilmiştir. Karışımda kullanılacak agregaların boyutları birbirine yakın olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 25. Agregaların Gradasyon Eğrisi

2.1.4. Kimyasal Katkılar

Bu çalışmada karışımların tamamında, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. firmasından temin edilen yüksek oranda su azaltıcı, süperakışkanlaştırıcı beton katkısı MasterGlenium ACE 450 kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu katkı TS EN 934-2+A1 (2013) standardına uygundur. MasterGlenium ACE 450 kimyasal katkının teknik özellikleri Şekil 26'da verilmiştir.

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi - Sıvı
Özgül ağırlık (20°C'de)	1.069 – 1.109 kg/l
pH değeri	Yakl. 5-7
Alkali içeriği (%)	≤ 3.00
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10
Korozyon davranışı	Sadece EN 934-1:2008, EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli maddeler	Tamamen Ek-AZ'ye uygundur.

Şekil 26. MasterGlenium ACE 450 Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri

2.1.5. Karışım Suyu

Karışımların tamamında, TS EN 1008 (2003) standardına uygun olan İstanbul ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Karışım Tasarımı

Bu çalışmada, numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R çimento ve yoğunlaştırılmış mikrosilika MasterRoc® MS 610, kimyasal katkı olarak MasterGlenium ACE 450 ve dolgu malzemeleri olarak, bazalt, Akdağlar doğal kum, dolomit, granit ve kumtaşı olmak üzere 5 farklı farklı ince agrega kullanılmıştır. Çimento, mikrosilika, kimyasal katkı ve su miktarları sabit tutularak, her bir agrega tipi için bir grup numune üretimi yapılmıştır.

Karışımlar 4000 g olacak şekilde tasarlanmıştır. 4000 g karışımında % 49 tek tip agrega, % 34,5 çimento % 8,5 yoğunlaştırılmış mikrosilika, % 3 kimyasal katkı ve toplam su bağlayıcı (çimento + mikrosilika) oranı 0,18 olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu değerler deneme ve yanılma yoluyla bulunmuştur. Karışımında kullanılacak malzeme miktarları ve karışım kodları Tablo 19’da gösterilmiştir.

Karışım kodların açılımları şu şekildedir:

AAH: Akdağlar doğal kum agregalı harç.

BAH: Bazalt agregalı harç.

DAH: Dolomit agregalı harç.

KAH: Kumtaşı agregalı harç.

GAH: Granit agregalı harç.

Tablo 19. Tasarım Kodları ve Malzeme Miktarları

Karışım Kodları	Agrega (g)	Çimento (g)	Mikrosilika (g)	Kimyasal Katkı (g)	Su (g)
AAH	1960	1380	340	51.6	309.6
BAH	1960	1380	340	51.6	309.6
DAH	1960	1380	340	51.6	309.6
KAH	1960	1380	340	51.6	309.6
GAH	1960	1380	340	51.6	309.6

Karışımlar; UTEST marka, 5 dm³ kapasiteli, manuel çimento mikseri ile yapılmıştır. Harç üretimi süresince su kaybını engellemek için, malzemeler miksere konulmadan önce, karıştırıcının iç yüzeyi nemlendirilmiştir. Agregas, çimento ve mikrosilika, önce kuru olarak iki dakika karıştırıldıktan hemen sonra, karışım suyunun %75'i ilave edilerek iki dakika karıştırılmıştır. Son olarak karışım suyunun geri kalan %25'lik kısmı, kimyasal katkı ile karıştırılarak harç karışımına ilave edildikten sonra, karışım yeterli kıvama gelene kadar karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Karıştırıcının hacmi küçük olduğundan, her bir agrega gurubu için 4 karışım yapılmıştır. Harç üretim çalışmaları Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27. Harç Üretim Çalışmaları

Harç kıvam deneyi ve sıcaklık ölçümleri yapıldıktan sonra 50 mm küp ve 40x40x160 mm prizma numuneler alınmıştır.

2.3. Karışımların Kalıplanması

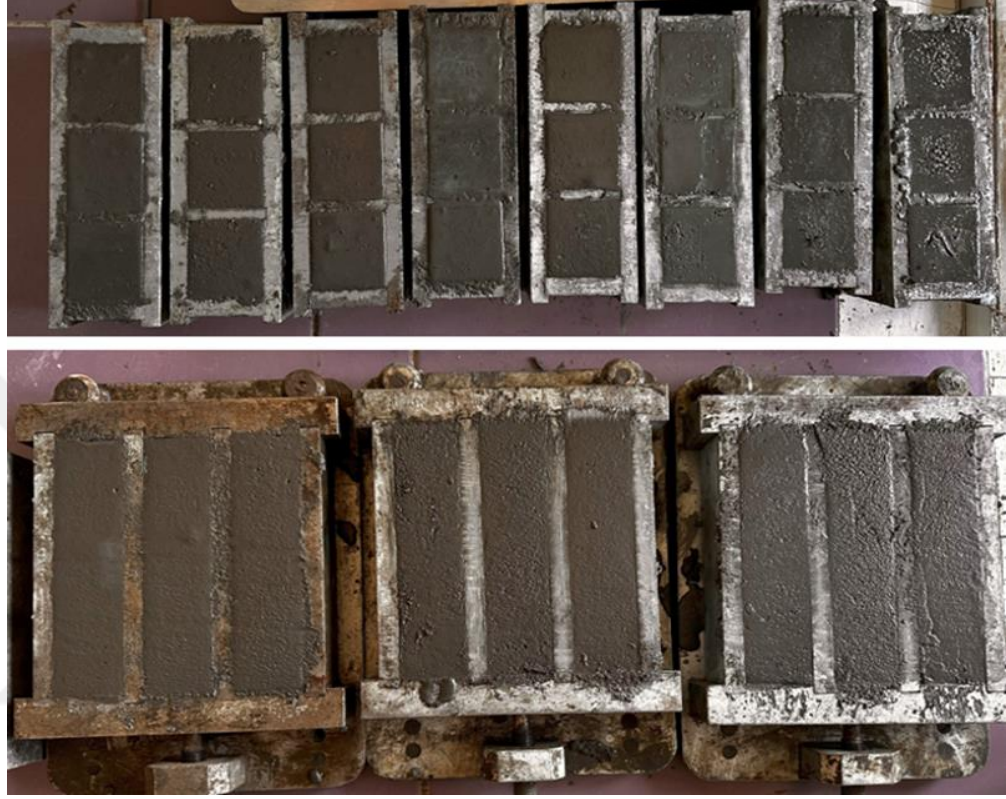
Bu çalışmada üretilen harçlar, kalıplar temizlenip yağlandıktan sonra, numune kalıplarına yerleştirilerek 45 saniye boyunca sarsılma tablası kullanılarak boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuştur. 7, 28, ve 56 günlük deneyler için 3 set ve 90 günlük deneyler için 3 set olmak üzere toplam 6 set 50 mm küp ve 6 set 40x40x160 mm prizma numuneleri alınmıştır. Her bir set 3 numuneden oluşmaktadır. Kalıplanan numuneler Şekil 28’de gösterilmiştir.

2.4. Numunelerin Kür İşlemleri

Bu çalışmada numunelerin tamamı, 24 saat bekletilip püriz aldıktan sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Bu numunelerden 4 seti, oda koşullarında, içilebilir şebeke suyu ile doldurulan havuzda kür işlemine tabi tutularak muhafaza edilmiştir. Numuneler 7, 28, 56 ve 90. gün yaş aldıktan sonra deneyler için kür havuzundan çıkartılıp kurumaları için laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bu numunelerden 90 günlük olanlar referans numune olarak belirlenmiştir.

Numunelerin geri kalan iki seti ise, durabilite özelliklerini belirlemek için bir set 10 %10 Hidroklorik asit (HCl) içeren ve 1 set %10 Sodyum hipoklorit baz (NaClO) içeren

seyreltilmiş çözelti kaplarına alınmıştır. Bu numuneler 90 gün yaş aldıktan sonra deneyler için çözelti kaplarında çıkartılıp su ile yıkandıktan sonra kurumaları için laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Seyreltilmiş çözelti kaplarına yerleştirilen numunelerin görüntüleri Şekil 29’da verilmiştir.



Şekil 28. Kalıplanmış Numune Örnekleri



Şekil 29. Numunelerin Su, HCl Asit ve NaClO Baz Kaplarına Alınması

2.5. Deney Yöntemleri

Bu çalışmada, taze harç numunelerinden sıcaklık ölçümü, mini çökme-yayılma deneyleri, sertleşmiş numunelerde ise yoğunluk tayini, su emme, porozite, ultra ses geçiş hızı, tek eksenli basınç deneyi, üç noktada eğilme deneyi ve iç yap için XRD ile SEM deneyleri yapılmıştır.

2.6. Taze Harç Deneyleri

2.6.1. Sıcaklık ölçümü

Bu çalışmada harç üretimleri esnasında tüm serilerin sıcaklık ölçümleri laboratuvar ortamında termometre ile yapılmıştır. Yapılmış olan bir sıcaklık ölçümü Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 30. Sıcaklık Ölçümü

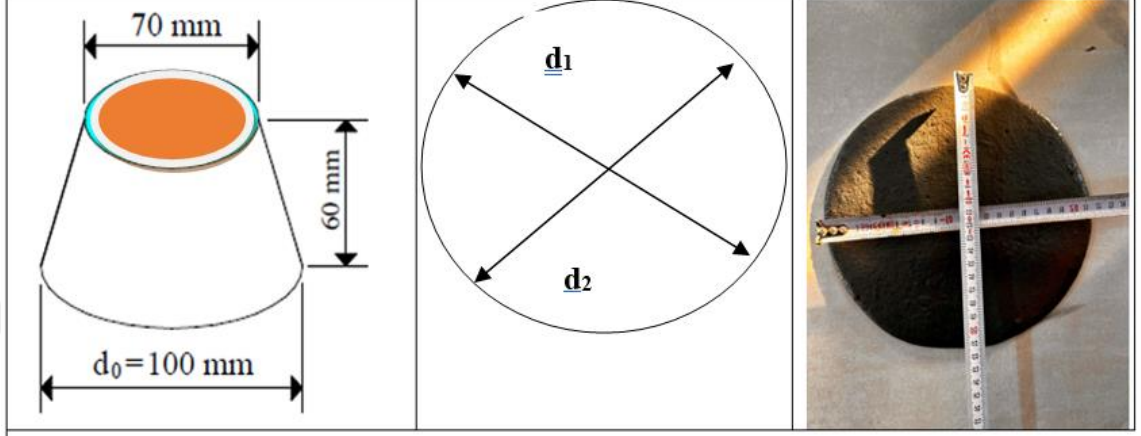
2.6.2. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Bu tez kapsamında mini çökme-yayılma deneyi ASTM C1611/C1611M (2021) standardı baz alınarak gerçekleştirmiştir. Mini çökme-yayılma deneyi, malzemenin akışkanlık ve doldurma yeteneğini hakkında bilgi vermektedir. Mini çökme-yayılma konisine harçların kendi ağırlığıyla doldurulmasından sonra, koni yukarı doğru kaldırılır. Herhangi bir darbe işlemi yapılmadan, malzemenin Şekil 31'de gösterildiği gibi yayılması beklenir. Yayılma çapı, birbirine dik noktalardan ölçülen iki mesafenin ortalaması (1) bağlantısı kullanılarak belirlenir.

Flow $(d_1+d_2) / 2$

(1)

d_1 ve d_2 Numunenin yayılma çapı.



Şekil 31. Mini Yayılma Deneyi

2.7. Sertleşmiş Harç Deneyleri

2.7.1. Yoğunluk, Su Emme ve Porozite Tayini

Bu çalışmada; doymun kuru yüzey yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk, görünür yoğunluk, porozite ve toplam su emme değerleri ASTM C642 (2013) standardı baz alınarak, Arşimet metoduyla belirlenmiştir. Bu deneyde 50 mm küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler, ilgili standartta belirttiği gibi, en az 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra doymun hale getirilerek, Arşimet terazisi yardımıyla, Şekil 32’de gösterildiği gibi, sırasıyla havadaki ağırlığı ve su içerisinde asılı ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra numuneler, $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ sıcaklıkta ve Şekil 32’de gösterilen hava dolaşımli etüvde 24 saat kurutulduktan sonra, etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüştür. (2), (3), (4), (5) ve (6) denklemlerin yardımı ile tüm serilerin doymun kuru yüzey yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk, görünür yoğunluk, porozite ve toplam su emme değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 32. Arşimet Terazisi ve Hava Dolaşımli Etüv

$$\text{Etüv kuru yoğunluk} = W_1/(W_3-W_2) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2)$$

$$\text{Doygun yüzey yoğunluk} = W_3/(W_3-W_2) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} = W_1/(W_1-W_2) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4)$$

$$\text{Su emme (\%)} = [(W_3-W_1)/(W_1)] \times 100 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (5)$$

$$\text{Porozite (\%)} = [(W_3-W_1)/(W_3-W_2)] \times 100 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6)$$

W_1 : Numunenin etüv kuru ağırlığı (g)

W_2 : Numunenin su içindeki ağırlığı (g)

W_3 : Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (g)

2.7.2. Ultrases Geçiş Hız Deneyi

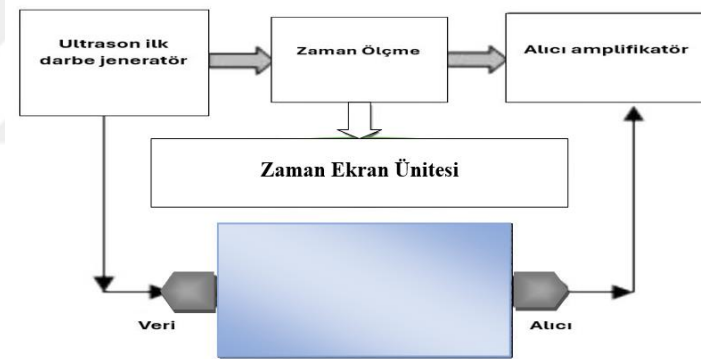
Bu çalışmada; ultrases geçiş hız (UPV) deneyi; 7, 28, 56 ve 90 gün yaş alan 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C597 (2016) standardının ön gördüğü şekilde yapılmıştır. ses geçiş süresi (t, μ s), frekansı 59 μ sec olan CONTROLS model 58 -E4800 tipi ultrases aleti kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı (7) bağlantısı kullanılarak hesaplanmıştır. UPV test düzeneği Şekil 33'te ve UPV ölçümü Şekil 34'te gösterildiği gibi yapılmıştır.

$$V = L/T \quad (7)$$

V: Ultrases geçiş hızı (m/s)

L: Dalgaların kat ettiği mesafe (mm, m)

T: Dalgaların kat ettiği mesafeyi alma süresi (μ , s)



Şekil 33. UPV Test Düzeneği



Şekil 34. Numunelerde UPV Ölçümü

2.7.3. Basınç Deneyi

Bu çalışmada; numunelerin basınç dayanımını belirlemek için, UTEST marka tam otomatik pres makinası kullanılmıştır. Basınç deneyi 50 mm küp numunelerin 7, 28, 56 ve 90 gün yaş aldıktan sonra, ASTM C109/109M (2023) standardın ön gördüğü şekilde, Şekil 35'te gösterildiği gibi yapılmıştır.

Basınç dayanımı, numunenin nihai yük ile kesit alanı arasındaki oran kullanılarak, (8) denklemine göre bulunmaktadır.

$$\sigma = P / A \quad (8)$$

σ : Basınç dayanımı, (MPa)

P : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N)

A : Kesit alan.

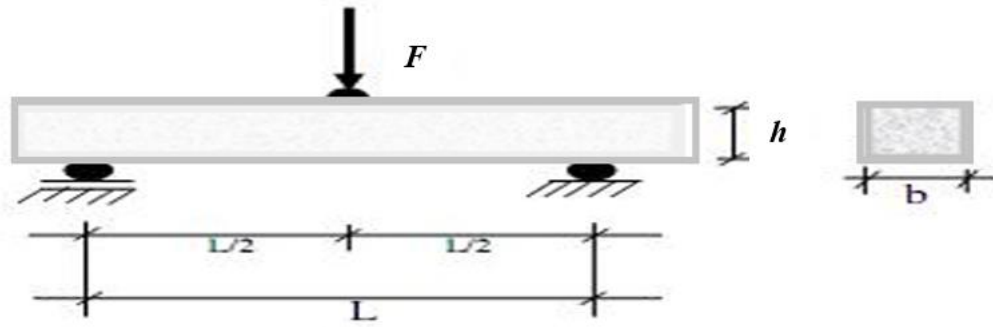


Şekil 35. Basınç Dayanımı

2.7.4. Eğilme Deneyi

Bu çalışmada; eğilme dayanımı, 40×40×160 mm prizmatik numuneler üzerinde 7. gün 28. gün 56. gün ve 90. günlerde MTS lps 589 model makinayla, TS EN 196-1 (2009) standardın ön gördüğü şekilde üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilerek belirlenmiştir.

Deney düzeneği Şekil 36’da ve eğilme dayanım testi Şekil 37’de gösterildiği gibi yapılmıştır. Eğilme dayanımı (8) bağlantısı kullanılarak bulunmaktadır.



Şekil 36. Eğilme Deney Düzeneği

$$\sigma_f = 1.5 \times (F \times L) / (b \times h^2) \quad (8)$$

σ_f : Eğilme dayanımı (MPa).

F : Numunenin kırılmasına sebep olan maksimum yük (N).

L : Destekler arası mesafe (mm).

b : Numunenin genişliği (mm).

h : Numunenin Yüksekliği (mm)



Şekil 37. Eğilme Deneyi

2.7.5. SEM Analizi

SEM analizi, Yıldız Teknik Üniversitesinde Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. SEM analizi, taramalı elektron mikroskobu odaklanmış bir elektron demetiyle numune yüzeyini tarayarak görüntü elde etmek için kullanılır. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon bilgi içeren sinyaller üreten bir yöntemdir. Bu çalışmada 50 mm küp numunelerinin içinde örnek alınarak analiz yapılmıştır.

2.7.6. XRD Analizi

XRD analizi, Yıldız Teknik Üniversitesinde Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır. XRD cihazı, X-ışınlarını toz kırınım ölçüm yöntem özeliği kullanılarak kristal tanelerin sahip olduğu mineralojik bileşimlerinin bulunması yöntemine göre çalışmaktadır. Bu çalışmada 50 mm küp numunelerinin içinde örnek alınıp toz haline getirilerek analiz yapılmıştır.

2.7.7. Durabilite Deneyi

Bu çalışmada; AAH, BAH, DAH, KAH ve GAH gruplarından alınan numunelerin durabilite dayanımlarını belirlemek için %10 Hidroklorik asit (HCl) ve %10 Hipoklorit (NaClO) baz içeren iki farklı seyreltilmiş çözelti kullanılmıştır. Numuneler 90 gün boyunca çözeltilere maruz bırakıldıktan sonra, UPV, tek eksenli basınç, üç nokta eğilme deneyi ve mikro yapı için SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar, referans numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılarak asit ve baz ortamın etkileri araştırılmıştır. Numunelerin muhafaza edildikleri kür suyu ve çözelti sıcaklıkları $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Su, HCl asit ve NaClO boz ortamına 90 gün maruz bırakıldıktan sonraki görüntüleri Şekil 38 ve Şekil 39'da gösterilmiştir.



Şekil 38. (a) Su, (b) HCl Asit ve (c) NaClO Baz, Ortamlarına Maruz Bırakılan Küp Numuneler



Şekil 39. (a) Su, (b) NaClO Baz ve (c) HCl Asit Ortamlarına Maruz Bırakılan Prizma Numuneler

2.7.7.1. Asidik Çözelti

Bir çözeltinin pH değeri 0-7 aralığında ise asit olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada durabilite dayanımı belirlemek için %10 Hidroklorik asit (HCl) içeren seyreltilmiş çözelti kullanılmıştır. Çözeltinin pH değeri 2 olarak ayarlanmıştır. Şekil 40'de, pH ölçümü ve numunelerin kaplara alınma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 40. pH Ölçümü ve Numunelerin Seyreltilmiş HCl Asit içine Alınması

2.7.7.2. Bazik Çözelti

Bir çözeltinin pH değeri 7- 14 aralığında ise baz olarak tanımlanır. Bu çalışmada durabilite dayanımı belirlemek için %10 Sodyum Hipoklorit (NaClO) baz içeren seyreltilmiş çözelti kullanılmıştır. pH değeri 12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 41’da pH ölçümü ve numunelerin çözelti içeren kaplara alınma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 41. pH Ölçümü ve Numunelerin Seyreltilmiş NaClO Baz İçine Alınması

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM: BULGULAR VE TARTIŞMALAR

3.1. Taze Harç Deney Sonuçları

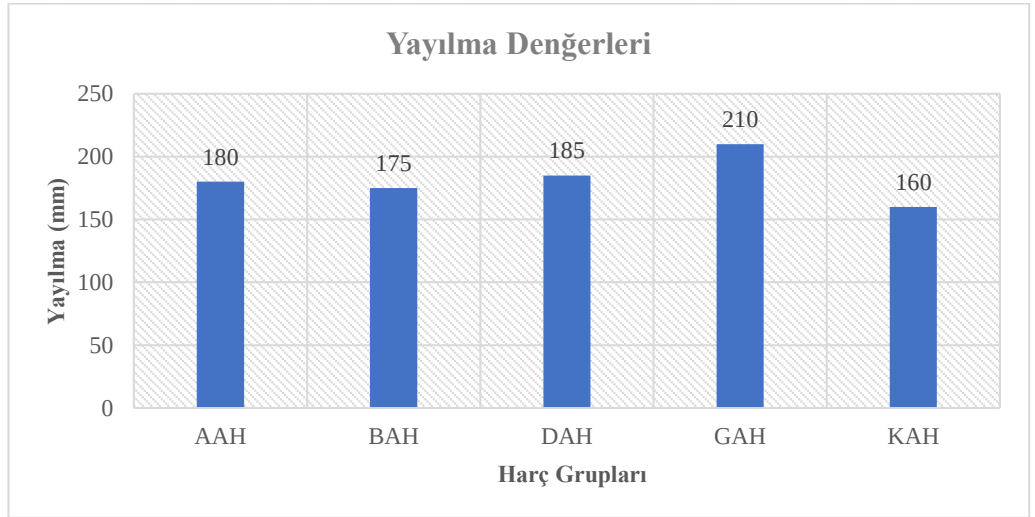
3.1.1. Mini Çökme-Yayılma Deney Sonuçları

Bu deneyde, taze harç numunelerinin işlenebilirlik tayini için ASTM 1611/C 1611M (2021) standardına göre, mini çökme-yayılma yöntemiyle yayılma değerleri bulunmuştur. Deney sonuçları Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 20. Taze Harç Grupların Yayılma Değerleri

Mini yayılma değerleri (mm)				
AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
180	175	185	210	160

Taze harç numunelerin mini yayılma değerleri Şekil 42’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.



Şekil 42. Taze Harç Grupların Yayılma Değerlerinin Karşılaştırılması

Farklı tip agregalar ile üretilen; AAH, BAH, DAH, KAH ve GAH numunelerinin işlenebilirlik değerleri, 160-210 mm arasında değişmektedir. Granit agrega kullanılarak üretilen numuneler (GAH) en yüksek işlenebilirlik değerini verirken, kumtaşıyla üretilen numuneler (KAH) en düşük işlenebilirlik değerlerini vermiştir. Numunelerin su/bağlayıcı

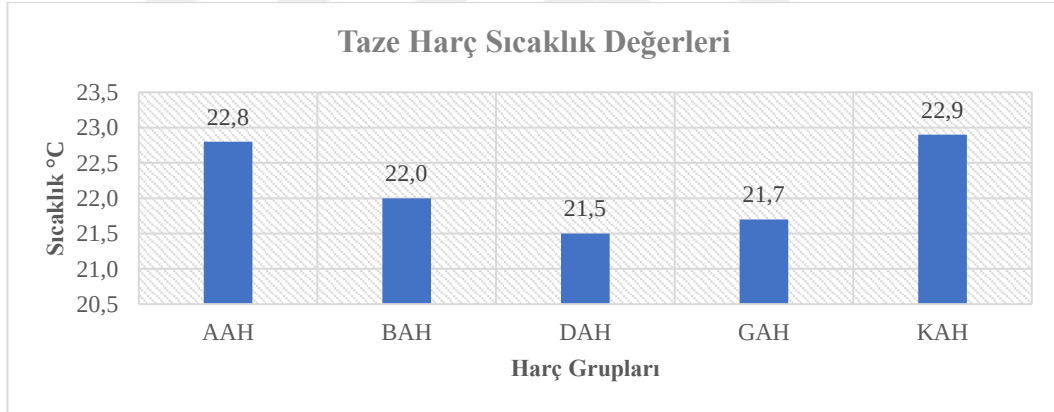
oranları, kimyasal katkı ve kullanılan agrega miktarları aynı olduğundan, harç grupların işlenebilirliği, agregaların su emme miktarıyla ilişkili olduğu gözlemlenmiştir.

3.1.2. Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

Bu deneyde, numunelerin tamamı aynı ortamda termometre ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termometre ile yapılan ölçüm sonuçları Tablo 21’de ve numunelerin sıcaklık karşılaştırılması Şekil 43’de gösterilmiştir.

Tablo 21. Taze Harç Sıcaklık Değerleri

Taze harç sıcaklık değerleri (°C)				
AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
22,8	22	21,5	21,7	22,9



Şekil 43. Taze Harç Numunelerin Sıcaklık Değerlerinin Karşılaştırılması

Bilindiği gibi sıcaklık, priz süresini etkilemektedir. Karışımlarda kullanılan malzemeler laboratuvar ortamında bekletildiğinden ve kullanılan çimento miktarları aynı olduğundan sıcaklık değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

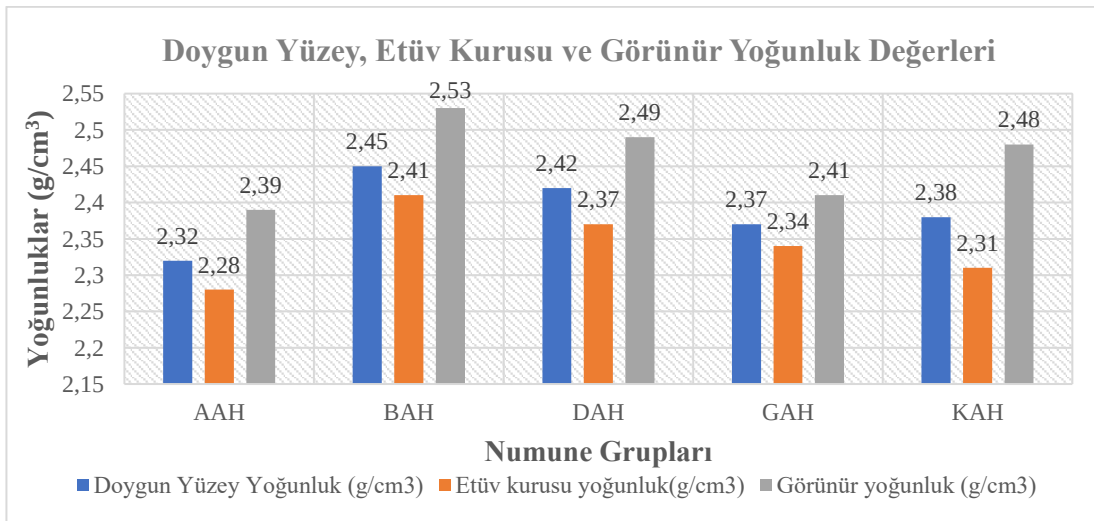
3.2. Sertleşmiş Harç Deney Sonuçları

3.2.1. Yoğunluk Tayini, Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları

Bu deneyde harç gruplarından alınan numunelerde; Arşimet metoduyla 50 mm küp numunelerde, doymun yüzey yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk, görünür yoğunluk, su emme ve porozite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22. Yoğunluk, Su Emme ve Porozite Sonuçları

Deneyler	Harç Grupları				
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Doygun Yüzey Yoğunluk (g/cm ³)	2,32	2,45	2,42	2,37	2,38
Etüv kurusu yoğunluk(g/cm ³)	2,28	2,41	2,37	2,34	2,31
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	2,39	2,53	2,49	2,41	2,48
Su emme (%)	2,04	1,94	1,85	1,19	2,86
Porozite (%)	4,64	4,67	4,39	2,78	6,57



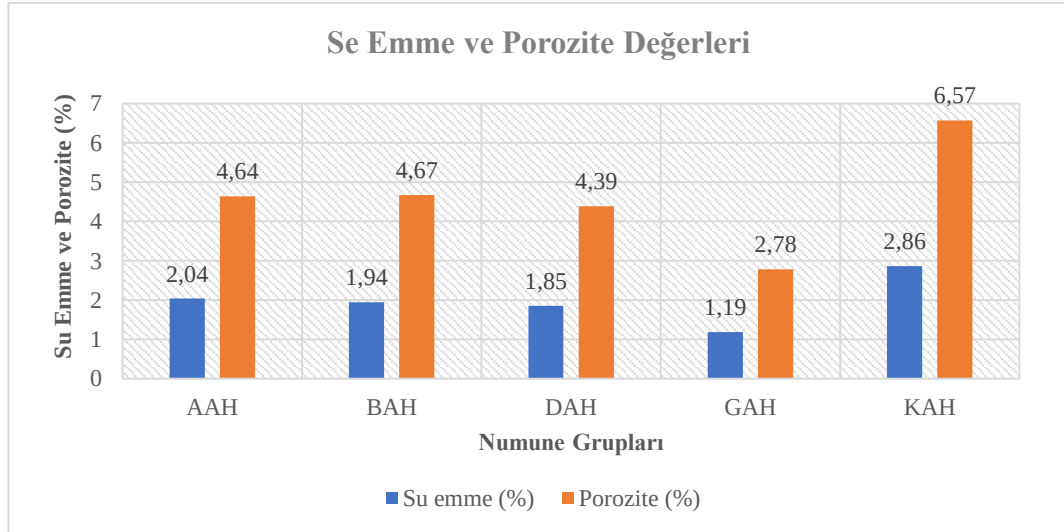
Şekil 44. Harç Grupların Yoğunluk Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 44'te verilen grafikte numunelerin doygun yüzey yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk ve görünür yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır.

Numunelerin doygun yüzey yoğunluk ve görünür yoğunluk sonuçlarına bakıldığında, en yüksek değerleri BAH ve en düşük değerleri ise AAH numuneleri vermiştir. Bazalt içerikli BAH numunelerden sonra, ikinci büyük değerleri DAH, üçüncü büyük değerleri KAH, dördüncü değeri GAH ve en düşük değeri ise AAH numuneleri vermiştir.

Numunelerin en yüksek etüv kurusu yoğunluk değerleri BAH numuneleri verirken, en düşük değerleri AAH numuneleri vermiştir. BAH numunelerden sonra ikinci büyük değeri DAH, üçüncü büyük değeri GAH, dördüncü değeri KAH ve en düşük değeri AAH numuneleri vermiştir.

Numunelerin su emme ve porozite değerlerine bakıldığında, en düşük GAH, en yüksek ise KAH numunelerinde elde edilmiştir. GAH numunelerin etüv kurusu yoğunluğunun, KAH numunelerin etüv kurusu yoğunluğundan fazla olması, elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Karışımlarda kullanılan agregaların yoğunluk ve su emme değerleri, sertleşmiş numunelerden elde edilen doygun yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, etüv kurusu yoğunluk, su emme ve porozite değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Numunelerin su emme ve porozite değerleri Şekil 45'te verilen grafikte karşılaştırılmıştır.



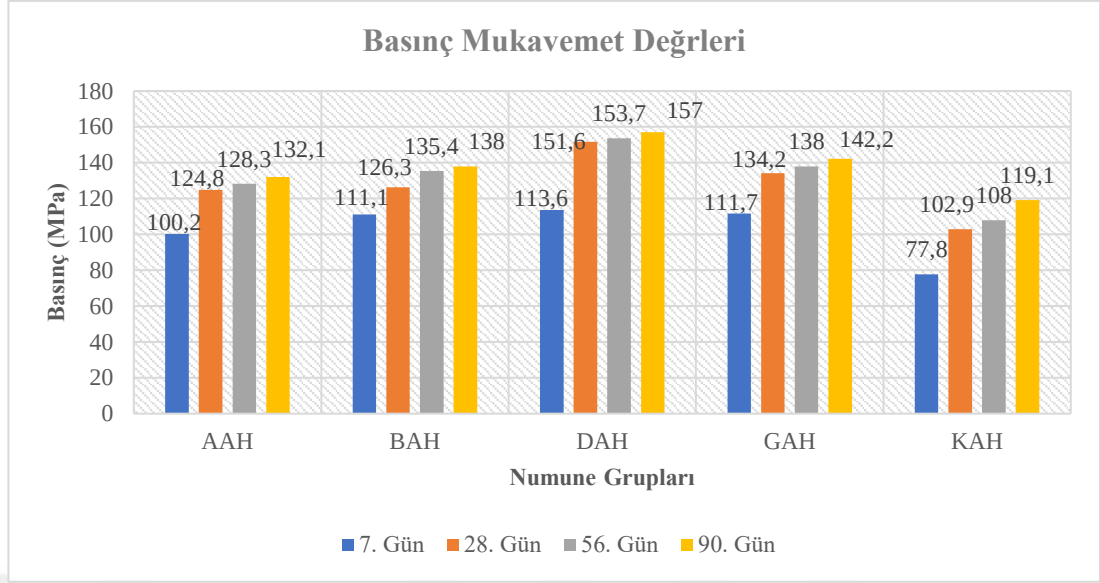
Şekil 45. Su Emme ve Porozite Değerlerinin Karşılaştırılması

3.2.2. Basınç Deney Sonuçları

Bu çalışmada 50 mm küp numunelerin, 7, 28, 56 ve 90 gün yaş aldıktan sonra yapılmış olan basınç deney sonuçları verilmiştir. Numunelerin basınç sonuçları Tablo 23’de gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin basınç mukavemetleri Şekil 46’da verilen grafikte karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları sırasıyla en yüksek mukavemeti DAH, ikinci GAH, üçüncü BAH, dördüncü AAH ve en düşük dayanımı ise KAH numuneleri vermiştir. Numuneler yaş aldıkça mukavemet değerlerin arttığını en yüksek mukavemet değerlerini 90. günde gerçekleştiği görülmektedir.

Tablo 23. Basınç Mukavemet Sonuçları

Numune Yaş Günü	Tek Eksenli Basınç Dayanımları (MPa)				
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
7. Gün	100,2	111,1	113,6	111,7	77,8
28. Gün	124,8	126,3	151,6	134,2	102,9
56. Gün	128,3	135,4	153,7	138	108
90. Gün	132,1	138	157	142,2	119,1



Şekil 46. Basınç Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırılması

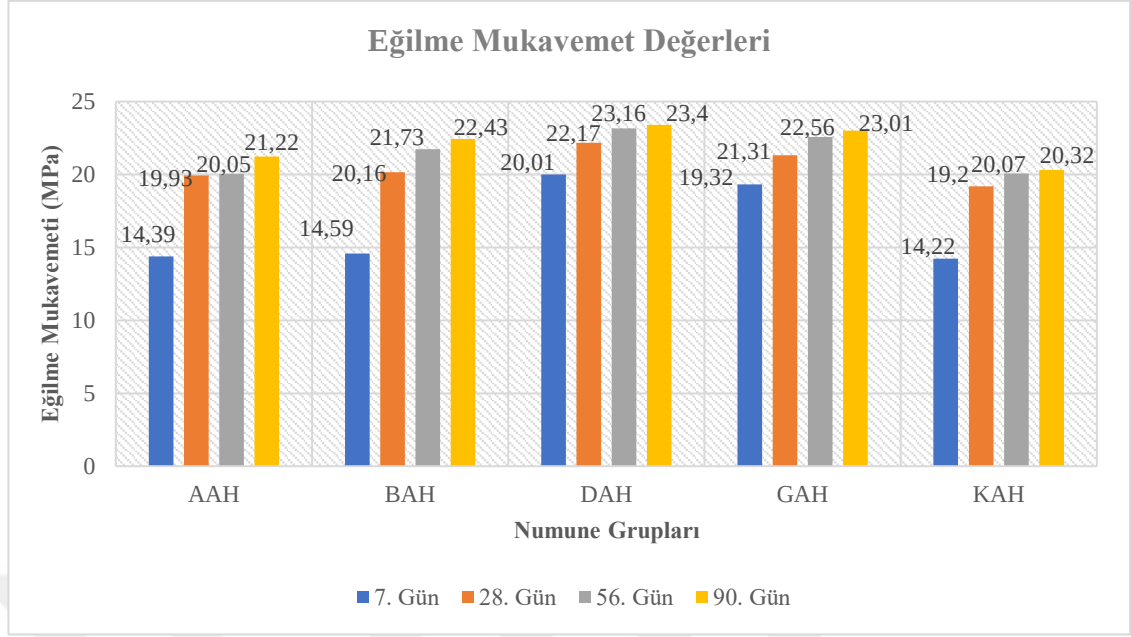
3.2.3. Eğilme Deney Sonuçları

Üç nokta eğilme deneyi İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 7, 28, 56 ve 90 gün yaş aldıktan sonra üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Elde edilen mukavemet sonuçları Tablo 24’de gösterilmiştir. Numunelerin eğilme mukavemet sonuçları Şekil 47’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.

En yüksek mukavemeti DAH numuneleri verirken, en düşük mukavemeti KAH numuneleri vermiştir. Eğilme mukavemet değerleri sırasıyla en yüksek DAH, ikinci GAH, üçüncü BAH, dördüncü AAH ve en düşük ise KAH numuneleri vermiştir. Numuneler yaş aldıkça eğilme mukavemet değerlerinin arttığı, en yüksek mukavemet değerlerine 90. günde ulaştığı görülmektedir.

Tablo 24. Eğilme Mukavemet Sonuçları

Numune	Eğilme Mukavemetleri (MPa)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
7. Gün	14,39	14,59	20,01	19,32	14,22
28. Gün	19,93	20,16	22,17	21,31	19,20
56. Gün	20,05	21,73	23,16	22,56	20,07
90. Gün	21,22	22,43	23,40	23,01	20,32



Şekil 47. Eğilme Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırılması

3.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

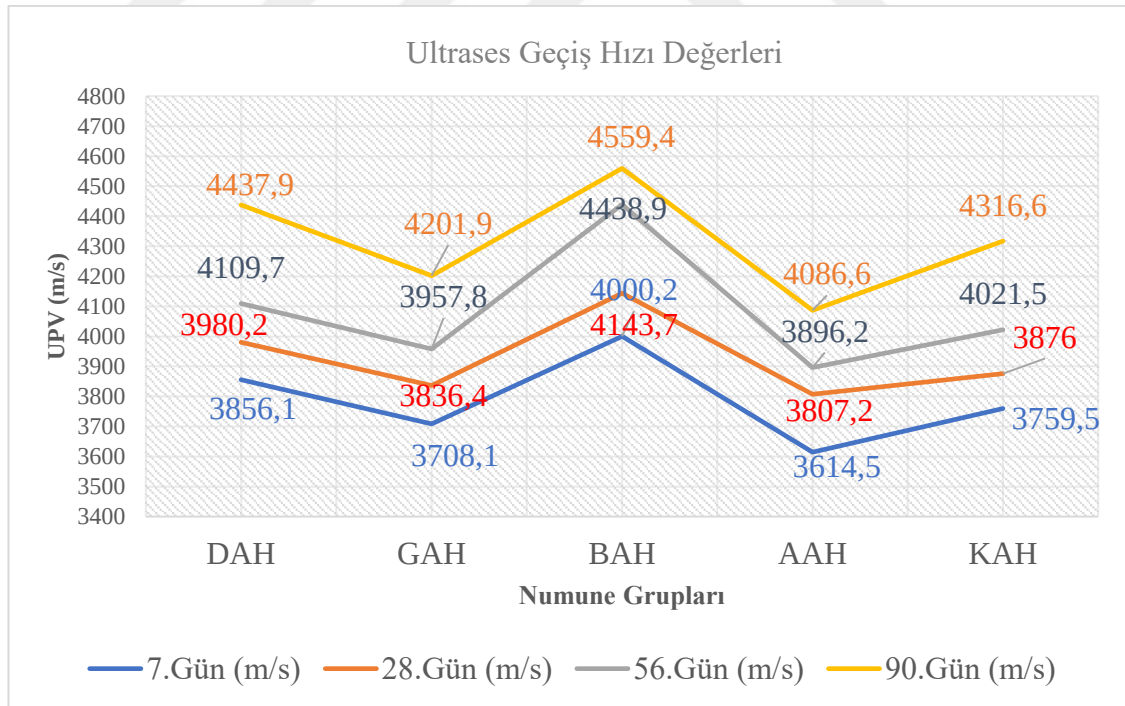
Ultrases geçiş hızı ile sertleşmiş harç numunelerinin yoğunlukları arasında bir ilişki olduğu bilinmektedir. Ultrases geçiş hızının düşük olması, harç numunelerinin boşluklu ve yoğunluğunun düşük olduğu anlamına gelmektedir. Yani yoğunluğu düşük olan ve iç yapısında daha fazla boşluk barındıran numunelerde, ses dalgalarının numunenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçişi, daha uzun sürmektedir. Numunenin içerisinde boşluk miktarı arttıkça, ses dalgalarının hızı daha az olmaktadır. Harç gruplarında ultra ses geçiş hızlarına bakıldığında, en düşük sonucu 3614,5 m/s ile 7 günlük AAH numuneleri verirken, en yüksek sonucu ise 4559,4 m/s değeri ile 90 günlük BAH numuneleri vermiştir. Harç üretiminde kullanılan agrega tipine göre ultrases geçiş hızı farklılık gösterirken, aynı gruptaki numunelerin 7, 28, 56 ve 90 günlük ultrases geçiş hızları kendi içlerinde uyum sağlamıştır. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları Tablo 25'te gösterilmiştir.

Tablo 25. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Numune	UPV Sonuçları (m/s)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
7. Gün	3614,5	4000,2	3856,1	3708,1	3759,5
28. Gün	3807,2	4143,7	3980,2	3836,4	3876,0
56. Gün	3896,2	4438,9	4109,7	3957,8	4021,5
90. Gün	4086,6	4559,4	4437,9	4201,9	4316,6

Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 46'da verilen grafikte karşılaştırılmıştır. Her grupta UPV deneylerinde elde edilen en düşük veriler baz alınmıştır.

Ultrases geçiş hızı sertleşmiş harç numunelerinin yoğunluklarıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yoğunluğa sahip BAH numuneler verirken, en düşük AAH numuneleri vermiştir.



Şekil 48. Ultrases Geçiş Hız Değerlerin Karşılaştırılması

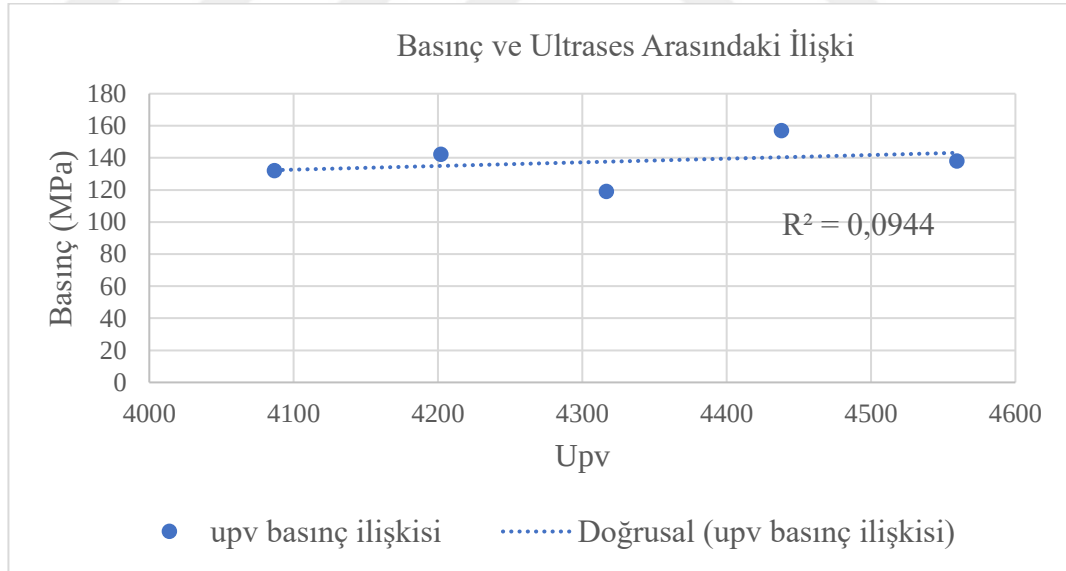
3.2.5. Ultrases ve Basınç Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi

Bu çalışmada ultrases ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi belirlemek için, numunelerin 90 günlük basınç ve ultrases geçiş hız değerleri ilişkilendirilmiştir. Basınç ve ultrases değerleri Tablo 26’da verilmiştir.

Tablo 26. Basınç ve Ultrases Geçiş Hız Değerleri

Numune	UPV Değerleri (m/s)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
90. Gün	4086,6	4559,4	4437,9	4201,9	4316,6

Numune	Basınç Dayanım Değerleri (MPa)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
90. Gün	132,1	138	157	142,2	119,1



Şekil 49. Ultrases Geçiş Hız ve Basınç Dayanım Sonuçlarının İlişkilendirilmesi

Şekil 49’da gerçekleştirilen korelasyon analizi sonucunda numunelerin basınç dayanımları ve ultrases geçiş hız değerleri arasında doğrusal ilişkinin ($R^2 = 0,0944$) zayıf olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise harç gruplarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ve kökenlerinin farklı olmasıdır. Burada hesaplanan R^2 değeri, y’deki değişim

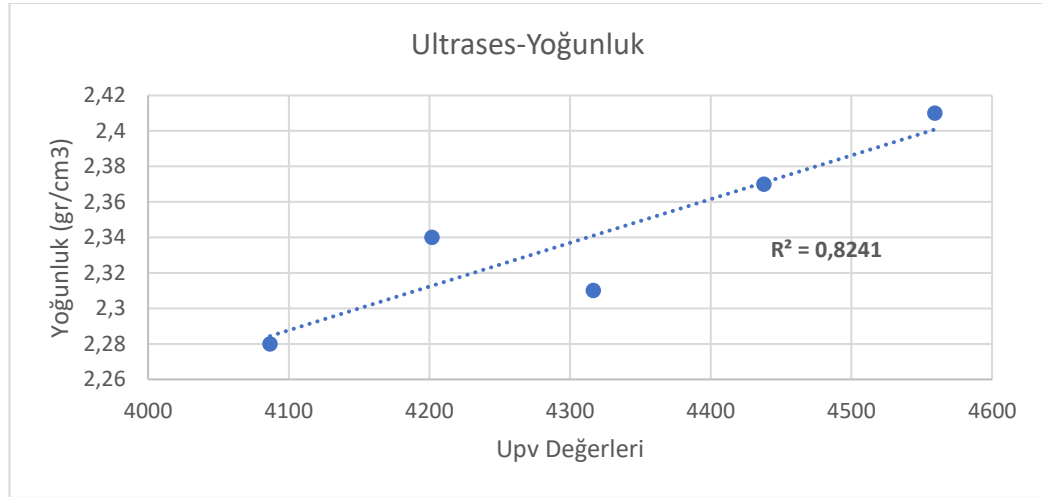
miktarının ne kadarlık bir kısmının regresyon doğrusu tarafından temsil edilebileceğini belirtmektedir.

3.2.6. Ultrases ve Yoğunluk Değerlerinin İlişkilendirilmesi

Bu çalışmada sertleşmiş numunelerinin ultrases geçiş hızı ve etüv kurusu yoğunluk değerleri ilişkilendirilmiştir. Numunelerin 90 günlük sonuçları baz alınmıştır. Numunelerin etüv kurusu yoğunluk sonuçları ve ultrases geçiş hız değerleri Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 27. Harç Etüv Kuru Yoğunluk ve Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Deneyler	Yoğunluğu ve Ultrases Geçiş Hızı değerleri				
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Etüv kurusu yoğunluk (g/cm ³)	2,28	2,41	2,37	2,34	2,31
UPV (m/s)	4086,6	4559,4	4437,9	4201,9	4316,6



Şekil 50. Ultrases Geçiş Hızı ve Yoğunluk İlişkisi

Numunelerin yoğunluk ve ultrases geçiş hız verilerinin ilişkilendirilmesi Şekil 50’de gösterilen grafikte yapılmıştır. Gerçekleştirilen korelasyon analizi sonucunda, yoğunluk ve ultrases geçiş hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ($R^2 = 0,8241$) görülmüştür.

3.2.7. Basınç ve Eğilme Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi

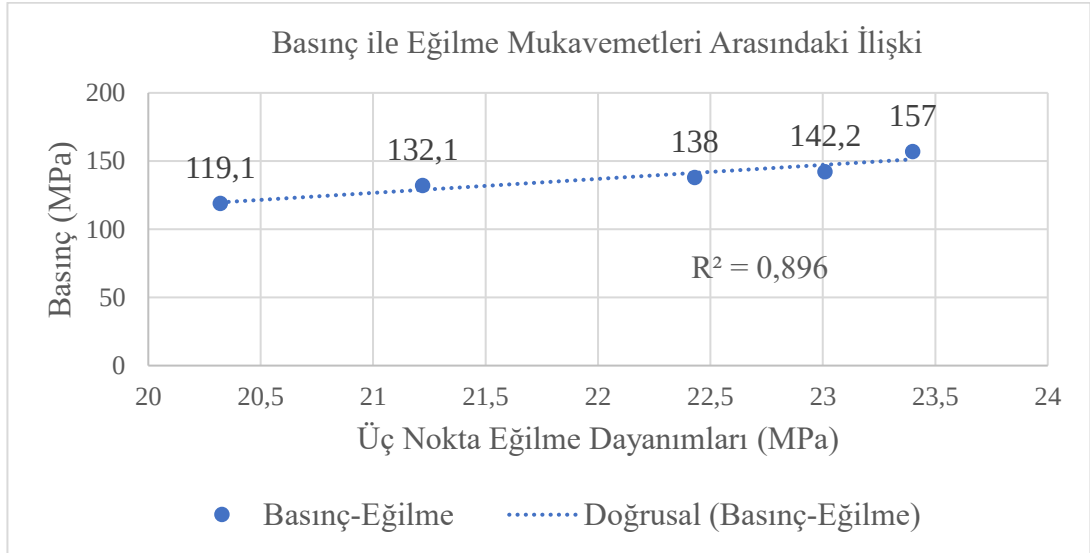
Bu çalışmada basınç ve üç nokta eğilme mukavemetleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için, numunelerin 90 günlük mukavemet değerleri ilişkilendirilmiştir. Basınç ve eğilme mukavemet değerleri Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28 Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri

Numune	Basınç Değerleri (MPa)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
90. Gün	132,1	138	157	142,2	119,1

Numune	Eğilme Değerleri (MPa)				
Yaş Günü	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
90. Gün	21,22	22,43	23,40	23,01	20,32

Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 51’de verilmiştir. Gerçekleştirilen korelasyon analizi sonucunda, harç grupların basınç ve eğilme dayanımları arasında doğrusal bir ilişki ($R^2 = 0,896$) olduğu görülmektedir.



Şekil 51. Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerlerinin İlişkilendirilmesi

3.3. Durabilite Deney Sonuçları

Bu çalışmada durabilite özelliklerini karşılaştırmak için hidroklorik asit ve sodyum hipoklorit baz olmak üzere iki farklı seyreltilmiş çözelti kullanılmıştır. Numuneler 90 gün çözeltilerin maruziyetine bırakıldıktan sonra; UPV, tek eksenli basınç deneyi ve üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Numunelerin iç yapıları çözeltilerden ne kadar etkilendiğini belirlemek için, en yüksek mukavemet değerleri veren DAH ve en düşük değerleri veren KAH numunelerin içinden alınan örneklerde SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar referans numune sonuçlarıyla karşılaştırılarak durabilite özellikleri belirlenmiştir.

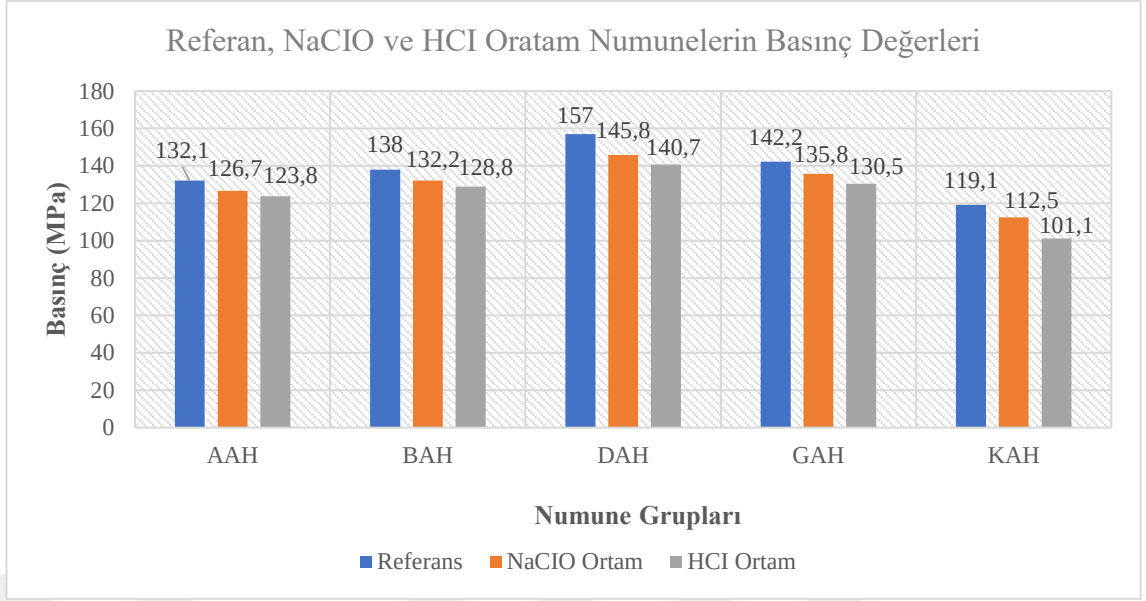
3.3.1. Basınç Deney Sonuçları

Bu çalışmada hidroklorik asit ve sodyum hipoklorit baz ortamlarının maruziyetine bırakılan numunelerin basınç testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar referans numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve azalma yüzdeleri Tablo 29’da gösterilmiştir. Mukavemet sonuçlarına bakıldığında Hipoklorit baz çözeltisine maruz bırakılan numuneler, Hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılan numunelere göre daha az etkilendiği görülmektedir

Tablo 29. Referans, HCI ve NaCIO Ortam Numunelerinin Mukavemet Değerleri

Basınç Değerleri (MPa)					
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Referans	132,1	138	157	142,2	119,1
NaCIO Baz	126,7	132,2	145,8	135,8	112,5
Azalma %	4	4	7	5	6
HCI Asit	123,8	128,8	140,7	130,5	101,1
Azalma %	6	7	10	8	15

Referans numuneler, NaCIO baz ortam ve HCI asit ortam numunelerinin basınç mukavemet değerleri Şekil 52’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.



Şekil 52. Referans, NaCIO Baz ve HCI Asit Ortam Numunelerin Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırması

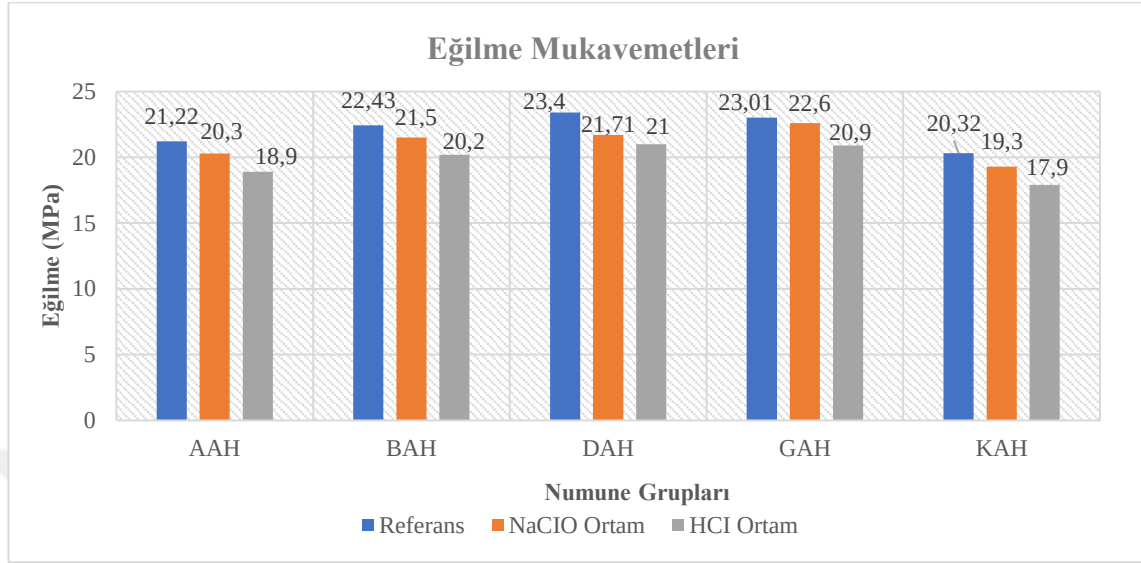
3.3.2. Eğilme Deney Sonuçları

Bu deneyde, referans numuneler, HCI asit ve NaCIO baz ortamlarına maruz bırakılan numuneler üzerinde üç nokta eğilme deney yapılmıştır. Numunelerin eğilme mukavemet sonuçları Tablo 30’da verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi NaCIO baz ortamına maruz bırakılan numunelerin mukavemet değerleri, HCI asit ortamına maruz bırakılan numunelere göre daha az etkilendiği görülmektedir.

Tablo 30. Referans, HCI Asit ve NaCIO Baz Ortam Numunelerinin Eğilme Mukavemetleri

Eğilme Mukavemet Değerleri (MPa)					
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Referans	21,22	22,43	23,40	23,01	20,32
NaCIO Baz	20,30	21,50	21,71	22,60	19,30
Azalma %	4	4	7	2	5
HCI Asit	18,90	20,20	21,00	20,90	17,90
Azalma %	11	10	10	9	12

HCl asit ortam ve NaClO baz ortam maruziyetine bırakılan numuneler ile referans numunelerin Eğilme mukavemet değerleri Şekil 53’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır.



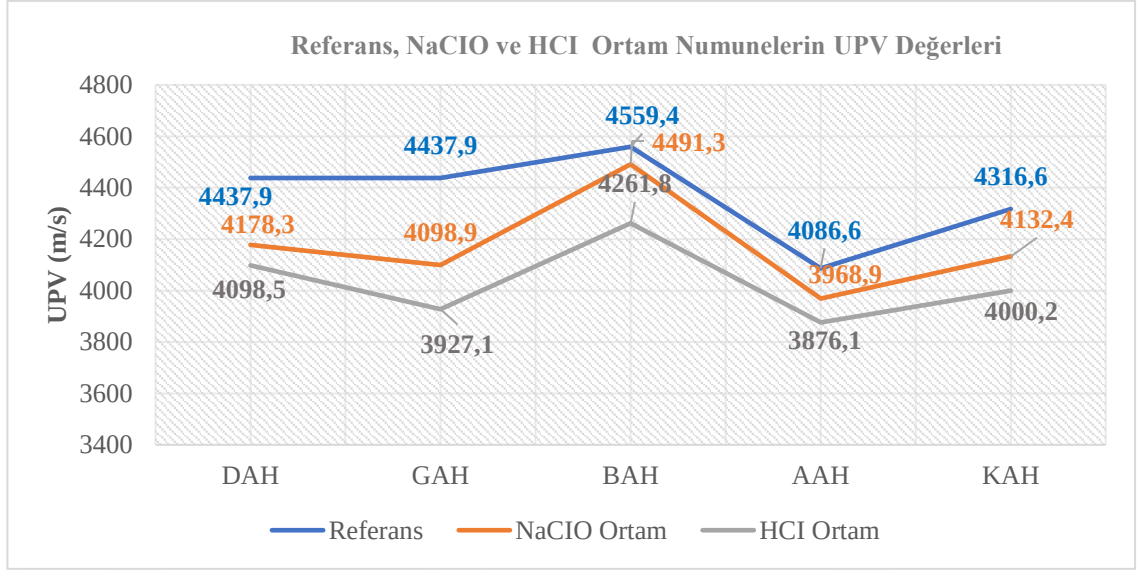
Şekil 53. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin Eğilme Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırması

3.3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Bu deneyde, referans numuneler, HCl asit ve NaClO baz ortamlarına maruz bırakılan numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı (UPV) deney yapılmıştır. HCl asit ve NaClO baz ortamına maruz bırakan numuneler ile referans numunelerinin UPV sonuçları Tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin UPV Sonuçları

Ultrases Geçiş Hız Değerleri (m/s)					
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Referans	4086,6	4559,4	4437,9	4201,9	4316,6
NaClO Baz	3968,9	4491,3	4178,3	4098,9	4132,4
HCl Asit	3876,1	4261,8	4098,5	3927,1	4000,2



Şekil 54. Referans, HCl Asit ve NaClO Baz Ortam Numunelerin UPV Sonuçlarının Karşılaştırması

Referans, HCl asit, NaClO baz ortamlarına bırakılan numunelerin UPV değerleri Şekil 54’de verilen grafikte karşılaştırılmıştır. En yüksek UPV değerini BAH ve en düşük AAH numuneleri vermiştir.

3.3.4. Basınç ve Eğilme Mukavemetlerin İlişkilendirilmesi

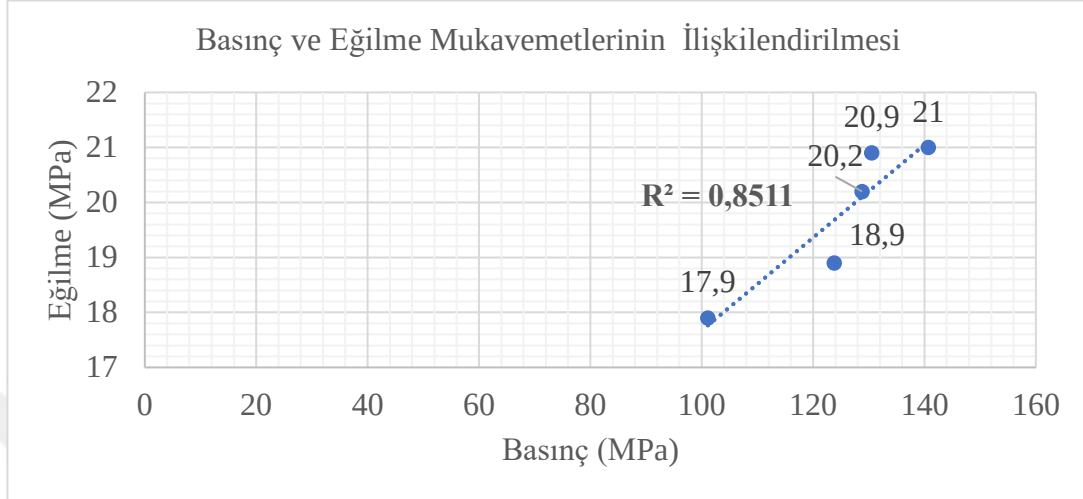
Bu çalışmada, referans, HCl asit ortam ve NaClO baz ortamına bırakılan numunelerin 90 günlük basınç ve üç noktada eğilme mukavemetleri ilişkilendirilmiştir.

HCl asit ortamına maruz bırakılan numunelerinin basınç ve eğilme mukavemet sonuçları Tablo 32’de verilmiştir.

Tablo 32. Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri

Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri					
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Basınç (MPa)	123,8	128,8	140,7	130,5	101,1
Eğilme (MPa)	18,90	20,20	21,00	20,90	17,90

Numunelerin basınç ve eğilme mukavemetleri Şekil 55'te verilen X-Y grafiğinde ilişkilendirilmiştir. Basınç ve üç nokta eğilme mukavemetleri arasında doğrusal ($R^2 = 0,8511$) bir ilişki olduğu görülmektedir.



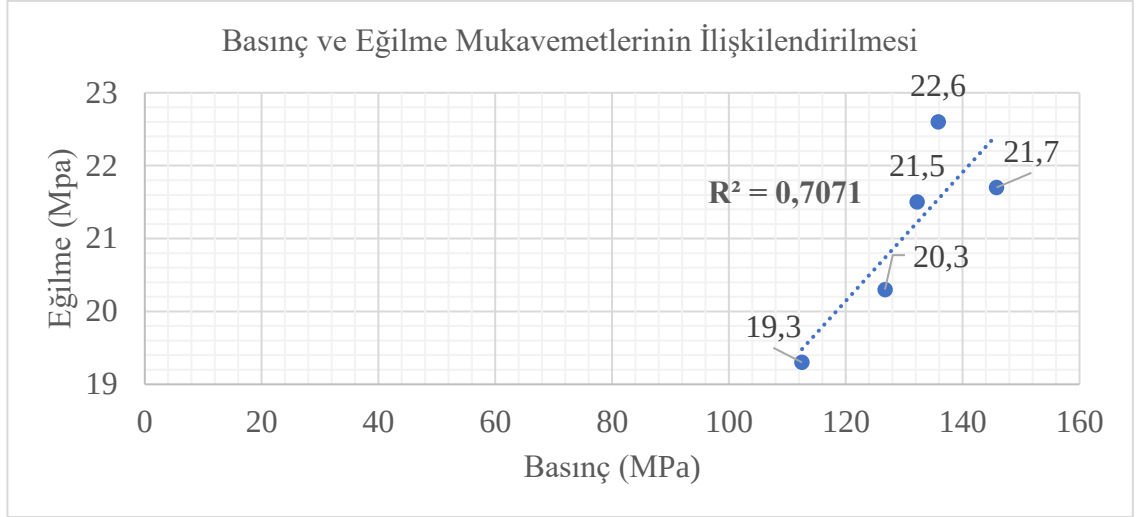
Şekil 55. HCl Asit Ortamına Maruz Bırakılan Numunelerin Basınç ve Eğilme Mukavemetlerinin İlişkilendirilmesi

NaClO baz ortamına maruz bırakılan numunelerin basınç ve eğilme mukavemet sonuçları Tablo 33'te verilmiştir.

Tablo 33. Basınç ve Eğilme Mukavemet Sonuçları

Basınç ve Eğilme Mukavemet Değerleri (MPa)					
	AAH	BAH	DAH	GAH	KAH
Basınç	126,7	132,2	145,8	135,8	112,5
Eğilme	20,30	21,50	21,71	22,60	19,30

Numunelerin basınç ve üç nokta eğilme mukavemet değerleri Şekil 56'da verilen X-Y grafiğinde ilişkilendirilmiştir. Basınç ve üç nokta eğilme mukavemetleri arasında doğrusal ($R^2 = 0,7071$) bir ilişki olduğu görülmektedir.

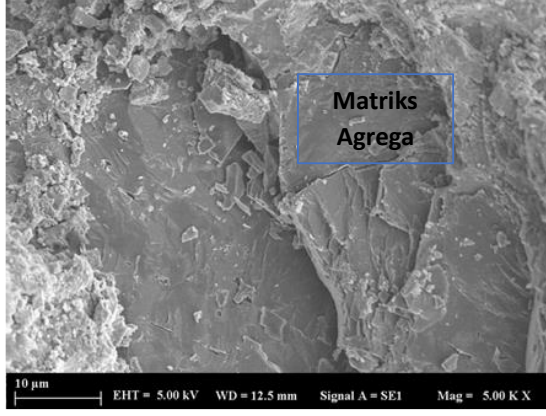


Şekil 56. NaCIO Baz Ortamına Maruz Bırakılan Numunelerin Basınç ve Eğilme Mukavemetlerinin İlişkilendirilmesi

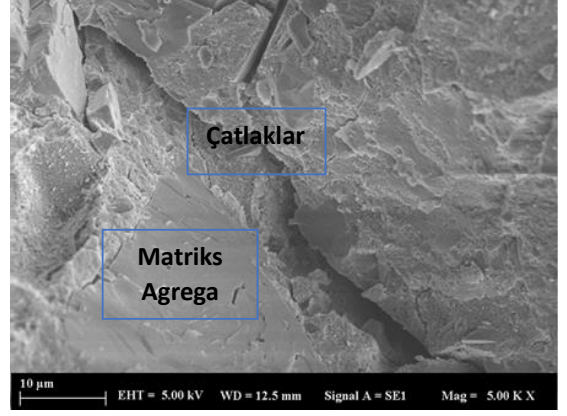
3.3.5. SEM Analiz Sonuçları

Bu çalışmada en yüksek mekanik dayanımı veren DAH ve en düşük mekanik dayanımı veren KAH numunelerinin HCl asit ve NaCIO baz ortamlarının da, iç yapılarının ne kadar etkilendiğini belirlemek için SEM analizleri yapılmıştır.

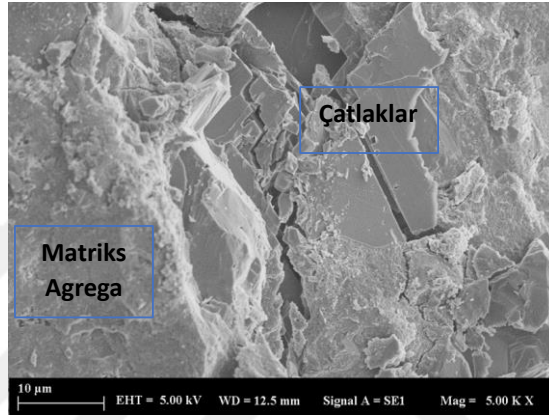
DAH numenlerinin SEM analizi görüntüleri Şekil 57’de ve KAH numunelerinin SEM analiz görüntüleri ise Şekil 58’de. Gösterilmiştir. Görüntülerde de anlaşılaçağı gibi DAH ve KAH numunelerinin iç yapıları %10 Hidroklorik asit (HCl) ve %10 Hipoklorit baz (NaCIO) içeren ortamlarından etkilendiğı ve genleşmelerden dolayı çatlak oluşumları görülmüştür.



a) Referans numune

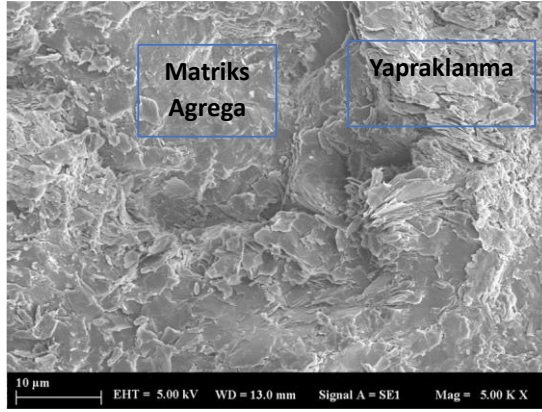


b) NaClO baz ortamına bırakılan numune

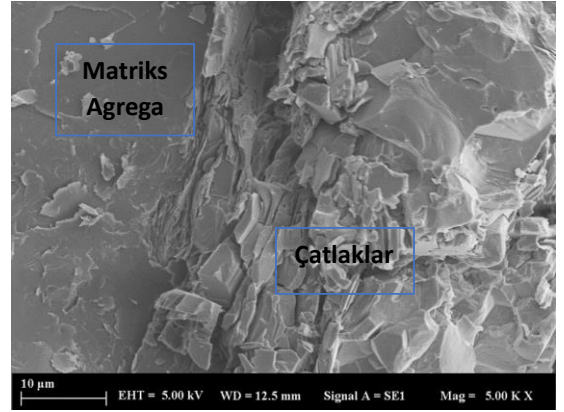


c) HCl asit ortamına bırakılan numune

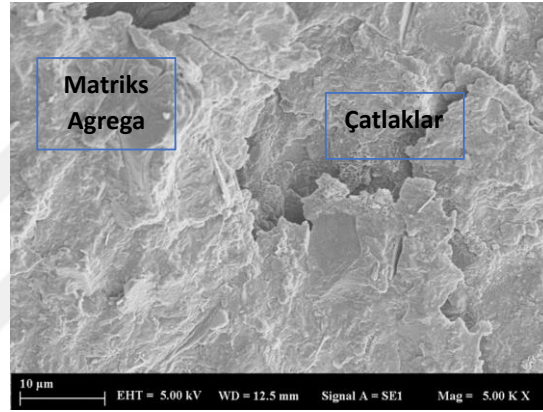
Şekil 57. DAH Numunelerin Sem Görüntüleri 5000 Kez Büyütülmüş



a) Referans numune



b) NaClO baz ortamına bırakılan numune



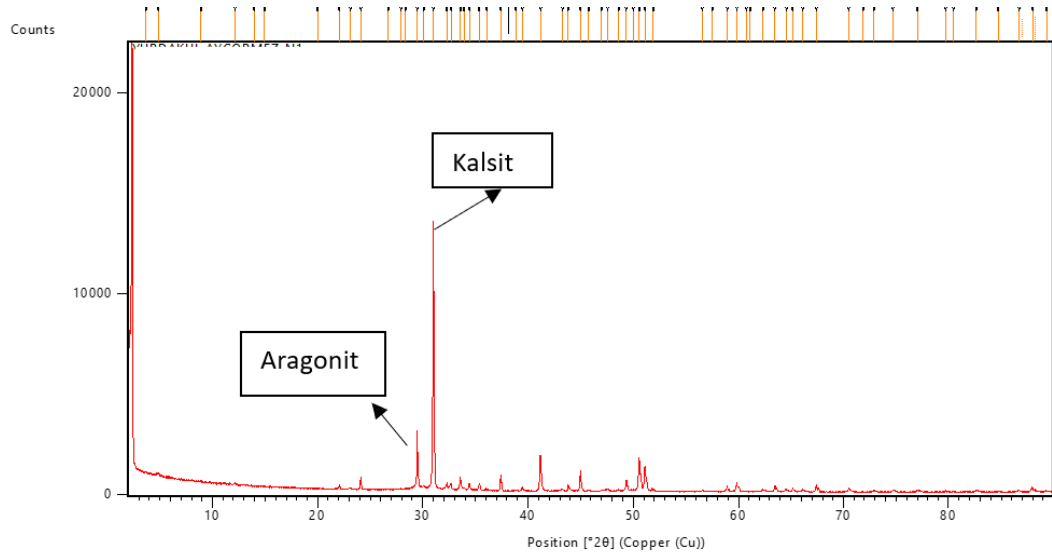
c) HCl asit ortamına bırakılan numune

Şekil 58. KAH Numunelerin Sem Görüntüleri 5000 Kez Büyütülmüş

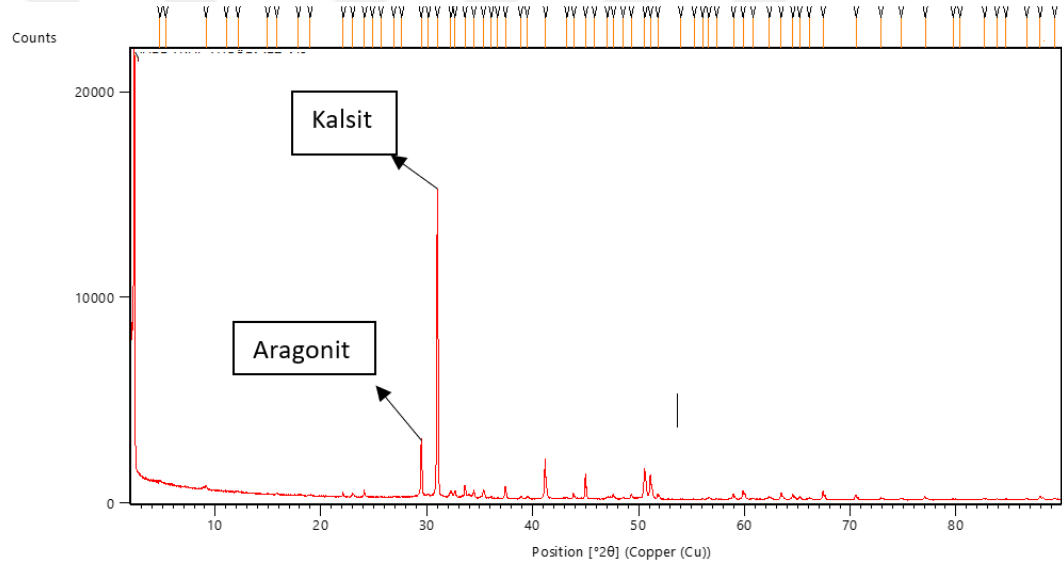
3.3.6. XRD Analiz Sonuçları

Bu çalışmada en yüksek mekanik dayanımı veren DAH ve en düşük mekanik dayanımı veren KAH numunelerinin iç kısmından alınan örnekler toz haline getirilerek XRD analizi yapılmıştır.

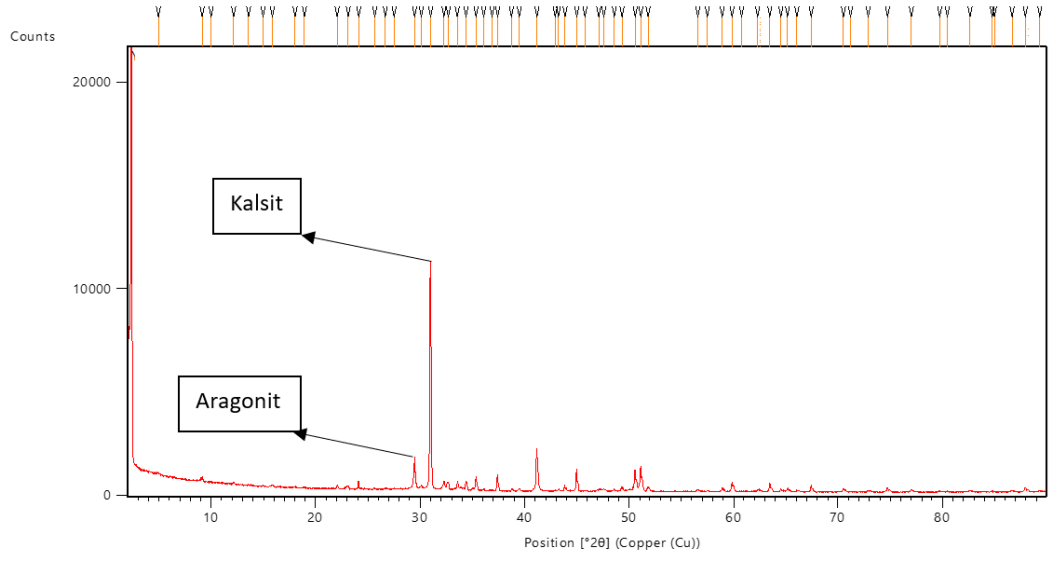
DAH numunelerinin XRD grafikleri Şekil 59, Şekil 60 ve Şekil 61’de. KAH numunelerinin XRD grafikleri ise Şekil 62, Şekil 63 ve Şekil 64’de mineral yapıları gösterilmiştir.



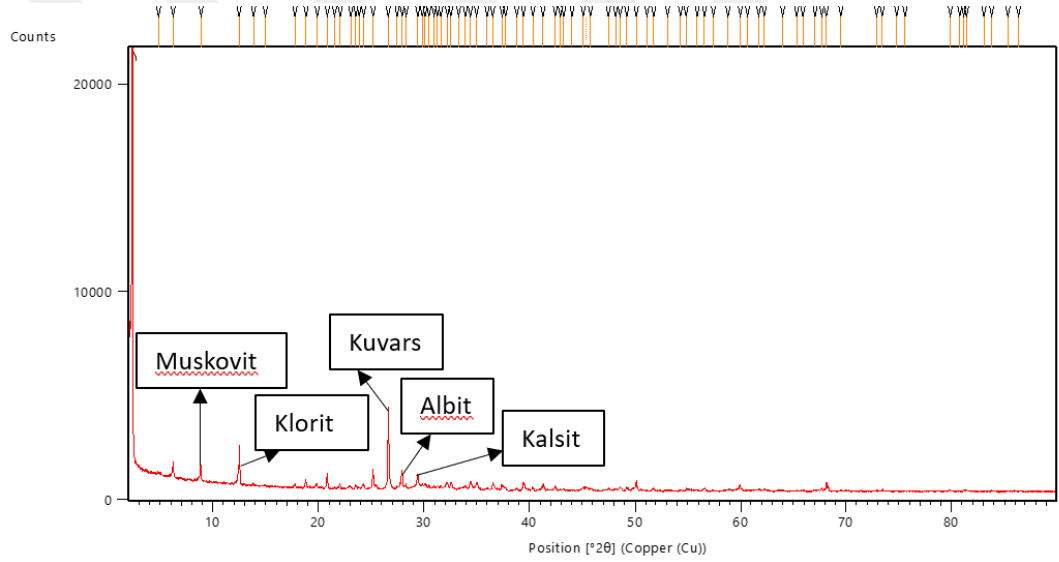
Şekil 59. Referans DAH Numunenin XRD Grafiği



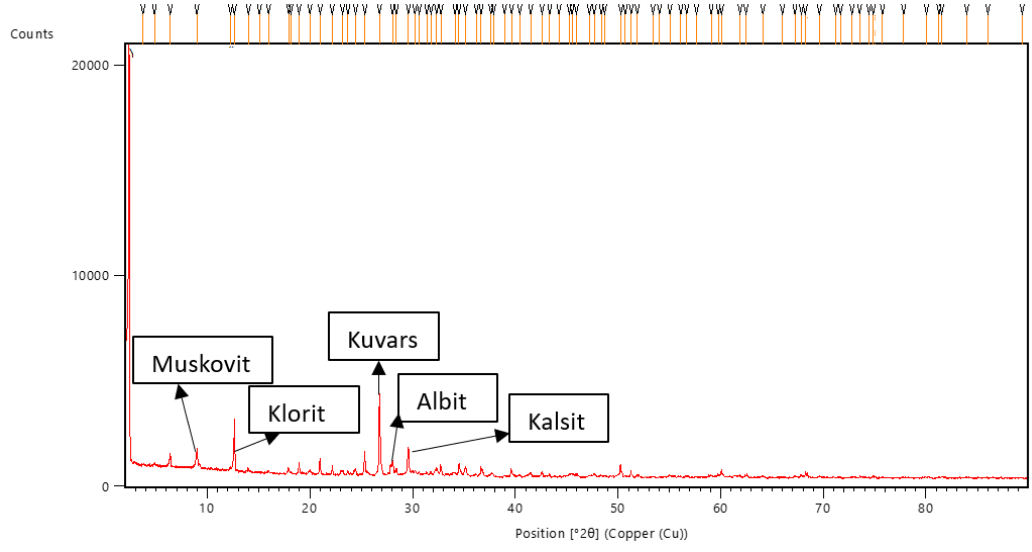
Şekil 60. NaClO Ortama Maruz Bırakılan DAH Numunenin XRD Grafiği



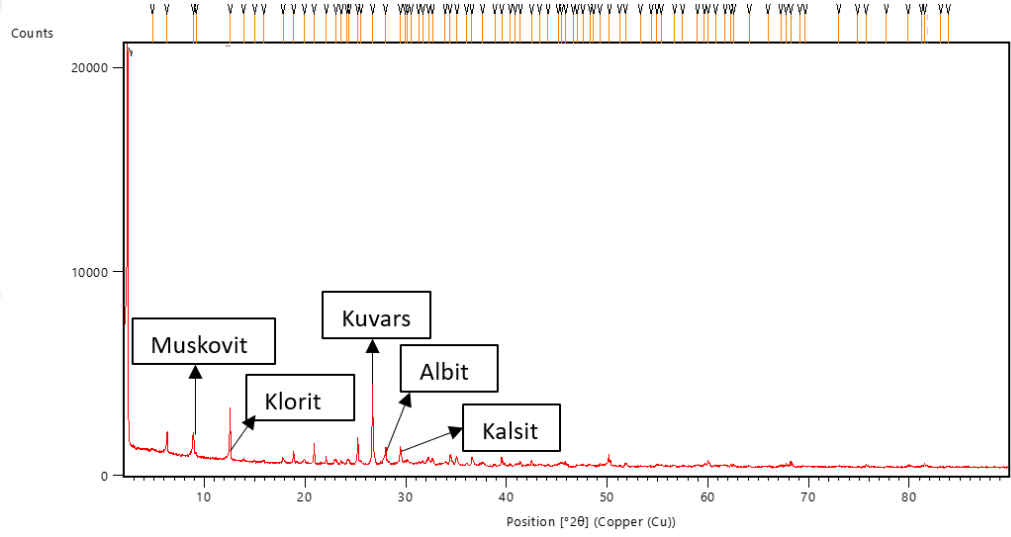
Şekil 61. HCl Ortama Maruz Bırakılan DAH Numunenin XRD Grafiği



Şekil 62. Referans KAH Numunenin XRD Grafiği



Şekil 63. NaClO Ortama Maruz Bırakılan KAH Numunenin XRD Grafiği



Şekil 64. HCl Ortama Maruz Bırakılan KAH Numunenin XRD Grafiği

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM: SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; doğal kum, bazalt, dolomit, kumtaşı ve granit olmak üzere beş farklı tip agrega ile üretilen ultra yüksek performanslı betonların, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Deney için hazırlanan karışımlarda; su/toplam bağlayıcı oranı ve kimyasal katkı miktarı sabit tutularak her bir agrega tipine ait birer grup olmak üzere toplam beş grup harç numunesi üretilmiştir.

Agregaların fiziksel özelliklerini belirlemek için elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır.

Harç guruplarının özelliklerini belirlemek için, taze harç numunelerinde termometreyle sıcaklık ölçümü ve mini çökme-yayılma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş harç numunelerinden ise etüv kurusu yoğunluk, doygun yüzey yoğunluk, görünür yoğunluk, su emme, porozite, ultra ses geçiş hızı, tek eksenli basınç ve üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır.

Numunelerin durabilite özelliklerini belirlemek için %10 Hidroklorik asit (HCl) ve %10 Sodyum Hipoklorit (NaClO) baz içeren seyreltilmiş çözeltilereler hazırlanmıştır. Numuneler 90 gün çözeltilere maruz bırakıldıktan sonra, ultrases geçiş hızı, tek eksenli basınç, üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. En yüksek mekanik dayanımı veren DAH ve en düşük mekanik dayanımı veren KAH numunelerin iç kısımlarında öremekler alınarak mikro yapı için SEM ve XRD analizleri yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar 90 günlük referans numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Agregaların fiziksel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- a. Agregalarda yapılan özgül ağırlık deneylerinde en yüksek değeri bazalt verirken, en düşük değeri doğal kum vermiştir. Agregaların özgül ağırlık değerleri, sırasıyla; bazalt 2,85 g/cm³, dolomit 2,78 g/cm³, kumtaşı 2,69 g/cm³, granit 2,63 g/cm³ ve doğal kum 2,60 g/cm³ bulunmuştur.
- b. Agregalarda yapılan su emme deneylerinde en yüksek değeri kumtaşı agrega en düşük değeri granit agrega vermiştir. Sırasıyla agregaların su emme yüzdeleri; kumtaşı %1,98, bazalt %1,83, doğal kum %1,30, dolomit %11,1 ve granit %0,66 bulunmuştur.

Taze harç özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- a. Harç grupların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için yapılan mini çökme-yayılma deneylerinde en yüksek yayılmayı GAH, en düşük yayılmayı ise KAH numuneleri vermiştir. Sırasıyla harç grupların yayılma değerleri; GAH 210 mm, DAH 185 mm, AAH 180 mm, BAH 175 mm ve KAH numunelerde 160 mm bulunmuştur. Agregaların su emme miktarları harç numunelerinin işlenebilirlik özelliklerini etkilemiştir. Su emme miktarı yüksek olan agregaların işlenebilirlik değeri düşük, su emme değeri az olan agregaların işlenebilirlik özelliğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.
- b. Termometreyle yapılan ölçümlerde; AAH'da 22,8 °C, BAH'da 22 °C, DAH'da 21,5 °C, GAH'da 21,7 °C ve KAH'da 22,9 °C sonuçları elde edilmiştir. Harç üretim koşulları ve kullanılan çimento miktarı aynı olduğundan harç grupların sıcaklıkları birbirine yakın değerler vermiştir. Sıcaklıklarının birbirine yakın olması numunelerin priz alma süresi ve erken dayanım üzerinde bir fark yaratmamıştır.

Sertleşmiş harç numunelerinin özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- a. Numunelerin doygun yüzey yoğunluk değerleri en yüksek değeri BAH ve en düşük değeri AAH numuneleri vermiştir. Sırasıyla doygun yüzey yoğunluk değerleri; BAH 2,45 g/cm³, DAH 2,42 g/cm³, KAH 2,38 g/cm³, GAH 2,32 g/cm³ ve AAH numunelerinde ise 2,32 g/cm³ olarak bulunmuştur.
- b. Numunelerin etüv kuru yoğunluk sonuçlarında en yüksek değeri BAH ve en düşük değeri AAH numuneleri vermiştir. Sırasıyla etüv kuru yoğunluk değerleri; BAH 2,41 g/cm³, DAH 2,37 g/cm³, GAH 2,34 g/cm³, KAH 2,31 g/cm³ ve AAH numunelerinde ise 2,28 g/cm³ olarak bulunmuştur.
- c. Numunelerin görünür yoğunluk sonuçlarında en yüksek değeri BAH ve en düşük değeri AAH numuneleri vermiştir. Sırasıyla görünür yoğunluk değerleri; BAH 2,53 g/cm³, DAH 2,49 g/cm³, KAH 2,48 g/cm³, GAH 2,41 g/cm³ ve AAH numunelerinden ise 2,39 g/cm³ olarak bulunmuştur. Harç gruplarına ait görünür yoğunlukların, karışımlarda kullanılan agregaların özgül ağırlıklarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

- d. En yüksek su emme değeri KAH ve en düşük GAH numunelerinde görülmüştür. Sırasıyla su emme yüzde değerleri; KAH %2,86, AAH %2,04, BAH %1,94, DAH %1,85 ve GAH numunelerinde %1,19 olarak tespit edilmiştir.
- e. En yüksek porozite değeri KAH ve en düşük değer ise GAH numunelerinde görülmüştür. Sırasıyla porozite değerleri; KAH %6,57, BAH %4,67, AAH %4,64, DAH %4,39 ve GAH numunelerinde %2,78 olarak tespit edilmiştir.
- f. Harç gruplarından alınan 50 mm küp numuneler üzerinde; 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç deneyleri yapılmıştır. En yüksek basınç mukavemet değerleri 90. günde ulaşıldığı görülmektedir. Numunelerin 90 günlük mukavemet dayanımları sırasıyla; DAH 157 MPa, GAH 142,2 MPa, BAH 138 MPa, AAH, 132,1 MPa ve KAH 119,1 MPa değerlerini vermiştir. En yüksek mukavemeti DAH ve en düşük değeri ise KAH numunelerinin verdiği görülmektedir.
- g. Harç gruplarından alınan 40x40x160 mm prizmalarda 7, 28, 56 ve 90 günlük üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Numuneler en yüksek eğilme mukavemet değerlerini 90. günde ulaşmıştır. Numunelerin 90 günlük eğilme mukavemetleri sırasıyla; DAH 23,40 MPa, GAH 23,01 MPa, BAH 22,43 MPa, AAH, 21,22 MPa ve KAH 20,32 MPa'dır. En yüksek eğilme mukavemeti DAH ve en düşük değeri ise KAH numuneleri vermiştir.
- h. Basınç ve üç nokta eğilme mukavemetleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu regresyon değeriyle ($R^2=8511$) kanıtlanmıştır.
- i. 50 mm küp numuneler üzerinde 7, 28, 56 ve 90 günlük ultrases geçiş deneyi yapılmıştır. 90 günlük ultra ses geçiş hızı değerleri sırasıyla; BAH 4559,4 m/s, DAH 4437,9 m/s, KAH 4316,6 m/s, GAH 4201,9 ve AAH 4086,6 m/s gelmektedir. En yüksek ultrases geçiş hızı BAH ve en düşük AAH numuneleri vermiştir.
- j. Numunelerin yoğunluk değerleri ve ultrases geçiş hızı değerleri arasında doğrusal ($R^2 = 0,8241$) bir ilişki olduğu bulunmuştur.
- k. Karışımlarda kullanılan, agregaların tane boyutları, kökenleri ve harç numunelerin porozite değerlerinin farklı olmasından, kaynaklı, basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızları arasındaki doğrusal ilişkinin zayıf olduğu görülmüştür.

Durabilite özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- a. Seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin, basınç mukavemet değerleri; sırasıyla DAH 140,7 MPa, GAH 130,5 MPa, BAH 128,8, AAH 123,8 MPa ve KAH numuneleri 101,1 MPa vermiştir. Referans numuneler göre, KAH %15, DAH %10, GAH %8, BAH %7 ve AAH'larda %6 oranlarında mukavemet değerlerinde azalma olmuştur. HCl asit çözeltisinde en fazla KAH en az ise AAH numunelerin etkilendiği görülmektedir.
- b. Seyreltilmiş sodyum hipoklorit (NaClO) baz çözeltisine maruz bırakılan numunelerin, basınç mukavemet değerleri sırasıyla; DAH 145,8 MPa, GAH 135,8, BAH 132,2, AAH 126,7 MPa ve KAH numuneleri ise 112,5 MPa vermiştir. Referans numunelerine göre, AAH ve BAH numuneleri %4, GAH %5, KAH %6 ve DAH numunelerinin %7 oranlarında mukavemetlerinde azalma görülmüştür. NaClO baz ortamında en fazla DAH numuneleri en az AAH ve BAH numunelerinin etkilendiği görülmektedir.
- c. Seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin üç nokta eğilme mukavemet değerleri sırasıyla; DAH 21 MPa, GAH 20,90 MPa, BAH 20,20, AAH 18,90 MPa ve KAH numuneleri 17,90 MPa vermiştir. Referans numunelerine göre KAH %12, DAH %10, GAH %9, BAH %10 AAH %11 oranlarda mukavemetlerde azalma olduğu görülmektedir. Hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde en fazla KAH numuneler en az GAH numunelerinin etkilendiği görülmüştür.
- d. Seyreltilmiş sodyum hipoklorit baz (NaClO) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin üç nokta eğilme mukavemet değerleri sırasıyla; DAH 27,71 MPa, GAH 22,60, BAH 21,50, AAH 20,30 MPa ve KAH numuneleri 19,30 MPa vermiştir. Referans numunelerine göre AAH ve BAH numunelerinin %4, GAH %2, KAH %5 ve DAH %7 oranlarda etkilendiği görülmektedir. Sodyum Hipoklorit baz (NaClO) çözeltisinde en fazla DAH numuneler en az GAH numunelerinin etkilendiği görülmüştür.
- e. Seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl) ortamına bırakılan numunelerin ultrases geçiş hızları AAH 3876,1 m/s, GAH 3927,1 m/s, KAH 4000,2 M/s, DAH 4098,5 m/s ve BAH 4261,8 m/s değerlerini vermiştir. En düşük değeri AAH numuneleri ve en yüksek ise BAH numuneleri vermiştir.

- f. Seyreltilmiş sodyum hipoklorit baz (NaClO) çözeltisine maruz bırakılan numunelerin ultra ses geçiş hızları sırasıyla; AAH 3968,9 m/s, GAH 4098,9 m/s, KAH 4132,4 M/s, DAH 4178,3 m/s ve BAH 4491,3 m/s değerleri vermiştir. En düşük UPV değeri AAH numuneleri ve en yüksek UPV BAH numunelerinden elde edilmiştir.
- g. Seyreltilmiş hidroklorik asit (HCl) ortamına maruz bırakılan 50 mm küp ve 40*40*160 mm dikdörtgen prizmaların basınç ve üç nokta eğilme mukavemetleri arasında, lineer bir ilişki olduğu ($R^2 = 0,88511$) görülmüştür.
- h. Seyreltilmiş sodyum hipoklorit baz (NaClO) ortamına maruz bırakılan 50 mm küp ve 40*40*160 mm dikdörtgen prizmaların basınç ve üç nokta eğilme mukavemetlerinin arasında da lineer ($R^2 = 0,7071$) bir ilişki olduğu görülmüştür.
- i. DAH ve KAH numunelerine yapılmış olan SEM analizlerinde numunelerin iç kısımları HCl asit ve NaClO baz ortamlarında etkilendiği ve etkileşim sonucunda çatlak oluşumuna sebebiyet verdiği görülmüştür.
- j. Ultra yüksek performanslı betonlar (UHPC) çelik fiber takviyesiyle karakteristik basınç mukavemeti minimum 150 MPa olarak bilinmektedir. Çelik fiber veya diğer fiber takviyeleriyle 130-150 MPa basınç mukavemetine sahip olanlar daha düşük dayanımlı UHPC olarak kabul gördüğü bilinmektedir. Çalışmamızda çelik fiber veya diğer fiber takviyeler kullanılmadan silis kumu yerine, dolomit agregayla ultra yüksek performansı betonlar üretilebileceği ve daha düşük mukavemetli ultra yüksek performansı betonlarda granit, doğal kum ve bazalt agregaların kullanılabileceği görülmüştür.

İleri Çalışmalar İçin Öneriler

Bu bölümde, çalışmanın devamı niteliğinde araştırılması gereken konular verilmiştir.

- a. Bu çalışmada dolomit, doğal kum, bazalt, kumtaşı ve granit agregalar ile ultra yüksek performanslı betonlarda, kullanılabileceği araştırılmıştır. Kumtaşı hariç diğer agrega tipleriyle yüksek dayanım ve durabilite sonuçları elde edilmiştir.
- b. Silis kumu ve silis tozu bu agregalara belli oranlarda ilave edilerek daha iyi sonuçlara ulaşılabilir.

- c. Ultra yüksek performanslı betonların mekanik ve durabilite özellikleri önemli olduğu kadar süneklik de önem taşımaktadır bu nedenle ilave olarak çelik, polipropilen veya cam gibi lifler kullanılarak süneklik özellikleri araştırılabilir.
- d. Ultra yüksek performanslı betonların mekanik, durabilite ve süneklik özelliğini artırmak için kürleme yöntemi önemlidir. Bu çalışmamızda $20 \pm ^\circ\text{C}$ sıcaklığında su kullanılarak kürleme işlemi yapılmıştır. Isıl işlem ile kürleme veya basınç işlemle kürleme yapılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.



KAYNAKÇA

- Akyüncü, V. (2012). *F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin karşılaştırılarak incelenmesi*. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Alexander, M. G. ve Milne, T. I. (1995). Influence of cement blend and aggregate type on the stress-strain behavior and elastic modulus of concrete. *Materials Journal*, 92(3), 227-235.
- Apaydın, M. S. (2017). *Farklı kökenli agregaların beton özelliklerine etkisi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM C109/109M. (2023). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 50 mm [2 in.] cube specimens)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C597. (2016). *Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642. (2013). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 1611/C 1611M. (2021). *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Babadağ, Y. (2009). *Kimyasal katkıların sıva harçlarının üzerindeki etkileri*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. ve Aitcin, P. C. (1997). Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *Materials Journal*, 94(4), 286-290.
- Cheyrezy, M., Maret, V. ve Frouin, L. (1995). Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1491-1500.
- Dehghanpour, H., Subasi, S., Guntepe, S., Emiroglu, M. ve Marasli, M. (2022). Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 328, 127079.
- Erten, E., Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A., Yiğiter, H. ve Yazici, H. (2017). Effect of early age shrinkage cracks on the corrosion of rebar embedded in ultra high performance concrete with and without fibers. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4).
- Erdoğan, T. Y. (2016). *Beton*, Ankara: ODTÜ Gelişim Vakfı Yayıncılık.
- İnce, H., Öcal, C., Çakıroğlu, M. A., ve Çelik, S. (2015). Püskürtme beton uygulamaları ve kullanım alanları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 100-107.
- Karadağ, A. (2008). *Farklı kökenli agregalar içeren yüksek mukavemetli betonların elastik özelliklerin incelenmesi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kılınç, C. (2012). Kendiliğinde yerleşen betonlar. *Türkiye Hazır Beton Birliği, İki Aylık Bülten* (6), 70–75.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
- Sanjuán, M. Á. ve Andrade, C. (2021). Reactive powder concrete: Durability and applications. *Applied Sciences*, 11(12), 5629.
- Sancak, E. (1998). *Hafif agregalı beton blokların mekanik özellikleri üzerine çelik lif kullanımının etkisi*. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Isparta.
- Şimşek, O. (2020). *Beton ve beton teknolojisi*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Şimşek, O., Sancak, E. ve Yaprak, H. (2005). Vakumlu beton. *4th International Advanced Technologies*, 1132-1137.
- TS EN 196-1. (2009). *Çimento deney metotları 1: Dayanım tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-2. (2013). *Çimento deney yöntemleri- Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-3. (2017). *Çimento deney yöntemleri- Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-6. (2020). *Çimento deney yöntemleri- Bölüm 6: İncelik tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 197-1. (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS 706 EN 12620+A1. (2009). *Beton agregaları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 933-1. (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini- eleme yöntemi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 934-2+A1. (2013). *Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları- tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. Ankara Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 1008. (2003). *Beton-karma suyu-numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 206:2013+A1. (2017). *Beton-özellik performans, imalat ve uygunluk*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 1097-6. (2022). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Türkel, S. (2007). Özel betonla hafif beton. *İMO İzmir Şubesi Bülteni*, (4), 31–33.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2024). *Ultra yüksek performanslı beton*. THB Akademi Teknik Bülten 14.