



**UÇUCU KÜL TİPİ İLE ORTAM KOŞULLARININ BETON
KARBONATLAŞMASINA ETKİSİ VE KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Seyedrahim BAHARAVAR

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2016

SeyedrahimBAHARAVARtarafından hazırlanan “UÇUCU KÜL TİPİ İLE ORTAM KOŞULLARININ BETON KARBONATLAŞMASINA ETKİSİ VE KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman:Yrd.Doç.Dr. Osman ŞİMŞEK

Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan:Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ

Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye:Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye:Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye:Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez SavunmaTarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin DoktoraTezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Seyedrahim BAHARAVAR

13/06/2016

UÇUCU KÜL TİPİ İLE ORTAM KOŞULLARININ BETON KARBONATLAŞMASINA ETKİSİ VE KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Seyedrahim BAHARAVAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2016

ÖZET

Bu çalışmada C ve F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül çimento ile kütlece %0, %5, %10, %15 ve %20 ikame oranlarında yer değişmiştir. İkinci karışımda ise %20 kireç, %5uçucu kül+%15 kireç, %10 uçucu kül+%10 kireç ve %15 uçucu kül+%5 kireç çimento ile ağırlık olarak yer değişmiştir. Bu karışımlar iki farklı uçucu kül için tekrar edilmiştir. Numuneler kontrollü ortam olarak %10 CO₂, %50 - 60 arası rutubet ve 18±2° C özel tasarlanmış tankta ve dışarının normal havasında bekletildikten sonra 7, 28, 90 ve 180 günlük deneylere tabi tutulmuş ve sonuçlar elde edildikten sonra bir biri ile karşılaştırarak en iyi karışıma karar verilmiştir. Betonlar üzerinde birim ağırlık, işlenebilirlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, schmidt çekici, ultra ses hızı, direk çekme, karbonatlaşma, su geçirgenlik ve kendiliğinden iyileşme deneyleri yürütülmüştür. Tüm deneyler stantlarına göre yapılmış. Kendiliğinden iyileşme deneyinde ise silindir beton numuneler 5 cm kalınlıkta kesildikten sonra ultra ses ve su geçirgenlikleri ölçülmüştür sonra betonlar mikron boyutunda çatlatılmış tekrar ultra ses ve geçirgenlik yapılmış ve kayıt edilmiş. Tüm numuneler çatlatıldıktan sonra kontrollü ortamda ve normal havada tutularak süratli denetlenmiştir ve numunelerdeki çatlakların ilk güne göre iyileşmeleri araştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91127
Anahtar Kelimeler : Uçucu kül, Kendiliğinden iyileşme, Kalsiyum oksit,
Karbon dioksit, Puzolan, Karbonatlaşma
Sayfa Adedi : 133
Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONCRETE CARBONATING IN FLY ASH
TYPES ENVIRONMENT AND RESEARCHING ABOUT SELF- HEALING EFFECTS

(Ph. D. Thesis)

Seyedrahim BAHARAVAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2016

ABSTRACT

In this study, C and F type of fly ash was used. Fly ash with cement according to weight ratio of %0, %5, %10, %15 and %20 was substituted. In the second mixture, %20 lime, %5 fly ash + %15 lime, %10 fly ash + %10 lime and %15 fly ash + %5 lime was substituted with cement. These mixtures were repeated for both flyashes. Samples were kept in specially designed tank with controlled environment conditions which include 10 % CO₂, 50-60% moisture and at 18±2° C. Then, they were left to normal air condition and dried. After that, they were subjected to experiments on 7, 28, 90 and 180 days. Obtaining results were compared to each other and the best mixture was decided. The specific gravity, slump, compressive strength, flexural strength, Schmidt Hammer, ultrasonic, direct tensile, carbonation, water permeability and self healing experiments were carried out over concrete samples. All experiments were done according to their standard. In the self-healing experiments, after cutting cylinder concrete samples with 5 cm thick, ultra sound and water permeability were measured, then concrete sample was fractured in micron size and then ultra sound and permeability was performed and recorded. All samples after fracturing were kept in a controlled environment and normal condition. Then, samples were controlled and cracks healing on samples were investigated from the first day.

Science Code : 91127
Key Words : Fly ash, Self healing, Calcium oxide , Carbon dioxide ,
Pozzolan , Carbonation
Page Number : 133
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

TEŞEKKÜR

Tezimizin konusunun belirlenmesinde, araştırma aşamasında, yön tayininde ve tamamlanmasında destek olan tezimizin başlangıcından bitimine kadar bana inanan, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım sayın Yrd. Doç.Dr. Osman ŞİMŞEK'e sonsuz teşekkür ediyorum. Tez jüri üyelerine her zaman verdikleri fikirlrinden ve gösterdikleri yollardan faydalandık, hepsine minnettarım. Yardım eden tüm arkadaşlarıma manevi ve fikri olarak özellikle Reza TALEBİ diğer ve bölümün tüm hocalarına teşekkürlerimi iletiyorum. ALLAH'tan dünyanın en iyi anne ve babasını, ailesini bana verdiği için mutluluk duyar ve şükür ediyorum.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMALARI	3
2.1. Mineral Katkılar	3
2.1.1. Silis dumanı	4
2.1.2. Yüksek fırın cürufu	5
2.1.3. Uçucu küller ve çeşitleri	6
2.2. Çimento ve Çimento Çeşitleri	14
2.2.1. Çimento bileşenleri	14
2.2.2. Çimento dayanım kazanma aşaması ve hidratasyonu	16
2.2.3. Çimento çeşitleri	20
2.3. Kireç	21
2.4. Betonda Kür Yapmanın Özelliği ve Önemi	23
2.4.1. Kür yöntemleri	23
2.4.2. Kürün çimento ve puzolanlarda olan etkisi	24
2.5. Betonda Karbonatlaşma	24

	Sayfa
2.5.1. Karbonatlaşmanın beton üzerinde etkisi	25
2.5.2. Karbonatlaşmanın olumlu ve olumsuz etkileri	25
2.5.3. Karbonatlaşmada önemli faktörler	26
2.5.4. Betonun S/Ç oranının karbonatlaşmada etkisi	27
2.5.5. Betonda kendiliğinden iyileşme ve önemi	27
2.6. Betonda Kendiliğinden İyileşmeyi Etkileyen Reaksiyonlar	30
2.6.1. Pozolanların kendiliğinden iyileşen betonlara etkileri	32
2.6.2. Kendiliğinden iyileşen betonun ve karbonatlaşmanın ortak özellikleri	36
2.7. CO ₂ Kaynakları	36
2.8. Önceki Çalışmalar ve Araştırmalar	39
3. MATERYAL VE METOT	53
3.1. Materyal	53
3.1.1. Uçucu kül	53
3.1.2. Çimento	60
3.1.3. Kireç	60
3.1.4. Karbon dioksit	61
3.1.5. Agrega	62
3.2. Metot	63
3.2.1. Taze beton kıvam deneyi	66
3.2.2. Yoğunluk tayini	66
3.2.3. Basınç dayanım tayini	67
3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı tayini	69
3.2.5. Ultrases hızı	70
3.2.6. Kapiler su emme katsayı tayini	71

	Sayfa
3.2.7. Karbonatlaşma deneyi	71
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	77
4.1. Çökme (slump) Metodu	77
4.2. Sertleşmiş Betonların Yoğunluk Tayini	79
4.3. Basınç Dayanımları	80
4.4. Ultrases İle Ses Geçiş Hızı	84
4.5. Kapiler Su Emme Katsayı Sonuçları	88
4.6. Kiriş Eğilme Dayanımı	93
4.7. Karbonatlaşma Deneyin Sonuçları (EN BS 13295:2004)	96
4.8. Kendiliğinden İyileşme Deney Sonuçları	113
4.8.1. Kendiliğinden iyileşmede ultrases geçiş hızı testi	113
4.8.2. Kendiliğinden iyileşmede su geçirgenlik deneyi	117
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ	133

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Beton çeşitlerinin özellikleri	1
Çizelge 2.1. Silikon oranına göre SiO ₂ miktarı	4
Çizelge 2.2. Yüksek fırın cürufun kimyasal kompozisyonu %	5
Çizelge 2.3. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller	7
Çizelge 2.4. F ve C sınıfların gurupları	10
Çizelge 2.5. Uçucu külün beton özelliklerine etkisi	12
Çizelge 2.6. Harç numuneler için mutlak ve nispi karışım oranları	39
Çizelge 2.7. Beton tasarımı	42
Çizelge 2.8. Karbonatlaşma derinliği uçucu külün % sine göre	44
Çizelge 2.9. Basınç dayanımı ve ultra ses sonuçları	50
Çizelge 2.10. İyileşmeden sonra basınç ve ultra ses sonuçları	51
Çizelge 3.1. Türkiye’ deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri	54
Çizelge 3.2. Kangal ve Yatağan uçucu küllerin kimyasal analizi	54
Çizelge 3.3. Kangal uçucu külün NUK ve ÖUK elek üstünde kalan %’si	56
Çizelge 3.4. NUK ve ÖUK Kangal uçucu külü ASTM C 311’egöre puzolanik aktivitesi	56
Çizelge 3.5. Yatağan uçucu külün öğütüldükten sonraki ve önceki elek analizi	58
Çizelge 3.6. Yatağan uçucu küllü NUK ve ÖUK puzolanik aktivitesi sonuçları	59
Çizelge 3.7. Kullanılan CEM 1 42.5 çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	60
Çizelge 3.8. Kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri	61
Çizelge 3.9. Karışımda kullanılan agregaların karışım analizi ve yoğunluğu	62
Çizelge 3.10. Karışımda kullanılan beton kodları	64
Çizelge 3.11. Bir metreküp beton içinde bulunan malzeme miktarları	64
Çizelge 3.12. Deneyler için kullanılan numune boyutları	65

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.13. Yapılan deneyler ve deney yaşları	65
Çizelge 3.14. Ultra ses hızı ve betonun mukavemet sınıfı	71
Çizelge 4.1. Taze betonların çökme değerleri	77
Çizelge 4.2. Betonların ortalama yoğunluk miktarları	79
Çizelge 4.3. Kangal betonlarda basınç değerleri (MPa)	81
Çizelge 4.4. Yatağan uçucu küllü betonlarda basınç değeri (MPa)	83
Çizelge 4.5. Ultrases hızı deneyinin değerlendirme sınırları	85
Çizelge 4.6. 180 günlük KUK betonlarda ultra ses ve basınç dayanım değerleri	86
Çizelge 4.7. 180 günlük Kangal uçucu küllü betonlarda ultra ses ve basınç değerleri ..	87
Çizelge 4.8. Kangal uçucu küllü betonlarda kapiler su emme değerleri	89
Çizelge 4.9. Kangal uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı	90
Çizelge 4.10. Yatağan uçucu küllü betonlarda su emme değerleri	91
Çizelge 4.11. Yatağan uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı	92
Çizelge 4.12. KUK betonlarda eğilme dayanımların aritmetik ortalaması (MPa)	93
Çizelge 4.13. Yatağan uçucu küllü betonlarda eğilme değerleri (MPa)	95
Çizelge 4.14. KUK betonların tankta beklenen numunelerde karbonatlaşma miktarı ..	100
Çizelge 4.15. KUKB laboratuvarında beklenen numunelerde karbonatlaşma miktarı	101
Çizelge 4.16. KUKB açık havada bekletilen numunelerde karbonatlaşma miktarı	103
Çizelge 4.17. Tankta bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı	105
Çizelge 4.18. Laboratuvarında bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı	106
Çizelge 4.19. Açık havada bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı ..	108
Çizelge 4.20. KUK betonlarında Schmidt çekici geri tepme kat sayısı değerleri	110
Çizelge 4.21. YUK betonlarında geri tepme kat sayısı değerleri	112
Çizelge 4.22. Tank içinde bekletilen Kangal UK numunelerde ultrases geçiş hızları....	114

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.23. Tank içinde bekletilen Yatağan UK numunelerde ultrases geçiş hızları .	114
Çizelge 4.24. Serbest havada bekletilen Kangak UK numunelerde ultrases geçiş hızı .	115
Çizelge 4.25. Serbest havada bekletilen Yatağan UK numunelerde ultrases geçiş hızı .	115
Çizelge 4.26. Tankta bekleten numunelerde su geçirgenlik deneyinin sonuçları.....	118
Çizelge 4.27. 180 gün tankta bekletilen numunelerde su geçirgenliğine bağlı iyileşme	119
Çizelge 4.28. Açık havada bekletilen numunelerde su geçirgenlik deneyinin sonuçları	120
Çizelge 4.29. Serbest havada bekletilen numunelerde % su emme deneyin sonuçları ..	121
Çizelge 5.1. 56 ve 180 günlük deney sonuçları	125

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Betondaki kendiliğinden iyileşmenin şematik olarak gösterilmesi	30
Şekil 2.2. Betonun kendiliğinden iyileşmesi şematik olarak ifadesi (A)	33
Şekil 2.3. Normal ve uçucu küllü betonların hidrasyon sonucu değişimleri (B)	34
Şekil 2.4. CO ₂ ' in doğada döngüsü	37
Şekil 2.5. CO ₂ 'nin şematik etkisi	39
Şekil 2.6. Agregaya yerine ikame edilmiş olan F tipi uçucu küllü harcın basınç dayanımı	40
Şekil 2.7. F tipi uçucu külün çimento yerine ikame edilen harcın basınç değerleri	40
Şekil 2.8. Betonun basınç dayanımı uçucu külün yüzdesine göre(1Psi= 0,07 kg/cm ²)	41
Şekil 2.9.7 Günlük basınç dayanımı	42
Şekil 2.10. 28 Günlük basınç dayanımı	43
Şekil 2.11. 90 Günlük basınç dayanımı	44
Şekil 2.12. Kireç eklenmiş CEM II -32,5 dan elde edilen betonlarda basınç değerleri .	45
Şekil 2.13. Kireç eklenmiş CEM I-42,5 dan elde edilen betonlarda basınç değerleri	46
Şekil 2.14. Kireç eklenmiş CEM I-42,5 + %20 UK' li betonlarda basınç değerleri	46
Şekil 2.15. CEM II 42,5 çimentoda kireç ve karbonatlaşmanın ilişkisi	47
Şekil 2.16. Karbonatlaşmanın numunelerde etkisi	48
Şekil 3.1. Kangal uçucu küllü betonların pozolanik aktivite değerleri	57
Şekil 3.2. Kangal uçucu külün pozolanik aktivite eğilme değerleri	57
Şekil 3.3. Yatağan uçucu külünün pozolanik aktivite basınç dayanımı	59
Şekil 3.4. Yatağan uçucu küllünün pozolanik aktivite eğilme dayanımı değerleri	59
Şekil 3.5. Kullanılan agreganın granolometresi	63
Şekil 3.6. Bazı kimyasal malzemelerin sıcaklık ve nem ilişkisi	73
Şekil 4.1. Kangal uçucu küllü betonlarda çökme değeri	77

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Yatağan küllü betonların çökme değerleri	78
Şekil 4.3. Kangal uçucu küllü betonlarda yoğunluk değerleri	79
Şekil 4.4. Yatağan uçucu küllü betonlarda yoğunluk miktarı	80
Şekil 4.5. Kangal uçucu küllü betonların basınç ve yaş ilişkisi	82
Şekil 4.6. Yatağan uçucu küllü betonlarda basınç dayanımı zaman ilişkisi	84
Şekil 4.7. KUK betonlarda ultrases hızı - zaman ilişkisi	85
Şekil 4.8. YUK betonlarda ultrases hızı ve zaman ilişkisi	86
Şekil 4.9. Kangal bölgesine ait uçucu küllü betonlarda ultra ses ve basınç ilişkisi	87
Şekil 4.10. YUK betonlarda ultra ses ve basınç dayanımı değerlerin ilişkileri	88
Şekil 4.11. Kangal bölgesine ait uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı	90
Şekil 4.12. YUK betonlarda su emme katsayısı	92
Şekil 4.13. Kangal uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımı ve yaş ilişkisi	94
Şekil 4.14. Yatağan uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımı ve yaş ilişkisi	96
Şekil 4.15. Tankta bekletilen KUK betonların karbonatlaşma miktarı	101
Şekil 4.16. Labratuarda ortamında bekletilen KUK betonların karbonatlaşma miktarları	102
Şekil 4.17. Açık hava'da bekletilen KUKB numunelerinin karbonatlaşma miktarı	104
Şekil 4.18. Tankta bekletilen YUK beton numunelerin zaman ilişkisi	106
Şekil 4.19. Labaratuvarda bekletilen YUKB numunelerde karbonatlaşma miktarı	107
Şekil 4.20. Açık havada bekletilen YUKB numunelerinin karbonatlaşma miktarı	109
Şekil 4.21. KUK betonlarında Schmidt çekici katsayısı	111
Şekil 4.22. YUK betonlarında schmidt çekici kat sayısı	112
Şekil 4.23. Ultrases sonucun tank ve açık havada KUK numunelerin karşılaştırılması.	116
Şekil 4.24. Ultrases sonucun tank ve açık havada YUK numunelerin karşılaştırılması..	117
Şekil 4.25. Tank'ta ve açıkta bekletilen KUK numunelerin su emme-iyileşme ilişkisi	122

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.26. Tank'ta ve açıkta bekletilen YUK numunelerde su emme iyileşme ilişkisi 123



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar	8
Resim 2.2. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı	8
Resim 2.3. Yüksek silisli uçucu (pulverize uçucu kül) ve yüksek kireçli uçucu kül	11
Resim 2.4. 10000 kat büyütülmüş çimentonun SEM fotorafi	13
Resim 2.5. Çimento hidrasyonu sonucunda doğan bileşenler	16
Resim 2.6. Çimento hidrasyonu sonucu jelimsel tabakanın görüntüsü	18
Resim 2.7. Piriz zamanında oluşan kristal bağlantılar	19
Resim 2.8. Betonun dayanım kazanma süreci	19
Resim 2.9. Hidrasyonu ürünlerinin artması ve gelişmesi	20
Resim 2.10. Karbonatlaşma sonucu donatı korozyonu	25
Resim 2.11. Çimentonun 10000 kat büyütülmüş SEM çekimi	31
Resim 2.12. Bakteriyel ve organik malzemelerin görüntüsü	48
Resim 2.13. Dijital çatlak ölçme makinası	49
Resim 2.14. Çatlaklarda kalsiyum karbonat oluşması ve çatlakların iyileşmesi	50
Resim 3.1. Kangal ÖÜK ve NÜK eleklerle göre tane dağılımı	55
Resim 3.2. Yatağan Öük'un eleklerle göre tane dağılımı	58
Resim 3.3. Çalışmada kullanılan karbon dioksitin tüpü	61
Resim 3.4. Basınç deneyi için hazırlanan YÜK ve KÜK beton silindir numuneler	68
Resim 3.5. ELE 3000 basınç makinesi	68
Resim 3.6. Eğilme için hazırlanan Yatağan uçucu küllü beton numuneler	69
Resim 3.7. Ultrases cihazı	70
Resim 3.8. Kangal ve Yatağan uçucu küllü beton numunelerin karbonatlaşma hali	72
Resim 3.9. Rutubeti kontrol etmek için Sodyum dikromat	72

Resim	Sayfa
Resim 3.10. Tankın içindeki nem ve sıcaklık miktarını kontrolü	73
Resim 3.11. Karbonatlaşma tankının bileşenleri	74
Resim 3.12. Ultrases deneyi için hazırlanan numuneler	74
Resim 3.13. Numune çatlatma yöntemi	75
Resim 3.14. Çatlatılmış numuneler	75
Resim 3.15. Ultrases ve çatlak gösterici deneyin uygulaması	76
Resim 3.16. Su geçirgenlik deneyin yapılışı	76
Resim 4.1. CO ₂ tankının içindeki beton numuneler	97
Resim 4.2. Laboratuvar ortamında bekletilen beton numuneler	97
Resim 4.3. Serbest hava ortamında bekletilen beton numuneler	98
Resim 4.4. Fenolfetalin püskürtme	99
Resim 4.5. Karbonatlaşma ölçümü	99
Resim 4.6. Schmidt çekici test yapılması	110
Resim 4.7. Beton numunelerde iyileşmenin 40X büyütmesi	124
Resim 4.8. Beton numunelerde iyileşmenin 40X büyütmesi	124

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
KB	Kontrol Beton
KUK	Kangal Uçucu Kül
YUK	Yatağan Uçucu Kül
YUKB	Yatağan Uçucu Küllü Beton
KUK1	Çimento yerine %5 Kangal UK ikame edilmiş beton
KUK2	Çimento yerine %10 Kangal UK ikame edilmiş beton
KUK3	Çimento yerine %15 Kangal UK ikame edilmiş beton
KUK4	Çimento yerine %20 Kangal UK ikame edilmiş beton
K1	Çimento yerine %20 ikame edilmiş kireçli beton
KUKK2	Çimento yerine %5 Kangal UK ve %15 kireç ikame edilmiş beton
KUKK3	Çimento yerine %10 Kangal UK ve %10 kireç ikame edilmiş beton
KUKK4	Çimento yerine %15 Kangal UK ve %5 kireç ikame edilmiş beton
UK	UçucuKül
YUK1	Çimento yerine %5 Yatağan UK ikame edilmiş beton
YUK2	Çimento yerine %10 Yatağan UK ikame edilmiş beton
YUK3	Çimento yerine %15 Yatağan UK ikame edilmiş beton
YUK4	Çimento yerine %20 Yatağan UK ikame edilmiş beton

1. GİRİŞ

Günümüzde önemli bir yapı malzemesi olan beton birçok malzemenin (agrega, çimento, su vb) bileşimleriyle ortaya çıkar. Beton bileşenlerinin bir kısmı doğrudan doğadan (su ve agrega) temin edildiği gibi bir kısmı ise bir sanayi yan ürünüdür (UK, yüksek fırın cüruf ve silis duman). Elde edilişleri farklı olmasına rağmen doğada bir çok malzeme farklı şekilde beton üretiminde kullanılmaktadır. Bu kullanım dünyada olduğu gibi Türkiye’de de olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Özellikle havadaki karbondioksitin neden olduğu beton ve beton ürünleri her geçen gün bozulmaya maruz kalmaktadırlar. Çevresel etkiler Betonarme yapılarda çeşitli bozulmaları oluşturur. Çevresel koşullar ne kadar zararlı olursa olsun beton kalitesinin artırılması bu zararları önlemede çok etkin bir faktör sayılabilir. Betonda kullandığımız malzemelerin kalitesi, su / çimento oranı, karışım hesapları ve üretim koşulları betonun kalitesini ve durabilitesini etkileyen önemli nedenlerdir. Beton bileşenlerinin kaliteli olması her zaman için kaliteli beton olacak anlamına gelmez. Beton bileşenlerinin kaliteleri yanında oranları, yüzey şekilleri, karıştırılması, yerleştirmesi, sıkıştırılması ve betonun korunması’da çok önemlidir. Beton üretiminde kullanılan kimyasal ve mineral katkı maddeleri betonun bazı olumsuz özelliklerini iyileştirmede çok etkilidir. Katkılar kullanılarak betonun istenmeyen özellikleri iyileştirilmiş betonun kalitesi artırılmış ve farklı tip betonlar üretilmiştir. İlk kez 1812 yılında Fransa’da, Louis Vicat ilk yapay çimentoyu üretmiş ve 1824 yılında, İngiliz Joseph Aspdin tarafından “Portland Çimentosu”nu geliştirilmiştir. 1850 yılında Fransız bahçıvan Joseph Monier, daha sağlam saksılar üretmek için betona demir çubuklar ekleyince betonarme ortaya çıkmıştır. 1879 yılında İskoçya’da portland çimentosu kullanılarak ilk beton yollar yapılmıştır. Bunu 1889’da Fransa’da yapılan ilk betonarme köprü izlemiştir. 1902 yılında Fransız mimar August Perret, ilk apartman binasını betonarme olarak tasarlamış ve inşa etmiştir. 20.yy boyunca dev barajlar, gökdelenler, köprüler, yer altı yapıları, dünyanın en yüksek yapıları, en estetik mimariler betonla kolayca hayata geçirilmiştir. Çeşitli betonlar değişik yerlerde kullanılarak bizim mal ve can güvenliğimizi daha’da arttırmaktadır. Her geçen gün betonun özellikleri iyileşirken Çizelge 1.1 deki gibi farklı betonların’da ortaya çıktığı görülmektedir.

Çizelge 1.1. Beton çeşitlerinin özellikleri

Üretilen Beton	S/Ç	Mukavemet (Mpa)	Üretim Yılı
Normal dayanımlı beton	0,6-0,75	20 – 30	1950
Normal dayanımlı beton	0,42- 0,60	30 – 50	1970
Yüksek dayanımlı beton	0,23- 0,42	50 – 80	1980 – 1990
Reaktif pudra betonu	0,15- 0,23	120 – 500	1995 ten sonra

Farklı beton çeşitleri, betonun olumsuz özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Günümüzde katkı maddesiz beton üretimi nerdeyse mümkün değildir. Sonuç olarak, betonu şu şekilde tanımlamak mümkündür. Beton agrega, çimento, su ve katkı maddeleri ile belirli oranlarda karıştırılarak, plastik kıvamda dökülen ve kolay şekil alabilen kompozit bir yapı malzemesidir. Betonlar yoğunluklarına, üretildiği yere, basınç dayanımına, katkı maddesine, uygulama yerlerine göre birçok gruplara ayrılabilir. Günümüzde betonların en büyük sorunlarından biri eğilme mukavemetlerinin yetersizliği ve oluşan çatlaklardan dolayı oluşan sızıntılar ve takiben bozulmalarıdır. Betonda sülfat etkisi, alkali silika reaksiyonu, rötre, karbonatlaşma ve korozyon vb betonda durabiliteyi olumsuz etkileyebilmektedirler. Bu sorunları çözmek için değişik lifler ve değişik pozolanlar ve kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Yaşadığımız çağda bazı zararlı faktörler bizim yaşamımızı ve ürettiğimiz ürünleri kendi etkisi altında bozabilmektedir. Örnek olarak dünyada teknoloji gelişmesine paralel olarak zararlı gazlarda üretilmektedir. Karbon dioksit en fazla ve en tehlikeli gazlardandır. Bu zararları minimize etmek sürdürülebilirlik açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada; Karbonatlaşma gibi olumsuz çevresel etkileri betonda olumlu etki oluşturmaya amaçlanmıştır

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Mineral Katkılar

Çimentonun ve betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betondaki kompasiteyi artırmak, çimentoya ekonomiklik kazandırmak amacıyla beton ve çimentoya uyumlu mikron boyutundaki taneli malzemelere mineral katkıları denir. Mineral katkıların betona olumlu etkileri yanında olumsuz etkileride vardır. Olumsuz özellikleri en aza indirmek için mineral katkıların özellikleri ve kullanılacağı yerin özelliği bilinmesi gerekir.

Betonda farklı amaçlarda katkıları kullanılmaktadır ve bu katkılarda farklı kaynaklardan üretilmektedirler. Bu katkıları doğal veya yapay mineral olarak tanımlanır [1]. Elde edildikleri kaynaklara göre, mineral katkı maddelerini üç grupta toplamak mümkündür;

- Doğal malzemeler(volkanik küller, traslar, diatomit ve taş unu)
- Beton üretimi ile doğrudan ilgili bir endüstri kolunda yan ürün elde edilen malzemeler(UK, silis duman ve yüksek fırın cürufu)
- Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş tuğla ve kiremit tozu)

Beton katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka mikron boyutunda ince taneli olması gerekmektedir [2].

Bu mineral katkıların bazıları puzolanik özellik gösterir. Puzolanik özellik gösteren mineral katkıları çimento ve betonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Puzolanik katkı olarak isimlendirilen katkıları, "kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştirildiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip silis veya silisli ve alüminli malzemeler "olarak tanımlanmaktadır [3,4].

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktarda demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunmaktadır. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştiğinde, bu malzemeler arasında bir takım

kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentonun hidrasyonunda olduğu gibi, hidrolik bağlayıcı özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu ürün puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği "puzolanik aktivite" olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda silis+alümin+demir oksit içermesi gerekmektedir. Bu puzolanik maddelerin en yaygın olanları Silis dumanı (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) ve Uçucu Kül (UK) dır. Bunlardan silis dumanı ve yüksek fırın cürufu özet olarak anlatılırken çalışmanın konusu olan UK üzerinde daha geniş olarak durulmuştur.

2.1.1. Silis dumanı

Silikon metalinin veya silikon metal alaşımların üretiminde yüksek saflıktaki kuvars elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesi ve çok çabuk yoğunlaştırılması ile gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir [2].

Yüksek oranda amorf silikondioksit içeren ve çok düzgün küresel partiküllerden meydana gelen 0,1µm civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Silikon oranı %98 'e eriştiğinde ürün Ferrosilikondan çok silikon metalı olarak isimlendirilmektedir. Silis dumanının SiO₂ miktarının silikon alaşımlarının üretimiyle ilişkisi Çizelge 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Silikon oranına göre SiO₂ miktarı [5].

Ferro Silikon Alaşım/Metal	Silis Duman İçindeki SiO ₂ Miktarı
%50 Ferrosilikon	%72-77
%75 Ferrosilikon	%84-88
%98 Silikon	%93-98

Silis dumanın önemli özelliklerinden biri özgül yüzey alanıdır. Silis dumanın özgül yüzey alanı klasik blain aleti ile ölçülemez. Ölçüm için nitrojen absorpsiyonun 'dan yararlanılan B.E.T. yöntemi kullanılır [6].

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı %10'a kadar azaltılmış ve onun yerine silis duman ilave edilebilir. Silis duman ince tane olması nedeniyle çok sayıda SiO_2 içerir ve bundan dolayı nihai dayanımı yüksek olan betonlarda kullanılması yararlıdır. Fakat çok ince olması sebebiyle taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltır [7].

2.1.2. Yüksek fırın cürufu

Demir elde edebilmek için, demir cevherlerinin(Fe_2O_3 ve Fe_3O_4) yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar (1600°C) ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekmektedir. Kok kömürünün (karbon) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda, ayrıca arıtma işlemine yardımcı olabilmesi için kalker taşıda cevherlerle birlikte ısınmaya tabi tutulur. Yüksek sıcaklık etkisi ile kok kömürünün karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırın bacasını terk etmektedir. Geriye kalan maddeler eriyik durumda olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S ve demirdir. Bu tabakada toplanan silis alüminat içerikli maddeler "yüksek fırın cürufu" olarak adlandırılmaktadır [2].

Çizelge 2.2, Türkiye'de yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonunu göstermektedir. Bu Çizelge 'de CaO miktarının diğer puzolanlara göre fazla olduğu görülmektedir. CaO 'nun fazla olması yüksek fırın cürufun kendi kendine az olsa bile bağlayıcı olma özelliğini kazandırmaktadır [9].

Çizelge 2.2. Yüksek fırın cürufun kimyasal kompozisyonu %

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	S
34-31	34-36	13-19	0,3-2,5	3,5-7,0	1,0-2,5	1,0-2,0

Portland çimentosunun kalsiyum silikatlı ana bileşenleri ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda, hem bağlayıcılık özelliği olan kalsiyum-silika-hidrat(C-S-H) jelleri, hemde kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Cürufun gösterdiği asıl güçlü reaksiyon, alkalili ortamda

bu kalsiyum hidroksitle girdiği reaksiyonlardır ve böylece kalsiyum hidroksitleri (C-S-H) jelleri gibi çok kuvvetli bağlayıcı ürünü ortaya çıkarır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun beton özelliklerinde olumlu ve olumsuz etkileri vardır ki bunları kısaca maddeler halinde özetlenmiştir;

- Taze betonda su emmemesi nedeniyle işlenebilirliği artırmaktadır,
- Taze betonun priz süresini uzatmaktadır,
- Az su emmesi priz süresini uzaltmakla birlikte ve hidrasyon ısısında düşürmektedir,
- Sert malzeme olup ve terlemeyi azaltmasından dolayı sertleşmiş betonda su geçirimsizliğini azaltmaktadır,
- Sertleşmiş beton sülfat hücumuna karşı daha geçirimsizdir. dayanım ve dayanıklılığı artırmaktadır,
- Geç prizden dolayı kış aylarında betonun sertleşme süresi uzar ,
- Betonun ilk dayanımını azaltmaktadır.

2.1.3. Uçucu küller ve çeşitleri

En yaygın olarak kullanılan puzolanik malzeme uçucu küldür. UK, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, UK olarak adlandırılmaktadır [8]. Son yıllarda dünyada artan enerji ihtiyacı termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santrallerden açığa çıkan atıkların, özellikle de uçucu külün önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atığın inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır.

Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir [10].

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır.

Çizelge 2.3’de görüldüğü gibi; Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü yumurtalık termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır.

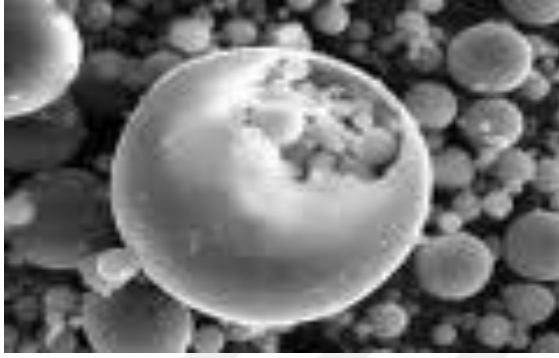
Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl Uçucu Kül elde edilmektedir [10]. Bu miktarın Türkiye’de daha fazla olduğu bir gerçektir. Bu miktar, A.B.D’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır [11].

Çizelge 2.3. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller [12]

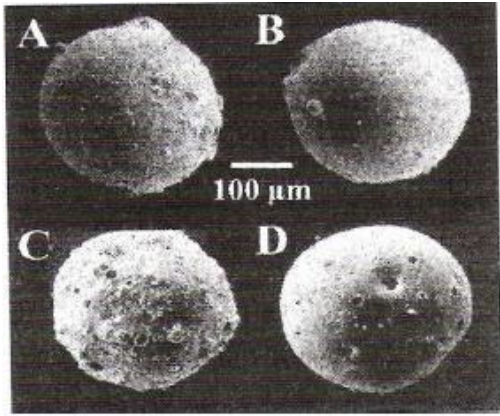
No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Linyit	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Taşkömürü	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Linyit	190	Kocaeli
7	Kangal	Taşkömürü	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü- Yumurtalık	Taşkömürü	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu $2,2 - 2,7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır [13].

Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar, boşluklu küreler ve büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar Resim 2.1’de yüzeyi düzensiz dağılmış, şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıklar bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir Resim 2.1 ve Resim 2.2 .



Resim 2.1. Büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar



- A) Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik
- B) Camsı küresel tanecik
- C) Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik
- D) Boşluklu küresel tanecik

Resim 2.2. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı [14]

Küresel olmayan tanecikler kömürden geçen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller, düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan oluşmaktadır [14].

Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar. Boyutları genellikle 0,5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri

1800 – 5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800 – 3800 cm²/gr dolayındadır.

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık % 5'i (hacminin % 20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır [14].

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 µm'nin altında olması ve şeklinin de genellikle küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedir.

Uçucu külün sınıflandırılması

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu küller 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür;

1. Silikat-Alümina esaslı uçucu küller: Bunlar taş kömürü uçucu külleridir. Yapılarının büyük kısmını kuvars (SiO₂) ve bir miktar alümina (Al₂O₃) meydana getirmektedir. Bu uçucu küller normal sıcaklıkta ve hidrolik bağlayıcı gibi priz yaparlar.
2. Silikat-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler kuvars (SiO₂) ve kalsit'tir (CaCO₃). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.
3. Sülfür-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümünü kükürt trioksit (SO₃) ve kalsit'ten (CaCO₃) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir.
4. Sınıflandırılmayan uçucu küller: Termik santrallerde ki yanma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 (1998) ve TS EN 197-1 (2012) standartları baza alınır.

Uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar

F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

C sınıfı uçucu kül ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'den fazla olan uçucu küller girmektedir.

Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [15].

F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşik oranları toplum olarak Çizelge 2.4'te verilmiştir. Bu tabloda uçucu küller yüksek F, düşük F, yüksek C ve düşük C olarak TS EN 197-1 de sınıflandırılmıştır.

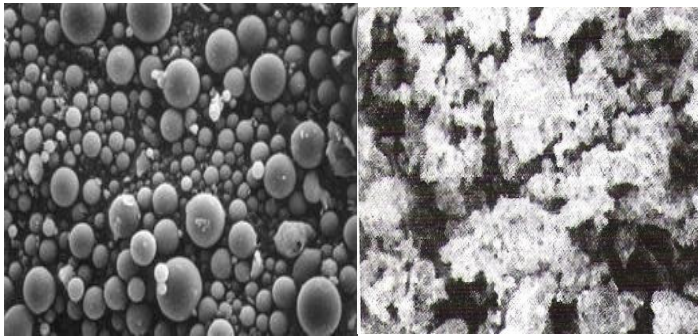
Çizelge 2.4. F ve C sınıfların gurupları [16]

	F sınıfı		C sınıfı	
Bileşik	Düşük F'li	Yüksek F 'li	Düşük C'li	Yüksek C 'li
SiO_2	46-57	42-54	25-42	46-59
Al_2O_3	18-29	16.5-29	15-21	14-22
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1,8-5,5	1,3-3,8	17-32	8-16
MgO	1,8-5,5	0.3-1,2	4-12,5	3,2-4,9
K_2O	1,9-2,8	2,1-2,7	0,3-1,6	0,6-1,1
Na_2O	0,2-1,1	0,2-0,9	0,8-6	1,3-4,2
SO_3	0,4-2,9	0.5-1,8	0,4-5	0,4-2,3
Li_2O	0,6-4,8	1,2-5	0,1-1	0,1-2,3
TiO_2	1-2	1-1,5	<1	<1

TS EN 197-1 (2002) göre uçucu küller silissi V ve kalkersi W gruplarına ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince toz yapıda olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitden (Al_2O_3) oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince toz yapıda olup, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir [17].

Uçucu küllerin özellikler

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, diğerleri SO_3 , MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir. %20'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları külün puzolanik özelliğinin yanı sıra kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır. Yüksek kireçli küllerin mikro yapıları incelendiğinde hem küresel hem de köşeli düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda heterojen olan şekil dağılımı görülmektedir Resim 2.3. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir [18]. Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde yavaş olarak reaksiyona girerken yüksek kireçli küldeki kalsiyum alumino silikat camsı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı fazları oluşturur [18].



Resim 2.3. Yüksek silisli uçucu (pulverize uçucu kül) ve yüksek kireçli uçucu kül

Uçucu küllü betonların özellikleri

Uçucu külün betonda kullanım oranı, betonun özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle uçucu külün betona olan etkisi uçucu külün oranına ve kullanılan agrega, su ve diğer malzemelere bağlıdır. Uçucu külün beton üzerinde bazı etkileri Çizelge 2.5’de görülmektedir.

Çizelge 2.5. Uçucu külün beton özelliklerine etkisi [6]

Beton özelliği	Etkisi
Taze beton su ihtiyacını	Azaltır
Taze betonda tane ayrışmasını	Azaltır
Taze betonda işlenebilirliği	Artırır
Taze betonda pürüz suresini	Artırır
Taze betonda terlemeyi	Azaltır
Sertleşmiş betonda erken dayanımı	Azaltır
Sertleşmiş betonda su geçirgenliği	Azaltır

Betondaki karbonatlaşma derinliğinin Uçucu kül miktarının artmasıyla arttığı, her %10’luk Uçucu kül miktarı artışının karbonatlaşma derinliğinde yaklaşık 0,3 mm’lik bir artışa sebep olduğu belirlenmiştir. Maksimum karbonatlaşma miktarının 2 mm olduğunu ve %40 Uçucu kül içeren betona ait olduğunu söylemektedir. Karbonatlaşma mevcut kireç ve permeabilitenin karmaşık bir fonksiyonudur [19].

Uygun tasarlanmış ve iyi kür edilip, iyi sıkıştırılmış Uçucu kül ikameli betonların karbonatlaşması diğer tip betonlardan çok farklı değildir [20].

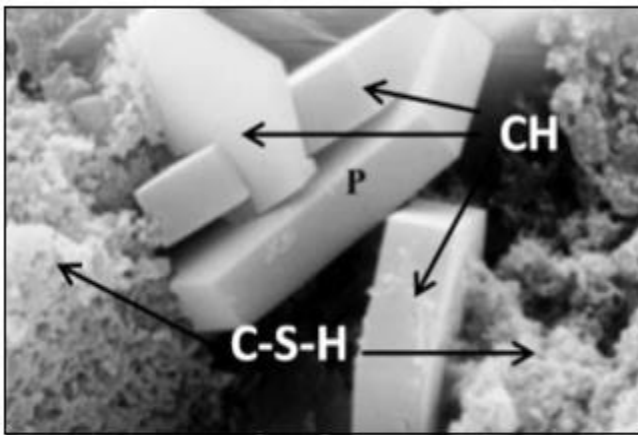
Kuru kür ve ıslak kür ortamlarında, %70 Uçucu kül içeren betonun, %50 Uçucu kül içeren betona ve normal portland çimentolu betona göre karbonatlaşma miktarının daha fazla olduğunu belirtmektedir. Yine her iki kür ortamında %50 Uçucu kül içeren betonun normal portland çimentolu betona göre daha az karbonatlaşma yaptığı belirlenmiştir [20]. Bu çalışmada karbonatlaşma araştırmanın önemli bir konusu olduğu için geniş olarak ayrı bir başlık altında incelenecektir.

Puzolanların betonda dayanım kazanma prosedürü

Betondaki portland çimentosu hamurunun kazanabileceği dayanımın hızı ve miktarı, çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin su ile reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşum hızı ve miktarına bağlıdır. C-S-H jelleri ne kadar hızlı oluşurlarsa, çimentonun dayanım kazanma hızı o kadar çok ve beton içinde hidrate olmamış çimento ne kadar az oluşursa dayanım o kadar yüksek olmaktadır.

İnce taneli puzolanik katkıların çimento hamurunun içerisinde dayanım kazanmaları, bu maddelerin çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmeleriyle mümkün olabilmektedir. Puzolanik malzemelere kalsiyum hidroksit ve su arasındaki reaksiyon, yeni C-S-H jellerin oluşmasına ve dayanım artmasına neden olmaktadır.

Puzolanik beton yapımında, beton karışımında yer alacak portland çimentosu bir miktar azalmakta ve onun yerine puzolan eklemektedir. İlk aşamada puzolanik betonun içerisindeki portland çimentosunun hidratasyona başlamasıyla bağlayıcılık sağlayan bir miktar C-S-H jeli üretmekte, ve ikinci aşamada puzolanik reaksiyonların devam etmesiyle yeni C-S-H jelleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, puzolanik betonun ilk günlerde kazanabileceği dayanımın miktarı, daha çok miktarda portland çimentosuna sahip olan puzolansız betonunkine göre daha azdır. Ancak Şekil 2.4 de verildiği gibi puzolanik reaksiyonların oluşması ve yeni C-S-H jellerin üretilmesiyle, puzolanik betonun nihai dayanımı, portland çimentosu ile elde edilen betonlardan daha az olmamaktadır.



Resim 2.4. 10000 kat büyütülmüş çimentonun SEM fotorafi

C-S-H jeli (kalsiyum silikat hidrat) çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran ve dayanım kazanmasını sağlayan üründür. Ürünün moleküler büyüklüğü yaklaşık çimento tanesinden 1000 kat daha küçüktür. C-S-H hidrate olan ürünlerin yaklaşık %60'ını oluşturur. CH (kalsiyum hidroksit) dayanıma etkisi olmayan, ancak beton içindeki bazik yapıyı sağlayan üründür. Zayıf yapısı ve aderansı zayıflatıcı etkisi nedeniyle gerekenden fazlası istenmeyen bir üründür. Hidrate olan ürünlerin yaklaşık %20'sini oluşturur. Katkılı çimentolarla yapılan betonlarda CH oranı çok daha düşüktür. CH düzgün altıgen şeklinde tabakalı bir yapıdadır. C-S-H'e oranla oldukça büyük boyutta olan CH genelde boşluklarda ve çimento hamuru-agrega arayüzeylerinde birikir.

2.2. Çimento ve Çimento Çeşitleri

Kil ve kalkerin 1350- 1500°C 'de döner fırında pişirilmesi sonucu elde edilen ürüne klinker denir. Çimento, klinkerlerin %3- 6 arasında alçı taşı ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır.

2.2.1. Çimento bileşenleri

Çimentoyu oluşturan karma oksit bileşenleri genel olarak dört grupta toplanabilir;

1. Fırına verilen farinde önce nispeten düşük ısılarda bileşimindeki tüm Fe_2O_3 bir miktar Al_2O_3 alarak, $\text{C}_4\text{AF} [(\text{CaO})_4 \text{Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3]$ Tetra kalsiyum alumino ferriti,
2. Kalan Al_2O_3 ve $\text{C}_3\text{A} [(\text{CaO})_3 \text{Al}_2\text{O}_3]$ ile birleşerek Tri kalsiyum aluminatı ,
3. Isı arttıkça: $\text{C}_2\text{S} [(\text{CaO})_2 \text{SiO}_2]$ Dikalsiyum silikası,
4. Yeterli CaO ve ısıda ($\sim 1400^\circ\text{C}$) $\text{C}_3\text{S} [(\text{CaO})_3 \text{SiO}_2]$ Trikalsiyum Silikası oluşur.

Karma oksitlerin çimentoya kazandırdıkları önemli özellikleri şunlardır;

1. C_3S ve C_2S su ile birleştiğinde hızla sertleşir, dayanım kazanır. C_3S . çimento hacminin yaklaşık %55 ni oluşturur ve erken dayanıma etkisi vardır. C_3S nin hidratasyonu daha çabuktur, oran arttıkça özellikle ilk günlerde dayanım kazandırır. C_2S çimento hacminin yaklaşık %20 sini oluşturur ve geç dayanıma etkisi vardır. C_3S ve C_2S hidratasyonu sırasında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşur. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, demir iskeletlerin

paslanmasını geciktirir. Korozyonu önlemede yararlıdır. Fakat zamanla suda çözünür ve beton içerisinde boşluklu bir yapı oluşur.

2. Alümina, kalsiyum oksitle birleşerek trikalsiyum alüminat (C_3A) ve demir oksitle birleşerek tetrakalsiyum aluminoferrite (C_4AF) oluşturur. Alüminatlar yaklaşık olarak çimentonun %20'sini oluşturur. Hidratasyon sırasında C_3A çok hızlı tepkimeye girer ve bu durum alçı taşı ile kontrol edilir.

C_3A ilk dayanımlarda olumlu rol oynarsa da ancak C_3S ile kıyaslanamaz. C_3A 'nın hidratasyonu sırasında büyük ısı açığa çıkar ve sülfat iyonları ile büyük hacimli ETRENJİT (Candlot tuzu) oluşturur. Bu iki olay betonu olumsuz etkiler. Kütle betonu (baraj vs.) ve agresif sularla temastaki betonlarda (kuyu, rıhtım, iskele, köprü ayağı gibi) genleşme ve çatlaklara neden olur. Bu tür yerlerde kullanılacak betonların çimentolarında C_3A oranının düşük olması istenir (C_3A %3-5 gibi) veya puzolonik katkılı çimentolar tercih edilmelidir [21].

3. C_4AF çimento içerisinde en az etkinliği olan bileşendir. Bu az etki de C_3A 'nın etkisine benzer. Yararı; klinkerin pişme süresince yumuşamasını, pişme yetkinliği kazanmasını sağlar.

Serbest CaO ve MgO fazla oranlarda olduğu zaman betonu olumsuz etkiler . Su ile $Ca(OH)_2$ ve $Mg(OH)_2$ açığa çıkmasına neden olur. Zamanla havadan CO_2 alır, $CaCO_3$, $MgCO_3$ oluşur. Böylece ince yüzey çatlaklarının genişlemesine, derinleşmesine neden olurlar.

Puzolonik maddeler kendi aktif silislerinin, hidratasyon ürünü $Ca(OH)_2$ ile birleşmesi sonucu sertleşir ve dayanım kazanırlar. Bu özellikleri betonun geçirimsizliğini olumlu yönde etkilerse de kirecin demir aksamı koruyuculuğunu azaltır. Puzolonik maddeler ülkemizde bol miktarda bulunurlar ve çok çeşitlidirler. Bazaltik, riyolit vs. gibi türleri, aynı türün ince, kaba kristal yapıları ve farklı aktif silis oranları vardır. Puzolonların farklı özellikleri çimentoların dayanım ve değişik ortamlarda değişik davranışlarına olumlu ya da olumsuz etkileri olur [22].

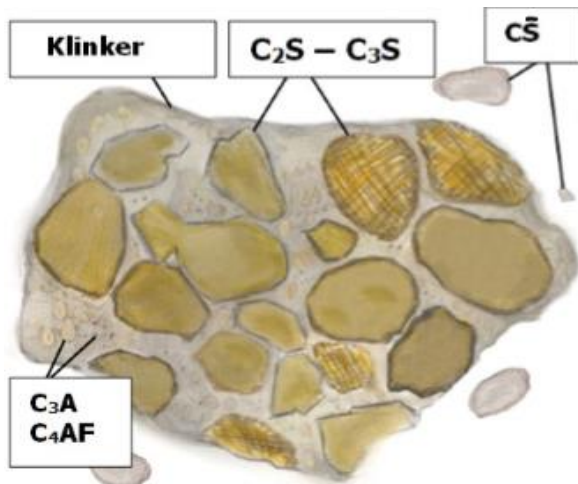
2.2.2. Çimento dayanım kazanma aşaması ve hidratasyonu

Beton bileşenleri karıştırıldıktan birkaç saat sonra plastik özeliği kaybolmuş katı bir yapı oluştururlar. Buna neden olan ve çimento ile suyun tepkimesi sonucu oluşan kimyasal reaksiyona “hidratasyon” denir. Su ve sıcaklığa bağlı olan hidratasyonun gelişimi ve açığa çıkardığı ısı hem üretici hem de uygulayıcı için önemlidir. Bu reaksiyonun iyi anlaşılması betonun birçok özelliğinin daha iyi kavranmasına neden olacaktır [18].

Hidratasyonun süreçleri

Çimento hidratasyon süreci çimento ve suyun biraraya gelmesiyle başlar. Çimento bileşenleri değişik hızlarda ve oranlarda reaksiyona girer. Reaksiyonlar sırasında ısı açığa çıkar ve yeni ürünler meydana gelir. Portland çimentosu, kireçtaşı ve kilin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ve bu işlem sonucu oluşan klinkerin alçıtaşıyla birlikte öğütülmesiyle meydana gelir. Pişirme sonucu klinker yapısında oluşan iki ana bileşen grubu (silikatlar-aluminatlar) ile sonradan Şekil 2.5 gibi ilave edilen alçı (sülfat) hidratasyon reaksiyonu sürecini doğrudan etkiler. Çimento ana bileşenleri;

1. Kalsiyum Silikatlar (C_3S-C_2S)
2. Kalsiyum Aluminatlar ($C_3A - C_4AF$)
3. Kalsiyum Sülfatlar ($CS.2H$)



Resim 2.5. Çimento hidratasyon sonucunda doğan bileşenler

Bu üç ana bileşenin ortak yanı kalsiyum(Ca) içermeleridir. Bu üç ana bileşenin kimyasal özellikleri ve etkileri oldukça farklıdır.

Hidratasyon reaksiyonunun süreçleri;

1. Karıştırma süreci,
2. Uyku süreci,
3. Sertleşme (priz) süreci,
4. Soğuma süreci,
5. Yoğunlaşma süreci.

Silikatlar: Çimentonun yaklaşık % 20'si silisyum dioksit(SiO_2) ve %60-65'i kalsiyum oksit'ten(CaO) oluşur. Bu iki oksitin birleşmesiyle silikatlar oluşur. Silikatlar klinkerin yaklaşık % 75'ini oluşturur Trikalsiyum silikat - Alit(C_3S): Çimento hacminin yaklaşık %55'ini oluşturur. Erken dayanıma etkisi vardır. Dikalsiyum silikat - Belit(C_2S): Çimentonun hacminin yaklaşık %20'sini oluşturur. Geç dayanıma etkisi vardır.

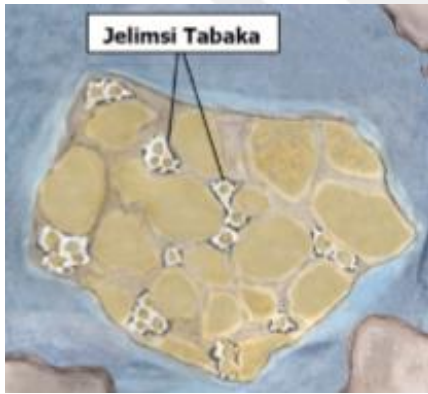
Alüminatlar: Alümina, kalsiyum oksitle birleşerek trikalsiyum alüminat (C_3A) ve demir oksitle birleşerek tetrakalsiyum aluminoferrite (C_4AF) oluşturur. Alüminatlar yaklaşık olarak çimentonun %20'sini oluşturur. Hidratasyon sırasında C_3A çok hızlı tepkimeye girer ve bu durum alçı ile kontrol edilir.

Alçıtaşı: Klinkere değirmende öğütülme işlemi esnasında çimentonun yaklaşık %3-5 hacmini oluşturacak miktarda alçıtaşı eklenir. Alçıtaşının eklenmesi ile C_3A tepkimesinin kontrolü için gerekli olan sülfat temin edilmiş olur. Sülfat oranı üretici tarafından çok hassas bir şekilde optimize edilir. Aksi takdirde priz olayında sorunlar yaşanabilir. Sülfat ve alüminat içeriği bir denge içerisinde olmalıdır. Çimento içeriğinde bulunan sülfat ile betona daha sonra giriş yapan deniz ya da yeraltı suyu kaynaklı sülfat karıştırılmamalıdır. Dış kaynaklı sülfat betona nüfuz eder ve hidratasyon ürünü olan C_3A ile tepkimeye girerek genleşmeye(hacimsel artışa) neden olur. İşte bu nedenle sülfata dayanıklı çimentoda C_3A oranı belli bir sınırdan tutulur (%5'den az) [23,24].

Karıştırma süreci

Bu süreçte alüminatlar ve alçı suda çok hızlı çözünür ve birkaç dakika içinde tepkimeye girerler. Hızlı tepkime sonucu oluşan bileşikler yüksek ısı çıkışına neden olurlar. Bu durum kontrol edilemediği takdirde betonda yalancı veya ani priz meydana gelir. Bu da istenmeyen bir durumdur. Klinkere eklenen alçının çok hızlı çözünmesi sonucu çözünmüş alüminatlar ve su ile tepkimeye girerek çimento taneciklerinin etrafında jelimsi bir tabaka oluşturur. Bu jelimsi tabaka alüminatların çok hızlı bir şekilde tepkimesini engeller ve sıcaklığı büyük ölçüde düşürür ve betonun ani priz yapması engellenir.

Silikatlar suda çok yavaş çözünür ve ani etkileri yoktur. Bu nedenle bu süreçte alüminatlar baskın bileşendir [24].



Resim 2.6. Çimento hidratasyon sonucu jelimsel tabakanın görüntüsü

Şekil 2.6’da görünen jelimsi tabaka oluşumu ile reaksiyonlar ve ısı oluşumu kontrollu bir şekilde devam eder [24].

Sertleşme süreci

Karışım suyu, çözünen kalsiyum iyonları ile aşırı doygun hale ulaşınca, yeni hidratasyon ürünleri oluşmaya başlar ve bunun sonucunda ısı çıkışında yükselme meydana gelir. Bu duruma sertleşmenin (priz) başlangıcı denir. Prizin başlaması ile betonda vibratör uygulaması veya yüzey bitirme işlemi gibi uygulamalar artık yapılamaz. Betona yapılacak müdahaleler kalıcı ayrılmaya neden olur. Bu periyotta beton yüzeyinde sulama, kür katkısı uygulaması ve yüzeyin membranla örtülmesi gibi kür (bakım) işlemleri yapılmaya

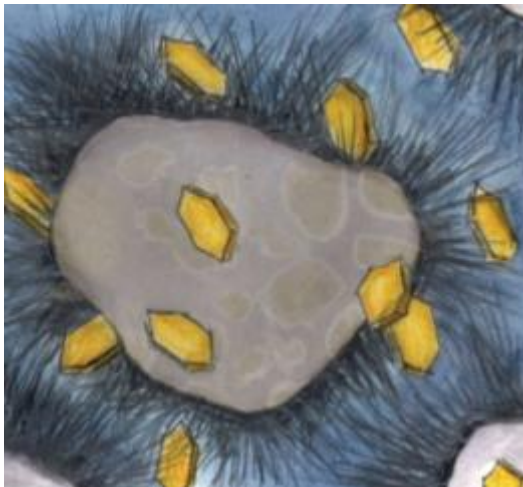
başlanır. Sertleşme periyodunda oluşan yeni ürünlerin miktarı devamlı artar. Buna paralel olarak ısı oluşumu da artar. Bu ürünler birbirleri ile bağlanıp agregaların etrafında toplanır ve agregaları sararlar. Sonuçta beton sertleşir ve katılaşmaya başlar. Priz sonu en azından betonun üzerinde yürünebileceği bir zamandır [24].



Resim 2.7. Priz zamanında oluşan kristal bağlantılar [22]

Soğuma süreci

Bu süreçte “topochemical” diye adlandırılan reaksiyon gerçekleşir. Çimento hamuru bileşenler açısından doygun hale gelmiştir. Çimento taneciklerinin (C_3S) yüzeyinde hidrasyon başlar ve yüzeyde hidrasyon ürünleri (C-S-H ve CH) oluşur. Betonun dayanım kazanma süreci artık başlamıştır [23,24].



Resim 2.8. Betonun dayanım kazanma süreci [22]

Yoğunlaşma süreci

Bu periyotta reaksiyon yavaşlamaya başlar ve ısı çıkışı önemli düzeyde azalır. Hidratasyon ürünleri artmaya ve gelişmeye devam etmektedir. Şekil 2.7-2.8 ve 2.9’da görüldüğü gibi beton gittikçe daha sert ve sağlam bir yapıya kavuşur. Bu periyot hidrate olmamış çimento tanecikleri ile suyun bulunması durumunda çok uzun bir süre devam eder. Kısaca, betonun yıllar sürebilecek bir zaman diliminde dayanımı ve dayanıklılığı artar [24].



Resim 2.9. Hidratasyon ürünlerinin artması ve gelişmesi [22]

2.2.3. Çimento çeşitleri

Çimento belirli standartlara dayanılarak üretilmektedir. Avrupa ülkelerinin çoğunluğu için geçerli olacak çimento standartlarının hazırlanmasına 1973 yılında Avrupa Standardizasyon Komitesi’nin teknik komitesi TC 51 ile başlanmıştır. Çeşitli Avrupa ülkelerinde çok sayıda çimento türünün yerel standartlara uygun olarak kullanılmakta olduğunu dikkate alan komite, genel çimentolar için hazırladığı EN 197-1 de çok sayıda çimento türüne yer vermiştir. Doğrudan Türk standardı olarak kabul edilen bu Avrupa standardı da genel amaçlı Türk çimentolarının yerini almıştır. Yeni genel çimentolar TS EN 197-1’de “CEM Çimentosu” olarak adlandırılır.

Buna göre;

Portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılarıdır. Standartta göre CEM Çimentoları, 27 alt çeşidi kapsayan 5 ana tiptir.

CEM I: Bu grupta klinkerin sadece kalsiyum sülfat ve minör bileşen olarak ağırlıkça en fazla % 0-5 arası mineral katkı ile öğütülmesi sonucunda Portland Çimentosu elde edilir.

CEM II: Bu grupta mineral katkı miktarı % 6-35 arasındadır. Katkı türüne bağlı olarak bu gruptaki çimentolar Portland Cürüflu, Portland Puzolanlı gibi isimler de almaktadır.

CEM III: Bu grupta Yüksek Fırın Cürüflu Çimentolar bulunur. Katkı miktarı % 36-95 arasındadır.

CEM IV: Bu grupta Puzolanik Çimentolar yer alır. Bunlarda cüruf veya kalker katkı maddesi olarak kullanılmaz. Katkı madde oranı puzolan ve uçucu kül katkıları ile birlikte %11-55 arasında değişmektedir.

CEM V: Bu grupta Kompoze Çimentolar bulunur. Bunlara hem cüruf (%18-50) ve hem de puzolan ve uçucu kül (%18- 50) miktarı belirlenen sınırlar içerisinde değiştirilerek birlikte katılır, miktarları klinker oranı %20- 64 arasında kalacak şekilde ayarlanır. Bunların haricinde gerek klinker üretimi sırasında, gerekse sonradan ilave edilen mineral katkıları sayesinde özel kullanım amaçlı olarak üretilmiş, TS EN 197-1 standardının kapsadığı 5 çeşit çimento bulunmaktadır [25].

Uçucu Küllü Çimento: Düşük hidratasyon ısılı çimento: 28% (C_3S), 49% (C_2S), 4% (C_3A), 12% (C_4AF), 1.8% MgO, 1.9% (SO_3) birleşiminden oluşur. (C_2S) ve (C_4AF) oranları yüksek (C_3S) ve (C_3A) oranları oldukça düşüktür.

C_3A için üst sınır %7 ve C_3S için üst sınır 35% dir. Düşük hidratasyon ısısının sağladığı avantajlar sayesinde baraj inşaatlarında kullanılır. Yazın yüksek sıcaklıklı günlerde karışım sıcaklığını düşürmekte önemli bir katkısı yoktur. Günümüzde yerini puzolan (granüle yakın fırın cürufu) katkısı ile sunulan normal çimentoya bırakmaktadır. Son dayanım değeri açısından normal çimentodan güçlüdür [22].

2.3. Kireç

Kireç kalsiyum esaslı inşaatla kullanılan en eski bağlayıcı yapı malzemesidir. Hava ile sertleşen ve su ile çözülen bir özelliğe sahiptir. Kireç en eski yapılardan birisi olan Çin

setti yaklaşık MÖ 300 yıllarda yapıldığı bilinmektedir. Günümüzde gelişen inşaat malzemesi ile birlikte kireç ürünleri ve tüketimi azalmaktadır. Kirecin yerini çimento ve alçı kısmen almaktadır. Bu kirecin öneminin azalması anlamına gelmez. Kirecin ana maddesi kireç taşı veya kalsiyum karbonat CaCO_3 doğada bol bol bulunan bir malzemedir. Uygun boyutta pişirilrilen CaCO_3 taşlar kireç fırınlarında $900\text{ }^\circ\text{C}$ derecelere kadar ısıtılırsa taş bünyesinde bulunan CO_2 tamamen taş bünyesinden ayrılarak amorf CaO açığa çıkar.

Eğer kalsiyum karbonatı (CaCO_3) $900\text{ }^\circ\text{C}$ kadar ısıtılırsa CO_2 tamamen ayrılır ve CaO geriye kalır;



Kireç taşının yoğunluğu $2,7\text{ g/cm}^3$ ve serbest kirecin ağırlığı $3,1\text{ g/cm}^3$ tanımlanmaktadır [26].

Kireç taşı genel bileşenleri, mangenez, silis, manyeziyum ve alüminyumdur. En kaliteli kireç hammaddesi (CaCO_3) içinde kalsiyum karbonat en az %90 olmalıdır. Diğer bileşenler ise $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ miktarın toplamı %4 den az olmalıdır [27]. Ham madesine göre bir çok kireç çeşitleri vardır.

Genel olarak kireçlerde sertleşme üç şekilde oluşur, Bunlar:

1. Kuruma,
2. Ca(OH)_2 formülünde kristalleşme,
3. Havadaki CO_2 ile birleşerek karbonatlaşmadır.

Kuruma ve kristalleşme geçicidir. Suyla karışınca kireç tekrar yumuşar. Asıl sertleşme karbonatlaşma sonucu oluşur. Kirec su ile karıştırdıktan sonra elde edilen hamur havada bırakıldığında, havanın CO_2 'sini alarak aşağıdaki reaksiyona göre, suda erimeyen kalsiyum karbonata dönüşür.



Bu reaksiyon çok yavaş olur ve özellikle CO_2 'nin varlığı zorunludur. Bu şekilde meydana gelen CaCO_3 sayesinde hava kireci katılır, yani plastikliğini kaybeder ve sertleşmeye

başlar. Bu reaksiyon sırasında da bir hacim artışı gözlenir. Eğer kireç yalnız başına kullanılırsa bu reaksiyon yapıya zarar verebilir. Kireci kumla karıştırmak suretiyle bu deformasyonu, miktar ve şiddetini azaltarak, zararsız hale getirilir.

Kireçi doğru kullanması için tüm tanelerinin su ile temasa geçmesi gerekir çünkü eğer hepsi su ile reaksiyona girmezse sertleştikten sonra su ile karşılaştığında tekrar reaksiyona girerek betona zarar verebilir ve betonda çatlaklara ve patlaklara neden olur [28].

2.4. Betonda Kür Yapmanın Özelliği ve Önemi

Günümüzde beton, en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Gelecekte de en çok kullanılan, en ekonomik yapı malzemesi olma özelliğini sürdürecektir. Bu önemli yapı malzemesinin iyi bir şekilde elde edilmesi; kendisini oluşturan malzemeler kadar üretim, döküm, yerleştirme, bakım şartları ve bunların denetimlerine de bağlıdır. Bu da ancak şantiyede bazı şartların yerine getirilmesi ve mevcut şartların en iyi şekilde değerlendirilmesiyle sağlanabilir [28].

Kür, çimento hidrasyonunun ilerlemesi için betondaki ısı ve nem değişikliklerini kontrol altında tutma yöntemidir. Kürün amacı, çimento hamurundaki suyun boşluklarını yine çimento içindeki ürünlerin doldurmasına kadar betonu doygun veya doyguna yakın durumda tutmaktır [28].

Betonlar 28 günlük dayanımlarına göre tanımlandıkları için laboratuvar da hazırlanan numuneler kalıplardan çıkartıldıktan sonra 28 gün kürde tutulmaktadırlar.

2.4.1. Kür yöntemleri

Genelde şantiyelerde değişik yöntemler ile betonu kür yaparak korurlar. Çimento hidrasyonunun ilerlemesi için betondaki ısı ve nem değişkenliklerini kontrol altında tutmanın çeşitli yollarından bazıları aşağıda verilmektedir;

- Su ile Kür Yapılması
- Beton Yüzeyini Örtü ile Kaplayarak Kür Yapılması
- Membran ile kür yapılması

Betona uygulanan kür yöntemleri basınç değerlerini ve hidrasyon yönünde miktarını artırmak değil belki diğer bir özellikleri iyileştirmek veya uygulamaktır. Örneğin: betonu deniz suyuna tabi tutmak için beton numunelerini deniz suyunda veya sülfat etkisine bakmak için sülfatlı suda veya karbonatlaşmayı araştırmak gerekirse karbondioksit kürü yapılabilir [28].

2.4.2. Kürün çimento ve puzolanlarda olan etkisi

Betondaki portland çimento hamurunun kazanabileceği dayanımın hızı ve miktarı, çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin su ile reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerine bağlıdır. C-S-H jelleri ne kadar hızlı ise çimentonun dayanım kazanma hızı 'da o kadar erken olmaktadır. Kür yaparken betonun karma suyu olan miktarın azalmasını engellemiş olur. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan C-S-H 'dan başka C-H diye farklı bir üründe meydana gelir. Bu ürün pozulanlarla reaksiyona girerek tekrar C-S-H jelini oluşturur. Bu reaksiyon aşamaları kürün iyi olması halinde dahada hızlanıp ve betonun erkenden istediğimiz mukavemete ulaşmasını sağlar [28].

2.5. Betonda Karbonatlaşma

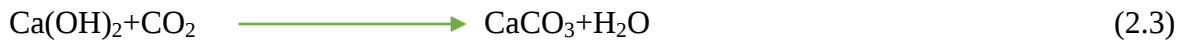
Çimento klinkerinin ana bileşenleri trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S) gibi silikatlar ile trikalsiyum alüminat (C_3A), tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF) gibi alüminatlardır. Silikatların ve alüminatların su ile birleşmesi sonucu silikat hidratlar (C-S-H) ve alüminat hidratlar (C-A-H) meydana gelir. Silikatların hidrasyonundan ayrıca (C-H) açığa çıkar, bu serbest kireç baz ortam oluşturarak betonarme elemanlarda donatıyı korozyona karşı korur. Serbest kireç havanın CO_2 etkisi ile betonun hava ile temas eden yüzeyinden başlayarak karbonatlaşır, beton yüzey sertliği artar ve suda çözünmez hale gelir.

Alkali niteliğinin kaybolmasına neden, çimento hidrasyon ürünlerinin ve özellikle $Ca(OH)_2$ 'nin havanın CO_2 gazı ile birleşerek nötr bir tuz olan $CaCO_3$ 'e dönüşmesidir ve uygun betonarme yapı elemanlarının servis ömrünü etkileyen bir faktördür [29].

Diğer bir değiş ile ; betonun içerisindeki çimentonun hidrasyon sonucunda ortaya çıkmış olan ve çimento hamurunun yapısında yer alan, kalsiyum hidroksitin bir kısmı beton

içerisine sızan sular tarafından çözünmektedir. Kalsiyum hidroksit eriği içeren sular, kapiler hareketle, beton yüzeyine veya yüzeye yakın bölgelere hareket etmektedir [30].

Kalsiyum hidroksitin havadaki karbon dioksit ile temas etmesi sonucunda kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşmakta ve ayrıca bir miktar su açığa çıkarmaktadır. Bu reaksiyon aşağıdaki formülle gösterir ve ayrıca burada bulunan suyun kuruduğu zaman betonda karbonatlaşma büzülmesi meydana çıkarak çatlamaya neden olur ve karbonatlaşmanın hızlanmasını sağlar [12].



2.5.1. Karbonatlaşmanın beton üzerinde etkisi

Karbonatlaşma veya bazı kaynaklarda beton kanseri diye geçen olay beton ve betonarme yapılarda bazı sorunlar meydana çıkarmaktadır. Bu sorunlar bazen gözle görülmediği için veya çok yavaş ilerlediği için betona zarar vermektedir [12].

Betonda karbonatlaşma olmasının beton özelliklerine olumsuz etkileri vardır. Fakat diğer taraftan , karbonatlaşma olayı, çok az da olsa, betona bazı yararlar sağlanmaktadır.

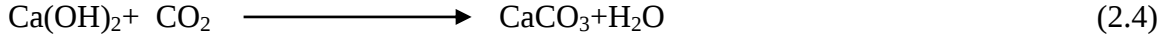


Resim 2.10. Karbonatlaşma sonucu donatı korozyonu

2.5.2. Karbonatlaşmanın olumlu ve olumsuz etkileri

Karbonatlaşmanın beton üzerinde farklı etkileri vardır. Bu etkiler çok az olsa bile bazen betona yararda bulunmaktadır. Karbonatlaşma beton yüzeyinin sertliğini artırır. Basınç dayanımını azda olsa artırır.

Karbonatlaşma nedeniyle oluşan CaCO_3 kristalleri, çimento hamurundaki kapiler boşlukların içerisine yerleştikleri için, beton nispeten daha geçirimsiz olabilmektedir [2].



Yukarıda görüldüğü gibi suyun bir bölümünü bu şekilde kaybeden çimento ister istemez bir miktar büzülme göstermektedir. Bu büzülme karbonatlaşma büzülmesi olarak adlanır [2].

Karbonatlaşma olayını gerçekleşmesi için karbon dioksitin beton boşluklarında bulunan doymuş kireç çözeltisine kadar difüzlenmesi gerekir. Yüzeye yakın olan bölgede belli kalınlıkta bir karbonat tabakası meydana geldikten sonra CO_2 beton içine girmesi zorlaşır ve böylece karbonatlaşma hızı yavaşlar. Karbonatlaşma sonucu oluşan kalsiyum karbonat beton boşluklarında çökerek poroziteyi azaltır. Bu nedenle az miktardaki karbonatlaşmanın beton dayanımı üzerinde olumlu etkisi var [31].

Yukarıda söylenen olumlu etkilere rağmen karbonatlaşmanın betonda olan olumsuz etkisi olumlu etkisinden daha önemlidir ve zararı yararından fazladır. Karbonatlaşmada olan olumsuz etkiler şu şekilde sıralanır;

- Karbonatlaşma sonucunda sertleşmiş çimento hamuru büzülme göstermektedir, dolayısı ile betonda çatlaklar oluşmaktadır.
- Karbonatlaşma sonucunda, kalsiyum hidroksitin çözünmesi nedeniyle, betonun içerisindeki mevcut olan alkali ortam daha düşük düzeye inmektedir.

Alkali niteliğinin azalması ile betonda karbonatlaşmanın yer aldığı bölgelerdeki betonarme demirlerinin korozyonu daha hızlı olabilmektedir [2].

2.5.3. Karbonatlaşmada önemli faktörler

Betonda karbonatlaşmayı etkileyen iç ve dış faktörler vardır. Bu faktörler kimyasal veya fiziksel olarak bölünebilir. Bu nedenlerden bazıları aşağıdaki şekildedir;

a) Havada olan nem yüzdesi,

- b) Beton porozitesi,
- c) Su /çimento oranıdır.

Eğer nem oranı %25 den az ise CO_2 gazının betona girme şansı yoktur çünkü nem oranı %25'den az olduğunda CO_2 gazını kendi içinde eritmeye yeterli olmayacaktır. Böylece CO_2 de betonun içine nüfuz edemez. Bunun tam tersine eğer relatif nem %90'dan fazla olduğu durumlardada karbonatlaşma görülmemektedir. Bunun nedeni nemin yüzdesidir. Nem oranı %90'dan fazla ise CO_2 betonun içine nüfuz edemez [19].

2.5.4. Betonun S/Ç oranının karbonatlaşmada etkisi

Betonun esas karbonatlaşma faktörlerinden biri betonun poroziteliğinin fazla olmasıdır. Eğer dökülen betonun içinde boşluklar minimum olmuş olsa o zaman beton daha geçirimsiz ve dıştan gelecek fiziksel etkilere karşı dayanıklıdır. Betonun içindeki boşluklar ne kadar az olursa betonun geçirimsizliği azalır ve betonu dış etkilere karşı korumuşlar. Beton içindeki boşluğun azaltılması S/Ç oranı, iyi sıkıştırma, iyi granülometri sağlanabilir.

Su / çimento oranı düşük tutulması suyun daha az kullanılması demektir. Az su demek betonun su kusması, buharlaşması, betonun oturmasında kaynaklanan su miktarının az olması buda kılcal boşlukların daha az olmasına neden olmasını sağlamaktadır.

Beton bünyesinde kılcal boşluklar CO_2 ve H_2O emerek karbontlaşma meydana gelir. S/Ç oranı ile karbonatlaşma arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir [34].

Betonda su/çimento oranı düşük olmasına rağmen sıkıştırma işlemi iyi olmaz ise beton poroziteli olarak dış etkilere maruz kalacaktır.

2.5.5. Betonda kendiliğinden iyileşme ve önemi

Kendiliğinden iyileşme kullanılan betonun servis ömrünü artırarak her yıl yüksek miktarda betonun bakım ve onarımından tasarruf ederek ekonomiye katkı sağlamaktadır.

Çatlaklar önemli ölçüde betonların yük taşıma gücünü ve dayanımını etkilemektedir. Çatlaklar her zaman betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini azaltır ve bundan dolayı

çatlakların betonda olmaması betonda oluşabilecek kimyasal ve fiziksel etkilere karşı önlemede önemli rolü var.

Köprülerde, binalarda, yollarda ve sulama kanallarında en çok kullanılan malzeme şüphesiz betondur. Beton büyük gerilmeler altında çatlayabilen bir malzemedir ve bu çatlaklardan dolayı beton kimyasal kimyasal etkilere maruz kalması kolaylaşır. Günümüzde üretilen betonlar farklı nedenlerde dolayı çatlama maruz kalmaktadır. Son yıllarda betonun çatlamlarını engellemek için bazı işlemler yapılmaya çalışılmakta fakat çatlama nedeni tek bir sebepten olmadığından dolayı kalıcı çözümler henüz bulunamayıp araştırma safhasındadır. Çatlaklar konusunda araştırmalar çatlakların oluşuktan sonra iyileşmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

Fiber cam sistemleri, polimer kompozitlerin otonomik iyileştirmesi ve kendiliğinden iyileştiren ajanların mikro kapsüller [35].

İlk deneylerde bakteriyel ve kimyasal olarak incelemeler yapılmış fakat ekonomik olmadığından dolayı sonuçlar pratik bir anlam taşımamıştır. Biyolji konusunda uzman Dr Henk Jorkers İnşaat ve yapı mühendisleri ile beraber yaklaşık 2 yıl çalıştıktan sonra icat ettiği bir aganta vasıtası ile biyo-beton adında bir ürün tasarlamıştır. Dr Jokers yaptığı betonda mikron boyutlarında kalsiyum silikatla zenginleştirilmiş kapsüllerle %30 çatlakları üzerinde iyileşme sağlamıştır. Fakat bu ürün laboratuvar dışında pek kullanışlı bir malzeme olmamıştır. Yıllar ilerledikçe araştırmacılar daha ekonomi ve daha kullanışlı yöntemler bulmak üzerinde odaklanarak bazı katkı maddelerin betonda kullanılmasını zaman çerçevesinde beton üzerinde etkili bulmuşlardır. Şahmaran ve arkadaşları katkı maddesi olarak pozolanların C-H ürününü betonun reaksiyonuna döndürülmesinden faydalanarak yaptıkları araştırmalarında %35 ve %55 uçucu kül çimento yerine ikame etmişler ve numunelerde basınç dayanımının %6 -27 arasında iyileşmesini sağlamışlardır [36].

Betonda en yaygın çatlak iyileştirme deneylerinde çatlakların ancak, 0,1-0,2 mm kadar genişliklere sahip mikro-çatlakları iyileştirmesidir.

Esasen, betonun iyileşmesi betonun bileşenlerine bağlıdır ama iyileşme süresi her zaman kullanılan mekanizmadan etkilenir.

Örneğin, Amsterdam kanallarında çatlak gözlenmiştir ve burada iyileşme işlemi ağırlıklı kireç bazlı harç matrisi içeren malzemeyle kalsiyum karbonatın yeniden üretilmiş ve çatlaklar kapanmıştır [37].

Araştırmaların kullanışlı olması için daha ekonomik ve basit uygulanması büyük önem taşımaktadır. Önerilen bir iyileştirme yöntemi ne kadar etkili olsa bile günlük hayat'ta ve betonun kullanıldığı şantiyelerde uygulanmadıkça ve sadece laboratuvarlarda sınırlandıkça bilim açısından yararlı ise de toplumun sorunlarının çözemediği için pek de yararlı olamaz. Kendiliğinden iyileşmenin şematik olarak Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ifade edilebilir [38].

Betonda çatlakların iyileşmesinde altküme olarak X ve V vardır. Bu iki kümeyi K temsil eder. Her iyileşme metodunda bu kümelerin müdahalesi ve kendine göre payı vardır.

(X) Otojen İyileşme: Bu yöntemde doldurmak ve sızdırmazlık sağlamak için hiçbir dış etki ve fazla enerji kullanılmamaktadır ve başka bir iyileşme operasyonu yapılmaz.

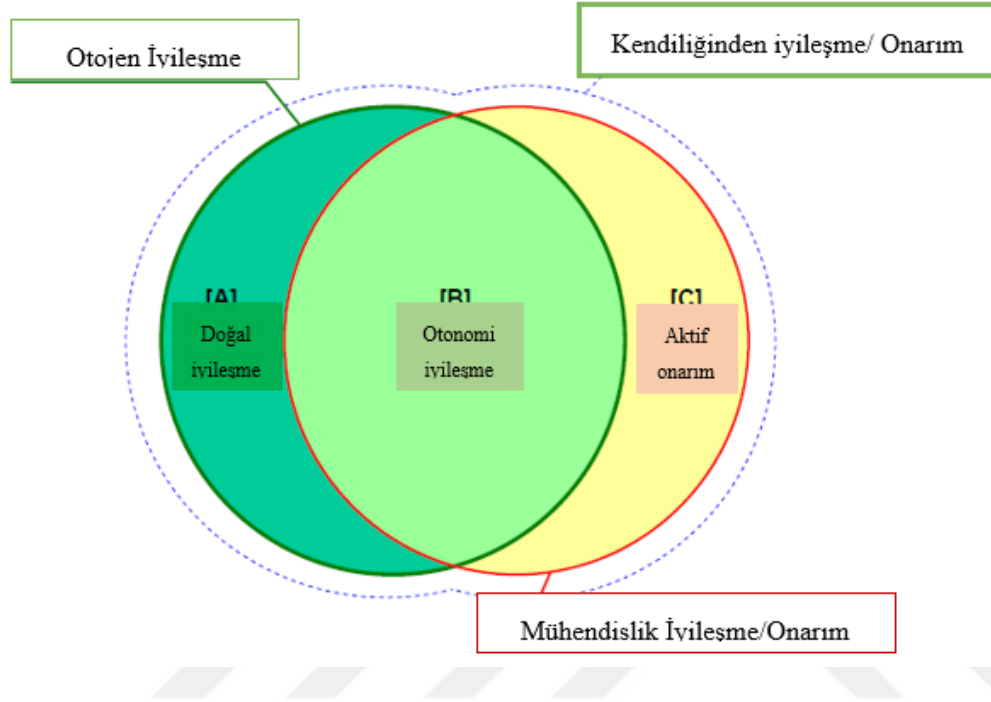
(Y) Mühendislik İyileşme/Onarım: Bu metotta doldurmak ve sızdırmazlık sağlamak için yapay işlemler ve dıştan müdahaleler yapılmamaktadır. İyileşme farklı malzeme ve makine kullanarak betonun bazı özelliklerini değişme ve kullanması ile yapılır.

$(X \cup Y)$ = kendiliğinden iyileşme/ Onarım: sızdırmazlık ve sağlamak için hiçbir dış ve iç işlemciler tarafından yapılmamaktadır ve çatlakların iyileşmesi otomatik olarak yapılır.

[A]= Doğal iyileşme: Doğal fenomende sızdırmazlık ve çatlakları iyileştirme kimyasal bir reaksiyon sonucu (hidratasyon ve karbonatlaşma) veya mekanik bloklaşma neticesinde oluşur bu reaksiyonlar iyileşmede doğal işlevler sayılırlar.

[B]= Otonomi iyileşme: Çatlakların kendi kendine iyileşmesi betonun karışımından kaynaklanır. Karışımda betona kasten uçucu kül veya özel ve pahalı agantalar katarak biz bu prosesi geliştiririz. Bu yöntem A ve C grubunun ortak bir işlemiyle yapılır. Yani A kadar doğal ve bağımsız değil ve C kadarda akıllı sistem (smart system)sayılmaz

[C]= Aktif onarım: Aktif veya otomatik onarımda bazı yapay malzemeler, algılayıcılar ve diskler kullanılır. Bu onarım işleminde kullanılan farklı maddeler akıllı madde ve metotta akıllı yöntem olarak adlanırlar [38].



Şekil 2.1. Betondaki kendiliğinden iyileşmenin şematik olarak gösterilmesi

2.6. Betonda Kendiliğinden İyileşmeyi Etkileyen Reaksiyonlar

Betonda iyileşme, genelde çatlakların dolması ve kapanmasından kaynaklanır. Çatlaklar kapandığı zaman betonun ya dayanımı kontrol betona göre yükselir veya kusurlu betonda iyileşme sonucu yükselişler kayıt edilir. Betonda iyileşmenin mukavemette ve dayanımda etkisi vardır. Önceki bölümde söylediğimiz gibi betonun iyileşmesinde 3 yöntem vardır [39];

1. Doğal yöntem
2. Mühendislik yöntem
3. Mühendislik ve doğal yöntemin ortak yapıldığı yöntem.

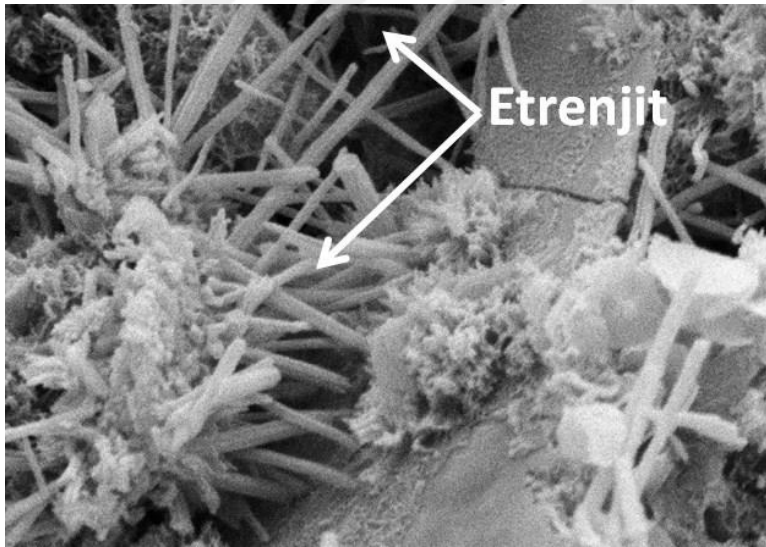
Farklı iyileşme metotlarında değişik yöntemler kullanılır. Her yöntemin kendine göre aşaması farklıdır. Bazı yöntemlerde betona fazladan malzeme ve enerji yüklemekten iyileşmeyi elde ederken diğer yöntemlerde hem yan malzemeye hem de başka

uygulamalara ihtiyaç duymaktayız. İyileşme süresinde gerçekleşen olay çoğu zaman reaksiyonlardan kaynaklanır. Reaksiyonlar genelde hidrasyon ve karbonatlaşmadır. Bu iki reaksiyon iyileşmenin gerektiği ana işlemlerdir. Hidrasyon çimento ve su arasında yapılan reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen ürünler betonun içinde kristal ağlar oluşturarak betonun mukavemetini ve durabilitesini etkiler. Resim 2.11 deki şekle göre

C-S-H jeli betonda çimento ve su arasında ortaya çıkan en önemli ürünlerdendir. Kalsiyum silika hidrat denilen bu jellerin betonda daha sık olması ve daha fazla oluşturulması bizim betonumu her yönden daha makbul ve kaliteli bir beton yapar [39, 40].

Hidrasyon sonucu çıkan ürünler tam olarak şunlardır;

- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H)
- Kalsiyum hidroksit (CH)
- Etrenjit (C-A-S-H) (AFm)
- Monosülfat(C-A-S-H) (AFt)

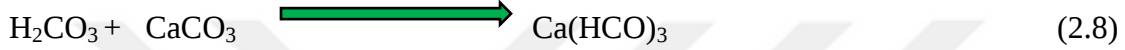
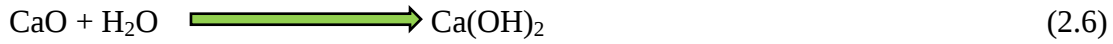


Resim 2.11. Çimentonun 10000 kat büyütülmüş SEM çekimi [40]

Bu ürünler betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen ana unsurlardır.

İyileşmeyi etkileyen diğer reaksiyon karbonatlaşmadır. Karbonatlaşmanın bölümünde de belirttiği gibi çimentonun içindeki ana bileşenler veya sonradan eklediğimiz pozolanlar veya havada olan karbon dioksit ile reaksiyona girer ve oluşan çatlaklar bu reaksiyon

neticesinde ortaya çıkan karbonatlaşma ürünleri ile doldurulur. İyileşme genelde çimento ve pozolanlar bünyesinde olan CaO 'ın CO_2 ve H_2O ile bir araya geldiğinde oluşur. Karbon dioksit ve su beraber reaksiyona girdikleri zaman asit olan H_2CO_3 (karbonik asidi) oluşur. Bu asit kılcal deliklerden betonun içine sızarak çimentonun bileşeni olan CaO ile tekrar reaksiyona geçer ve 8 Numaralı denklem ortaya çıkar;



Bu denklemleri dikkate aldığımızda karbonatlaşmanın oluşum adımlarını görebiliriz. Kalsiyum karbonat karbonatlaşma sonu üretilen malzemedir. Bu malzeme suda erimemesinden dolayı çatlakların çevresinde oluşarak betonu sızdırmaz ve çatlakları iyileştirerek yüzey sertlik ve mukavemeti artırır [40].

2.6.1. Pozolanların kendiliğinden iyileşen betonlara etkileri

Pozolanların ana maddesi olan oksitle kendi kendine bağlayıcı özellikleri olmasa bile hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan Ca(OH)_2 ile karşılaştıklarında bu ürün ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği gösterirler.

Pozolanların CaO , Fe_2O_3 , SiO_2 ve Al_2O_3 'leri çimentonun ilk mukavemetini kazandıklarından sonra kendi etkilerini göstererek beton 'da iyileşmeye sebep olurlar.

Yukarıdaki reaksiyona baktığımızda çimentonun ilk ürünleri olan C-S-H ve C-H hidrasyonu sonucu üretildiğinde beton dayanımın kazanır. Pozolanların oksitleri ve özellikle SiO_2 2. Aşamada C-H ile nemli ortamda karşılaştığında tekrar C-S-H ve C-A-H oluşur ve bu durum betonun kalitesini zaman geçerek iyileştirir.

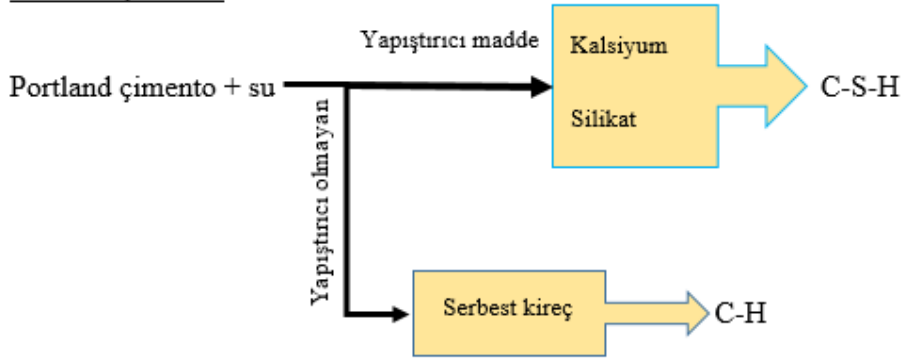


Özellikle uçucu külün bileşenlerinin %60 dan fazlası SiO_2 ve CaO 'dır. Bu iki ana bileşen yukarıda reaksiyona göre sonradan kazanılan beton dayanımında büyük rol oynamaktadırlar.

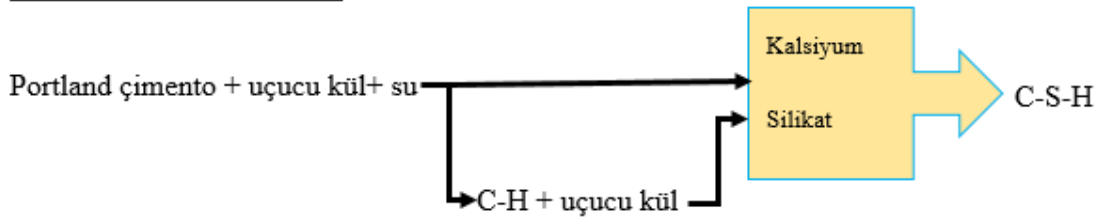
Daha önceleri öğütülerek ince bir toz haline getirilmiş doğal puzolanların, kireç ile doğrudan karışımı hidrolik bağlayıcı elde etmek için çok kullanılmıştır. Ancak günümüzde bu çok yaygın değildir. Bununla birlikte, kireç-doğal puzolan karışımları yol alt temeli işlerinde ve benzer uygulamalarda kullanılmaktadır.

Çimentonun ve puzolanların ana bileşeni olan kalsiyum oksit havada olan karbon dioksit ile reaksiyona girer ve karbonat kalsiyumu oluşturur üstelik W numaralı förmüle göre de puzolanların oksitleri 'de hidroksit kalsiyum ile reaksiyona başladıklarında betonun iyileşmesine katkıda bulunurlar [41]. Puzolanların kendiliğinden iyileşmesi şematik olarak Şekil 2.2 ve 2.3'de daha kolay izah edilebilmektedir.

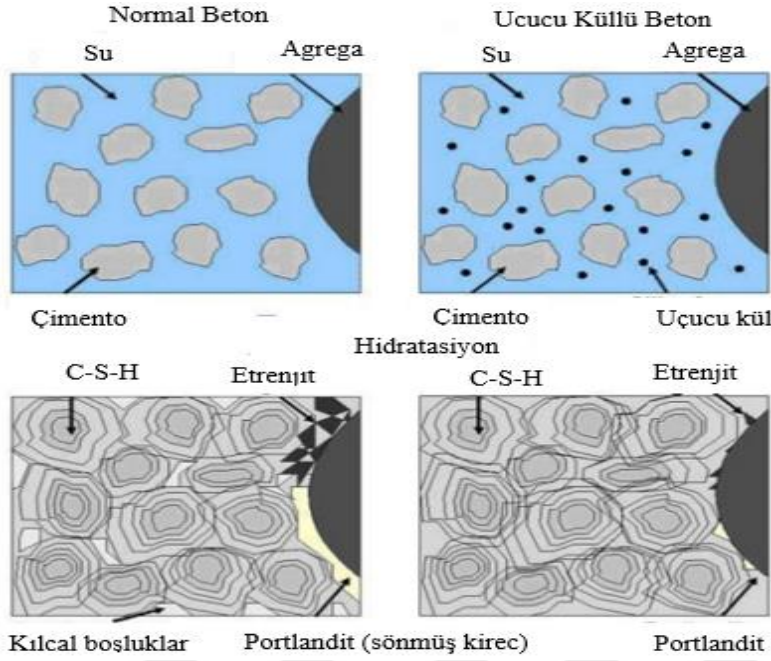
Portland çimento:



Portlan çimento+ uçucu kül:



Şekil 2.2. Betonun kendiliinden iyileşmesi şematik olarak ifadesi (A)



Şekil 2.3. Normal ve uçucu küllü betonların hidrasyon sonucu değişimleri (B) [41]



Betonla ilgili işlemlerde, suyun değişik kullanım amaçları vardır. Bu amaçların her birinde, özellikle beton karışımının hazırlanmasında, kullanılacak suyun uygun kalitede olması, beton özelliklerini olumsuz etkileyebilecek yabancı maddeleri içermemesi gerekir. Karışım suyu: Çimento ve agreganın yanında, betonu oluşturan bir diğer temel malzeme sudur.

Karışım suyunun iki önemli görevi vardır;

1. Çimento ile birleşerek hidrasyonun oluşmasını sağlamak,
2. Betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze betonun karışımında istenilen işlenebilmeyi (segregasyon olmadan, betonun kolayca karıştırılmasını, yerleştirilmesini, sıkıştırılmasını, yüzeyinin düzeltilmesini) sağlamaktır.

Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonu özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Beton karışımında kullanılacak suyun içinde istenmeyen miktarlarda yabancı maddelerin bulunması durumunda, çimento ve su arasında kimyasal reaksiyonların hızı ve hidrasyonun seyrini etkilemektedir. Buna bağlı olarak, taze

betonun priz süresi, sertleşmiş betonun dayanımı ve dayanıklılığı etkilenmektedir. Ayrıca betonarme yapılardaki betonun içerisinde yer alan demir donatılar daha kolay bir şekilde korozyona uğrar.

Betonun içerisinde, çimentonun hidratasyonunu ve taze betonun istenen işlenebilmesini sağlayabilecek miktarda karışım suyu kullanılmalıdır. Gerekenden daha az miktarda su kullanıldığı takdirde, yeterli hidratasyon ve işlenebilme elde edilememektedir. Gerekenden daha çok miktarda su kullanıldığı takdirde ise, betonun içerisindeki boşluklar artmakta, sertleşmiş betonun dayanımı ve dayanıklılığı azalmaktadır. O nedenle, beton karışımında yer alacak su miktarının beton özellikleri üzerinde çok önemli etkisi bulunmaktadır [42].

Hidratasyon sonucu üretilen C-S-H için gereken su miktarı %25' tir, yani Su/Çimento = 0,25 . Karışım suyunun bu miktardan az olması betonda hidrate olmamış çimento miktarını artırır. Karışım suyunun hidratasyon olayına ilaveten betonun yerleşmeye de etkisi olduğundan dolayı karma suyu betonda kullanım yerine göre %40 ile %60 arasında değişmektedir. Hidratasyon olayı için gerekli su miktarında az su kullanılırsa betonda olumsuz etkilere neden olur. Karma suyunun %25'ten az olması gerekir, betonda istediğimiz kıvamı sağlanmak için akışkanlaştırıcı ve hatta süper akış kandırıcı kullanılabılır.

Eğer su/çimento oranı betonun normal su ihtiyacından az ise C-S-H jeli ve C-H üretiminde azalır. C-S-H azalması ile betonun mukavemetini ve durabilitesini olumsuz yönde etkiler. Hidroksit kalsiyum suyun azalmasından dolayı az üretilirse o zaman karbonatlaşma sonucu ortaya çıkan ürünlerinde az üretilmesi demektir. Bu prosedürler doğal ve mühendislik ve doğal iyileşmeyi azaltır [43].

Su/çimento oranı gerekenden fazla ise de betonda daha fazla boşluklar oluşur ve bu kapiler boşlukları doldurma için daha fazla karbonatlaşma ürününe ihtiyaç duyulur. Buna rağmen bizim beton karışımında karbonatlaşmaya giren ilk malzemelerin miktarı belli ve kısıtlıdır. Tabi ki daha fazla çimento veya puzolan kullanarak fazla suyun etkisini azaltabilir ama bu yöntem mühendislik olarak kabul edilemez ve betonu ekonomi açısından sorguya çekebilir ve belki başka özelliklerde olumsuzluklara neden olur [43, 44].

2.6.2. Kendiliğinden iyileşen betonun ve karbonatlaşmanın ortak özellikleri

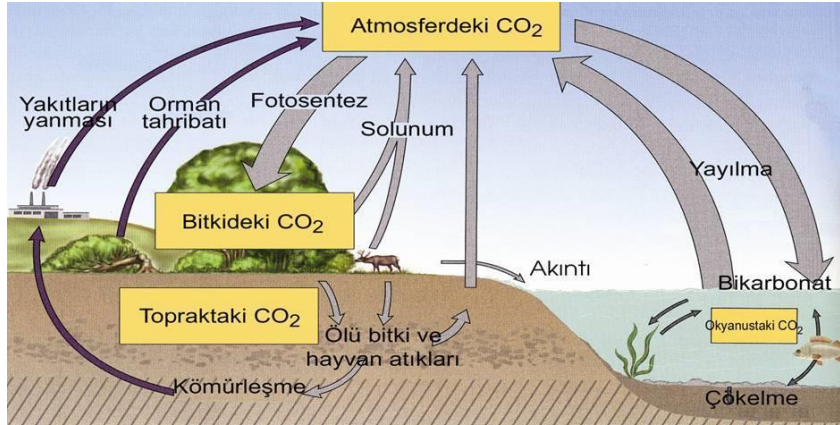
Betonun fazladan dayanıklılık kazanması ve yüzleştığımız aksiliklerin iyileşmesine doğal güçler ve yapay işlemler ile yaklaşabiliriz. İyileşmede doğal yöntemlerin temel reaksiyonu karbonatlaşmadır. Sadece karbonatlaşmanın betona faydalı etkileri pek fazla değil hatta tersine bazı olumsuzlarda bu reaksiyonda meydana gelir. Karbonatlaşmayı betonun iyileşme yönünde kullandığımızda katalizör olarak bazı malzemelerde betonda kullanmalıyız. Bu katalizör malzemeler bazen bizim reaksiyonu hızlandırır ve bazen de reaksiyonda istediğimiz ürünün daha fazla üretilmesine yardımcı olur. Her zaman betonun içindeki ana bileşenler karbonatlaşarak arasındaki boşlukları doldurur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar ki bu malzemeden dolayı iyileşmeler söz konusu olur [44].

2.7. CO₂ Kaynakları

Evrendeki en yaygın moleküllerinden biri olan karbondioksit, bir karbon ve iki oksijen molekülünün birleşiminden meydana gelir, Karbondioksit renksizdir ve düşük konsantrasyonlarda gazı kokusuzdur. Yüksek konsantrasyonlarda ise keskin bir asit kokusu yayar. Standart sıcaklık ve basınç koşullarında yoğunluğu metreküp başına 1,98 kilogramdır ki bu değer havanın yaklaşık bir buçuk katıdır. Karbondioksit 520 Kpa basıncın altında sıvılaşmaz. 1 atmosfer basınçta -78.5 derecenin altındaki sıcaklıklarda gaz halinden doğrudan katı faza geçer ve benzer şekilde bu dereceden yüksek bir derecede katı fazdan gaz fazına süblimleşir ve bu nedenle kuru buz olarak da isimlendirilir [45].

Karbondioksit, fotosentez olarak bildiğimiz karbon döngüsü esnasında ışık ve su ile birlikte, algler(yosun), bitkiler ve siyanobakteriler tarafından kendilerine karbonhidrat enerjisi oluşturmak için absorbe edilir. Bu nedenle yaşamın devamlılığı için vazgeçilmezdir. Karbondioksit, kömür veya hidrokarbonların yanması, sıvıların fermentasyonu ve insan ve hayvanların solunumu sonrası oluşur.

Karbondioksitin oluşumu Şekil 2.4 'de izah edilebilir. Uzaydaki karbondioksit molekülleri çok soğuk olduğundan katı fazdadır. Havanın %1'den az bir miktarı karbondioksit içerir ancak bu miktarı bile dünyadaki yaşayan tüm canlı organizmalar için hayati önem taşımaktadır.



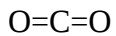
Şekil 2.4. CO₂' in doğada döngüsü

Kullanımı: Karbondioksit, gıda sanayisinden yağ sanayisine kadar birçok farklı alanda, farklı amaçlarla kullanılmaktadır.

Bunlardan belki de en bilineni gazlı içeceklerdir ki burada gaz olarak tabir edilen şey karbon dioksittir. Yangın söndürme tüplerinin etken maddesi yine karbon dioksittir. Sıvı ve katı formları iyi bir soğutucudur ve özellikle sağlık alanında olmak üzere bu amaçla birçok alanda kullanımı yaygındır. Yüzme havuzlarında pH kontrolü için kullanıldığı gibi bilinen ilk lazer çeşidi karbondioksit lazerlerdir [46].

Karbondioksitin çevre üzerine etkisi çok önemlidir. Atmosferde sera gazı etkisi yapar ve küresel ısınma ve antropojenik iklim değişikliklerinde önemli bir rol alır. Aynı zamanda, zayıf asit özelliği gösteren karbonik asit formunda suda çözündüğü zaman okyanusların asitlenmesinin en önemli kaynaklarından biri olur.

Karbondioksit, normal şartlar altında renksiz, kokusuz ve düşük konsantrasyonlarda tatsız bir gazdır. CO₂ sembolü ile gösterilir. Bir Karbon, iki Oksijen atomunun bir araya gelmesinden oluşur.



Karbonik dioksit su ile birleşmesinden zayıf bir asit olan, karbonik asit (H₂CO₃) oluşur. CO₂ genel olarak katı, sıvı ve gaz halinde bulunmaktadır. Betonla sık karşılaşan türü ise gaz konumundaki halidir. Gaz halindeki CO₂ kritik noktanın üstünde gaz halinde bulunur.

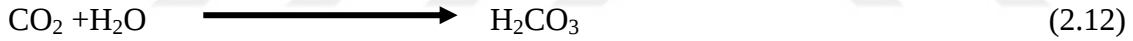
CO₂ gazı, dengeli bir moleküler yapıya sahiptir ve reaksiyona zor girer. Ancak yaklaşık 1700 °C den sonra %2 oranında.



Şeklinde ayrışır ve Dissosiasyon başlar, Bu nedenle inert gaz olarak birçok endüstride kullanım olanağı bulur [46].

CO₂ gazının önde gelen özelliklerinden biri, yoğunluğunun normal şartlarda (1013 m bar, 0°C) 2 kg/m³ olmasıdır. Ayrıca daha evvel moleküler ağırlığının 44 olduğundan da bahsetmiştik. Bu durumda CO₂ havadan 1,5 kat daha ağırdır.

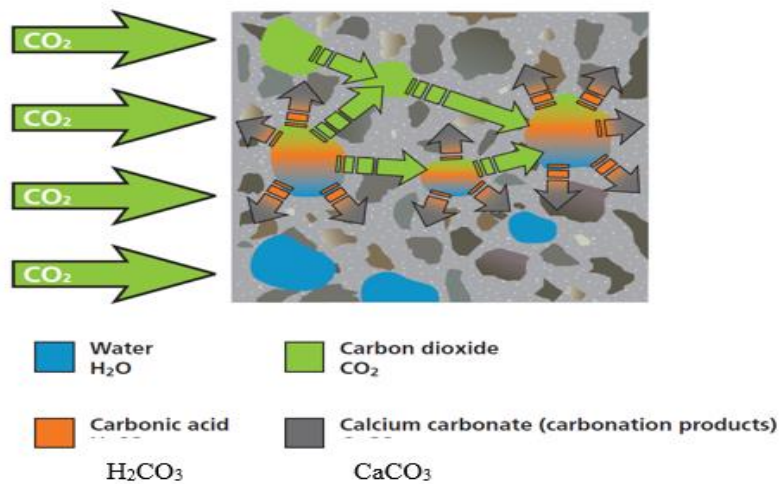
Karbonatlaşma prosesi CO₂ gazının betona nüfuz etmesi ve reaksiyonlara başlaması ile ortaya çıkar. Bu reaksiyonda karbon hidroksit karbonat kalsiyuma dönüşür. Bu dönüş CO₂ gazının olmadan imkânsızdır. CO₂ tek başına aktif değil fakat nem ortamda olduğu zaman (12. formülünde görüldüğü gibi) karbonik aside dönüşerek betonda reaksiyona geçer [45].



Genelde doğanın temiz havasında %0,03 kadar CO₂ bulunmaktadır. Bu oran büyük şehirlerin kirli havasında %0,3 'e kadar yükselebilmektedir. Fakat tünellerin içinde hava sirkülasyonu iyi olmadığı takdirde bu CO₂ yüzdesi %1 'e kadar yükselebilir. Bu betonun zaman açısından karbonatlaşma hızını yaklaşık 30 kata kadar çabuklaştırır [2]. Denklem 12' de elde edilen asit betonun içindeki serbest kireçle reaksiyona girerek ortaya çıkan ürün kalsiyum hidroksit ve içine nüfuz etmesi görülmektedir.



Ortamda CO₂ fazla olduğu zaman karbonatlaşmada artış kaçınılmazdır bu karbonatlaşma ortamda daha fazla olan CO (monoksit karbon) gazı ile etkilenip ve reaksiyon daha fazla hızlanır. Şekil 2.5' de CO₂ ve diğer maddelerin etkisini görebiliriz.



Şekil 2.5. CO₂ ‘nin şematik etkisi [46]

Fosil ve madeni Yakıtların yarım yakılması ile havada olan kirlilik oranı yükselmektedir. Bu yakıtların kaynaklarını otomobil yakıtları, fabrikalarda kullanılan yakıtlar ve diğer tüketicileri işaret edebiliriz.

2.8. Önceki Çalışmalar ve Araştırmalar

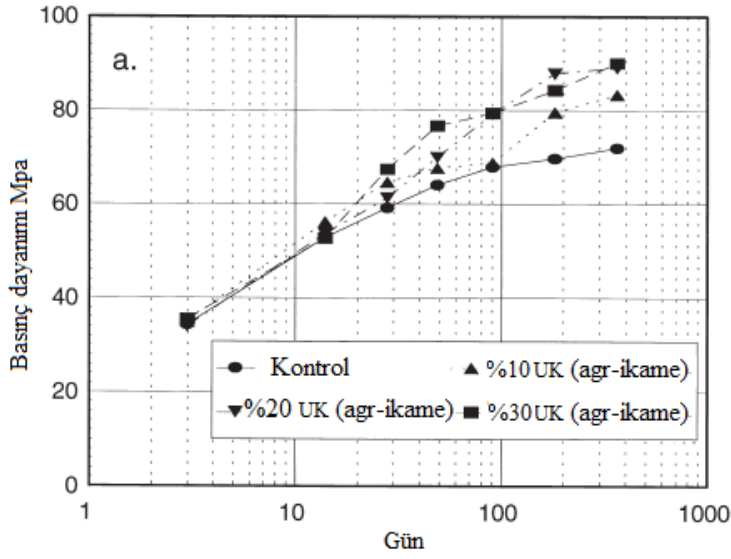
Vagelis ve Papadakis yaptıkları çalışmada çimento yerine F tipi Uk ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarda ikame edilerek 40×40×160 mm boyutunda harç numuneleri üretilerek 3, 7, 14, 28, 49, 112, 182 ve 360 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışma ile ilgili karışım tasarımı Çizelge 2.6’da verilirken basınç dayanımları ise Şekil 2.6 ve 2.7 ‘de verilmiştir [41].

Çizelge 2.6. Harç numuneler için mutlak ve nispi karışım oranları [47]

Numune	C	P	W	A	W/C	A/C	P/C
Contro l	514,6	0,0	257,4	1543,8	0,50	3,00	3,00
FLA1	514,6	51,5	257,4	1482,7	0,50	2,88	2,88
FLA2	514,6	102,9	257,4	1421,7	0,50	2,76	2,76
FLA3	514,6	154,4	257,4	1360,6	0,50	2,64	2,64
FLC1	463,1	51,5	257,4	1526,6	0,556	3,30	3,30
FLC2	411,7	102,9	257,4	1509,4	0,625	3,67	3,67
FLC3	360,2	154,4	257,4	1492,3	0,715	4,14	4,14

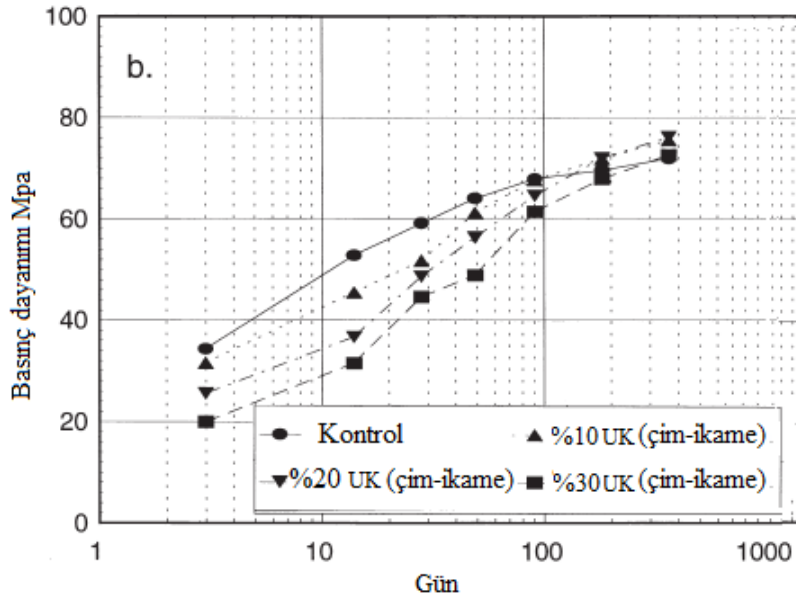
C=cement, P=Pozolan, W= Water, A= Aggregate.

C=cement, P=Pozolan, W= Water, A= Aggregate,



Şekil 2.6. Agrega yerine ikame edilmiş olan F tipi uçucu küllü harcın basınç dayanımı

Şekil 2.6' da agregaya yerine %10, %20 ve 30 ilave edilmiş F tipi uçucu külün sonuçları verilmektedir. 14 günlük sonuçlarda %30 ve %20 uçucu kül içeren betonların dayanımları birbirine çok yakındır. Betonun yaşı arttıkça %30 uçucu kül içeren betonlar daha fazla dayanım göstererek en yüksek mukavemeti göstermektedirler. Beton yaşı arttıkça UK'li karışımda UK oranı arttıkça basınç dayanımında artmaktadır Şekil 2.6.

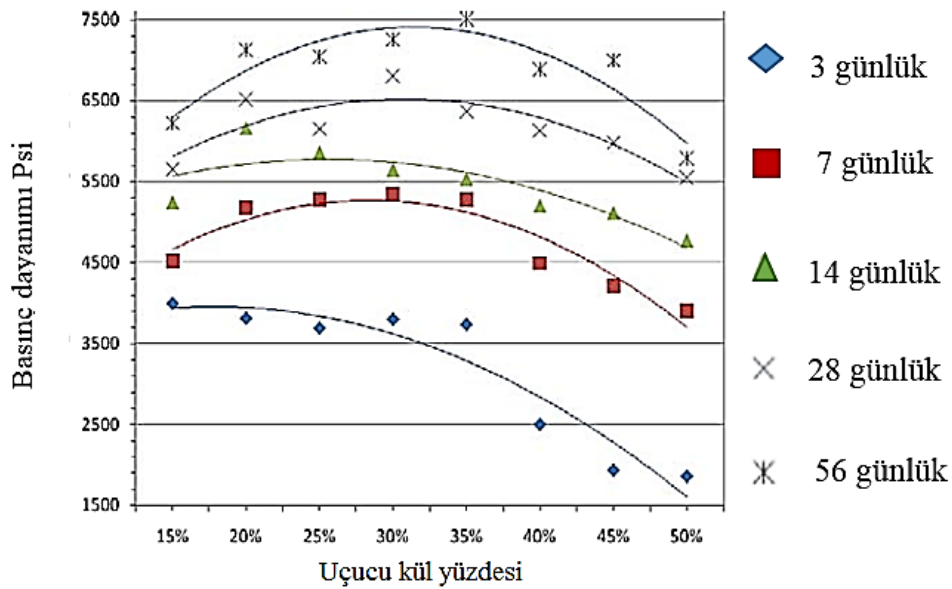


Şekil 2.7. F tipi uçucu külün çimento yerine ikame edilen harcın basınç değerleri

Şekil 2.6 ve 2.7'i karşılaştırdığımızda agregaya yerine ikame edilen uçucu küllü numuneler daha iyi sonuç vermişlerdir [47].

Namagga ve Atadero yaptıkları çalışmada ASTM C 618' e göre C sınıfı yüksek kireçli uçucu kül kullanarak 3, 7, 14, 28, 56 günlük dayanımlarını incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm uçucu küller 0,075 mm den küçük tane boyutundadır. UK çimento ve filler agrega ile ikame edilmiştir. Bu çalışmanın amacı betonun dayanım ve durabilitesi yönünde incelenerek optimum UK oranının belirlenmesidir [42].

Yapılan bu araştırmada çimento ve filler malzeme ağırlıkça %0, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %45, ve %50 oranında uçucu kül ile ikame edilmiştir [48].



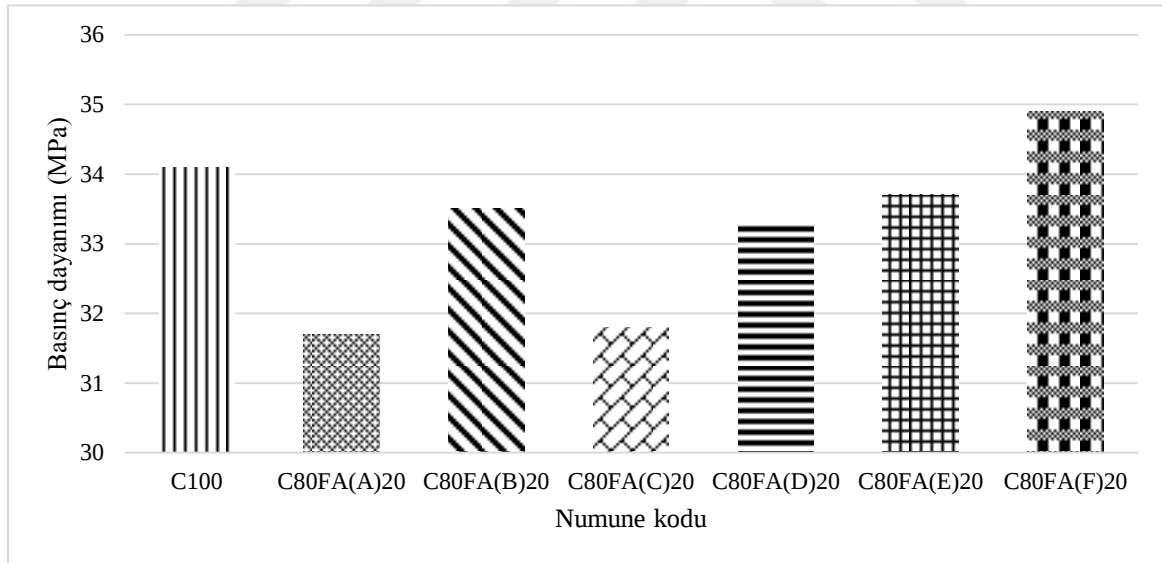
Şekil 2.8. Betonun basınç dayanımı uçucu külün yüzdesine göre (1Psi= 0,07 kg/cm²)

Kaewmane ve Diyerleri yaptıkları çalışmada iki farklı A ve B olarak isimlendirilen UK tipi kullanılmıştır. UK çimento ağırlığının %20' si oranında ikame edilmiştir. %20 UK oranındaki karışıma iki farklı 2 farklı oranlarda kireç ikame edilmiştir. Bu ikameli karışımlarla 50×50×50 mm boyuyunda küp nmuneler üretilmiştir. Üretilen numuneleri 7, 28 ve 90 günlerde basınç dayanımları Şekil 2.9 , Şekil 2.10 ve Şekil 2.11' de verilmiştir. Tasarlanan karışımlar ise Çizelge 2.7'de verilmiştir [43].

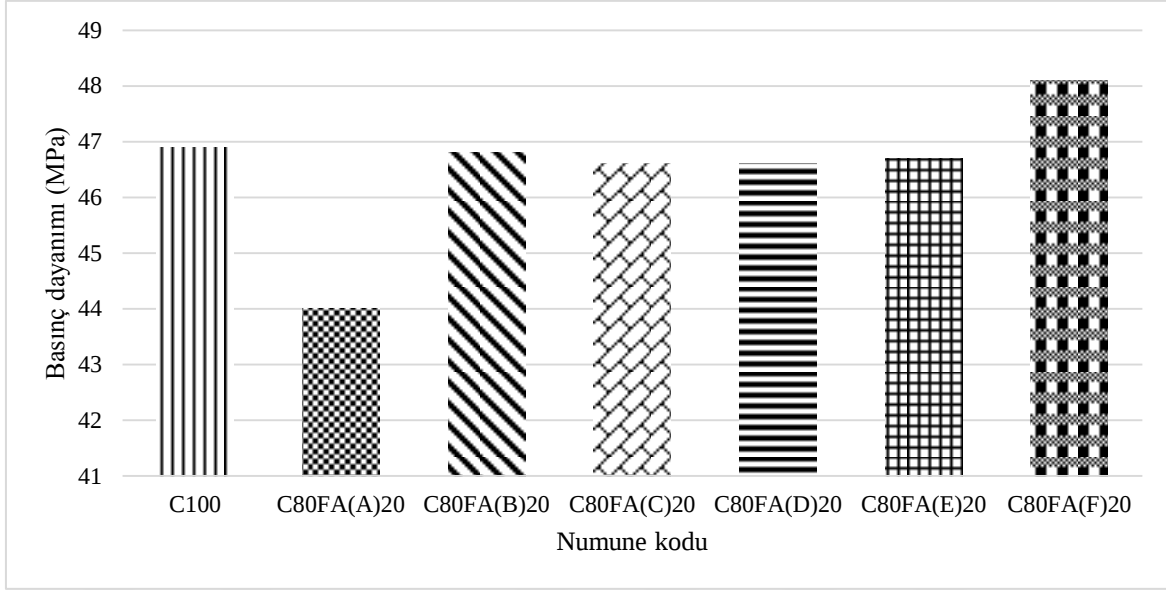
Çizelge 2.7. Beton tasarımı [49]

Numune ismi	Eklenmiş olan CaO	Açıklama
C100	0	Kontrol (Uçucu kül ve kireç yok)
C80FA(A)20	0	%20 A tipi uçucu kül
C80FA(B)20	2,43	%20 çimento ağırlığı A Tipi uçucu küle %2,43 kireç eklenmiş
C80FA(C)20	3,81	%20 çimento ağırlığı A Tipi uçucu küle %3,81 kireç eklenmiş
C80FA(D)20	0	%20 B tipi uçucu kül
C80FA(E)20	3,11	%20 çimento ağırlığı B Tipi uçucu küle %3,11 kireç eklenmiş
C80FA(F)20	4,51	%20 çimento ağırlığı B Tipi uçucu küle %4,51 kireç eklenmiş

Şekil 2.9 incelendiğinde 7 günde en yüksek dayanımı C80FA(F)20 kodlu karışım vermiştir. Bu karışım %20 B grup uçucu küllü ve %4.51 kireçli karışımdır. Burada kireç 7günlük dayanımı artırdığı görülmektedir. Şekil 2.9’da kontrol betonun (C100) geçtiği görülmektedir.



Şekil 2.9.7 Günlük basınç dayanımı [49]

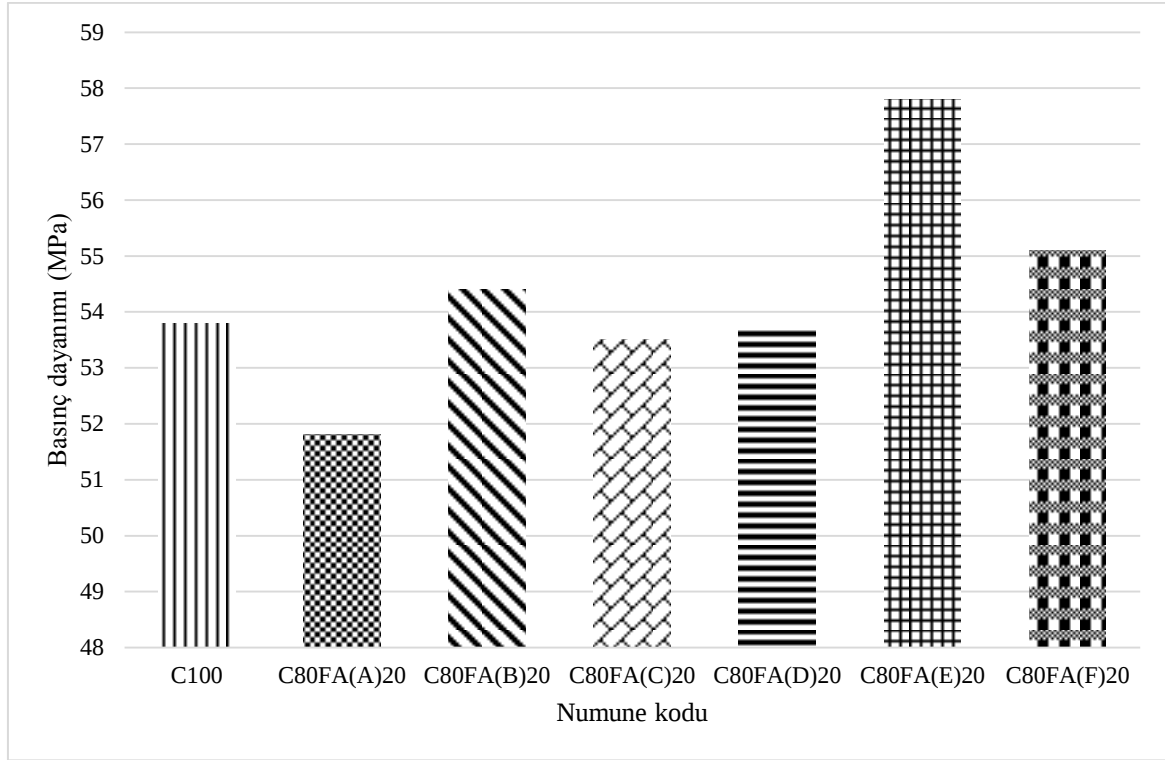


Şekil 2.10. 28 Günlük basınç dayanımı [49]

Şekil 2.10 incelendiğinde 28 günlük basınç dayanımının en yüksekini C80FA(F)20 kodlu numune vermiştir. Yine bu numunede kireç %4,51 B tipi uçucu kül karışımıdır. En düşük basınç dayanımında C80FA(A)20 kodlu numune vermiştir. Bu numune %80 çimento %20 UK karışımından üretilmiştir. Burada kireç karışımları nerede ise kontrol numunelerine yakın dayanımlar göstermiştir.

Şekil 2.11’de 90 günlük numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanımı C80FA(E)20 kodlu numune verirken en düşük basınç dayanımı ise C80FA(A)20 kodlu numuneler vermiştir. Bu iki numune arasında iki fark vardır.

Bunlarda birisi C80FA(A)20 A tipi UK ve kireç yok, ikincisi ise C80FA(E)20’de B tipi UK ve %3,11 kireçli karışımdır. Bu sonuca göre B tipi UK ile %3,11 kireç oranı beton basınç dayanımını oldukça fazla ölçüde etki göstermiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.11. 90 Günlük basınç dayanımı

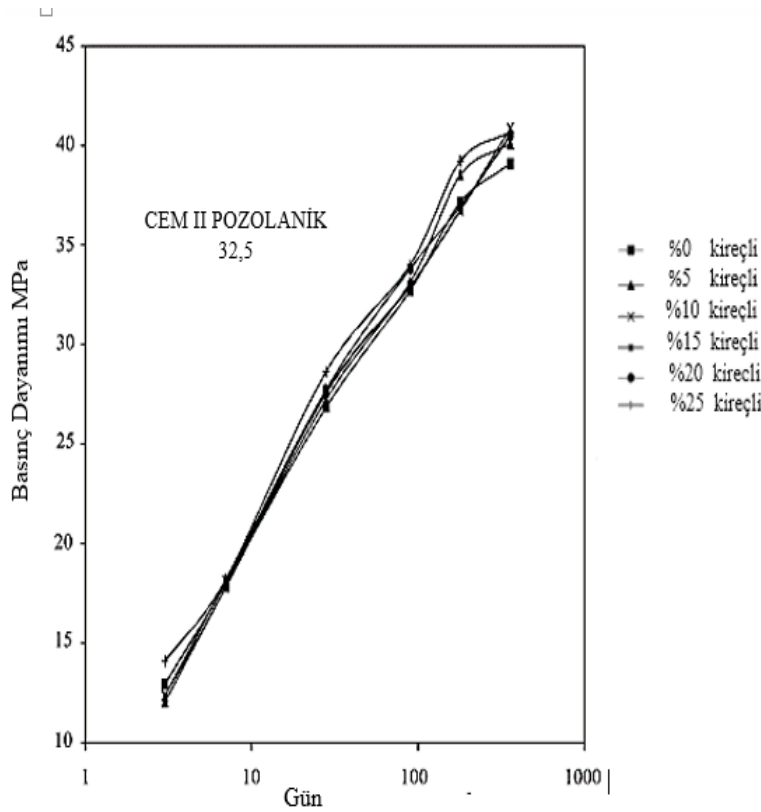
HE yaptığı bir çalışmada %0, %10, %20, ve %25 uçucu külü çimentonun hacim olarak yer değiştirmişler ve belli yüzdede CO₂ (%20) ve nem ortamında (%70) betonlara kür yaparak 1,7,28 ve 42 günlük karbonatlaşma derinliklerine bakmışlardır. Bu araştırmada 450×100×120 mm boyutlarda prizma numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu numuneler her yaşta 6 cm kalınlıkta kesilerek karbonatlaşma miktarı ölçülmüştür. Bu ölçülen numunelerin karbonatlaşma derinliği % olarak Çizelge 2.8’ de verilmektedir [44].

Çizelge 2.8. Karbonatlaşma derinliği uçucu külün % sine göre

FA(UK)%	3 gün	7 gün	14 gün	28 gün	42 gün
0	8,62	13,19	18,62	21,25	24,20
%10	9,21	14,09	19,89	22,04	26,40
%20	10,27	15,71	22,18	25,27	29,11
%30	10,76	16,46	23,24	26,77	30,24

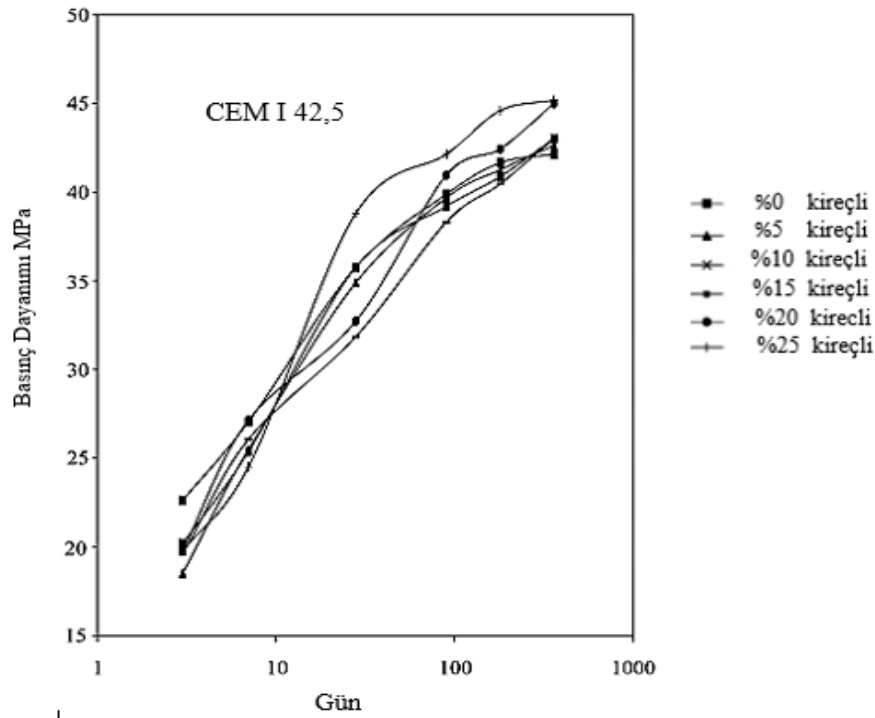
Sonuçlara baktığımızda uçucu kül oranı arttıkça karbonatlaşmanın paralel olarak artması dikkat çekicidir [50].

Mir ve Diyerleri yaptıkları çalışmada CEM II pozolanik 32.5, CEM I 42.5 ve CEM I 42.5 + %20 UK bağlayıcı olarak farklı beton tasarımları yapılmıştır. Bu üç bağlayıcı ile ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında toz kireç ilave edilerek 3, 7, 45, 90, 180 ve 720 günlük numunelerin basınç dayanımları ve karbonatlaşma özellikleri 100×200 mm lik örnekler üzerinde incelenmiştir. Bununla ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 2.12, Şekil 2.13, 2.14, 2.15 ve Şekil 2.16’da verilmiştir[45].



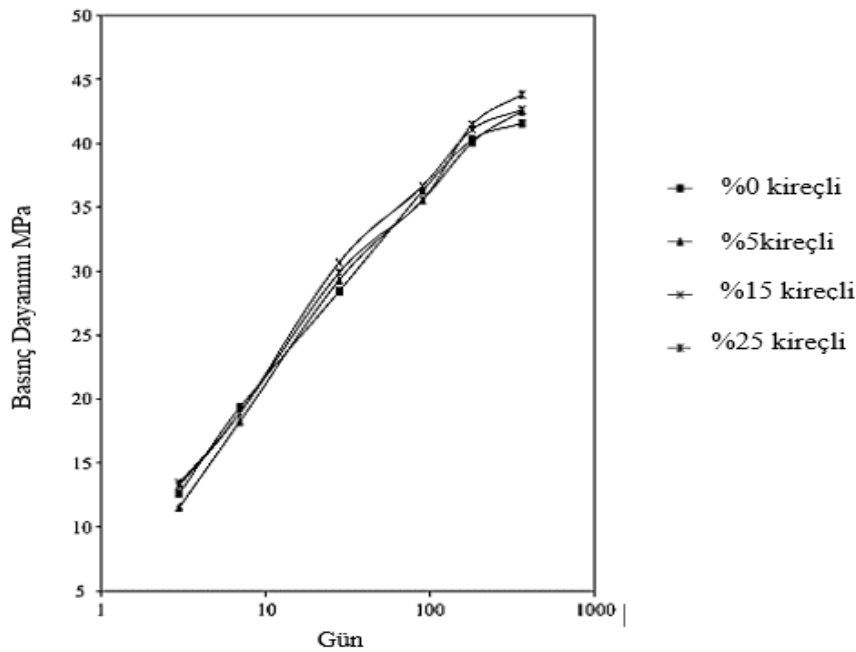
Şekil 2.12. Kireç eklenmiş CEM II -32.5 dan elde edilen betonlarda basınç değerleri

Şekil 2.12 incelendiğinde numunelerin basınç dayanımları kırılma yaşına bağlı olarak artış olduğu açıktır. 720 günlük numunelerde %10 kireç ile üretilen örnekler en yüksek dayanım gösterdiği görülmektedir. 7 günlük basınç dayanımlarında kireç oranlarının birbirinden farklı olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.13. Kireç eklenmiş CEM I-42.5 dan elde edilen betonlarda basınç değerleri

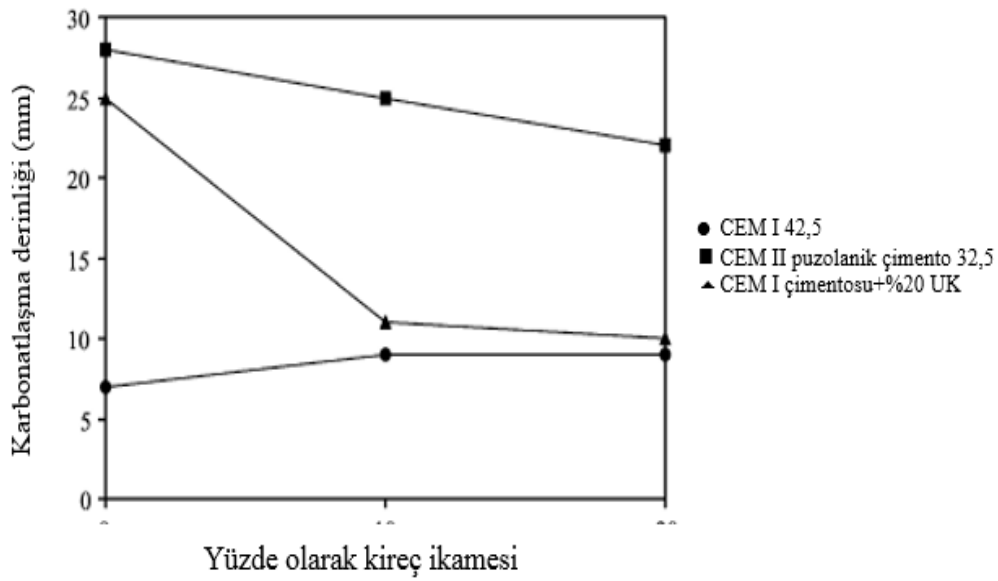
Şekil 2.13 incelendiğinde 720 günde en yüksek basınç dayanımını %25 kireçli karışım verdiği söylene bilir. 90 günlük basınç dayanımları kireç oranına bağlı çok farklılık gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.14. Kireç eklenmiş CEM I-42.5 + %20 UK' li betonlarda basınç değerleri

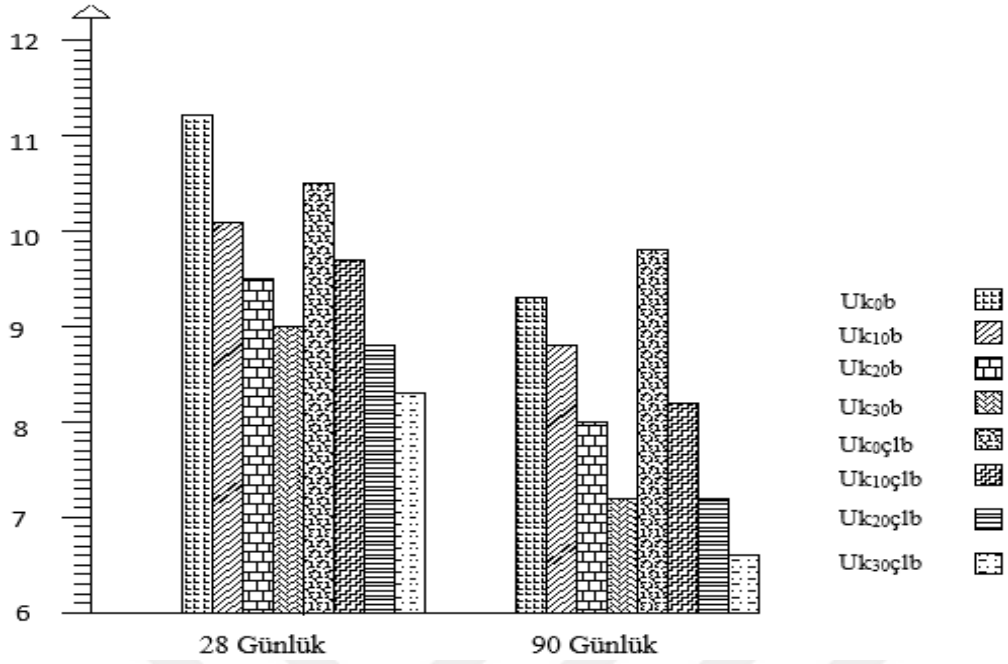
Şekil 2.14 incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 720 günde %25 kireçli karışım verdiği görülmektedir. Kontrol numunesinin en düşük dayanımı verdiği görülmektedir. Kirecin uzun sürelerde beton basınç dayanımına olumlu katkıda bulunduğu Şekil 2.15 grafiğe göre söyleye biliriz.

Numuneler % 50 CO₂ ile karbonatlaşmış ve sonuçlar 45 günlük bir süreden sonra Şekil 2.15’ da bulunduğu gibi kayıt altına alınmıştır [51].



Şekil 2.15. CEM II 42.5 çimentoda kireç ve karbonatlaşmanın ilişkisi

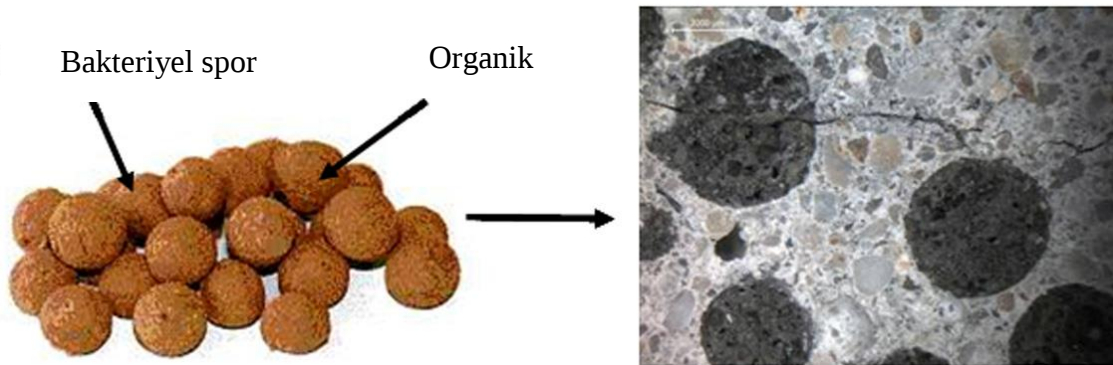
Şimşek ve Baharavar çalışmalarında çimentoyu ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 oranlarında azaltarak yerine uçucu külü edilerek 10×10×40 cm boyunda lifsiz (Uk_{10b}) çelik lifli (Uk_{10çlb}) kiriş numuneler üreterek karbonatlaşma miktarını ölçmüşlerdir [31].



Şekil 2.16. Karbonatlaşmanın numunelerde etkisi

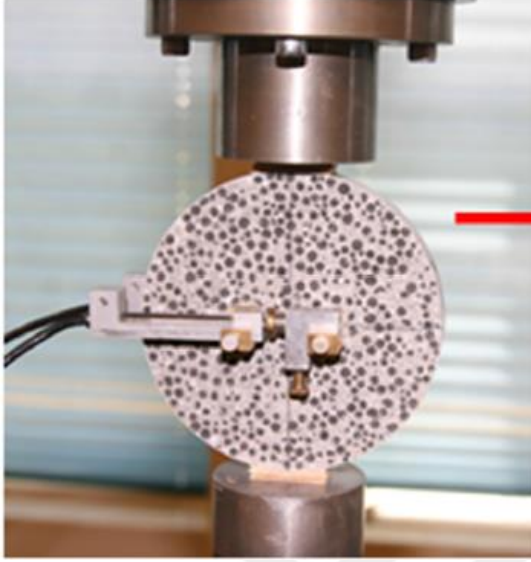
Şimşek ve Baharavar'ın yaptıkları çalışmanın sonuçlarına göre uçucu kül oranları 7 günlük basınç dayanımını olumsuz etki etmektedir. 28 günlük basınç dayanımı üzerinde %10 Uk oranı azda olsa olumlu etki göstermiştir. Fakat 90 günlük betonlara UK %10 ve %20 katıldığı belirgin bir artış sağlayarak olumlu etki ettiği görülmüştür ve UK oranları karbonatlaşma derinliği ile ters ilişkisiye sahip olduğu saptanmıştır [34].

Jonkers ve Horlandada yaptığı Bacteria- based self-healing concrete adlı araştırmada 2 farklı karışım yapmış. 1. karışımında sadece genleştirilmiş kil ve 2 inci karışımında kil ile beraber bakteriyel sporlar ve %5 kalsiyum lakat genleştirerek kullanmışlardır Resim 2.12. Çizelge 2.12' de agrega yer değişimi ve karışımları verilmektedir [46].



Resim 2.12. Bakteriyel ve organik malzemelerin görüntüsü

Karışımlardan 10cm çapında ve 1,5 cm kalınlığında numuneler yapılmış ve 0,15 mm genişlediğinde çatlatılmıştır.



Resim 2.13. Dijital çatlak ölçme makinası

Genleşmiş kil ve karışımli kil olarak her malzeme ile 6 tane numune döküldükten sonra 2 aylık su kürü yapılmış. Ardından 56 gün CO₂ kürü yapıldı ve sadece kilden oluşan malzemelerle yapılan numunelerin 2 tanesinde %33 ve kalsiyum Laktat artı bakteriyel sporlar ile zenginleştirilmiş 6 numunenin hepsinde iyileşme elde edilmiştir [52].



Resim 2.14.Çatlaklarda kalsiyum karbonat oluşması ve çatlakların iyileşmesi

Şahmaran ve Diyerleri çalışmalarında 200×100 mm silindir numuneler yapmışlar. Bu çalışmada %35 ve %55 olarak uçucu kül çimento ile yer değiştirmiş 28 günlük basınç dayanımı sınırının %70 ve %90 kadar basınç uyguladıktan sonra ultrases ve basınç dayanım ile tekrar numuneleri denetlemişler ki bu veriler Çizelge 2.9’de verilmektedir [47].

Çizelge 2.9. Basınç dayanımı ve ultra ses sonuçları

Uçucu kül %	28 günlük basıncın dayanımın yüklenen yüzdesi		
	0%	70%	90%
	Basınç Yüzdesi yüklendikten önce ve sonra Basınç dayanımı(MPa)		
0	51.3	48.3	41.3
35	46.4	43.1	35.6
55	38.7	33.4	28.1
	Basınç Yüzdesi yüklendikten önce ve sonra Ultra ses (m/s)		
0	4864	4767	4618
35	1385	4810	4698
55	1542	4701	4430

Numunelere basınç uygulandıktan sonra 15 ve 30 gün su kürü yapılmış ve betonların dayanım kazanma miktarları Çizelge 2.10' de ki gibi verilmiştir.

Çizelge 2.10. İyileşmeden sonra basınç ve ultra ses sonuçları

	Basınç dayanımı iyileştikten sonra					
Uk %	15 günlük su küründen sonra			30 günlük su kürü yapıldıktan sonra		
	Basınç dayanımı deney sonuçları					
0	53,3	53,5	45,9	55,8	56,9	48,3
35	56,8	51,3	49,8	62,8	57,1	56,3
55	46,5	43,4	40,2	51,8	50,2	48,1
	Ultra ses deney sonuçları					
0	4911	4810	4721	4950	4916	4887
35	4980	4901	4853	5006	4986	4910
55	4954	4887	4793	4948	4945	4875

Sonuçlara bakıldığında bu deneyde numuneler %90 kırılma yüküne tabi tutulduktan sonra %6- %25 arasında mukavemet kayıp etmişler ve 1 aylık kür yapıldıktan sonra %15-%73 mukavemetlerini geri kazanmışlar. Bu sonuçlar %35 lik uçucu kül ilave edilen numunelerde daha 'da iyi olduğu görülmektedir ki bunun sebebi kalsiyum hidratlar in kalsiyum silika hidratlara dönüşmesi olarak tahmin edilmektedir [53].



3. MATERİYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada C25 sınıfı beton üretilmiştir. Beton üretiminde doğal kırma taş agrega kullanılmıştır, CEM I 42,5 R çimento ve katkı malzemesi olan CaO Baştaş kireç fabrikasından alınmıştır. Bu çalışmada çimento ile ikame edilerek karışıma ilave edilen bir başka ürün uçucu küldür. Çalışmada iki farklı uçucu kül kullanılmıştır, Kangal (Sivas) ve Yatağan (Muğla) termik santralinden alınarak kullanılmıştır.

3.1.1. Uçucu kül

En yaygın kullanılan puzolan uçucu küldür. Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5-150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [8].

Uçucu külün önemli çevre sorunları yarattığı bilinmektedir. Bu atığın malzemenin %6 'sı inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır.

Termik santrallerinden elde edilen uçucu küller kimyasal bakımından farklı sınıflarda yer almaktadır. Bunun nedeni yakılan kömürün cinsi, elde edildiği yere yanma tekniğine bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 3.1' de bazı santrallerin uçucu küllerinin sınıflandırılması verilmektedir. Bu ürünler SAF miktarlarına ve CaO zenginliğine bakılarak sınıflandırılmışlar [43].

Çizelge 3.1. Türkiye’ deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri

	F		S+A+F %	CaO %	C		S+A+F %	CaO %
	Yüks ek F’li	Düşük F’li			Yüksek C’li	Düşük C’li		
Tünçbilek 3 ünite	●		88,77	1,68				
Tünçbilek 4 ünite	●		86,86	2,22				
Çatalağzı	●		89,75	1,46				
Orhaneli	●		80,73	9,48				
Seyit Ömer	●		84,34	4,26				
Yatağan	●		80,65	10,53				
Çayırhan		●	73,83	11,8				
Soma 1-2 ünite					●		68,21	23,45
Soma3-4 ünite		●	70,76	22,23				
Kangal 1 ünite					●		51,29	34,88
Kangal 2 ünite					●		55,31	30,02
Kangal 3 ünite					●		53,49	30,82

Bu çalışmada kullanılacak uçucu küllerin kimyasal analizleri Limak çimento fabrikasında yaptırılarak Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kangal ve Yatağan uçucu küllerin kimyasal analizi

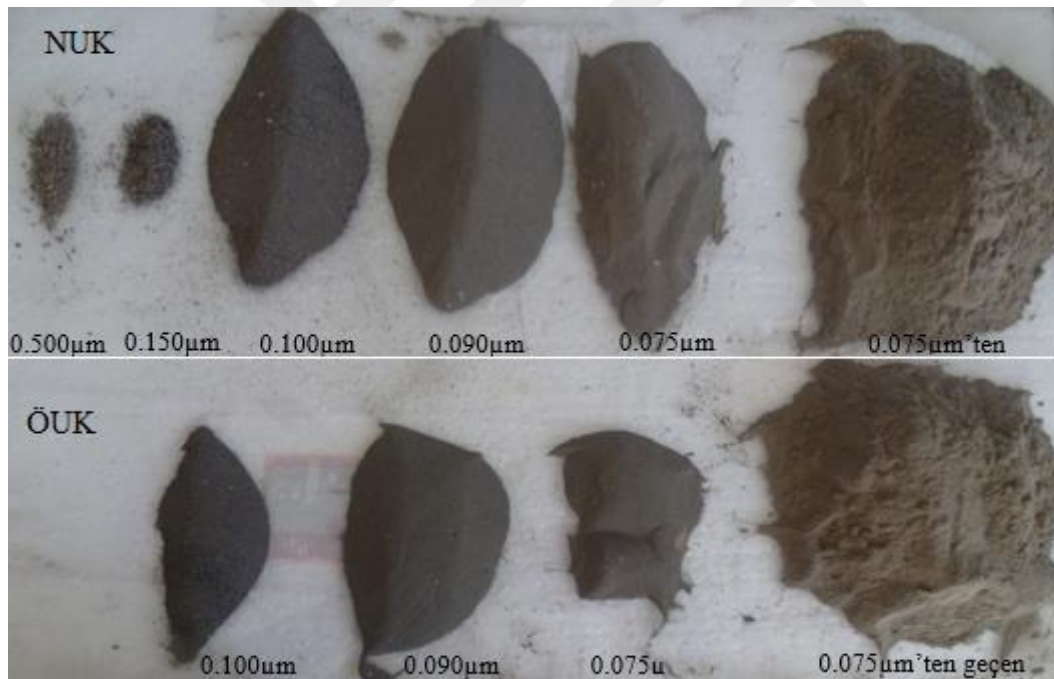
Uçucu Külün Kimyasal Analizi									
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Kangal	31,8	36,48	15,32	3,94	2,3	4,37	1,16	0,66	3,64
Yatağan	10,01	46,71	26,5	7,21	2,42	1,87	2,54	0,69	1,32

Çizelge ’de verilen analize göre Kangal uçucu külümüz yüksek C’li ve Yatağan uçucu külü yüksek F’ li guruplarda yer almaktalar.

Puzolanların kompozisyonu büyük ölçüde silis ve alüminen oluşmaktadır. İnce taneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve su ile birleştirdiğinde, bu malzemeler

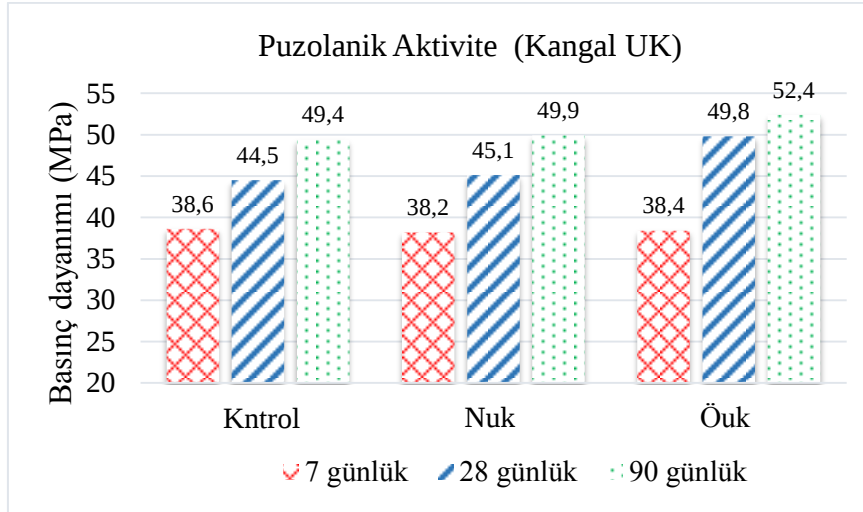
arasında bir takım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidrasyonu olduğu gibi, hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerin oluşmasına neden olur. Pozolanik malzemelerin söndürülmüş kireç ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, "pozolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır. Pozolan malzemelerin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda "silis (S)+alumin (A) +demir oksit (F)" içermesi gerekmektedir.

Bu sebeple uçucu küllerin elek analizi yapılarak tekrar öğütmeye tabi tutulmuş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Resim 3.1 Yığınlar eleklerin üstünde kalan malzeme miktarlarını gösterilmiştir. Çizelge 3.4' de ağırlık olarak verilmiştir.

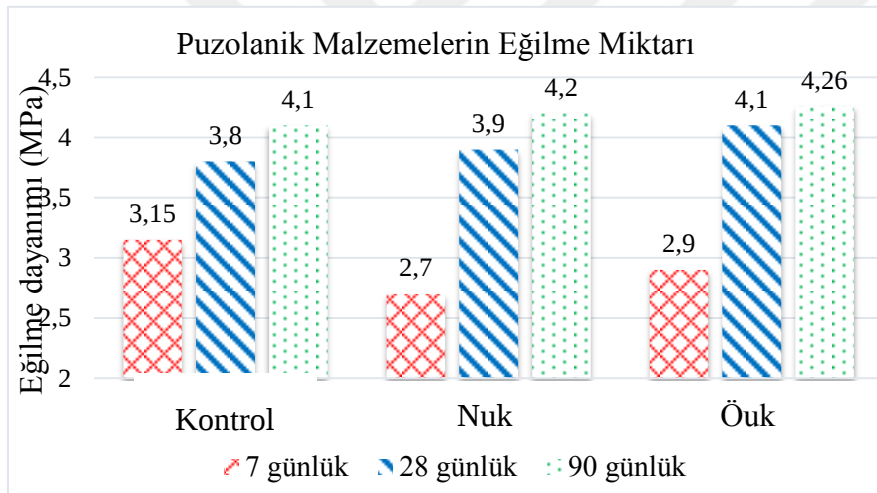


Resim 3.1. Kangal ÖUK ve NUK eleklere göre tane dağılımı

Kangal uçucu külün öğütüldükten sonraki ve önceki durumuna bakarak 500 mikron ve 150 mikron üzerinde kalan malzemelerin öğütüldükten sonra incelerek diğer guruplara karışmaları ve 100 ile 90 ve 75 mikron üzerinde kalan malzemelerinde miktarında değişimleri görülmektedir. Bu değişimler Çizelge 3.3'te yüzde ve ağırlık olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. Kangal uçucu küllü betonların puzolanik aktivite değerleri



Şekil 3.2. Kangal uçucu külün puzolanik aktivite eğilme değerleri

Resim 3.2’de Yatağan uçucu külünün öğütülmeden önce ve öğütüldükten sonrası granolometrisi görülmektedir. Bu topraklar eleklerin üstünde kalan malzeme miktarlarını gösterir ki Çizelge 3.5’ de ağırlık olarak verilmiştir.



Resim 3.2. Yatağan Ök'ün eleklerle göre tane dağılımı

Şekillere bakarak 150 mikron üzerinde kalan malzemenin öğütüldükten sonra daha narinleşerek diğer guruplara karışmasını ve 100, 90 ve 75 mikron üzerinde kalan malzemelerin miktarındaki değişimler görülmektedir.

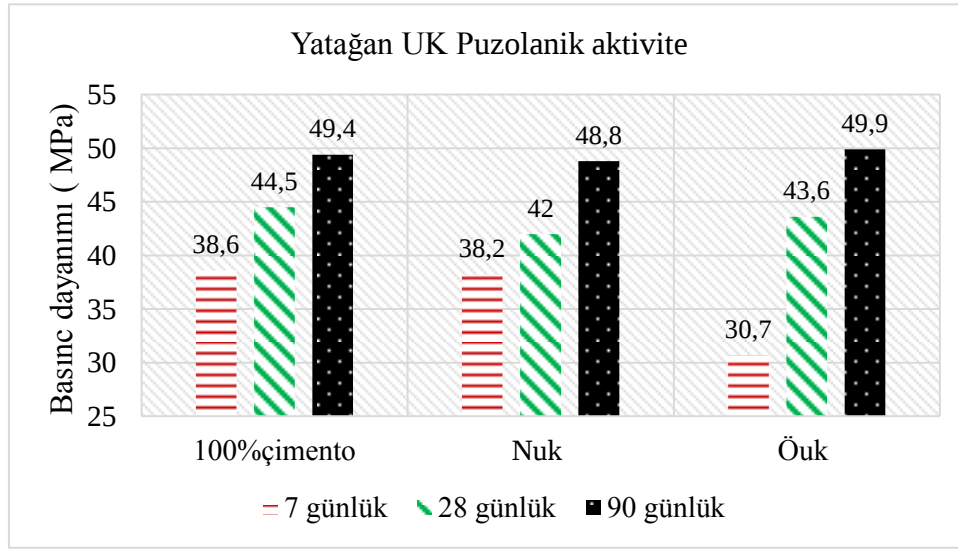
Çizelge 3.5. Yatağan uçucu külün öğütüldükten sonraki ve önceki elek analizi

Elek çapı (mm)	NUK				ÖÜK			
	Her elek üstünde kalan (g)	Kümülatif elek üstü kalan	Kümülatif %		Her elek üstünde kalan (g)	Kümülatif elek üstü kalan	Kümülatif %	
			Kalan	Geçen			Kalan	Geçen
1	0	0	0	100	0	0	0	100
0,50	0	0	0	100	0	0	0	100
0,150	2,5	2,5	1	99	0	0	0	100
0,100	48	50,5	20,2	79,8	20	20	8	92
0,090	58	108,5	43,4	56,6	21	41	16,4	83,6
0,075	40	148,5	59,4	40,6	24	65	26	74
Pan	101,5	250	100	0	185	250	100	0

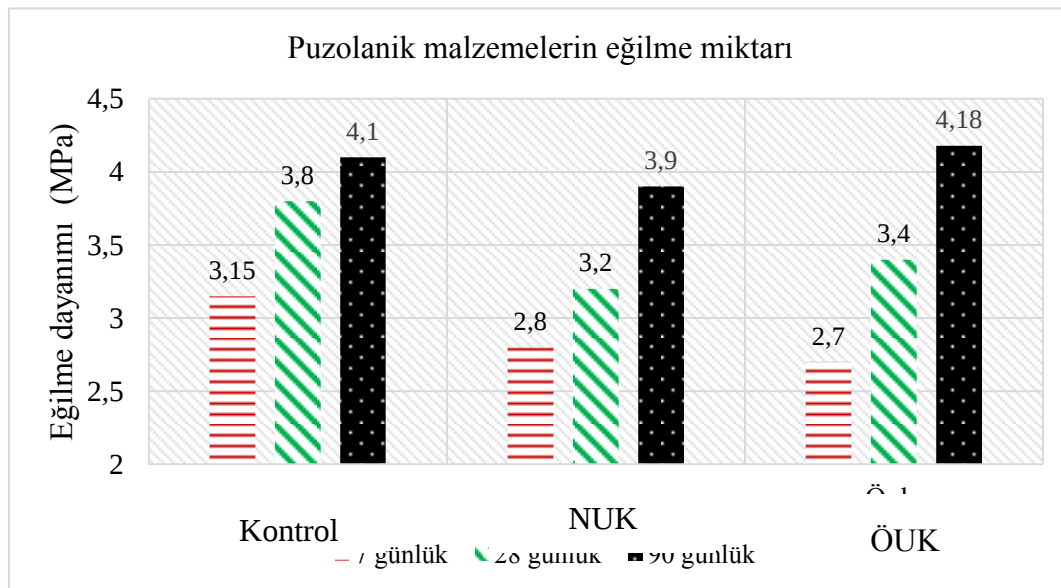
Yatağan uçucu kül ile ASTM C311 pozolanik aktivite değerleri yapılmıştır. Uçucu külün öğütmeden ve öğütülmüş pozolanik aktivite değerleri Çizelge 3.6' da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Yatağan uçucu küllü NUK ve ÖUK puzolanik aktivitesi sonuçları

Num adı	7 günlük		28 günlük		90 günlük	
	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme
Kontrol	38,,6	3,15	44,5	3,8	49,4	4,1
NUK	38,2	2,8	42	3,2	48,8	3,9
ÖÜK	30,7	2,7	43,6	3,4	49,9	4,18



Şekil 3.3. Yatağan uçucu külünün puzolanik aktivite basınç dayanımı



Şekil 3.4. Yatağan uçucu külünün puzolanik aktivite eğilme dayanımı değerleri

3.1.2. Çimento

Bu çalışmada TS EN 197-1 (2002) uygun olarak üretilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento Limak batı çimento san ve A.Ş fabrikasından alınmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri üretilen firmadan temin edilmiş ve Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kullanılan CEM 1 42.5 çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
Bileşen	Değerler(%)	Özellik	Miktar
SiO ₂	19,3	Yoğunluk (gr/cm ³)	3,28
Al ₂ O ₃	5,57	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3626
Fe ₂ O ₃	3,46	Priz Başlangıç Süresi (dak)	102
Mn ₂ O ₃	0,1	Priz Final Süresi (dak)	181
CaO	63,56	Hacim Genleşmesi(mm)	1
MgO	0,86	2 Günlük Basınç Dayanımı (Mpa)	26,7
SO ₃	2,91	28Günlük Basınç Dayanımı (Mpa)	51,8
Na ₂ O	0,19	Çimento Ana Bileşenleri	
K ₂ O	0,80	Çimento Kimyasına Göre Sembolü	Miktarı(%)
Serbest CaO	1,22	C ₃ S	52,48
Cl ⁻	0,0089	C ₂ S	19,63
Çözünmeyen kalıntı	0,25	C ₃ A	8,02
Kızdırma Kaybı	2,93	C ₄ AF	9,15

3.1.3. Kireç

Çalışmada kullanılan kireç ats en 459-1 CL 70 yapı kireçi olarak torbalanan Baştaş kireç fabrikasından temin edilmiş olup fabrikada belirlenen kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.8 ‘te verilmiştir.

Çizelge 3.8. Kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri

KİREÇİN ANALİZİ		
Bileşenler	TS EN 459-1 'e göre %	Malzemenin verileri %
CaO+MgO	Min 70	76,87
MgO	Mak 5	2,30
SO ₃	Mak 2	0,87
CO ₂	Mak 12	11,32
Aktif Kireç	Min 55	72,29
Hacim değişmezliği	Mak 20	7
90Mikron elek üstü	Mak 7	2,02
200 Mikron Elek Üstü	Mak 2	0,17
Serbest kireç	Mak 2	0,99
Penetrasyon	10-50	42

3.1.4. Karbon dioksit

İkinci bölümdede belirtildiği gibi karbon dioksit gaz, kuru ve yaş halde bulunabilmektedir. Karbondioksit gazı yer altından doğal olarak veya atık baca gazından elde edilir. Karbondioksit gazı $-56,6^{\circ}\text{C}$ 'de ve 4 bar basınçta aynı anda katı, sıvı ve gaz halinde bulunur. Karbondioksit sıvı halde yatay ya da dikey dışı yalıtım malzemeleri ile yalıtılmış, tek cidarlı içten soğutma sistemli veya Kryojenik tanklarda depolanabilir. Karbondioksit basınç olarak 13 – 20 bar ve -35°C - 55°C sıcaklıkta depolanır ve tırlar ile sevk edilir. Bu çalışmada kullanılan karbon dioksit gaz şeklinde ve tüp içindedir.



Resim 3.3. Çalışmada kullanılan karbon dioksitin tüpü

3.1.5. Agregalar

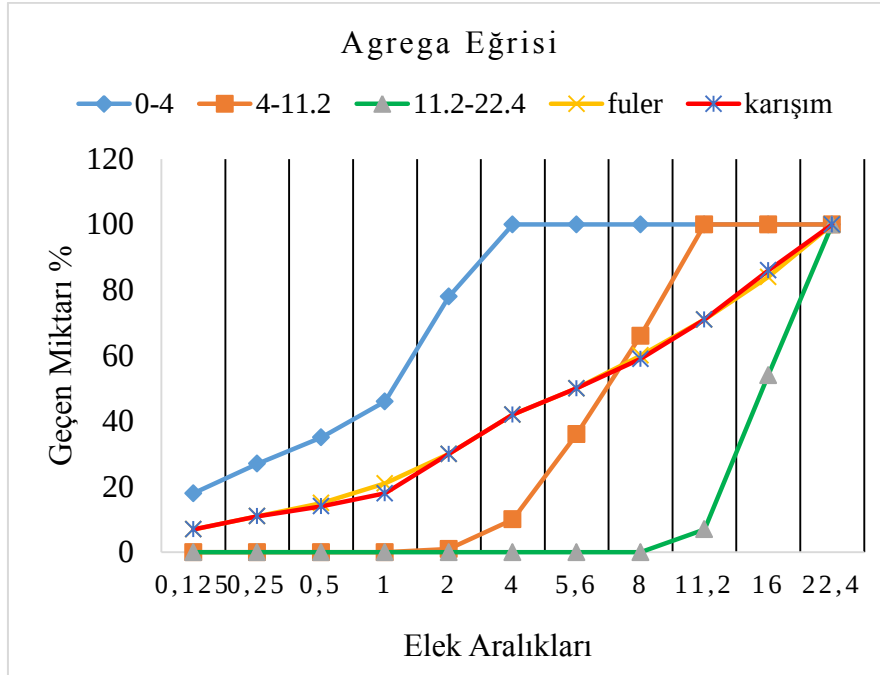
Hazırlanan beton numunelerinde kullanılan agregalar 0-4, 4-11,2 ve 11,2-22,4 boyutlarda kırma agregalar olarak, BELBETON hazır beton santralinden temin edilmiştir.

Beton üretiminde kullanılacak olan agregalar, TS 707 (1980) ve TS EN 932-2 (1999) agregalardan numune alma ve laboratuvar numunelerinin azaltılması ile deney numunesi hazırlama metodlarına göre hazırlanmıştır. Toplam numune agregalar bölgeci kullanılarak deney numunesi için gerekli agregalar miktarı elde edilinceye kadar tekrar edilmiştir.

Agregalar tane büyüklüğü dağılımı, TS 3530 EN 933-1(1999) standardına uygun olarak belirlenmiştir. İri ve ince agregalara ait numunelerin tane büyüklüklerine göre dağılımı elek analizi sonucunda belirlenmiştir. Fuller eğrisine uygun olarak agregalar karışım oranları hesaplanarak agregalar granülometrisi ayarlanmıştır. Buna göre 0-4 mm agregalar %38, 4-11,2 mm agregalar %30 ve 11,2-22,4 mm %32 olarak düzenlenmiştir.

Çizelge 3.9. Karışımında kullanılan agregaların karışım analizi ve yoğunluğu

Elek Açıklığı(mm)	Agregalar Grupları			Fuller	Karışım
	0-4	4-11,2	11,2-22,4		
22,4	100	100	100	100	100
16,0	100	100	54	84	86
11,2	100	100	7	71	71
8,0	100	66	0	60	59
5,6	100	36	0	50	50
4,0	100	10	0	42	42
2,0	78	1	0	30	30
1,0	46	0	0	21	18
0,5	35	0	0	15	14
0,25	27	0	0	11	11
0,125	18	0	0	7	7
Karışım oranları	%38	%30	%32	100	100
Yoğunluk kg/dm ³	2,69	2,70	2,71		



Şekil 3.5. Kullanılan agreganın granolometresi

3.2. Metot

Bu çalışmada agreg, çimento ve uçucu kül ile farklı karışımlar elde edilmiştir. Bu karışımlarda kullanılan malzemelerin oranları bir biri ile de farklıdır.

Karışım oranları

Deneysel çalışmada hazırlanan tüm beton karışımlardaki agreg oranları, %38 ince (0-4mm) ve %30 orta (4-11,2mm) ve %32 iri (11,2-22,4mm) agreg olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan iki farklı uçucu kül ağırlıkça ikame yoluyla betona %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Tekrar edilen karışımlarda ikame oranın %20 sabit tutarak uçucu küllere kireç ilave edilerek beton karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca C25 için karışım miktarlarının hesabı TS 802 (2009) esas alınarak yapılmıştır. Hesaplarda bağlayıcı miktarı 318 kg/m^3 ve su-bağlayıcı oranı 0,50 sabit olarak seçilmiş ve hapsolmuş hava miktarı ise 20 dm^3 alınmıştır. Gerekli agreg miktarının hacmi hesaplanmış ve daha sonra ağırlıklar bulunmuştur. Çizelge 3.9 'da kısaltılmış olan beton karışım kodları verilmiştir.

Çizelge 3.10. Karışımda kullanılan beton kodları

Kod Adı	Açıklama
KB	Kontrol (%100 Çimento)
KUK1	Çimento yerine %5 Kangal uçucu kül ikame edilmiş beton
KUK2	Çimento yerine %10 Kangal uçucu kül ikame edilmiş beton
KUK3	Çimento yerine %15 Kangal uçucu kül ikame edilmiş beton
KUK4	Çimento yerine %20 Kangal uçucu kül ikame edilmiş beton
K1	Çimento yerine %20 ikame edilmiş kireçli beton
KUKK2	Çimento yerine %5 Kangal uçucu kül ve %15 kireç ikame edilmiş beton
KUKK3	Çimento yerine %10 Kangal uçucu kül ve %10 kireç ikame edilmiş beton
KUKK4	Çimento yerine %15 Kangal uçucu kül ve %5 kireç ikame edilmiş beton
YUK1	Çimento yerine %5 Yatağan uçucukül ikame edilmiş beton
YUK2	Çimento yerine %10 Yatağan uçucu kül ikame edilmiş beton
YUK3	Çimento yerine %15 Yatağan uçucu kül ikame edilmiş beton
YUK4	Çimento yerine %20 Yatağan uçucu kül ikame edilmiş beton
YUKK2	Çimento yerine %5 Yatağan uçucu kül ve %15 kireç ikame edilmiş beton
YUKK3	Çimento yerine %10 Yatağan uçucu kül ve %10 kireç ikame edilmiş beton
YUKK4	Çimento yerine %15 Yatağan uçucu kül ve %5 kireç ikame edilmiş beton

Bir metreküp beton içinde bulunan malzeme miktarlarda Çizelge 3.11' de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Bir metreküp beton içinde bulunan malzeme miktarları

Malzemeler	dm ³	γ_c	Kütle (kg)
Çimento	90,4	3,16	286
Su	149	1	149
Hava	20	-	-
0-4 Agrega(0,38)	282	2,68	756
4-11,2 Agrega(0,30)	222	2,69	598
11,2-22,4 Agrega(0,32)	237	2,71	642

Deneylerde kullanılan yöntemler;

- Çökme Hunisi Metodu (TS EN 12350-2)
- Yoğunluk Tayini (TS EN 12390-7)
- Basınç Dayanım Tayini (TS EN 12390-3)
- Ultrases hızı ile beton kalite ölçümü (ASTM C 597)
- Beton test çekici (ASTM C805)
- Kapiler Su Emme Katsayı Tayini (TS EN 722-11)
- Kiriş eğilme deneyi (TS EN 12390-5)
- Karbonatlaşma Deneyi (EN BS 13295:2004)
- Kendiliğinden İyileşme Deneyi

3.2.1. Taze beton kıvam deneyi

Taze betonun kıvam deneyinde TS EN 12350-2 esas alınarak çökme metoduna göre yapılmıştır. Çökme miktarı bu araştırma 40- 80 mm arasında hedeflenmiştir.

3.2.2. Yoğunluk tayini

Sertleşmiş betonun yoğunluk deneyinde TS EN 12390-7 esas alınacak suya doymun yüzey metoduna göre yapılmıştır. Hesaplanmada aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

Suya doymun durumdaki numune kütlesi;

- Numune, (20 ± 2) °C sıcaklıktaki su içerisinde, 24 saat aralıkla yapılan tartımda kütle değişimi % 0,2'den daha az hale gelinceye kadar batırılır. Bu tartımlarda numune yüzeyindeki serbest su silinerek temizlenmiş ve suya doymun numune *kütlesi* (M_s), kg olarak kaydedilmiştir

Numunenin hacim tayini;

- Numune tel sepeti su içinde boş kütlesi (M_{st}), kilogram olarak kaydedilir.
- Suya batırılmış numune ve tel sepetin toplam görünür kütlesi ($M_{st} + M_w$), kilogram olarak kaydedilir.

$$V = \frac{M_a - [(M_{st} + M_w) - M_{st}]}{\bar{\rho}_w} \quad (3.1)$$

V: numunenin hacmi, m³,

M_a: numunenin havadaki kütlesi, kg,

M_{st}: kefenin su içerisindeki görünür kütlesi, kg,

M_w: numunenin su içerisindeki görünür kütlesi, kg,

$\bar{\rho}_w$: suyun 998 kg/m³ olarak kabul edilen, 20 °C sıcaklıktaki yoğunluğu

Yoğunluk, numunenin tayin edilen kütlesi ve hacmi kullanılarak, denklem 15 yardımıyla hesaplanır:

$$D = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

D: Numunenin nem durumu ve hacim tayini metoduna bağlı olarak yoğunluğu, kg/m³,

M: Numunenin, deney esnasındaki durumuna bağlı kütlesi, kg,

V: Numunenin özel metotla tayin edilen hacmi, m³ dür.

Yoğunluk tayini deney sonuçları, en yakın 10 kg/m³'e yuvarlatılarak gösterilmiştir.

3.2.3. Basınç dayanım tayini

Sertleşmiş betonun basınç dayanımı belirlenmesinde TS EN 12390-4 esas alınmıştır.

Basınç deneyini yapmak için Resim 3.8 ve 3.9'da görüldüğü gibi 10x20 silindir kalıplar kullanılmıştır.



Resim 3.4. Basınç deneyi için hazırlanan YUK ve KUK beton silindir numuneler



Resim 3.5. ELE 3000 basınç makinesi

Bu deneyde aletin yükleme hızı 1,0 MPa/s sabit alınarak yapılmıştır.

Basınç dayanımı, 16. verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır;

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.3)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²),

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²'dir Bu alan, numunenin belirtilen ölçüleri kullanılarak (EN 12390-1) hesaplanır. Basınç dayanımı, en yakın 0,5 MPa (N/mm²)'ye yuvarlatılarak gösterilmelidir.

3.2.4. Eğilmede çekme dayanımı tayini

Eğilme dayanımı özelliğinin belirlenmesinde TS EN 12390-5 esas alınarak ortadan yükleme metodu yapılarak 17. eşitlik kullanılmıştır.

Üretilen kiriş numuneler, deney için sudan çıkartıldıktan sonra, yüzeylerindeki fazla su, deney makinesine yerleştirilmeden önce, silinerek temizlenmiştir.



Resim 3.6. Eğilme için hazırlanan Yatağan uçucu küllü beton numuneler

Presin yükleme hızı 0,04 MPa/s sabit gerilme artış hızı sağlanacak şekilde ayarlanmıştır.

Betonun eğilme dayanımının ölçmek için 100×100×400 mm beton kiriş numuneler hazırlanmıştır.

$$Fcf = \frac{F.L}{d_1.d_2^2} \quad (3.4)$$

Burada;

F_{cf} =Eğilme dayanımı, MPa (N/mm²),

F =En büyük yük, N,

L= Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

d_1 ve d_2 =Numunenin en kesit boyutları, mm dir.

Eğilme dayanımı, en yakın 0,1 MPa (N/mm²)'ya yuvarlatılarak gösterilmiştir.

3.2.5. Ultrases hızı

Ultra ses hızının belirlenmesinde ASTM C 597 esas alınarak, numune boyutundan geçen ses süresi tayin edilme esasına dayanır. Elde edilen ses geçiş süresi aşağıdaki eşitliği kullanılarak km/sn cinsinden geçiş hızı belirlenir. Deney 200×100 mm boyutundaki örnekler üzerinde yapılmıştır.



Resim 3.7. Ultrases cihazı

Okunan ses geçiş süresi ses hızına 18. bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$V=L/t \quad (3.5)$$

V:Ses hızı (km/s)

T:Ses geçiş süresi(saniye)

L:Ölçüm boyu(km)

Çizelge 3.14. Ultra ses hızı ve betonun mukavemet sınıfı

Ses Hızı (V)km/s	Beton Kalitesi
> 4,5	Mükemmel
3,3-4,5	İyi
3,0-3,5	Şüpheli
2,0-3,0	Zayıf
< 2,0	Çok zayıf

3.2.6. Kapiler su emme katsayı tayini

Beton numunelerin kapiler su emme deneyinde TS EN 772 standardı esas alınmıştır. Deneyde 100×100×100 mm boyutundaki numuneler kullanılmıştır. 24 saat boyunca 75°C deki etüv kurusu haline getirilmiştir. Etüv kurusu ağırlıkları tartıldıktan sonra her bir deney numunesi için beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden dolayı beton numunelerin yan yüzeyleri silikon ile izole edilmiştir. Silikon ağırlıkları da tartıldıktan sonra su yüksekliği yaklaşık olarak 5 mm olan deney düzeneğine yerleştirilmişlerdir. Deney numuneleri 1, 2, 4, 8, 12, 24 ve 36 saat sonrası su emme miktarları ölçülmüştür. Ölçülen değerlerden her bir saatteki su emme miktarları (Sa) hesaplanmıştır.

$$C_{ws} = \frac{m_{so} - m_{dry}}{A_s \cdot t_{so}} \times 10^6 \text{ [g/(m}^2 \times \text{s)]} \quad (3.6)$$

3.2.7. Karbonatlaşma deneyi

Karbonatlaşma Deneyinde EN BS 13295:2004 standardı esas alınmıştır;

Agregaların maksimum boyutları 4 mm' den büyük olduğu için 100×100×400 mm prizma kullanılmıştır.

17 farklı oranlarda dökülen betonlar 28 gün kirece doymun kürde beklenildikten sonra 14 gün laboratuvar ortamında tutulmuş daha sonra deney tankının içinde önceden yapılmış raflar üstüne düzenle konulmuştur. Numuneler yaklaşık %60±5 sabit nemde ve 20±2 °C , %10 CO₂ miktarı kapalı tankta 56, 90 ve 180 gün tutulmuştur aynı numuneler hem de dışarıda ve normal havada tutulup ve deney sonrası bir biriyle karşılaştırılmışlar. Tankta ve

açık havadaki numunelerin günü geldiğinde fenelfetalin ve alkol karışımı püskürülerek deneye tabi tutulmuşlar. Püskürülmüş madde karbonatlaşma olmayan bölgelerde pembelik yapmıştır. Karbonatlaşma olan bölgeler de renk değişimi olmamıştır.

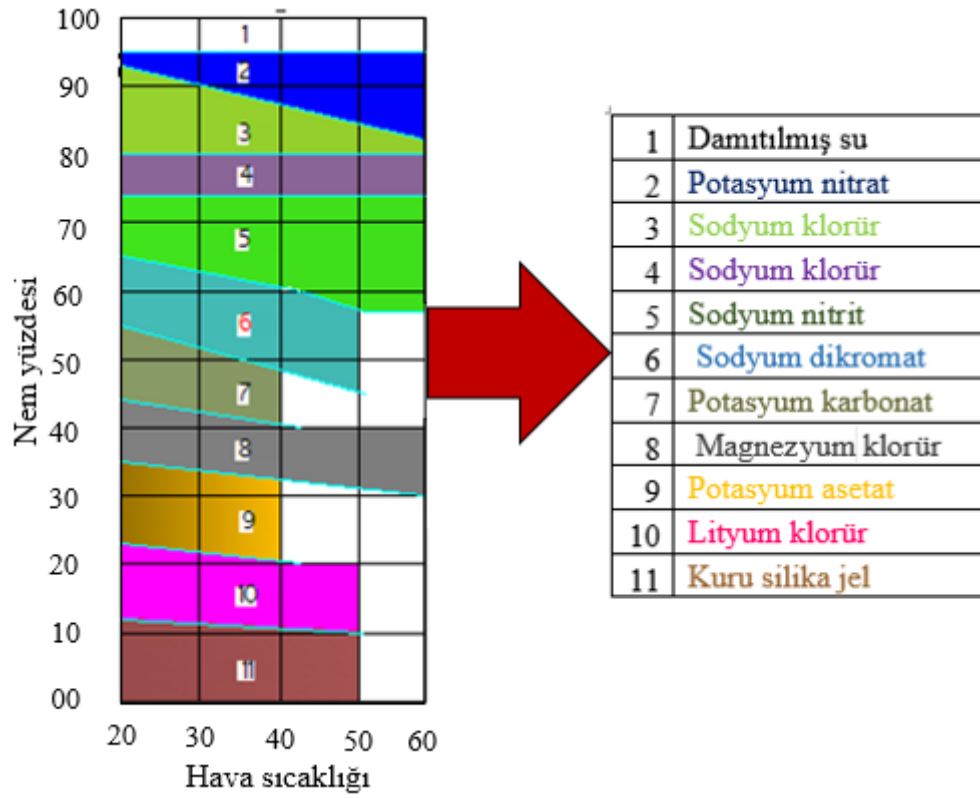


Resim 3.8. Kangal ve Yatağan uçucu küllü beton numunelerin karbonatlaşma hali

Tankın içinde nem miktarını 60 ± 5 de tutması için sodyum dikromat tuzu kullanılmıştır. Bu tuz 1 litre suda doygün hale gelene kadar karıştırılmış ortama konularak nemi 60 ± 5 arasında tutulmuştur.



Resim 3.9. Rutubeti kontrol etmek için Sodyum dikromat



Şekil 3.6. Bazı kimyasal malzemelerin sıcaklık ve nem ilişkisi [34]



Resim 3.10. Tankın içindeki nem ve sıcaklık miktarını kontrolü

Tankın içindeki CO_2 miktarını %10 yapmamız için hacim-ağırlık metodu kullanılmıştır. Tankın hacmi alınarak hacim hesaplanmış ve sonrada normal hava ağırlık birimine çarpılarak içindeki hava miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra vakumla içerisindeki hava emilerek gereken ağırlık alınmış ve onun yerine CO_2 eklenmiştir.

Tankın içindeki nem ve CO₂ miktarını kontrol etmemiz için Resim 3.18’de görünen nem ve sıcaklık cihazı ve basınç ölçer tankın içine yerleştirilmiştir. Tanka eklenen basınç ölçerle içindeki gaz miktarı kontrol edilmiştir. Numuneler bu şartlarla içeriye konulduktan 56, 90 ve 180 gün sonra tanktan alınarak karbonatlaşma deneyine tabi tutulmuştur.



Resim 3.11. Karbonatlaşma tankının bileşenleri

3.2.8. Kendiliğinden iyileşme deneyi

Kendiliğinden iyileşen betonda kullanılan numuneler 100×50 mm’lik disk şeklinde numunelerdir. Bu numuneler Resim 3.19’de görüldüğü gibi ultra ses cihazının üstünde rahatça kullanmamız için 2 taraftan beton testeresiyle kesilmiştir.



Resim 3.12. Ultrases deneyi için hazırlanan numuneler

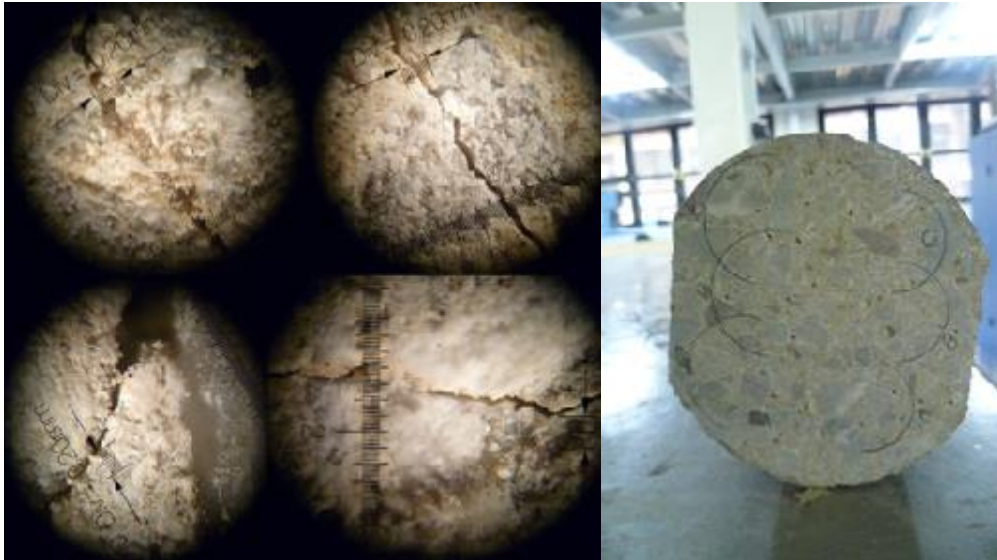
Numuneler 10×20 cm silindir olarak hazırlandı 28 gün kürlendikten sonra Resim 3.19’deki gibi 10×5 olarak kesilmiştir. Her silindirden elde edilen 4 numune elde edilmiştir. Bu

numunelerin biri betonun kırılma noktasını bulmak için basınç altında kırılmıştır. 1 numune rezerv olarak tutulmuş ve 2 numunede basıncın son direncinin %90 'nı kadar yüklenerek Resim 3.20' deki gibi çatlatılmıştır.



Resim 3.13. Numune çatlatma yöntemi

Betonda oluşan çatlaklar 80 ile 120 mikron arasında olmuştur. Bu yüzden her disk numune beton üzerinde 3 kez farklı yerlerden büyüteç ile fotoğraf çekilmiştir.



Resim 3.14. Çatlatılmış numuneler

Betonların çatlatma işlemine tabi tutulmadan önce ultra ses deneyine tabi tutularak sağlam halde değerleri kayıt edilmiştir. 2. Aşamada betonlar çatlatıldıktan sonra tekrar Resim 3.14ve 3.15 gibi ultra ses ve su geçirgenlik deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin paralelinde fotoğraflar yerleri çizildiği noktadan çekilerek arşivlenmiştir.



Resim 3.15. Ultrases ve çatlak gösterici deneyin uygulaması

Betonlar ağırlık olarak %10 CO₂ eklenmiş tank ortamında ve açık havada 28, 56, 90 ve 180 gün bekletilmiştir. Her yaştın sonunda betonlar tanktan ve açık havadan alınarak aynı işlemler ve deneyler tekrar uygulanmıştır.

Ultra ses deneyi yapılarak fotoğrafları çekilmiş ve su geçirgenliklerine bakılmıştır.



Resim 3.16. Su geçirgenlik deneyin yapılışı

Elde edilen 28, 56, 90,ve 180 günlük sonuçlar bir biriyle karşılaştırılarak üzerinde tartışılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

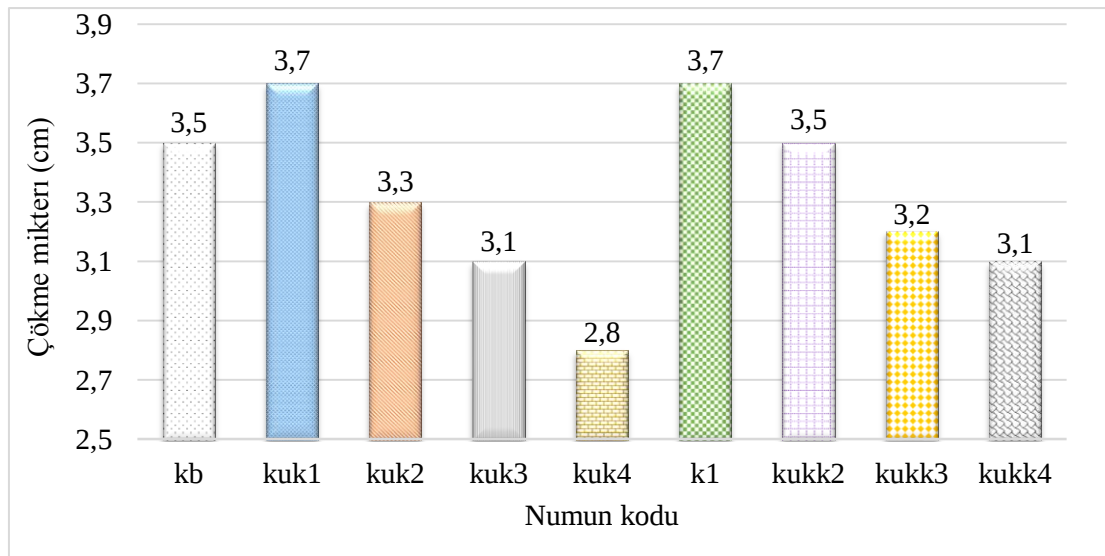
4.1. Çökme (slump) Metodu

Taze betonun kıvamı ASTM C 143'e göre çökme metodu kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonunda elde edilen bütün karışımların çökme değeri Çizelge 4.1 ve şekil 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde karışımlarla en yüksek çökmeyi KUK1 ve K1 karışımları verirken en düşük çökmeyi YUK4 vermiştir. En yüksek çökme ile düşük çökme arasında 1 cm fark olduğu Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Taze betonların çökme değerleri

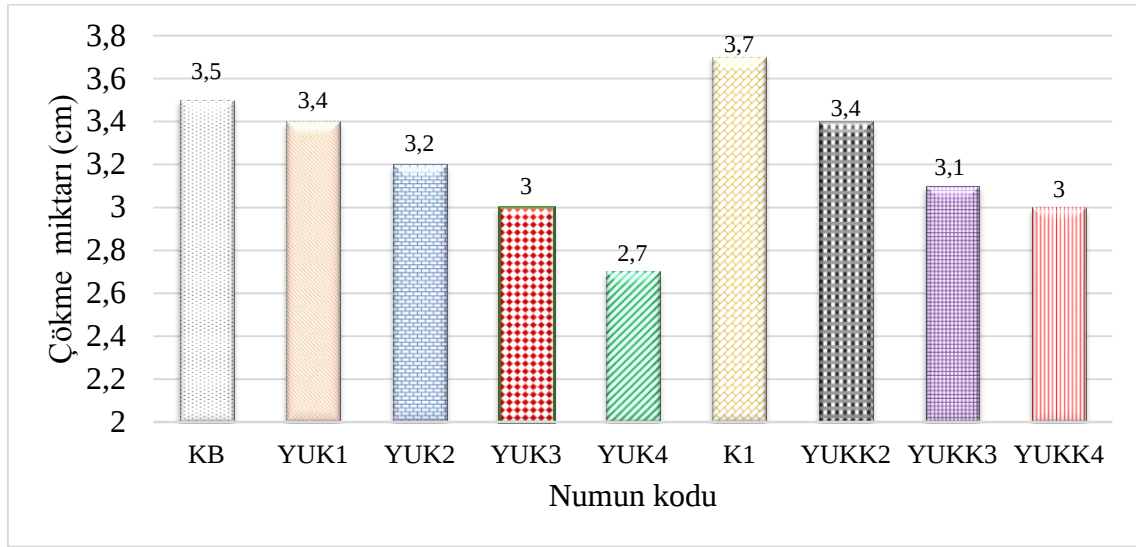
Numune kodu	KB	KUK1	KUK2	KUK3	KUK4	K1	KUKK2	KUKK3	KUKK4	YUK1	YUK2	YUK3	YUK4	YUKK2	YUKK3	YUKK4
Çökme miktarı (cm)	3.5	3.7	3.3	3.1	2.8	3.7	3.5	3.2	3.1	3.4	3.2	3	2.7	3.4	3.1	3

Daha önce bahsedildiği gibi karışımlarda su sabit tutulduğu için bu değişiklikler karışıma giren bağlayıcı (çimento+UK+kireç) değişkeninden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1. Kangal uçucu küllü betonlarda çökme değeri

Şekil 4.1’de Kangal uçucu küllü betonların çökme değerlerini incelediğimizde en yüksek çökme değeri 3.7 mm ile KUK1 ve K1 betonuna ve en az 2.8 mm ile KUK4 numuneye ait olduğunu görülmektedir. Bu iki değer kontrol beton ile karşılaştırıldığında, kontrol betona göre KUK1 %5.7 lik bir artış gösterirken KUK4 de %20 lik bir azalma görülmektedir. %5 UK betonda işlenebilirliği artırırken UK oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır. Bunun nedeni olarak UK’nin inceltilmesindeki tane şekli olduğu tahmin edilmektedir. Kireç ile işlenebilirliği olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 4.2. Yatağan küllü betonların çökme değerleri

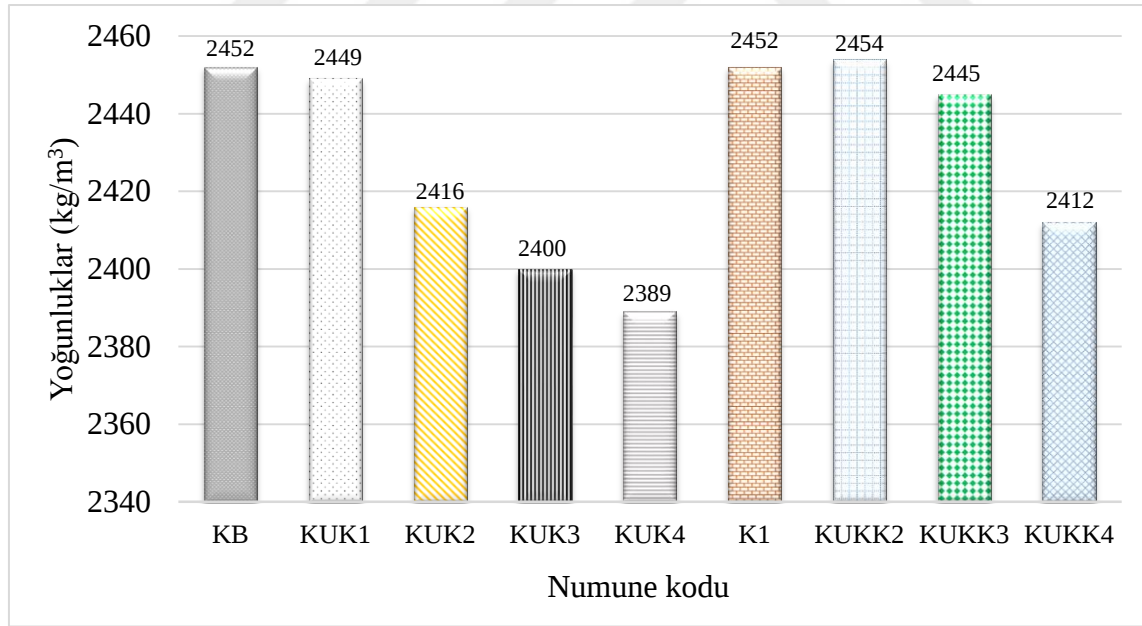
Şekil 4.2’deki Yatağan uçucu küllü betonların çökme değerlerini incelediğimizde en yüksek çökme değeri 3.7 mm ile K1’e ve en düşük çökme değeri 2.7 cm ile YUK4’ e aittir. Şekil 4.2’de yatağan uçucu küllü numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde KB karışımı 3.5 cm çökme değeri ölçülmüş . UK oranı arttıkça çökme değerinin azaldığı görülmektedir. Kireç ise UK ye göre işlenebilirliği olumlu yönde etkilemektedir. Kireçli karışımlarda K1 3.7 cm bir çökme verirken YUKK4 3 cm olarak belirlenmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça çökme miktarı azalmıştır. Uçucu kül ile çökme arasında ters bir ilişki vardır. Bu literatöre terstir. Bunun sebebi uçucu külün doğal tane yapısının öğütülerek küçüldüklerinden ve şeklinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere tane boyutu küçüldükçe yüzey alanı artmakta bu da su ihtiyacını arttırmaktadır.

4.2. Sertleşmiş Betonların Yoğunluk Tayini

Bu çalışmada üretilen beton numunelerinde 28 günlük örneklerin yoğunlukları bulunmuştur. Elde edilen yoğunluk sonuçlarının aritmetik ortalaması Şekil 4.3, 4.4 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2 analiz edildiğinde katkı oranı arttıkça yoğunluk azalmaktadır. Bu azalma katkının (ikame malzemesinin) çeşidine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Çizelge 4.2. Betonların ortalama yoğunluk miktarları

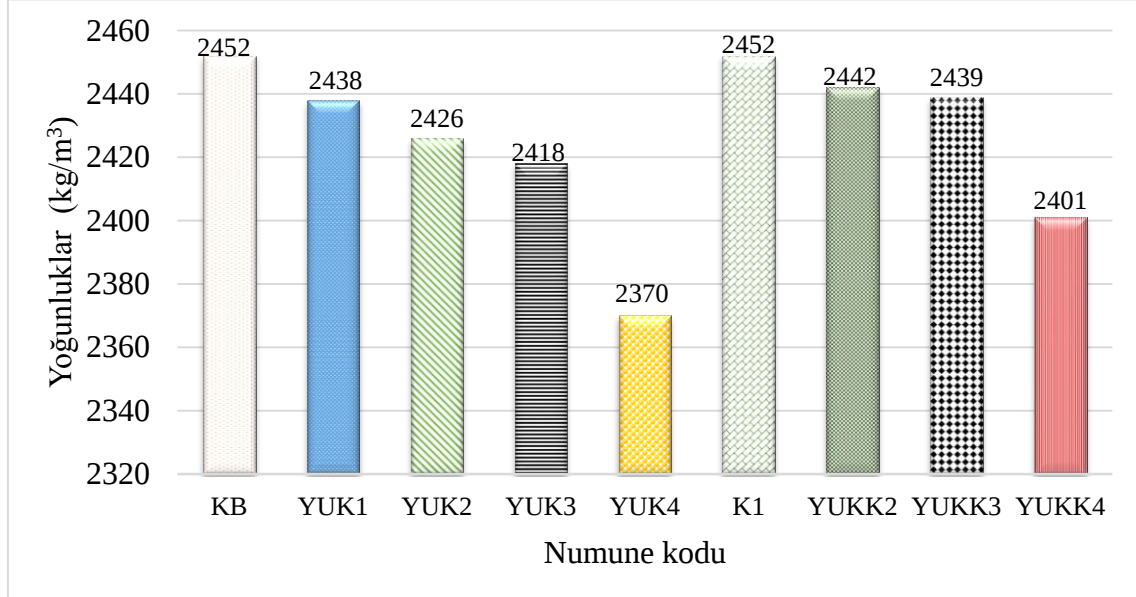
Numune adı	KB	KUK1	KUK2	KUK3	KUK4	K1	KUKK2	KUKK3	KUKK4	YUK1	YUK2	YUK3	YUK4	YUKK2	YUKK3	YUKK4
Ortalama yoğunluk (kg/m ³)	2452	2449	2416	2400	2389	2452	2454	2445	2412	2438	2426	2418	2370	2442	2439	2401



Şekil 4.3. Kangal uçucu küllü betonlarda yoğunluk değerleri

Şekil 4.3 incelendiğinde en düşük yoğunluk KUK4 ve en yüksek yoğunluk ise KUKK2 betonu vermiştir. Yani kontrol betona göre en büyük yoğunluk %15 kireç ile %5 uçucu küllü olan KUKK2’de %0.08 lik bir artış gözükmemektedir. En düşük yoğunluk ise %20

çimento yerine ikame edilmiş Kangal uçucu küllü, KUK4 ‘te kontrol betonuna göre %2.5 daha düşüktür



Şekil 4.4. Yatağan uçucu küllü betonlarda yoğunluk miktarı

Şekil 4.4 ‘ü incelediğimizde en büyük yoğunluk K1 ve KB ‘da olduğu görülmektedir. Dikkat edilirse bu iki numunede uçucu kül miktarı %0 ‘dır fakat uçucu kül içeren numunelerde en yüksek yoğunluk YUKK2 kodlu betonda görülmektedir. En düşük yoğunluk ise %20 çimento yerine ikame edilmiş Yatağan uçucu küllü YUK4 ‘de aittir. İkame malzemesi arttıkça yoğunluk azalmaktadır.

4.3. Basınç Dayanımları

Betonun basınç dayanımı için 7, 28, 90 ve 180 gün üzerinde testler yapılarak KUK ikameli kireç + KUK ikameli karışımlara basınç dayanımları yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3 analiz edildiğinde 7 günlük kontrol betona göre KUK1 kodlu beton %4,7 daha az verirken en yüksek ve KUK4 kodlu beton %20 daha az vererek en düşük numune olmuştur. Kireç ikameli karışımlar 7 günlük betonların kontrol betona göre en yüksek basınç dayanımı %2,7 artış ile K1 en düşük dayanım ise %8,5 azalış göstererek KUKK2 kodlu beton vermiştir.

Çizelge 4.3. Kangal betonlarda basınç değerleri (MPa)

Numune adı	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
KB	25,8	34,8	36,1	36,4
KUK1	24,6	37,6	41,2	41,6
KUK2	22,8	32,9	38,3	38,9
KUK3	22,3	31,7	37,6	38,4
KUK4	20,54	29,8	34,7	36
K1	26,5	30,1	34,5	34,6
KUKK2	23,6	31,4	35,8	36,1
KUKK3	24,6	30,5	38,2	38,7
KUKK4	25,8	30	38,0	38,3

28 günlük betonların kontrol numunelerine göre en yüksek dayanımı veren %8 artışla KUK1 kodlu beton numunesi verir ken, en düşük dayanım gösteren numune %14,4 azalarak KUK4 kodlu beton örneği olmuştur.

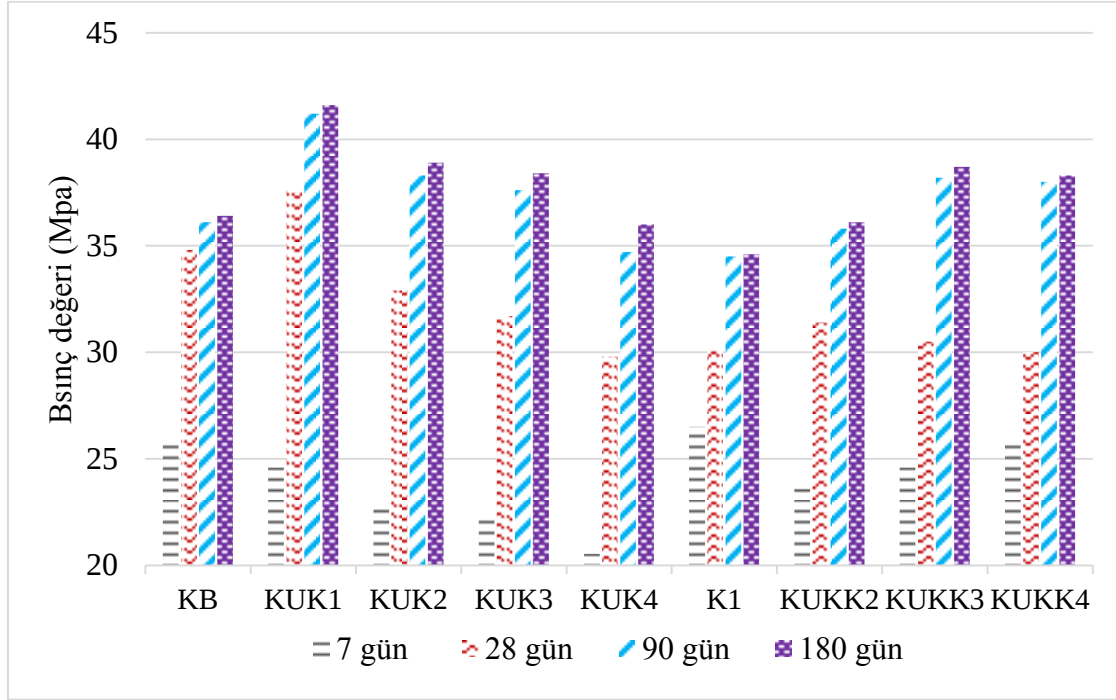
Kireçli karışımlarda en yüksek dayanımı veren numune KB'ye göre %9,8 azalma ile KUKK2 kodlu beton örnekleri verir ken, en düşük dayanımı veren %13,8 azalarak KUKK4 kodlu beton örnekleri vermiştir.

90 günlük betonların kontrol numunelerine göre en yüksek artışı KUK1'de %14 olurken, en düşük dayanımı %3,8 azalışla KUK4 kodlu beton örneği vermiştir.

Kireçli karışımlarda en yüksek dayanımı veren kontrol betona göre %5,8 artışla KUKK3 kodlu beton örnekleri verirken, en düşük dayanımı %0,8 azalışla KUKK2 kodlu beton örneklerinin verdiği görülmüştür.

180 günlük betonların kontrol numunelerine göre en yüksek dayanımı %14,2 artışla KUK1 kodlu beton olmuş ken, en düşük dayanımı %1 azalma gösteren numune KUK4 kodlu beton örneği olmuştur.

Kireçli karışımlarda en yüksek dayanımı veren kontrol betona göre %6,3 artışla KUKK3 kodlu beton örnekleri verirken, en düşük dayanımı ise %5 azalışla K1 kodlu beton örneklerinin verdiği görülmüştür.



Şekil 4.5. Kangal uçucu küllü betonların basınç ve yaş ilişkisi

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi betonun yaşı arttıkça beton basınç dayanımından önemli ölçüde artış görülmektedir. Kısaca betonun yaşı ile basınç dayanım arasında liner bir ilişki olduğu bütün karışım oranlarında açıkça görülmektedir. 7 günlük kuk karışımları esas alındığında en yüksek basınç dayanımı 7 günlük numunelerde KB 'ye aitken yaş arttıkça %5 uçucu kül içeren KUK1 onun yerini almıştır. En düşük dayanım ise 7 günlükte KUK4' de görülmüştür ki yaş arttıkça puzolan etkisi sayesinde dayanımı artmış ve 180 günlük betonlarda yerini K1 numuneye bırakmıştır.

Yatağan UK ve kireç ikameli örneklerin 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımlarının aritmetik ortalaması Çizelge 4.4 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.4 analiz eildiğinde kontrol beton yaşlarına göre karşılaştırılması yapılmıştır.

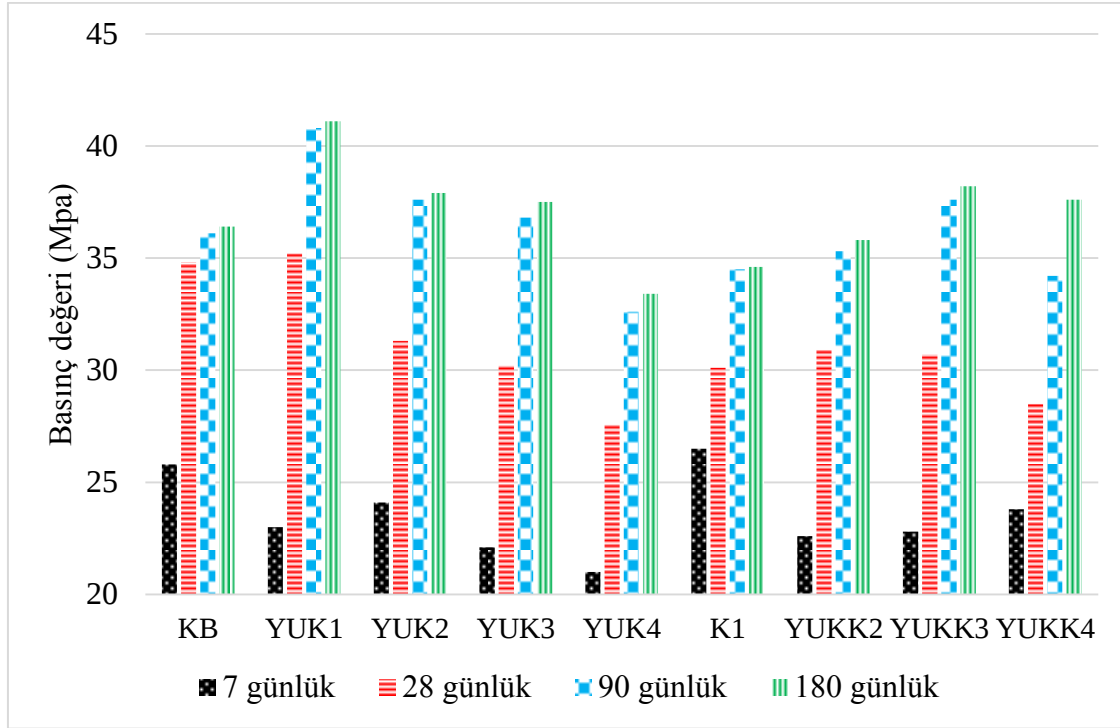
Çizelge 4.4. Yatağan uçucu küllü betonlarda basınç değeri (MPa)

Numune adı	7 günlük	28 günlük	90 günlük	180 günlük
KB	25,8	34,8	36,1	36,4
YUK1	23	35,2	40,8	41,1
YUK2	24,1	31,3	37,6	37,9
YUK3	22,1	30,2	36,8	37,5
YUK4	21	27,6	32,6	33,4
K1	26,5	30,1	34,5	34,6
YUKK2	22,6	30,9	35,3	35,8
YUKK3	22,8	30,7	37,6	38,2
YUKK4	23,8	28,5	34,2	37,6

7 günlük kontrol betonuna göre en yüksek basınç dayanımını %2,7 lik artışla K1 kodlu beton vermiştir. En düşük dayanım ise %18,6 daha düşük olan YUK4 kodlu beton vermektedir.

28 günlük kontrol betona göre en yüksek basınç dayanımı %11 lik artışla YUK1 kodlu betonda görülmektedir. En düşük dayanım ise %20,7 daha düşük olan YUK4 kodlu beton vermiştir.

90 günlük kontrol betona göre en yüksek basınç dayanımı %12 lik bir artışla YUK1 kodlu beton gösterirken en düşük dayanım ise %10 daha düşük olan YUK4 kodlu beton vermiştir 180 günlük'te ise kontrol betona göre en yüksek basınç dayanımı %13 lük bir artışla YUK1 kodlu betona aitken en düşük dayanımı %8 daha düşük gösteren YUK4 kodlu beton vermiştir.



Şekil 4.6. Yatağan uçucu küllü betonlarda basınç dayanımı zaman ilişkisi

Şekil 4.6 incelendiğinde genel olarak beton yaşı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Başka bir ifadeyle doğrusal bir ilişki söz konusudur. Kontrol betona göre 7 günde düşük dayanım gösteren numuneler 90 ve 180 günlük yaşlarda KB'den yaklaşık %10 dan daha fazla dayanım verdiği görülmektedir.

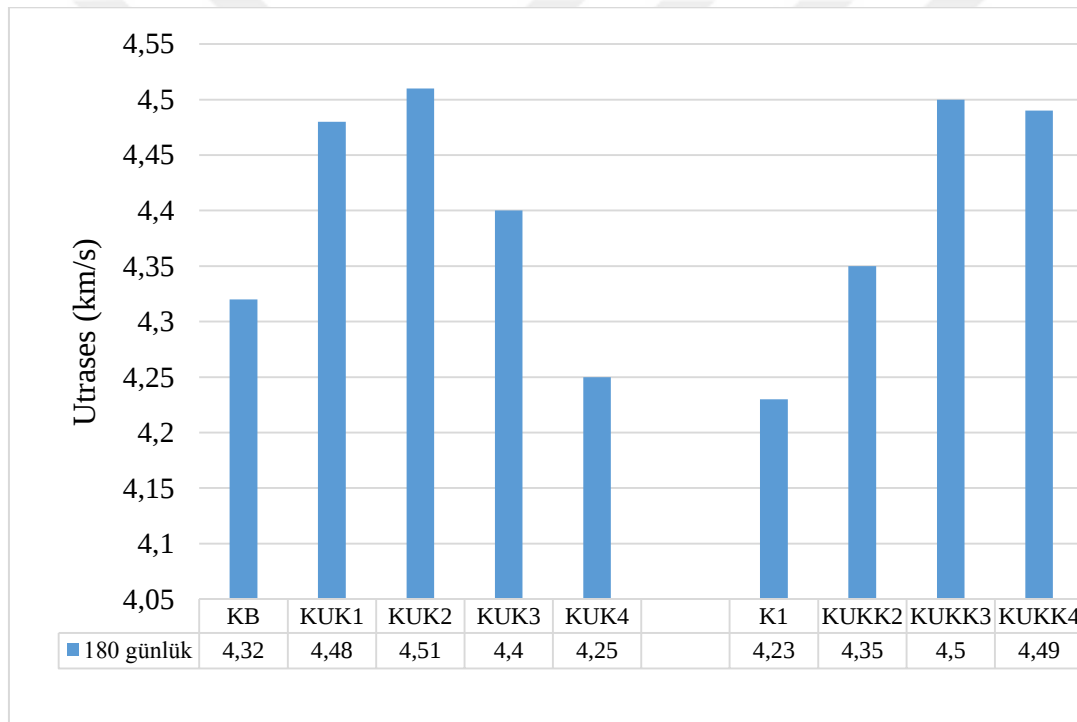
Verilere göre sertleşmeye başladıkça zamana bağlı olarak basınç dayanımında düzenli bir artış olduğu tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı 7 günlük numunelerde YUK1 'e aitken yaş arttıkça %5 uçucu kül içeren KUK1 onun yerine geçmektedir. En düşük dayanım ise 7 ve 180 günlükte YUK4 kodlu numunede görülmektedir.

4.4. Ultrases İle Ses Geçiş Hızı

ASTM C 597' ye uygun 100 × 200 mm numuneler üzerinde yapılan ultrases ile ses geçiş hızı deney sonuçları Çizelge 4.7, 4.8 ve Şekil 4.9 ve 4.10' da verilmektedir.

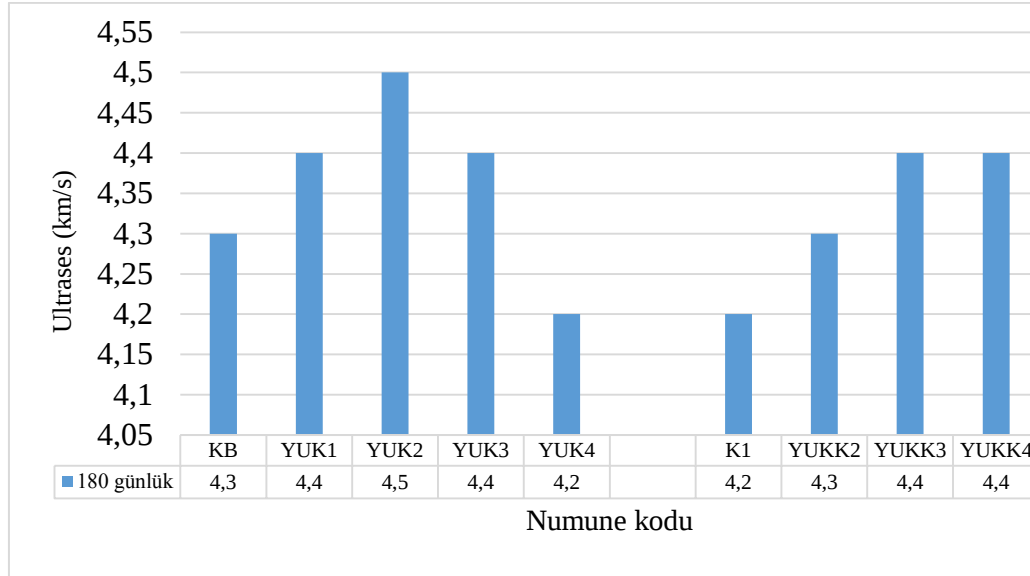
Çizelge 4.5. Ultrases hızı deneyinin değerlendirme sınırları [6]

Ses Hızı (V)km/s	Beton Kalitesi
> 4,5	Mükemmel
3,3-4,5	İyi
3,0-3,5	Şüpheli
2,0-3,0	Zayıf
< 2,0	Çok zayıf



Şekil 4.7. KUK betonlarda ultrases hızı - zaman ilişkisi

Şekil 4.7 incelendiğinde KUK içeren numuneler arasında en yüksek ses geçirim hızını KUK2 numunesi %10 UK içeren numune KB'ye göre %4,2 artış ile verir ike en düşük ses geçirimliliğini 180 gün sonunda KUK4 kodlu2 numune %1,6 azalış ile vermiştir. UK 180 gün sonunda tamamen C-H ile reaksiyona girdiğinden dolayı tüm UK içeren numuneler KB'ye göre daha iyi sonuç vermektedirler. Şekil 4.7'nin ikinci kısmında ise kireç karışıma eklenmektedir ki bu karışımların en iyi sonucunu KUKK3 kodlu numune %10 UK+%10 kireç karışımı ile vermektedir. KUKK3 kodlu numune KB'ye göre %4 artış göstermektedir en az değer ise %2 azalma göstererek K1 kodlu numuneye aittir.

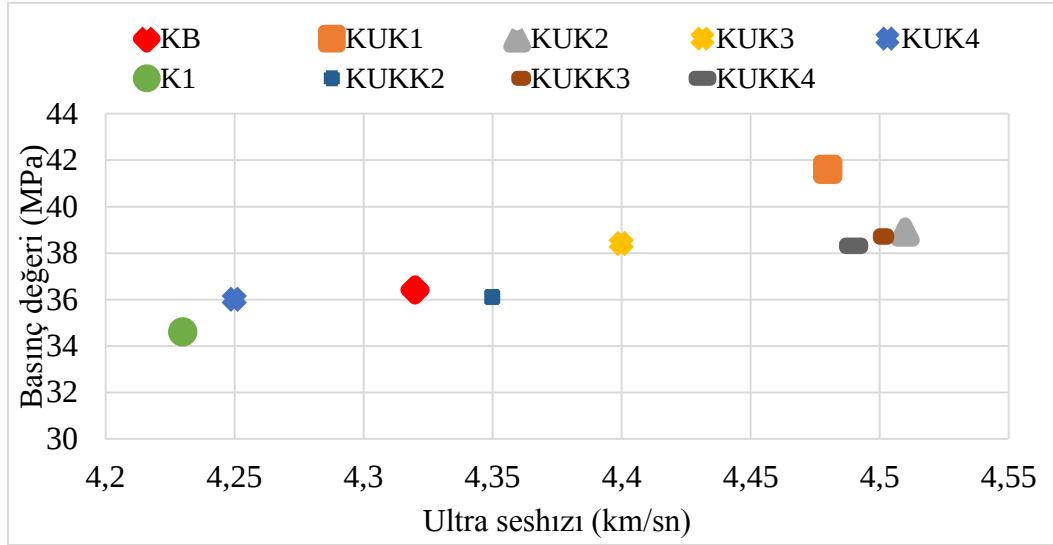


Şekil 4.8. YUK betonlarda ultrases hızı ve zaman ilişkisi

Şekil 4.8 incelendiğinde YUK içeren numuneler arasında en yüksek ses geçirim hızını YUK2 numunesi %10 UK içeren numune KB'ye göre %4,1 artış ile verir iken en düşük ses geçirimliliğini 180 gün sonunda KUK4 kodlu numune %2,3 azalış ile vermiştir. Şekil 4.7'nin ikinci kısmında ise kireç karışıma eklenmektedir ki bu karışımların en iyi sonucunu KUKK3 ve KUKK4 kodlu numuneler %4,7 bir artış ile vermektedir. En az değer ise %2,3 azalma göstererek K1 kodlu numuneye aittir.

Çizelge 4.6. 180 günlük KUK betonlarda ultra ses ve basınç dayanım değerleri

Numune adı	180 günlük ultrases hızı (km/sn)	180 günlük basınç (MPa)
KB	4,32	36,4
KUK1	4,48	41,6
KUK2	4,51	38,9
KUK3	4,4	38,4
KUK4	4,2	36
K1	4,2	34,6
KUKK2	4,3	36,1
KUKK3	4,5	38,7
KUKK4	4,49	38,3

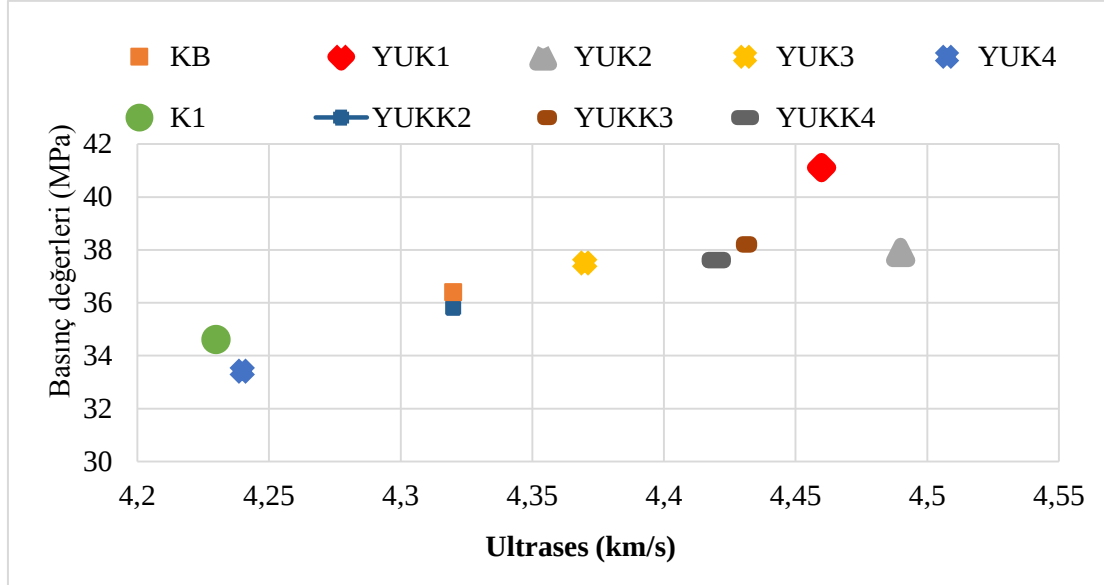


Şekil 4.9. Kangal bölgesine ait uçucu küllü betonlarda ultra ses ve basınç ilişkisi

Basınç dayanımı ses hızı ilişkisini görmek için sadece 180 günlük örneklerin sonuçları kullanılmıştır. Bunun nedeni ise UK ve kireç gibi puzolanların özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu bakımdan Çizelge 4.10 ve Şekil 4.9'da ultrases ve basınç dayanımlarının sonuçlarını bir arada verilmiştir. Kangal uçucu kül içeren bu numunelerde en iyi basınç dayanımı KUK1'e aitken en düşük dayanım KUK4 numunesine aittir. Fakat %5 uçucu kül içeren KUK1 numunesi ultrases deneyinde KUK2 numunesinden sonra çok az farkla 2. sıraya yerleşmiştir. Uçucu kül arttıkça her iki deneyde düşüşler görülmektedir. Kireç karışımlara eklendikten sonra %10 uçucu kül+ %10 kireç her iki deneyde en yüksek sonuçları vermiştir. K1 Beton numunesi %20 kireç içererek kireçliler sınıfında en düşük veriye sahiptir.

Çizelge 4.7. 180 günlük Kangal uçucu küllü betonlarda ultra ses ve basınç değerleri

Numune adı	180 gün (MPa)	180 günlük (MPa)
KB	4,32	36,4
YUK1	4,46	41,1
YUK2	4,49	37,9
YUK3	4,37	37,5
YUK4	4,24	33,4
K1	4,23	34,6
YUKK2	4,32	35,8
YUKK3	4,43	38,2
YUKK4	4,42	37,6



Şekil 4.10. YUK betonlarda ultra ses ve basınç dayanımı değerlerin ilişkileri

Yatağan uçucu kül içeren numunelerin birleşik deneyi, basınç ve ultra ses olarak Çizelge 4.7 ve Şekil 4.10' de verilmektedir. Şekil 4.10 incelendiğinde deneyler arasında olan ilişki görülmektedir. KUK1 ve KUK2 numunelerin her iki deneyde en iyi sonuçlar vermeleri dikkate alınmalıdır UK %10 dan fazla olması mekaniksel değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Çizelge 4.7'nin ikinci yarısında, kireç karışıma eklendiğinde iki deneyde de YUKK3 beton en iyi sonuçları vermektedir.

4.5. Kapiler Su Emme Katsayı Sonuçları

100×100×100 mm'lik beton numuneler üzerinde TS EN 772-11 uygulayarak kapiler su emme katsayı tayini deneyi yapılmıştır. Öncelikle numuneler 24 saat boyunca 75°C deki etüv kurusu haline getirilmiştir. Etüv kurusu ağırlıkları tartıldıktan sonra her bir deney numunesi için beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden dolayı beton numunelerin yan yüzeyleri silikon ile izole edilmiştir.

$$C_{ws} = \frac{m_{so} - m_{dry}}{A_s \cdot t_{so}} \times 10^6 \text{ [g/(m}^2 \times \text{s)]}$$

Çizelge 4.8. Kangal uçucu küllü betonlarda kapiler su emme değerleri

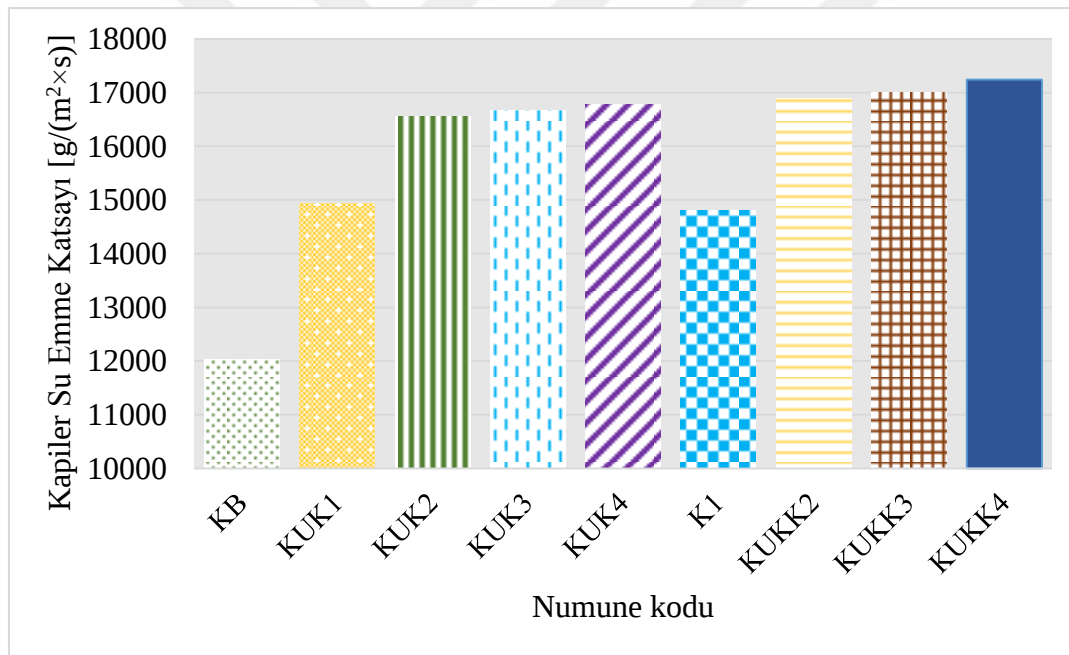
Numune adı	Su emme miktarı (g)					
	1 saat	2 saat	4 saat	8 saat	12 saat	24 saat
KB	4	7	8,5	9,6	10	10,4
KUK1	5,7	9,3	11	11,9	12,5	12,9
KUK2	6,4	9,6	11,1	12,6	13,8	14,3
KUK3	6,6	10	11,6	12,9	13,5	14,4
KUK4	6,5	10,3	11,7	12,9	13,6	14,5
K1	5,8	10,3	11,5	12,2	12,5	12,8
KUKK2	6,7	10,9	12,2	12,7	13,8	14,6
KUKK3	6,8	10,4	12,2	12,9	14,1	14,7
KUKK4	6,8	10,5	12,3	13,1	14,6	14,9

Çizelge 4.8 Kangal uçucu kül içeren numunelerde kapiler olarak su emme miktarlarını göstermektedir. İlk saatlerde numunelerde kapiler su emmenin yüksek olmasına rağmen giderek suyun beton içinde yükselmesi azalmıştır. En yüksek su emme miktarı tüm saatlerde KUKK4 kodlu numunede görülmektedir. KUKK4 numune KB'ye göre 24 saat sonunda %43 daha fazla su emmiştir. KUKK3 kodlu numune 24 saat sonra 1 saatlik numuneye göre %120 bir artış göstermiş.

Çizelge 4.8 incelendiğinde tüm numunelerde saat artışına bağlı olarak su emme miktarları düzenli olarak artış göstermiştir. KB 24 saat sonunda 10,4 g su emerek en düşük değeri vermiştir. Uçucu kül içeren numuneler arasında KUK1 %24 artışla en az ve KUK4 kodlu numune %39 artış ile en fazla su emmeye sahiptirler. Kireç içeren kısımda KB'ye göre K1 kodlu numune %23 artışla en az ve KUKK4 numunede %45 artışla en yüksek su emme görülmektedir.

Çizelge 4.9. Kangal uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı

Numune adı	24 saat	Su Emme Katsayı[g/(m ² ×s)]
KB	10,4	12037,03704
KUK1	12,9	14930,55556
KUK2	14,3	16550,92593
KUK3	14,4	16666,66667
KUK4	14,5	16782,40741
K1	12,8	14814,81481
KUKK2	14,6	16898,14815
KUKK3	14,7	17013,88889
KUKK4	14,9	17245,37037



Şekil 4.11. Kangal bölgesine ait uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı

Kapiler su emme miktarını daha iyi anlamak için kapiler su emme katsayısı hesaplanmaktadır. Bu kat sayı suyun betonda ilerlemesini $g/(m^2 \times s)$ olarak göstermektedir. Şekil 4.11’de kangal bölgesine ait uçucu kül içeren numunelerde en iyi numune su emme katsayısı sahip olan şahit numunedir. En yüksek kapiler su emmeye sahip olan numune 24 saatlik deney sonucu KUKK4 numunesi olarak KB’ye göre %43 fazla hız ile su geçirmektedir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 karşılaştırıldığında su emme miktarı ve su emme hızının bir birileri ile doğrudan ilişkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10. Yatağan uçucu küllü betonlarda su emme değerleri

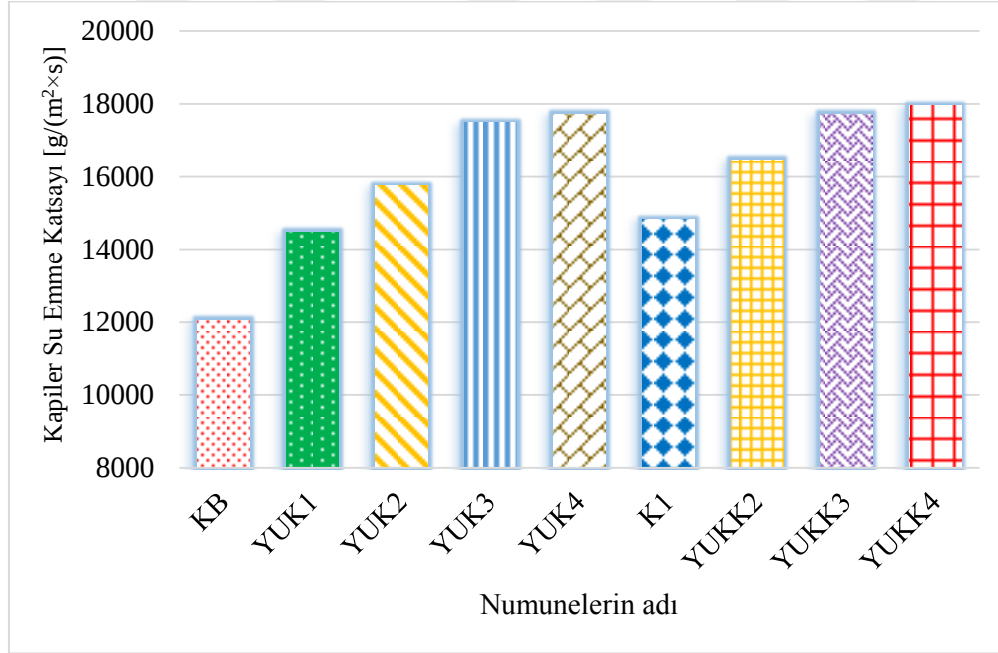
Numune adı	Numunelerde kapiler su emme miktarı (gr)					
	1 saat	2 saat	4 saat	8 saat	12 saat	24 saat
KB	4	7	8,5	9,6	10	10,4
YUK1	5,6	8,2	10,8	11,8	12,1	12,5
YUK2	6	9,3	11,5	12,5	13,1	13,6
YUK3	6,9	10,8	12,9	13,7	14,5	15,1
YUK4	6,7	10,6	13,5	14,5	14,8	15,3
K1	5,8	10,3	11,5	12,2	12,5	12,8
YUKK2	5,9	10,4	12,3	13,2	13,7	14,2
YUKK3	6,1	10,8	12,8	13,8	14,4	15,3
YUKK4	6,8	10,9	12,7	13,9	14,8	15,5

Çizelge 4.10 yatağan bölgesine ait uçucu kül içeren numunelerde kapiler olarak su emme miktarları gösterilmektedir. İlk saatlerde kapiler su emmenin yüksek olmasına rağmen giderek aynen Kangal uçucu küllü betonlar gibi suyun beton içinde yükselmesi azalmıştır. İlk günlerde YUK3 daha fazla su emmiş ve ilerleyen günlerde uçucu kül ve kireci aynı zamanda içeren numunelerde YUKK4 yüksek kapiler su emme miktarlarına sahiplerdiler.

Beton numunelerde saat artışına bağlı olarak kapiler su emme miktarları düzenli artış göstermiştir. KB 24 saat sonunda 10.4 g su emerek en düşük değeri vermiştir. Uçucu kül içeren numuneler arasında YUK1 %20 artışla en az ve YUK4 kodlu numune % 47 artış ile en fazla su emmeye sahiptirler. Kireç içeren kısımda KB'ye göre K1 kodlu numune % 23 artışla en az ve YUKK4 numunede %48 artışla en yüksek su emme görülmektedir.

Çizelge 4.11. Yatağan uçucu küllü betonlarda su emme katsayısı

Numune adı	Kapiler Su Emme Katsayı [$\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{s})$]
KB	12037,03704
YUK1	14467,59259
YUK2	15740,74074
YUK3	17476,85185
YUK4	17708,33333
K1	14814,81481
YUKK2	16435,18519
YUKK3	17708,33333
YUKK4	17939,81481



Şekil 4.12. YUK betonlarda su emme katsayısı

Kapiler su emme katsayısı Şekil 4.12 incelendiğinde sadece UK içeren grupta hepsi KB ‘den daha fazla su emme hızı göstermişlerdir. KB’ ye göre YUK4 %47 artış ile en fazla ve YUK1 %20 artışla en az kat sayısını göstermiştir.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.11 karşılaştırıldığında su emme miktarı ve su emme hızının bir birile doğrudan ilişkisi olduğu görülmektedir.

Kireç içeren numunelerde K1 kodlu numune KB'ye göre %23 artışla en az ve YUKK4 %49 atışla en fazla kat sayısını vermiştir. Tüm numuneler karşılaştırıldığında K1 ve ardından YUK1 en az su emme katsayısını göstermektedir.

4.6. Kiriş Eğilme Dayanımı

Beton kiriş ortadan yüklenmiş eğilmede çekme dayanımı deneyi sonuçlarının aritmetik ortalaması Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. KUK betonlarda eğilme dayanımların aritmetik ortalaması (MPa)

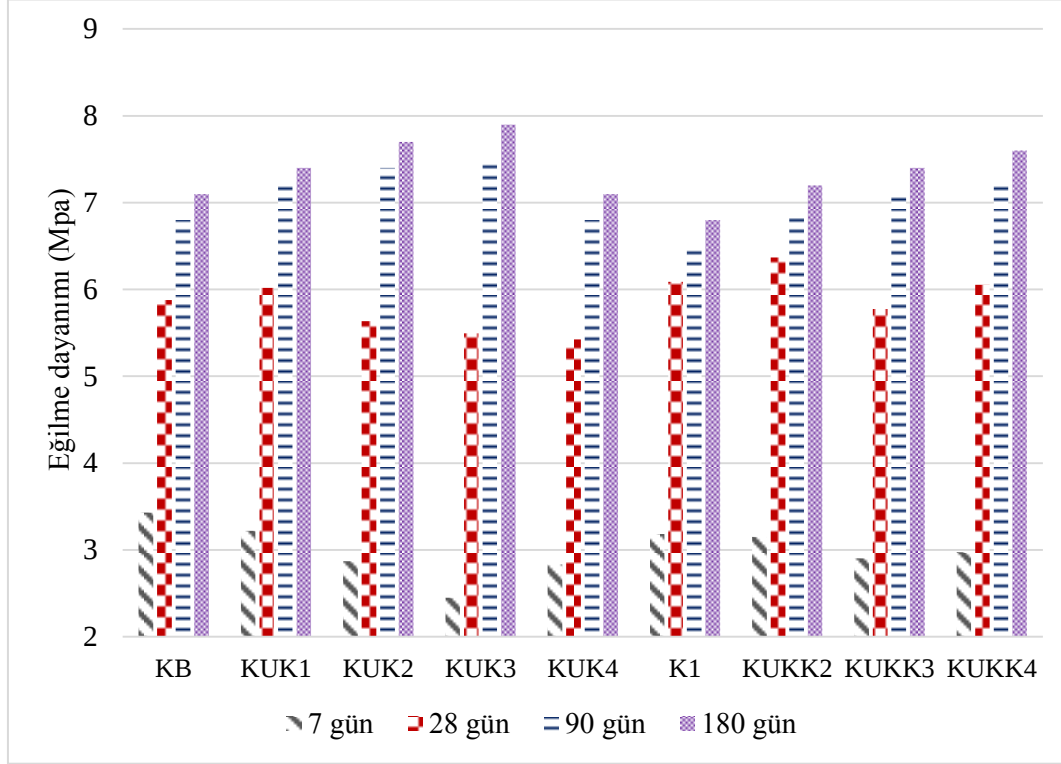
Numune adı	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
KB	3,43	5,88	6,8	7,1
KUK1	3,22	6,02	7,2	7,4
KUK2	2,87	5,635	7,4	7,7
KUK3	2,45	5,495	7,5	7,9
KUK4	2,835	5,425	6,8	7,1
K1	3,185	6,09	6,5	6,8
KUKK2	3,15	6,37	6,86	7,2
KUKK3	2,905	5,775	7,1	7,4
KUKK4	2,975	6,055	7,2	7,6

Kangal UK ile üretilen betonun 7 günlük eğilmede çekme dayanımı KB ile UK oranları kıyaslanmıştır. KB' ye KUK1 %6,12 daha düşük KUK3 ise %24 lük bir düşüş meydana gelmiştir. UK kendi aralarında değerlendirildiğinde KUK1 en yüksek KUK3 en düşük dayanımı vermiştir.

Kangal uçucu külünün 28 günlüklerinin KB'ye göre kıyaslandığına en yüksek eğilme dayanımı %8,3 daha az olarak KUKK2 karışım beton örnekleri verirken en düşük dayanımı ise %7,8 lik bir düşüş ile KUK4 kodlu beton örnekleri vermiştir.

90 günlüklerinin KB'ye göre kıyaslanmasında en yüksek eğilme dayanımı %10,2 daha fazla olarak KUK3 karışım beton örnekleri verirken en düşük dayanımı ise %4 luk bir düşüş ile K1 kodlu beton örnekleri vermiştir.

Kangal uçucu külünün 180 günlüklerinin KB'ye göre kıyaslandığında en yüksek eğilme dayanımı %11,2 daha fazla olarak KUK3 beton karışım örnekleri verirken en düşük dayanım ise %4,2 lik bir düşüş göstererek K1 kodlu beton numunesinde görülmektedir.



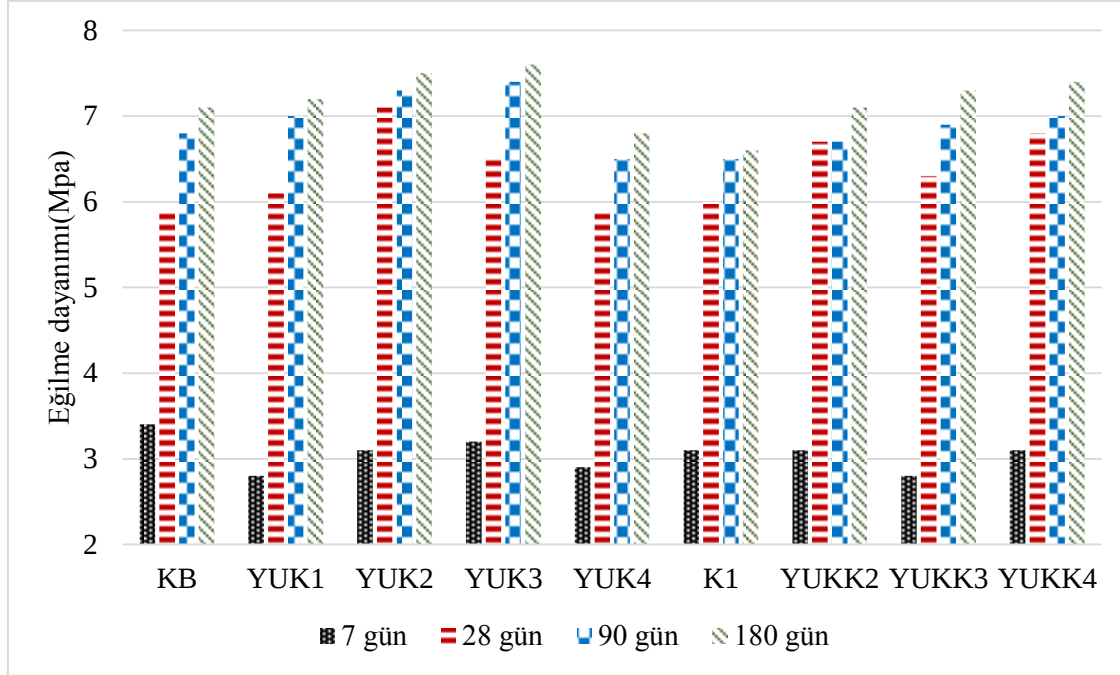
Şekil 4.13. Kangal uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımı ve yaş ilişkisi

Kangal bölgesine ait uçucu kül içeren betonlarda eğilme değerlerine baktığımızda en yüksek dayanım gösteren numune 7 günlüklerde, KB'ye ve ardından 2. sırada KUK1'e aittir. Fakat numune yaşı arttıkça 180 gün sonunda %11,6 artışla KUK3 en yüksek eğilme dayanımını göstermektedir. En düşük eğilme gösteren numune 7 günlük betonlarda KUK2'ye aitken beton numunelerin yaşı ilerledikçe 180 günün sonunda %7 artış göstererek K1 beton karışımında görülmektedir.

Çizelge 4.13. Yatağan uçucu küllü betonlarda eğilme değerleri (MPa)

Numune adı	7 gün	28 gün	90 gün	180 gün
KB	3,4	5,9	6,8	7,1
YUK1	2,8	6,1	7,0	7,2
YUK2	3,1	7,1	7,3	7,5
YUK3	3,2	6,5	7,4	7,6
YUK4	2,9	5,9	6,5	6,8
K1	3,1	6	6,5	6,6
YUKK2	3,1	6,7	6,7	7,1
YUKK3	2,8	6,3	6,9	7,3
YUKK4	3,1	6,8	7,0	7,4

Beton numuneler YUK grupları oranları arasında değerlendirildiğinde 7günlükte en yüksek eğilme dayanım KB numunesinde görülmektedir en düşük dayanım KB'ye göre %18,6 azalışla YUK1 numunesinden elde edilmiştir. Kireçli karışımlarda ise en düşük eğilme dayanımı kontrol numuneye göre %18,6 azalışla YUKK3 numunesinde görülmektedir. 180 günlük eğilme dayanımları analiz edildiğinde KB'ye göre en yüksek dayanım %7,04 YUK3 numunesi vermiştir. Kireç ikamelide ise KB' ye göre en yüksek dayanımı %4,2 artışla ile YUKK4 numunesi vermiştir. Bütün yaşlarda KB'ye göre YUK3 ve YUKK4 numuneleri en yüksek eğilme dayanımı vermiştir.



Şekil 4.14. Yatağan uçucu küllü betonlarda eğilme dayanımı ve yaş ilişkisi

Şekil 4.14 incelendiğinde Yatağan uçucu kül içeren betonlarda eğilme değerlerine baktığımızda en yüksek dayanım gösteren numune 7 günlükte KUK betonlar gibi KB'ye ve ardından 2. sırada KUK2 ve KUK3'e aittir. Numune yaşı arttıkça 'da aynı numuneler en yüksek eğilme dayanımını göstermektedir. En düşük eğilme gösteren numune 7 günlük betonlarda YUK1 ve YUK3'e aitken betonlar sertleşmeye başladıkça yerini K1'e ve KUK4 'de bırakmıştır.

4.7. Karbonatlaşma Deneyin Sonuçları (EN BS 13295:2004)

Bu deneyi yapmak için 100×100×400 mm beton numuneler üretilmiş olup EN BS'e göre karbon dioksit tankında 180 gün boyunca kontrol altında tutulmuştur. Tank hariç numunelerin aynısı 18 ay boyunca laboratuvarında ve bir başka grup dış havada test edilmiştir. Bu 3 ortamın amacı sıra ile şöyledir.

Karbon dioksit'li ortam: Beton bir elemanı düşünürsek bu eleman 3 farklı ortamda karbonatlaşmaya uğramaktadır. Beton elemanı sanayi bölgesi gibi kirli bir ortamda da olabilir. Bunu temsil etmek için numuneleri karbon dioksit ortamında tutmak zorunda olup bu yöntem 1. hızlandırılmış yöntem, 2.si ise kirli ortamın modellenmesidir.



Resim 4.1. CO₂ tankının içindeki beton numuneler

Laboratuvar ortamı: Normal yapılarda beton elemanın iç yüzü her zaman içeri alandadır yani bir kolonun 4 yüzü varsa en az 1 tarafı her zaman üstü kapalı bir alandadır. Bunu modellememiz için laboratuvar ortamında (18-20°C ve normal CO₂) bekletilen beton numuneler vardır.



Resim 4.2. Laboratuvar ortamında bekletilen beton numuneler

Serbest hava şartları: Beton numunelerimizi labratuar dışında açık bir alanda beklektikten sonra 3 farklı koşulda tutulan beton numuneler 56, 90 ve 180 gün sonunda 2 farklı yöntem ile test edilmiştir. 1. Yöntem fenelfetalin püskürme metodu ve 2. Yöntem ise schmidt hyperlink. Fenelfetalin yöntemi betonun karbonatlaşma miktarını açığa çıkarmış ve beton test çekici gün geçerek karbonatlaşmanın yüzeyde olan değişmelerini bizi aydınlatmada yardımcı olmuştur.

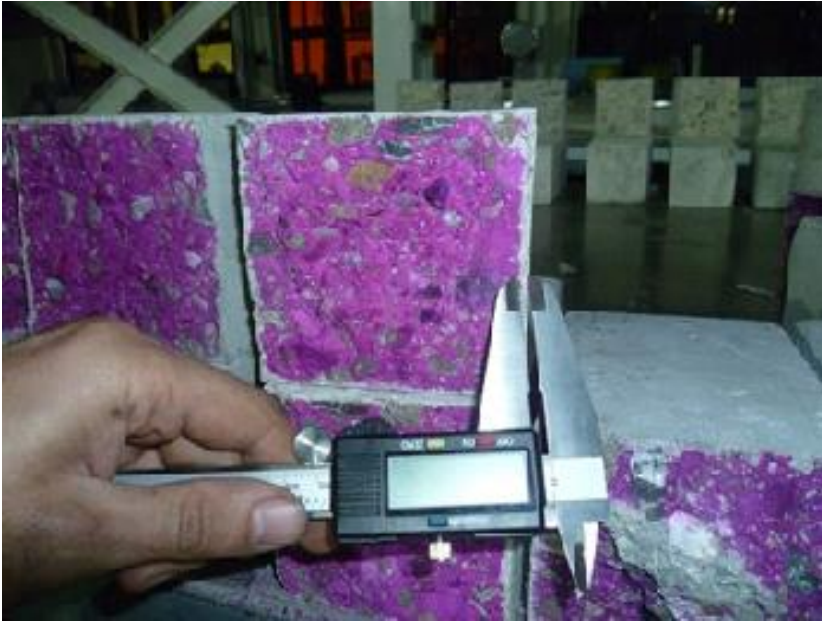


Resim 4.3. Serbest hava ortamında bekletilen beton numuneler

Fenelfetalin püskürme yöntemi: Fenelfetalin yönteminde numunelerin günü geldikten sonra bu çözelti püskürerek karbonatlaşma olmayan beton numunenin rengi Pembe'ye dönüşmektedir. Karbonatlaşmadan dolayı PH değerinin düştüğü bölgelerde fenelfetalin betonun rengini değiştirmez ve PH yüksek olan bölgelerde betonun rengi pembeye döner. Genel anlamda pembe olan bölgelerde karbonatlaşma yoktur anlamına gelir.



Resim 4.4. Fenolfetalin püskürtme



Resim 4.5. Karbonatlaşma ölçümü

Karbonatlaşma değerleri 3 değişik grupta da farklı özellik göstermiştir. Çizelge 4.14, 4.15 ve 4.16'da verilen değerler farklı koşullarda tutulan betonların karbonatlaşma miktarlarının göstermektedir.

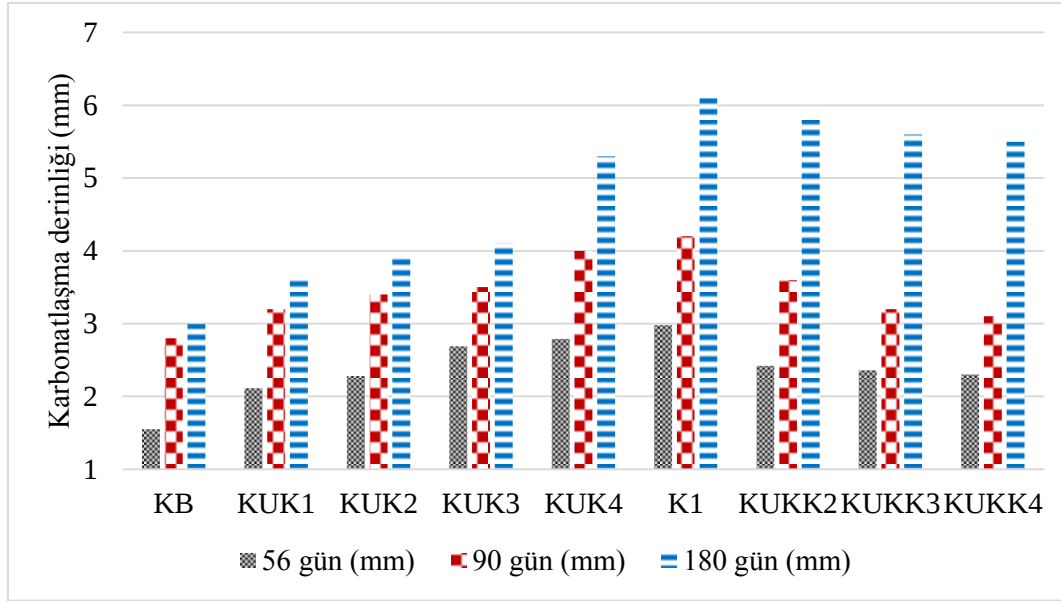
Çizelge 4.14. KUK betonların tankta beklenen numunelerde karbonatlaşma miktarı

Numune Adı	56 gün (mm)	90 gün (mm)	180 gün (mm)
KB	1,55	2,8	3
KUK1	2,11	3,2	3,6
KUK2	2,28	3,4	3,9
KUK3	2,69	3,5	4,1
KUK4	2,79	4	5,3
K1	2,98	4,2	6,1
KUKK2	2,42	3,6	5,8
KUKK3	2,36	3,2	5,6
KUKK4	2,3	3,1	5,5

Çizelge 4.14 incelendiğinde; 56 günlük sonuçlarda KB 1,55 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %36 artışla 2,11 mm göstererek en düşük ve KUK4 %80 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %92 artışla en yüksek ve KUKK4 %48 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda KB 2,8 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numunedir. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %14 artışla 3,2 mm göstererek en düşük ve KUK4 %42 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %50 artışla en yüksek ve KUKK4 %10 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük sonuçlarda KB 3 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numunedir. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %20 artışla 3,16 mm göstererek en düşük ve KUK4 %76 artışla en yüksek karbonatlaşma değerini gösteren numune olmuştur. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %100 artışla en yüksek ve KUKK4 %83 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.15. Tankta bekletilen KUK betonların karbonatlaşma miktarı

Şekil 4.15 incelendiğinde yaş ilerledikçe karbonatlaşmanın artışı görülmektedir. Tüm yaşlarda en az karbonatlaşmayı KB numunesi, en yüksek karbonatlaşmayı ise K1 kodlu numune göstermektedir. Bunun nedenini ise CaO miktarının artması olarak belirtebiliriz.

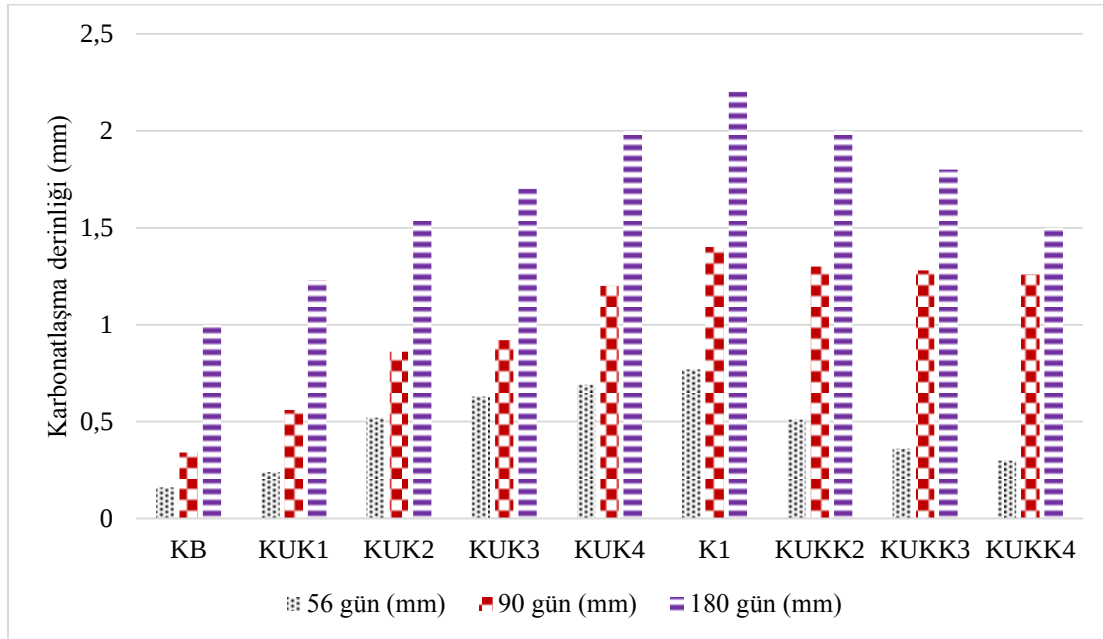
Çizelge 4.15. KUKB laboratuvarında beklenen numunelerde karbonatlaşma miktarı

Numune adı	56 gün (mm)	90 gün (mm)	180 gün (mm)
KB	0,16	0,34	1
KUK1	0,24	0,56	1,23
KUK2	0,52	0,86	1,54
KUK3	0,63	0,92	1,7
KUK4	0,69	1,2	2
K1	0,77	1,4	2,2
KUKK2	0,51	1,3	2
KUKK3	0,36	1,28	1,8
KUKK4	0,3	1,26	1,5

Çizelge 4.15 incelendiğinde; 56 günlük sonuçlarda KB 0,16 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %50 atışla 0.24 mm göstererek en düşük ve KUK4 %330 atışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numunedir. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %380 atışla en yüksek ve KUKK4 %86 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda ise; en düşük karbonatlaşmayı KB numunesi 0,34 mm ile göstermiştir. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %64 atışla 0,56 mm göstererek en düşük ve KUK4 %250 atışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numuneler olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %311 atışla en yüksek ve KUKK4 %270 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük sonuçlarda ise; KB 1 mm ile en düşük karbonatlaşma göstermiştir. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %23 atışla 1,23 mm göstererek en düşük ve KUK4 %100 atışla en yüksek karbonatlaşma göstermiştir. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %120 atışla en yüksek ve KUKK4 %150 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.16. Labratuarda ortamında bekletilen KUK betonların karbonatlaşma miktarları

Şekil 4.16'yi incelediğimizde; 56 gün laboratuvarında %0.01 CO₂ ve 20±2 ve %35 nem ortamında bekletilen numunelerde en yüksek karbonatlaşma K1 numunesinde, en düşük karbonatlaşma ise KB numunesinde görülmektedir. Zaman ilerledikçe 90 ve 180 günlerde K1 numunesinin en yüksek karbonatlaşma değerini göstermeye devam ettiği görülmektedir. Hatta en düşük karbonatlaşma'da tüm yaşlarda KB 'ye aittir. Bu iki numune hariç 180 gün sonucunda KUK1 en az ve KUKK2 en yüksek karbonatlaşmayı göstermektedir. Buradaki sonuçlara göre aynı numuneler en yüksek ve düşük karbonatlaşmayı vermesine rağmen CO₂ ortamında bekletilen numunelerde karbonatlaşma laboratuvarında bekletilen numunelere göre 3 kat kadar yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.16. KUKB açık havada bekletilen numunelerde karbonatlaşma miktarı

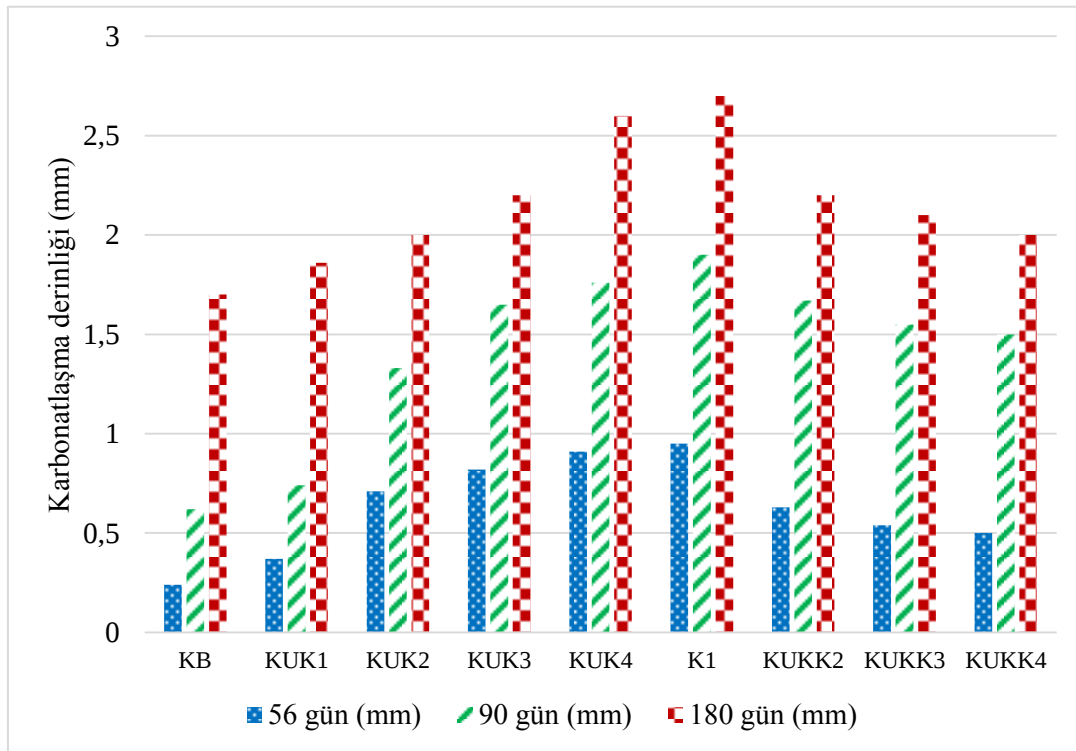
Numune adı	56 gün (mm)	90 gün (mm)	180 gün (mm)
KB	0,24	0,62	1,7
KUK1	0,37	0,74	1,86
KUK2	0,71	1,33	2
KUK3	0,82	1,65	2,2
KUK4	0,91	1,76	2,6
K1	0,95	1,9	2,7
KUKK2	0,63	1,67	2,2
KUKK3	0,54	1,55	2,1
KUKK4	0,5	1,5	2

Çizelge 4.16 incelendiğinde; 56 günlük sonuçlarda KB 0,24 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %54 artışla 0,37 mm göstererek en düşük ve KUK4 %279 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %295 artışla en yüksek ve KUKK4 %108 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda ise; KB 0,62 mm ile en düşük karbonatlaşma gösteren numune olmuştur. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %20 artışla 0,74 mm göstererek en düşük ve KUK4 %180 artışla en yüksek karbonatlaşmayı göstermiştir. Kireç içeren karışımlarda

KB'ye göre K1 %206 artışla en yüksek ve KUKK4 %140 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük onuçlarda ise; KB 1.7 mm ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermiştir. Sadece UK içeren kısımda KUK1 %10 atışla 1,86 mm göstererek en düşük ve KUK4 %52 artışla en yüksek karbonatlaşma değerini göstermiştir. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %58 artışla en yüksek ve KUKK4 %30 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.17. Açık hava’da bekletilen KUKB numunelerinin karbonatlaşma miktarı

Şekil 4.17’i incelediğimizde; en yüksek karbonatlaşma 56 gün dış (açık havada) ortamında %0.03 CO₂ ‘de bekletilen numunelerde diğer koşullardaki beton numunelerinde olduğu gibi K1 ve onun ardından KUK4 numunelerine aittir. Numunelerin yaşları ilerledikçe ‘de 90 ve 180 günlük beton numuneler, 56 günlük numunelerde olduğu gibi en yüksek karbonatlaşma miktarlarını göstermişlerdir. Dış hava koşullarında bekletilen numunelerde en düşük karbonatlaşma miktarı KB’da göstererek ardından KUK1 2.sırada yer almaktadır. 90 ve 180 günlük betonlarda karbonatlaşma miktarları artmış fakat sıralamada değişiklik olmamıştır.

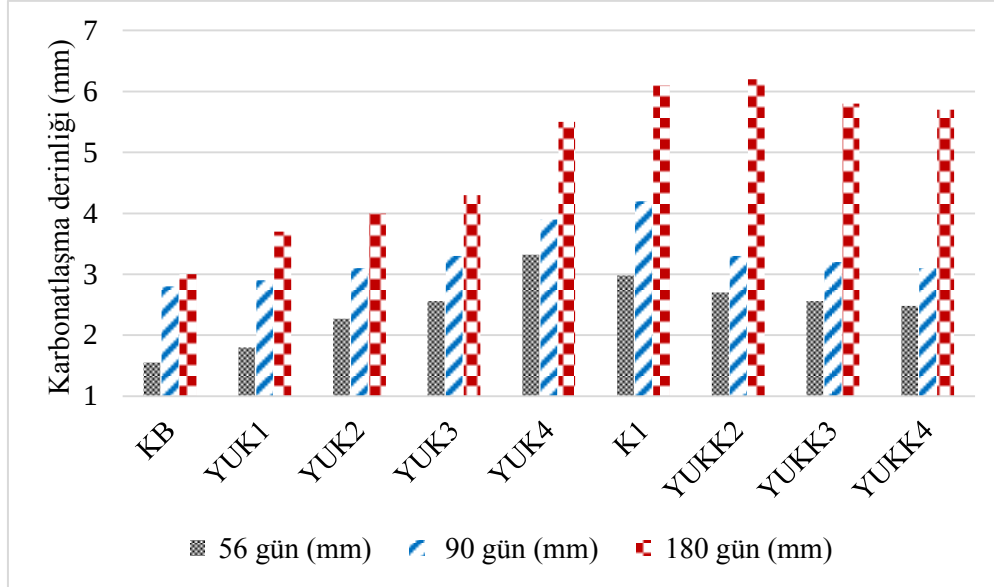
Çizelge 4.17. Tankta bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı

Numune adı	CO2 Tankında Beklenen 56 gün (mm)	CO2 Tankında Beklenen 90 gün (mm)	CO2 Tankında Beklenen 180 gün (mm)
KB	1,55	2,80	3
YUK1	1,8	2,9	3,7
YUK2	2,27	3,1	4
YUK3	2,56	3,3	4,3
YUK4	3,32	3,9	5,5
K1	2,98	4,2	6,1
YUKK2	2,70	3,3	6,2
YUKK3	2,56	3,2	5,8
YUKK4	2,48	3,1	5,7

Çizelge 4.17 incelendiğinde 56 günlük sonuçlarda; KB 1,55 mm ile en düşük karbonatlaşmayı göstermiştir. Sadece UK içeren numunelerde YUK1 %16 artışla 1,8 mm göstererek en düşük ve YUK4 %115 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %98 artışla en yüksek ve YUKK4 %60 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 2,8 mm ile KB numunesi göstermiştir. Sadece UK içeren kısımda YUK1 %7 artışla 2,9 mm göstererek en düşük ve YUK4 %40 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %50 artışla en yüksek ve YUKK4 %13 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 3 mm ile KB numunesi göstermiştir. Sadece UK içeren kısımda YUK1 %23 artışla 3,7 mm göstererek en düşük ve YUK4 %80 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %103 artışla en yüksek ve YUKK4 %94 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.18. Tankta bekletilen YUK beton numunelerin zaman ilişkisi

Şekil 4.18’de incelediğimizde; Yatağan uçucu küllü betonlarda en yüksek karbonatlaşma 56 gün sonucunda K1 ve YUK4 ‘numunelerine aittir. Betonların yaşı ilerledikçe 90 günlük sonuçlarda aynı 56 günlük gibidir fakat 180 günlük numunelerde K1 ve YUKK2’de en yüksek karbonatlaşma görülmüştür. En düşük karbonatlaşma ise diğer numunelerde olduğu gibi KB’da görülmektedir. Betonların yaşı ilerledikçe 90 ve 180 günlük betonlarda KB en az karbonatlaşmayı gösterirken 2.sırada ise YUK1 gelmektedir

Çizelge 4.18. Laboratuvarıda bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı

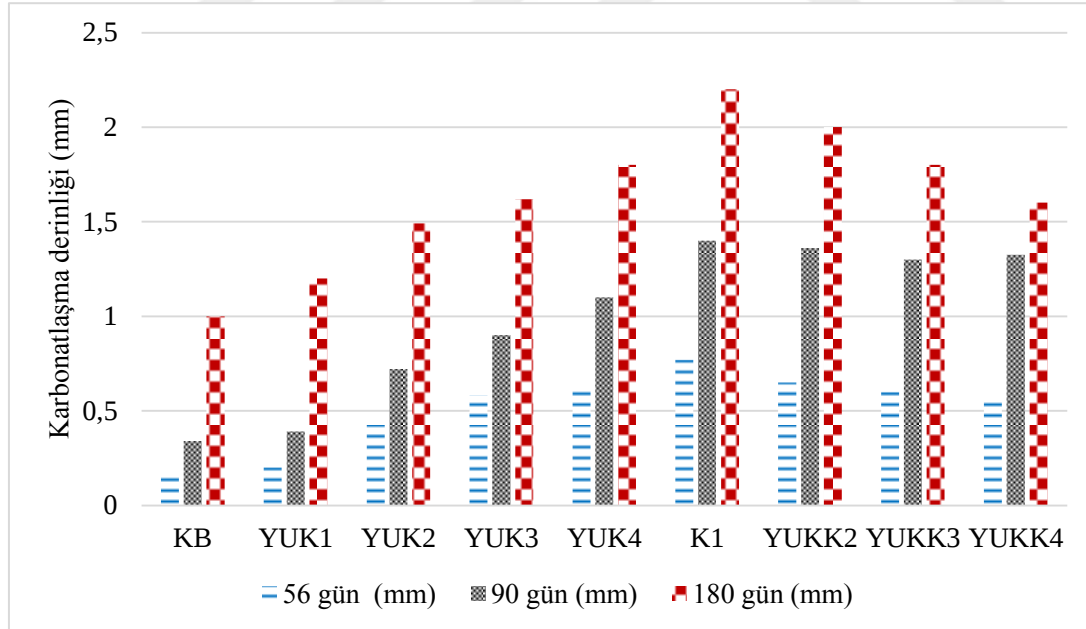
Numune adı	56 gün (mm)	90 gün (mm)	180 gün (mm)
KB	0,16	0,34	1
YUK1	0,2	0,39	1,2
YUK2	0,44	0,72	1,49
YUK3	0,58	0,9	1,62
YUK4	0,62	1,1	1,8
K1	0,77	1,4	2,2
YUKK2	0,65	1,36	2
YUKK3	0,6	1,3	1,8
YUKK4	0,55	1,325	1,6

Çizelge 4.18 incelendiğinde 56 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 0.16 mm ile KB numunesi göstermiştir. Sadece UK içeren numunelerde YUK1 %25 atışla 0.2 mm

göstererek en düşük ve YUK4 %287 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %381 artışla en yüksek ve YUKK4 %243 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 0,34 mm ile KB numunesi göstermiştir. Sadece UK içeren numunelerde YUK1 %15 artışla 0,39 mm göstererek en düşük ve YUK4 %235 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %353 artışla en yüksek ve YUKK3 %283 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük sonuçlarda ; en düşük karbonatlaşmayı 1 mm ile KB numunesi göstermiştir. Sadece UK içeren numunelerde YUK1 %20 artışla 1,2 mm göstererek en düşük ve YUK4 %80 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %100 artışla en yüksek ve YUKK4 %160 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.19. Labaratuvarda bekletilen YUKB numunelerde karbonatlaşma miktarı

Şekil 4.19'i incelediğimizde; en yüksek karbonatlaşmayı 56 gün laboratuvar ortamında bekletilen numunelerde K1 ve en düşükte ise KB'de olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe 90 ve 180 günlerde K1 en yüksek karbonatlaşma değerini korumuştur. Hatta en

düşük karbonatlaşma'da tüm yaşlar 'da KB 'ye aittir. Bu iki numune hariç 180 gün sonucunda YUK1 numune en az ve YUKK2 en yüksek karbonatlaşmayı göstermektedir.

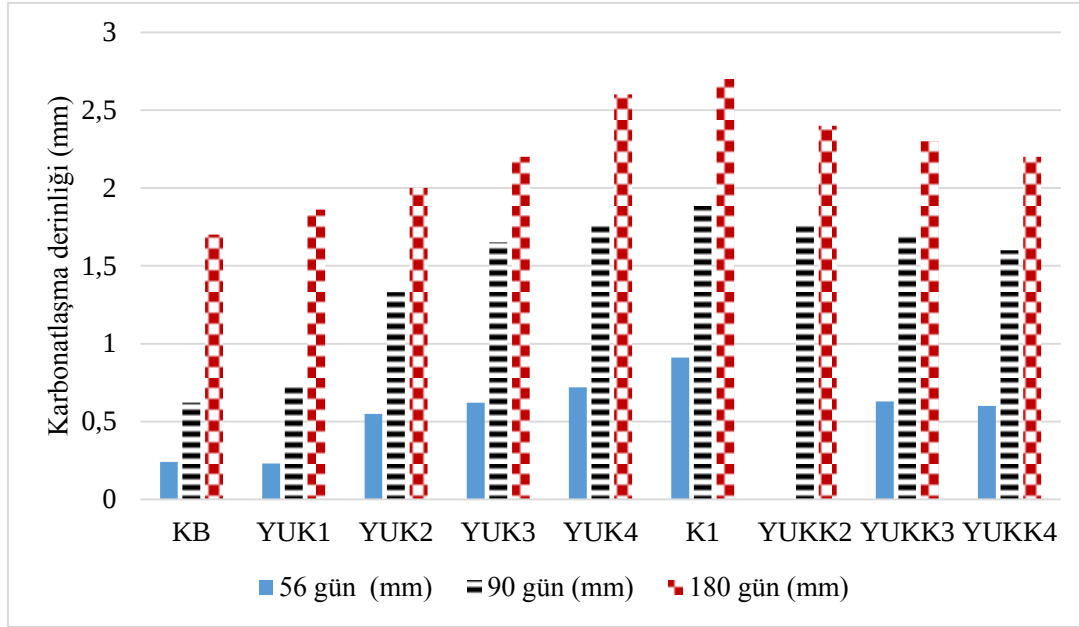
Çizelge 4.19. Açık havada bekletilen YUKB numunelerinde karbonatlaşma miktarı

Numune adı	56 gün (mm)	90 gün (mm)	180 gün (mm)
KB	0,24	0,62	1,7
YUK1	0,23	0,74	1,86
YUK2	0,55	1,33	2
YUK3	0,62	1,65	2,2
YUK4	0,72	1,76	2,6
K1	0,91	1,9	2,7
YUKK2	0, 72	1,77	2,4
YUKK3	0,63	1,70	2,3
YUKK4	0,60	1,6	2,2

Çizelge 4.19 incelendiğinde; 56 günlük sonuçlarda en düşük karbonatlaşmayı 0,24 mm ile KB numunesi vermiştir. UK içeren numunelerde YUK1 %4 azalışla 0,23 mm göstererek en düşük ve YUK4 %200 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numuneler olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %271 artışla en yüksek ve YUKK4 %150 artış ile en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

90 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 0,62 mm ile KB numunesi vermiştir. UK içeren numunelerde YUK1 %20 artışla 0,74 mm göstererek en düşük ve YUK4 %235 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %188 artışla en yüksek ve YUKK3 %158 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.

180 günlük sonuçlarda; en düşük karbonatlaşmayı 1,7 mm ile KB numunesi vermiştir. UK içeren numunelerde YUK1 %9 artışla 1,86 mm göstererek en düşük ve YUK4 %52 artışla en yüksek karbonatlaşma gösteren numune olmuşlardır. Kireç içeren karışımlarda KB'ye göre K1 %58 artışla en yüksek ve YUKK4 %29 artışla en düşük karbonatlaşma değerini göstermektedir.



Şekil 4.20. Açık havada bekletilen YUKB numunelerinin karbonatlaşma miktarı

Şekil 4.20'yi incelediğimizde; en yüksek karbonatlaşmayı 56 gün dış (açık havada) ortamında bekletilen K1 numunesinde olduğu görülmüştür. K1 kodlu numunenin ardından YUK4 ve YUKK2'de 0,72 mm ile karbonatlaşma olduğu görülmektedir. Numunelerin yaşları ilerledikçe 90 ve 180 günlük betonlarda aynı numuneler en yüksek karbonatlaşma miktarlarının göstermişlerdir. Dış hava koşullarında beklenen numunelerde en düşük karbonatlaşma miktarı KB'da görülmektedir ve onun ardından YUK1, 2.sırada yer almaktadır ki bu sonuçlar 90 ve 180 günlük betonlarda karbonatlaşma miktarları artmış olup sıralamada değişiklik olmamıştır.

Karbonatlaşmanın test çekici ile yüzey sertliğinin belirlenmesi :Beton test çekici kullanılarak karbonatlaşmaya tabi tutulan numunelerin iki yan yüzünden 10 adet vuruş yaparak toplam 20 adet sonuç değerlendirilmeye alınmıştır.

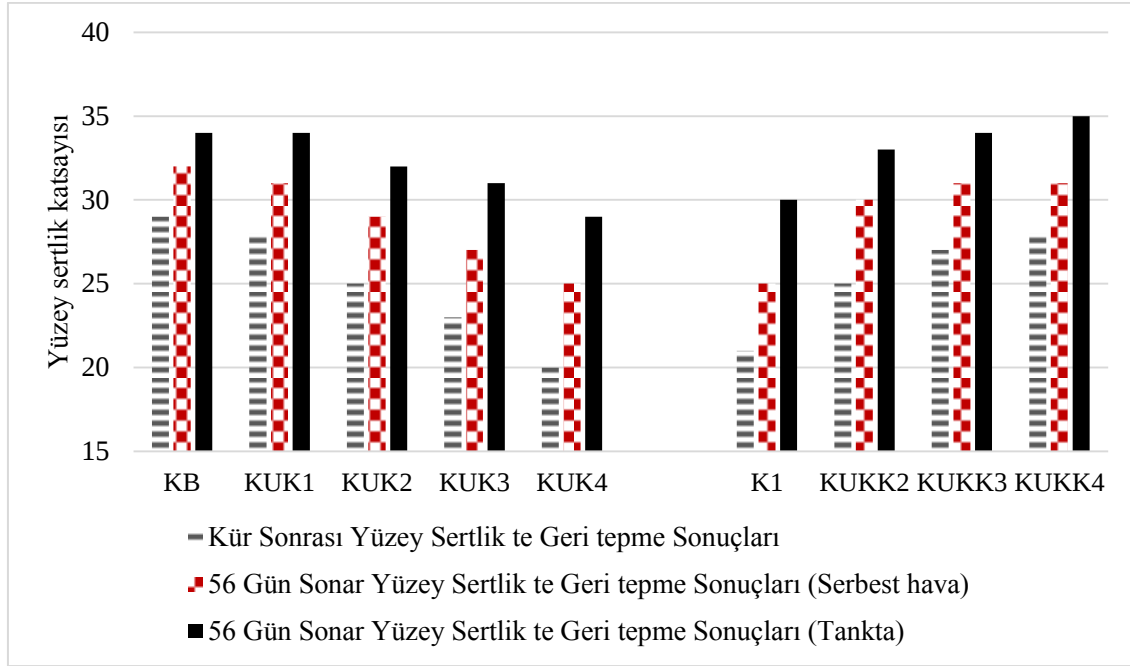


Resim 4.6. Schmidt çekici test yapılması

Schmidt çekici ile karbonatlaşmadan nedeniyle yüzey sertliğinin değişmesine bakılmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.20 ve 4.23’de verilmiştir

Çizelge 4.20. KUK betonlarında Schmidt çekici geri tepme kat sayısı değerleri

Numune kodu	KB	KUK1	KUK2	KUK3	KUK4	K1	KUKK2	KUKK3	KUKK4
Kür Sonrası Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları	29	28	25	23	20	21	25	27	28
56 Gün Sonra Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları (Serbest hava 'da)	32	31	29	27	25	25	30	31	31
% olarak serbest havada beklenen numunelerin yüzey sertlik artması	10	11	16	17	25	19	20	15	11
56 Gün Sonra Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları (Tankta)	34	34	32	31	29	30	33	34	35
% olarak %10 CO ₂ içeren tankta beklenen numunelerin yüzey sertlik artması	17	29	28	34	45	43	32	26	25



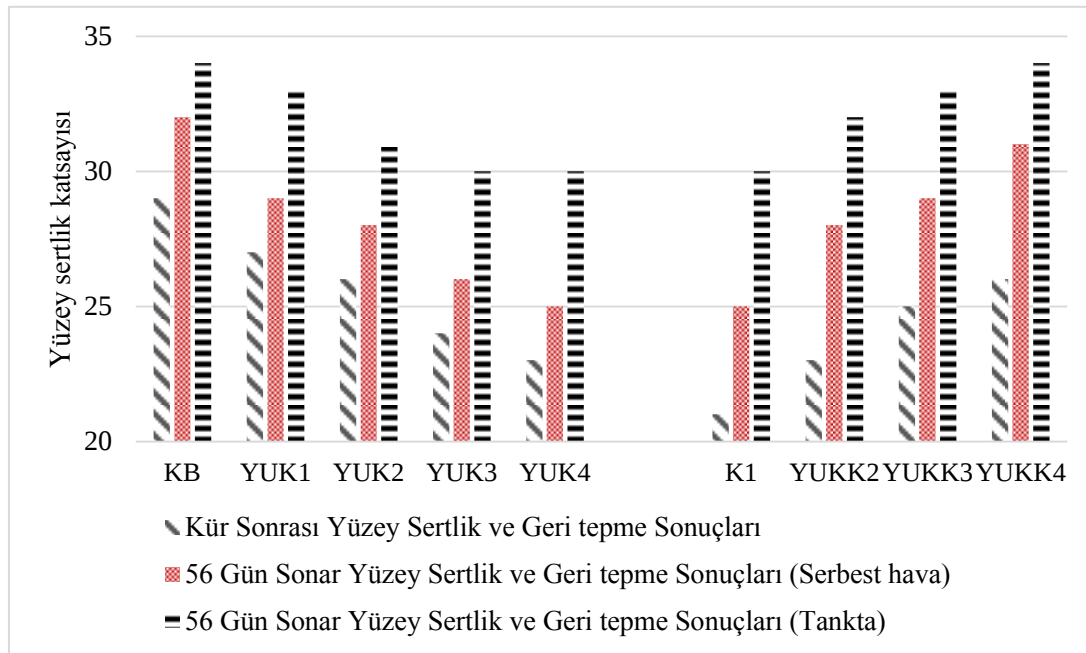
Şekil 4.21. KUK betonlarında Schmidt çekici katsayısı

Şekil 4.21 ve çizelge 4.6 incelendiğinde; 28 günlük su kürü sonrası maksimum değer 29 ile KB'ye ve en düşük değer ise 21 ile K1 kodlu numuneye aittir. 56 gün serbest havada (dış ortamda) bekletildikten sonra KB %10 artış göstererek 32 ve K1 %21 artışla 28 mpa dayanıma ulaşmıştır. Serbest havada bekletilen numuneler arasında en yüksek geri tepme değeri %11, %15 ve %11 artışla 31 olarak KUK1, KUKK3 ve KUKK4 de en az değer artışları ise en fazla % artış göstermelerine rağmen ise %25 ve %19 yileşme ile 25 olarak KUK4 ve K1 'de görülmüştür.

56 gün CO2 tankı içinde bekletildikten sonr KB %17 artış göstererek 34 ve K1 %43 artışla 30 M dayanıma ulaşmıştır . Tank içinde bekletilen KB % 7 ve K1 %22 serbest havada bekletilenlere göre daha fazla artış göstermişlerdir. Karbondioksit tankında bekletilen numuneler arasında en fazla artış %45 artışla KUK4 'de ve 2. Sırada % 43 ile K1'de en az artış ise %17 ile KB ve ardında %25 ile KUKK4 'de görülmüştür.

Çizelge 4.21. YUK betonlarında geri tepme kat sayısı değerleri

Numune kodu	KB	YUK1	YUK2	YUK3	YUK4	K1	YUKK2	YUKK3	YUKK4
Kür Sonrası Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları	29	27	26	24	23	21	23	25	26
56 Gün Sonra Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları (Serbest hava)	32	29	28	26	25	25	28	29	31
% olarak serbest havada beklenen numunelerin yüzey sertlik artması	10	7	7	8	21	19	21	16	14
56 Gün Sonra Yüzey Sertlik ve Geri tepme Sonuçları (Tankta)	34	33	31	30	30	30	32	33	34
% olarak %10 CO ₂ içeren tankta beklenen numunelerin yüzey sertlik artması	17	30	19	25	30	43	39	32	31



Şekil 4.22. YUK betonlarında schmidt çekici kat sayısı

Şekil 4.22 ve Çizelge 4.21 incelendiğinde; 28 günlük su kür sonrtası maksimum değer 29 ile KB'ye ve en düşük değer ise 21 ile K1 kodlu numuneye ait olduğu görülmüştür. 56 gün serbest havada (dış ortamda) bekletildikten sonr KB %10 artış göstererek 32 ve K1 %21 artış ile 28 mpa dayanıma ulaşmıştır. Serbest havada bekletilen numuneler arasında en yüksek geri tepme değeri %21 artışla YUK4 ve K1 de en az ise %7 ile YUK1 ve YUK2 'de görülmüştür.

56 gün CO₂ tankı içinde bekletildikten sonra KB %17 artış göstererek 34 ve K1 %43 artışla 30 dayanıma ulaşmıştır . Tank içinde bekletilen KB % 7 ve K1 %22 serbest havada bekletilenlere göre daha fazla artış göstermişlerdir. Karbondioksit tankında bekletilen numuneler arasında en fazla artış %43 artışla K1 'de ve 2. Sırada % 39 ile YUKK4'te en az artış ise %17 ile KB ve ardında %19 ile YUK2 'de görülmüştür.

KB %10 ve %17 gibi en az artışları göstermesine rağmen 56 günlük tank ve serbest havada bekletilen numunelerde en yüksek değeri veme sebebi ilk gündeki yüksek dayanımından kaynaklanmaktadır.

4.8. Kendiliğinden İyileşme Deney Sonuçları

Bu deney iç ve dış mekân olarak karbondioksit tüpünün içinde ve normal havada yapılmıştır. Deneyde 2 farklı test metodu uygulanmıştır.

Birinci deneyde numuneler ultrasonik test cihazı ile, 2. Deneyde numunelerin su geçirgenlikleri, karbonatlaşmadan önce ve sonra ölçülmüştür..

Deneylerin sonuçları tablo ve diyagram olarak verilmiştir.

4.8.1. Kendiliğinden iyileşmede ultrases geçiş hızı testi

Bu deneyde numuneler kırılmadan önce ve hemen kırıldıktan sonra, ardından 56, 90 ve 180 günlük aralıklarla karbon dioksit içeren tank ve serbest hava'da bekletilen numuneler teste tabii tutulmuş ve sonuçlar Çizelge 4.22 ve 4.23'te verilmiştir.

Çizelge 4.22. Tank içinde bekletilen Kangal UK numunelerde ultrases geçiş hızları

Numune adı	Çatlatılmadan önce	Çatlatıldıktan sonra	Tankta 56 gün sonra	Tankta 90 gün sonra	Tankta 180 gün sonra	Yüzde olarak ses geçişin artması
KB	4,5	1,9	2	2,1	2,2	16%
KUK1	4,52	2,4	2,5	2,7	2,9	21%
KUK2	4,32	2,1	2,2	2,4	2,6	24%
KUK3	4,23	2	2,2	2,3	2,5	25%
KUK4	4,26	1,7	1,9	2	2,2	29%
K1	4,54	2,1	2,2	2,4	2,6	24%
KUKK2	4,44	2,1	2,2	2,4	2,7	29%
KUKK3	4,24	2,4	2,5	2,8	3,2	33%
KUKK4	4,38	2,4	2,5	2,7	3	25%

Çizelge 4.23. Tank içinde bekletilen Yatağan UK numunelerde ultrases geçiş hızları

Numune adı	Çatlatıldıkta n önce	Çatlatıldıkta n sonra	Tankta 56 gün sonra	Tankta 90 gün sonra	Tankta 180 gün sonra	Yüzde olarak ses geçişin artması
KB	4,5	1,9	2	2,1	2,2	16%
YUK1	4,55	2,2	2,3	2,4	2,6	18%
YUK2	4,3	2,9	3	3,3	3,5	21%
YUK3	4,23	2,8	3	3,2	3,5	25%
YUK4	4,28	2,8	2,9	3,4	3,6	29%
K1	4,54	2,1	2,2	2,4	2,6	24%
YUKK2	4,61	2,6	2,9	3,4	3,5	35%
YUKK3	4,32	1,9	2,3	2,5	2,7	42%
YUKK4	4,33	2	2,1	2,4	2,6	30%

Karbon dioksit içeren tank 'ta Kangal bölgesine ait uçucu kül içeren numunelerde azda olsa kireçle karışmadığı zaman yatağan uçucu kül içeren numunelere karşı daha iyi bir sonuç göstermişlerdir. Kangal uçucu kül içeren numunelerde KUKK3 %10 kangal uçucu

kül + %10 kireç ile %33 iyileşme değeri vermiş ve kangal UK lı numunelerde en iyi karışım olmuştur. Ardından KUK4 ve KUKK2 %29 ile 2. Sıradalar. Yatağan uçucu kül içeren numunelerde ise YUKK3 %42 iyileşme ile en iyi karışım olmuştur. Numuneleri incelediğimizde kireç ve uçucu külün bir araya geldiğinde Yatağan uçucu külü daha iyi sonuçlar vermektedir.

Çizelge 4.24. Serbest havada bekletilen Kangal UK numunelerde ultrases geçiş hızı

Numune adı	Çatlatılmadan önce	Çatlatıldıktan sonra	56 gün sonra	90 gün sonra	180 gün sonra	Yüzde olarak ses geçişin artması
KB	4,6	2,03	2,06	2,1	2,12	4%
KUK1	4,6	2,30	2,34	2,38	2,41	5%
KUK2	4,3	2,38	2,43	2,48	2,52	6%
KUK3	4,3	1,94	2	2,03	2,08	7%
KUK4	4,3	2,21	2,25	2,31	2,38	8%
K1	4,4	2,37	2,41	2,44	2,52	6%
KUKK2	4,3	2,01	2,04	2,08	2,15	7%
KUKK3	4,4	2,13	2,22	2,27	2,31	8%
KUKK4	4,2	2,06	2,14	2,18	2,22	8%

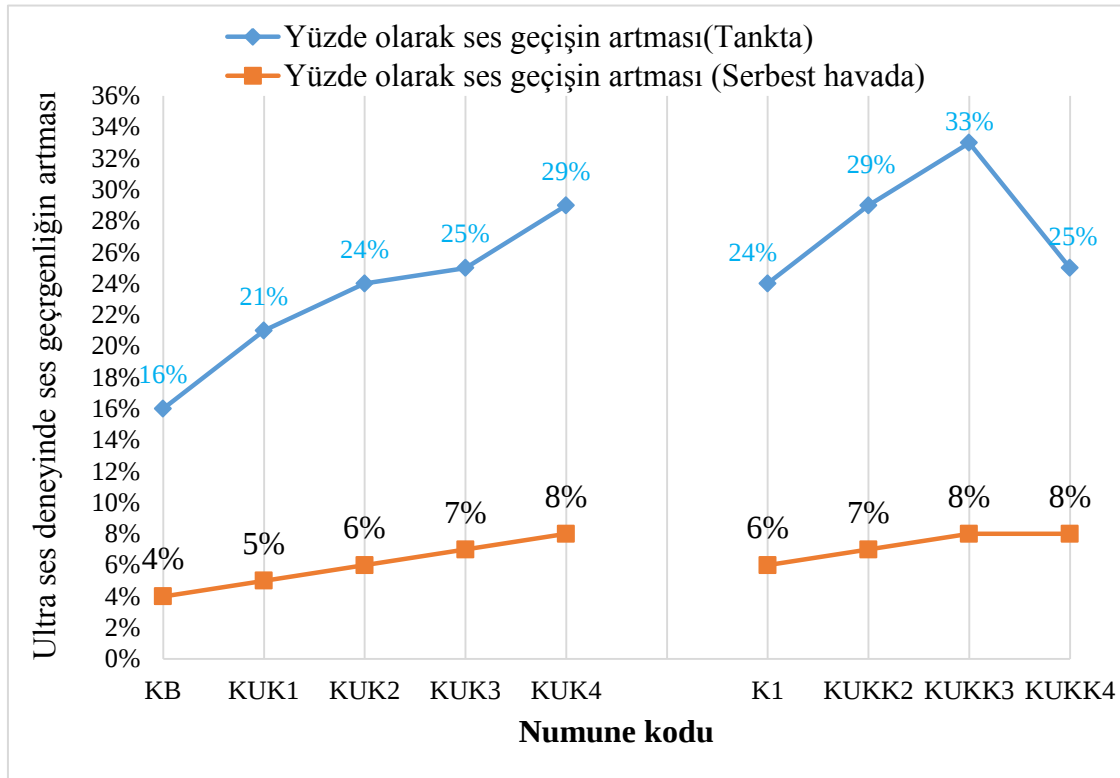
Çizelge 4.25. Serbest havada bekletilen Yatağan UK numunelerde ultrases geçiş hızı

Numune adı	Çatlatılmadan önce	Çatlatıldıktan sonra	Dışarıda 56 gün sonra	Dışarıda 90 gün sonra	Dışarıda 180 gün sonra	Yüzde olarak ses geçişin artması
KB	4,6	2,03	2,06	2,1	2,12	4%
YUK1	4,4	2,18	2,21	2,26	2,29	5%
YUK2	4,4	1,90	1,95	2,01	2,05	8%
YUK3	4,1	2,00	2,05	2,1	2,16	8%
YUK4	4	2,32	2,37	2,42	2,46	6%
K1	4,4	2,37	2,41	2,44	2,52	6%
YUKK2	4,5	2,37	2,43	2,48	2,54	7%
YUKK3	4,3	2,14	2,19	2,19	2,28	7%
YUKK4	4,5	2,22	2,28	2,33	2,39	8%

Serbest havada bekletilen Kangal uçucu kül içeren numunelerde ultra ses deneyin geçiş hızı iyileşmesi tankta bekletilen numunelere göre çok azdır. Kangal uçucu kül içeren

numunelerde en iyi sonuç %20 uçucu kül içeren KUK4 ve kül ile kireç bir araya gelmiş olan numunelerde görülmektedir. Yatağan uçucu küllü numunelerde ise iyileşmeler bir birine çok yakinken uçucu kül miktarı arttıkça daha iyi sonuçlar görülmektedir.

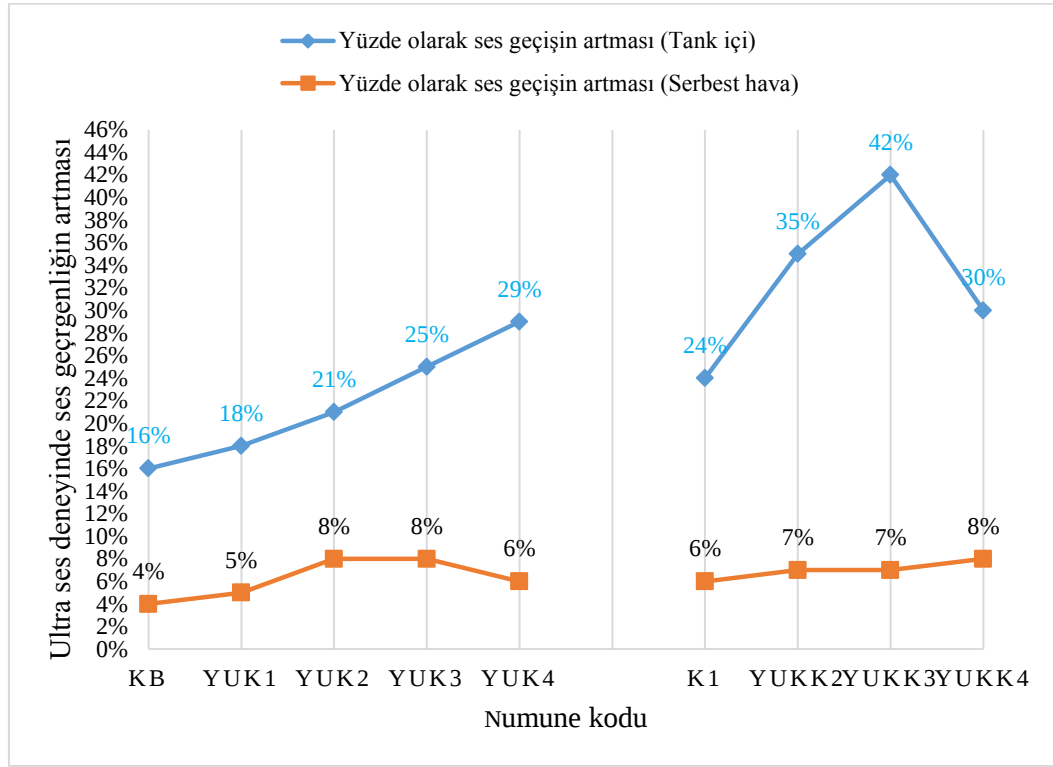
Yapılan deneylerde kullanılan iki ortamın sonuçlarını (Tank içi kontrollü ve serbest hava) farklı uçucu kül olan Yatağan ve Kangal uçucu külleri olarak Şekil 4.35 ve 4.36'da karşılaştırarak farklı koşullarda verilen test bilgileri bir biri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.23. Ultrases sonucun tank ve açık havada KUK numunelerin karşılaştırılması

Numuneler çatlatılmadan önce, çatlatıldıktan sonra ve iyileştikten sonra ultrases deneyine tabi tutulmuşlar. Şekil 4.23 incelendiğinde tank içi ve serbest havada bekletilen numunelerde çok yüksek bir fark görülmektedir. Tank içinde UK içeren kısımda en fazla iyileşme gösteren %29 ile KUK4'de aittir ki bu değer serbest havada bekletilen aynı numunenin 3,5 katıdır. Tank içinde KUK4 kodlu numune KB'ye göre %81 daha fazla iyileşme göstermektedir.

Kireç içeren numunelerde ise en fazla iyileşme iyileşmeden öncesine göre %33 artışla KUKK3 kodlu numunede görülmektedir ki bu numune KB'ye göre %106 daha fazla iyileşmiştir.



Şekil 4.24. Ultrases sonucun tank ve açık havada YUK numunelerin karşılaştırılması

Şekil 4.24 incelendiğinde tank içi ve serbest havada bekletilen numunelerde çok yüksek fark görülmektedir. Tank içinde UK içeren kısımda en fazla iyileşme gösteren %29 ile YUK4'de aittir ki bu değer serbest havada bekletilen aynı numunenin 4,5 katıdır. Tank içinde YUK4 kodlu numune KB'ye göre %81 daha fazla iyileşme göstermektedir.

Kireç içeren kısımda ise en fazla iyileşme iyileşmeden öncesine göre %43 artışla YUKK3 kodlu numunede görülmektedir ki bu numune KB'ye göre %168 daha fazla iyileşmiştir.

4.8.2. Kendiliğinden iyileşmede su geçirgenlik deneyi

Deneyde numuneler kür işlemine tabii tutulduktan sonra ağırlığı değişmeye kadar (Tamamen kuruyana kadar) bekletilmiş, silindir kalıplara yerleştirilmiş ve kenarları silikonla geçirimesiz yapılmıştır. Daha sonra silindirlerin içine su eklenerek numunelerin

tüm çatlakları suya doygun hale gelebilmesi için 4 saat suda bekletilmiştir. Numuneler tekrar tartılmış ve su emme miktarları belirlenmiştir. Diğer kademede numuneler 45 ° C’de 2 saat bekletilmiş ve kırılma basıncının %90’ı kadar basınca tabi tutulmuş ve 20 ile 100 mikron arasında çatlatılmış. Çatlatıldıktan sonra numuneler tekrar silindirin içine yerleştirilmiş ve tekrar silikonla su kaçan yerleri kapatılmış ve su emme miktarları kayıt edilmiş. Numuneler daha sonra %10 karbondioksit tankında ve serbest havada bekletilmiş ve 56, 90 ve 180 günlerde aynı yöntem ile su emme miktarları denetlendikten sonra sonuçları Çizelge 4.26’da verilmiştir.

Çizelge 4.26. Tankta bekleten numunelerde su geçirgenlik deneyinin sonuçları

Numune adı	Çatlattıktan sonra Kuru ağırlık	Su emdikten sonra	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 56 günlük	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 90 günlük	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 180 günlük	Su emme miktarı
KB	823,4	841,1	17,6	838,7	15,35	836,9	13,55	836,0	12,64
KUK1	811,2	824,2	13	822,7	11,52	821,3	10,12	819,7	8,5
KUK2	820,9	843,1	22,22	840,5	19,67	838,2	17,3	835,2	14,32
KUK3	831,8	848,1	16,29	845,6	13,81	843,2	11,43	841,4	9,64
KUK4	815,1	834,2	19,04	831,5	16,42	829,0	13,87	825,4	10,32
K1	841,4	859,9	18,55	855,8	14,41	852,6	11,23	849,9	8,5
KUKK2	834,3	847,6	13,3	845,8	11,46	843,3	8,96	841,7	7,43
KUKK3	815,6	832,1	16,41	829,7	14,09	827,6	11,98	825,0	9,34
KUKK4	838,1	850,7	12,6	849,3	11,2	846,9	8,89	845,5	7,43
YUK1	831,7	848,3	16,53	847,5	15,8	845,4	13,66	842,5	11,11
YUK2	821,6	837,4	15,75	835,6	13,95	832,9	11,34	831,6	9,96
YUK3	834,1	846,9	12,78	845,7	11,6	843,3	9,20	841,4	7,32
YUK4	804,1	816,8	12,64	814,7	10,58	812,5	8,35	811,2	7,1
YUKK2	825,2	837,5	12,29	835,2	10,07	833,8	8,65	832,0	6,85
YUKK3	819,8	831,6	11,78	830,7	10,91	828,0	8,18	826,6	6,79
YUKK4	832,3	845,7	13,46	844,7	12,41	842,7	10,43	840,5	8,18

Çizelge 4.27. 180 gün tankta bekletilen numunelerde su geçirgenliğine bağlı iyileşme

Numune adı	iyileşme oranı (%)
KB	28
KUK1	34
KUK2	35
KUK3	41
KUK4	46
K1	54
KUKK2	44
KUKK3	43
KUKK4	41
YUK1	33
YUK2	37
YUK3	43
YUK4	44
YUKK2	44
YUKK3	42
YUKK4	40

Çizelge 4.27 incelenip analiz edildiğinde en yüksek iyileşme oranı su su geçirgenliğine bağlı olarak K1’de en düşük iyileşme oranı ise KB’de elde edilmiştir. Genel olarak ikame maddesi arttıkça su geçirgenliği azalmış yani iyileşme oranı artmıştır. Kireç oranı arttıkça su geçirgenliği azalmış buda bize kirecin iyileşmede önemli bir etki oluşturduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.27’ye baktığımızda tüm numunelerin kontrol betonundan daha iyi sonuçlar verdikleri görülmektedir. Tank ’ta bekletilen Kangal uçucu kül içeren numunelerde KUK4 KB’ye göre %64 azalışla en düşük su emen ve daha fazla iyileşen numune olarak görülmektedir. Çizelgenin kireç ve Kangal UK içeren numunelerinde ise K1 kodlu numune %92 KB’ye göre daha iyileşme sağlayarak en fazla karbonatlaşmadan dolayı %54 çatlakları kapatarak tüm numunelerin arasında en iyi sonucu vermiştir. Yatağan uçucu külü içeren numunelerde ise YUK4 ve YUKK2 sıra ile en iyi sonuçlara sahiplerdir.

Çizelge 4.28. Açık havada bekletilen numunelerde su geçirgenlik deneyinin sonuçları

Numune adı	Kuru ağırlık	Su emdikten sonra	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 56 günlük	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 90 günlük	Su emme miktarı	Su emdikten sonra 180 günlük	Su emme miktarı
KB	812,66	825,92	13,26	825,51	12,85	824,88	12,22	824,5	11,84
KUK1	854,4	866,94	12,54	866,3	11,9	865,43	11,03	865,15	10,75
KUK2	865,7	884,66	18,96	883,57	17,87	882,81	17,11	881,62	15,92
KUK3	878,13	891,41	13,28	890,94	12,81	890,26	12,13	889,11	10,98
KUK4	856,18	873,91	17,73	872,93	16,75	872,35	16,17	870,8	14,62
K1	814,65	831,41	16,76	830,71	16,06	830,08	15,43	828,4	13,75
KUKK2	828,45	845,29	16,84	844,21	15,76	843,07	14,62	842,33	13,88
KUKK3	863,34	877,7	14,36	877,13	13,79	876,46	13,12	875,78	12,44
KUKK4	832,28	846,82	14,54	846,3	14,02	845,67	13,39	844,91	12,63
YUK1	842,75	860,4	17,65	859,83	17,08	859,38	16,63	858,4	15,65
YUK2	836,46	850,8	14,34	850,41	13,95	849,7	13,24	849,12	12,66
YUK3	829,42	844,63	15,21	844,02	14,6	843,2	13,78	842,64	13,22
YUK4	843,37	860,79	17,42	859,85	16,48	859,19	15,82	858,38	15,01
YUKK2	844,28	858,94	14,66	858,38	14,1	857,83	13,55	857,13	12,85
YUKK3	867,75	883,49	15,74	882,96	15,21	882,22	14,47	881,64	13,89
YUKK4	853,43	869,66	16,23	869,14	15,71	868,29	14,86	867,82	14,39

Çizelge 4.28 ‘de serbest havada bekletilen numunelerin çatlatılmadan önce ve sonrası, 56, 90 ve 180 günlük deneylerin sonuçlarını göre biliriz. 180 gün sonunda iyileşme sonuçlar Çizelge 4.29 ‘da verilmiştir.

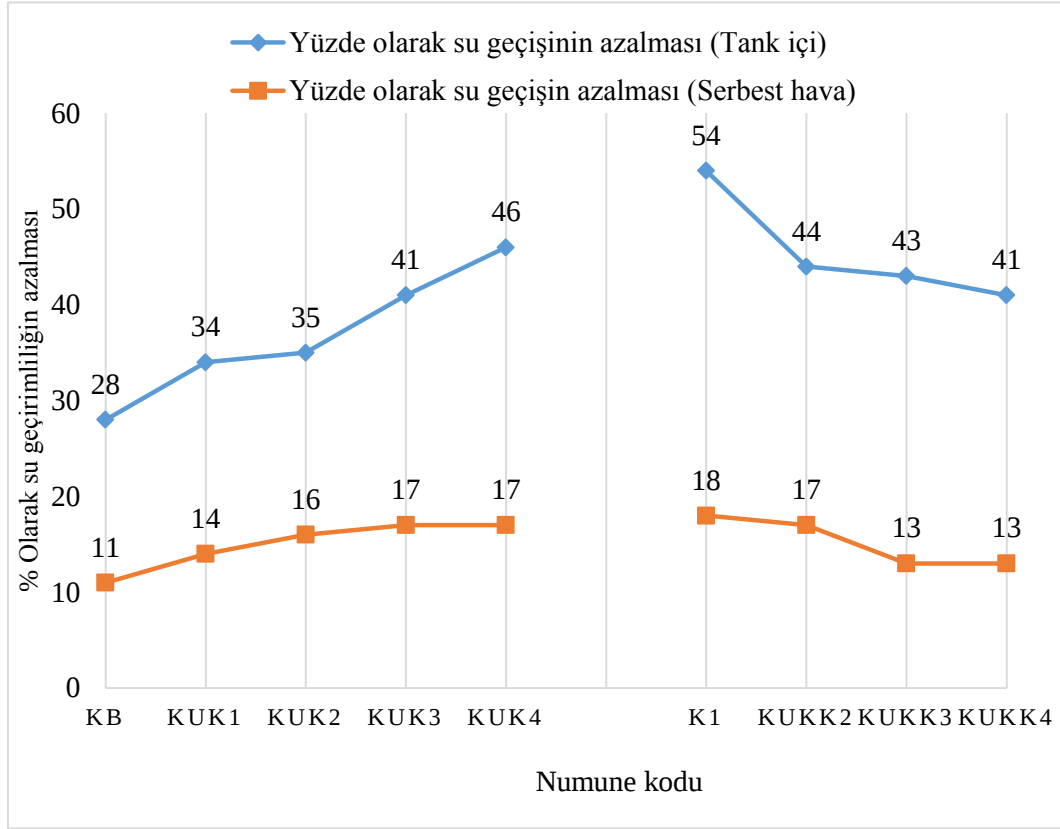
Çizelge 4.29. Serbest havada bekletilen numunelerde % su emme deneyin sonuçları

Numune adı	Yüzde olarak su emmenin azalma miktarı
KB	11
KUK1	14
KUK2	16
KUK3	17
KUK4	17
K1	18
KUKK2	17
KUKK3	13
KUKK4	13
YUK1	12
YUK2	12
YUK3	13
YUK4	14
YUKK2	12
YUKK3	12
YUKK4	11

Çizelge 4.29 incelenip analiz edildiğinde en yüksek iyileşme oranı su su geçirgenliğine bağlı olarak K1’de en düşük iyileşme oranı ise KB ve YUKK4’te elde edilmiştir. Genel olarak ikame maddesi arttıkça su geçirgenliği azalmış yani iyileşme oranı artmıştır. Kireç oranı arttıkça su geçirgenliği azalmış buda bize kireç iyileşmede önemli bir etki göstermiştir.

Çizelge 4.29’e baktığımızda tankta bekletilen numunelerin tersine tüm numunelerin kontrol betonundan daha iyi sonuçlar verdikleri görülmemektedir. Serbest havada bekletilen Kangal bölgesine ait uçucu kül ve yatağan külü içeren numunelerde birkaç numune aynı kontrol beton gibi sonuçlar vermiştir. Kangal uçucu küllü numunelerde KUK3, KUK4 ve KUKK2 %17 oran ile en iyi sonucu ve K1 numune ise fazla karbonatlaşmadan dolayı %18 çatlakları kapatarak tüm numunelerin arasında mükemmel sonuç vermiştir. Bu sonuç tankta bekletilen numunenin tam üçte biri kadardır.

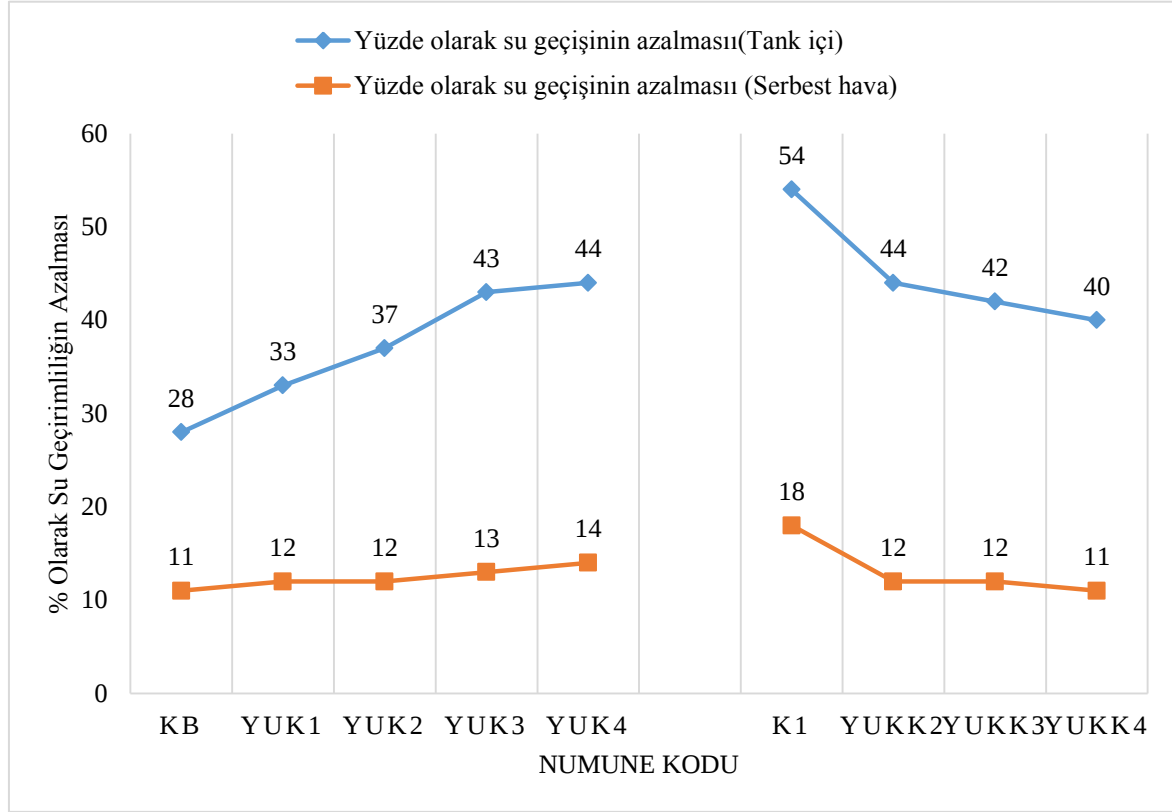
Yatağan uçucu külü içeren numunelerde ise YUK4 %20 uçucu kül ile %14 iyileşme göstererek K1 numunesinden sonra en iyi sonucu vermiştir.



Şekil 4.25. Tank'ta ve açıkta bekletilen KUK numunelerin su emme-iyileşme ilişkisi

Kangal uçucu küllü numunelerin tank içinde, kontrollü ortam olarak ve serbest havada bekletildikten sonra su geçirgenlikte iyileşme oranları ölçülmüştür ve bu karşılaştırmanın sonuçları Şekil 4.25'te verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde tank 'ta bekletilen kangal uçucu kül içeren numunelerin su emme ve geçirme miktarlarının azalması dış ortamda tutulan numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Malzemelerin davranışları iki ortamdada bir birine çok yakın iken sadece CO₂ miktarının artmasından dolayı kontrollü ortamda daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Kontrollü ortamda tutulan numunelerde en fazla iyileşmeyi %46 olarak KUK4 kodlu numune göstermiş ki bu numune KB'ye göre %64 artış göstermektedir.

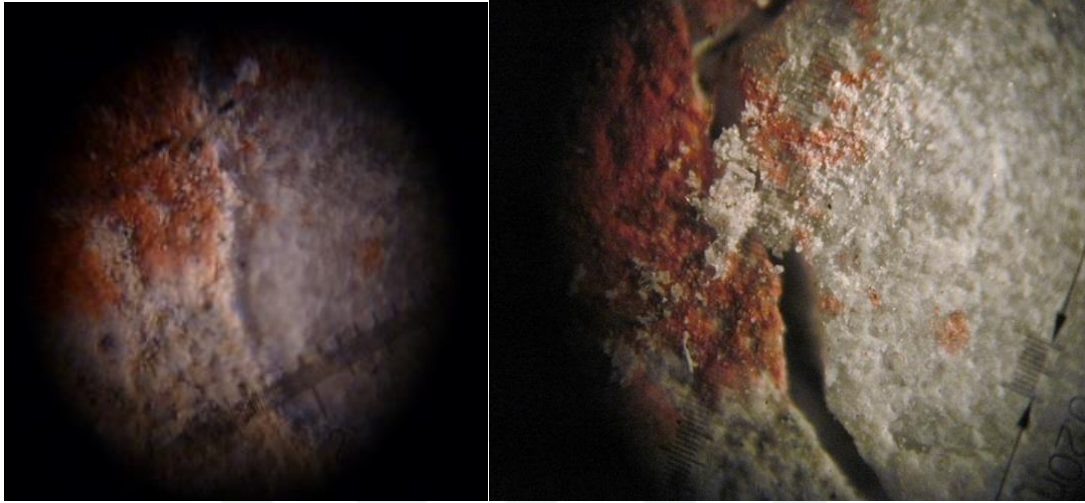
Kireç içeren numunelerde ise K1 %54 değeri ile en fazla iyileşmeyi göstermiş ki KB'ye göre %92 daha fazla iyileşme göstermiştir. En az iyileşmeler ise sıra ile KB ve KUK1 numunelerinde görülmektedir.



Şekil 4.26. Tank'ta ve açıkta bekletilen YUK numunelerde su emme iyileşme ilişkisi

Yatağan uçucu küllü numunelerin tank içinde, kontrollü ortam olarak ve serbest havada bekletildikten sonra su geçirgenlikte iyileşme oranları ölçülmüştür ve bu karşılaştırmanın sonuçları Şekil 4.26'da verilmiştir ki bu malzemenin davranışları Kangal uçucu küllü içeren numunelere çok yakındır. Malzemelerin davranışları iki ortamda bir birine çok yakın iken sadece CO₂ miktarının artmasından dolayı kontrollü ortamda daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.26 incelendiğinde tank içinde bekletilen sadece UK içeren numunelerde en fazla iyileşme gösteren numune YUK4 %44 iyileşme göstermiştir. YUK4 kodlu numune KB'ye göre % 57 daha fazla iyileşme göstermiştir. Bu grupta en az iyileşme değeri %33 ile YUK1 koda aittir ki KB'ye göre %17 daha fazla iyileşme göstermiştir.

Kireç içeren numunelerde en fazla iyileşme %54 ile K1 numunesine aittir. K1 kodlu numune KB'ye göre %92 daha fazla iyileşme göstermiştir. Bu grupta en az iyileşme değeri %40 ile YUKK4 koda aittir ki KB'ye göre %42 daha fazla iyileşme göstermiştir.



Resim 4.7. Beton numunelerde iyileşmenin 40X büyütmesi



Resim 4.8. Beton numunelerde iyileşmenin 40X büyütmesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada KB (kontrol beton) KUK (Kangal uçucu kül) ikameli Kireç (K) ikameli KUKK (Kangal uçucu kül +kireç) YUK (Yatağan uçucu kül) YUKK (Yatağan uçucu kül+Kireç) ikameli olmak üzere 6 tip beton üretimi tasarlanmıştır. Bu tasarım sonunda yapılan karışımların işlenebilirlik özelliklerini belirlemek ve karşılaştırmak için taze beton çökme testi yapılmıştır. Sertleşmiş beton özellikleri için , dayanım, ses geçiş hızı, kapiler su emme , eğilme dayanımı, karbonatlaşma, yüzey sertliği ve kendiliğinden iyileşme gibi özellikleri belirlemek için 56 ve 180 günlük deney sonuçları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5.1. 56 ve 180 günlük deney sonuçları

Karışım tipi	Numune adı	Çökme miktarı (cm)	Ortalama yoğunluk	Basınç dayanımı	Ses Hızı (V)/km/s	Su Emme Katsayısı	Eğilme dayanımı	Karbonatlaşma miktarı (mm)	Test çekici	Yüzde olarak iyileşme
			180 gün	180 gün	180 gün	180 gün	180 gün	56 gün	56 gün	56 gün
1	KB	3,5	2452	36,4	4,32	12037,03	7,1	3	17	16%
2	KUK1	3,7	2449	41,6	4,48	14930,55	7,4	3,6	26	21%
	KUK2	3,3	2416	38,9	4,51	16550,92	7,7	3,9	28	24%
	KUK3	3,1	2400	38,4	4,4	16666,66	7,9	4,1	34	25%
	KUK4	2,8	2389	36	4,25	16782,40	7,1	5,3	45	29%
3	K1	3,7	2452	34,6	4,23	14814,81	6,8	6,1	43	24%
4	KUKK2	3,5	2454	36,1	4,35	16898,14	7,2	5,8	32	29%
	KUKK3	3,2	2445	38,7	4,5	17013,88	7,4	5,6	26	33%
	KUKK4	3,1	2412	38,3	4,49	17245,37	7,6	5,5	25	25%
5	YUK1	3,4	2438	41,1	4,4	14467,59	7,2	3,7	26	18%
	YUK2	3,2	2426	37,9	4,5	15740,74	7,5	4	19	21%
	YUK3	3	2418	37,5	4,4	17476,85	7,6	4,3	25	25%
	YUK4	2,7	2370	33,4	4,2	17708,33	6,8	5,5	30	29%
6	YUKK2	3,4	2442	35,8	4,3	16435,18	7,1	6,2	39	35%
	YUKK3	3,1	2439	38,2	4,4	17708,33	7,3	5,8	32	42%
	YUKK4	3	2401	37,6	4,4	17939,81	7,4	5,7	31	30%

Sonuçlar;

➤ İşlenebilirlik (kıvam)

Genel olarak KB'ye göre en yüksek çökme değerini KUK1 vermiştir. Bütün karışım tasarımlarında en yüksek çökme 3,7 mm olarak bulunmaktadır. UK oranı arttıkça çökme azalmaktadır. Kireç ikameli karışımlarda K oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır.

Yuk ikameli karışımında en yüksek çökme YUK1 'de 3,4 mm bulunurken en düşük çökme YUK4'de 2,7 mm olarak bulunmaktadır. UK oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır.

YUKK karışım tasarımına kireç oranı azaldıkça çökme düşüş göstermektedir

➤ Yoğunluk

KUK ve YUK oranı arttıkça yoğunluk azalmaktadır. KB en yüksek 2452 kg/m³ vermektedir. YUK ve KUK karışımlar kendi arasında değerlendirildiğinde kireç ikame oranı azaldıkça yani Uk oranı arttıkça yoğunluk azalmaktadır.

➤ Basınç dayanımı

KB'nun basınç dayanımı 36,4 Mpa iken KUK1 ve YUK1 karışımlarının basınç dayanımları 41 MPa dan büyüktür. KUK1 ve YUK1 karışımlarda UK beton basınç dayanımını olumlu yönde etkilemektedir. KUK ve YUKK'lu karışımlarda kireç beton basınç dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Yani UK ikame oranı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır.

➤ Ultrases geçiş hızı

Bütün karışımlarda %10 UK ikameli karışımlarda en yüksek ses geçiş hızı 4,50 km/s civarında olduğu görülmüştür. En düşük hız ise %20 kireç ikameli karışımlarda 4,23 km/s olarak tesbit edilmiştir.

➤ Kapiler su emme kat sayısı

En düşük 12037,03704 [g/(m²×s)] ile KB ve en yüksek değer ise 17939,81481 [g/(m²×s)] ile de YUKK4 betonundan elde edilmiştir. karışımlardaki kireç oranı arttıkça kapiler su emme katsayısı yükselmektedir. K1 karışımında su emme katsayısı 14814,81 ile en düşük iken YUK4 17939,81 ile en yüksek katsayıyı göstermektedir.

➤ Eğilme dayanımı

Bütün KUK, KUKK, YUK ve YUKK karışımları kendi arasında değerlendirildiğinde UK ikame oranı arttıkça eğilme dayanımı artmaktadır. KB 7,1 MPa eğilme dayanımına sahipken KUK1 karışım 7,5 MPa ve KUK3 karışım örneği 7,9 MPa eğilme mukavemeti göstermiştir. Kireçli karışım da yani K1 karışımında eğilme mukavemeti 6,8 MPa iken KUKK4 karışım 7,6 MPa lık bir dayanım söz konusudur.

➤ Karbonatlaşma derinliği

Karbonatlaşma ile ilgili deneyler test çekici ve kendiliğinde iyileşme deneyleridir. Be deneylerden elde edilen sonuçlar 56 gün sonucundaki aritmetik ortalamalardır. Bütün karışımlarda ikame katkıları arttıkça karbonatlaşma artmaktadır. Burada UK cinsi ve kireç bir birinden farklılık göstermiştir. En düşük karbonatlaşma derinliği 3mm ile KB’de görülmüştür. En yüksek karbonatlaşma derinliği ise K1 ve YUKK2 karışımında 6 mm den az olduğu görülmektedir.

➤ Yüzey sertliği

Beton yüzeyinin sertlik belirlenmesinde 56 günlük numunelerin açık havadaki ile tank içinde (karbondioksit etkisinde) bekleyen ayrı karışımlardan elde edilen örnekler üzerinde yapılarak karbonatlaşmanın yüzey yüzey sertliğine etkisi incelenmiştir. Sonuçların aritmetik ortalaması yukarıdaki çizelgede verilmiştir. Sonuç çizelgesi analiz edildiğinde ikame katkı oranı arttıkça yüzey sertliği artmaktadır. En büyük artış oranı KUK4’de %45 olarak elde edilmiş fakat bu numune kendi karışım grubu içinde en düşük dayanımlara sahiptir. Karbonatlaşma derinliğinin ise 5,3 mm dir. Kireç ikameli karışımlarda ise kireç oranı azaldıkça yani UK oranı arttıkça yüzey sertliği azalmaktadır. K1 ikameli karışımında yüzey sertliği farkı %43 iken KUKK4 karışımında yüzey sertliği %25 olduğu görülmüştür.

Aynı ilişki YUK ve YUKK ikameli karışımlardaki yüzey sertliği farkında benzer ilişki görüle bilmektedir.

➤ Betonda kendiliğinden iyileşme

Beton kendiliğinden iyileşme belirlemede 56 günlük numunelerin açık havadaki ile tank içinde (karbondioksit etkisinde) bekleyen ayrı karışımlardan elde edilen örnekler üzerinde yapılarak karbonatlaşmanın kendiliğinden iyileşme etkisi incelenmiştir. Sonuçların aritmetik ortalaması Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sonuç çizelgesi analiz edildiğinde ikame katkı oranı arttıkça yüzey sertliği artmaktadır. En büyük artış oranı KUK4’de %29 olarak elde edilmiş fakat bu numune kendi karışım gurubu içinde en düşük dayanımlara sahiptir. Karbonatlaşma derinliğinde ise 5,6 mm dir. Kireç ikameli karışımlarda ise kireç oranı azaldıkça yani UK oranı arttıkça yüzey iyileşmesi azalmaktadır. K1 ikameli karışımda yüzey iyileşme %24 iken KUKK3 karışımda yüzey sertliği %33 olduğu görülmüştür. Aynı ilişki YUK ve YUKK ikameli karışımlardaki kendiliğinden iyileşmede benzer ilişki görüle bilmektedir.

Sonuç olarak betonun kullanılacağı yere göre betonun özeelikleride değişiklik göstere bilmektedir. basınç dayanımı ön planda ise en uygun numune KUK1 ve YUK1 karışımı betonlarda yani %5 UK ikameli betonlar tercih edilmeli. Karbonatlaşmadan dolayı iyileşme daha önemliyse YUKK3 beton daha uygun olarak tercih edilmelidir.

Öneriler:

- Karbonatlaşmadan dolayı Kendiliğinden iyileşmek için betonun erken dayanımının düşük olması gerekir çünkü yüksek erken dayanım CaO miktarının çoğunu reaksiyona sokmaktadır, bu neden ile CEM II 32.5 daha yararlı olabilir.
- Betonun yaklaşık %75 ‘ini agregalar oluşturduğu için karbonatlaşma ve ondan dolayı iyileşmeden iyi sonuç almak için kalkerli agregalar daha uygun görülmektedir.
- İyileşmenin yüksek olması için katkı malzemeler CaO miktarının yükselmesi önerilir.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U. (1985). Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı.,O.D.T.İnşaat Mühendisliği Bölümü .,4.Baskı Evrim Yayın Ei. 7.
2. Erdoğan, Y.H. Mayıs (2003). Beton'1.Baskı Orta Doğu Teknik Üniversitesi.İnş Fak.,Metu Press .
3. ASTM C 618, (1998). Standart Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book.
4. ASTM C 125 , (1994). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates ,Annual Book of ASTM Standards.
5. Halilov, S. (2003). Silis Dumanı ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Lifli Betonların Özellikleri. Doktora Tezi (Yayınlanmamış). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , Temmuz, Ankara,189-191.
6. Şimşek, O. (2016). Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yay. San. ve Tic. A.Ş, Ankara, 23,46-109.
7. Luther,M.D.And Bauer, KC . (1987). Using High Strength Concrete Simplifies Column Design,Concrete Construction ,32(6), 546-547.
8. Yılmaz, Ş. (1992) Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi , Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü
9. Erdinç, M., (1995). Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirimsizliği.İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,İstanbul, 143.
10. Tokyay, M., Erdoğan, K. (1998). Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara
11. Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K., (1998). Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India, Construction and Building Materials, 12(6-7), 341-346.
12. Aruntaş, H.Y. (2006).Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 06500 Ankara 21(1), 193-203.
13. Eie ,K. (1982). Türkiye uçucu küllerinin özellikleri, EİE Yayını. Ankara, 82, 21-28.
14. Görhan, G., Kahraman, E., Baspınar, S., Demir, İ. (2009). Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 5 (2), 33-42.
15. TS EN 197-1, (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

16. Türker, P., Erdoğan, B. (2004). Türkiye'de ki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, AR-GE TCMA, Ankara,
17. Erdoğan, T.Y. (1977). Admixtures for Concrete ,Middle East Technical University Press,Ankara, 22-56.
18. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T.(2005). Effect of Fly Ash Fineness on Compressive strength and Pore Size of Blended Cement Paste. Cement and Concrete Composites, 27,425-428.
19. Newman, J., Choo, B. S. (2003). Advanced Concrete Technology.Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, 234-239
20. Mehta, K. P., Monteiro, P. J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, 232-239.
21. Soroko, I. (2004). Concrete in Hot Environments, E&FN Spon, 250-258.
22. Kosmatka, S. H., Voigt, G. F., Taylor, P. (2006). Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual, Center for Transportation Research and Education Iowa State University, 69-104.
23. Baradan, B. (1996). Yapı Malzemesi II, D.E.Ü. Yayınları, , İzmir, 207, 217
24. Oates, J.A.H. (1998).Lime and limestone. Chemistry and technology. Production and uses,656 Wiley-VCH verlag GmbH, Weiheim,
25. Deng, M., Hong, D., Lan X., Tang, M. (1995). Mechanism of expansion in hardened cement pastes with hard-burnt free lime, Cem. Conc. Res. 25 (2), 440-448
26. Shah, S.P., Balaguru, P.N.(1992). Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill Inc., Singapore
27. Şimşek, O. Sancak, E., Erdal, M. (2004). “Silis dumanının çelik lif ile birlikte kullanımının betonun özelliklerine etkisi” Gazi Üniversitesi Mimarlık – Mühendislik Fakültesi Dergisi (yayımda), Ankara.
28. Yalçın H. and Koç, T. (2004). Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi"1.Baskı Gazi Üniversitesi,Ankara,Türkey ,254 -26.
29. Hearn, N., Hooton, R. D., Mills, R. H. (1994). Pore Structure and Permeability”, Concrete and Concrete-Making Materials, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., ASTM STP 169C, 240-262.
30. Gönen,T.,Yazıcıoğlu, S. (2005). Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü,Elazıği., Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic, 8 (2), 233-237.
31. Şimşek,O., Baharavar, S. (2013). Çelik lifli ve uçucu kullu betonlarda karbonatlaşmanın etkisi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi DOI: 10.15317/Scitech.201415957 Konya, Türkiye, 21-34.

32. James Gilford III B.S., Prairie View A&M University, August 2012 Microencapsulation Of Self-Healing Concrete Propertie.
33. Neville, A.M. (2002). Autogenous healing – A concrete miracle?Concrete Int 24(11),76–82.
34. Li, V.C.,Yang, E. (2007). Self healing in concrete materials.n S. van der Zwaag (ed.) Self healing materials – Analternative approach to 20 centuries of materials science.Springer, The Netherlands, 161–194.
35. Rooij, M, de., Schlangen, E., Joseph, C. (2013). Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, USA.
36. Nawy, E. G. (2001). Fundamentals of High-Performance Concrete. JohnWiley and Sons, Canada, 441.
37. Anne, A., Nicolas, R., Tina, S., Amirreza, K., Michael, S., Marijana, M. (2012). Growth and Morphology of Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), THE Industrial-Academic Research Network On Cement And Concrete, Usa, 1-17.
38. ASTM C94/C94M -12, “Specification for Ready Mixed Concrete”, , ASTM International, West Conshohocken, PA 2 - Powers, T. C., A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete, Research Department Bulletin RX025, Portland Cement Association, 1948.
39. Hover, K. (2002)Curing and Hydration - Two half truths don't make a whole” PhD., FACI published by L & M Concrete News, 3(2), 800-3623331.
40. Powers, T. C. (1949). The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste – Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination, Research Department Bulletin RX029, Portland Cement Association.
41. Vagelis, G.P. (1999). Effect fly ash on Portland cement systems Part1. Low – Calsium fly ash,. Danish Teknological İnstitute, bilding technology, Concrete Center, 1728-1736.
42. Namagga, C., Atadero, R. (2009), Optimization of fly ash in concrete., in Lexington, USA, world of coal ash conference, 11-16.
43. Kaewmanee, K., Krammart, P., Sumvanwanich, T., choktaweekan, P.(2013). Effect of free lime content on properties of cement – fly ash mixtures, counstruction and bilding materials Tailand, 829-836.
44. He, R. (2010). A study on carbonation for low calcium fly ash concrete under different temperature and relative humidity, Collage of civil and materials engineering Hanan university city of urban construction, chine, 1872-1877.
45. Mira, P., Papadakis, V., Tsimas, S. (2001). Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete, Laboratory of Inorganic and Analytical

Chemistry, Department of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Greece, 683-689.

46. Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Department of Materials and Environment – Microlab, Delft, Netherlands, 1-12.
47. Şahmaran, O., Keskin.B.S., Özerkan, G., Yaman.Ö.İ. (2008). Self- healing of mechanically- loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly ash, Cement and concrete composites, 827-829.
48. TS EN 12350-2 “ Taze beton kıvam deneyi(çökme hunisi metoduile) “ 2002.
49. TS EN 12390-7, Nisan 2002. BETON - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7:Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini. Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened Concrete, Ankara
50. TS EN 12390-4 “Beton –sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 4: basınç dayanımı“ Nisan 2002. Ankara
51. TS EN 12390-5 “Beton –sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: deney numunelerin eğilme dayanımının “ tayini 2010, Ankara.
52. ASTM C597-09, 1994. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete
53. TS EN 722-11 “ kagir birimler –deney yöntemleri11:Betondan yapay ve doğal taştan yapılmış kagir birimlerde kapiler su emme ve kil kagir birimlerde ilk su emme hızının tayini“ 2012, Ankara.
54. TS 2027 “Kayaçların çekme dayanımlarının tayini“ 2010, Ankara.
55. BS EN 13295:2004 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance to carbonation

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı,adı :BAHARAVAR, Seyedrahim
Uyruğu :İRAN
Doğumtarihiveyeri :13.09.1980, Tabriz
Medenihali :Bekar
Telefon :0(537)9135332
e-mail :seyedrahim.baharavar@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	GaziÜniversitesi/Yapı Eğitimi	2012
Lisans	Azad Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2007
Lise	Tabriz	2001

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme,



GAZİ GELECEKTİR...