

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN TAŞIYICI HAFİF
BETONUN MEKANİKSEL VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tahir GÖNEN

Tez Yöneticisi
Doç.Dr. Salih YAZICIOĞLU

DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ 2009

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HAFİF BETONUN
MEKANİKSEL VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tahir GÖNEN

Doktora Tezi

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, 05.03./2009 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile başarılı / ~~başarısız~~ olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Üye: Prof. Ali Sayıl ERDOĞAN

Üye: Doç. Dr. Ragıp İNCE

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet TUĞAL

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TEMİZ

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun// tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŐEKKÖR

Doktora tezimle ilgili çalışmalarda tez konusunun tespiti, deney programının belirlenmesi, deneyler süresince her türlü desteğinden dolayı danışman hocam Sayın Doç.Dr. Salih YAZICIOğLU'na, yine doktora çalışmam süresince yönlendirmelerinden dolayı Prof. Ali Sayıl ERDOğAN'a (Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği), tez programında ilerlemeye destek sağlayıcı ek çalışmalardaki yardımlarından dolayı Doç.Dr. Ragıp İNCE'ye (Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği), bölümün tüm imkanlarını kullanıma açan bölüm başkanı Yrd.Doç.Dr. Mehmet TUğAL'a, literatür araştırmasında yardımda bulunan ve zaman zaman fikirlerine danıştığım Yrd.Doç.Dr. Erdinç ARICI ve Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ'a, deneysel çalışmalar süresince gösterdikleri ilgi ve yardımlarından dolayı Bölüm Teknisyenleri Mehmet Ali POLAT, Ramazan GÖL, Necati MAHMUT ve Ümit ÖZEL, her türlü resmi yazışmalarda ilgi ve iyi niyetlerinden dolayı Bölüm Sekreterleri Musa ATABAY ve Örfi YARDIMCI'ya, deneysel çalışmalarımda zaman zaman yardımlarını aldığım Nusret BOZKURT ve Serhat AY'a, malzeme temininde gösterdiği yakın ilgiden ve özellikle süper akışkanlaştırıcı seçimindeki teknik desteğinden dolayı Ali Raif SAğLAM'a (SİKA Yapı Kimyasalları), maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anne, baba ve ağabeyime, çalışmalarım süresince sonsuz sabırlarından dolayı eşime ve oğluma teőekkürlerimi arz ederim.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
ÇİZELGELER TABLOLAR LİSTESİ	VII
SİMGELER	IX
KISLATMALAR	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. HAFİF BETON VE HAFİF BETON YAPIMINDA KULLANILAN AGREGALAR..	3
2.1. Hafif Betonun Tanımı	4
2.2. Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar	5
2.2.1. Diyatomit	5
2.2.2. Genleştirilmiş kil	6
2.2.3. Perlit	8
2.2.4. Genleştirilmiş polistren sert köpük	9
2.2.5. Vermikülit	10
2.2.6. Pomza	11
2.3. Hafif Betonun Performansı	14
3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	15
3.1. Tanım	15
3.2. Tarihsel Gelişim	15
3.3. KYB Bileşenleri	16
3.3.1. Çimento	17
3.3.2. Toz malzeme	17
3.3.3. Agregası	19
3.3.4. Kimyasal katkı	20
3.3.5. Lifler	22
3.3.6. Karışım suyu	22
3.4. Tasarım Prensipleri	22
3.5. KYB Özellikleri	26
3.5.1. Slump yayılma deneyi	27

3.5.2. V hunisi deneyi	28
3.5.3. Elek ayrışma testi	29
3.5.4. L kutusu Deneyi	30
3.5.5. U kutusu deneyi	31
3.5.6. J halkası deneyi	32
3.5.7. Orimet deneyi	32
3.6. Dayanım Özellikleri	33
3.7. Dayanıklılık Özellikleri	33
3.7.1. Boşluk yapısı ve geçirimliliği	34
3.7.2. Aşınma direnci	35
3.7.3. Donma-çözülme direnci	36
3.7.4. Karbonatlaşma	36
3.7.5. Klorür geçirimliliği	37
3.7.6. Korozyon	38
3.7.7. Sülfat dayanıklılığı	39
3.7.8. Asitli ortamlara dayanıklılığı	40
3.7.9. Yüksek sıcaklık	41
3.8. Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	43
4.1. Kapsam	43
4.2. Malzemeler	44
4.2.1. Çimento ve toz malzemeler	44
4.2.2. Agrega	44
4.2.3. Kimyasal katkı	45
4.2.4. Karma suyu	45
4.3. Deneyler ve Karışım Oranları	46
4.3.1. Farklı agregata tane dağılımları ile üretilen KYHB karışımları	47
4.3.2. Farklı tozlar ile üretilen KYHB karışımları	48
4.3.3. Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYHB karışımları	48
4.3.4. Kür şartının etkisi	49
4.4. Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri	50
4.4.1. Taze beton deneyleri	50
4.4.2. Basınç ve eğilmede çekme dayanımı	51
4.4.3. Görünür porozite	51
4.4.4. Kılcal su emme	52

4.4.5. Karbonatlaşma	53
4.4.6. Donma-çözülme	55
4.4.7. Yüksek sıcaklık	56
4.4.8. Sülfürik asit dayanıklılığı	57
4.4.9. Ultra ses hızı ve dinamik elastisite modülü	57
4.4.10. Basınçlı su geçirimsizliği	58
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	60
5.1. Taze Beton Özellikleri	60
5.2. Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri	62
5.3. Dayanım Özellikleri	68
5.4. Dayanıklılık Özellikleri	77
5.4.1. Donma-çözülme	78
5.4.2. Yüksek sıcaklık	84
5.4.3. Karbonatlaşma	91
5.4.4. Sülfürik asit	95
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Genleştirilmiş kil agregası	7
Şekil 2.2. Genleştirilmiş kil agregası ile üretilmiş yapı örnekleri (sağda Marina City Towers, Chicago-USA, solda Stolma Bridge, Bergen)	8
Şekil 2.3 Perlit madeninin Türkiye’de dağılımı	9
Şekil 3.1. Geleneksel beton ve KYB’nin karşılaştırmalı karışım oranları	24
Şekil 3.2. V hunisi aparatı ölçüleri	29
Şekil 3.3. Elek ayırma deneyinin prosedürü	30
Şekil 3.4. L kutusu deney aparatı	31
Şekil 3.5 J ring deneyi	31
Şekil 3.6 U kutusu deney aparatı	32
Şekil 3.7. Orimet deney aparatı	33
Şekil 4.1. Ref-G, G1 ve G2 serilerinin agrega tane dağılımı eğrileri	45
Şekil 4.2. KYHB’lerin kalıplara dökülmesi	46
Şekil 4.3. Hava kürü edilen numuneler	49
Şekil 4.4. Taze beton deneylerinde kullanılan V hunisi ve L kutusu	51
Şekil 4.5. Görünür porozite ölçümü deney düzeneği	52
Şekil 4.6. Kılcal su emme deney düzeneği	53
Şekil 4.7. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzeneği ve karbonatlaşma ölçümü	54
Şekil 4.8. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı kesitleri	54
Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık testlerinde kullanılan fırın	57
Şekil 4.10. Basınçlı su geçirimsizliği deneyi	59
Şekil 5.1. Farklı agrega tane dağılımlı KYHB’lerin basınçlı su geçirimsizlik katsayıları...	63
Şekil 5.2. Farklı toz malzemeli KYHB’lerin basınçlı su geçirimsizlik katsayıları	64
Şekil 5.3. Farklı agregalı KYHB, HB ve KYB’lerin basınçlı su geçirimsizlik katsayıları	66
Şekil 5.4. Hava kürlü serilerin basınçlı su geçirimsizlik katsayıları	67
Şekil 5.5. KYHB’lerde porozite kılcal su emme ilişkisi	68
Şekil 5.6. Farklı agrega tane dağılımları ile hazırlanan KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	72
Şekil 5.7. UK ve SD’li KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	72
Şekil 5.8. UK+SD’li KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	72
Şekil 5.9. Çatalağzı ve kangal UK’li KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	73

Şekil 5.10. UK+PT’li KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	73
Şekil 5.11. UK+TP’li KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	73
Şekil 5.12. HB, KYB ve farklı agregalı KYHB’lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	74
Şekil 5.13. Su ve hava kürlü numunelerin karşılaştırmalı basınç dayanımları	74
Şekil 5.14. KYHB’lerin prozite basınç dayanımı ilişkisi	75
Şekil 5.15. Çalışmada hazırlanan tüm serilerin 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları	76
Şekil 5.16. Farklı agrega tane dağılımlı karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	79
Şekil 5.17. UK ve SD’li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	80
Şekil 5.18. UK + SD’li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	81
Şekil 5.19. UK + PT’li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	81
Şekil 5.20. Farklı tip UK’li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	81
Şekil 5.21. UK + TP’li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	82
Şekil 5.22. Farklı agregalı karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları	83
Şekil 5.23. Donma-çözülme deneylerinde ölçülen ultra ses hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	84
Şekil 5.24. Donma-çözülme deneylerinde ölçülen ED ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	84
Şekil 5.25. Farklı agrega tane dağılımlı karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları	86
Şekil 5.26. Farklı tip agregalar ile üretilen karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları	87
Şekil 5.27. Hava kürlü karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan basınç dayanımları	88
Şekil 5.28. Farklı toz tipli KYHB karışımlarının 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları	89
Şekil 5.29. Yüksek sıcaklık deney numunelerinde ED ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	90

Şekil 5.30. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm numunelerde basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi	90
Şekil 5.31. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm numunelerde kalan basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi	91
Şekil 5.32. Karbonatlaşma derinliği ölçümünden bir örnek	92
Şekil 5.33. Hava kürlü (solda) ve su kürlü (sağda) numunenin karbonatlaşma derinliği ...	94
Şekil 5.34. Sülfürik asit çözeltisinde 45 gün bekletilmiş numune (solda) ve kontrol numunesi (sağda)	97

ÇİZELGELER LİSTESİ

Tablo 2.1. Hafif betonların sınıflandırılması	4
Tablo 2.2. Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif betonların özgül ağırlık ve basınç dayanımları	4
Tablo 2.3. Hafif betonun birim hacim ağırlığına göre sınıflandırılması	4
Tablo 2.4. Hafif betonun basınç dayanımına göre sınıflandırılması (TS EN 206-1)	5
Tablo 2.5. Agregâ türüne göre elde edilen hafif betonların özellikleri	5
Tablo 2.6. Asidik ve bazik pomzanın genel kimyasal bileşimleri	12
Tablo 2.7. Türkiye’de pomza rezervlerinin dağılımı	13
Tablo 3.1. KYB karışım oranları için sınır değerler	24
Tablo 3.2. KYB testleri ve ölçülen özellikler	27
Tablo 4.1 Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri	44
Tablo 4.2. Agregaların fiziksel özellikleri	45
Tablo 4.3. Çalışmada hazırlanan serilerin şeması	47
Tablo 4.4. Agregâ tane dağılımına yönelik karışımların karışım özellikleri	48
Tablo 4.5. Toz tipine yönelik hazırlanan karışımlarda toz miktarları	48
Tablo 4.6. Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYHB’lerin karışım oranları	49
Tablo 4.7. Kendiliğinden yerleşebilme kriterleri	50
Tablo 4.8. Çalışmada kullanılan kendiliğinden yerleşebilmeyi ölçen deneyler	50
Tablo 4.9. Geçirimlilik katsayılarının değerlendirilmesi	49
Tablo 5.1. Farklı agregâ tane dağılımına ait karışımların taze beton özellikleri	60
Tablo 5.2. Toz tipine yönelik yapılan karışımların taze haldeki özellikleri	61
Tablo 5.3. Genleştirilmiş perlit agregasının ilave edildiği karışımlarının taze beton özellikleri	62
Tablo 5.4. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları	63
Tablo 5.5. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları	65
Tablo 5.6. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları	65
Tablo 5.7. Su kürüne göre hava kürlü numunelerde su emme ve geçirimsizlik özelliklerindeki artış (%).....	67
Tablo 5.8. Kontrol karışımları ve KYHB’lerin basınç dayanımları	69

Tablo 5.9 Eğilmede çekme dayanımlarının gelişimi, dayanım kaybı ve basınç dayanımına oranı	77
Tablo 5.10. Su kürlü numunelerde donma-çözülme deneylerinin sonuçları	78
Tablo 5.11. Hava kürlü numunelerde donma-çözülme deneylerinin sonuçları	79
Tablo 5.12. Su kürlü numunelerin yüksek sıcaklık deneylerinin sonuçları	85
Tablo 5.13. Hava kürlü numunelerin yüksek sıcaklık deneylerinin sonuçları	86
Tablo 5.14. Su kürlü numunelerin hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonuçları	92
Tablo 5.15. Hava kürlü numunelerin hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonuçları	93
Tablo 5.16. Suda kür edilen numunelerin sülfürik asit deney sonuçları	95
Tablo 5.17. Havada kür edilen numunelerin sülfürik asit deney sonuçları	96

SİMGELER LİSTESİ

- ED: Dinamik elastisite modülü
 d_1 : Slump yayılmada nihai yayılma çapı
 d_0 : Slump konisini taban çapı
 W_s : ince agrega miktarı
 W_g : iri agrega miktarı
 W_{gL} : iri agreganın havada doymun kuru yüzey haldeki gevşek birim hacim ağırlığı
 W_{sL} : ince agreganın havada doymun kuru yüzey haldeki gevşek birim hacim ağırlığı
C: çimento
 f_c' : hedef dayanım
HCl: Hidroklorik Asit
K: Basıncılı su geçirimsizlik katsayısı
Q: Suyun debisi
A: Alan
 α : Suyun yoğunluğu
L: Numune uzunluğu
V: Ultra ses hızı
 μ : Poisson oranı

KISALTMALAR LİSTESİ

EFNARC: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EPS: Expanded/Expandable Polystrene
HB: Hafif Beton
KYB: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYHB: Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton
PÇ: Portland Çimentosu
PT: Pomza Tozu
RILEM: The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
SD: Silis Dumanı
THB: Taşıyıcı Hafif Beton
TP: Toz Perlit
UK: Uçucu Kül
VAK: Viskozite Arttırıcı Kimyasal

ÖZET

Doktora Tezi

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN TAŞIYICI HAFİF BETONUN MEKANİKSEL VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tahir GÖNEN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 127

Hafif beton son elli yıldır yapısal amaçlı kullanılan ve oldukça yaygınlaşmış bir beton türüdür. Sağladığı en büyük avantaj yapının zati ağırlığını azaltmaktır. Karşılaşılan en önemli sorun ise kullanılan agregaların gözenekli yapısından dolayı işlenebilirliğinin zor ve dayanımının düşük olmasıdır. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile istenilen kesite homojen bir şekilde yayılabilen, yüksek dayanım-dayanıklılık özelliklerine ve genellikle $2300\text{--}2500\text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip bir beton türüdür. Bu iki beton türünün birleştirilmesi ile ortaya çıkan kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB), beton teknolojisinde kullanıcıya özellikle deprem bölgelerinde iyi bir alternatif sunabilecek niteliktedir. Her iki beton türünün birbirinin dezavantajını kapatabilecek özelliklerinin bulunması ve Türkiye'nin yüksek hafif agrega rezervine sahip olmasından dolayı bu çalışmada kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmeye çalışılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmek için, bazaltik pomza ve perlit agregası seçilmiştir. Agregatane dağılımının, toz malzemelerin ve agrega tipinin etkisinin incelendiği çalışmada ayrıca iki farklı kür uygulanmıştır. Viskozite sağlayıcı malzeme olarak silis dumanı, uçucu kül, pomza tozu ve toz perlit değişik oranlarda kullanılmıştır. Bu tozların optimum kullanım miktarları, hem mekanik hem de dayanıklılık özellikleri için tespit edilmeye çalışılmıştır. Mekanik özelliklerden basınç dayanımı ve eğilme dayanımı incelenmiş, dayanıklılık da ise donma-çözülme, yüksek sıcaklık, karbonatlaşma ve sülfürik asit parametrelerine bakılmıştır. Bunların yanında dayanıklılık açısından fikir verebilecek kılcal su emme, porozite ve basınçlı su geçirimsizliği özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak bazaltik pomza agregası ile yüksek mukavemetli KYHB elde edilebilmiştir. Hazırlanan betonların birim ağırlıkları $1700\text{--}1800\text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımları $50\text{--}60\text{ MPa}$ arasındadır. Deney sonuçları, iki farklı toz malzemenin birlikte kullanımının kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif beton yapımında daha yararlı olduğunu göstermiştir. Suda kür edilme durumunda KYB'lerin performansları KYHB'lere göre yüksektir. Havada kür durumunda ise KYHB'lerin mukavemet ve dayanıklılıkları, dere agregalı KYB'ler kadar etkilenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, hafif beton, durabilite, pomza, kür şartı, geliştirilmiş perlit

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF DURABILITY AND MECHANICAL OF SELF COMPACTING STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE

Tahir GÖNEN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Constructions Education

2009, Page: 127

Lightweight concrete (LWC) is a kind of special concrete that is used for last five decades in structures. The biggest advantage of LWC is to decrease death weight of structure. But the biggest problem is difficulty of workability since lightweight aggregates are porous materials with high water absorption rate. Self compacting concrete (SCC) is also a special concrete that can fill all section by means of its own self-weight and have highly strength and durability properties and with density 2300-2400 kg/m³. If lightweight aggregates are used to produce self compacting concrete, it is named as self compacting lightweight concrete (SCLWC) and SCLWC may be a good alternative concrete type especially in earthquake area. There are good advantages of both concrete type, LWC and SCC, to be able to cover their disadvantages. Moreover Turkey has large reserve of lightweight aggregate like perlite and pumice.

In this study, basaltic pumice and perlite aggregate was used to produce SCLWC. The effects of gradation, powder type and aggregate type on durability and mechanical properties were investigated. In addition two different curing regimes were applied on specimens. Silica fume, fly ash, perlite and pumice dusts were used as viscosity agent with different rates. Optimum rates of those powder were determined for both mechanical and durability properties of SCLWC. Compressive and flexural tensile strengths were investigated as the mechanical properties. Freeze-thaw cycled, high temperature, accelerated carbonation and sulfuric acid experiments were carried out to determine durability properties. In addition, water absorption, capillary water absorption, apparent porosity and permeability were investigated. As a result of experiment, SCLWC could have been produced with basaltic pumice and perlite aggregates. The dry unit weights and compressive strengths of the SCLWC prepared are 1700–1900 kg/m³ and 50–60 MPa respectively. The results of experimental studies showed that double mineral admixtures were much more satisfactory than other approaches for SCLWC. In water curing, SCC was showed better performance than SCLWC. However, the mechanical and durability properties of SLWC were not affected as much as SCC with river aggregate from air curing.

Keywords: Self compacting concrete, lightweight concrete, durability, basaltic pumice, curing conditions, expanded perlite.

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe en fazla kullanım alanına sahip olan kompozit malzemelerden biri betondur. Bu kompozit malzemenin özelliklerini iyileştirme yönünde birçok araştırma mevcuttur. Son yıllarda beton teknolojisinde önemli gelişmelerden biri de kendiliğinden yerleşen betondur (KYB). İlk kez 1990 yılında Japonya’da geliştirilen KYB, herhangi bir sıkıştırmaya gerek kalmadan kendi ağırlığınca kalıbına yerleşebilen ve sıkışabilen bir beton türüdür. Gelişmiş ülkelerde kullanılmaya başlanmış fakat henüz gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde yaygınlaşmamıştır. KYB kullanımı toplam maliyeti azaltmada, çalışma ortamını geliştirmede ve verimliliği arttırmada önemli avantajlar sağlar. Fakat bu avantajlarının yanı sıra yüksek akışkanlığından dolayı taşıma ve yerleştirme sırasında terleme ve ayrışma gibi bazı sakıncaları da vardır. Bundan dolayı KYB üretimi geleneksel betona göre daha fazla hassasiyet gerektirir [1–7].

Taze betondan beklenen performans; kolayca karılabilir, taşınabilir, yerleştirilebilir ve aynı zamanda ayrışma direncinin yüksek olmasıdır [8]. Bu özellikler KYB’nin geliştirilmesi ile çözülmüş durumdadır. Sertleşmiş haldeki betondan beklenen performans ise yerine, zamana, ortam şartlarına, proje, kullanım amacı gibi parametrelere göre değişiklik arz edebilir. Sertleşmiş haldeki betondan istenen veya istenebilecek olan parametrelerden biri betonun hafif olmasıdır. Birim ağırlığı $800\text{--}2000\text{ kg/m}^3$ arasında olan betonlara hafif beton (HB) denilmektedir. HB son 50 yıldır taşıyıcı elemanlarda kullanılan ve oldukça yaygınlaşmış bir beton türüdür. HB yapı zati ağırlığında önemli seviyede azalma sağladığından yapıların temel kesitlerini küçültür. Deprem açısından da önemli bir avantaja sahiptir. Bunların dışında ısı ve ses geçirimsizliğinde de normal betona kıyasla daha iyi bir performans sergilemektedir. Bunların yanında HB yapımında kullanılan agregaların gözenekli olmasından dolayı işlenebilirlik gibi çok büyük bir sorun bulunmaktadır. HB elde etmek için hafif agrega kullanmak, köpük katkıları veya gaz üreten katkılar kullanmak ve ince agregasız karışım hazırlama olarak üç farklı yöntem vardır. Hafif beton, ısı geçirimsizliği ve birim ağırlığının düşük olması gibi birçok avantajı bulunan bir beton türüdür. Ancak işlenebilme problemi ve basınç dayanımının düşüklüğü en büyük dezavantajlarıdır. Kendiliğinden yerleşen beton ise çok iyi işlenebilme özelliklerine sahip ve genelde hedef dayanımdan daha yüksek mukavemet özellikleri gösteren bir beton türüdür.

Bu iki beton türü birleşiminden hafif, mukavemeti yüksek, geçirimsizliği düşük ve kalıba çok iyi yerleşebilen bir beton türü beklenebilir. Bu amaçla bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun bir türevi olan kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmeye çalışılmıştır (KYHB). Üretilen KYHB’lerin geleneksel hafif betonlar ve normal ağırlıklı kendiliğinden yerleşen

betonlar ile karşılaştırması yapılarak dayanım ve dayanıklılık açısından performansları değerlendirilmiştir.

Kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) henüz çok yeni bir beton türüdür. Bu konuda yapılan araştırmalar sayıca azdır. Bir betonun hem kendiliğinden yerleşmesi hem de hafif olması o betonda aranılacak özelliklerden biri olabilir. Bu çalışmada; bir tarafta işlenebilirlik ve ayrışma direnci açısından çok iyi özelliklere sahip bir beton türü olan KYB (normal ağırlıklı) ile hafif fakat işlenebilirliği zor olan HB'nin bir araya gelmesi ile iyi ve yeni bir kompozit malzemenin ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Sonuçta bu iki beton türü bir araya geldiğinde homojene yakın, işlenebilirliği iyi, düşük ağırlıklı, ses ve ısı yalıtımlı ve her şeyden önemlisi dayanım ve dayanıklılık kriterlerini sağlayabilen bir betonun çıkması beklenmektedir.

KYB ile ilgili yapılmış araştırmalar dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlar:

1. Yeni karışım dizaynları [9–13],
2. Farklı viskozite sağlayıcıların kullanılması [14, 15],
3. Dayanıklılık problemlerinin araştırılması [16–18],
4. Lif takviyesidir [19, 20].

KYHB karışımlarında agrega olarak Elazığ'ın Yeniköy mevkiine ait pomza taşı ve Elazığ Çimento Fabrikasında üretilen CEM I 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Agreganın en büyük tane boyutu 16 mm olarak seçilmiştir. Bir grup seride de daha da hafifletme amacıyla pomza ile genişletilmiş perlit agregası ikamesi yapılmıştır. Viskozite sağlayıcı olarak uçucu kül, silis dumanı, pomza tozu, toz perlit ve viskozite arttırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

Beton karışımları EFNARC [10] kriterlerine göre yapılmıştır. KYHB için öncelikle kendiliğinden yerleşme şartları sağlanıncaya kadar deneme karışımları hazırlanmıştır. Toplam 24 deneme karışımdan sonra edinilen bilgiler ışığında sertleşmiş haldeki özelliklere bakmak için farklı özelliklerde KYHB üretimleri yapılmıştır. Bunlar; agrega tane dağılımı etkisini incelemek için 3 seri, toz tipi ve miktarının etkisini incelemek için 16 seri ve agrega tipine yönelik hazırlanan 7 seri ile toplam 26 farklı beton karışımının sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Kontrol amaçlı hazırlanan seriler; KYB özelliği olmayan hafif beton (HB), viskozite arttırıcı kimyasal katkı kullanılarak üretilmiş KYHB ve iki farklı dozajda üretilen normal ağırlıklı KYB'lerdir. Hazırlanan karışımlarının mekanik özellikleri için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı belirlenmiştir. Taze birim ağırlık, kuru birim ağırlık, su emme, porozite, kapiler su emme ve basınçlı su geçirimsizliği bu çalışmada incelenmiş fiziksel özelliklerdir. Dayanıklılık parametresi olarak bu çalışmada donma-çözülme, yüksek sıcaklık, karbonatlaşma ve sülfürik asit deneyleri seçilmiştir. Çalışmada ayrıca bazı serilere laboratuarda hava kürü uygulanmış ve standart su kürü ile kıyaslamalar yapılmıştır.

2. HAFİF BETON VE HAFİF BETON YAPIMINDA KULLANILAN AGREGALAR

Türkiye'nin önemli bir bölümü 1. ve 2. derece deprem bölgesi üzerindedir. Stratejik öneme sahip birçok yapı bu riskli bölgelerde inşa edilmiştir. 17 ağustos 1999 da yaşanan Marmara Depremi ve hemen arkasından gelen 12 Kasım 1999 Düzce Depremleri çok kısa zaman aralıklarında bile büyük can ve mal kayıplarına neden olan depremlerin olabildiğini göstermiştir. Ülkemizde depremlerin gelecekte de olma ihtimali yüksektir. Depremlerin büyük miktarda mal ve can kaybına neden olduğu birçok kere görülmüştür. Ancak gerekli önlemler alınırsa depremin zararlarını azaltmamız mümkün olabilmektedir, Özellikle Japonya gibi gelişmiş ülkelerde büyük depremlerde can ve mal kayıpları olmamakta ya da çok az olmaktadır.

Yapılarda hafif beton kullanılması durumunda yapının zemine aktardığı yük azalacaktır. Depremler esnasında, yapılara gelen yükler yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Zati ağırlığı fazla olan bir yapı, deprem sırasında daha fazla salınım yapmaktadır. Yapılan deneyler, düşük şiddetli depremlerde, yapıların taşıyıcı sisteminde önemli bir hasar oluşmasa bile hafif malzemeden yapılan duvarların zarar görebileceğini ortaya çıkarmıştır. Şiddeti yüksek olan depremlerde ise, bunların basınç dayanımları az olduğundan kolonlar çökerken ve duvarlara yük aktarılmaya başlarken sorun çıkmaktadır. Bu dezavantajlarına rağmen, binalarda hafif agregadan yapılmış hafif yapı malzemeleri kullanıldığında yapının toplam kütlesi azalmakta, dolayısıyla da binanın iskeletini oluşturan temele daha az yük binmektedir. Bir başka deyişle, hafif malzemelerle yapılan binalarda deprem sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetleri de azalacağından sarsıntıların bina üzerindeki yıkıcı etkileri zayıflar [21, 22].

Yeni İnşaat teknolojilerinde çok katlı dev gökdelenlerin yükü çelik yapı sistemleri ile taşımaktadır. Duvar, bölme, tavan, taban ve sıvalarda hafif yalıtımlı yapı malzemeleri kullanılmaktadır. Böylece demir, çimento gibi ağır malzemelerin az kullanılması nedeniyle binalar ağır yüklerden kurtulmaktadır. Böylece binalar kendi ağırlıklarıyla ezilmemekte ve depremin yıkıcı zararları azalmaktadır.

Deprem haricindeki diğer önemli bir avantajı, hafif yapı malzemeleri kullanılan binaların ısıtma ve soğutma giderlerinde enerji tasarrufu sağlanmasıdır. Pomza, perlit, yton, gazbeton, vermikülit vb, hafif yapı malzemelerini ithal ederek kullanan İsveç, Norveç gibi soğuk ülkelerde bile bir konutun ısıtma maliyeti Türkiye'deki eşdeğer konutun ısıtma maliyetinin yarısından azdır. Bu çarpıcı örnek ısı ve enerji tasarrufu yönüyle de konunun önemini ortaya koymaktadır.

Hafif beton üretmek için bilinen en temel kural beton içerisinde çeşitli yollarla boşluk oluşturmaktır. Boşluk oluşturma; harç içinde veya iri agrega taneleri arasında ya da agreganın

içinde yapılır [23]. Bunlar içerisinde en yaygın olanı boşluklu agreganın kullanılmasıdır. Bu yolla yapılan hafif betonlar bazen kullanılan agregaya göre de isimlendirilirler.

2.1. Hafif Betonun Tanımı

Hafif betonlar ağırlıkları ve dayanımlarına göre RILEM [24] tarafından yapısal, yapısal-yalıtım ve yalıtım betonu olmak üzere üç grupta sınıflandırmıştır. Başka bir çalışmada hafif betonlar Tablo 2.1’de verilen beton tiplerine göre sınıflandırılmıştır [25]. Hafif beton üretiminin çeşitli yöntemleri vardır. Bu yöntemlerden en sık başvurulanı birim ağırlıkları düşük olan agregalar ile hafif beton üretmektir [26,27]. Genel olarak hafif agregalı betonlar, yapılarda blok olarak kullanılmakta ve bu blokların kullanımı ile yapıların zati yüklerinin azaltılmasının yanında ısı yalıtımı, deprem sorunu, yangına karşı dayanım ve estetik gibi özelliklere de sahip olması amaçlanmaktadır [28]. TS 2511’de [29] 1800 kg/m³’ün altında birim ağırlığa sahip ve 17 N/mm²’den büyük silindir basınç dayanımına sahip betonlar taşıyıcı hafif beton olarak sınıflanılmaktadır (Tablo 2.2). TS EN 206-1’de [30] ise üst sınır 2000 kg/m³ olarak belirlenmiş ve birim ağırlık ve dayanıma göre hafif betonlar sınıflara ayrılmıştır (Tablo 2.3 ve 2.4) .

Tablo 2.1 Hafif betonların sınıflandırılması

Hafif Beton Tipi	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenlik (W / m°C)
Çok hafif yalıtım betonu	<800	<2	<0.16
Çok hafif beton	<800	>2	<0.16
Hafif taşıyıcı yalıtım betonu	800 – 1400	>10	<0.80
Hafif taşıyıcı beton	>1200	>20	-
Yüksek dayanımlı hafif beton	>1200	>30	-

Tablo 2.2. Çeşitli standartlara göre taşıyıcı hafif betonların özgül ağırlık ve basınç dayanımları.

Standartlar	Özgül Kütle (Kg/m ³)	Standart Silindir Karakteristik Basınç Dayanımı (MPa)
DIN 1045	≤ 2000	≥ 16
ASTM C 330	≤ 1840	≥ 17
CEB-FIB	< 1900	≥ 16
TS 2511	< 1900	≥ 17
ACI 213R-03	< 1840	≥ 17

Tablo 2.3. Hafif betonun birim hacim ağırlığına göre sınıflandırılması (TS EN 206-1) [30]

Sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Yoğunluk aralığı (kg/m ³)	800-1000	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000

Tablo 2.4. Hafif betonun basınç dayanımına göre sınıflandırılması (TS EN 206-1) [30]

Basınç dayanım sınıfı	En düşük karakteristik silindirik dayanımı (N/mm ²)	En düşük karakteristik küp dayanımı (N/mm ²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.2. Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar

Hafif beton yapımında kullanılan agregalar doğal ya da suni olabilmektedir. Doğal hafif agregalar; genelde bir volkanizma ürünü olarak oluşmuş gözenekli ve geniş kütsel dağılımlar gösteren endüstriyel hammaddelerdir. Pomza, diyatomit, perlit, vermikülit, puzzolanlar, tuf ve volkanik cürufur bu kapsamda değerlendirilen ve güncel oluşumları bilinen doğal hafif agrega türleri olarak sayılabilir. Kullanılan agrega cinsine göre elde edilen hafif betonların karakteristikleri Tablo 2.5’de verilmiştir. Türkiye’de, taşıyıcı hafif beton için gerekli olan yapay agregaların üretimiyle ilgili henüz bir sanayi kolu kurulmamıştır. Ancak yurt dışında yaygın bir kullanıma sahiptirler.

Tablo 2.5. Agrega türüne göre elde edilen hafif betonların özellikleri [31]

Agrega Cinsi	Ortalama yoğunluk kg/m ³	Beton kuru birim ağırlık kg/m ³	Basınç dayanımı MPa	Isı geçirgenliği %5 nem KCAL/MH°C
Genleşmiş Perlit	80–240	400–1120	0.5–7	0.16–0.39
Pomza (Asidik)	500–880	640–1140	2–14	0.21–0.60
Genleşmiş Kil	320–1040	720–1760	2–62	0.24–0.91
Genleşmiş Vermikülit	65–200	400–800	0.7–3.5	0.16–0.26
Ytong, Gazbeton	300–1000	300–1000	1.5–7	0.10–0.22
Kum-Çakıl	1300–1760	2240–2480	14–70	1.40–1.80

2.2.1. Diyatomit

Diyatomitler binlerce yıl önce deniz ve göl yataklarında, çok küçük deniz canlılarının iskeletlerinin birikmesiyle meydana gelmişlerdir. Su yosunları sınıfından tek hücreli, mikroskopla görülebilecek kadar küçük, silisli kavrıkların birikerek fosilleşmesinden meydana

gelen organik tortul bir kayadır. 8000 kadar farklı türü vardır. Diatomalı toprak, Diatomalı silis, Fosil unu, Silis unu, Dağ unu, Beyaz turba gibi isimlerle anılmaktadır [32]. Diatomitin görünüşü tebeşire benzemekte ve ufalanınca pudra kıvamı kazanmaktadır. Saf diatomit beyazdır. Ancak yabancı bileşenlere bağlı olarak sarı, kahverengi ve yeşil renkli olabilmektedir. Volkanik küller diatomitlerin içinde kirletici etki yapmaktadır. Ayrıca karbonat, kum, kil, feldspat, mika, amfiboller, piroksenler, rutil, zirkon vb. mineraller bünyede safsızlık olarak bulunurlar [33,34].

Diatomitin gözenekliliğinin fazla, ısı, ses ve elektriği az geçirmesi, erime noktasının 1400–1600 °C olması, kimyasal maddelere karşı dayanıklı ve yoğunluğunun az olması gibi fiziksel özellikleri nedeni ile yardımcı filtre malzemesi, dolgu maddesi, izolasyon maddesi, absorbent, cila maddesi, katalizör ve katalizör taşıyıcısı, hafif yapı malzemesi, refrakterler ve sentetik silikat imali gibi birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. İlk çağlarda parlatma tozu olarak kullanılan diatomitler bugün dünya çapında çok geniş kullanım alanına ve eşsiz özelliklere sahip olmasına rağmen diatomit henüz Türkiye’de ana hammadde olarak yerli endüstriye girmemiştir [35,37]. Türkiye’deki diatomit yataklarının bulunduğu iller; Afyon, Ankara, Aydın, Balıkesir, Bingöl, Çanakkale, Çankırı, Denizli, Eskişehir, Kayseri, Konya, Kütahya, Niğde, Sivas ve Van’dır [38]. Dinamit üretiminde, kağıt, boya, tuğla, kiremit, seramik, plastik, sabun, deterjan gibi birçok maddelerin üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılır. Çok yumuşak bir aşındırıcı özelliği taşıdığı için diş macunlarının ve metal cilalarının içine katılır. Beton ve harçların işleme kolaylığını artırdığı için, çimentolar içine katkı maddesi olarak konur.

Yapılmış bir çalışmada; [39] diatomitle üretilen hafif agregalı betonların dayanımlarının düşük olması, (4-5.8 MPa) ancak ısı yalıtım değerlerinin yüksek olması (0,23-0,314 W/mK) nedeniyle hafif agrega olarak hafif beton üretiminde kullanılması ile taşıyıcı olmayan ancak ısı yalıtımı yüksek olan yalıtım amaçlı hafif betonlar veya bloklar üretilebileceği belirtilmiştir.

2.2.2. Genleştirilmiş kil

Isıtıldığında gaz kabarcıklarıyla dolu bir kütle oluşturan killere genleşen kil denir. Mineralojik bileşimlerine göre genleşen kil yatakları 3 gruba ayrılır. Bunlar; klorit, illit, kuvars ve feldspat içeren yataklar, montmorillonit, illit, kuvars içeren yataklar, kaolinit, montmorillonit, kuvars içeren yataklardır. Genleştirilmiş kil için kullanılan yaygın hammaddeler; kumlu kil, erken sinterleşen kil, killi şist ve şifertondur. Bunlar mineralojik olarak illit, serizit ve montmorillonit gibi tabakalı silikatlardan meydana gelir. Bazı hallerde bir miktar kaolinit ve klorit ile değişen miktarlarda kuvars, feldspat, kalsit, dolomit ve limonit

ihativa ederler. Bu malzemelerin 1100–1300 °C’de pişirilmesi neticesinde oluşan gözenekli yapıya sahip küçük seramik ürünlerin (granüller) dış yüzeyinde iyi sinterleşmiş sert ve piroplastik yapı gösteren bir kabuk oluşmaktadır (Şekil 2.1). İç kısımda ise, malzeme bünyesinde bulunan ve pişme esnasında açığa çıkan tüm gazların bünyeyi terk etmesi nedeniyle kapalı ve küçük boşluklar halinde hücreler ihtiva eden homojen bir yapı meydana gelmektedir [40]. Bu oluşum, inşaat sektöründe hafif beton üretiminde hafif agrega malzemesi olarak değerlendirilebilmektedir.



Şekil 2.1 Genleştirilmiş kil agregası

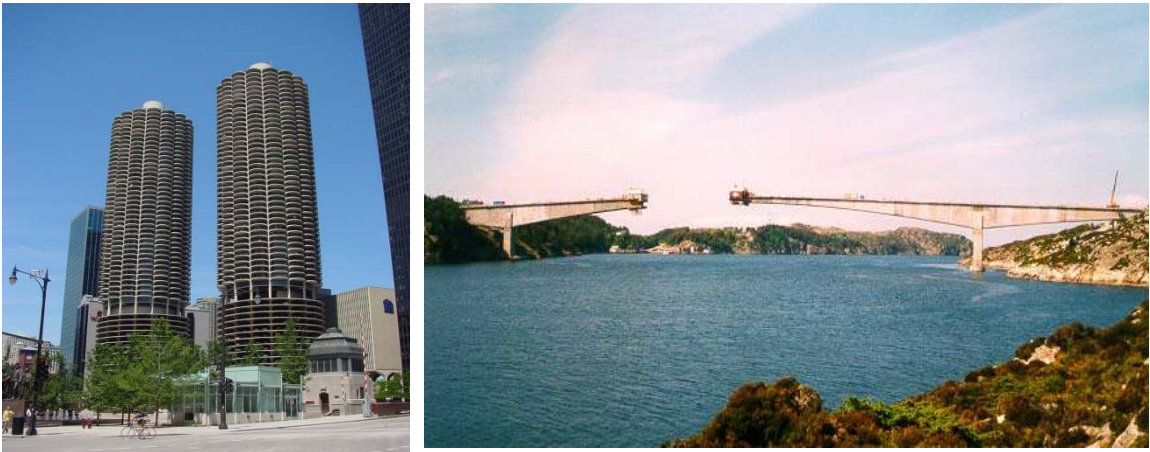
Killer doğadan alındığı gibi kullanılamamaktadır. Kil genleşme işleminden önce, belirli bir işlemden geçmesi gerekmektedir. Bu işlem sürecine akış seması denilmektedir. Akış şeması hammaddenin çıkarılması, harmanlanması, kırılması, katkı maddeleri ilavesi, şekillendirilmesi, pişirilmesi, tasnif ve sınıflandırılması kademelerini ihtiva eder. Pişirme hem döner fırınlarda hem de düşey fırınlarda yapılmaktadır [40].

Genleşen killerin varlığının bilinmesi 1850’lere dayanmaktadır. Bu alanda ilk ürünler 1918 yılında Missouri’de S.J. Hayde tarafından elde edilerek Amerikan standartlarına “Haydite” adı ile girmiştir. Döner fırınlarda elde edilen bu ürünler o sıralar konut inşaatlarından ziyade, gemilerin iç konstrüksiyonunda kullanılmıştır. Genleşmiş kil agregası, 1950’lerden sonra inşaat sektöründe başta gökdelen ve köprü yapımı olmak üzere bugünkü konumunu tam olarak kazanmıştır. Genleştirilmiş kil agregalarının üstünlüklerinin keşfedilmesinden sonra ABD’de 26 eyalette genleşen kil üretilmektedir. Bu genleştirilmiş kil agregalarından “Haydite” basta olmak üzere daha birçok kil agregası ticari olarak piyasaya sürülmüştür. Bu killer; Solite, Basalite, Buildex, Lite-Wate, Rocklite v.b. yaklaşık 15 çeşit piyasa ürünü olarak mevcuttur. ABD’de halen yılda hafif yapı agregası üretiminin 2/3 si olan genleşen kil veya şeyldir. Bu da yılda yaklaşık 8–9 milyon m³ arasındadır. Ayrıca Dünya üzerinde üretim yapan büyük firmalar Kanada, Belçika, Avustralya, İsviçre ve Japon kuruluşlarla birlikte oluşturdukları “Expanded, Shale Clay ve Slate Institute (ESCSI) adlı bir örgüt kurulmuştur [41]. MTA Genel Müdürlüğü

Genleşen Kil Etütlerine (Türkiye Geneli) ilk defa 20-13A1 proje numarasıyla 2000 yılında başlamış olup, çalışmalar 2001 yılında da devam etmiştir. Türkiye’ de genleşen kil üretimi olmadığı gibi tüketimi de yoktur [41].

Genleştirilmiş kil ve şistler hafif agregalar içerisinde basınç mukavemeti en yüksek olan ürünlerdir. Genleşmiş kil ile ilgili Türkiye’de yapılan bir çalışmada kendi ürettikleri genleşmiş kil agregası ve 400 doz çimento kullanımıyla C30 sınıfı beton üretilebileceği belirtilmiştir [42]. Başka bir çalışmada, Moldova’dan temin ettikleri genleşmiş kil agregası ile ürettikleri betonların zararlı kimyasallara dayanıklılığını incelemişler ve sülfat ile asitlere dayanıklı olduklarını belirtmişlerdir [42].

Dünya üzerinde genleştirilmiş kil agregası ile üretilmiş birçok yapı örneğine rastlamak mümkündür. Bunlardan bazıları Şekil 2.2’de verilmiştir. Soldaki resimdeki Marina City Towers 1964 yılında Chicago USA’da üretilmiştir. Burada kullanılan betonun sınıfı BS25 ve yoğunluğu 1700 kg/m^3 ’den küçüktür. Yapılan yapının yüksekliği ise 179 m’dir. Hafif agregası ile bu dayanımda beton üretmek yapım yılı için büyük bir başarıdır. Sağdaki resimde Stolma köprüsü görülmektedir. Burada da yine genleştirilmiş kil agregası kullanılmıştır. Yapım yılı 1988–1989 olmakla beraber köprünün toplam uzunluğu 467 m’dir. Yapım aşamasında yapılan testlerde 70.4 Mpa ’lık basınç dayanımına ulaşılmıştır. Bu yüksek dayanımın yanında kullanılan betonun birim ağırlığı 1800 kg/m^3 ’den küçüktür.



Şekil 2.2. Genleştirilmiş kil agregası ile inşa edilmiş yapı örnekleri (solda Marina City Towers, Chicago-USA, sağda Stolma Bridge, Bergen)

2.2.3. Perlit

Perlit asidik karakterli volkanik bir camdır. Doğal olarak oluşur ve silis esaslı bir kayadır. Perlit ismi bazı perlit tiplerinin kırıldığında inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi nedeni ile inci anlamına gelen perle kelimesinden türetilmiştir. Perlit $870 \text{ }^{\circ}\text{C}$ derece

üzerinde hızlı bir şekilde ısıtıldığı zaman bünyesindeki özsuyn buharlaşması ile mısır taneleri gibi patlar ve ısıyla genleşen perlit üzerinde sayısız gözenekler oluşur. Bu şekilde yeni hacmi orijinal hacminin 35 katına çıkar. Çeşitli perlit kayaçları renk ve yapı itibarıyla birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişebilmektedir. Genleştiğinde renk tamamen beyazlaşır. Perlitte en önemli özellik, hidrasyona uğramış camsı silika yapısındaki %2,5 arasında bileşik halinde içerdiği sudur ve bu su perlitin kararlılığını sağlamaktadır. Dünya perlit rezervlerinin yaklaşık %5'i Türkiye'dedir. Bu rezerv 4,5 milyar tondur [40, 42]. Rezervlerin Türkiye'deki dağılımı Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Perlit madenin Türkiye'de dağılımı

Kantarıcı [43] kendiliğinden yerleşen betonların geçirimsizliklerine ve mekanik özelliklerine geliştirilmiş perlit agregasının etkisini incelemiştir. Normal ağırlıklı betona %5, 10 ve 15 oranlarında geliştirilmiş perlit ilave etmiştir. Bu yolla elde edilen betonların birim ağırlıkları 2278 kg/m^3 'den 2247 kg/m^3 'e kadar düşmüştür. Numunelerin basınç dayanımları ise 54–40 MPa arasında değişmiştir. Farklı kür şartlarının da incelendiği bu çalışmada kuru ortamda kür edilen numuneler de perlit agregalı numuneler kontrol betonuna göre daha iyi performans sergilemiştir. Geliştirilmiş perlit agregalı numunelerin geçirimsizlik katsayıları kontrol betonundan yüksek çıkmış fakat kuru kür ortam durumunda ise kontrol betonuna göre yine daha iyi sonuç vermiştir.

2.2.4. Genleştirilmiş polistiren sert köpük

Ham petrolden imal edilen ve sentetik bir malzeme olan geliştirilmiş polistiren sert köpük için kısaltma olarak EPS kullanılmaktadır. EPS (expanded/expandable polystyrene),

genleştirilmiş veya genişletilebilen polistren anlamına gelir. Türkiye’de strafor (stiropor) adıyla anılmaktadır. EPS, petrolden elde edilen bir hidrokarbondur. Bu hidrokarbonun % 98’i havadan oluşan termoplastik esaslı daha çok yalıtım amaçlı kullanılan bir malzemedir. Styrene monomerin polimerizasyonu ile elde edilir. Bu polimerizasyonda katalizör olarak peroksit, şişirme maddesi olarak da pentan kullanılır. Bünyesinde bulunan çok sayıdaki küçük gözenekli hücrelerde durgun hava hapsolmuş vaziyettedir. Bir m³ EPS yaklaşık olarak 3–6 milyar küçük gözenekli hücre içerir. Bu gözenekli yapı, ısı ve ses yalıtımı sağlar. Büyük bir kısmı havadan oluştuğu için de çok hafif bir malzemedir. İşlenmesi ve taşınması kolaydır [44]. 1950’li yıllarda Almanya’da keşfedilen strafor, hızla tüm dünyada kullanılmaya başlanmıştır. 1960’lı yılların başından itibaren Türkiye’de üretimine başlanmıştır [44].

EPS çözünmeyen ve erimeyen bir yapıda olduğundan, gözenekli yapıdaki malzemenin gözenek arası duvarları su geçirmez. EPS uygun şekilde üretilmişse suya tamamen batırılmadıkça su geçirmez. Akışkan haldeki suyu emmemesi durumuna karşılık EPS, havada bulunan nemi buhar basıncı yoluyla bünyesine alabilir. Bu su buharı soğuduğunda yoğunlaşmaya uğrayıp akışkan su haline dönüşür. Malzemenin buhar difüzyonuyla su alması, buhar kesici malzemeler kullanılarak engellenebilir [45].

EPS’nin parlama noktası 360–370 °C’dir. ASTM 1929’a göre EPS’nin kendiliğinden yanabilmesi için ortam sıcaklığının 490 °C’ye ulaşması gereklidir. Ancak alevlenme sıcaklığının artırılması çeşitli kimyasallar katılmasıyla mümkündür. EPS’nin yanması halinde ortaya çıkan gazların miktarı, ahşabın yanmasıyla ortaya çıkan gazların miktarından düşüktür [44].

Sönmez [46] çalışmasında; 300 kg/m³’den 1200 kg/m³’e kadar 100’er kg/ m³ artışla 10 farklı birim ağırlıkta beton üretmiştir. Üretilen bu betonların taşıyıcı elemanlarda kullanılamayacağını ancak iyi bir ısı yalıtım malzemesi olabileceği vurgulanmıştır. Diğer bir çalışmada [47] kontrol, %10, 20, 30 ve 40 oranlarında EPS yer değiştirilerek betonlar üretilmiştir. Çalışmada sırasıyla 33.5, 32.8, 24.9, 18.6 ve 7.8 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. Çalışmalarında ayrıca %30’a kadar EPS ilavesi durumunda elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir.

2.2.5. Vermikülit

Piroksenit, amfibol grubu ve ultramafik kayalardaki olivinlerin sonradan bunlara nüfuz eden siyenitler, karbonatitler ve pegmatitler vasıtasıyla oluşan solüsyonlar ve yüksek sıcaklık sebebiyle gaz haline dönüşmüş bazı maddelerin etkileriyle alterasyona uğrayarak biyotit-flogopit, serpantin ve klorite dönüşmesinden sonra yeraltı sularının sirkülasyonu ile derinlere doğru kayalardaki alkalilerin yer değiştirmesi, magnezyumun yeniden dağılımı, kristal yapısına

suyun nüfuzedip molekül yapısına girmesi suretiyle oluşan bir mineraldir. Vermikülitin en önemli özelliği 900–1100 °C sıcaklıkta 4 ila 8 saniye tutularak genişletirebilmesidir. Genleşme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak, 0,8 g/cm³ 'den 0,08 g/cm³'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermikülitin kalitesine ve genişletirmenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısı işlem sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir [48–49]

Genleştirilmiş vermikülit, hafif yapı gereçlerinde agrega olarak, binalarda ısı ve ses yalıtımında, soğuk hava depolarının izolasyonunda, dekorasyon işlerinde, dökümhane ve benzeri yüksek ısı ile çalışan yerlerde ateşe dayanıklı sıva ve kaplama malzemeleri üretiminde kullanılır. Ziraatte ise toprağın özelliklerini iyileştirici katkı olarak, zirai ilaçlarda ve gübrelerde katkı malzemesi olarak, ev ve ahır hayvanlarına yatak malzemesi olarak kullanılır. İnce taneli genişlemiş vermikülit ayrıca boyada, lastik ve plastik üretiminde dolgu olarak kullanılır. Diğer bir deyişle vermikülit, perlit, pomza, genişlen killer, camyünü, yutong, strafor beton ve köpüklü beton gibi malzemelere bir alternatiftir. Dünya toplam üretimi yılda 500.000–600.000 ton kadardır.

2.2.6. Pomza

Kullanılan en eski yapı malzemelerinden biri pomzadır. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde pomza, amfitiyatrolar, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler ve konut inşaatlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yapılar zamana karşı hala direnmektedir. Pomza, İtalyanca ponza, Almanca Bimsstein, İngilizce Pumice olarak adlandırılır. Dilimizde süngertaşı, köpük taşı, topuk taşı, hışır taşı olarak da adlandırıldığı gibi bilimsel terminolojide dünyaca kabul görmüş pümis (pumice), pümisit (pumicite) olarak da adlandırılabilir. Anadolu'da hafif yalıtımlı yapı malzemeleri antik çağlarda keşfedilmiştir. Ege ve Akdeniz'deki birçok depremlere direnerek günümüze kadar gelen tarihî yapılarda kullanılan Horasan çimentosu pomza ve kireç karışımından İmal edilmiş bir nevi hafif betondur.

Volkan bacalarından çıkan lavların oluşturduğu kayalar ve yine volkandan çıkan gazların dışında diğer bir volkanik malzeme çeşidi ise değişik büyüklükteki magma parçalarıdır. Bu malzemelere “proklasik malzemeler” denilmektedir. Proklasik malzemeler doğada büyük kütlelerden küle kadar değişik boyutlarda bulunabilirler. Boyut değişimindeki ana etken proklasik malzemenin volkan bacasından ayrıldığı andaki sıcaklığı ve soğuma hızıdır [50]. Yüksek bir sıcaklıkta iken aniden soğuyan malzemelerden ince taneler oluşur, soğuma şekline ve içindeki gaz miktarına bağlı olarak oluşan tanelerin kendi bünyelerinde değişik oranlarda

boşluklar meydana gelmektedir [51]. Boşluklu volkanik camı yapıya sahip olan pomza taşı ısı ve ses yalıtım özeliği yüksek olan doğal bir malzemedir [52].

Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşur. Bunlar asidik ve bazik pomzadır. Asidik pomza; beyaz veya kirli beyaz renkli, Mahs skalasına göre sertliği 5-6 olup, yoğunluğu $0,5-1\text{gr/cm}^3$ 'tür. Bazik pomza ise kahverengi veya siyah olup daha ağırdır. Sertliği 5–6, yoğunluğu ise $1-2\text{ gr/cm}^3$ 'tür. Her iki tür pomzanın kimyasal bileşimleri Tablo 2,6'da verilmiştir [53]. Asidik magma, bazik magmaya nazaran daha viskozdur ve yüksek silis içerir. Bazik magmanın sıvı olduğu sıcaklıklarda asidik magma katı halde bulunur. Bu nedenle volkanik aktivite durduğunda magma akışı da durarak asidik kayaç ve kütleler oluşur. Volkandan basınçla püsküren asidik malzeme ve erimiş gazlar ani basınç azalması sonucu genleşir ve uçucu bileşenlerin kaçmasına neden olur. Atmosferle temas eden erimiş küresel parçalar hızla soğuyarak pomzayı oluşturur [54].

Pomza; rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak perlit gibi diğer volkanik camı kayaçlardan ayrılır. En çok renk benzerliği/yakınlığı ve kimyasal bileşimi bakımından perlit ile karıştırılmakta olup, bazı durumlarda perlitten ayırt edilememektedir. Pomzalı perlit/pomzatik perlit veya perlitik pomza olarak adlandırılabilen geçişli kayaçlarla petrografik analizle ve gözenek yapısı itibariyle ayrılabilir. Pomzada gözenekler çoğunlukla birbirleriyle bağlantılı değildir. İçerdiği gözenekler gözle görülebilecek boyutlardan mikroskobik boyutlara kadar sayısız miktarda olup, her biri diğerinden camı bir zarla yalıtılmıştır. Bu yüzden hafif, suda uzun süre yüzebilen, izolasyonu yüksek bir kayaçtır.

Tablo 2.6. Asidik ve bazik pomzanın genel kimyasal bileşimleri

	S(SiO_2)	A(Al_2O_3)	F(Fe_2O_3)	CaO	MgO	Na ₂ O+ K ₂ O
Asidik pomza	70	14	2,5	0,9	0,6	9
Bazik pomza	45	21	7	11	7	8

Anadolu arazisi, jeolojinin üçüncü ve dördüncü zaman başlarında şiddetli bir volkanik faaliyete sahne olmuştur. Bu volkanik faaliyetten dolayı arazide toptan yükselmelerle birlikte derin ve sürekli kırılmalar meydana gelmiştir. Volkanik bir malzeme olan pomzanın Anadolu'daki dağılımının belirlenebilmesi için volkanik arazilerin ana hatları ile gözden geçirilmesi yerinde olacaktır. Araştırmalara göre Türkiye 3 milyar metre küp pomza rezervi ile oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Bu da dünya pomza rezervlerinin 1/7'sine karşılık gelmektedir. Tablo 2.7'de görüleceği üzere pomza rezervleri Doğu Anadolu Bölgesinde oldukça yoğunlaşmıştır [55]. İç Anadolu ve Akdeniz Bölgesinde de rastlanmaktadır. İşletme sayısı bakımından ise İç Anadolu Bölgesi önde gelmektedir [56].

Pomza taşı; inşaat sektöründen kozmetik alanına kadar birçok alanda kullanılmaktadır [57]. Fakat ülkemizde genel olarak inşaat ve tekstil sanayinde kullanılmaktadır, diğer alanlara tam olarak girmemiştir.

İnşaat sektöründe konut ihtiyacının karşılanabilmesi için günümüze kadar çok katlı binaların inşasında bazı problemlerle karşılaşmıştır. Bunların en önemlisi beton kütleden dolayı binanın öz ağırlığının fazla olmasıdır. Bu ağırlığın azaltılması amacıyla betonda kullanılan normal agregaya yerine alternatif olarak pomza taşı kullanılmaya başlanmıştır. Pomza taşı hafif agregaya olarak kullanıldığında betonun özgül ağırlığını azaltır ayrıca gözenekli yapısından dolayı da ısı ve ses yalıtımını sağlar.

Tablo 2.7. Türkiye’de pomza rezervlerinin dağılımı

YERİ	REZERV MİKTARI	İLİ	İŞLETME SAYISI	İLİ	İŞLETME SAYISI
Isparta-Gölcük	30.983.250	Adana	7	Manisa	9
Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000	Isparta	9	Muğla	2
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834	Burdur	1	Ağrı	3
Nevşehir-Derin kuyu	48.660.500	Hatay	2	Bitlis	6
Kayseri-Gömeç	13.250.000	Kayseri	17	Erzurum	1
Kayseri-Develi	58.500.000	Konya	4	Erzincan	1
Kayseri-Talas-Tomarza	241.000.000	Nevşehir	23	Kars	2
Kayseri-Talas-Tomarza	284.000.000	Niğde	4	Van	2
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000	Aksaray	2	Urfa	1
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000	İzmir	2	Mardin	2
Van-Mollakasım	5.950.000				
Ağrı-Patnos	27.812.000	BÖLGELER	REZERV		İŞLETME SAYISI
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000		MİKTARI	%	
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250		1.369.012.000	56	
Kars-Digor	11.718.750		1.057.893.334	43	
Kars-Sarıkamış	1.875.000		30.983.250	1	
		Diğer			32

Yazıcıoğlu ve Bozkurt [58] Elazığ yöresinden temin ettikleri bazaltik pomza ile kontrol, uçucu kül ve silis dumanı katkılı (toplam bağlayıcı miktarı 310 kg/m³) hafif betonlar üretmişlerdir. Çalışmada, üretilen hafif betonlar LC25/28 sınıfında olup, deprem dayanımı açısından kullanılabilir sınırlar içerisinde olduğunu belirtilmişlerdir.

Yaşar vd. [59] uçucu kül ile üretilen bazaltik pomza agregalı betonların mukavemet özelliklerini incelemişler. Yazarlar bazaltik pomza kullanımı ile taşıyıcı hafif beton üretilebileceğini vurgulamışlardır.

2.3. Hafif Betonun Performansı

Beton teknolojisinde son yıllarda yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılar ve silis dumanı gibi puzolanların yaygın kullanımı ile su/çimento oranı büyük ölçüde düşürülmüş ve yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonlar üreilmeye başlanmıştır. Bu betonlar yüksek miktarda çimento kullanılarak üretilmektedir. Yüksek miktarda çimento ile üretilen betonlar normal betona göre daha yoğun olmaktadır. Bu betonlarda süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile düşük su çimento oranı seçilmesinden dolayı hidratasyon sürecini tamamlayacak miktarda su bulunmadığı gibi betonun geçirimsiz karakteri nedeniyle dışarıdan su girişi de gerçekleşmemektedir [60]. Hidratasyon ürünlerinin oluşmasıyla birlikte çimento hamurunda zamana bağlı hacim değişimleri çok erken yaşta başlar [61]. Suyla dolu olmayan boşlukların kimyasal rötre ile oluşması menisklerdeki çapın düşmesinin ana sebebidir. Bu azalma, boşluk suyundaki kapiler gerilmenin artmasına sebep olarak kendiliğinden kurumaya neden olur. Suyla dolu olmayan boşlukların oluşması ve kendiliğinden kuruma boyunca devam etmesi hidratasyon kinetiğini etkiler. Bu etki, hidratasyonun en son derecesini ve dolayısıyla son dayanımı kısıtlar. Geleneksel kür yöntemleri ortamdaki bu bağıl nem kaybını azaltmada etkili olmaz. Yeni kuşak yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların en önemli sakıncaları erken yaşlarda oluşan otojen deformasyon ve kendiliğinden kuruma olarak görülmektedir. Betonun şekil değiştirme kapasitesi erken yaşlarda iç ve dış kısıtlamalarla oluşan gerilmeleri karşılamak için yeterli olmadığından, otojen deformasyon ve çatlak oluşturma eğilimindedir. Erken yaşlarda oluşan bu çatlaklar dayanıklılık problemlerine yol açar. Bu deformasyonu önlemek için önceden suya doyurulmuş hafif agregaların su rezervuarı olarak kullanılması ilk olarak Philleo [62] tarafından önerilmiştir. Bu teknik ile ilgili gelişmeler birçok araştırmacı tarafından da tartışılmıştır [63 – 69]. Öte yandan hafif agrega ve matris ara yüzeyinin normal agregadan daha iyi olduğu bilinmektedir. Bu iyileştirilmiş ara yüzey bağıl nem ve sıcaklık etkileri altındaki boy ve hacim değişimlerini önler [70].

3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

3.1. Tanım

Kendi ağırlığı ile herhangi bir sıkıştırma işlemine gerek duyulmadan sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma ve terleme gibi problemler ile karşılaşılmayan, çok akıcı kıvamlı betonlara KYB denilmektedir. KYB en genel isim olmakla birlikte bu beton türüne farklı isimlerle anıldığına rastlanmaktadır. Bunlar; döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeysel alanlarda kullanılması halinde, Kendiliğinden Yüzeyleyen Beton (Self-Levelling Concrete - SLC) adı kullanılmaktadır. Kendiliğinden Yüzeyleyen Beton'dan kendi ağırlığı ile her 4 metrede 1 mm'den fazla kot farkı oluşturmaksızın, akarak yatay konum alması beklenmektedir [71,72]. Kuzey Amerika'da Khayat vd. [73], Kendiliğinden Konsolide Olan, Çöken Beton (Self-Consolidating Concrete - SCC) adını kullanmıştır. Kullanım alanı ve bölgeye göre değişen bu isimler birbiri yerine de kullanılmaktadır. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen beton (KYB) ifadesi kullanılacaktır.

3.2. Tarihsel Gelişim

Kendiliğinden yerleşen betonların çıkış şekli ve tarihsel gelişimi hakkında farklı görüşler mevcuttur. Bir görüşe göre; KYB'lar ilk kez 1988 yılında Japonya'da kalıcı betonarme yapılar yapmak amacıyla geliştirildi. KYB üzerine yazılan ilk bildiri 1989'da Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansında sunulmuştur. Aynı bildirinin 1992'de İstanbul'daki CANMET & ACI Uluslararası Konferansında sunulması KYB kavramının dünyaya yayılmasını hızlandırmıştır. 1994'de Bangkok'daki ACI çalıştayından sonra KYB, dünyadaki araştırmacıların ve mühendislerin ilgi odağı haline gelmiştir. 1996'da New Orleans'da ACI Sonbahar Kongresinde KYB, Amerika ve Kanada'da da iyice yaygın hale gelmiştir; sonuç olarak KYB üzerine dünya ölçeğinde araştırmalar başlamış oldu [74]. Diğer bir görüşe göre ise KYB Japonya'da su altında beton dökümü uygulamalarında vibrasyonsuz tekniğin kullanılmasının verdiği tecrübelerle üretilmeye başlanmıştır. 1986 yılında Tokyo Üniversitesinde Okamura'nın başlattığı çalışmaları Ozawa, Ouchi ve Maekawa devam ettirmişlerdir [75]. Collepardi'ye [76] göre ise, ilk KYB uygulaması 1980'lerin başında İtalya'nın S.Marco Rıhtım inşaatında sualtı temel betonu dökümünde 40.000 m³ Reoplastik Beton kullanılarak yapılmıştır. Bu beton çok yüksek viskoziteye sahip (kohezif), vibrasyona gerek duyulmadan su altında kalıba yerleşebilen ve bu kohezyonuyla deniz suyunun yıkayıcı

etkisine direnç gösterebilen özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir. Neticede kimyasal katkı teknolojisinin gelişmesi, Reoplastik Beton ve su altı betonu uygulamalarından tecrübe ve bilgi birikiminin oluşması KYB'nin ortaya çıkmasını sağlamıştır [77].

RILEM (Uluslararası Bina Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Uzmanları ve Laboratuvarları Birliği) bu konuda öncü kuruluşlardan biri olmuştur. KYB konusunda raporlar düzenlemiş ve teknik bir komite oluşmasını sağlamıştır. Bu komite dünyanın birçok yerinde sempozyumlar düzenleyerek yaygınlaşmada önemli rol oynamıştır [78]. En fazla kabul gören ve takip edilen KYB ön görüleri Rilem tarafından yayınlanmış olan EFNARC 2002 ve EFNARC 2005'dir. Birçok ülke KYB konusunda standart hazırlama çabasındadır.

Türkiye'de ise KYB konusunda bireysel çalışmalar yürütülmektedir. Araştırmacılar, çalışmalarını ilgili kongrelerde sunmakta ve uluslararası dergilerde yayınlamaktadırlar. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen bilgiler ışığında KYB uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Geleneksel betonun tarihi dikkate alındığında, KYB'nin yeni olarak ifade edilebilecek bir geçmişi vardır. KYB'nin üretilmeye başlanıldığı ilk yıllarda bilgi paylaşımının günümüzdeki kadar hızlı olmaması ve birçok ülke yönetmeliğindeki beton çökme-kıvam değeri üst limiti sınırlayıcıları KYB'nin hızlı yayılmasını engellemiştir. Ancak günümüzde inşaat sektöründeki hızlı gelişmeler ve yeni ihtiyaçlar KYB'nin uygulama alanlarını her geçen gün genişletmektedir.

Bugün KYB kullanılarak elde edilen üstünlüklerin ötesinde, bu kullanımı geleneksel hale getirerek genele yayma fikri ulaşılmak istenen bir hedef olarak görünmektedir. KYB ile ilgili dünyada yapılmış araştırmalar KYB'nin tüm sertleşmiş ve taze haldeki özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Pratikteki sorunları görmek için pilot uygulama projeleri geliştirilmiştir. Günümüz itibarıyla önemli deneyimler elde edilmiş ve büyük gelişme kaydedilmiştir, ancak bazı noktalarda halen yanıtlanması gereken sorular bulunmaktadır [79].

3.3. KYB Bileşenleri

KYB karışımının geleneksel betondan en büyük farkı, toz miktarının artması ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılmasıdır. Kullanılan bu malzemelerle, taze betona kendiliğinden yerleşebilirlik, sertleşmiş betona ise yüksek performans özellikleri kazandırılmaya çalışılır [80]. Karışım oranları ülke ve bölge farklılıkları gösterebilmektedir. Farklılığın nedeni ise kullanılan toz malzeme ve agrega tipi olarak ifade edilebilir.

KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özellikleri, karışımda yer alan malzemelerin miktarına ve tipine göre önemli değişiklikler gösterir. Bu hassasiyet, KYB üretiminin, dökümünün ve bakımının daha dikkatli yapılmasını gerektirmektedir. Karışımda yer alacak her malzeme farklı bir özellik göstereceğinden, KYB üretiminde kullanılacak malzemelerin

özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu özelliklerin bilinmesi ile ancak optimum karışım oranları belirlenebilir [81].

3.3.1. Çimento

Çimento betonun ana bileşenlerindendir. Beton dayanımı üzerine direkt etkili bir unsurdur. Çimentonun tipi, karma oksit bileşenlerinin miktarı ve katkı malzemeleri ile ilgilidir. C_3A oranının %10 üzerinde olanların KYB dizaynında kullanılmaması tavsiye edilmektedir [82]. Fazla C_3A hızlı etrenjit oluşumu ve yüksek hidrasyon ısısı nedeniyle işlenebilirlik kaybına neden olur. Katkı maddesi kalker esaslı bir çimentonun hidrasyon ısısının, uçucu kül katkılı çimentoya göre daha düşük olacağı bilinmektedir [83]. Aynı kimyasal bileşime sahip çimentolarda, incelik miktarı önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. İncelik miktarı, kullanılması gereken su miktarı ile doğru orantılı, su miktarı ise dayanım ile ters orantılıdır. Burada optimum değer çimento özellikleri veya çeşidi ile belirlenecektir. Çimentoların, farklı toz malzemelerle (uçucu kül, silis dumanı vb.) ve farklı kimyasal katkılarla farklı uyumlar gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle, aynı karışım oranlarına sahip KYB’lerde sadece çimento tipi değiştirilerek daha başarılı KYB’ler elde edilebilir [84].

Dayanım ve dayanıklılık açısından çimento dozajının 350–450 kg/m³ arasında seçilmesi tavsiye edilmektedir. 500 kg/m³’ün üstünde kullanımı rötreyi arttıracığından tavsiye edilmez. 350 kg/m³’ün altında kullanımı ise, ilave fillerle veya viskozite arttırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması halinde uygundur. Eğer viskozite ayarlayıcı kimyasal katkı kullanılmıyorsa, kendiliğinden yerleşen betonda toplam toz madde miktarı hiçbir zaman 500 kg/m³’ün altına inmemelidir [82].

3.3.2. Toz malzeme (Filler)

125 mikronun altında kalan malzemeler toz malzeme olarak tanımlanır [82]. Toz malzeme türü ve miktarı KYB’nin özellikle işlenebilirliği üzerinde çok etkilidir. Silis dumanı, uçucu kül, taş tozu ve mermer çamuru gibi toz malzemeler KYB üretiminde viskoziteyi arttırmak için kullanılmaktadır [85,86].

Uçucu kül, termik santrallerden elde edilen, atık bir malzemedir. Küresel mikro yapısı nedeniyle KYB üretiminde kullanılması uygundur. Bilindiği gibi uçucu küllerin kimyasal bileşenlerinin oranları ve fiziksel özellikleri farklılıklar göstermektedirler. Birçok uçucu kül tipinin KYB üretiminde olumlu özellikler gösterdiği bilinmekle birlikte, deneme karışımları ile ayrıca özellikleri belirlenmelidir [87–89]. Uçucu kül, taş tozuna kıyasla düşük eşik kayma

gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar [90]. Toz malzeme kullanımı, karışımın katı iskeletini zenginleştirir ve malzemeyi daha kompakt hale getirir. Harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar. KYB üretiminde kullanılan toz malzemelerden biride taş tozudur. Özellikle taş ocaklarında elde edilen atık tozlar kullanılmaktadır. Kireçtaşı tozu bunlar içinde en yaygın olanıdır. Ancak tebeşir tozu gibi özel tozlarda kullanılabilir [91–93]. KYB dizaynında ince öğütülmüş (Blaine değeri $> 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$) kireçtaşı tozu, granit, kuvars kumu da kullanılabilir. Taş tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler yaratabilir. Taş tozu elektrostatik olarak negatif, kum ve iri agrega pozitif yüklü olduğundan taş tozu agrega yüzeyine yapışır. Bu yapışmayı engellemek için malzemeleri karıştırma sırasına ve yöntemine dikkat edilmelidir. Mikro yapı incelemesi ile yapılan çalışmalarda en iyi ince kesit görüntüsü, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, sonra agreganın ilave edildiği durumda elde edilmiştir [94]. Taş tozu ile üretilen KYB, diğer puzolanik maddelerin kullanıldığı KYB'lere kıyasla, kür işlemine daha az hassastır. Taş tozunun pürüzlü mikro yüzeyi nedeniyle, yüksek oranda karışım suyu absorbe etmesi ve erken dayanımı hızlandırıcı etkisi sebepleriyle küre hassasiyetinin azaldığı, kabul edilebilir [90]. Öte yandan puzolanik filler kullanılarak üretilen KYB'de priz süresinin uzadığı rapor edilmiştir [95].

Silis dumanı çimento taneciklerine göre yaklaşık yüz kat daha küçük çaplıdır. Ferrosilikon ve silikonlu metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarsın kömürle redüklenmesi sonucu metal üretiminin bir yan ürünü olup, yapısında % 85 ile 98 arasında SiO_2 içerir ve tamamına yakını reaktifdir [96]. Aynı uçucu kül ve diğer puzolanlar gibi C_3S ve C_2S hidrasyonundan gelen serbest kireci bağlar ve ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumuna neden olur. Buradaki CSH yapısı normal çimento hidrasyonundan oluşan CSH yapısından farklıdır. Silis dumanı kullanımı yüzey alanı artışıyla kimyasal katkı absorpsiyonunu arttırdığından katkının efektifliğini azaltır [97]. Bu nedenle silis dumanı, diğer puzolanlar gibi yüksek dozajlarda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en yüksek dozaj, çimento ağırlığının % 15'i, optimum dozaj ise % 10'u kadardır. Bu değerin geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı ve yükselen hidrasyon ısısı sebebiyle uygulamada zorluklar yaşanabilir [98].

Bazı malzemeler ülkeye hatta bölgeye özel olabilmektedir. Bazen madenler çıkarılırken, maddi değeri olmayan toz malzemeler elde edilir. Bunların uygunluğu kanıtlanıp, KYB üretiminde kullanılması mümkündür. Bazen de Çin de olduğu gibi, püskürtülerek oluşturulmuş çelik cüruf agregası gibi malzemeler elde edilir. Bu tür atıklarda KYB üretiminde kullanılmaktadır [99, 100].

3.3.3. Agregas

Agrega betondaki önemli malzeme gruplarından biridir. Bu nedenle beton karışımında agrega ile ilgili en uygun değerlerin kullanılması beton dayanımını ve dayanıklılığını olumlu yönde etkileyecektir. Çakıl ve kum oranı, agrega tipi, en büyük dane çapı ve agrega tane dağılımı gibi özellikler normal betonda olduğu gibi KYB'nin de taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde direkt etkilidir [101].

Geleneksel betonda kullanılabilen tüm agregalar KYB üretiminde de kullanılabilir. Kırma ya da doğal, silisli ya da kalker esaslı agrega KYB üretimi için tercih edilebilir. Ancak doğal agrega iç sürtünmeyi azalttığı için işlenebilirlik açısından kırma agregaya göre daha avantajlıdır. KYB üretiminde kullanılan agreganın 125 µ altında kalan kısmının karışım hesabında toz malzemelere ilave edilmeleri gerekmektedir. Bu KYB reolojisi açısından önemlidir. [82].

KYB'nin döküm sırasında kalıplara yaptığı basınç agrega oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu hidrostatik basınç, karışımında uygun agrega oranı kullanılarak en alt düzeyde tutulabilir. Ayrıca, bu uygun agrega oranına sahip KYB, kalıplara daha hızlı ve uygun yerleşmektedir [102].

Agrega tane dağılımı, KYB de daha fazla önem kazanmaktadır. Çünkü tane dağılımı taze beton özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Ayrıca uygun agrega tane dağılımı, betonun doluluğu ile direk ilgisi olmasından dolayı, gereksiz dayanım kayıplarını da önleyecektir. Uygun oranlar tespit edildiğinde kesikli tane dağılımında KYB de kullanılabileceği bilinmektedir [103–105]. İri/ince agrega oranı diğer önemli parametrelerden biridir. İçsel sürtünme açısından bu oran düşük tutulmalıdır [106]. Kum oranının yüksek tutulması donatılar arasından geçiş yeteneğini de önemli oranda artırır [107]. Ancak iri agreganın miktarının azalması basınç dayanımını olumsuz etkileyebilir. Bu açıdan en optimum kum hacmi Fang vd [108] tarafından % 45- 48 olarak önerilmektedir.

En büyük agrega tane çapı için farklı görüşler mevcuttur. Genel görüş, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneği de dikkate alınarak agrega en büyük tane çapının azaltılmasından yanadır. Üst sınır 16 – 20 mm arasındadır. Sari vd. [106]'ne göre kendiliğinden yerleşen betonda en büyük agrega çapı 5 – 20 mm arasında değişir ama V-hunisinde bloke olma tehlikesini engellemek için 15 mm seçilmesi en uygundur. Collepari [76], hareket sırasında ayrışmayı engellemek için 15 mm'yi uygun bulmuştur.

Agrega tipide KYB özellikleri ve ekonomisi üzerinde direkt etkilidir. Nehir agregası, kırmataş agregasına göre daha az suya ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca kırmataş yüzey özelliklerinden dolayı taze betonun viskozite özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Nehir

agregasına üretim için herhangi bir işlem uygulanmadığı için bu agregaya ile üretilen KYB'ler daha ekonomik olabilirler. Kalker, bazalt ve nehir agregalarının dayanımları farklı olduğundan, karışım özellikleri aynı agregaları farklı betonların özellikle basınç dayanımları da farklı özellikler gösterecektir [109].

Agrega nem içeriği KYB'nin taze özelliklerini etkileyeceğinden agreganın nem içeriği belirlenmeli ve dizaynda dikkate alınmalıdır. Agregaya yüzey neminden kaynaklanan su fazlalığının olumsuz etkisi geleneksel betonda emniyet paylarıyla engellenebilir. Örneğin, çimento dozajını bir miktar yükseltmek dizaynda güvenlik sağlamak için yeterli olacaktır. Fakat kendiliğinden yerleşen betonda su fazlalığı karışımın reolojik özelliklerini kaybetmesine sebep olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton bu açıdan bakıldığında agregaya nemine çok hassastır. Özellikle su emmesi yüksek olan; uçucu kül agregası, pomza kumu, vb. malzemeler kullanılması halinde dizaynda ek önlemler alınmalıdır. Bu durum hafif KYB üretiminde de önemli sorunlardan biridir. Agregaya nemi laboratuvar ortamında tespit edilerek deneysel çalışmalarda kolaylıkla dikkate alınabilmektedir ancak bu, şantiye ortamında biraz daha zordur. Kendiliğinden yerleşen beton üreten santrallerde de bu işlem hassas bir şekilde yapılmalıdır [110].

3.3.4. Kimyasal katkı

Akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, hava uzaklaştırıcı, priz kontrol edici ve viskozite artırıcı gibi ve çoğunlukla sıvı halde bulunan malzemelere kimyasal katkı denilmektedir. Kimyasal katkılar, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento miktarının %5'ini geçmemek üzere eklenen maddeler olarak da tanımlanmaktadır. Hava şartlarına ve ihtiyaca göre farklı nitelikteki kimyasal katkılar beton özelliklerini iyileştirme amacıyla kullanılmaktadır. KYB'yi normal betondan farklı kılan en önemli farklardan biri de karışımında kullanılan farklı kimyasal katkılardır. Bu katkıların en çok kullanılanı yüksek oranda su azaltıcı veya süper akışkanlaştırıcı olarak ifade edilen katkılardır. Betonların diğer özelliklerini iyileştirmek için kullanılan katkılarda mevcuttur. Süper akışkanlaştırıcıları kısaca şöyle özetlemek mümkündür:

1. Sülfone edilmiş sentetik polimerler
2. Polikarbonatlar
3. Karma işlevli sentetik polimerler

Katkı sektöründeki gelişmeler büyük bir hızla devam etmektedir. Özellikle birkaç katkı çeşidinin bir arada kullanılmasıyla, betonun birçok özelliğinin iyileştirilmesi hedefler arasındadır. Özellikle süper akışkanlaştırıcılarla birlikte hava sürükleyici katkı ve viskozite artırıcı katkı kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır [111–113].

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıları, öncelikle süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici katkıları olmak üzere iki türdür. Süper akışkanlaştırıcı katkıları, yüksek akıcılık sağlanması ve su/bağlayıcı oranının düşürülmesini sağlamak amacı ile kullanılır. Viskozite düzenleyici katkıları ise ihtiyaç duyulması halinde terleme ve çökelme gibi ayrışmaları azaltarak betonun homojenliğinin sağlanması ve kayma eşiğinin düşürülmesi için kullanılır. Ancak ayrışma ve terleme problemleri için genellikle toz malzeme miktarının artırılması yoluna gidilmektedir.

Beton karışımında bulunan malzeme özellikleri ve miktarları, beton-katkı performansını önemli ölçüde etkilemektedir [114]. Bu nedenle, özel yapılarda bu durum dikkate alınarak, karışım oranları hesaplanmaktadır. Bu özellik ve farklı katkıları bir arada kullanılarak, Çin de Nan He Köprüsü, Ning-Hang ve Yan-Tang Karayolları, KYB kullanılarak başarılı bir şekilde inşa edilmişlerdir [115].

KYB üretiminde polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasının, taze beton özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaptığı tespit edilmiştir [116]. KYB'nin kullanıldığı her alana göre katkı çeşitleri farklılık göstermektedir. Su altı tünelleri, okyanus sondaj platformları ve rıhtımlar gibi özel deniz yapılarının üretiminde kullanılacak KYB'lerde metilseliloz ve poliakrilamit türü kimyasal katkıların kullanımı olumlu sonuçlar vermiştir [117].

KYB de yüksek dayanım ve/veya yüksek performans için kimyasal katkı kullanımı vazgeçilmezdir. Kimyasal katkıların taze beton reolojisi üzerine etkileri incelenerek, karışım oranları belirlenirken bu durumlarında dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır [118].

Çimento ile kimyasal katkıları arasındaki etkileşim fizikseldir. Katkısız çimento hamuru, karma oksitlerinin elektro-potansiyellikleri gereği, birbirlerini elektrostatik etkiyle çekerek topaklaşır. C_3S ve C_2S negatif zeta potansiyeline sahipken, C_3A ve C_4AF pozitif zeta potansiyeline sahiptir. Bu da çimento taneciklerinin su veya nem ile temas ettiğinde topaklaşmasına sebep olur. Katkı ilavesi ile tüm çimento karma oksitlerinin negatif zeta potansiyeline sahip olduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur [119, 120]. Tüm bileşenlerin negatif yüklenmesi topaklaşmayı önler.

Yeni nesil süper akışkanlaştırıcıları olarak da isimlendirilen polikarboksilik asit bazlı katkıları kullanıldığında, çimento taneciklerinin beton içerisindeki dispersiyonu (dağıtılması) yalnızca elektiriksel itki ile değil, aynı zamanda uzun yan dallar içeren polimer zincirlerinin çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten fiziksel bir itki oluşturması ile de sağlanır [121].

Akışkanlaştırıcı katkılar eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltırlar. Plastik viskoziteyi azaltıcı etkileri yüksek S/Ç oranlarında daha belirgindir. Yüksek S/Ç oranında çok küçük miktarda katkı ilavesi dahi viskoziteyi hızla düşürerek ayrışmaya sebep olabilir. Düşük su/çimento oranlarında katkı ilavesinin akışkanlığı artırıcı etkisi daha yavaştır.

3.3.5. Lifler

Betonun en zayıf yönlerinden biri çekme dayanımının, basınç dayanımının yanında çok düşük olmasıdır. Bu dezavantaj KYB’de de aynı şekildedir. Betonun çekme dayanımının artırılmak istenmesi, lifli beton çalışmalarını gündeme getirmiştir. Milattan önceki yıllardan günümüze kadar kullanılmış olan, saman takviyeli kil harcı (kerpiç) ve at saçından sıva harcı da, lifli beton çalışmalarına esin kaynağı olmuştur. Lifler çeşitli şekillerde ve boyutlarda çelik, plastik, cam ve doğal malzemelerden üretilen, uzunluğu, bükülebilirliği, esnekliği ve dayanıklılığı olan malzemelerdir. Bu malzemeler KYB’nin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, betondan beklenen performansa uygun lif çeşidi belirlendikten sonra deneme karışımları yardımıyla uygun lifli KYB karışım değerleri bulunmalıdır [122].

3.3.6. Karışım suyu

Beton karışım suyu TS EN 1008 uygun olmalıdır. Eğer beton endüstrisinden elde edilen atık sular karma suyu olarak kullanılacaksa, bu suların konsantrasyonuna dikkat edilmeli ve mutlaka deneme karışımları ile önceden KYB özellikleri tespit edilmelidir [123].

3.4. Tasarım Prensipleri

KYB tasarımı geleneksel betona göre daha fazla deneyim ve bilgi birikimini gerektir. KYB’den beklenen performans geleneksel betondan farklıdır. Geleneksel beton dizaynında belirli bir çökme değeri ve basınç dayanımı hedeflenirken KYB’de ise akıcı özelliğe ve düşük eşik kayma direncine sahip olmalı fakat aynı zamanda bu özellikleri gösterirken terleme ve ayrışmaya yeterince dirençli olmalıdır. KYB’de taze haldeki özellikler öncelikli hedeftir. Su/bağlayıcı oranını arttırmak, yüksek şekil değiştirmeyi sağlayabilir, ancak kohezyonu azaltarak betonun akışının tıkanması ile sonuçlanabilecek agreganın ayrışmasına neden olabilir. Kaba agrega, kum ve ince malzeme tanecikleri arasındaki iç sürtünme miktarı, akışa karşı iç direnci belirler [124]. Yüksek akıcılık süper akışkanlaştırıcı katkıları ile sağlanır. Betonun kararlılığı (ayrışma direnci) ise çimento ve/veya toz malzeme miktarının artırılması ile sağlanabilir. Bazen de karışıma viskozite artırıcı kimyasal katkı ilavesi de yapılabilir. Ayrışma

direncinin artırılması için bazen de her iki metot da kullanılabilir. Kendiliğinden yerleşen betondan aşağıdaki özellikler beklenir.

- Akıcılık
- Geçiş yeteneği
- Doldurma yeteneği
- Ayırışma direnci

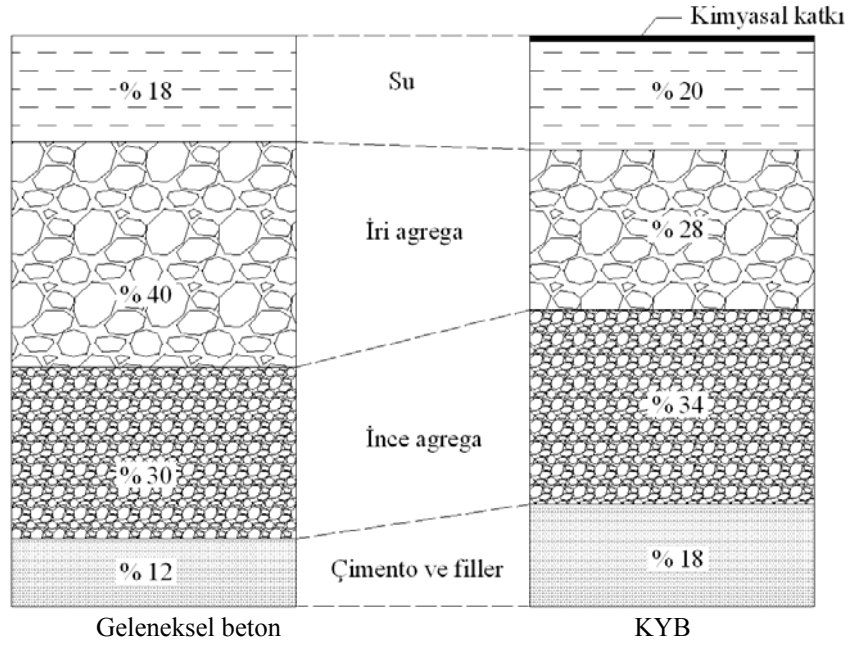
Bu özelliklerin sağlanabilmesi için beton bileşimine giren malzemeler ve bu malzemelerin miktarlarında geleneksel betona göre farklılıklar olur. KYB’de yukarıdaki özellikleri elde edebilmek için aşağıdaki prensiplere uyulmalıdır [82].

- Su/toz oranı sınırlandırılarak, süper akışkanlaştırıcı ilave edilerek ve çimento ile toz malzeme oranının dikkatli bir şekilde seçilmesiyle akışkanlık ve viskozite dengelendirilir.
- Sıcaklık artışını ve rötreyi kontrol etmek için çimentoyla birlikte kabul edilebilir sınırlar içerisinde puzolanik ilave malzemeler kullanılır.
- Pasta, agreganın taşınımı için bir araçtır. Bundan dolayı pasta hacmi agregalar arasında kalan boşluk hacminden fazla olmalıdır. Böylece tüm agregaların çevresi pasta ile sarılacak ve akışkanlık artacaktır.
- İri agrega ince agrega oranı, iri agrega taneleri harç fazı ile çevrelenibilsin diye azaltılır. Böylece taze beton dar bir bölgeyle karşılaştığında iri agrega tanelerinin birbirini sıkıştırıp tıkanmayı önler. Özetlenecek olursa KYB tasarımında iri agrega miktarı ile su/toz oranı azalırken pasta ve süper akışkanlaştırıcı miktarları artmaktadır (Şekil 3.1).

Kendiliğinden yerleşen beton tasarımı için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle klasik dizayn yöntemlerinden daha karmaşık ve deneme yanılmayı gerektirmektedir. EFNARC 2005’de fikir vermesi açısından karışıma giren malzemeler için bir takım sınır değerler verilmiştir. Fakat bu sınır değerlere uyulacak diye bir zorunluluk yoktur. Farklı araştırmacılar ve kuruluşlardan farklı sınır değerler ortaya çıkmıştır. Hatta 2002’de yine EFNARC tarafından yayınlanan rehberde de 2005’e göre farklılıklar vardır (Tablo 3.1). Japon standardı [124] ise yapının şartlarına bağlı olarak farklı sınır değerler önermiştir (Tablo 3.1). Betonarme sistemlerdeki donatı miktarının durumuna göre farklı iri agrega miktarı önerilmektedir. Örneğin m^3 ’de ki donatı miktarı <100 , $100-350$ ve >350 kg olarak sınıflandırılmış ve buna göre sırasıyla iri agreganın tüm karışımdaki miktarı $0.30-0.36$, $0.30-0.33$ ve $0.28-0.30$ olmalıdır.

KYB tasarımında viskositeyi arttırmada kullanılan malzemeye göre isimlendiren üç farklı tasarım yöntemi olduğu literatürde kabul görmektedir. Buna göre KYB toz içeriği artırılarak (toz tipi), viskozite arttırıcı kimyasal katkı kullanarak (stabilizer metodu) veya her iki

metot birlikte kullanılarak (birleşim metodu). Bu metotlarda karışıma giren diğer malzemeler ortaktır.



Şekil 3.1 Geleneksel beton ve KYB'nin karşılaştırmalı karışım oranları

Tablo 3.1.KYB karışım oranları için sınır değerler.

Bileşen	EFNARC 2002 [82]		EFNARC 2005 [10]		JSCE [124]	
	Ağırlık (kg/m ³)	Hacim (l/m ³)	Ağırlık (kg/m ³)	Hacim (l/m ³)	Ağırlık (kg/m ³)	Hacim (l/m ³)
Toz	400–600	160–240	380 – 600			>130
Pasta			300 – 380			
Su		<200	150 – 210			
İri agrega	Karışımın	%28–35 hacimce	750 – 1000		Karışımın	%28–36 hacimce
Su/toz	0.80–1.10 hacimce		0.85–1.10 hacimce			

Toz tipi metodu Avrupa ülkelerinde yaygındır. Kuzey Amerika'da ise stabilizör metodu yaygındır. Toz tipi metodunda viskozite, uçucu kül, silis dumanı, kireç taşı tozu vb toz malzemeler ile arttırılmaktadır. Bu metodu ilk öneren araştırmacı Japon bilim adamı Okamura'dır. Okamura'nın metoduna göre önce hamur ve harç üzerinde denemeler yapılır. Hamur ve harç ile yapılan denemelerde varsa uyumsuzluklar giderilir ve optimum karışım oranları belirlenir. Daha sonra beton denemelerine geçilir. Okamuranın metodunda;

- Ön kabul yapılarak hava miktarı %2 olarak seçilir.
- İnce agrega miktarı harç hacminin %40-50'si olmalıdır.
- Çimento ve toz tipi seçilir ve bunlar ile ilgili hamur deneyleri yapılır. Hamur deneyinde su/toz oranları 1.1, 1.2, 1.3 ve 1.4 olarak alınarak rölatif slump yayılma çapları denklem

3.1'deki gibi belirlenir. Y eksenini su/toz (hacimce) oranını gösterirken x eksenine rölatif yayılma çapları yerleştirilir. Çıkan grafikte oluşan doğrunun Y eksenini kestiği noktadaki su/toz oranı seçilir.

$$\text{rölatif yayılma} = (d_1 - d_0)^2 - 1 \quad (3.1)$$

d_1 : nihai yayılma çapı, d_0 : koni çapı (100 mm)

- Harç deneylerinde hamurdakine ilave olarak kum ve akışkanlaştırıcı ilave edilir. Daha önce belirtildiği gibi kum harcın %40'ı olarak sabitlenir. Su/toz oranı da belirlenmiştir. Burada sadece akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilerek deneme yanılmayla istenilen karışım elde edilir. Harçta rölatif yayılma 5'den küçük ve mini V hunisi akış süresi 7-11 sn değerleri arasında ise beton deneylerine geçilir.
- Beton deneylerinde iri agreganın hacmi tüm agreganın hacminin %40-60'ı arasında olmalıdır.

Su vd. [107] basit bir tasarım metodu geliştirmiştir. Temel prensip yığın haldeki agreganın boşluklarını bağlayıcı pasta ile doldurmaktır. Yazarlar KYB'deki sıkışık birim ağırlığın gevşek birim hacim ağırlığa oranına Packing Factor (PF) olarak tanımlamıştır. Yazarların modelinde: agreganın gevşek birim hacim ağırlık belirlenir. Genellikle agreganın gevşek doldurulduğunda bulunduğu kabın %52-58'lik bir hacmini doldurur. Yani %42-48 oranında boşluk kalır. PF oranına göre iri ve ince agreganın kombinasyonu seçilir. PF yüksek seçilirse agreganın miktarı artar, daha az bağlayıcı karışıma girer ve akışkanlık azalır. Düşük PF değeri ise, betonun kuruma rötresinin artacağı anlamına gelir. Aynı zamanda daha fazla bağlayıcı gerektiğinden maliyet de artacaktır. Bu yüzden optimum PF değeri seçimi önemlidir. Su'nun metodunda agreganın miktarları denklem 3.2 ve 3.3 ile hesaplanır.

$$W_g = PF \times W_{gL} \left(1 - \frac{S}{a}\right) \quad (3.2)$$

$$W_s = PF \times W_{sL} \times \frac{S}{a} \quad (3.3)$$

Burada; W_g : iri agreganın miktarı (kg/m^3), W_s : ince agreganın miktarı (kg/m^3), W_{gL} : iri agreganın havada doygun kuru yüzey haldeki gevşek birim hacim ağırlığı (kg/m^3), W_{sL} : ince agreganın havada doygun kuru yüzey haldeki gevşek birim hacim ağırlığı (kg/m^3), PF: Packing factor (sıkışık birim ağırlığın gevşek birim ağırlığa oranı) ve S/a : ince agreganın toplam agregadaki oranıdır ve genelde %50-57 civarındadır.

Çimento miktarının seçimi; çimento miktarı belirlenirken denklem 3,4'e göre hedef dayanıma göre hesaplanır. Burada: C: çimento (kg/m³), f_c' : hedef dayanım (psi).

$$C = \frac{f_c'}{20} \quad (3.4)$$

Çimento için gerekli olan suyun hesaplanması; KYB'de basınç dayanımı ve su/çimento oranı arasındaki ilişki normal betonun ki ile benzerdir. Su/çimento miktarı ACI 318'e göre belirlenebilir. Belirlenen bu su/çimento miktarında göre su miktarı hesaplanır.

Mineral katkıların hesaplanması; önerilen metotta daha önce hesaplanan çimento miktarı istenilen hedef dayanıma ulaşabilmek içindi. KYB özellikleri için çimento miktarının artırılması hem hedef dayanımı saptıracak hem de maliyeti yükseltecektir. Bu yüzden KYB özelliklerinin sağlanabilmesi için mineral katkı ilavesi yapılmaktadır. İlave edilecek mineral katkı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu olabilir ve mutlak hacim metoduna göre hesaplanır. Çimento, su, hava ve agregadan kalan hacim ilave edilecek mineral katkının hacmidir. Hesaplanan miktardaki mineral katkıya göre su ilavesi yapılmalıdır. Yapılacak olan su miktarı ilavesi testlerle belirlenir. Hesaplanan bu su toplam su miktarına ilave edilir. Nihai su miktarı 160–185 kg/m³'dür.

Hwang [125] kendiliğinden yerleşen hafif beton için bir tasarım modeli geliştirmiştir. Yazarın modeline göre karışım oranları algoritması agrega ve pasta olmak üzere iki kısma ayrılır. Agrega kısmı iri hafif agrega, normal ince agrega ve uçucu külü kapsarken pasta kısmı, çimento, curuf, su ve süper akışkanlaştırıcıyı kapsamaktadır. Yazarın modelinde agregalar arası boşlukları kum ve uçucu kül, kum+uçucu kül boşluklarını da hamur fazı doldurmaktadır. Buna göre ilk önce en optimum kum/uçucu kül oranı belirlenir. Belirli bir kaba gevşek bir şekilde farklı oranlarda doldurularak en yoğun oran belirlenir. Optimum kum+uçucu kül için belirlendikten sonra benzer bir şekilde iri hafif agrega ile en yoğun oran aranır.

Hafif beton elde etmenin bir yolu hafif agrega kullanımıdır. Hafif agreganın boşluklu özelliğinden dolayı üretilen betonun basınç dayanımı bir miktar düşer ve su absorpsiyon kapasitesi artar. Bundan dolayı uygun işlenebilirliği ve istenilen basınç dayanıma ulaşmak için daha fazla çimentoya ihtiyaç vardır. Yine boşluklu yapısından ve pürüzlü yüzey yapısından dolayı KYB tasarımında fazla miktarda toz malzemeye gerek olacaktır.

3.5. KYB Özellikleri

Beton üretiminde kaliteyi belirlemede pratikte en çok kullanılan iki parametre taze betonun çökme değeri ve betonun belirli yaştaki (genellikle 28 günlük) basınç dayanımıdır.

Geleneksel beton basınç dayanımına göre sınıflandırılmaktadır. KYB’de ise durum farklıdır. Basınç dayanımından çok, taze haldeki özellikleri KYB’yi tanımlamada kullanılır [10].

Bir betona “Kendiliğinden Yerleşen Beton” denilebilmesi için aşağıdaki özelliklerin ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının da verilen sınır değerlerin içinde kalması gerekir. Bu özellikler;

- Doldurma Kabiliyeti “Filling Ability”
- Geçme Kabiliyeti “Passing Ability”
- Ayırmaya Karşı Direnç “Segregation Resistance”

Bu parametrelerin ölçülmesi için bazı deney metodları geliştirilmiştir. Ancak hiçbir metot tek başına tüm reolojik özellikleri belirleyebilmede tek başına yeterli olamamaktadır. Bu yüzden kendiliğinden yerleşebilirlik birkaç deneyin bir arada yapılmasıyla anlaşılabilmektedir. EFNARC 2005’de test metodları ve ölçtüğü özellikler Tablo 3.2’deki gibi özetlenmiştir. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan KYB testlerinden bahsedilecektir.

Tablo 3.2. KYB testleri ve ölçülen özellikler

Karakteristik	Test Metodu	Ölçülen değer
Akışkanlık /doldurma yeteneği	Slump yayılma Kajima kutusu	Toplam yayılma Gözlem (doldurma)
Viskozite/akışkanlık	T ₅₀₀	Akış süresi
	V-funnel	Akış süresi
	O-funnel	Akış süresi
	Orimet	Akış süresi
Geçiş yeteneği	L-box	Geçiş oranı
	U-box	Yükseklik farkı
	J-ring	Yükseklik ve toplam yayılma
	Kajima box	Gözlem (geçiş yeteneği)
Ayırma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayırma	Yüzde oran
	settlement column	Ayırma oranı

3.5.1. Slump yayılma deneyi

Bu deney geleneksel çökme (slump) hunisi ve bir yayılma tablası ile yapılır. Yayılma tablasının düz, pürüzsüz ve su emmeyen niteliklere sahip olması gerekir. Yayılma tablasına önceden slump hunisinin yerleştirileceği daire ve bu dairenin merkezi ile aynı olan 50 cm çaptaki başka bir daire işaretlenir. Yayılma tablası üzerine konulan slump hunisi içerisine, şişleme yapılmadan taze beton doldurulduktan sonra, slump hunisi yukarıya çekilerek herhangi bir sarsma yapmadan, betonun kendi ağırlığı ile yayılması beklenir. İki farklı doğrultuda yayılma çapları ölçülerek kaydedilir.

Bu deney sonucunda betonun yayıldığı maksimum çap ve 50 cm çapa yayılma süresi (T_{50}) saniye olarak tespit edilir. Betonun kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği gösterip, doldurma yeteneğinin olması için yayılma değerinin en az 55 cm olması gerekmektedir. Bu değer büyük olması, doldurma yeteneğinin gittikçe artması manasına gelmektedir. Ancak yayılma değeri arttıkça segregasyon riskinin de artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Betondaki segregasyon yaklaşıktaysa, yayılma sınır bölgesinde gözle tespit edilebilir. Betondaki fazla su bu bölgede birikecektir. T_{50} süresinin kısa olması, betonun doldurma yeteneği hakkında fikir verir ve taze betonun viskozitesi ile direkt ilişkilidir.

Çökme yayılma deneyinde sonucu etkileyebilecek değişkenlikler daha çok deneyi yapan kişinin kullandığı aparat ve yöntem (koni çekme hızı ve doğrultusu, yayılma tablasının malzeme sürtünme katsayısı, huni ve tablanın yüzey nem durumu), karışım oranlarındaki elde olmayan değişkenliklere (stok sahasında agrega nem değişkenliği, agrega gradasyonundaki değişkenlikler) bağlıdır. Çökme yayılma deneyi malzeme değişkenliklerini ortaya koyma açısından, iyi bir kalite kontrol deneyidir.

3.5.2. V Hunisi deneyi

Bu deney, taze KYB'un kendi ağırlığı ile özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Deney, KYB'un viskozitesi ve geçiş yeteneği hakkında fikir vermektedir. Aparat olarak özel bir huni kullanılır (Şekil 3.2). Huniye KYB doldurulduktan sonra en altta bulunan sürgülü kapak açılır ve huni içindeki tüm betonun boşalma süresi tutulur. Deney için yaklaşık 10 L taze beton gerekmektedir. Beton karışımında en büyük agrega çapının (d_{max}) 20 mm yi geçmemesi gerekir. Taze beton huniye yaklaşık 10 ± 2 saniyede doldurulmalı ve akış süresi 0.1 saniye hassasiyetle ölçülmelidir. Huninin iç yüzeyindeki nem miktarının her deneyde yaklaşık aynı olmasına özen gösterilmelidir.

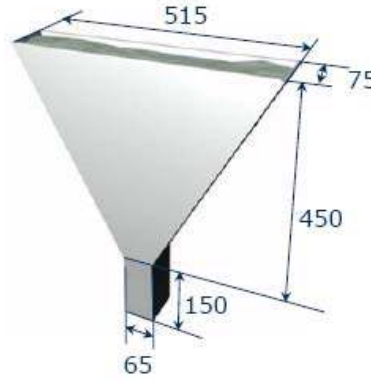
Daha büyük agrega çapları içeren karışımlar için orifis ağzının modifiye edilmesi gerekmektedir. Örneğin, 32 mm maksimum agrega çapına sahip beton karışımları için 75 x 75 mm'lik orifis en kesiti uygundur [126]. Khurana & Topçu [27], farklı maksimum tane boyutuna sahip KYB'lerin 5 x 5 cm açıklıklı V-hunisinden geçiş süreleri için aşağıdaki sınır değerleri önermektedir:

$D_{maks.} = 15 \text{ mm}$ ise 8–12 sn.

$D_{maks.} = 20 \text{ mm}$ ise 11–15 sn.

Deneyde belli hacimdeki betonun (10 lt), orifisten çıkış süresi ölçülür. Betonun akış sebebi kendi ağırlığının eşik gerilmeyi aşması olduğundan, deney viskoziteyle ilişkilendirilebilir. Deneyin yapılışı sırasında beton akmıyorsa yani tıkanma varsa, bunun iki

nedeni olabilir; eşik kayma gerilmesi betonun ağırlığının yarattığı gerilmeden büyüktür. Bir başka tıkanma sebebi de betonun yeterli stabiliteye sahip olmaması durumunda ortaya çıkan ayrışma ile agrega tanelerinin çıkış ağzında birikerek kenetlenme yarattığı tıkanmadır. Bu yüzden V kutusu deneyi ayrışma ile ilgili gözlemsel sonuçlar elde edilebilecek bir deneydir [107].



Şekil 3.2. V hunisi aparatı ölçüleri

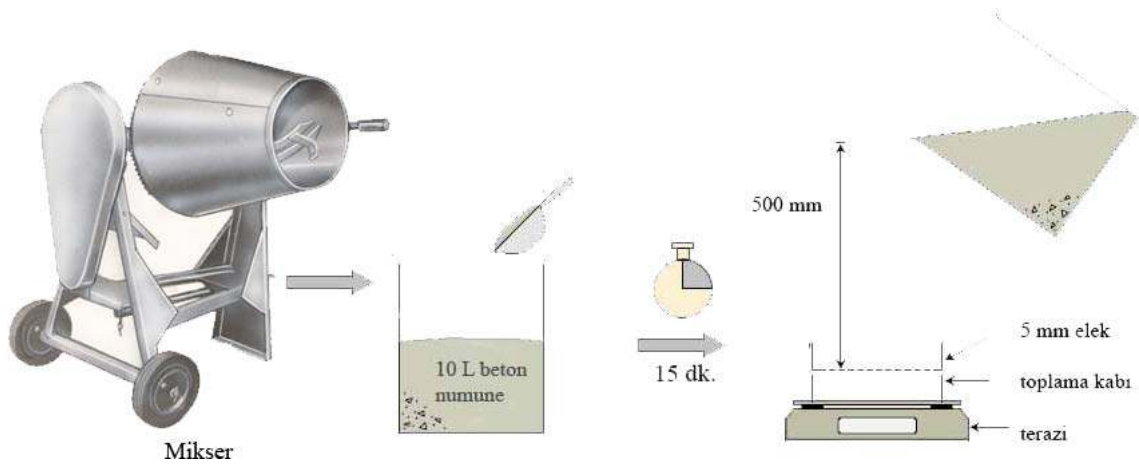
V-hunisi akış süresi deneyi yapıldıktan hemen sonra V-hunisi yıkanmadan yeniden taze betonla doldurularak ve 5 dakika bekletilir ve deney tekrarlanır. Statik ayrışma direnci ölçülür. Bu sırada taze beton yeterli stabiliteye sahip değilse, ayrışma meydana gelir. İri agrega çökelerek bloke olur. 5 dakika sonunda orifis ağzı açılarak akış süresi belirlenir. İlk andaki akış süresine göre 3 saniyeden fazla uzama varsa bu durum statik ayrışma olduğuna işaretler.

3.5.3. Elek ayrışma testi

Segregasyon direnci, taze betonun yerleşmesi ve sertleşmiş betonun yüzey düzgünlüğü açısından çok önemlidir. Ayrışma direnci, doldurma ve geçiş kabiliyeti üzerinde direkt etkilidir. Ayrışma, agrega tane dağılımı, toz malzeme çeşidi ve miktarı, S/Ç oranı ve süper akışkanlaştırıcı (SA) gibi birbiri ile ilişkili olan birçok parametreye bağlıdır. Ayrışmanın olmaması için, uygulama ve döküm şartlarına uygun karışım elde edilmelidir. Ayrışma belirli bir seviyeye kadar kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Bu sınırlar, KYB'nin kullanılacağı yapıya göre belirlenmelidir. Ayrışma olup olmadığı ve yaklaşık olarak ayrışma düzeyinin ne olduğu, doldurma ve geçiş kabiliyeti deneylerinde de gözlemsel olarak belirlenir. Ancak kesin sonuçlar ayrışma direnci deneyleri ile bulunabilir (Şekil 3.3).

Elek segregasyon deneyinde çapı 300 mm, derinliği 40 mm ve elek göz açıklığı 5 mm olan paslanmaz çelikten imal edilmiş elek kullanılmaktadır. Ayrıca en az 10 kg kapasiteli ve 10

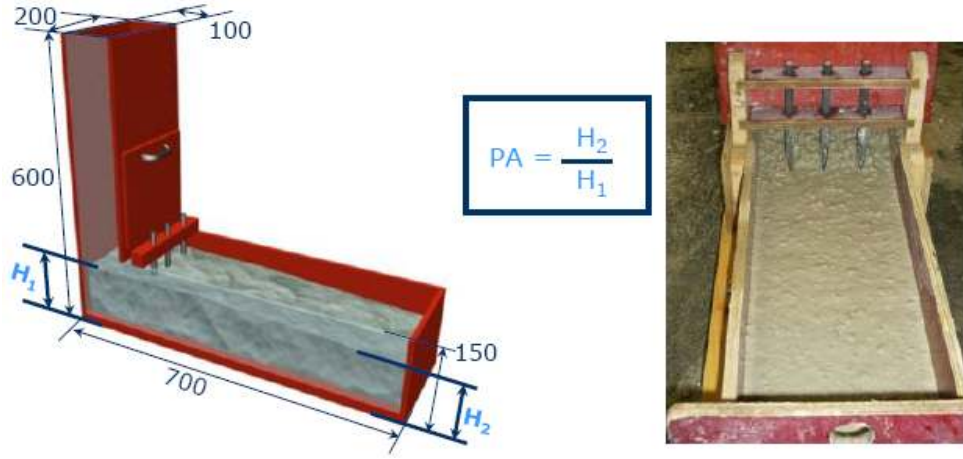
g hassasiyetli elektronik bir terazi ve iki adet kova gereklidir. Taze beton elde edildikten sonra 15 ± 0.5 dk bir kovada bekletilir ve su kuma olup olmadığı gözlemlenir. Bu arada elek ve eleğin altına konulacak kovanın ağırlıkları belirlenir. Daha sonra 4.8 ± 0.2 kg beton eleğin üzerine dökülür. Betonun elekten geçmesi için 2 dakika beklenir. Eleğin altına geçen betonun, toplam betona oranı ayrışma miktarını vermektedir. Bu oran EFNARC’da [10] iki farklı sınıf için maksimum 0,15 ve 0,20 olarak verilmiştir. Statik durumdaki ayrışmayı ölçmesi onun en büyük sınırlılığıdır.



Şekil 3.3 Elek ayrışma deneyinin prosedürü

3.5.4. L Kutusu deneyi

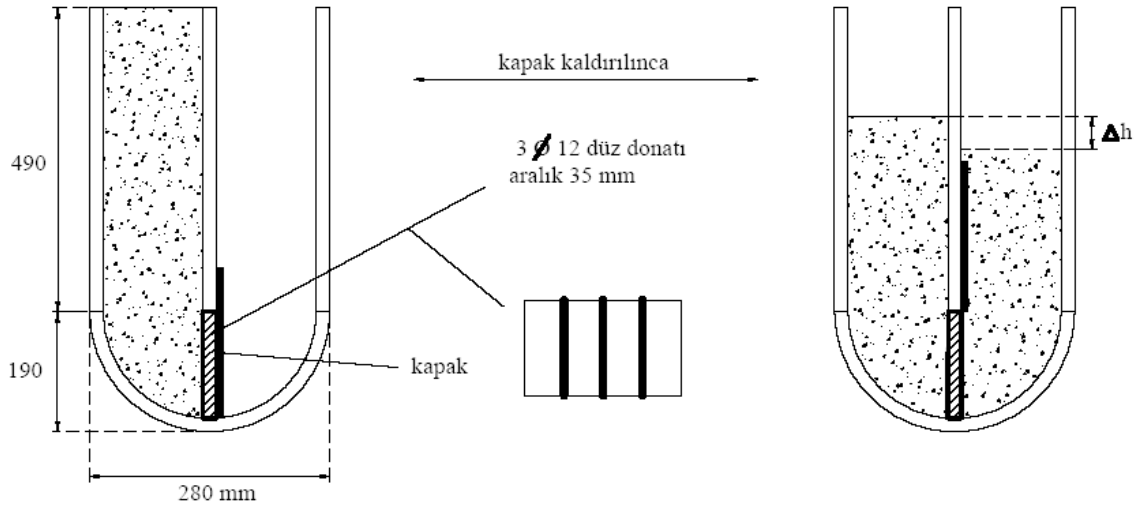
L şeklindeki dikdörtgen kesitli Şekil 3’4’deki aparat ile yapılır. Yatay ve düşey prizmalar arasındaki geçiş kesitinde belirli aralıklarda düşey çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Düşey kısım hareketli bir ayırıcı yardımıyla kapalı durumdayken taze betonla doldurulur. Ayırıcı kaldırılır ve beton, donatılar arasından geçerek yatay prizmayı doldurmaya başlar. Hareket durduğunda donatıların başında ve yatay kalıp ucundaki beton yükseklikleri ölçülür. Bu yükseklikler arası oran (h_2/h_1) hesaplanır. EFNARC Komitesi raporu [82], bu değer 0.8’den küçük olması halinde agreganın bloke olma riski olduğunu belirtmiştir. Fakat Bernabeu [128] yaptıkları deneylerde L-kutusu oranı 0.65 olan karışımların (Yayılma çapı 60 cm) sık donatılı kalıbı rahatlıkla doldurduğunu rapor etmiştir. L- kutusunda geçiş bölgesindeki donatılar arası mesafe en büyük agrega çapının 3 katından az olmamalıdır. Agrega çapına göre donatı aralıkları değiştirilerek aparat modifiye edilebilir.



Şekil 3.4. L kutusu deney aparatı

3.5.5. U kutusu deneyi

Betonun geçiş kabiliyetini ölçmede oldukça etkili metotlardan biridir. Kutunun bir tarafına beton doldurulduktan sonra aradaki kapak açılır ve iki seviye arasındaki fark veya oran geçiş kabiliyetini tanımlamaktadır. Şekil 3.5’de U kutusu deney aparatının boyutları ve kullanım şekli görülmektedir.



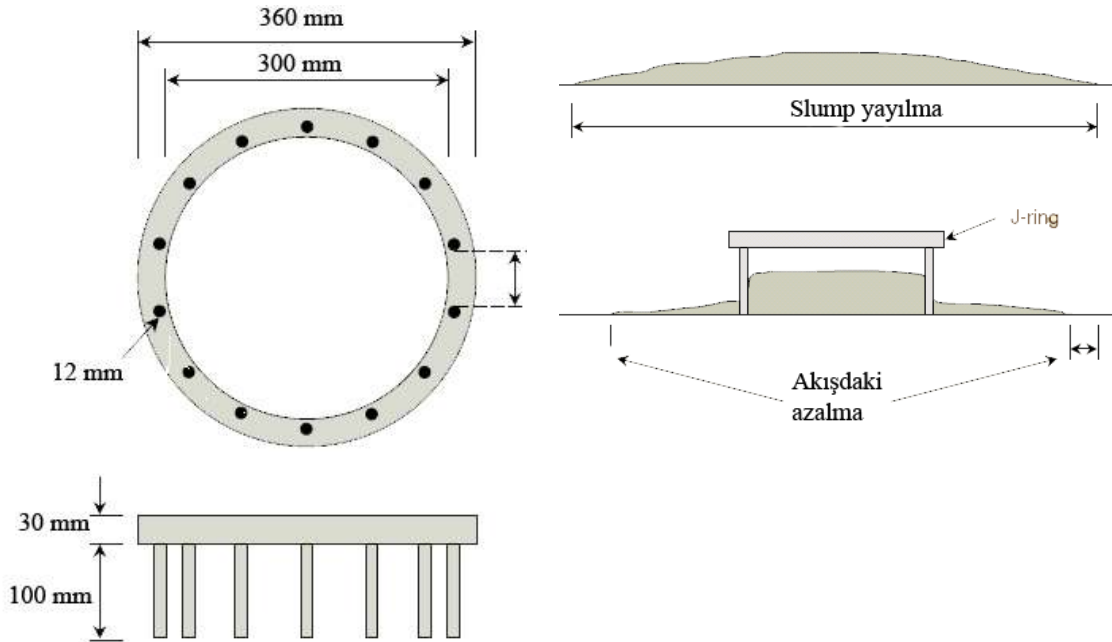
Şekil 3.5 U kutusu deney aparatı

Beton su gibi davransaydı, açık hava basıncıyla eşit kaplar prensibinden kollar arası fark sıfır olacaktı. Kollar arasındaki fark ne kadar azsa, betonun geçiş yeteneği o kadar fazladır. Farkın 3 cm’den az olması iyi geçiş yeteneğine işarettir [82].

Betonun kendi ağırlığı ile çeşitli zorluk derecelerini temsil eden farklı sayıda ve çapta donatılar arasından geçme yeteneğinin belirlenmeye çalışıldığı U şeklinli aparatı, betonun bir koldan diğer kola geçiş yüksekliği belirlenir. Diğer kolda 30 cm ve daha fazla yükselmenin iyi geçiş ve doldurma kabiliyetinin bir göstergesi olduğu kabul edilmektedir [128].

3.5.6. J halkası deneyi

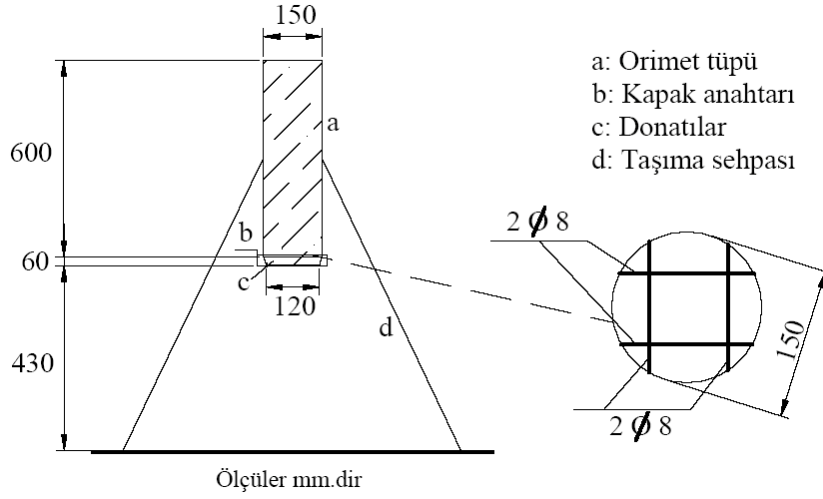
J-halkası deneyi yardımıyla taze betonun geçiş kabiliyeti ölçülmektedir (Şekil 3.6). Slump hunisinin içerisine doldurulan beton, huni kaldırılınca, çubukların arasından akmaya ve yayılmaya başlar. Deney sonucunda yayılma miktarı uzunluk cinsinden ve *T50* süresi saniye cinsinden ölçülebilir. Halka merkezden merkeze 30 cm çapındadır. Üzerinde 18 adet 125 mm uzunluğunda düz demir çubuk bulunur. Bu demirlerin çapları çalışmaya göre farklılık gösterebilir [128].



Şekil 3.6 J halkası deneyi

3.5.7. Orimet deneyi

Orimet deney aparatı 600 mm uzunluğunda ve 80 mm çapında bir tüp ve tüpün altında açılabilir bir kapaktan oluşur (Şekil 3.7). V tipi akma hunisindeki gibi betonun tüpü boşaltma süresi ölçülür. Bu aparatı farklı çaptaki iri agregalara göre boru çapı ve orifis ayarlanabilmektedir



Şekil 3.7. Orimet deney aparatı

3.6. Dayanım Özellikleri

KYB'nin basınç dayanımı, düşük su/toz oranı ve puzolanik fillerlerin etkisi nedeniyle genellikle öngörülen değerden yüksek çıkmaktadır. Bu yüzden dizaynda basınç dayanımı hedefi ikinci plandadır.

Person [130], KYB'lerin aynı mertebedeki basınç dayanımına sahip geleneksel betonlarla karşılaştırıldığında rötire, sünme ve elastikiyet modülünün benzer olduğunu belirtmiştir. EFNARC'da [10] aynı su/bağlayıcı oranlı geleneksel betonla KYB karşılaştırıldığında; KYB'nin az bir miktar daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Bunun da muhtemelen agregaya harç ara yüzey kalitesinden kaynaklanabileceği vurgulanmıştır.

Beton hacminin büyük bir kısmını agregaya teşkil etmektedir. Agreganın tipi ve miktarı Elastikiyet modülü üzerinde oldukça etkilidir. Pasta hacmindeki artış elastikiyet modülünde azalmayla sonuçlanır. KYB'de agregaya hacmi geleneksel betona göre az, pasta hacmi ise yüksektir. Bundan dolayı geleneksel betona göre elastikiyet modülü biraz düşüktür [10].

3.7. Dayanıklılık Özellikleri

Beton, içerden ya da dışardan fiziksel ve kimyasal etmenlere maruz kalır. Zamanla ilk baştaki özelliklerini yitirir. Betonun karıldığı andan artık hizmet veremeyeceği zamana kadar geçen süreye servis ömrü denilmektedir. Beton servis ömrü süresince çeşitli etkilere maruz kalır. Betonun bu etkilere karşı gösterdiği direnç kalıcılık, dayanıklılık veya durabilite

(durability) olarak isimlendirilmektedir. Yapıların servis ömrünün uzatılması için gerçeğe uygun değerlendirmelerin yapılması ve bu sürenin önceden tahmin edilebilmesi tasarımcılar, uygulayıcılar ve kullanıcılar için önemli bir kazanımdır. Türkiye’de özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında kalıcılık önem kazanmıştır. Bu konuya dikkat çekmede atılmış önemli bir adım 2005 yılında düzenlenen “5. Ulusal Beton Kongresinin” teması “Betonun Dayanıklılığı (Durabilite)” seçilmesidir.

Betonun dayanıklılığı ya da kalıcılığının öneminin artması beton teknolojisinin bu yöne kaymasında etkili olmuştur. Özellikle beton için üretilen yan ürünlerden sülfata dayanıklı çimento (SDÇ) ve donma çözülme dayanıklılığını arttırmak için üretilen hava sürükleyici katkı maddeleri beton teknolojisindeki gelişmenin bu yöne kaydığının göstergesidir. Hatta su/çimento oranını düşürmek için üretilen süper akışkanlaştırıcılarda dayanıklılığı artırma çabalarından sayılabilir. Beton bünyesini sonradan terk eden su kapiler boşluklar oluşturarak dayanıklılık yönünden fevkalade sorunlara zemin hazırlamış olur. Bu bölümde en bilindik dayanıklılık problemleri kendiliğinden yerleşen beton açısından literatür taraması şeklinde aktarılacaktır.

Betonda bozulmanın en temel nedenlerinden biri betonun bünyesinde nemin bulunmasıdır. Birçok dayanıklılık problemi nem olmadan ortaya çıkmaz. Örneğin kuru bir beton karbonatlaşmaz, donma çözülmeden etkilenmez, alkali silika reaksiyonu gerçekleşmez vb. Su beton içine zararlı maddeleri taşır, ayrıca kimyasal reaksiyonların oluşumuna katkıda bulunur. Suyun beton içerisine taşınımı; beton içerisindeki boşluğun türüne, çapına ve dağılımına bağlıdır. Bundan dolayı dayanıklılık problemlerinde betonun geçirimliliğinin (kapiler su, basınçlı su ve gaz) araştırılması ön fikir vermesi açısından önemlidir.

3.7.1 Boşluk yapısı ve geçirimliliği

Çimento hamuru ve betondaki çatlak ve boşluklar; çoğunlukla beton teknolojisine uyulmaması sonucu, yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terlemesi veya buharlaşması olayları ile oluşur. Betondaki boşluklar mikro, kılcal ve makro olarak gruplandırılabilir.

Dayanıklı bir beton üretiminde göz önüne alınan en önemli özellik betonun boşluk yapısı ve oranıdır [131]. Bu durum betonun geçirimliliği ile doğrudan bağlantılıdır. Suyun veya diğer akışkanların beton içinde iletimi bu yolla olur ve zararlı maddeler bu şekilde betonun içine taşınır. Bundan dolayı beton içindeki akışkan hareketini iyi anlamak gerekir.

Betonda taşınım üç şekilde gerçekleşir. Birincisi; malzemenin boşluklarının tamamının suya doygun olduğu ve mevcut suyun basıncının etkisi ile meydana gelen doymuş akımdır.

Diğeri; betonun boşluklarının kısmen suyla dolu olduğu, yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle meydana gelen doymamış akım (kılcallık). Sonuncusu ise; betonun boşluklarında iki bölge arasındaki mevcut buhar basıncı farkı dolayısıyla meydana gelen su buharı akımıdır [132–133]. Taşınma çoğunlukla agrega taneciklerini saran ve daha fazla boşluğa sahip olan çimento hamuru içinde olmaktadır. Taşınma işleminin hızı ise boşlukların iletkenliğine, dolambaçlıklarına ve hacim fraksiyonlarına bağlıdır. Bunları ise su-çimento oranı, çimento miktarı, çimento inceliği, çimento tipi, mineral malzemelere, betonun yerleştirilmesine, kür şartlarına ve maruz kalma şartları belirlemektedir [134].

Betonun dayanıklılığını karakterize etmede önemli bir parametre betonun su penetrasyonuna gösterdiği dirençtir [135]. Bu nedenle betona dayanıklılık kazandırmanın yolu geçirimsiz beton üretmekten geçer. Kapiler su emme, basınçlı su geçirimsizliği ve klor geçirimsizliği en yaygın kullanılan deney metotlarıdır.

Basınçlı su geçirimsizliği, basınç uygulaması sonucu betondan bir sıvının ne kadar hızlı geçtiğinin ölçüsüdür. Baraj veya tünel gibi yapılarda basınç yapı dışındaki su basıncı olabilir. Kılcal emme, suyun ıslak yüzeyli küçük boşluklar tarafından yüzey gerilmesinden dolayı çekilmesidir. Betondaki boşluklar ne kadar küçük olursa daha yüksek kılcal emme basıncına maruz kalır.

3.7.2. Aşınma direnci

Aşınma, sürtünen yüzeylerin malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Aşınma miktarı malzemelerin türüne sürtünen yüzeylerin biçimine ve sürtünme koşullarına bağlıdır. Baraj, sulama kanalı gibi çeşitli hidrolik yapılar, nehir veya deniz içerisinde bulunan köprü ayakları veya liman yapıları ile endüstriyel zemin betonları beton yollar vd. çeşitli aşınma etkilerine maruz kalmaktadır. Aşınma oluşma nedenlerine bağlı olarak üç gruba ayrılabilir; (i) sürtünme sonucu oluşan aşınma, (ii) erozyon aşınması ve (iii) kavitasyon sonucu oluşan aşınmadır. Aşınma dayanımını büyük oranda betonda kullanılan agrega belirlemektedir. Erozyon aşınması; içinde askı halinde parçacıklar bulunan sıvıların özellikle yüksek hızlarda beton yüzeyini çizerek aşındırmasıdır. Kavitasyon ise; hızlı akan suların ani yön değiştirmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, değişikliğin yer aldığı bölgenin hemen altındaki bir bölgedeki suda düşük basınç yaratmakta ve bu bölgedeki suda kabarcıklar oluşturmaktadır. Kabarcıklı su beton yüzeyine çarptığı vakit patlamakta ve buda ciddi gerilmelere yol açmaktadır. Bu şekilde oyuklanma şeklinde aşınmalar olmaktadır. Felekoğlu [136]'e göre KYB'ler geleneksel betonlardan daha az aşınma kütle kaybına uğramaktadır.

3.7.3. Donma-çözülme direnci

Sertleşmiş ve suya doygun haldeki bir beton don etkisinde kalınca, çimento harcının içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve yaklaşık %9 oranında genleşir. Çözölmeyi takip eden yeniden donma sonrasında bu boşluklar kümülatif olarak artar. Tekrarlı donma çözölmeler sonrası betonlarda dona dayanıklılığı belirleyen en önemli parametreler betonun doygunluk derecesi, boşluk miktarı ve boşluk tipidir. Suların bulunduğu boşluk çapı donma sıcaklığını belirleyen diğer bir faktördür [137, 8]. Hava sürükleyici katkı maddeleri don direncini artırmada kullanılmaktadır. Yapay olarak oluşturulan hava boşlukları yarı kapalı boşluklardır. Betonun suya doygun olması halinde bile su ile dolmazlar. Suyun donması esnasında oluşan gerilmeler oluşturulan bu düzenli boşluklar sayesinde azalmakta ve bozulmayı önlemektedir. Ancak su-çimento oranı arttıkça hava sürükleyicilerin etkinliği azalmaktadır. Donma çözölmeye maruz kalacak yapılarda bu katkıların kullanılması durumunda su-çimento oranının 0,50 yi aşmaması önerilmektedir [137].

Person [138] KYB'lerin tuz çözöcü etkisindeki yüzeysel donma direncinin normal betonla aynı olduğunu, ancak silis dumanlı yada uçucu küllü KYB'lerin daha iyi sonuç verdiğini, ayrıca içsel donma direncinin normal betonlardan daha iyi olduğunu belirtmiştir. Xie ve diğ. [139] 100 çevrimlik donma çözölmeye neticesinde KYB'lerin ağırlık kaybına uğramadığını ve basınç dayanım kaybının %11 olduğunu belirtmişlerdir. Felekoğlu ve diğ. [136] KYB toz malzemesi olarak uçucu kül ve taş tozunu kullandıkları çalışmalarında iki farklı gradasyonda toplam 4 seri KYB üretmişler. İki farklı su çimentolu geleneksel betonla kıyaslamışlardır. Buna göre; taş tozlu KYB'ler uçucu küllölere oranla daha fazla donma çözölmeye dayanım kaybına uğramışlardır. Hem uçucu küllü hem de taş tozlu KYB'ler geleneksel betondan daha iyi donma çözölmeye direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

3.7.4. Karbonatlaşma

Karbonatlaşmanın en sade tanımı; havadaki serbest durumda bulunan karbondioksitin nemli ortamlarda, hidrate olmuş çimento ile reaksiyona girmesidir. Atmosferde serbest durumda bulunan CO₂, beton içerisinde fazla miktarda bulunan ve betona alkaline özellik veren Ca(OH)₂ ile denklem 3.5'de verildiği gibi reaksiyona girer. Başlangıçta betonun pH seviyesi 12-13 civarında iken reaksiyon neticesinde 9 mertebesine kadar geriler. Karbonatlaşma reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için ortamda bir miktar nemin bulunması gerekir [140–143, 53, 137].

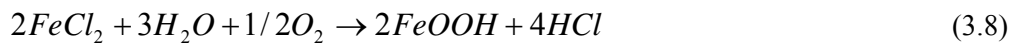


Karbonatlaşma tek başına beton için fazlaca bir sorun teşkil etmez. Onun en büyük sakıncası betonarme sistemlerde donatı korozyonudur. Başlangıçta alkalın yani çeliği koruyan pasif tabaka karbonatlaşma neticesinde bozulur ve çelik korozyona açık hale gelir. Donatının korozyonu beton matrisi ile çelik arasındaki aderansın kaybolmasına ve bunun sonucu mukavemetin azalmasını neden olur. Karbonatlaşma başlangıçta bir dayanıklılık sorunu olmasıyla birlikte dayanım problemi de sayılabilir.

Durabiliteyi etkileyen tüm parametreler betonun karbonatlaşmasında da rol oynamaktadır. Bu parametrelerden biri de betonun boşluk yapısı ve miktarı ile birlikte ortamdaki nemdir. Betonun döküm aşamasında bulunmakta olan sıkıştırma ve yerleştirme işlemi betonun boşluk yapısını ve miktarını önemli derecede etkileyebilmektedir. Tekniğine uygun sıkıştırma ve yerleştirme yapılmayan bir beton her türlü zararlı dış etkilere açıktır [144]. Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre daha homojen ve yoğun bir yapıya sahip olması karbonatlaşma ve diğer geçirimsizlik parametrelerinde onu avantajlı kılmaktadır. En azından yetersiz sıkıştırmadan dolayı boşluk oluşmamaktadır. Ayrıca düşük su çimento oranı ve yüksek toz miktarından dolayı kendiliğinden yerleşen betondan daha geçirimsiz olması beklenebilir.

3.7.5. Klorür geçirimsizliği

Beton alkalinitesi yüksek bir ortamdır. Bu ortam sayesinde çelik yüzeyinde kararlı koruyucu bir oksit tabakası bulunur. Ancak bu ortamda dahi ortamda klorür iyonları varsa pH'ın 11'in üzerinde olması durumunda bile çukurcuk korozyonu oluşur [145]. Klorür ortama dış ortamdan girdiği gibi önceden hammaddeler yoluyla da karışmış olabilir. Klorür iyonlarının dışardan difüzyonu, deniz suyu veya diğer çözeltilerin betonla teması sonucu gerçekleşir [146]. Beton bünyesine bir şekilde nüfuz eden serbest klorürler denklem 3.6, 3.7 ve 3.8'deki gibi bir dizi reaksiyon sonucu hidroklorik asite (HCl) dönüşürler. Bu asit çelik üzerindeki koruyucu pasif tabakayı tahrip ederek korozyonu hızlandırırlar.



Standartlarda beton içindeki çeliğin korozyonuna neden olan Cl^- miktarı çimento ağırlığının veya agrega ağırlığının yüzdesi olarak $1 m^3$ betonda $kg(0,6-0,9 kg/m^3)$ olarak verilmektedir. Örneğin BS 8110'a göre çimento ağırlığının %'si olarak sınır değerler, sülfata dayanıklı çimento ile üretilmiş betonda %0,2, portland çimentosu ile üretilmiş betonlarda %0,4'dür. Daha yüksek orandaki Cl^- , betonun havadan daha fazla nem kapmasına neden olacağı için, betonun elektriksel iletkenliği artacak donatı korozyonu hızlanacaktır [147].

Güneysi [148] silis dumanı ve/veya uçucu küllü betonların klorür difüzyon katsayıları su-bağlayıcı oranına ve mineral katkı tipine bağlı olarak yalın betonunkinden yaklaşık %7–40 oranında daha düşük olduğunu göstermiştir.

3.7.6. Korozyon

Betonarme yapılar için donatının korozyonu en önemli bozulma ve hasar görme mekanizmasından biridir. Korozyon, metallerin kademeli aşınması olarak tarif edilir. Korozyonun elektrokimyasal oluşumu metallerin pozitif yüklü iyonlarının elektrolitik bir ortamın negatif yüklü iyonları karşısında çözülmesi ve osmatik basınçlara bağlı olarak metalde farklı elektrostatik yükler veya potansiyel farklarının ortaya çıkmasıdır.

Bir elektrolit ortamda çözülme gerilimleri farklı olan iki metalin birbirine değmesi sonucu, çözülme gerilimi daha büyük olan metalden çözülme gerilimi daha küçük olana doğru bir elektron akımı başlar. Böylece anot görevini yüklenerek devamlı elektron kaybeden metalden katoda doğru bir elektron akımı olur ve anot görevini üstlenmiş olan metal sürekli tahrip olur.

İki metalin birbirine değmesi sonucu oluşan korozyonun dışında metallerde ayrıca kendi üzerinde hem anot hem de katotdan oluştuğu korozyon şeklide vardır. Kendi kendine oluşan korozyonda bir malzeme yüzeyinin farklı dokuda olması, aynı yüzeyde dövme, haddeleme veya kaynak gibi farklı işlemlerin bulunması veya yüzeyde farklı havalandırmaya maruz yerlerin varlığı gibi faktörler önem kazanır.

Demir ve çelik genellikle; oksijen ve suyun bulunduğu her ortamda korozyona uğrar. Korozyonun gerçekleşebilmesi için daima su ve oksijen gereklidir. Korozyon miktarını her ikisi de belirler. Örneğin, kuru havada çelikte korozyon görülmez.

Betonarme yapılarda donatı korozyonu iki şekilde başlayabilmektedir. Birinci durum normal olarak, bazik özellikte olan pas payı, betonunun yeterli geçirimsizliğe sahip olmaması nedeniyle karbonatlaşarak bazikliğini yitirmesi, böylece donatının korozyona açık hale gelme şeklindedir. İkinci durumda ise korozyon, klor iyonlarının etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Özellikle deniz kenarındaki yapılarda klor iyonları pas payını geçerek, donatıya ulaşabilmektedir. Beton

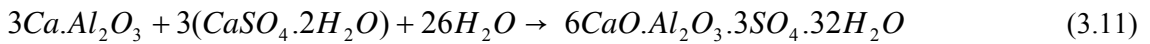
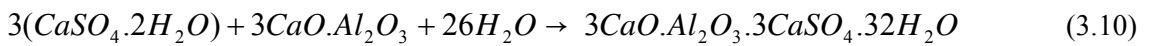
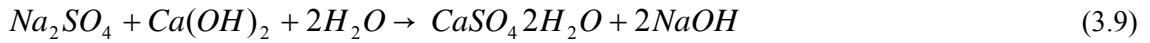
alkalitesi sayesinde betonarme çeliği pasif durumdadır. Çeliğin pasifliğini azaltan koşullar aşağıdaki gibi sıralanabilir [149].

- Ortamda çok fazla Cl^- bulunması (asidik ortama ihtiyaç duyar),
- Pasifliği azaltan iyonların çelik çubuk ile temasta olması ve
- Atmosferdeki karbondioksitin asidik reaksiyonları sonucu betonda alkalinitenin azalmasıdır.

Hem klorür iyonlarının hem de oksijenin betona difüzyonu karbonatlaşma tarafından oldukça fazla etkilenir. Betonun boşluk miktarı karbonatlaşma süresince oluşan ve $Ca(OH)_2$ 'den hacimce daha fazla olan $CaCO_3$ 'ün oluşmasıyla azalmaktadır.

3.7.7. Sülfat dayanıklılığı

Sertleşmiş betonların sülfat içeren sularla karşılaşması durumunda meydana gelen hasar, betonların dayanıklılık problemleri arasında çok bilinenlerden biridir. Doğal olarak oluşan ve beton için zararlı sodyum, potasyum veya magnezyum sülfatlar toprakta bulunduğu gibi yer altı suyunda da çözülmüş halde bulunurlar. Betonun suyu buharlaştıkça, sülfatlar bu yüzeye yerleşir ve böylece sülfat konsantrasyonu artarak betona nüfuz etmek üzere potansiyel oluştururlar [150]. Sülfat iyonları hasar sürecinde ilk aşamada, sudaki sülfatın kalsiyum denklem 3.9'da verildiği gibi sülfata yani alçıya dönüşmesi ve bu alçının denklem 3.10'da verildiği gibi hidrate olarak beton boşluklarında genleşmesi ve betona hasar vermesidir. Bu reaksiyon sonucu katı fazın hacmi %124 artmaktadır. Ancak bu hasar ihmal edilebilir seviyededir. İkinci aşamada alçıtaşı çimentonun trikalsiyum aluminat hidratı ile reaksiyona girer ve denklem 3.11'de verildiği gibi kalsiyum monosülfoaluminata dönüşür. Bu reaksiyonun sonucu katı fazın hacmi %227 artmaktadır. Buda betonun patlayarak parçalanmasına neden olur [136].



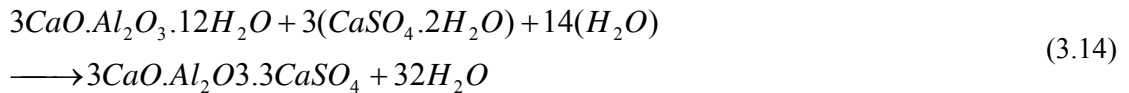
Uçucu kül, silis dumanı veya doğal puzolanlar kalsiyum hidroksiti bağladıklarından dolayı betonların sülfat direncini arttırmaktadırlar. Person [151] kalker filleri kullanarak üretilen KYB'lerin suda kür edilmeleri koşulu ile sülfata dayanıklılık açısından normal betonlardan farklı davranmadıklarını belirtmiştir.

3.7.8. Asitli ortamlara dayanıklılık

Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda bulunan asitler, betonun genişip hasar görmesine yol açan kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Asitlerin betonda yarattığı yıpratıcı etki, "asit hücumu" olarak adlandırılmaktadır.

Birçok yakıtın yanması sonucu açığa kükürt dioksit (SO₂) ve karbon dioksit (CO₂) çıkar. Bu gazlar rutubetli ortamlarda çözülmek suretiyle atmosferdeki asitleri oluştururlar. Asitler daha çok yapılara yağmur suları ile ulaşabilmektedir. Bunun dışında tünel yapıları, kanalizasyon yapıları ve arıtma tesisleri asit etkisi maruz kalan yapılardır.

Organik atık maddelerin taşındığı kanalizasyon sistemlerinde, atık maddelerin içerdiği kükürtlü bileşenler, anaerobik bakterilerle (serbest oksijene ihtiyaç olmadan yaşayabilen bakterilerle) birleşerek, nemli ortamda önce hidrojen sülfid (H₂S) ve daha sonra da sülfürik asit (H₂SO₄) oluşturmaktadırlar (denklem 3.12). Hidrojen sülfid gazının betona yıpratıcı etkisi yoktur. Ancak, bu gazın, beton yüzeyindeki nemli tabakanın içerisine girmesi ve anaerobik bakteriler tarafından sülfürik aside dönüştürülmesiyle, bu asidin betona zararlı etkileri olmaktadır. Kanalizasyon sistemindeki pis su seviyesinin hemen üstündeki bölgede yer alan betonun bu tür asitli sularla karşılaşmasına çok sık rastlanmaktadır. Asit hücumu sonucunda, sertleşmiş betonun içerisindeki kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silika hidrat (CSH) jellerinde çözülme yer almaktadır (denklem 3.13 ve 3.14). Beton yüzeyinde yumuşak (Çamur gibi) ince bir tabaka oluşmakta ve beton pH'ı düşmektedir. Bu tabaka betondan uzaklaşırsa betonun geçirimliğide artacaktır. Beton daha gözenekli duruma gelmekte, dayanımı ve dayanıklılığı daha az olmaktadır. Betonun dayanıklılığını en fazla etkileyen olay denklem 3.14'de gerçekleşmektedir. Burada hidratasyon ürünlerinden betona bağlayıcı özelliği veren CSH yapısı bozulmaktadır.



Asitler çimento matrisine ulaştığında hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girerek tuzlara dönüşürler. Bu tuzlar suda yüksek çözünme kabiliyetine sahiptirler. Tüm bunların neticesinde sürekli olarak porozite artar, mukavemet azalır ve korozyon hızlanır [152–153].

3.7.9. Yüksek sıcaklık

Beton yanıcılık açısından A1 sınıfı “hiç yanmaz” malzemeler sınıfına girer. Ancak sıcaklığın artışı ile içyapıda değişimler başlar. Sıcaklık etkisinde, basınç dayanımı kaybına neden olan olayların açıklamasında farklı görüşler olsa da model oluşturulmasında problem: çimento hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluk, agrega çimento ara yüzündeki bağlantı, ısınma sırasında buharlaşan suyun basıncı çimento hamuru ve agregadaki kimyasal yapı değişikliği gibi olaylar esas alınarak incelenmektedir [154]. Yangın sırasında mukavemet kaybı ve kapak atma başlıca ortaya çıkan problemlerdir.

Çimento hamurunda jel yapıyı oluşturan CSH (kalsiyum silika hidrat) katı ögeleri absorpsiyon suyu ile birbirlerine bağlanırlar. Absorpsiyon suyu kolaylıkla buharlaşmaz. Normal dayanımlı betonlarda ancak sıcaklık 300 °C'ye vardığında bu su buharlaşmaya başlar ve mukavemette kayıplar görülmeye başlanır [53, 155]. Serbest su miktarı fazla ise betonda çatlama ve dökülmeler daha erken sıcaklıklarda başlayabilir. CSH'nin dışında diğer önemli bir bileşen Ca(OH)_2 'dir (kalsiyum hidroksit). Ca(OH)_2 530 °C'de CaO 'ya (serbest kireç) %33'e varan bir büzüşme ile dönüşür. Yüksek sıcaklık sonrası CaO 'in yeniden hidrate olması %44'lük bir hacim artışını meydana getirir. 400 °C ısıdan sonra su ile ani soğutmalar bu süreci hızlandırarak numunelerin dağılmasına neden olur. Yüksek performanslı betonlar ise 250 °C'ye kadar sıcaklığa dayanmaktadırlar. Silis dumanlı betonlar 250 °C'de bir miktar mukavemet artışı gösterebilmektedir [156,157].

Günümüzde betondan beklenen farklı özellikler için üretimde cüruf, uçucu kül, silis dumanı vb. puzolan malzemeler ve katkı maddeleri kullanılmaktadır. Yüksek miktardaki atıl olma potansiyelinden dolayı özellikle uçucu kül kullanımının ekolojik faydası da bulunmaktadır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan silis dumanının, yüksek sıcaklığa maruz kalan betona etkileri çeşitli yönleri ile araştırılmaktadır [158–160]. Uçucu kül katkılı betonlarda 121-149 °C'ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle CSH jelinden iki-üç kat daha güçlü olan tobermorit jelini oluşturarak betonun basınç dayanımını bir miktar artırabilmektedirler. Yüksek mukavemetli betonların kılcal boşluklarının boyutu geleneksel betonlara göre daha küçüktür. Bundan dolayı bu boşluklarda oluşan buhar basıncıda geleneksel betondan daha fazladır [137,161]. Hafif agregalar, örneğin pomza ve genleşmiş kil yüksek yangın dayanıklılığına sahiptir [162]. Türker ve diğ. [163] kuvarsit, kalker ve pomza agregaları ile ürettiği harç numunelerinin yangın dayanımlarını incelemişler. Pomza agregalı harçların 500 °C'ye kadar dayanım kaybetmediğini belirtmişlerdir.

3.8. Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton

Hwang [125], Kendiliğinden yerleşen hafif betonla ilgili bir tasarım modeli geliştirmiş. Çalışmasında ince agregayı kırma kum ve iri agregayı suni hafif agregası olarak kullanmış. Geliştirdiği tasarım modeli Su ve diğ. [107] modeline bir miktar benzerlik göstermektedir. Yazar, çimento dozajı 386 kg/m^3 olduğunda 56 MPa basınç dayanımına sahip betonların üretilebileceğini belirtmektedir. Çalışmasında elde edilen kendiliğinden yerleşen hafif betonların basınç dayanımları $47\text{--}53 \text{ MPa}$ değerleri arasında değişmektedir.

Kadiroğlu [164] yaptığı bir çalışmada; pomza taşı agregaları kullanılarak kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif betonun üretilebilirliği konusunda, laboratuvar bazında deneysel araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada hafif ve kırma taş agregası oranları değiştirilerek 1400 , 1500 , 1600 ve 1700 kg/m^3 etüv yoğunluklarında hafif, aynı zamanda kendiliğinden yerleşen özelliklere sahip betonlar üretilerek bir çalışma yapılmıştır. Karışımda çimento (350 kg/m^3), uçucu kül (170 kg/m^3), silis dumanı (30 kg/m^3) ve kimyasal katkı miktarları (8 kg/m^3) ile en büyük agregası tane büyüklüğü (16 mm) sabit tutulmuştur. Üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları $20\text{--}30 \text{ MPa}$ arasında değişmiştir.

Açıkel ve Günaydın [165] Nevşehir Bims agregası ile kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri kendiliğinden yerleşen hafif betonlar yaklaşık olarak $1400\text{--}1650 \text{ kg/m}^3$ birim ağırlıklara ve $21\text{--}33 \text{ MPa}$ basınç dayanımlarına sahiptirler. Çalışmalarında dere kumu kullanımı ile basınç dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

Türkmen ve Kantarcı [166] normal ağırlıklı kendiliğinden yerleşen betona kattıkları genleştirilmiş perlit agregasının farklı kür şartları altında geçirimsizlik ve mekanik özelliklere etkisini incelemişler. Genleştirilmiş perlit agregasının arttıkça birim ağırlıklar ve basınç dayanımı düşmüş geçirimsizlikler artmıştır. Ancak kuru ortamda kür edilmeleri durumunda referans karışıma göre daha iyi sonuç vermişler.

Topçu ve diğ. [167] doğal kum ve pomza agregası ile kendiliğinden yerleşen yarı hafif beton üretmişlerdir. Hazırlanan karışımların birim ağırlıkları $1780\text{--}2070 \text{ kg/m}^3$ olup basınç dayanımları 40 MPa civarındadır. Agregası tane dağılımı ince bölgeye yaklaştıkça segregasyon direncinin azaldığını ve KYB’de hafif agregası kullanılması durumunda daha yüksek viskoziteye ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Wu ve diğ. [168] iri agregası olarak genleştirilmiş kil ve ince agregası olarak da nehir kumunu kullanarak kendiliğinden yerleşen hafif betonun işlenebilirliği üzerine bir çalışma yapmışlar. Elde ettikleri karışımların iyi işlenebilme özelliklerine sahip olduğunu ve karışımların mukavemetlerinde 40 MPa ’nın üzerinde olduğunu belirtmişlerdir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kendiliğinden yerleşen hafif betonun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin araştırılmasına ve geleneksel hafif beton ile karşılaştırılmasına yönelik çalışmalara ait detaylı bilgiler bu bölümde sunulmaktadır.

4.1. Kapsam

Çalışmada öncelikli olarak pomza agregası için en iyi agrega tane dağılımını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Buna göre hazırlanan karışımlardan en iyi sonucu veren agrega tane dağılımı temel alınarak toz tipinde ve oranlarında değişiklikler yapılarak farklı karışımlar elde edilmiştir. Kullanılan tozlar F ve C sınıfı uçucu küller, silis dumanı, genleştirilmiş perlit tozu ve pomza tozudur. Öğütülmüş pomza tozunun kendiliğinden yerleşen betonda toz malzeme olarak kullanımına daha önce rastlanmamıştır. Çalışmada ayrıca şahit numune olarak geleneksel hafif beton (HB), kendiliğinden yerleşen normal ağırlıklı beton (KYB) ve toz mineral katkı kullanmadan (kimyasal viskozite arttırıcı kullanarak) yapılan kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen betonların taze haldeki özelliklerinin belirlenmesi için her bir karışım 30 dm³'lük miktarlarda pan tipi bir karıştırıcıda hazırlanmıştır. Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşebilmeyi test etmede kullanılan metotlar;

- | | |
|---|--|
| ✓ Slump yayılma çapı, | ✓ V hunisi 5 dk sonra akış süresi, |
| ✓ Slump yayılmada T ₅₀ süresi, | ✓ L kutusu deneyi, |
| ✓ V hunisi akış süresi, | ✓ Segregasyon (elek yöntemi) testidir. |

Taze haldeki özellikleri kendiliğinden yerleşme kıstaslarını sağlayan karışımlardan sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek için aynı karıştırıcıda 40 dm³'lük miktarlarda karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlardan 10x10x50 cm kiriş ve 10x10x10 cm küp örnekler alınmıştır. Pomza agregasının yüksek oranda su tutabilmesinin bir avantaj olabileceğini düşünerek bazı karışımlarda standart kürün (su kürü) yanında kür yapılmadan (hava kürü) muhafaza edilen numunelerde incelenmiştir. Bu durumdaki özellikleri, özellikle dere kumu agregalı kendiliğinden yerleşen betonlar ile kıyaslaması yapılmıştır. Sertleşmiş halde bakılan özellikler;

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| ✓ Eğilme ve basınç dayanımları | ✓ Donma-çözülme direnci |
| ✓ Birim ağırlık | ✓ Yüksek sıcaklık direnci |
| ✓ Su emme ve kılcal su emme | ✓ Karbonatlaşma katsayısı |
| ✓ Basınçlı su geçirimsizliği | ✓ Sülfürik asit direncidir |

4.2. Malzemeler

4.2.1. Çimento ve toz malzemeler

Deneysel çalışmalarda Elazığ çimento fabrikasında üretilen CEM I 42.5 N tipi çimento kullanılmıştır. Çalışmada toz malzeme olarak ise iki farklı tipte uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), toz perlit (TP) ve pomza tozu (PT) kullanılmıştır. Uçucu küller, Sivas kangal ve Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Kangal termik santralinden elde edilen uçucu kül C sınıfı Çatalağzı uçucu külü ise F sınıfıdır. Pomza öğütülüp 125 μ 'luk elekten elendikten sonra kullanılmıştır. Toz perlit ise Etiper markadır. Kullanılan çimento ve toz malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Verilerin hepsi üretici firma verileridir.

Tablo 4.1. Çimento ve toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal	Uçucu kül		Uçucu kül		Silis	
Bileşim (%)	PÇ	Kangal	Çatalağzı	Perlit	Pomza	Dumanı
S(SiO ₂)	21.12	38.34	57.05	72.48	47.65	91
A(Al ₂ O ₃)	5.62	16.69	25.16	13.26	16.08	0.58
F(Fe ₂ O ₃)	3.24	5.11	6.50	-	11.42	0.24
C(CaO)	62.94	27.62	2.10	0.2-0.5	10.2	0.71
MgO	2.73	1.60	2.50	-	4.02	0.33
SO ₃	2.30	4.44	0.34	-		1.06
Na ₂ O	-	-	0.66	3.40		0.38
K ₂ O	-	-	3.65	-		4.34
Cl	-	-	0.0092	-		0.8-1.0
Kızdırma Kaybı	1.78	0.79	0.0014	-	1.83	1.84
Fiziksel Özellikler						
Yoğunluk, (g/cm ³)	3.10	2.3	2.1	0.28		2.20
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3370	2343	3355		1870	144000

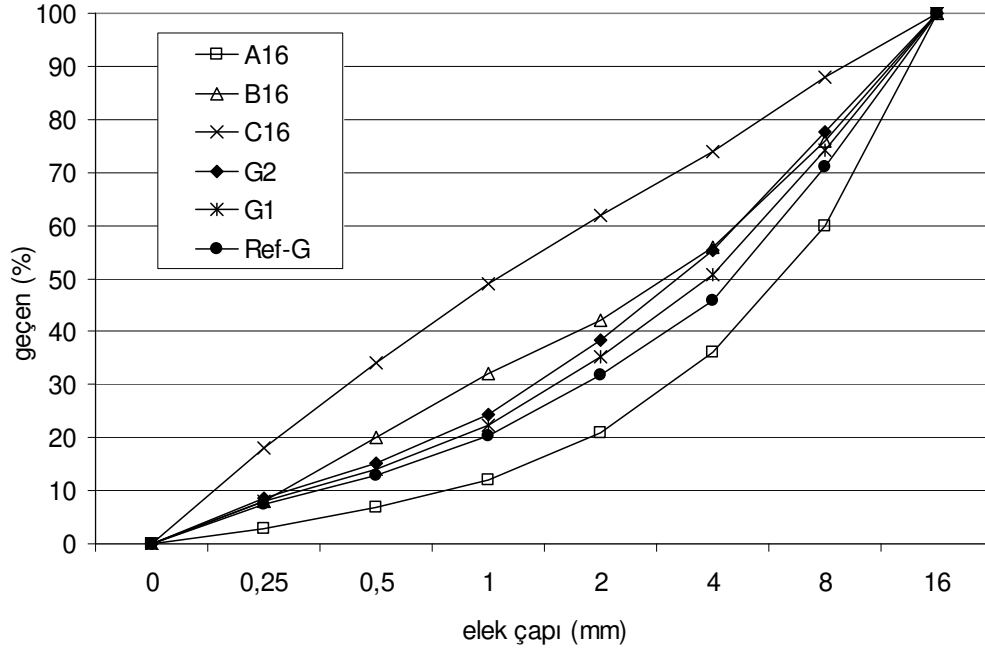
4.2.2. Agrega

Deneysel çalışmalarda farklı kökenli agregalar kullanılmıştır. Bunlar; dere agregası, bazaltik pomza ve perlittir. Dere ve bazaltik pomza agregası sırasıyla Elazığ'ın Palu ve Yeniköy yörelerine aittir. Genleştirilmiş perlit agregası ise Etiper markadır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Deney karışımlarının bir bölümünü agrega tane dağılımına yönelik çalışmalar oluşturmaktadır. Çalışmada Ref-G, G1 ve G2 olarak rumuz verilen 3 farklı agrega tane dağılımına sahip karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların agrega tane dağılımı TS 802'de verilen sınır değerler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Agregaların fiziksel özellikleri

	Pomza		Dere kumu		Perlit
	İri	İnce	İri	İnce	İnce
Kuru özgül ağırlık faktörü (kg/dm ³)	1.91	2.07	2.67	2.73	0.19
Su emme (%)	8.3	17.7	2.0	2,0	140
Gevşek birim ağırlık (kg/m ³)	789	836	1470	1580	0.022
500 devir aşınma (%)	42		5.6		

**Şekil 4.1.** Ref-G, G1 ve G2 serilerinin agrega tane dağılımı eğrileri

4.2.3. Kimyasal katkı

Deneysel çalışmalarda başlangıç dizaynları yapılırken SİKA marka 3. nesil süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Kontrol amaçlı dökülen bir karışımda da mineral katkı yerine viskozite artırıcı katkı (VAK) kullanılmıştır.

4.2.4. Karma suyu

Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e [123] uygun Elazığ İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karma suları herhangi bir depoda bekletilmeden, içme suyu şebekesinden alındığı anda kullanılmıştır.

4.3. Deneyler ve Karışım Oranları

Tüm karışımlar Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Karışımlar 52 dm³ kapasiteli pan tipi karıştırıcı ile hazırlanmıştır. KYHB'lerin taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri 3 grupta incelenmiştir. Bunlar; agrega tane dağılımı, toz tipi ve agrega tipidir. Her bir seriden 24'er adet 10 cm'lik küp numune ve 9'ar adet 10x10x50 cm kiriş numunesi dökülmüştür. Harç kendi ağırlığınca herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan kalıba iki kademedede doldurulmuştur (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. KYHB'lerin kalıplara dökülmesi

Tüm kalıplar önce yarıya kadar doldurulmuş daha sonra ikinci turda tam olarak doldurulmuştur. Ref-A serisi dalgıç tipi vibratör ile kalıba yerleştirilmiştir. Numuneler 1 gün süre için kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve kirece doymun su dolu kür havuzuna bırakılmıştır. 7 günlük numuneler 7 gün, 28 ve 90 günlük numuneleri ise 28 gün kür havuzunda bekletilmişlerdir. Havuzdaki su sıcaklığı 23 ± 2 °C'de sabit tutulmuştur.

Bazı karışımlarda kür şartının etkisi incelenmiştir. Kür şartlarından birincisi yukarıda bahsedildiği gibi standart kür havuzuna bırakılmıştır. Bu numuneler çalışmada su kürlü

numuneler olarak anılmıştır. Hava küründe ise numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuarda güneşe bağlı değişikliklerden etkilenmesin diye karanlık bir odaya bırakılmış ve deney zamanına kadar burada saklanmıştır. Deney sonuçlarından bahsedilirken kuru ortamda bekletilmiş numunelerin rumuzlarının yanına (k) ibaresi eklenmiştir. Odanın sıcaklık ve nem değerleri günlük takip edilmiştir. Ortalama oda sıcaklığı 20 ± 3 °C ve bağıl nemi $\%45 \pm 5$ civarında kaydedilmiştir. Kür havuzuna bırakılmayıp oda da kuru ortamda kür edilen bu numunelerin kür şartı bundan sonra hava kürü olarak anılmıştır. Çalışmanın tamamında hazırlanan karışımların özet görünümü Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Çalışmada hazırlanan serilerin şeması

Simge	Açıklaması	Guruplandırma	Su kürü	Hava kürü
G2	Nispeten ince	Agrega tane dağılımı	√	√
G1	Nispeten orta		√	
Ref-G	Nispeten iri		√	
F1	Uçucu kül %20 (Kangal)	UK ve SD	√	
F2	Uçucu kül %30 (Kangal)		√	√
H1	Silis dumanı %10		√	√
H2	Silis dumanı %20		√	
F3	Uçucu kül 20 toz perlit %10	UK+TP	√	√
F4	Uçucu kül 10 toz perlit %5		√	
F5	Uçucu kül 15 toz perlit %5		√	
H3	Uçucu kül %20 Silis dumanı %10	UK+SD	√	
H4	Uçucu kül %20 Silis dumanı %5		√	
H5	Uçucu kül %10 Silis dumanı %10		√	√
L1	Uçucu kül %20 Pomza tozu %5	UK+PT	√	
L2	Uçucu kül %25 Pomza tozu %5		√	
L3	Uçucu kül 15 Pomza tozu %5 toz perlit %10		√	
Ç1	Çatalağzı uçucu külü F sınıfı %20	UK sınıfı	√	√
Ç2	Çatalağzı uçucu külü F sınıfı %30		√	√
Ref-T	Viskosite arttırıcı kimyasal katkı (VAK)		√	√
P0	Perlit agregası %0 Pomza agregası %100	Agrega tipi	√	
P10	Perlit agregası %10 Pomza agregası %90		√	
P20	Perlit agregası %20 Pomza agregası %80		√	
P30	Perlit agregası %30 Pomza agregası %70		√	
Ref-N1	Düşük dozlu KYB Dere agregası		√	√
Ref-N2	Yüksek dozlu KYB Dere agregası		√	√
Ref-A	Hafif beton HB (vibrasyonlu) Pomza agregası		√	√

4.3.1. Farklı agrega tane dağılımları ile üretilen KYHB karışımları

KYHB üretebilmek için agrega tane dağılımında değişikliklere gidilerek en uygun iri-ince agrega oranı belirlenmesine çalışılmıştır. Yapılan deneme karışımları neticesinde 3 farklı agrega tane dağılımına sahip KYHB üretilenmiştir. Bu karışımların karışım özellikleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Agregatane dağılımına yönelik karışımların karışım özellikleri

Karışım no	Toplam toz kg/m ³ Litre		Su/toz (hacimce)	İri agrega (hacimce tüm karışımın %)	İnce agrega (ağırlıkça agreganın %)	SA kg/m ³
G1	550	180	0,95	29	54	6
G2	550	180	0,95	26	59	6
Ref-G	550	180	0,95	31	50	6

4.3.2. Farklı tozlar ile üretilen KYHB karışımları

UK, SD, TP ve PT kullanılarak 15 farklı mineral katkılı KYHB tasarlanmıştır. Bu karışımları kıyaslamak için mineral katkının kullanılmadığı ve viskozitenin VAK kullanarak sağlandığı 1 adet referans karışımı hazırlanmıştır. Karışımların özellikleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Toz tipine yönelik hazırlanan karışımlarda toz miktarları (%)

	Toplam Toz (kg/m ³)	PÇ	UK	SD	TP	PT	VAK*	Su/toz (hacimce)	İri agrega (hacimce tüm karışımın)	İnce agrega (ağırlıkça agreganın)
F1	550	80	20	-	-	-	-	0,95	31	50
F2	550	70	30	-	-	-	-	0,95	31	50
F3	550	70	20	-	10	-	-	0,95	31	50
F4	550	80	10	-	10	-	-	0,95	31	50
F5	550	80	15	-	5	-	-	0,95	31	50
L1	550	75	20	-	-	5	-	0,95	31	50
L2	550	70	25	-	-	5	-	0,95	31	50
L3	550	70	15	-	10	5	-	0,95	31	50
H1	550	90	-	10	-	-	-	0,95	31	50
H2	550	80	-	20	-	-	-	0,95	31	50
H3	550	70	20	10	-	-	-	0,95	31	50
H4	550	75	20	5	-	-	-	0,95	31	50
H5	550	80	10	10	-	-	-	0,95	31	50
Ç1	550	80	20	-	-	-	-	0,95	31	50
Ç2	550	70	30	-	-	-	-	0,95	31	50
Ref-T	550	100	-	-	-	-	0,5	0,95	31	50

*Bağlayıcının ağırlıkça %’si

4.3.3. Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYHB karışımları

Hazırlanan KYHB’leri kıyaslamak için iki farklı dozaja sahip dere agregalı KYB üretilmiştir. Bu karışımların rumuzları düşük dozajlı Ref-N ve yüksek dozajlı Ref-N2 serisidir. Pomza agregası ile üretilen KYHB’lerde birim ağırlığı biraz daha düşürebilmek için karışımın ince agregası farklı oranlarda perlit agregası ile yer değiştirilmiştir (Tablo 4.6). Tüm karışımları

kıyaslamak için ayrıca KYB özelliği olmayan, vibrasyon ile sıkıştırılmış geleneksel hafif beton (HB) karışımı hazırlanmıştır (Ref-A).

Tablo 4.6. Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYTHB'lerin karışım oranları (%)

	Açıklama	Toplam toz (kg/m ³)	PÇ	UK	Su/toz (hacimce)	Genleştirilmiş perlite ince	İri agrega (hacimce tüm karışımın)	İnce agrega (ağırlıkça agreganın)
P0	KYHB	550	80	20	0,95	0	31	50
P10	KYHB	550	80	20	0,95	10	31	50
P20	KYHB	550	80	20	0,95	20	31	50
P30	KYHB	550	80	20	0,95	30	31	50
Ref-N1	KYB	420	80	20	0,95	-	31	50
Ref-N2	KYB	500	80	20	0,95	-	31	50
Ref-A	HB	400	100	-	0,95	-	31	50

4.3.4. Kür şartının etkisi

Deneyel çalışmalar için hazırlanan serilerden bazılarında (Tablo 4.3) kür şartının etkisi incelenmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler karanlık bir odaya alınmış ve bu ortamın günlük olarak sıcaklık ve nem durumu takip edilmiştir. Ortalama %40–50 arasında bağıl nem ve 18–23 °C sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Bu şekilde deney zamanına kadar bekletilen numuneler çalışmada hava kürü olarak bahsedilmiştir. Basınç dayanımı için 7, 28 ve 90 günde eğilmede çekme dayanımı için ise sadece 28 günde kür şartının etkisi incelenmiştir. Hava kürü yapılan numunelerde su emme ve geçirimsizlik özellikleri ile dayanıklılık deneyleri de yapılmış ve standart su kürü yapılan seriler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'de hava kürü uygulanan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Hava kürü edilen numuneler

4.4. Taze ve Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.4.1. Taze beton deneyleri

Kendiliğinden yerleşebilme kriterleri hakkında farklı kurumların farklı görüşleri bulunmaktadır. EFNARC bile 2002 [82] ile 2005’de [10] çıkardığı kılavuzlarda farklı değerleri öngörmüştür (Tablo 4.7). Japonların standardı [124] da Avrupa’nınkinden biraz farklıdır. Ancak sonuç olarak öngörülerin hepsi birbirine yakındır.

Bir betonun kendiliğinden yerleşebilir olup olmadığını belirlemek için doldurma yeteneğinden, geçiş yeteneğinden ve ayrışma direncinden en az 1’er deneyin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada kendiliğinden yerleşebilirlik testlerinden kullanılanlar Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Kendiliğinden yerleşebilme kriterleri

Metot	EFNARC 2002 [82]			EFNARC 2005 [10]			JSCE [124]		
	Birim	Min.	Max.	Sınıflandırma			Sınıflandırma		
							1	2	3
Çökme Yayılma	mm	650	800	SF1 550-650	SF2 660-750	SF3 760-850	650-750	600-700	500-650
T ₅₀ süresi	sn	2	5	VS1 ≤ 2		VS2 >2	5-25	3-15	3-15
J-halkası	mm	0	10						
V–hunisi	sn	6	12	VF1 ≤ 8		VF2 9-25	10-20	7-20	7-20
V–hunisi 5 dk.	sn	0	+3						
L-kutusu	(h2/h1)	0.8	1.0	PA1 ≥ 0,80 2çubuklu		PA2 ≥ 0,80 3 çubuklu			
U-kutusu	(h2-h1) mm	0	30				≥300	≥300	≥300
GTM Stabilite deneyi	%	0	15						
Elek ayrışma direnci	%	-	-	SR1 ≤20		SR2≤15			
Orimet	sn	0	5						

Tablo 4.8. Çalışmada kullanılan kendiliğinden yerleşebilmeyi ölçen deneyler.

Ölçülen özellik	Deney metodu
Viskozite	V Hunisi akış süresi (sn)
Akışkanlık	Slump yayılma (mm)
Geçiş yeteneği	L kutusu deneyi (mm/mm)
Ayrışma direnci	V hunisi gecikmeli akış süresi (sn)
Ayrışma direnci	Elek testi (%)



Şekil 4.4. Taze beton deneylerinden kullanılan V hunisi ve L kutusu.

Karışımlar 52 dm³ hacimli pan tipi karıştırıcıda her seferinde 30 dm³lük partiler halinde hazırlanmıştır. 30 dm³lük karışım ile slump yayılma, V hunisi, L kutusu, elek ayırma ve taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan V hunisi ve L kutusunun resimleri Şekil 4.4’de verilmiştir.

4.4.2. Basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı

Basınç dayanımı, 7, 28 ve 90 günlük her seriden 3’er adet numuneye TS EN 12390-3’e göre uygulanmıştır. Basınç dayanımlarında 3000 kN kapasiteli hidrolik yük kontrollü dijital göstergeli pres kullanılmıştır. Basınç dayanımı testlerinin her bir zaman dilimi için 3’er adet 10 cm’lik küp numune kırılmış ve bu üç numunenin ortalaması alınmıştır.

Eğilme çekme dayanımında 10×10×50 cm kiriş numuneler kullanılmıştır. Eğilmede çekme dayanımına, standart su kürü yapılan tüm serilerde 7, 28 ve 90 günde, hava kürü yapılanlarda ise sadece 28 günde bakılmıştır. Sonuçlar 3 numunenin ortalaması şeklinde verilmiştir.

4.4.3. Görünür porozite

Porozite testleri için 100 mm küp numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin etüv kuru (W_k), doymun kuru yüzey (W_{dyk}) ve su altındaki (W_s) ağırlıkları tespit edildikten sonra

numunelerin porozite değerleri (4.1) nolu bağıntıya göre bulunmuştur [169–171]. Her bir porozite değeri iki numunenin ortalamasıdır. Porozite belirlemeye yönelik yapılan tartımların yapıldığı deney düzeneği şekil 4.5’da verilmiştir.

$$P = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_{dyk} - W_s} \times 100 \quad (4.1)$$



şekil 4.5. Görünür porozite ölçümü dney düzeneği

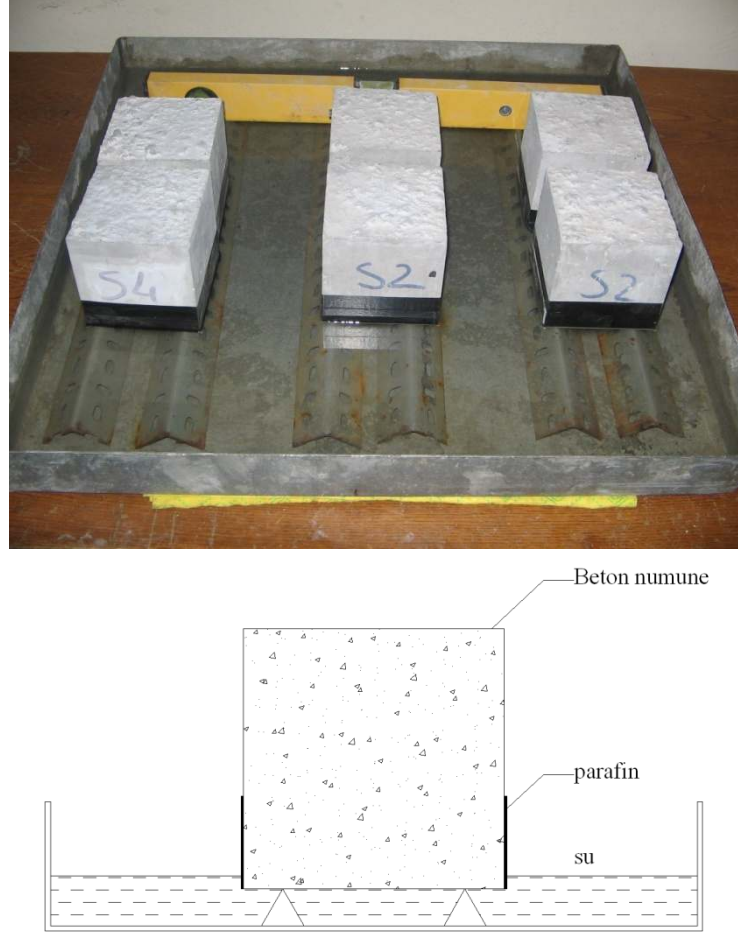
4.4.4. Kılcal su emme

Betonun içerisine su girişi bozulmanın en önemli sebeplerinden biridir. Kılcal boşluklar vasıtasıyla beton içerisine sülfat ve klorür iyonlarının taşınması, kılcal boşluklarda bulunan absorbe suyun donma-çözülme etkisiyle en fazla hasar gören bölgeyi teşkil etmesi bu boşluk türünün önemini göstermektedir.

Numuneler 28 günlük krden sonra 75 ± 5 °C’de değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra 2 saat kadar laboratuvar ortamında (20 ± 2 °C) soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin sınırlı bir alandan su emmesi için yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak suya yerleştirilmiştir. Su yüksekliği numune tabanından 5 mm olacak şekilde ayarlanmış ve deney boyunca seviye korunmuştur. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 ve 1440 dk.) tartılmıştır. Kılcal su emme katsayıları (4.2) nolu bağıntı kullanılarak belirlenmiştir [172,173]. Kılcal su emmede kullanılan deney düzeneği şekil 4.6’da verilmiştir. Kılcal su emme deneyleri her bir seri için 2 adet $10 \times 10 \times 10$ cm’lik küp numune üzerinde yapılmıştır. Denklem 4.2’de; Q =

absorbe olan su miktarı (cm³), A = suya temas eden yüzeyin alanı (cm²), k = kılcal su emme katsayısı (cm/s^{1/2}) ve t zaman (s)'dir.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (4.2)$$



Şekil 4.6. Kılcal su emme deney düzeneği

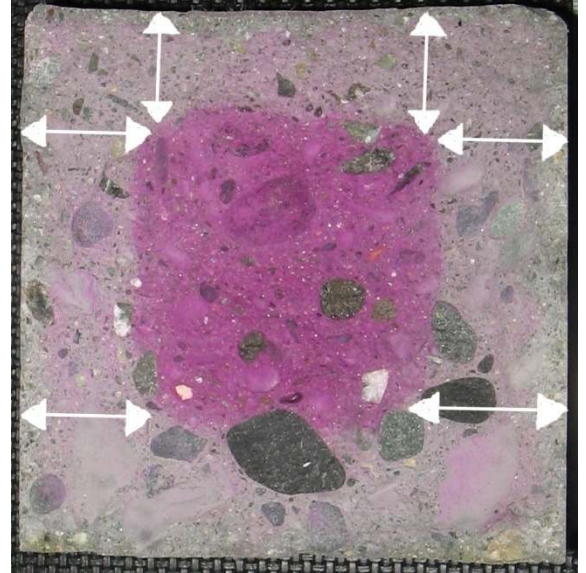
4.4.5. Karbonatlaşma

Karbonatlaşma üzerine araştırmalar normal ortamdaki karbonatlaşma ve hızlandırılmış karbonatlaşma olarak iki şekilde yapılabilmektedir [141, 174, 175]. Normal ortamda yapılan deneyler çok uzun yıllar alabildiğinden genellikle hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinin yapılabilmesi nem, sıcaklık ve karbondioksit oranının kontrol edilebildiği suni bir atmosferin oluşturulmasına bağlıdır. Daha önceki çalışmalarda nem, sıcaklık ve karbondioksit miktarının kontrol edilebildiği bir deney düzeneği geliştirilmiş ve kullanılabilirliği test edilmiştir [176, 177]. Bu çalışmada da bu düzeneğe hızlandırılmış karbonatlaşma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7.a

da bu düzeneğe ait resim ve Şekil 4.7.b’de deney sonrası yarılmış bir numunede karbonatlaşma ölçümünün resimleri görülmektedir. Deney düzeneğine ait ayrıntılı kesit görünüşleri de ayrıca Şekil 4.8. de verilmiştir.

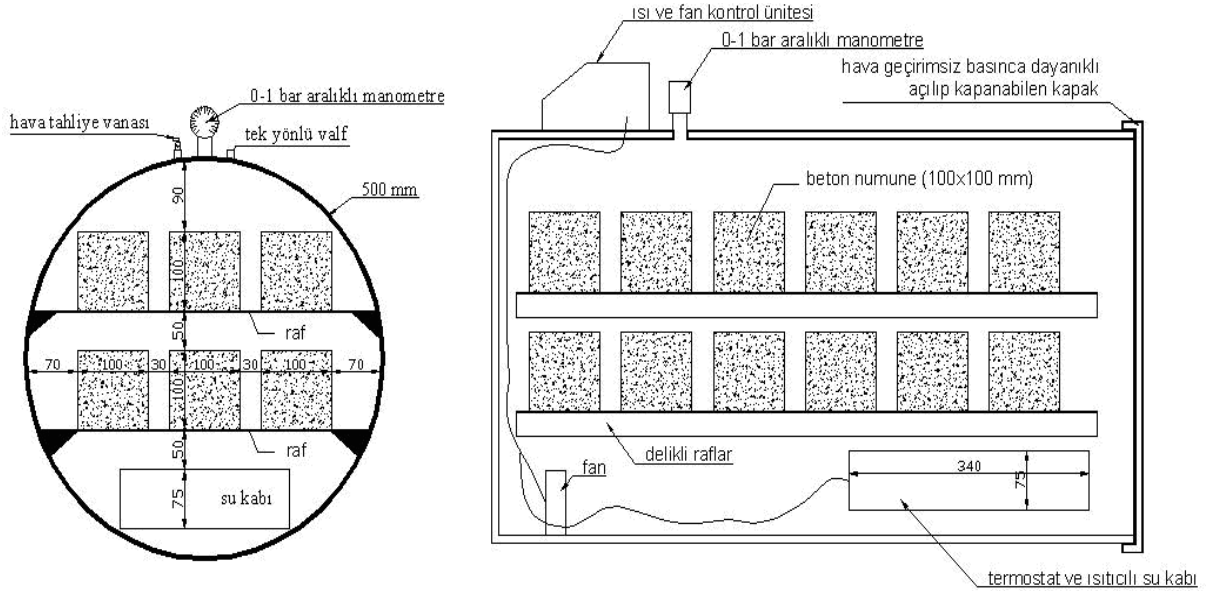


a) Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı



b) Karbonatlaşma derinliğinin ölçümü

Şekil 4.7. Hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzeneği ve karbonatlaşma ölçümü



Şekil 4.8. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı kesitleri

Hızlandırılmış karbonatlaşma düzeneğinde $10 \times 10 \times 10$ cm boyutlarındaki numunelerin aparatta bekletileceği sürenin belirlenmesi için 20 adet beton numune hazırlanmış ve 28 gün $\%95 \pm 5$ bağıl nemli ortamda kür uygulanmıştır. Hazırlanan bu 20 adet numune çeşitli zaman

dilimlerinde aparatın içerisine bırakılmış ve karbonatlaşma derinliklerine bakılmıştır. Bu ön çalışmaya göre karbonatlaşma ilk 1 gün sonunda ölçülebilir seviyeye geldiği gözlenmiş ve 7 günden sonra ise yavaşlamaya başladığı görülmüştür. Ölçülmesi gereken zaman kriterlerinin bu çalışma için 1, 3 ve 7 gün olmasına karar verilmiştir. Fakat karbonatlaşma gelişimi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan dolayı yapılacak başka bir çalışma için yeniden zaman faktörünün belirlenmesi gerekebilir. Denenecek olan numunelerin yaklaşık olarak hangi zaman diliminde karbonatlaşma gelişiminin yavaşlamaya başladığının bilinmesi kıyaslama yapılmasında hata payını azaltabilir.

Çalışmada her bir zaman dilimi için her bir seriden ikişer adet numune denenmiştir. Numunelerin karbonatlaşma derinliklerinin ölçümü Şekil 4.7.b'deki gibi fenolfitalein çözeltisi püskürtüldükten sonra altı nokta üzerinden ölçülerek ortalaması alınmıştır. Karbonatlaşma deneyleri yaklaşık %55 bağıl nemde yapılmıştır. Bu nem oranını sağlayabilmek için düzenekteki su kabına doygun sodium dikromat çözeltisi konulmuş ve suyun sıcaklığı 20 °C'de sabit tutulmuştur. Karbonatlaşma testlerinde ortama karbondioksit verilmeye başlamadan önce deney numuneleri düzeneğin içerisine yerleştirildikten sonra numune ile ortam neminin stabil hale gelmesi için 2 gün bekletilmiştir. Bu beklemin ardından karbondioksit verilmiş ve deney zamanı geldiğinde çıkarılıp karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür.

4.4.6. Donma-Çözülme

Isının sıfırın altına düşmesi durumunda, beton içyapısındaki boşluklarda bulunan su donarak yaklaşık %8 – 9 oranında hacim artışı gösterir. Bu olay betonda çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Ortaya çıkan gerilmelerin betonun çekme direncini aşması durumunda betonda çatlaklar ve giderek parçalanmalar gözlenir. Sertleşmiş betonun donma sonunda çatlamasına neden olan en baskın etken bünyesindeki suyun miktarıdır. Su miktarı fazlaştıkça betonun donma-çözülme süreci sonunda bozulup dağılma riski artar. Buna karşılık boşluklarında su bulunmayan betonlarda donma-çözülme olgusu zararlı etki yaratmaz. Tamamen boşluksuz bir beton üretmek imkânsızdır. Boşlukların suya doygun olması en büyük risktir. Boşluklar tamamen suyla dolu olmasa beton zarar görmeyebilir. Suyla dolu olmayan boşluklar bir çeşit yastık vazifesi görecektir. Nitekim donan suyla gelen hacim artışı bu boşluklara doğru büyüyecek ve gerilme meydana gelmeyecektir. Betonun donma-çözülme direncini arttırmak için uygulamada hava sürükleyici katkıları kullanılmaktadır.

ASTM C666–92 [178]'ya göre donma-çözülme testleri ya 300 çevrim yapıncaya kadar ya da dinamik elastisite modülü orijinal değerinin %60'ına ulaşıncaya kadar sürdürülür. ASTM' de ayrıca çözülme sıcaklığının + 4 °C, donma sıcaklığının -20 °C ve donma hızının da 14

$^{\circ}\text{C/saat}$ olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak dünyanın çoğu yerinde donma hızının 3°C/saat 'e nadiren ulaştığı görülür [146]. Türk standartlarında iki metot tarif edilmektedir [179]. Bunlar havada donma-çözülme ve suda donma-çözülmedir. Her iki rejiminde gerçekleşebilmesi için donma-çözülme aygıtına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada pomza agregasından dolayı yüksek poroziteli numuneler bulunmaktadır. Ancak bu boşlukların büyük bir kısmı agrega fazının içerisinde. Donma-çözülme direncini arttırmak için ayrıca hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Çalışma kapsamında tüm numuneler 100 sert çevrime ($+20$ ve -20°C) tabi tutulmuştur. Her bir çevrim bir donmadan ve bir çözülme ibarettir. Bu çevrim sayısı Jansen [180]'in önerisine uygundur. Deneyler $10\times 10\times 10$ cm ayrıtlı numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Ultra ses hızı betonun dayanımı ve diğer bazı özellikleri hakkında ön fikir verebilir. Betonların donma-çözülme direnci ile dinamik elastisite modülü arasında ilişki vardır [178]. Dinamik elastisite modülü ile ultrasonik dalga hızı arasında doğru orantı vardır. Çalışmada ayrıca ultrasonik dalga hızı ile donma-çözülme dayanıklılığı arasında ilişki aranmıştır. Donma-çözülme çevrimine başlamadan önce numunelerin ultra ses hızları ve buna bağlı hesaplanan dinamik elastisite modülü ile ağırlıklar kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerler donma-çözülme sonrası ile kıyaslanmıştır. Ayrıca çevrimler sonrası basınç dayanımları çevrime tabi tutulmayan kontrol numunelerinin basınç dayanımlarıyla kıyaslanmıştır.

4.4.7. Yüksek Sıcaklık

Baradan [137], 250°C 'nin altındaki sıcaklıklarda betonun dayanımının etkilenmediğini belirtmiştir. Literatürdeki çoğu çalışmaya göre 300°C sıcaklıkların üzerinde beton numuneler etkilenmeye başlamaktadırlar. Bu çalışmada $10\times 10\times 10$ cm boyutlarındaki numuneler, F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Laboratuvarında bulunan ısınma hızı 6°C/dakika olan 1200°C kapasiteli Protherm HLF 150 laboratuvar tipi fırında (Şekil 4.9), 1 saat süre ile 300 , 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Her bir sıcaklık değeri için üçer numune kullanılmıştır. Hedef sıcaklıkta 1 saat süre çalışan fırın daha sonra otomatik olarak kapanmış ve numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Tüm numunelere ultra ses ve basınç dayanımı deneyleri yapılmış ve elde edilen tüm sonuçlar, laboratuvar ortamında bekleyen numunelerden alınan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Laboratuvar ortamında bekleyen numuneler fırından çıkan numunelerle aynı nem içeriğine ulaşması için etüvde 105°C 'de sabit ağırlığa kadar kurutulmuşlardır.



Şekil 4.9. Yüksek sıcaklık testlerinde kullanılan fırın

4.4.8. Sülfürik asit dayanıklılığı

Kimyasal dayanıklılık deneyleri için sülfürik asit çözeltileri kullanılmıştır. Deneylerde 10 cm’lik küp numuneler kullanılmıştır.

Sülfürik asit deneylerinde %5 H_2SO_4 (sülfürik asit) çözeltisi hazırlanmış ve numuneler bu çözeltilere bırakılmıştır. Numuneler 45 gün sülfürik asit çözeltisinde bekletilmiştir. Çözeltide bekleme süresinde buharlaşma olmasın diye numunelerin bırakıldığı kaplar jelâtin ile kapatılmıştır. Deney sonrası numunelerde hacim kaybı, birim ağırlık, görünür porozite ve basınç dayanımı ölçümleri gözlenmiştir.

4.4.9. Ultra ses hızı ve dinamik elastisite modülü

Ultrasonik testler donma-çözülme ve yüksek sıcaklık deneylerinde önce ve sonrasında ölçülmüştür. Numunelerde iki farklı yönde okuma yapılmış ve bunların ortalamaları kaydedilmiştir. Ultrasonik deney yönteminde; ses üstü dalgaların betonun içerisinden geçme süresini ölçmek üzere tertiplenen bir cihaz kullanılmıştır. Ultrasonik testler betonun nem durumundan etkilendiği için [8], yüksek sıcaklık numunelerinde test öncesi numuneler etüvde kurutulmuşlar ve yüksek sıcaklık sonrası yine kuru haldeyken ölçülmüştür. Donma-çözülme deneylerinde ise hep doymuş yüzey kurusu (DYK) haldeyken okumalar yapılmıştır.

Bu cihazla, dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasında kalan, yüzeyleri temiz numunelerden sesüstü dalgaların ne kadar zamanda geçtiği otomatik olarak belirlenmiş ve (4.3) nolu bağıntı ile dalga hızı hesaplanmıştır [8].

$$V = (h / t) \times 10^6 \quad (4.3)$$

Formüldeki; V = Sesüstü dalga hızı (m/sn), h = Beton numunenin sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (m), t = Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden alındığı yüzeye kadar geçen zaman (µsn) dır.

Dinamik elastisite modülü, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme deneylerinde hasar gören ve görmeyen numunelerde kıyaslama yapmak için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ASTM C 215’de tarif edilen denklem 4.4’e göre yapılmıştır. Burada; E_d dinamik elastisite modülü (MPa), V ultra ses hızı (km/sn), n betonun yoğunluğu (kg/m^3), μ poisson oranı.

$$E_d = \frac{V^2 n(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (4.4)$$

4.4.10. Basınçlı su geçirimliliği

Basınçlı su geçirimliliği deneyleri, her bir seriden 3’er adet 10x10x10 cm ayrıtlı küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Hesaplanan geçirimlilik katsayısı bu üç numunenin ortalamasıdır. Basınçlı su geçirimlilik deneyinin yapıldığı düzenek Şekil 4.10’de verilmiştir.

Her bir deneyde 6, 24 ve 72 saat süresince numunelere 5 bar basınç altında belirli bir alandan basınçlı su uygulanmıştır. Sonuç olarak basınçlı su geçirimlilik katsayısı (permeabilite) denklem 4.5 ile hesaplanmıştır. Concrete Society 1988’e [181] göre bu şekilde hesaplanan geçirimlilik katsayıları Tablo 4.9’deki gibi sınıflandırılmaktadır.

$$K = \frac{Q.l}{p.A} \quad (4.5)$$

Burada; K basınçlı su geçirimlilik katsayısı (m/sn), Q suyun debisi (m^3/sn), A alan (m^2), t zaman (sn), l yükseklik, p basınçtır (santimetre su sütunu).



Şekil 4.10. Basınçlı su geçirimsizliği deneyi

Tablo 4.9 Geçirimsizlik katsayılarının değerlendirilmesi

	Düşük	Orta	Yüksek
Geçirimsizlik katsayısı Sıvı m/sn	$<10^{-12}$	10^{-12} - 10^{-10}	$>10^{-10}$

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde hazırlanan 26 farklı karışımın taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deney sonuçları ve değerlendirmeler, taze beton, geçirimsizlik, dayanım ve dayanıklılık ana başlıkları altında incelenmiştir.

5.1. Taze Beton Özellikleri

Farklı agrega tane dağılımına sahip KYHB karışımları:

Agrega tane dağılımının etkisini incelemeye yönelik Ref-G, G1 ve G2 agrega tane dağılımlı numuneler KYB özelliği göstermiş ve aynı zamanda birim ağırlık açısından da hafif beton sınıfına girmiştir. Hazırlanan bu üç karışımın kendiliğinden yerleşebilirlik sonuçları EFNARC [10] ve JSCE [124] tarafından belirtilen sınır değerlere uymaktadır. Ref-G, G1 ve G2 serilerinin taze beton özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı agrega tane dağılımına ait karışımların taze beton özellikleri

Simge	Slump (mm)	T50 (sn)	V hunisi İlk (sn)	V hunisi 5 dk (sn)	L kutusu (mm/mm)	Elek ayrışma (%)	Taze br.ağr. (gr/dm ³)
G2	630	2.6	16	+4	0.85	8.3	1960
G1	670	1.5	13	+3	0.82	8.3	1920
Ref-G	670		11	+1	0.80	5.4	1900

Ref-G serisinde V hunisi süreleri arasında 1 sn’lik fark olması en yüksek ayrışma direncine bu serinin sahip olduğunu göstermektedir. Ayrışma direncini ölçen diğer bir deney olan elek ayrışma testi sonuçları da bu sonucu doğrulamaktadır. İri agrega miktarının artmasıyla taze beton birim ağırlığı da azalmış ve ayrıca kendiliğinden yerleşebilme özellikleri de daha iyi olmuştur. Her 3 karışım da KYB özelliği göstermesiyle birlikte bu 3 karışım arasında sonuçları daha iyi görünen Ref-G serisinin agrega tane dağılımı diğer karışımlar için baz olarak seçilmiştir.

Farklı Toz malzemeler ile üretilen KYHB karışımları:

Agrega tane dağılımı belirlemesine yönelik çalışmalardan sonra seçilmiş olan tane dağılımı (Ref-G) ile toz tipinin ve miktarının belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ref-G agrega tane dağılımı sabit olmak üzere karışımların toz tipi ve miktarı değiştirilerek en uygun oranlı karışımlar aranmıştır. Bu karışımların taze haldeki özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

UK miktarının artışı (F2) slump yayılma çapını, V hunisi 5 dk süresini ve elek ayırışma oranını arttırmıştır. SD'nin artışı (H2) ile ise karışımların viskozitesi biraz artmıştır. SD'li karışımlarda slump yayılma çapı ve elek ayırışma oranı azalmış V hunisi akış süreleri kısalmıştır. SD'nin blaine inceliğinin daha fazla olmasından dolayı daha fazla suya ihtiyaç duyması ve su miktarının karışımlarda sabit tutulması bu sonucun alınmasında etkili olmuştur.

Tablo 5.2. Toz tipine yönelik yapılan karışımların taze haldeki özellikleri

Simge	Slump (mm)	T50 (sn)	V hunisi İlk (sn)	V hunisi 5 dk (sn)	L kutusu (mm/mm)	Elek ayırışma (%)	Taze br.ağr. (gr/dm ³)
F1	630		10	+3	0.87	7.9	1920
F2	710		14	+9	0.89	11.0	1910
H1	650	2	6	+0	0.83	7.7	1940
H2	630	1.6	8	+1	0.82	7.4	1950
F3	650		11	+3	0.85	7.5	1910
F4	630	1.5	11	+1	0.85	8.7	1940
F5	690	2.4	11	+1	0.88	9.0	1920
L1	670		13	+3	0.82	8.3	1920
L2	630		12	+1	0.86	7.1	1970
L3	650		15	+3	0.84	7.8	1910
H3	670	1.1	5	+2	0.85	8.9	1900
H4	700	1.1	9	+1	0.88	9.2	1940
H5	650	1.5	8	+0	0.83	6.1	1930
Ç1	620	2.4	7	+0	0.82	7.7	1940
Ç2	680		10	+5	0.83	9.8	1920
Ref-T	680		12	+6	0.85	11.5	1975

Ç1-Ç2 serileri F1-F2 serilerine göre daha iyi ayırışma direnci göstermiştir. Ç1 ve Ç2 sepere edilmiş haldedir ve blaine incelikleri kangal termik santralinden alınan UK'lere göre fazladır. Blaine inceliğinin fazla olması da segregasyon oranının düşmesinde etkili olmuştur. Daha viskoz olması sebebiyle de slump yayılma çapları da F1 ve F2'ye göre düşük çıkmıştır.

V hunisi süreleri SD kullanımıyla kısalmıştır. UK ve PT (pomza tozu) V hunisi sürelerini arttırmıştır. Elek ayırışma testlerinde UK'lerin tekli kullanılması ayırışma oranını bir miktar arttırmıştır. İki farklı tozun birlikte kullanımı ise ayırışma oranını azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar KYB özellikleri açısından yeterli olsa da UK'ün yanında bir başka tozun kullanılması ayırışma direnci daha iyi karışımların elde edilmesi açısından önemlidir.

Genel olarak kendiliğinden yerleşebilme özellikleri incelendiğinde ayırışma direnci iyi olan karışımların slump yayılma çaplarının azaldığı görülmektedir. Slump yayılma çapının artması ayırışma riskini ortaya çıkarmaktadır.

Farklı agregalar ile üretilen HB, KYB ve KYHB karışımları:

Elde edilen KYHB'lerin birim ağırlıklarını biraz daha düşürebilmek amacıyla karışımın ince agregası (pomza) genleştirilmiş perlit agregası ile yer değiştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan

karışımların ve bunun yanında dere agregası ile üretilen KYB'lerin taze haldeki özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir. Ayrıca genel bir kıyaslama yapmak için üretilen hafif betonun (HB) sadece birim hacim ağırlığı verilmiştir.

Genleştirilmiş perlit agregası takviyesinde en fazla %30 oranında yer değiştirmeye kadar kendiliğinden yerleşebilme özellikleri sağlanabilmiş bu orandan sonra istenilen özellikler sağlanamamıştır. Genleştirilmiş perlit agregasının yüzey özellikleri pomza agregasının yüzey özelliklerine benzerdir. Ancak birim ağırlıkları arasında oldukça fark vardır. Bu farklılık V hunisi 5 dk gecikmeli akış süresinin biraz artmasına neden olmuştur. Bu artış en fazla P30 serisinde olmuştur. Elek ayrışma testi de bu serinin ayrışma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Perlitin pomzaya göre hafif olmasından dolayı bu agregalar yukarıya çıkma eğilimindedir. Karışımında herhangi bir değişiklik (perlit-pomza ikamesi hariç) olmadığından dolayı perlit miktarındaki artışla birlikte segregasyon direncinde azalma olmuştur.

Tablo 5.3. Genleştirilmiş perlit agregasının ilave edildiği karışımlarının taze beton özellikleri

Simge	Slump (mm)	V hunisi İlk (s)	V hunisi 5 dk (s)	L kutusu (mm/mm)	Elek ayrışma (%)	Taze br.ağr. (gr/dm ³)
P0	630	10	+3	0.87	7.9	1920
P10	660	11	+4	0.82	6.4	1900
P20	690	17	+2	0.80	7.0	1880
P30	660	11	+6	0.80	12.1	1860
Ref-N1	670	5	+0	0.90	2.5	2385
Ref-N2	710	4	+1	0.94	14	2395
Ref-A	-	-	-	-	-	1895

Kendiliğinden yerleşebilme özellikleri açısından dere agregalı seriler Ref-N1 ve Ref-N2 incelendiğinde slump yayılma çaplarının diğer seriler ile benzer olmasına karşın V hunisi sürelerinin kısalığı dikkat çekmektedir. Dere agregasının birim ağırlığının pomza ve perlit agregasına göre daha ağır olmasının, V hunisinden boşalmayı hızlandırmada etkili olduğu düşünülmektedir.

5.2. Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri

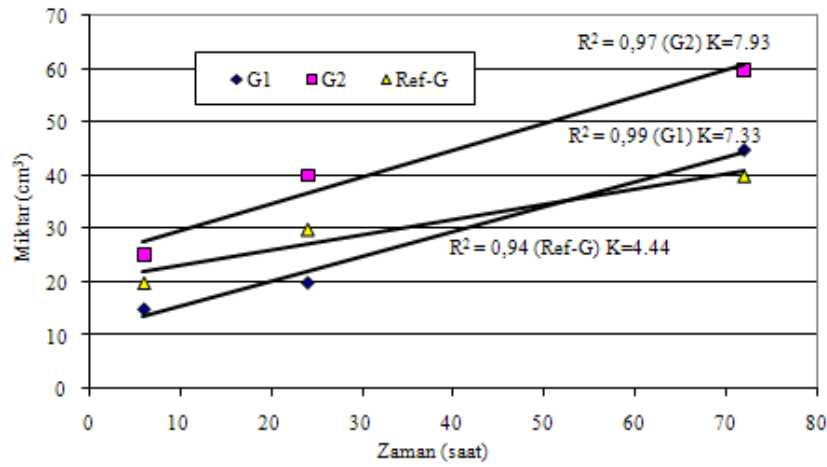
Farklı agregata tane dağılımlı KYHB'lerin su emme ve geçirimsizlik özellikleri:

Tane dağılımının etkisini belirlemeye yönelik hazırlanan karışımların su emme, porozite, kılcal su emme ve kuru birim ağırlıkları Tablo 5.4'de sunulmuştur. Tabloda da görüleceği üzere agregata tane dağılımı irileştikçe kuru birim ağırlıklar azalmaktadır. İri agreganın daha hafif olması bu sonuçta etkili olmuştur. Agregata tane dağılımı irileştikçe su

emme, kılcal su emme ve porozite değerleri azalmıştır. Bunun dışında, agrega tane dağılımı incelendiğinde basınçlı su geçirimsizlik katsayısı artmıştır (Şekil 5.1).

Tablo 5.4. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları

Rumuz / Kür şartı	Kuru br. ağır (gr/dm ³)		Su emme (%)		Porozite (%)		Kılcal su emme (cm/sn ^{-1/2})	
	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava
G2	1800	1737	12.3	13,5	21.1	23.5	2.067	2.798
G1	1780	-	11.8	-	19.9	-	1.920	-
Ref-G	1760	-	10.4	-	18.5	-	1.798	-

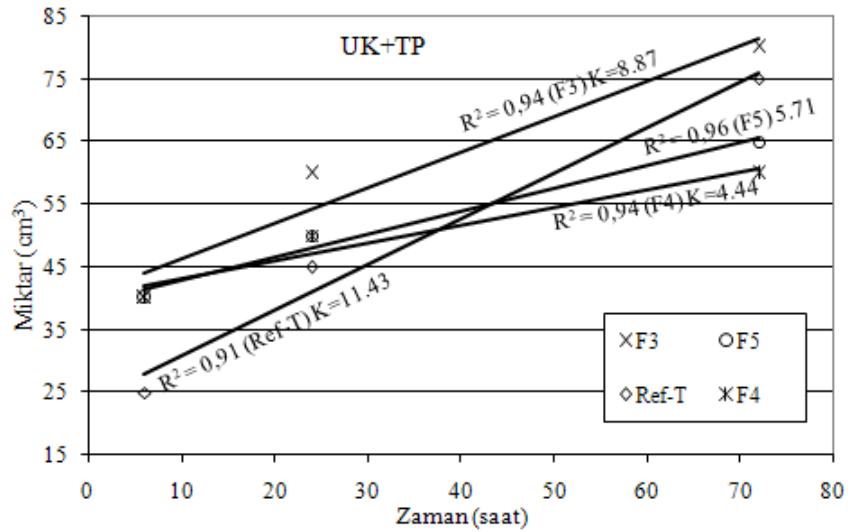
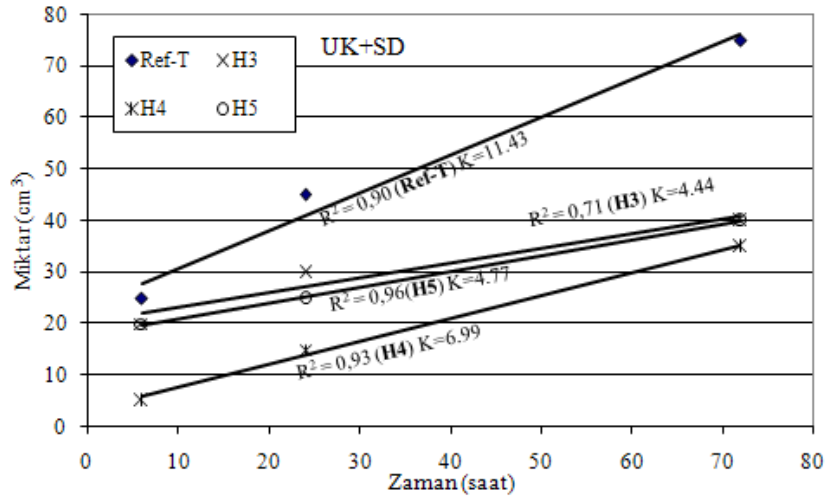
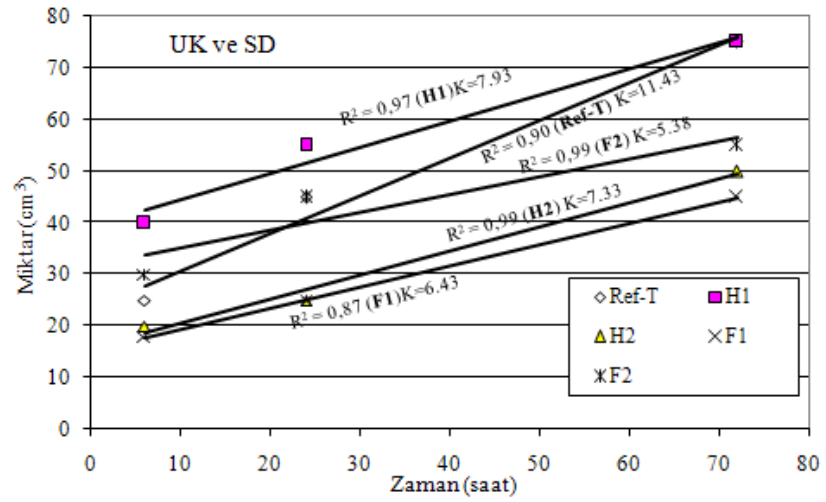


Şekil 5.1. Farklı agrega tane dağılımlı KYHB'lerin basınçlı su geçirimsizlik katsayıları (m/sn×10⁻¹¹)

Farklı toz tipi ve miktarlı KYHB'lerin su emme ve geçirimsizlik özellikleri:

Farklı toz malzemeler ile üretilen KYHB'ler ile toz malzeme kullanmadan üretilen KYHB'nin su emme ve geçirimsizlik özellikleri Tablo 5.5 'de verilmiştir. SD'nin PÇ ve UK'e göre biraz daha düşük yoğunlukta olması ve karışıma ağırlıkça girmesi, karışımındaki dozajını hacimsel olarak biraz arttırmaktadır. Ayrıca SD'nin çok ince oluşu sertleşmiş betonda iyi boşluk doldurma özelliğini ortaya çıkarmaktadır. Genel olarak incelendiğinde SD'li seriler betonun su emme ve geçirimsizlik özelliklerini geliştirmektedir. KYHB'lerin taze birim ağırlıkları 1900 ile 2000 gr/dm³ arasında, kuru birim ağırlıkları ise 1700–1800 gr/dm³ arasında değişmiştir. KYHB'lerin taze ve kuru birim ağırlıkları birbirine çok yakındır. En düşük kuru birim ağırlık SD'li serilerden elde edilmiştir. Kılcal su emme açısından iki farklı tozun birlikte kullanımları tekli kullanımlarına göre daha iyi sonuç vermiştir. KYHB'ler içerisinde en düşük su emme miktarı yine SD'li serilerde görülmüştür.

Farklı toz tipleri ile üretilmiş KYHB'lerin basınçlı su geçirimsizlikleri incelendiğinde, tüm mineral katkılı numunelerin basınçlı su geçirimsizlikleri mineral katkısız olandan (Ref-T) düşüktür (Şekil 5.2). SD ve UK oranının artması basınçlı su geçirimsizliğini azaltmıştır.



Şekil 5.2. Farklı toz malzemeler ile üretilen KYHB'lerin basınçlı su geçirimsizlikleri ($m/sn \times 10^{-11}$)

Ref-T serisi ise tüm KYHB'ler içerisinde en yüksek basınçlı su geçirimsizliğine sahip seri olmuştur. UK+SD'li serilerden basınçlı su geçirimsizliği açısından en uygun karışım H3 serisi olmuştur. Mineral katkılı seriler içerisinde TP'nin (toz perlit) kullanıldığı serilerde basınçlı su geçirimsizliği diğer mineral katkılı KYHB'lere göre yüksek çıkmıştır. KYHB'lerden özellikle F4, H3 ve H5 serileri basınçlı su geçirimsizliği açısından diğer KYHB'lere göre en iyi performansı sergileyen seriler olmuştur.

Tablo 5.5. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları

Rumuz / Kür şartı	Kuru br. ağır (gr/dm ³)		Su emme (%)		Porozite (%)		Kılcal su emme (cm/sn ^{-1/2})	
	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava
F1	1785	-	12.2	-	19.5	-	1.619	-
F2	1756	1732	11.1	12.9	19.6	23.2	1.523	2.311
H1	1735	1705	10.3	11.8	18.7	21.3	1.503	1.772
H2	1723	-	8.6	-	15.0	-	1.364	-
F3	1725	1774	6.8	8.2	18.5	21.2	1.423	1.776
F4	1750	-	11.3	-	19.8	-	1.388	-
F5	1749	-	11.3	-	17.8	-	1.497	-
L1	1782	-	11.8	-	19.9	-	1.620	-
L2	1760	-	9.7	-	19.5	-	1.546	-
L3	1755	-	9.3	-	16.7	-	1.548	-
H3	1771	-	9.2	-	16.3	-	1.338	-
H4	1815	-	8.3	-	15.0	-	1.329	-
H5	1815	1768	7.7	9.4	15.9	17.6	1.156	1.525
Ç1	1782	1684	9.5	11.2	17.6	21.0	1.624	1.971
Ç2	1769	1701	9.5	10.9	16.9	19.0	1.590	1.859
Ref-T	1767	1763	12.1	13.5	19.4	21.8	1.747	2.571

Farklı agregalar ile üretilen KYB ve KYHB'nin su emme ve geçirimsizlik özellikleri:

En düşük kuru birim ağırlık geleneksel hafif betondan (Ref-A) elde edilmiştir (Tablo 5.6). Pomza agregasıyla hazırlanan geleneksel hafif betonun dışında en düşük kuru birim ağırlık beklendiği gibi genleştirilmiş perlit agregalı numunelerden elde edilmiştir. Taze birim ağırlık açısından diğer KYHB karışımlarından çok fazla farkı olmayan perlit agregalı numuneler yüksek oranda bünyelerinde tuttıkları suyu bıraktıktan sonra belirgin ölçüde hafiflemiştir.

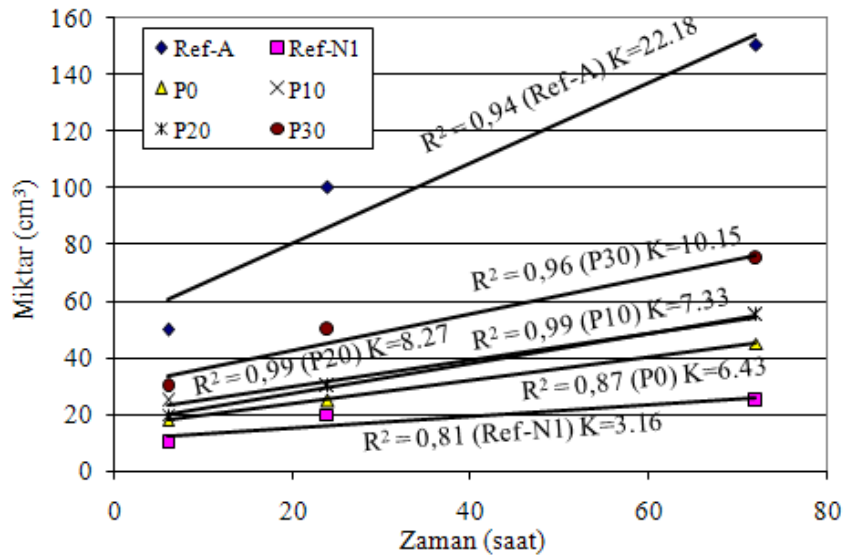
Tablo 5.6. Numunelerin kuru birim ağırlık, porozite, su emme ve kılcal su emme sonuçları

Rumuz / Kür şartı	Kuru br. Ağır. (gr/dm ³)		Su emme (%)		Porozite (%)		Kılcal su emme (cm/sn ^{-1/2})	
	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava	Su	Hava
P0	1785	-	12.2	-	19.5	-	1.919	-
P10	1748	-	11.5	-	20.1	-	1.992	-
P20	1722	-	11.6	-	20.3	-	2.156	-
P30	1706	-	11.9	-	20.3	-	2.450	-
Ref-N1	2292	2266	6.3	7.5	9.5	17.5	1.446	2.189
Ref-N2	2336	2291	5.5	6.9	7.9	15.8	1.483	2.415
Ref-A	1675	1633	14.9	17.2	24.9	28.1	2.686	4.028

Numunelerde su emme olayı agregadan belirgin ölçüde etkilenmiştir. Dere agregalı numuneler en minimum seviyede su emerken genişletilmiş perlit agregalı numuneler oldukça yüksek su emme oranına sahip olmuşlardır. Ref-A aynı agrega ile üretilen KYHB'lere göre daha fazla su emmiştir.

Agrega tipine göre en yüksek basınçlı su geçirimsizliği P30 serisinden elde edilmiştir (Şekil 5.3). En düşük basınçlı su geçirimsizliği ise dere agregalı KYB serisinden (Ref-N1) elde edilmiştir. KYHB'lerin basınçlı su geçirimsizlikleri genel olarak dere agregalı karışımlara göre yüksek çıkmıştır. KYHB'de genişletilmiş perlit agregasının miktarı arttıkça basınçlı su geçirimsizlik katsayısı artmıştır. KYHB'lerin basınçlı su geçirimsizliği dere agregalı olanlara göre yüksek çıkmış olmasına rağmen, tüm KYHB'ler Concrete Society'e [181] göre orta seviyede bir katsayıya sahip olmuşlardır.

Karışımın salt pomza agregası ihtiva etmesi durumunda kendiliğinden yerleşebilme özelliği su emme ve geçirimsizlik özelliklerinde oldukça etkili olmuştur. Ref-A ve P0 serileri incelendiğinde bahsedilen özellikler için aralarındaki farklılık önemsenebilecek boyutta olmuştur. Ref-A serisinin basınçlı su geçirimsizliği Concrete Society'e [181] göre yüksek seviyede çıkmıştır.

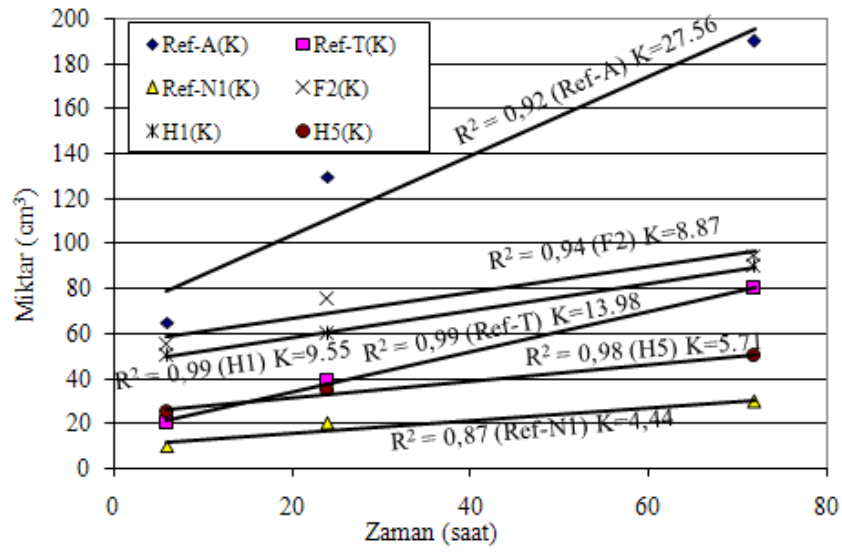


Şekil 5.3. Farklı agregalı KYHB, HB ve KYB'lerin basınçlı su geçirimsizlikleri ($m/sn \times 10^{-11}$)

Hava kürü uygulanan karışımların su emme ve geçirimsizlik özellikleri:

Su emme ve geçirimsizlik özelliklerine kür şartının etkisini incelemek için basınçlı su geçirimsizliğinde 6 seriye, su emme, porozite ve kılcal su emme için 11 seriye hava kürü uygulanmıştır. Hava kürü numunelerde birim ağırlıklar su kürü yapılan numunelere göre yaklaşık %10'a kadar azalmıştır. Hidratasyonun sağlıklı gelişmemesi bunda rol oynamıştır.

Tablo 5.7’de Hava kürlü serilerin su kürüne göre su emme ve geçirimsilik özelliklerindeki artış % olarak gösterilmiştir. Hava kürü durumunda Tablo 5.7’de görüldüğü gibi numunelerin su emme, porozite, kılcal su emme ve basınçlı su geçirimsilikleri artmıştır. Bu artış özellikle UK’li numunelerde biraz daha fazladır. Şekil 5.4’de basınçlı su geçirimsiliklerinin zamana bağlı olarak grafik şeklinde verilmiştir. Şekilden açıkça görüleceği üzere en fazla basınçlı su geçirimsiliği Ref-A en düşüğü ise Ref-N1 serisindedir. Ref-N1 serisinin basınçlı su geçirimsiliği su kürüne göre %71 seviyesinde artış gösterirken diğer serilerde ise bu artış en fazla %24 olarak gerçekleşmiştir.



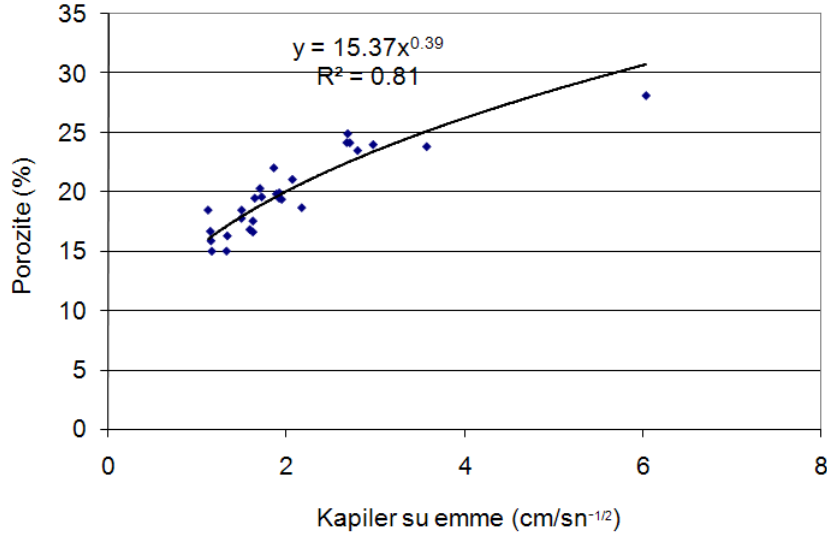
Şekil 5.4. Hava kürlü serilerin basınçlı su geçirimsiliği (m/sn×10⁻¹¹)

Tablo 5.7. Su kürüne göre hava kürlü numunelerde su emme ve geçirimsilik özelliklerindeki artış (%)

	Su emme % artış	Porozite % artış	Kılcal su emme % artış	Basınçlı su geçirimsiliği % artış
G2	9.8	11.4	35.4	
F2	16.2	18.4	34.1	21.1
F3	20.6	14.6	24.8	
H1	14.6	13.9	17.9	20.4
H5	22.1	10.7	31.9	19.8
Ç1	17.9	19.3	21.4	
Ç2	14.7	12.4	16.9	
Ref-T	11.6	12.4	32.0	16.2
Ref-A	15.4	12.9	50.0	24.2
Ref-N1	19.0	20.7	51.4	40.5
Ref-N2	25.5	22.5	62.8	

Tüm numunelerin kılcal su emme katsayıları 1.1 ile 2.6 cm/sn^{-1/2} arasında değişmiştir. Mineral katkılı olup olmama, agrega tipi, ve kür şartı kılcal su emme katsayısı üzerinde etkili olan parametrelerdir. Bu parametreler porozite üzerinde de etkili olmuşlardır. Şekil 5.5’de

pomza ile üretilen betonlarda, porozite ile kılcal su emme katsayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Porozitedeki artışla birlikte kılcal su emme katsayısı da artmıştır.



Şekil 5.5. KYHB’lerde porozite kılcal su emme ilişkisi

5.3. Dayanım Özellikleri

Tüm karışımların 28 günlük dayanımları esas alınarak 7 ve 90 günde kazanılan dayanımlar % olarak Tabloda 5.8’de belirtilmiştir. Ayrıca hava kürü ve su kürü kıyaslaması için aynı yaştaki su kürü yapılan numuneye göre hava kürlü numunenin % kaybı verilmiştir. Tüm serilerin zamana bağlı olarak basınç dayanımları ise Şekil 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13’de verilmiştir.

Genel olarak en düşük dayanım Ref-A serisinden elde edilmiştir. Geleneksel yöntemle sıkıştırılan Ref-A serisinde mineral katkının olmaması bu sonucun ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Ref-A serisi vibrasyonla sıkıştırılmasına rağmen porozite deneyleri bu seride fazla miktarda sıkıştırma boşluğunun olduğunu göstermektedir. Boşluğun fazlalığı da düşük basınç dayanımında etkili olan diğer bir faktör olmuştur.

Farklı agrega tane dağılımlı karışımların basınç dayanımları:

KYHB’de agrega tane dağılımı farkının basınç dayanımına etkisi Ref-G, G1 ve G2 serileriyle incelenmiştir (Şekil 5.6). KYHB elde edilmesinin güçlüğünden dolayı agrega tane dağılımı eğrisinde aşırı bir oynama yapılamamıştır. Hazırlanan serilerin agrega tane dağılımları TS 802’e göre A16 ve B16 eğrileri arasında kalmaktadır. Buna göre üç seri arasında A16 ve B16 eğrilerinin tam ortasından geçen seri Ref-G ve B eğrisine en yakın olanı da G2 serisidir. Bu

üç seriden tüm yaşlarda basınç dayanımı açısından birbirine yakın sonuçlar alınmıştır. Agregata ne dağılımı farkının fazla olmayışı bu sonucun elde edilmesinde etkin olmuştur.

Tablo 5.8. Kontrol karışımları ve KYHB'lerin bağıl basınç dayanımları (%)

	Su kürü			Hava kürü			Kür şartına göre		
	Day. Gelişimi (%)			Day. Gelişimi (%)			Dayanım kaybı (%)		
	7	28	90	7	28	90	7	28	90
G2	79	100	116	85	100	102	10	12	23
G1	83	100	117						
Ref-G	82	100	117						
F1	83	100	112						
F2	82	100	118	81	100	105	13	13	23
H1	86	100	107	88	100	104	13	15	17
H2	88	100	106						
F3	82	100	112	74	100	103	25	17	24
F4	82	100	108						
F5	80	100	110						
Ç1	77	100	110	82	100	107	19	23	26
Ç2	76	100	107	81	100	107	26	29	32
H3	86	100	107						
H4	83	100	111						
H5	90	100	105	92	100	102	10	12	15
L1	81	100	112						
L2	81	100	113						
L3	81	100	110						
Ref-T	73	100	105	86	100	106	14	17	20
P0	76	100	107						
P10	82	100	108						
P20	86	100	108						
P30	85	100	104						
Ref-N1	78	100	111	86	100	104	27	33	37
Ref-N2	77	100	113	85	100	104	22	29	35
Ref-A	68	100	116	73	100	103	12	18	27

Farklı toz malzemeler ile üretilen KYHB karışımlarının basınç dayanımları:

Toz tipinin KYHB'nin basınç dayanımına etkisinin incelendiği serilerde, referans karışımını (Ref-T) 7 günde sadece SD kullanılan seriler (H1, H2, H3, H4 ve H5) geçebilmiştir. Basınç dayanımı açısından KYHB için en optimum toz oranını H3 karışımı vermiştir. SD'nin kullanılmadığı seriler ileri yaşlarda Ref-T'yi yakalayabilmiştir. Karışımlarda %85'i PÇ (F4) ve %90'ı PÇ (H1) olan karışımlar olmasına rağmen %70'i PÇ (H3) olan karışımın optimum çıkması dikkate değerdir. %10 SD'li (H1) veya %20 SD'li (H2) seriden yüksek mukavemet beklenebilir. Ancak mineral katkıların betonda puzolonik etkisinin yanında filler etkisi de vardır. Hatta filler etkinin puzolonik etkiden daha önemli olduğu belirtilmektedir [182]. H3 serisinde %20 UK ve %10 SD kullanımı ile puzolonik etkilerinin yanında iyi bir filler etki göstermiştir.

UK ve SD'nin ayrı ayrı tek başına kullanıldığı seriler Şekil 5.7'de görüldüğü gibi her 90 günde Ref-T serisini geçmiştir. SD'li serilerin (H1 ve H2) basınç dayanımı her yaşta Ref-T'den yüksek çıkmış, UK'li seriler ise ancak 90 günde Ref-T'yi yakalayabilmiştir.

UK+SD kullanımında ise tüm seriler (H3, H4 ve H5) Ref-T'yi Şekil 5.8'de görüldüğü gibi tüm yaşlarda geçmiştir. İlk yaşlardaki dayanım kazanımına SD'nin katkısı ve ileri yaşlarda da karışımlarda bulunan UK'lerin ilave dayanım kazanımı mineral katkısız üretilen referans karışımın basınç dayanımını geçmede etkili olmuştur.

Çatalağzı UK'si ile Kangal UK'sinin karşılaştırıldığı Ç1, Ç2, F1 ve F2 serileri Şekil 5.9'de görüldüğü gibi, 90 günde her iki tipte de %20 kullanıldığında basınç dayanımı %10 kullanıma göre daha yüksek çıkmıştır. Çatalağzı UK'sinin basınç dayanımı hem %10 hem de %20 kullanımda Kangal UK' sinin basınç dayanımını geçmiştir.

Pomza tozlu (PT) karışımlardan L3 yüksek miktarda silis içerikli perlit tozunun etkisiyle her yaşta Ref-T'yi geçebilmiştir. L2 serisi ise ancak 90 günde Şekil 5.10'da görüldüğü gibi Ref-T'yi geçebilmiştir. L1 karışımı ise tüm yaşlarda Ref-T'yi geçememesine rağmen, L1'in basınç dayanımı gelişiminden ileri yaşlarda Ref-T'yi geçebileceği anlaşılmaktadır.

Toz perlit (TP) %5 kullanımında (F4 ve F5) her yaşta Ref-T'nin basınç dayanımından yüksek çıkmıştır. Toz perlitin %10 kullanılması durumunda (F3) %5 kullanıma göre (F4 ve F5) düşük olmasına rağmen Ref-T'nin basınç dayanımından her yaşta geçmiştir. Bu karışımlar içerisinde F4 ve F5 daha uygun karışımlar olarak görünmektedir (Şekil 5.11).

Farklı agregalar ile üretilen karışımların basınç dayanımları:

P10, P20 ve P30 serilerinin 7 günlük dayanımları P0 serisinden yüksektir. Perlitin yüksek silis içeriğine sahip olması bu durumu açıklayabilir. İleri yaşlarda sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte genel olarak Şekil 5.12'den de görüldüğü gibi birim ağırlık azaldıkça basınç dayanımı da düşmektedir.

Kendiliğinden yerleşebilme özelliği olan P serileri de dahil olmak üzere bütün seriler Ref-A'nın basınç dayanımını tüm yaşlarda geçmiştir. Kendiliğinden yerleşebilme basınç dayanımında etkin bir değişken olarak gözükmektedir.

Agrega tipi de basınç dayanımını belirleyen faktörlerden biri olmuştur. Dere agregası (Ref-N2 ve Ref-N1) en yüksek dayanımı vermiştir. Perlit ise pomza ile yer değiştirdikçe az da olsa dayanımı düşürmüştür.

Hava kürlü numunelerin basınç dayanımları:

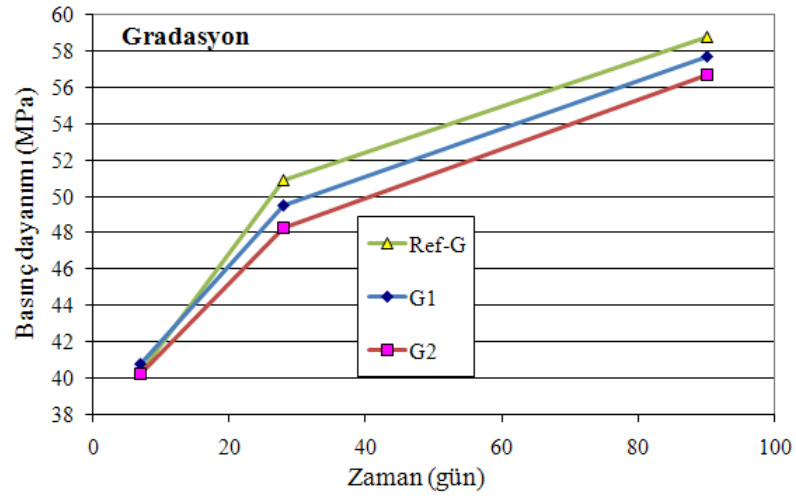
Genel olarak hava kürlü numunelerin basınç dayanımı kaybı %10 ile %37 arasında değişmiştir. Kuru ortamda kalmaları durumunda bile bulundukları ortamın 45 ± 5 bağıl nemli

olması dayanım kaybının az miktarda kalmasına neden olmuştur. Güneşli veya rüzgârlı bir ortamda olmaması da, hava kürü ortamındaki numunelerin basınç dayanımı kaybını azaltmıştır.

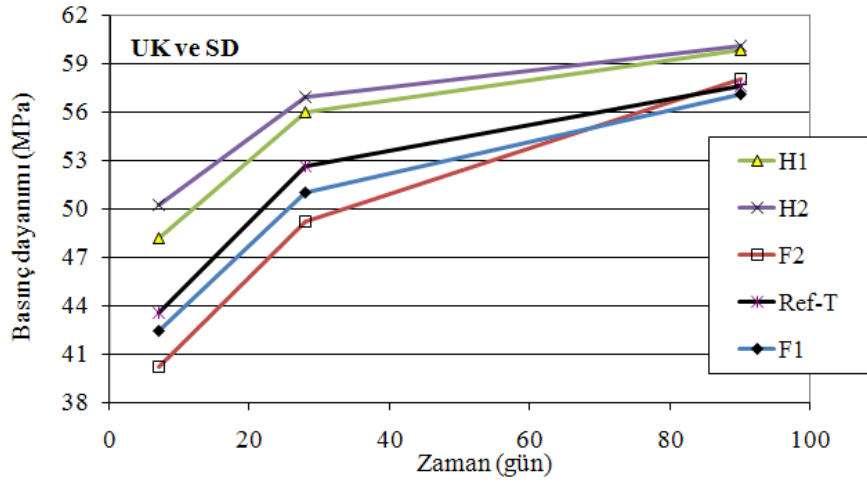
Hava kürü numunelerin 28 gündeysen mevcut nem durumlarına bakılmıştır. Pomza agregalı numunelerde nem oranı %6–8 arasındayken dere agregalarında ise %3 civarlarında olmuştur. Bu durum pomza agregasının dere agregasına oranla fazla miktarda su tutabilmesinin sonucudur. Fazla miktarda su tutabilen pomzanın bu kabiliyeti hava kürü durumunda etkisini göstermiştir. Basınç dayanım kaybı doğal agregalı olanlarda pomza agregalılara göre daha fazla çıkmıştır. Pomza agregalılarda basınç dayanımındaki kayıp %10–27 arasında iken, dere agregalılarda ise %19–37 arasındadır. Doğal agreganın nem tutamaması hava kürü durumunda performansını düşürmüştür.

Pomza agregalı karışımların içinde özellikle SD’li karışımlar daha az dayanım kaybına uğramıştır (Şekil 5.13). SD’nin hidratasyonunun hızlı olması ve bundan dolayı ileri yaşlarda kür gereksiniminin olmaması, pomza agregasının da hava kürü ortamda erken hidratasyon için gerekli olan suyu sağlaması bu sonucu ortaya çıkarmıştır. KYHB karışımları içinde hava kürü durumunda, UK’li seriler SD’li karışımlara göre daha fazla dayanım kaybetmiştir.

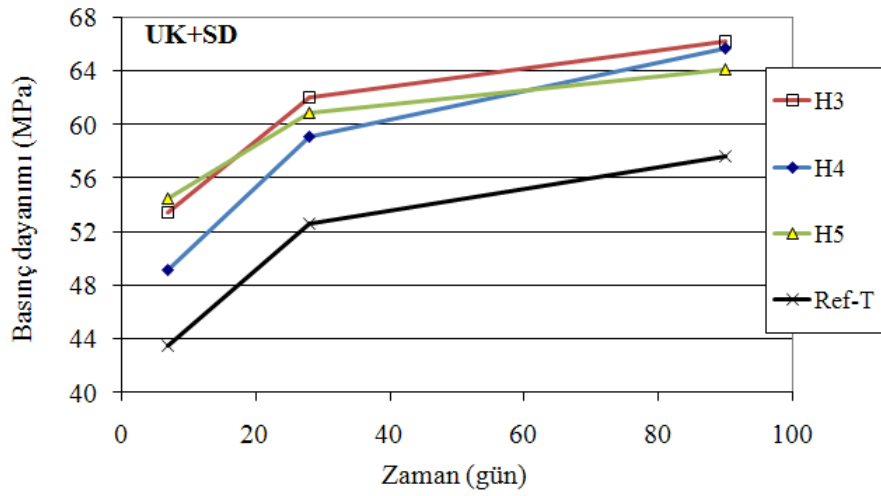
Özellikle UK daha uzun vadede küre ihtiyaç duymaktadırlar. Uçucu külün tek başına kullanılması durumunda (F2) pomza agregalı olmasına rağmen 7 günde daha az dayanım kaybı göstermesine karşı özellikle 90 günde su kürü duruma göre dayanım kaybı artmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda [183, 184] puzolanların hava kürü durumunda normal PÇ’ye göre daha fazla etkilendiği belirtilmektedir. Diğer bir çalışmada ise [185] puzolan katkılı çimento ile portland çimentolu betonlar havada ve suda kür edilmiştir. Havada kür edilmesi durumunda puzolan katkılı betonda basınç dayanım kaybı %17 iken portland çimentolu betonun dayanım kaybı %18 olarak belirlenmiş. Puzolanların aktivite gösterebilmeleri için nemli ortamlara ihtiyaç duyduğu ve bu yüzden de hava kürü ortamlarda, puzolanik aktiviteden kaynaklanan dayanım kazanımının olmaması ya da az olması bu durumu açıklayabilir [186, 187]. Ancak puzolanların hidratasyon ısısını düşürdükleri de bilinen bir durumdur. Hidratasyon ısısının düşmesi de hava kürü ortamlarda betona bir avantaj kazandırabilir. Ayrıca kullanılan pomzanın nem tutabilme kabiliyeti de göz önüne alındığında, bu çalışmadaki puzolanlı karışımların fazla etkilenmemesinin nedenini açıklayabilir. Lura [67] çalışmasında pomza agregasının iç kürlenme yaptığını belirtmiştir. İç kürlenmesi sayesinde dere agregasına göre naylon kürü durumunda; daha az rötre, daha iyi hidratasyon derecesi ve daha fazla dayanım kazandığını çalışmasında göstermiştir.



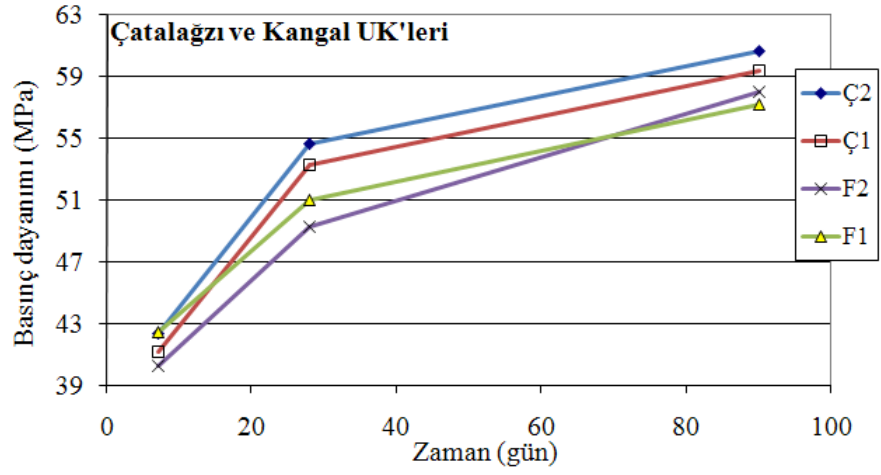
Şekil 5.6. Farklı agrega tane dağılımları ile hazırlanan KYHB'lerin basınç dayanımları



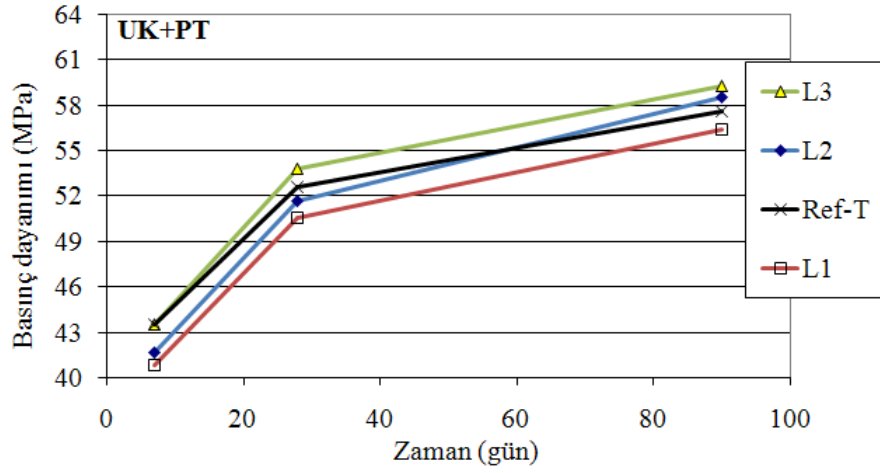
Şekil 5.7. UK ve SD'li KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



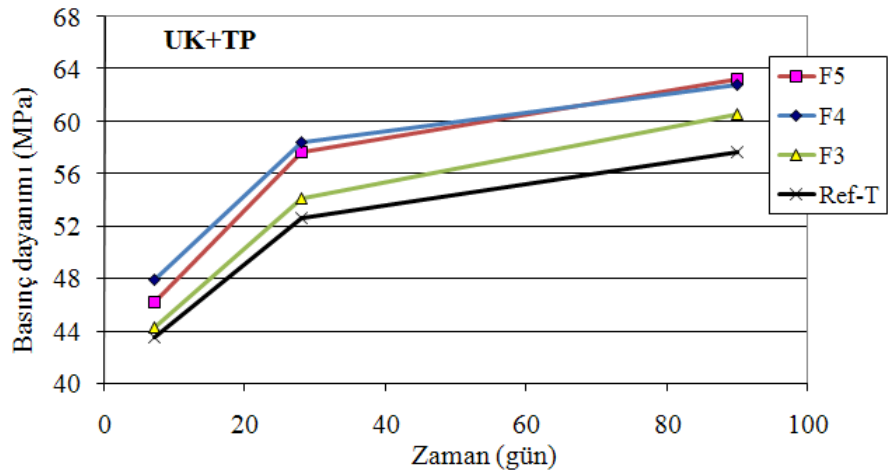
Şekil 5.8. UK+SD'li KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



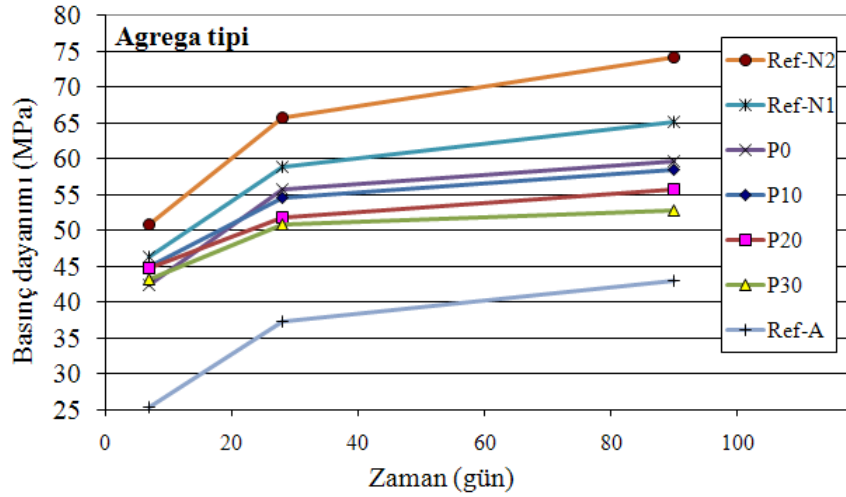
Şekil 5.9. Çatalağzı ve kangal UK'li KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



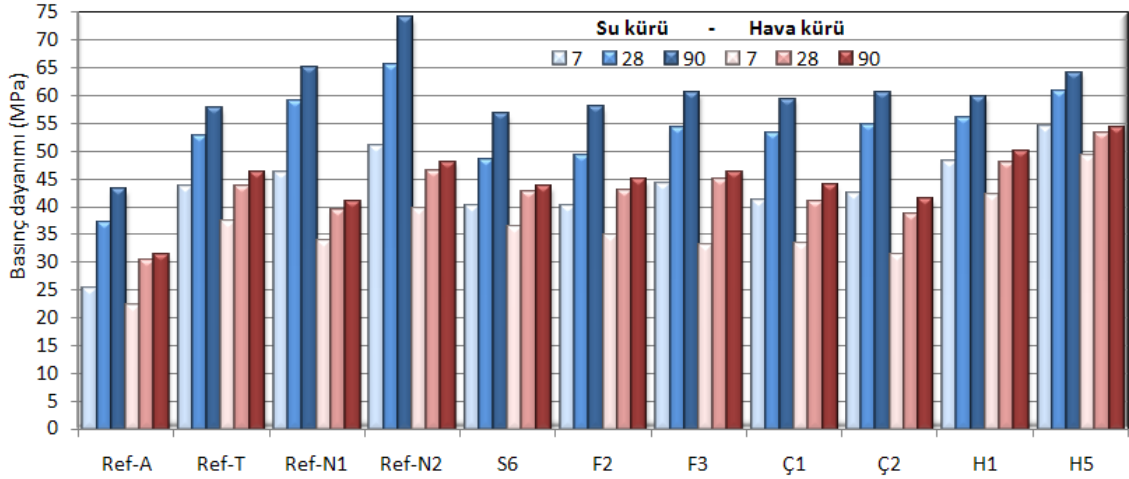
Şekil 5.10. UK+PT'li KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 5.11. UK+TP'li KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

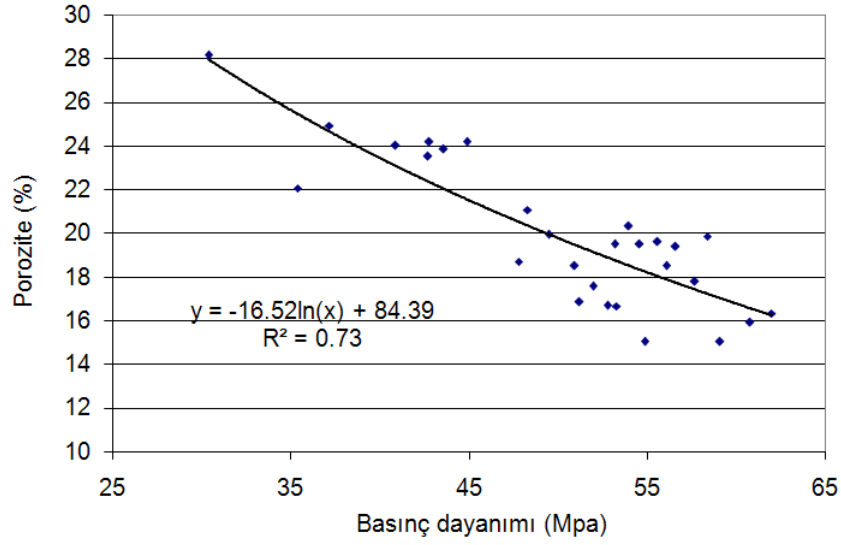


Şekil 5.12. HB, KYB ve farklı agregalı KYHB'lerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 5.13. Su ve hava kürlü numunelerin karşılaştırmalı basınç dayanımları

KYHB'lerin basınç dayanımı ile prozitetleri arasındaki ilişki Şekil 5.14'de verilmiştir. Sertleşmiş betonda en genel ifade ile boşluk oranı arttıkça dayanım düşer. Literatürde porozite ile basınç dayanımı arasında birçok ilişki sunulmuştur [188]. Çimentonun hidratasyonu ile betonda boşluk ve katı faz oluşur. Ancak boşluklar bazen yetersiz sıkıştırma ile de oluşabilir [177, 188]. Bundan dolayı bu çalışmada boşluk ile basınç dayanımı arasındaki ilişki aranırken sadece pomza agregalı KYHB serilerinin sonuçları dikkate alınmıştır. Böylece sıkıştırma farklılığı ve agregadan kaynaklanan boşluklardan kaynaklanabilecek etkiler ortadan kaldırılmıştır. Bu çalışmada porozite ve basınç dayanımı arasında 0,73 R^2 'li bir ilişki vardır. Porozite ve basınç dayanımı arasında çok kuvvetli bir ilişkinin kurulması oldukça zordur. Çünkü hem poroziteyi hem de basınç dayanımını ayrı ayrı etkileyen bağımsız birçok faktör vardır. Nitekim bu ilişkinin zayıf olabileceği Kumar [188] tarafından da belirtilmiştir.



Şekil 5.14. KYHB'lerin porozite basınç dayanımı ilişkisi

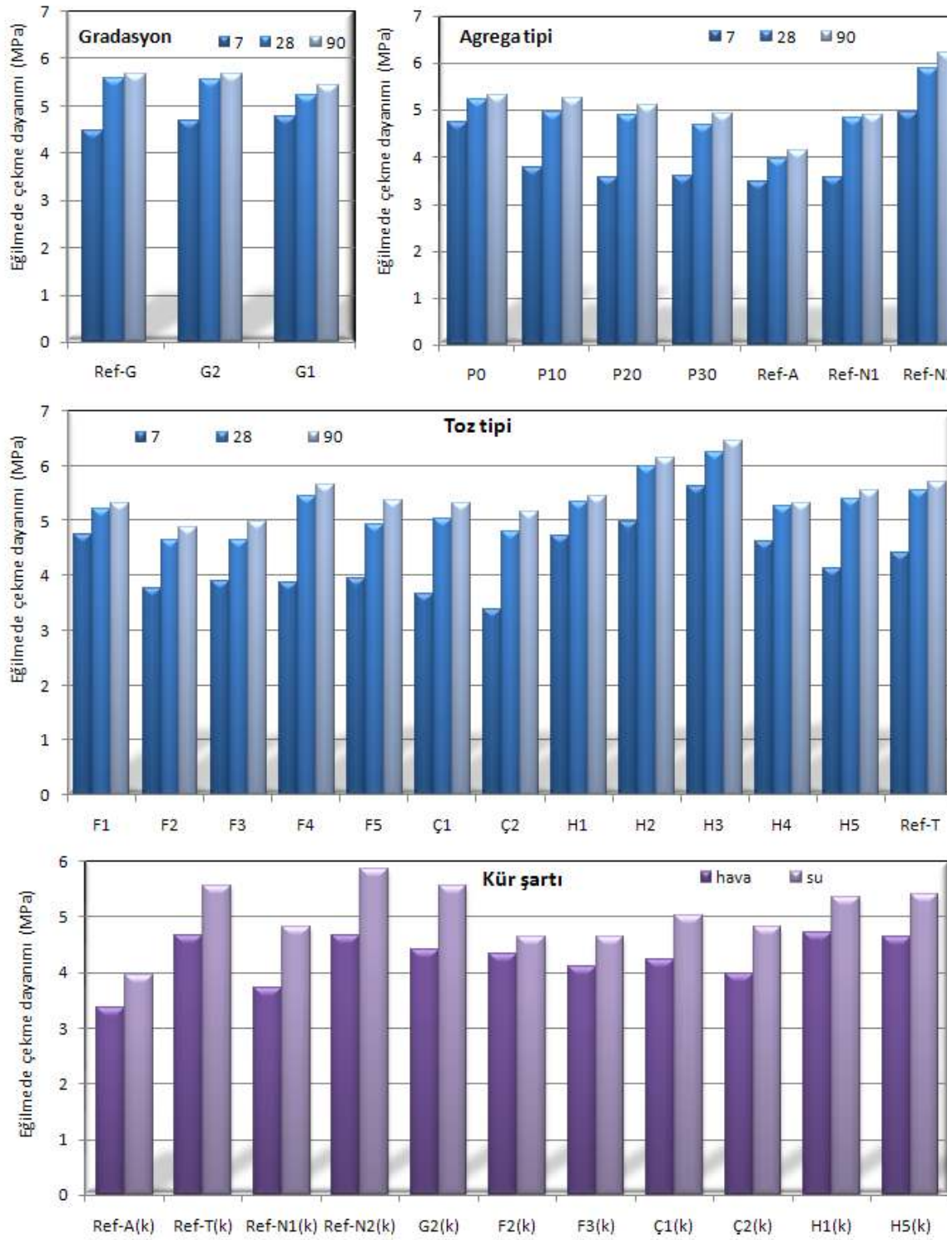
Eğilmede çekme dayanımları:

Deney sonuçları agrega tane dağılımı, agrega tipi, toz tipi ve kür şartı şeklinde guruplara ayrılarak Şekil 5.15'de değerlendirilmiştir. Tablo 5.9'da ayrıca 28 günlük eğilmede çekme deneyi esas alınarak 7. ve 90. gündeki dayanım gelişimleri de % olarak gösterilmiştir. Agrega tane dağılımının eğilmede çekme dayanımına sonuçların birbirine çok yakın olmasından dolayı belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

Agrega tipi eğilmede çekme dayanımında belirleyici bir etken olmuştur. En yüksek eğilme dayanımı Ref-N2 serisinden elde edilmiştir. Kendiliğinden yerleşip yerleşememe durumu da eğilmede çekme dayanımında önemli bir değişken olmuştur. Ref-A serisi en düşük eğilmede çekme dayanımı göstermiştir. Genel olgu birim ağırlık düştükçe ve porozite arttıkça eğilmede çekme dayanımının düştüğü yönündedir.

Faklı toz malzemeler ile üretilen KYHB'ler içinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı H3 serisinden elde edilmiştir. Tüm yaşlarda H3 serisi yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip olmuştur. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise F2 ve F3'den elde edilmiştir. KYHB'lar içinde SD içeren karışımlar (H serileri) genelde diğerlerine göre daha yüksek eğilmede çekme dayanımına sahiptirler.

Hava kürlü numunelerde sadece 28 günlük numunelerde eğilmede çekme dayanımı tespit edilmiştir. Kür şartı açısından incelendiğinde, hava kürlü serilerde, eğilmede çekme dayanımında su kürüne göre en fazla kayıp dere agregalı seriler Ref-N1 ve Ref-N2 serilerinde çıkmıştır. Pomza agregasının nem tutabilme kabiliyeti hava kürü durumunda hidratasyon için gerekli suyun bir kısmını karşılamıştır.



Şekil 5.15. Çalışmada hazırlanan tüm serilerin 7, 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları

Numunelerin basınç dayanımlarının eğilme dayanımlarına oranı Tablo 5.9'da verilmiştir. Mehta ve Monteiro [189] çalışmalarında; geleneksel betonda 20 MPa basınç

dayanımına sahip örneklerin çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı % 9–10 iken, 60 MPa basınç dayanımına sahip örneklerde bu oran % 7'ye düşmektedir. Bu çalışmada örneklerin eğilme dayanımları ile basınç dayanımları arasındaki oran %8–14 arasında değişmektedir. Literatürdekine benzer şekilde basınç dayanımı arttıkça eğilme dayanımında oransal olarak azalma olmuştur.

Tablo 5.9 Eğilmede çekme dayanımlarının bağıl gelişimi, dayanım kaybı ve basınç dayanımına oranı

	Su kürü için			Hava kürü durumunda			
	Dayanım gelişimi (%)			Dayanım kaybı (%)	Eğilme/basınç (%)		
	7	28	90		7	28	90
Ref-G	80	100	102		11	11	11
G2	85	100	102	17	12	12	11
G1	91	100	104		12	11	11
F1	91	100	102		12	10	9
F2	81	100	105	7	9	8	8
F3	84	100	107	12	9	8	9
F4	71	100	104		8	9	9
F5	80	100	108		9	9	8
Ç1	73	100	106	16	9	10	9
Ç2	70	100	107	17	8	9	9
H1	88	100	102	12	10	10	10
H2	83	100	102		10	11	11
H3	90	100	104		11	10	10
H4	87	100	101		9	9	8
H5	76	100	103	14	8	9	9
Ref-T	79	100	103	16	11	10	9
P0	91	100	102		12	10	9
P10	77	100	106		8	9	8
P20	73	100	105		8	10	9
P30	77	100	105		8	10	10
Ref-A	87	100	104	15	14	11	10
Ref-N1	74	100	102	23	9	8	8
Ref-N2	84	100	106	20	10	9	8

5.4. Dayanıklılık özellikleri

Beton üretildikten sonra servis ömrü süresince birçok kimyasal ve fiziksel etmenle karşılaşmaktadır. Bu etmenler karşısında gösterdiği direnç onun dayanıklılığı olarak adlandırılmaktadır. Bilinen çok çeşitli dayanıklılık problemleri vardır. Her bir dayanıklılık problemi kendi başına ayrıca bir araştırma konusu olabilecek niteliktedir. Bu çalışmada dayanıklılık problemlerinden donma-çözülme, yüksek sıcaklık, karbonatlaşma ve sülfürik asit parametreleri incelenmiştir.

5.4.1. Donma-çözülme

Donma-çözülme deneylerinden elde edilen ultra ses hızları, dinamik elastisite modülleri ve basınç dayanımları Tablo 5.10 ve 5.11’de verilmiştir. Deney karışımları; agrega tane dağılımı, toz tipi, agrega tipi ve kür şartı olmak üzere 4 guruba ayrılarak değerlendirmeye alınmıştır.

Tablo 5.10. Su kürlü numunelerde donma-çözülme deneylerinin sonuçları

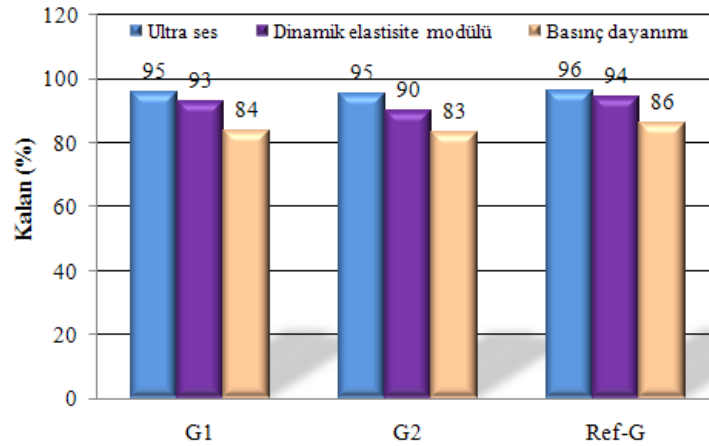
	Kontrol			100 çevrim		
	Ultra ses km/sn	ED GPa	Basınç dayanımı MPa	Ultra ses km/sn	ED GPa	Basınç dayanımı MPa
G2	3.75	22.7	58.3	3.57	20.4	48.5
G1	3.77	22.8	60.5	3.6	21.2	50.6
Ref-G	3.83	23.3	62.1	3.69	22.0	53.4
F1	3.95	26.5	60.9	3.82	25.4	53.1
F2	4.08	26.3	61.9	3.93	25.0	52.4
H1	3.83	22.8	61.9	3.63	20.8	53.3
H2	3.94	24.2	61.2	3.88	23.0	53.6
Ç1	3.91	25.4	61.7	3.77	24.2	54.2
Ç2	3.85	23.5	63.3	3.66	21.7	51.7
L1	3.77	21.6	52.5	3.6	19.9	46.1
L2	4.00	27.4	53.2	3.88	25.9	45.1
L3	3.76	23.4	56.2	3.71	20.4	47.7
F3	3.85	24.3	59.1	3.66	22.5	44.6
F4	3.86	23.5	61.4	3.74	22.4	55.5
F5	4.05	25.8	63.4	3.87	24.0	56.2
H3	3.94	24.7	66.4	3.82	23.0	57.8
H4	4.00	26.1	65.9	3.9	25.4	56.1
H5	3.98	25.9	64.5	3.88	25.2	55.3
Ref-T	4.02	25.7	59.6	3.94	24.7	54.6
P0	3.95	26.5	60.9	3.62	23.4	53.1
P30	3.95	24.0	55.0	3.83	23.0	43.8
Ref-A	3.80	21.8	47.0	3.63	21.0	43.0
Ref-N2	4.85	49.5	78.0	4.75	46.5	71.8

Çalışmada donma-çözülme direncini arttırmak için ayrıca hava sürükleyici katkı kullanılmamıştır. Hale vd. [190] su/çimento oranı 0.36’dan küçük karışımlarda donma-çözülme dayanıklılığı için hava sürükleyici katkı kullanmaya gerek olmadığını belirtmişlerdir. Bundan dolayı hiçbir karışım hava sürükleyici katkı içermemektedir.

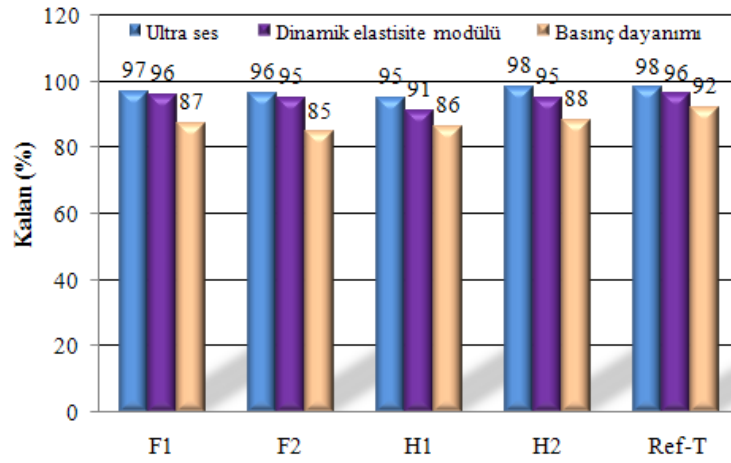
Tablo 5.11. Hava kürlü numunelerde donma-çözülme deneylerinin sonuçları

	Kontrol			100 çevrim		
	Ultra ses km/sn	ED GPa	Basınç dayanımı MPa	Ultra ses km/sn	ED GPa	Basınç dayanımı MPa
Ref-A(K)	3.38	16.8	32.8	3.70	20.2	30.9
Ref-T(K)	3.60	20.5	47.0	3.89	24.0	50.4
Ref-N2(K)	4.63	44.2	52.2	4.88	49.1	49.5
F2(K)	3.70	21.4	46.3	3.94	24.2	47.2
Ç1(K)	3.65	20.2	43.1	3.77	21.6	44.2
Ç2(K)	3.68	20.7	43.4	3.85	22.6	44.7
F3(K)	3.73	22.2	46.7	3.83	23.4	46.9
H1(K)	3.82	22.4	58.7	3.88	23.1	59.4
H5(K)	3.89	24.1	54.3	3.92	24.5	59.4

Agrega tane dağılımı farkının incelendiği Ref-G, G1 ve G2 karışımlarında ince agrega tane dağılımına sahip olan G2 serisi Şekil 5,16'dan da görüldüğü gibi donma-çözülme ortamından daha fazla etkilenmiştir. G2 serisi %17'lik bir dayanım kaybına uğrarken, Ref-G, G1 ve G2 serilerinin dayanım kaybı sırasıyla %14 ve 16'dır. G2 serisinin ince agrega tane dağılımlı olması daha fazla agrega yüzeyi anlamına gelir ki buda pürüzlü yüzeylerin arttığını gösterir. Buna karşılık yüzeyi saracak olan toz miktarında bir artış olmadığı için ara yüzey kalitesi bundan olumsuz etkilenmiştir. Özyurt [191] uçucu küllü betonlarda kırma kum ile doğal kumu yer değiştirmiştir. Kırma kum miktarındaki artışın mukavemeti arttırdığı ancak donma-çözülme dayanıklılığını azalttığını belirtmiştir. Bunun sebebi kırma taş yüzeyinin daha fazla toz malzemeye ihtiyaç duymasıdır [191].

**Şekil 5.16.** Farklı agrega tane dağılımlı karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları

UK'li karışımlar (F1, F2) incelendiğinde UK miktarındaki artış donma-çözülmede dayanım kaybını arttırdığı görülmektedir. SD ve UK kıyaslamasında ise %20 SD'li (H2) ve %20 UK'li karışımın (F1) dayanım kaybı sırasıyla %12 ve %13'dür. Topçu ve Canbaz [192], mineral katkıların hidrasyon ürünlerinden olan Ca(OH)_2 'yi bağlayarak CSH dönüştürmesinden dolayı daha yoğun ve güçlü bir yapı elde edilmesine karşın bu güçlü yapı donma-çözülme etkisinde daha büyük buz basıncına maruz kalmakta ve parça kopmasına neden olduğunu belirtmektedir. Ref-T'de dayanım kaybının %8 gibi küçük bir rakamda kalması, betonun yapısında sonradan boşlukların tıkanmamasından ileri geldiği düşünülmektedir. Mineral katkı içeren tüm KYHB'lerin dayanım kaybı Ref-T (mineral katkısız) serisinin dayanım kaybından fazladır.

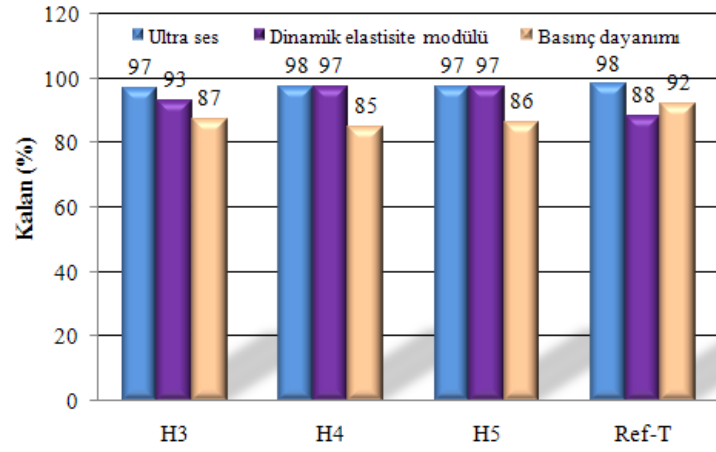


Şekil 5.17. UK ve SD'li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları

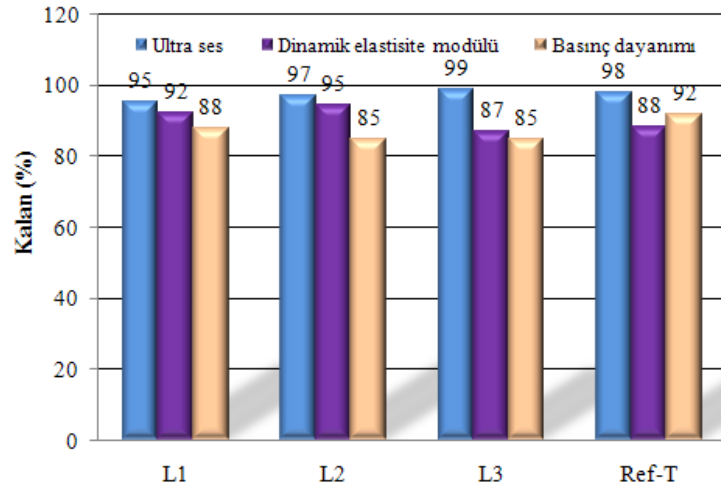
UK+SD'li KYHB'lerin donma-çözülme performansı H3, H4 ve H5 serileri ile incelenmiştir. Bu seriler içerisinde toplam %20 mineral katkılı olan H5 serisi %12 ile en az dayanım kaybına uğrayan seri olmuştur (Şekil 5.18). En az dayanım kaybının, %25'i (H4) ya da %30'u (H3) mineral katkı olandan olmaması mineral katkıların donma-çözülmeye dayanıksızlığını göstermektedir. H4 ve H3'ün dayanım kaybı sırasıyla %19 ve %21'dir.

Pomza tozunun (PT) mineral katkı olarak kullanımı durumunda donma-çözülme sonrası özellikleri L1, L2 ve L3 serileri ile incelenmiştir. Bu karışımlarda da mineral katkı oranı azaldıkça dayanım kaybı azalmaktadır (Şekil 5.19).

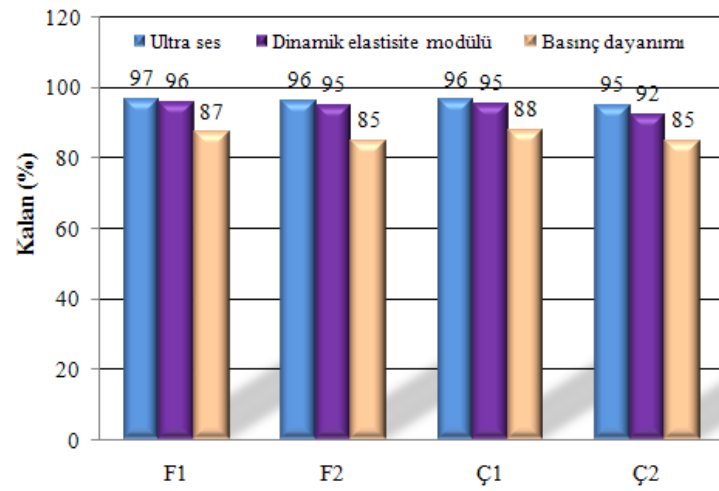
UK tipinin donma-çözülme direnci Ç1, Ç2, F1 ve F2 serileri ile incelenmiştir. Her iki tip UK'de de %20 ikame durumunda (F2 ve Ç2) %10 kullanıma göre (F1 ve Ç1) donma-çözülme öncesine göre dayanım kaybı fazladır (Şekil 5.20). Uçucu küldeki artış dayanım kaybını arttırmıştır. F sınıfı uçucu küllerin C sınıfı uçucu küllere göre donma-çözülme dayanıklılığı daha fazla çıkmıştır.



Şekil 5.18. UK + SD'li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları

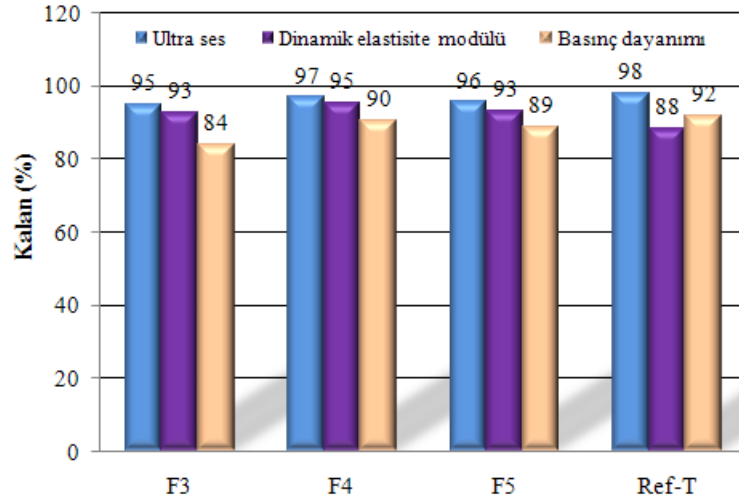


Şekil 5.19. UK + PT'li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları



Şekil 5.20. Farklı tip UK'li karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç day.

Toz tipine yönelik karışımlardan UK+TP’li (uçucu kül ve toz perlit) karışımların donma-çözölmeye etkisi F3, F4 ve F5 serileri ile incelenmiştir. Bu karışımlarda da mineral katkı artışı ile birlikte donma-çözölme direnci azalmıştır (Şekil 5.21). Farklı toz malzemeler ile üretilen karışımlardan hiçbirisi donma-çözölme direncini arttıramamıştır.



Şekil 5.21. UK + TP’li karışımların donma-çözölme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları

Kendiliğinden yerleşme özelliği donma-çözölmede etkili parametrelerden biri olmuştur. Vibrasyon ile sıkıştırılan hafif beton (Ref-A) Şekil 5.22’de görüldüğü gibi mineral katkılı tüm KYHB’lerden daha az dayanım kaybetmiştir. Mineral katkısız kendiliğinden yerleşen Ref-T ile hemen hemen aynı dayanım kaybına sahiptir. Donmaya karşı dayanıklılığı belirleyen en büyük etken betonun boşluk yapısıdır. Donma sonucu suyun buza dönüşmesi ile hacimce %9’luk artışın getirdiği basınç (buz basıncı) dayanıklılığı belirlemektedir. Buz basıncının etkili olabilmesi betonun doygunluk derecesine bağlıdır. Betonda yeterli boşluk varsa ya da tamamen doygun değil ise donma-çözölmeden çok fazla etkilenmeyebilir. Ref-A numunesi en yüksek porozite ve kılcal su emme değerini sahip olan seridir. Donma-çözölme sırasında da yüksek boşluk oranı ve kılcal kanalların çokluğu ile hasar sürecinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

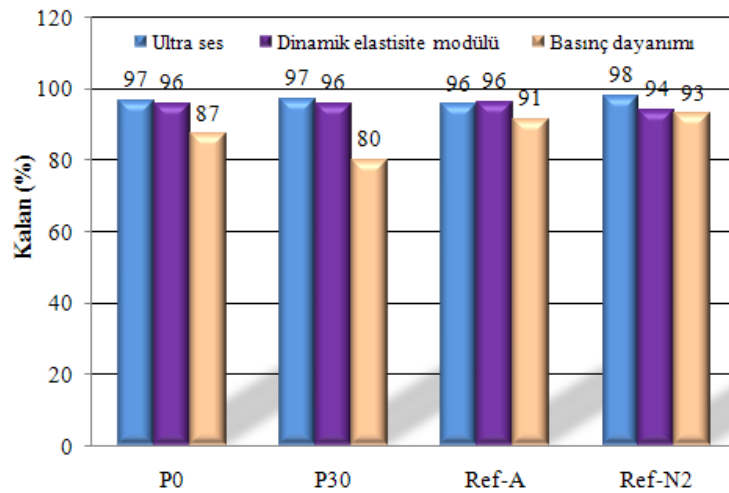
Agrega tipinin donma-çözölme direncine etkisinde dere, pomza ve genleştirilmiş perlit agregaları kullanılmıştır. Kendiliğinden yerleşebilme özelliği olan Ref-N2 (dere), P0 (pomza) ve P30 (pomza+perlit) serilerinin dayanım kayıpları sırasıyla %7, 13, 20’dir. Agregalar hafifletikçe donma-çözölmeye dayanıklılıkları azalmıştır. Bünyelerinde fazla miktarda su tutabilmeleri ve donma sırasında zayıf yapıları donma-çözölme dayanıklılığını azaltmıştır.

Havada kür edilen seriler donma-çözülme sonrası ya dayanım kazanmış ya da çok az dayanım kaybına uğramıştır. Hava küründen dolayı numunelerdeki hidrate olmamış ürünler çözülme esnasında yeniden hidrate olmuştur. Donma-çözülme çevrimlerinde çözülme safhasının 20 °C’de gerçekleşmesi bu sıcaklığın ideal kür sıcaklığı olması bu olguyu güçlendirmektedir.

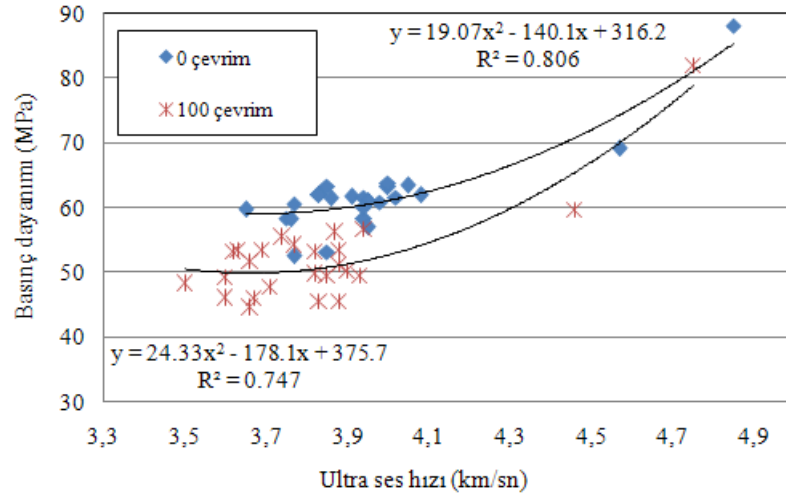
Ultra ses hızı betonun dayanımı hakkında fikir verebilen tahribatsız ve en pratik metotlardan biridir. Neville [52] normal agregalı betonlarda ultra ses geçiş hızına göre yaptığı sınıflandırma;

- $V < 2$ km/s çok kötü beton
- $2 \text{ km/sn} < V < 3 \text{ km/sn}$ zayıf beton
- $3 \text{ km/sn} < V < 3.5 \text{ km/sn}$ orta sınıf beton
- $3.5 \text{ km/sn} < V < 4.5 \text{ km/sn}$ iyi beton
- $4.5 \text{ km/sn} < V$ çok iyi beton’dur.

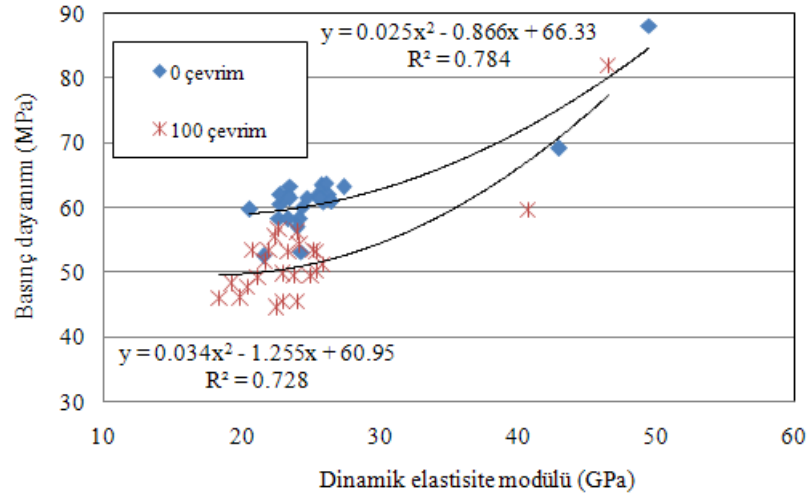
Donma-çözülme öncesinde numunelerin ultra ses hızları ve birim ağırlıkları ölçülmüş ve bu verilerle dinamik elastisite modülleri bulunmuştur. Deney sonrasında da aynı ölçümler yapılmıştır. Tablo 5.10’da görüldüğü gibi dere agregalı beton çok iyi beton pomza agregalılarda iyi beton sınıfına girmektedir. Bulundukları sınıf donma çözülme testleri sonrasında da değişmemektedir. Buda 100 çevrimlik donma çözülme dirençlerinin yüksek olduğunu gösterebilir. Şekil 5.23 ve 5.24’de sırasıyla basınç dayanımı ile ultra ses hızı ve dinamik elastisite modülleri arasında ilişki aranmıştır. Havada kür edilen serilerin deney sonuçları hesaplamaya alınmamıştır. Hem deney öncesi için hem de deney sonrası için aralarındaki ilişkiyi veren eğriler birbirlerine paralellik göstermektedir.



Şekil 5.22. Farklı agregalı karışımların donma-çözülme sonrası kalan ultra ses, ED ve basınç dayanımları



Şekil 5.23. Donma-çözülme deneylerinde ölçülen ultra ses hızı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki



Şekil 5.24. Donma-çözülme deneylerinde ölçülen ED ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

5.4.2. Yüksek sıcaklık

Bu çalışmada KYB, KYHB ve HB karışımlarının yüksek sıcaklıklarda altındaki davranışları incelenmiştir. Ayrıca kür şartının yüksek sıcaklığa etkisini incelemek için bu karışımlardan 11 adedi hava küründen sonra deneye tabi tutulmuştur. Standart 28 gün su kürü uygulanan karışımlar ile 28 güne kadar laboratuvar ortamında havada bekletilen (20 ± 3 °C sıcaklık ve $\%45 \pm 5$ bağıl nem) hava kürlü numuneler karşılaştırılmıştır. Hava kürlü deney serilerinin rumuzlarının yanında (k) ibaresi bulunmaktadır. Yüksek sıcaklık parametreleri olarak 300, 600 ve 900 °C dereceleri seçilmiştir. Tüm serilerde 10 cm'lik küp numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Fırına numuneler kurutulmadan oda ortamındaki doğal nemleri ile yerleştirilmişlerdir. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ultra ses hızları belirlenmiş ve ultra ses

hızı vasıtasıyla dinamik elastisite modülleri hesaplanmıştır. Ayrıca numuneler 3000 kN kapasiteli hidrolik yük kontrollü dijital göstergeli preste basınç dayanımları belirlenmiştir. Her bir sıcaklık sonrası oda sıcaklığına kadar soğuması beklenen numunelerin ultra ses hızları, dinamik elastisite modülleri ve basınç dayanımları Tablo 5.12 (su kürlü) ve Tablo 5.13’de (hava kürlü) verilmiştir.

Karışımlar 4 grup olarak ayrı ayrı değerlendirmeye alınmıştır. Bunlar; agrega tane dağılımı, toz tipi, agrega tipi ve kür şartı şeklindedir. Yapılan yüksek sıcaklık deneyleri neticesinde genel görünüm mukavemeti yüksek olan betonun daha fazla dayanım kaybettiğidir.

Tablo 5.12. Su kürlü numunelerin yüksek sıcaklık deneylerinin sonuçları

	20 °C			300 °C			600 °C			900 °C		
	US*	BD**	ED***	US	BD	ED	US	BD	ED	US	BD	ED
	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa
G1	3.8	49.5	22.8	3.5	48.5	20.1	2.9	39	13.5	2.7	14.1	11.3
G2	3.7	48.3	22.7	3.5	43.9	20.4	2.9	40	13.2	2.6	14.1	10.5
Ref-G	3.8	50.9	23.3	3.5	44.9	19.6	2.9	38	12.9	2.6	14.8	10.4
F1	4	53.2	24.7	3.6	41.6	20.7	2.8	32	12.6	2.5	16.3	10.2
F2	4.1	55.6	27.8	3.6	46.7	21.7	2.8	41	13.5	2.6	17.6	11.1
H1	3.8	54	24.5	3.7	57	23.2	2.9	43	14.5	2.7	10.8	12.1
H2	3.9	54.9	26.3	3.7	57.9	23.3	2.9	43	14.6	2.3	10.5	9.3
Ç1	3.9	52	23.4	3.6	50.3	19.9	3	48	14.3	2.8	18.7	11.7
Ç2	3.8	51.2	25.1	3.5	51.1	21.3	3.2	49	17.2	2.8	20.1	13.8
F3	3.8	56.1	23.5	3.6	49	21	2.9	37	13.1	2.4	15.1	9.4
F4	3.9	58.4	22.6	3.6	45	20	2.7	37	11.2	2.6	19	9.9
F5	4	57.7	28	3.6	36.1	21.8	3	34	15.6	2.3	13.2	8.7
H3	3.9	62	24.5	3.6	49.4	21.1	2.8	40	12.5	2.4	17.1	9
H4	4	59.1	26.3	3.6	54.5	21.9	2.9	40	13.9	2.6	22.4	10.7
H5	4	60.8	25	3.7	55.8	21.4	2.8	36	12.5	2.6	18.6	10.6
Ref-T	4	56.6	25.7	3.1	47.2	15.4	3.1	38	14.9	2.6	18.2	10.6
P0	4	53.2	24.7	3.6	41.6	20.7	2.8	32	12.6	2.5	16.3	10.2
P10	3.9	54.4	26.3	3.7	40.9	23.6	2.9	30	13.9	2.4	14.8	9.9
P20	3.6	51.7	21	3.7	42.9	21.4	2.8	34	12.5	2.5	14.2	9.7
P30	4	50.8	24.2	3.6	50.4	19.8	2.9	39	12.7	2.5	14.1	9.7
Ref-A	3.8	37.2	21.8	3.5	36.9	18	2.9	27	13	2.2	12.2	7.5
Ref-N1	4.6	58.9	43	4.3	49	37.3	2.9	27	17.5	1.8	13.5	6.5
Ref-N2	4.9	65.6	49.5	4.5	55.5	41.9	3	28	18.5	1.9	14.7	7.6

*Ultra ses, **Basınç dayanımı, ***Dinamik elastisite modülü

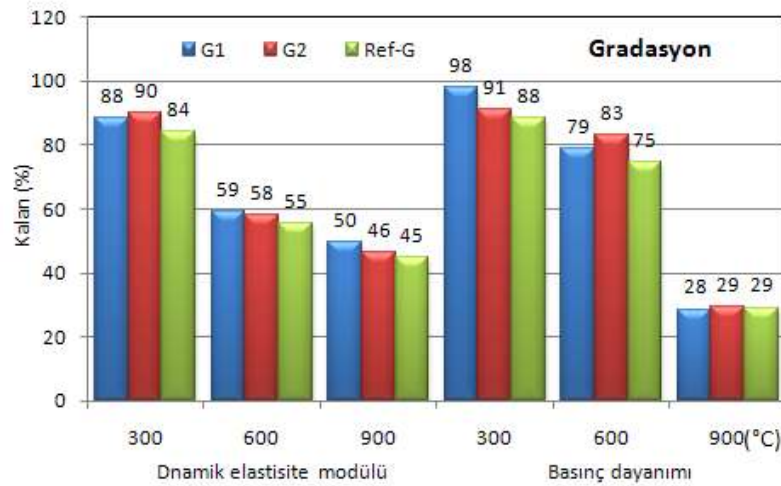
Karışımların yüksek sıcaklıklardan sonra kalan dayanım ve kalan dinamik elastisite modülleri Şekil 5.25, 5.26, 5.27 ve 5.28’de verilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrasında kalan dayanım olarak ifade edilen; yüksek sıcaklık geçirmiş numunelerin dayanımının kontrol numunelerinin dayanımlarına oranıdır.

Tablo 5.13. Hava kürlü numunelerin yüksek sıcaklık deneylerinin sonuçları

	20 °C			300 °C			600 °C			900 °C		
	US*	BD**	ED***	US	BD	ED	US	BD	ED	US	BD	ED
	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa	km/sn	MPa	GPa
Ref-A(K)	3.4	30.4	17.8	3.0	26.0	13.9	2.7	26	11.6	2.2	9.9	7.2
Ref-T(K)	3.6	43.6	20.6	3.3	35.0	17.5	2.9	29	13.2	2.5	16,5	10.2
Ref-N1 (K)	4.3	39.4	30.6	3.9	33.7	25.3	2.6	24	11.1	1.7	12.5	4.4
Ref-N2(K)	4.6	46.3	35.0	4.1	41	27	2.9	29	14	1.9	14.7	5.9
G2(K)	3.5	42.7	18.5	3.4	41	16.7	2.9	38	12.7	2.3	12.1	7.6
F2(K)	3.7	42.8	21.8	3.6	43.6	20.2	3	37	14,2	2.5	15.8	10.1
Ç1(K)	3.6	40.9	18.9	3.5	36	17.4	3.1	33	13.7	2.7	21.5	10.3
Ç2(K)	3.7	35.4	27.6	3.6	34.4	27	2.9	31	17	2.5	19.2	12.8
F3(K)	3.7	44.9	28.7	3.4	35	23.4	2.6	28	13.8	2.6	15.4	14.4
H1(K)	3.8	47.8	22.8	3.5	33.2	18.7	2.9	35	13.5	2.7	19.1	11.3
H5(K)	3.9	53.3	23.6	3.5	41.6	19.3	2.9	40	13.3	2.7	18.1	11.6

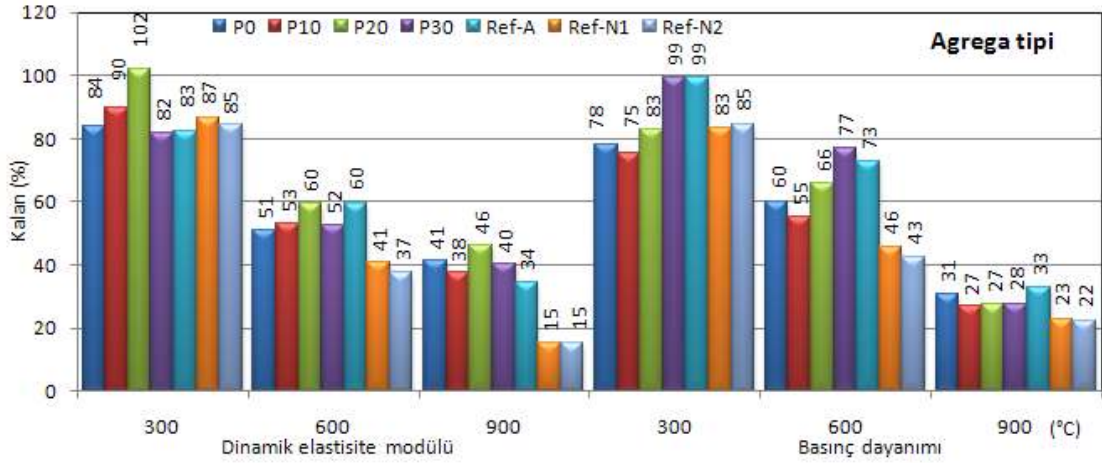
*Ultra ses, **Basınç dayanımı, ***Dinamik elastisite modülü

Agrega tane dağılımının irileşmesi kontrol numunelerinde basınç dayanımını arttırmıştır. 600 °C’de ise agregatane dağılımı irileştikçe Şekil 5.25’de görüldüğü gibi dayanım kaybı artmaktadır ve bu sıcaklık değerinde en az dayanım kaybı G2 serisinin hava kürlü numunelerinden elde edilmiştir. 900 °C’de ise Ref-G, G1 ve G2’nın dayanım kayıpları arasında farklılık yoktur.

**Şekil 5.25.** Farklı agregatane dağılımlı karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları

Agrega tipi açısından incelendiğinde (Şekil 5.26), genel olarak pomza agregası (P0) dere agregasından (Ref-N1 ve Ref-N2) daha iyi performans sergilemiştir. Bu sonuca pomzanın ısı iletkenliğinin düşüklüğü etkili olmuştur. Isıl iletkenliğinin düşüklüğü sayesinde iç bölgelere ısı geçişini yavaşlatmış buna bağlı hasar oranını da düşmüştür. Diğer bir sebep pomza agregası puzolonik esastır. Bu yüzden ara yüzey oluşan puzolonik reaksiyonlar sonucu daha kaliteli

gelişmiştir. Yüzeyin porozlu oluşu ara yüzeyi geliştiren diğer bir etmen olmuştur. Boşluklara giren çimento hamuru mekanik bağı daha güçlü hale getirmiştir. Agregalar olarak perlit ilavesi (P20 ve P30) 300 ve 600 °C sıcaklıklarda pomza ve dere agregalı karışımlara göre daha iyi performans göstermiştir. Yüksek sıcaklık sırasında en kritik bölge agregalar matris ara yüzeyidir. Farklı termal genleşmelere sahip olan agregalar ile bağlayıcı hamur arasındaki aderans yüksek sıcaklıklarda zayıflar ve çatlaklar. Buna bağlı olarak da dayanım düşer.



Şekil 5.26. Farklı tip agregalar ile üretilen karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları

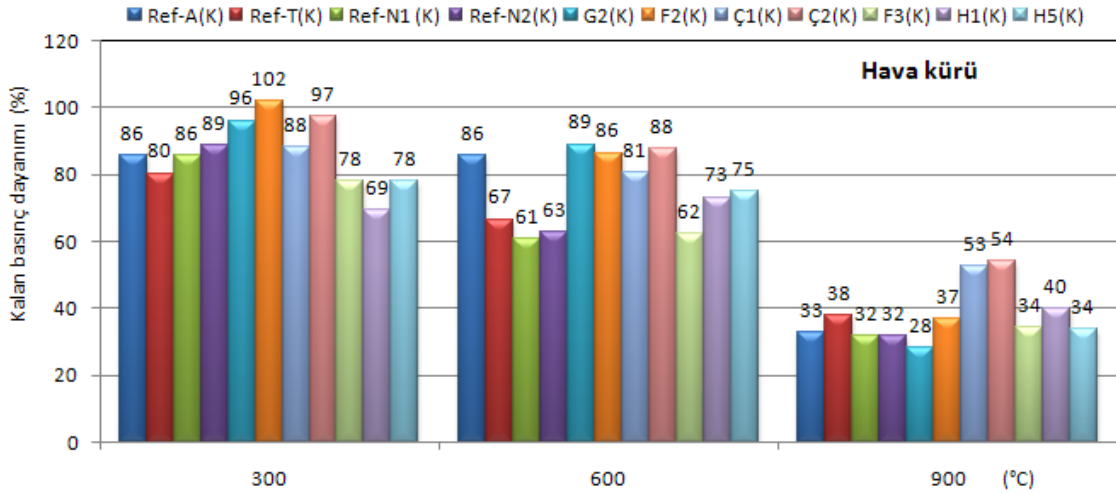
Hafif agregaların normal agregaya göre 600 °C’den sonra üstün olduklarını Neville [52] vurgulamıştır. Türker vd. [163] çalışmasında, pomzadan üretilmiş harçlarda yüksek sıcaklık sonrası çatlak oluşumu agregalar ara yüzeyinde değil de agreganın kendisinde gerçekleşmiştir. Buda ara yüzey kalitesinin yüksek olduğunu göstermiştir. Aydın ve Baradan [193], çalışmalarında, standart kum, tuğla kırığı ve pomza kumu kullanmışlardır. Çalışmalarında pomza kumlu numunelerin 600 °C sıcaklıkta dayanım kaybına uğramadığı aksine dayanım artışı olduğunu görmüşler ve bunu da nemli örneklerin içsel kürlenmesine bağlamışlardır.

Şekil 5.26’da Ref-N2 serisinin özellikle 600 ve 900 °C’de diğer serilere göre daha fazla dayanım kaybettiği açıkça görülmektedir. Ref-N2 serisi Ref-N serisine göre yüksek çimento dozajına ve bundan dolayı da yüksek mukavemete sahiptir. Agregaların ve kendiliğinden yerleşebilmenin kıyaslandığı bu grupta en az dayanımı Ref-A serisi kaybetmiştir. 20 °C’de en düşük dayanıma sahip olan bu beton yüksek sıcaklıklarda çok fazla tahrip olmamıştır. Bu duruma göre düşük mukavemet ve düşük dozajın dayanım kaybını azalttığı söylenebilir.

Hava kürü uygulanan karışımların yüksek sıcaklık sonrasında kalan dayanımları Şekil 5.27’de verilmiştir. Burada da Ref-A serisi diğerlerine göre 300 ve 600 °C’de oldukça az dayanım kaybetmiştir. Ref-N2 serisinin dayanım kaybı hava kürü durumu her sıcaklık için su

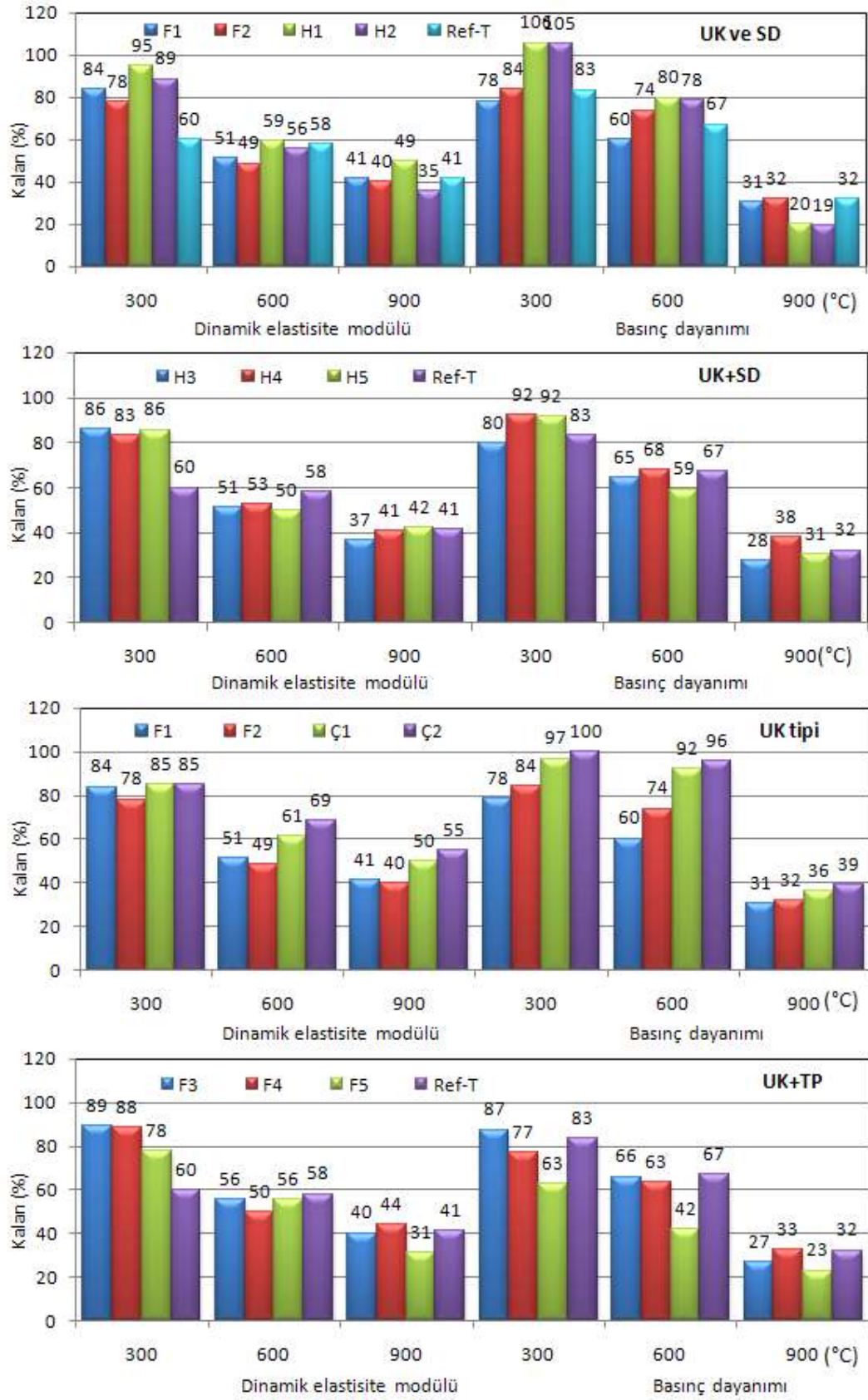
kürü durumuna göre daha azdır. Ref-N serisinin hava kürlü numuneleri de yüksek sıcaklık derecelerinde su kürü durumuna göre daha az dayanım kaybetmiştir. Pomza agregalılarda ise kür şartı ile ilgili net bir şey söylemek mümkün değildir. Hava kürü uygulanan mineral katkılı karışımların; dayanım kayıpları su kürlü numunelere göre genel olarak 300 °C daha fazla, 600 °C’de ve 900 °C’de daha azdır. 300 °C sıcaklık betonu hasara uğratmak için zayıf kalmıştır. 600 ve 900 °C sıcaklıklar yüksek sıcaklıklara direnci belirlemede daha belirleyici olmuştur.

SD kullanımında (H1 ve H2) 600 °C’ye kadar UK (F1 ve F2) ve Ref-T’ye göre daha iyi performans sergilemesine karşın Şekil 5.28’de görüldüğü gibi 900 °C’de en fazla dayanım kaybına uğrayan seri olmuştur. Sancak ve Şimşek’de [160] 800 °C ve üstünde silis dumanı kullanımının basınç dayanımına olumsuz etkisini çalışmalarında vurgulanmıştır. UK ve SD’nin birlikte kullanımında (H3, H4 ve H5); başlangıçta en yüksek mukavemete sahip olan H3 serisi 300, 600 ve 900 °C’de en fazla dayanım kaybeden seri olmuştur. Uçucu kül sınıfının KYHB’de kullanılması durumunda yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığa etkisi F1, F2, Ç1 ve Ç2 serileri ile incelenmiştir. Bu karışımların sonuçlarından F sınıfı UK’lerin yüksek sıcaklık dirençlerinin C sınıfından daha yüksek olduğu Şekil 5.28’den açıkça görülmektedir. UK ve TP (toz perlit) birlikte kullanıldığı seriler (F3, F4 ve F5) içerisinde yüksek sıcaklıklara direnç açısından en optimum karışım F4 olmuştur.



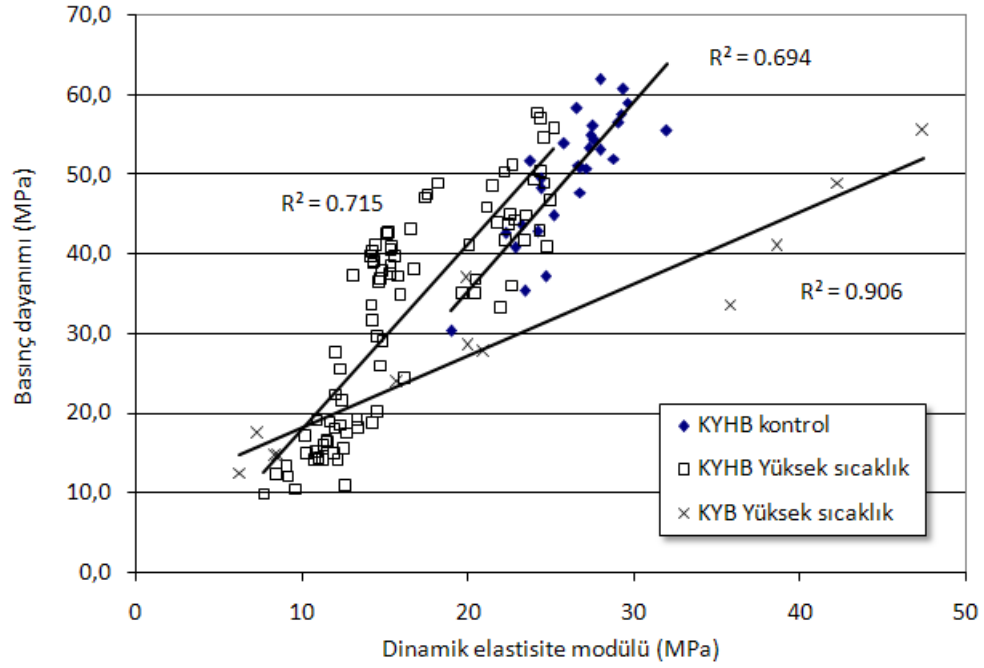
Şekil 5.27. Hava kürlü karışımların 300, 600 ve 900 °C’de kalan basınç dayanımları

Yüksek sıcaklıklar sonrasında numunelerin ultra ses hızı ölçülmüş ve dinamik elastisite modülleri hesaplanmıştır. KYHB’ler ve KYB’ler için dinamik elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki doğrusal ilişki Şekil 5.29’da aranmıştır. Aynı basınç dayanımı için KYB ve KYHB’ler farklı dinamik elastisite modüllerine sahiptirler. Hafif agregalar betonun elastisite modülünü düşürmektedir. İlerleyen sıcaklık derecelerinde de bu olgu değişmemektedir.

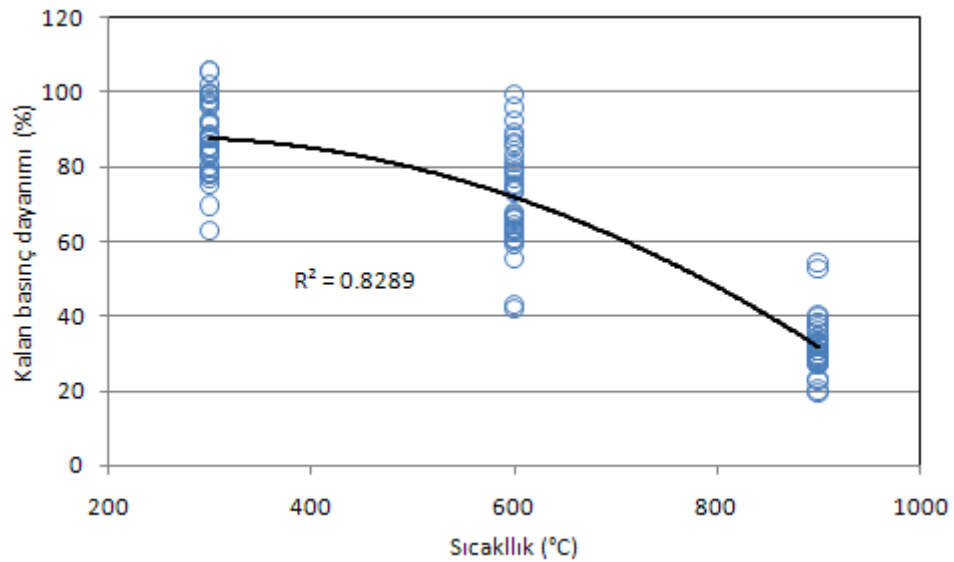


Şekil 5.28. Farklı toz tipli KYHB karışımlarının 300, 600 ve 900 °C’de kalan ED ve basınç dayanımları

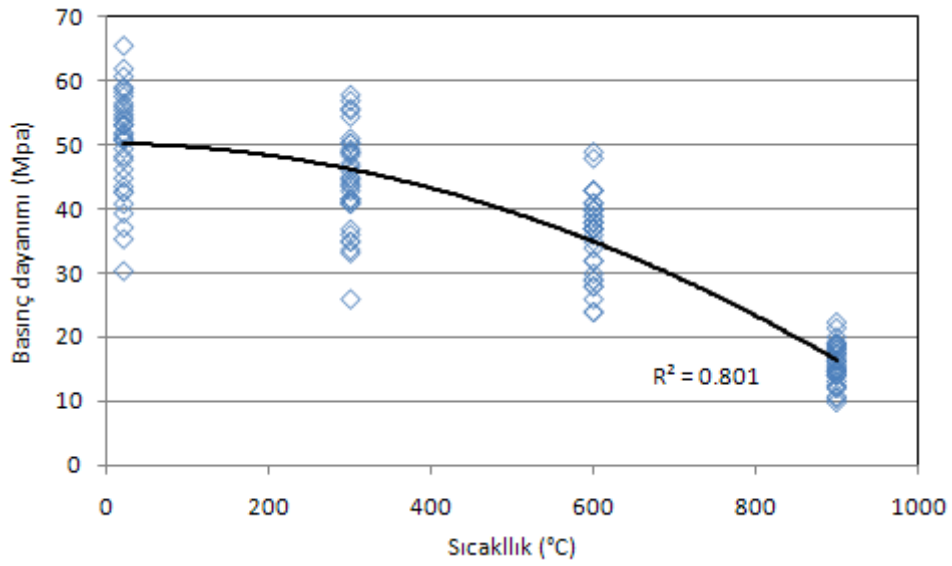
Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm karışımların basınç dayanımı ile sıcaklık ve kalan basınç dayanımı ile sıcaklık ilişkileri Şekil 5.30 ve 5.31’de verilmiştir. Buna göre ortalama olarak numuneler basınç dayanımlarının 300 °C’de %10’unu, 600 °C’de %25’ini ve 900 °C’de ise %65’ini kaybetmişlerdir.



Şekil 5.29. Yüksek sıcaklık deney numunelerinde ED ve basınç dayanımları arasındaki ilişki



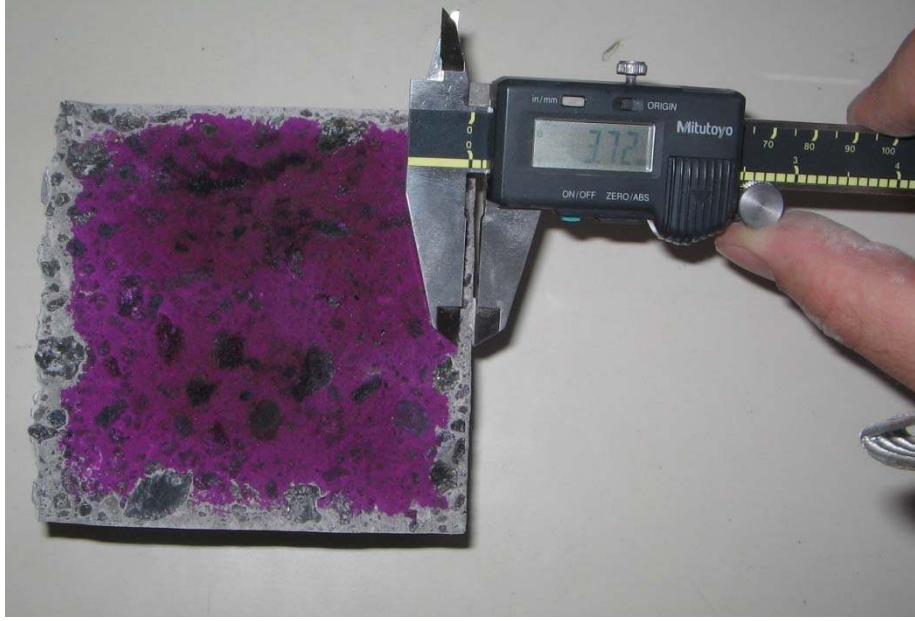
Şekil 5.30. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm numunelerde kalan basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi



Şekil 5.31. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan tüm numunelerde basınç dayanımı sıcaklık ilişkisi

5.4.3. Karbonatlaşma

Hızlandırılmış karbonatlaşma tekniği üzerine henüz tam bir prosedür bulunmamaktadır. Sanjuan ve diğ. [194] hızlandırılmış karbonatlaşma testleri için ortam karbondioksit miktarının %20'nin üzerine çıkmaması gerektiğini, bu değerin üzerine çıkılması durumunda gerçek dışı sonuçlarla karşılaşılabilceğini belirtmişlerdir. Fakat daha önce yapılan çalışmada [177] %40 CO₂ oranına maruz bırakılan numuneler ile doğal ortama bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri arasında gayet anlamlı ilişkiler çıkmıştır. Ayrıca Papadakis ve diğ.[169] çalışmalarında %50 CO₂ oranını kullanmışlardır. Yazarlar deneysel çalışmadan elde ettikleri veriler ile oluşturdukları teoriksel modelin gayet uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da hızlandırılmış karbonatlaşma çalışmalarında yine %40 oranı seçilmiştir. Ortam bağıl nemi ise karbonatlaşmanın en hızlı gelişebileceği %55 olarak sabit tutulmuştur. Karbonatlaşması ölçülecek serilerin hepsi aynı anda karbonatlaşma tankına yerleştirilmiştir. Deney sonrası ölçümler elektronik kumpas ile (Şekil 5.32) 0,01 mm hassasiyette ölçülmüştür. 1, 3 ve 7 gün olarak yapılan hızlandırılmış karbonatlaşma deneyinin sonuçları Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'de verilmiştir. Tablolarda karbonatlaşma süreleri ile karbonatlaşma derinlikleri arasındaki ilişkinin R² değerleri de ayrıca verilmiştir. Toplam 25 farklı serinin karbonatlaşma deneyleri yapılmıştır. Bunlardan 11 adedinin kür şartı da incelenmiştir. Tüm numunelerde karbonatlaşma, zamanla artış hızında azalma olsa da artmaktadır.



Şekil 5.32. Karbonatlaşma derinliği ölçümünden bir örnek

Tablo 5.14. Su kürlü numunelerin hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonuçları

	Karbonatlaşma derinlikleri (mm)			R ²	Karbonatlaşma katsayısı (mm/gün ^{0.5})
	1 gün	3 gün	7 gün		
G1	2.96	6.59	6.79	0.86	2.94
G2	3.04	6.74	6.97	0.86	3.01
Ref-G	2.25	5.23	6.18	0.94	2.51
F1	2.81	6.29	7.14	0.92	2.96
F2	2.43	5.57	7.59	0.98	2.92
H1	2.73	6.15	7.27	0.94	2.97
H2	2.29	5.3	6.37	0.95	2.57
Ç1	1.91	4.58	5.41	0.94	2.2
Ç2	1.71	4.21	4.67	0.9	1.94
L1	2.96	6.59	7.79	0.94	3.18
L2	2.53	5.76	7.21	0.96	2.87
L3	3.75	8.1	9.57	0.94	3.92
F3	3.12	6.9	9.15	0.98	3.57
F4	3.74	8.06	10.52	0.98	4.14
F5	2.59	5.87	7.94	0.98	3.07
H3	3.35	7.33	7.96	0.9	3.37
H4	3.49	7.59	8.97	0.94	3.67
H5	2.42	5.56	6.56	0.94	2.67
Ref-T	1.38	3.58	4.23	0.93	1.71
P0	2.81	6.29	7.14	0.92	2.96
P10	3.66	4.11	7.85	0.94	2.87
P20	3.41	7.44	8.8	0.94	3.60
P30	5.21	10.87	12.34	0.92	5.15
Ref-A	2.3	5.33	6.3	0.94	2.56
Ref-N1	0.57	1.65	1.95	0.93	0.78
Ref-N2	0.44	1.21	1.53	0.96	0.6

Tablo 5.15. Hava kürlü numunelerin hızlandırılmış karbonatlaşma deney sonuçları

	Karbonatlaşma derinlikleri (mm)			R ²	Karbonatlaşma katsayısı (mm/gün ^{0.5})
	1 gün	3 gün	7 gün		
Ref-A(K)	6.62	13.56	15.52	0.93	6.47
Ref-T(K)	5.26	10.97	11.96	0.9	5.08
Ref-N1(K)	4.41	9.35	10.05	0.89	4.29
Ref-N2(K)	4.49	9.5	10.32	0.9	4.39
G2(K)	3.07	6.79	8.02	0.94	3.28
Ç1(K)	2.19	5.13	5.96	0.93	2.44
Ç2(K)	2.75	6.19	6.92	0.91	2.89
F2(K)	2.25	5.23	6.38	1	2.56
F3(K)	3.11	6.88	8.62	0.99	3.44
H1(K)	3.68	7.95	9.4	0.94	3.85
H5(K)	4.21	8.96	10.59	0.94	4.34

Hızlandırılmış ortamda yapılan karbonatlaşma derinliklerinin literatürdeki veriler ile karşılaştırılması güçtür. Her deneysel çalışmada farklı farklı metot ve ortam değişkenleri kullanımından dolayı, bu çalışmada elde edilen sonuçlar kendi içersinde karşılaştırılmıştır. Aynı numunelerin uzun süreli doğal ortamda uğrayacakları karbonatlaşma derinlikleri ile kullanılan metodun gerçeğe uyarlanması mümkün olabilir. Ancak buda oldukça uzun bir süre gerektirmektedir.

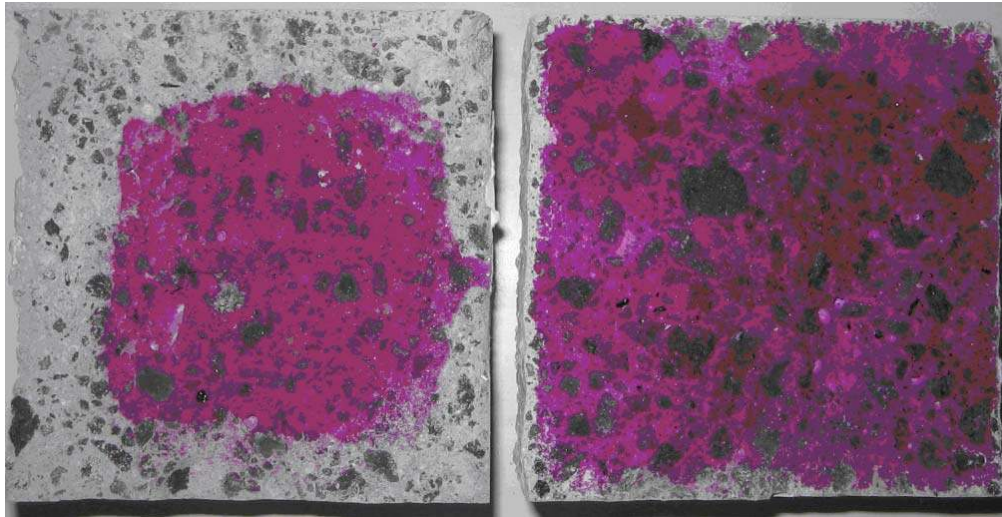
Uçucu kül sınıflarından C sınıfı uçucu külün F sınıfına göre daha yüksek karbonatlaşma hızı olduğu görülmektedir. F1 ve F2 numunelerinin Ç1 ve Ç2 numunelerinden yüksek çıkmasının nedeni C sınıfı uçucu küllerin ortama daha fazla karbonatlaşma reaksiyonuna girecek ürün bırakmasıdır. C sınıfı uçucu küller daha fazla CaO içermektedir. Bu ürün ise hidrasyon neticesinde serbest kirece dönüşür. F sınıfı uçucu küllerde ise yüksek SiO₂ içeriğinin gecikmeli olarak hidrasyon reaksiyonuna girerek sonradan boşluk tıkaması ve ayrıca muhtemel Ca(OH)₂'leri bağlaması ile karbonatlaşma reaksiyonunu yavaşlamıştır.

Kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda uçucu külün tek ve toz perlit ile çeşitli varyasyonlarda denendiği F serileri incelendiğinde en hızlı karbonatlaşmanın F3 serisinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu seriler içerisinde en yüksek toz perlit miktarına sahip olan seri F3'dür. F3 serisinde kullanılan toz perlit de pomza gibi süngerimsi yapıya sahiptir. Buda gaz geçirimsizliğini kolaylaştırmış ve karbonatlaşma hızını arttırmış olabilir. Tablo 5.15'de görüldüğü üzere toz perlitin kullanıldığı F3, F4 ve F5 serileri F1 ve F2 den daha hızlı karbonatlaşmaktadırlar. Uçucu kül miktarının artışı da (F1 ve F2) karbonatlaşma hızını arttıran bir etken olmuştur. Uçucu küllü numuneler genel olarak silis dumanlı serilere göre de yüksek karbonatlaşma hızına sahiptirler. Bu sonuç literatürle iyi derecede paralellik arz etmektedir [195–197]. Byfors [195] aynı su/bağlayıcı oranında FA ve SD katkısının karbonatlaşmaya etkisini incelemiştir. Yazar SD katkılı numunelerin karbonatlaşma hızına kontrol numunesine kıyasla etki etmediğini ve uçucu küllü numunelerin ise karbonatlaşma hızını arttırdığını

belirtmişleridir. Ayrıca Khan [197] SD ilavesinin karbonatlaşma hızını çok hafif arttırdığını ve UK ilavesinin ise önemli derecede arttırdığını belirtmiştir.

Deney sonuçları incelendiğinde tüm sürelerde en yüksek karbonatlaşma derinliğinin Ref-A serisinin hava kürlü numunelerinde olduğu görülmektedir. Ref-A serisi KYB özelliği olmayan tek seridir. Bütün serilerin hava kürlü numuneleri, su kürlü numunelerine göre yüksek karbonatlaşma katsayısına sahiptir. Ancak hava kürlü durumunda, karbonatlaşma açısından en fazla etkilenen numuneler doğal agregalı olanlardır. Doğal agregalı KYB'lerin karbonatlaşma hızları su kürlü durumunda oldukça düşüktür. Buna karşılık hava kürlü durumunda ise karbonatlaşma hızlarında yaklaşık 4 kat artışın olmuştur. Kür şartından pomza agregasının daha az etkilenmesinin sebebi daha önceki deneylerde karşılaşılan durumun burada da etkili olmasıdır. Pomza agregasının yüksek oranda nem tutma kabiliyeti karbonatlaşma deneylerinde de etkili olmuştur. Yüksek oranda nem tutma özelliği hava kürlü ortamından fazla etkilenmesini önlemiştir. Kuru ortamda pomzanın bünyesinde tuttuğu su hidratasyonu biraz daha devam ettirmiş ve bu şekilde özellikle agrega civarında daha iyi ara yüzey oluşmasına katkıda bulunmuştur. Daha iyi gelişen ara yüzey gaz geçirimsizliğinin azalmasında önemli bir rol oynamıştır. Kür şartından etkilenme durumuna örnek bir numuneye ait foto Şekil 5.33'de verilmiştir.

Su kürlü ortamında ise dere agregasına göre pomza agregalı numunelerin karbonatlaşma hızları fazladır. Bu durum agreganın kendisinin de geçirgenliğinden kaynaklanmaktadır. Pomza agregasının süngerimsi yapıda olması iç bölgelere gaz geçirimini kolaylaştırmış ve reaksiyonun daha derinlerde gerçekleşmesine neden olmuştur.



Şekil 5.33. Hava kürlü (solda) ve su kürlü (sağda) numunenin karbonatlaşma derinliği

5.4.4 Sülfürik asit

Kendiliğinden yerleşen hafif betonların asitli sulara dayanıklılığını belirlemek, kendiliğinden yerleşen dere agregalı betonlar ve vibratör ile sıkıştırılmış hafif beton ile kıyaslamak için numuneler sülfürik aside maruz bırakılmıştır. Toplam 45 günlük deney süresinin sonunda, numuneler yıkanmış ve yumuşak dış yüzey tel fırça yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Deney sonrasında numunelerin görünür poroziteleri, hacimleri, birim ağırlıkları ile basınç dayanımları hesaplanmış ve deney öncesindeki durumları ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.16 ve 5.17’de verilmektedir.

Çalışmada toplam 20 farklı karışımın sülfürik asitlere dayanıklılığı incelenmiştir. Bunlardan 4 tanesi kontrol karışımı, 3 tanesi genleştirilmiş perlit agregasının kullanıldığı ve geri kalan 12 karışım ise toz tipi ve miktarı ile ilgili karışımlardır. 19 karışımdan bazılarının da ayrıca havada kür edilmiş numuneleri de deneylere tabi tutulmuştur. Havada kür edilen numune rumuzlarının yanına (k) ibaresi yazılmıştır.

Tablo 5.16. Suda kür edilen numunelerin sülfürik asit deney sonuçları

	Kontrol				45 gün sülfürik asit			
	Hacim dm3	Br.Ağr. gr/dm3	Por. %	Basınç Mpa	Hacim dm3	Br.Ağr. gr/dm3	Por. %	Basınç Mpa
F1	0.991	1885	19.5	60.9	0.986	1859	21.6	53.6
F2	0.992	1756	19.6	61.9	0.986	1751	19.7	54.7
H1	0.994	1723	18.7	61.9	0.991	1716	19.3	55.8
H2	0.987	1735	15	61.2	0.983	1723	16.6	56.3
Ç1	0.993	1852	17.6	61.7	0.991	1827	18.5	53.8
Ç2	1.009	1769	16.9	63.3	0.982	1745	17.9	55.4
F3	0.981	1825	18.5	59.1	0.968	1810	21.1	48.9
F4	0.994	1750	19.8	61.4	0.988	1744	20.8	52.4
F5	0.987	1749	17.8	63.4	0.985	1740	19.7	52.6
H3	0.991	1771	16.3	66.4	0.974	1713	18.7	59
H4	0.994	1815	15	65.9	0.989	1799	17.7	58.4
H5	0.988	1815	15.9	64.5	0.985	1769	18.5	57.1
Ref-T	0.980	1767	19.4	59.6	0.964	1760	21.1	51.8
P0	0.991	1885	19.5	60.9	0.986	1839	21.6	53.6
P10	0.99	1748	20.1	60.1	0.983	1744	20.6	50.5
P20	0.988	1722	20.3	57.7	0.982	1714	21	48.3
P30	0.989	1706	20.3	55	0.986	1702	20.7	44.9
Ref-A	0.982	1675	24.9	47	0.977	1668	25.7	31
Ref-N1	0.974	2292	14.5	69.1	0.962	2286	15.9	58.4
Ref-N2	0.968	2336	12.9	78	0.964	2333	14.1	70.5

Sülfürik asit deneyleri için diğer çalışmalarda çok farklı yöntemler kullanılmıştır. Bunlar; sülfürik asit çözeltisine bırakma, mikro biyolojik testler ve sahada sülfürik asidin bol olduğu ortamlara bırakmaktır. Sülfürik asit çözeltisine bırakma hızlı ve kontrolü rahat olduğu için sıklıkla başvurulandır. Ancak bu metotta da %1–5 arasında farklı oranlarda çözelti

kullanıldığı gibi deneyin ıslanma-kuruma ya da sürekli içersinde bırakma gibi kendi arasında pek çok metoda ayrılabilir. Bu durum diğer çalışmalardaki veriler ile kıyaslamayı güçleştirmektedir. Karahan ve diğ. [198] %1'lik çözeltiye bırakılma durumunda 1 yıl sonunda puzolan katkılı çimentolu karışımların dayanım kaybının %12 iken düz PÇ'li karışımların dayanım kayıplarının %21 olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 5.17. Havada kür edilen numunelerin sülfürik asit deney sonuçları

	Kontrol				45 gün sülfürik asit			
	Hacim dm ³	Br.Ağr. gr/dm ³	Por. %	Basınç MPa	Hacim dm ³	Br.Ağr. gr/dm ³	Por. %	Basınç MPa
Ref-A(K)	0.978	1633	28.1	32.8	0.975	1647	25.5	33.3
Ref-T(K)	0.965	1763	23.8	47	0.959	1763	20.5	47.7
Ref-N1(K)	0.974	2266	18.5	45	0.946	2268	15.6	46.3
Ref-N2(K)	0.983	2291	18.8	52.2	0.974	2315	14.5	55.3
G2(K)	0.981	1737	23.5	43.5	0.981	1755	20.3	46
F2(K)	0.993	1732	24.2	46.3	0.965	1799	12.6	47.4
Ç1(K)	0.972	1684	24	43.1	0.943	1769	16.4	44.9
Ç2(K)	0.961	1701	22	43.4	0.983	1663	18.4	45.9
F3(K)	0.982	1774	24.2	46.7	0.969	1724	20.9	49.5
H1(K)	0.987	1705	20.3	58.7	0.976	1848	15.6	59.5
H5(K)	0.988	1768	16.6	54.3	0.97	1782	15	55

Deney sonrası numunelerin genelinde birim ağırlıkta kayda değer bir değişiklik yoktur. Hacimlerde ise az bir miktar düşme söz konusudur. Basınç dayanımındaki değişiklik ise %1 ile %39 arasında değişmektedir. Uçucu küllü numunelerde genel olarak hem porozite hem de basınç dayanımında etkilenme diğer numunelere göre daha fazladır. Silis dumanı ise tam tersi olarak sülfürik asit direncini arttırmıştır. H1 ve H2'de basınç dayanımındaki kayıp sırasıyla %3 ve 5 iken F1 ve F2'de ise bu kayıp %21 ve 12'dir.

Dere agregalı KYB'ler pomza ve perlit agregalı KYHB'lere göre sülfürik aside daha fazla direnç göstermiştir. Dere agregalı serilerin daha geçirimsiz olması ve pomzaya göre daha az su emmesi sülfürik asidin iç bölgelere geçişini zorlaştırmıştır.

Havada kür edilen numunelerin sülfürik asit sonrasındaki davranışları suda kür edilenlerden biraz farklıdır. Su kürlü numunelerin tamamında basınç dayanımında kayıp varken hava kürlü numunelerin çoğunda aksine az bir miktar artış vardır. Bu sülfürik asit çözeltisi içersine beklerken suyun etkisiyle hidrate olmayan ürünlerin yeniden hidratasyonundan kaynaklanmıştır. Hava kürlü numunelerin sülfürik asit etkisi sonunda basınç dayanımlarındaki az bir miktar artışa rağmen nihai dayanımları su kürlü numunelerin basınç dayanımlarından düşüktür.

45 günlük maruz bırakma sonrasında numunelerde gözle görülür bir fiziksel bozulma gerçekleşmiştir. Numune yüzeylerinde sülfürik asitten kaynaklanan aşınmalar meydana

gelmiştir. Özellikle kendiliğinden yerleşebilmenin iyi bir özelliği olan yüzey düzgünlüğü sülfürik asit deneyleri neticesinde tüm numunelerde kaybolmuştur (Şekil 5.34). Yüzeye düzgünlüğü veren çimento hamuru çözünmek suretiyle kaybolmuş ve agregalar açığa çıkmıştır.



Şekil 5.34. Sülfürik asit çözeltisinde 45 gün bekletilmiş numune (solda) ve kontrol numunesi (sağda)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 46 farklı KYHB'nin (kendiliğinden yerleşen hafif beton) taze beton karışımı denenmiştir. Bunlardan 23 tanesi istenilen taze özellikleri sağlamış, geri kalanlar ise ya birim ağırlıklar istenilen düzeyde olmamış ya da KYB (kendiliğinden yerleşen beton) özelliği göstermemiştir. 23 farklı KYHB beton numunenin yanında kıyaslama amaçlı 1 adet geleneksel vibrasyonla sıkıştırılmış hafif beton ve 2 adet de dere agregalı normal ağırlıklı KYB üretilmiştir. Sonuç olarak toplam 26 farklı serinin sertleşmiş haldeki özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kür şartının etkisini incelemek için karışımlardan 11 tanesine ayrıca hava kürü uygulanmıştır. Çalışmada sonuç olarak 26 adet karışıma ait 1300 adet 10 cm'lik küp numune ve 300 adet 10×10×50 cm kiriş numune üzerinde sertleşmiş haldeki özellikler belirlenmiştir.

KYHB üretimi için, iri ve ince agrega olarak bazaltik pomza seçildiğinde tüm karışımlar KYB özelliklerini sağlamıştır. İnce agreganın perlit ile yer değiştirmesinde ise %30'a kadar KYB özellikleri sağlanabilmiştir. Hazırlanan KYHB'lerin taze haldeki birim ağırlıkları 1900–2000 gr/dm³ ve etüv kurusu birim ağırlıkları 1700–1800 gr/dm³ arasında değişmiştir. Bazaltik pomza ile KYHB yapımıyla birim ağırlıklar KYB'ye göre yaklaşık olarak %25 azalmıştır. UK'nin (uçucu kül) SD (silis dumanı), PT (pomza tozu) veya TP (toz perlit) ile kullanımında, tekli kullanımlara göre V hunisi akış süreleri ile segregasyon oranlarında daha iyi sonuç vermiştir. İki farklı tozun birlikte kullanılması durumunda KYB özelliklerinin daha iyi olması tozların farklı irilikte olup daha iyi boşluk doldurmasına bağlanmıştır. Bu çalışma ile KYHB üretiminde toz malzeme olarak UK, SD, TP ve PT'nin kullanılabildiği görülmüştür. Özellikle birlikte kullanımları daha yararlı olmuştur.

Basınç dayanımları açısından, tüm numuneler ele alındığında, en düşük dayanımlar vibratör ile sıkıştırılmış ve kendiliğinden yerleşme özelliği olmayan HB'lerden (hafif beton) elde edilmiştir. En yüksek dayanım ise dere agregası ile üretilmiş KYB'lerde görülmüştür. KYHB'lerin dayanımları ise 50 ile 65 MPa arasında çıkmıştır. KYHB'ler arasında en yüksek basınç dayanım H3 serisinde çıkmıştır. H3 serisinin basınç dayanımı her yaşta diğer KYHB serilerini geçmiştir. Numunelerin bulundukları kür ortamı basınç dayanımlarını etkilemiştir. Tüm serilerde hava kürü durumunda basınç dayanımında standart su kürüne göre azalmalar olmuştur. Ancak basınç dayanımlarında, pomza agregalı numunelerde dere agregalılarına göre daha az etkilenme olmuştur. Hava kürü pomza agregalılarda %10–28, dere agregalılarda ise %35–37 oranında dayanım kaybına neden olmuştur. Pomzanın yüksek nem tutabilme kabiliyeti kuru ortamda bekleme durumunda hidratasyonun devamını sağlamıştır. Özellikle sıcak havalarda beton dökümünde veya kütle beton imalinde pomza agregasının tamamen ya da

kısmen kullanılması durumunda iç kürlenme yaparak beton dayanımına katkı sağlayacağı açık bir şekilde görülebilir.

Kapiler su emme ve basınçlı su geçirimsizliklerinde en etkili parametre kendiliğinden yerleşip yerleşmeme durumu olmuştur. HB, KYHB'lere göre yaklaşık 1,5 kat kapiler su emme ve 2–3 kat basınçlı su geçirimsizliği değerlerine ulaşmıştır. Numunelerin su emme miktarında agrega tipi de etkili bir parametre olmuştur. Pomza agregası basınçlı su geçirimsizliğini dere agregasına göre yaklaşık %20 oranında arttırmıştır. Kür şartları da su emme oranında etkiye sahip diğer önemli bir parametre olmuştur. Havada kür edilen numuneler suda kür edilenlere oranla %10–25 oranında daha fazla su emmiştir. Havada kür edilme durumunda numunelerin kapiler su emme ve porozite miktarları da artmıştır. Ancak pomza agregalılarda dere agregasındaki kadar su emme ve porozite fazla artmamıştır. Dere agregasında su emme ve porozite hava küründe sırasıyla %19–25 ile %20–22 arasında artarken pomzada bu artış sırasıyla %10–22 ve %10–19'dur. Kür şartlarının çok iyi sağlanamayacağı durumlarda, karışımlarda bir miktarda olsa pomza gibi bünyesinde su tutabilen agregalara yer vermek, su geçirimsizliği ve basınç dayanımı açısından yararlı olabilir.

Donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrasında en yüksek basınç dayanımı KYB'dedir. En düşük dayanım ise HB'dedir. Dayanım kayıpları, pomza agregalı KYHB'lerde %8–16, dere agregalı serilerde ise %7–14'tür. Pomzanın bünyesinde yüksek miktarda su tutabilmesi ve donma sırasında da zayıf yapıları nedeniyle daha fazla hasar görmüşlerdir. Genleştirilmiş perlit agregası da aynı durumdan dolayı donma-çözülme dayanıklılığını azaltmıştır. Perlit agregalı serilerde dayanım kaybı %20 civarındadır. Mineral katkıların donma çözülme direncinin incelenmesinde, bu çalışmada kullanılan UK, SD, PT ve TP'nin donma-çözülme dayanıklılığını azalttığı görülmüştür.

Yüksek sıcaklık deneylerinde agrega açısından bakıldığında pomza agregasının yüksek sıcaklık direnci dere agregasına göre daha fazladır. Kür şartında ise genel olarak havada kür edilen numunelerin dayanım kaybı ileri sıcaklık derecelerinde suda kür edilenlere oranla az çıkmıştır. Genleştirilmiş perlit agregasının karışımdaki oranı arttıkça 600 °C'ye kadar dayanım kaybı azalmıştır. 900 °C ise dayanım kayıpları aynı kalmıştır. Hem C sınıfı hem de F sınıfı UK yüksek sıcaklık direncini arttırmıştır. F sınıfı UK'nin dayanım kaybı C sınıfına göre daha azdır. SD'li seriler 300 ve 600 °C'de oldukça iyi performans sergilemesine karşın, 900 °C'de oldukça fazla dayanım kaybı göstermiştir. Dinamik elastisite modülü hafif agregalı betonlarda aynı dayanım sınıfındaki dere agregalı serilere göre düşüktür. Yüksek sıcaklık deneylerinde ilerleyen sıcaklık derecelerinde de bu durum değişmemiştir.

Karbonatlaşma derinliği zamanla tüm serilerde artmıştır. Artış hızı giderek azalma eğilimindedir. Kür şartı karbonatlaşmada en belirleyici faktör olmuştur. Havada kür edilen

numunelerin karbonatlaşma hızları suda kür edilenlere nazaran çok fazladır. Bu durumdan dolayı oluşan fark doğal agregalı serilerde daha fazladır. Suda kür edilme durumunda dere agregalı KYB'lerin karbonatlaşma hızı, pomza agregalı KYHB'lerin karbonatlaşma hızından azdır. Agreganın gözenekli yapısı gaz girişini hızlandırmıştır. Bu durumu; genişleştirilmiş perlit agregasının kullanım oranı arttıkça karbonatlaşma hızı artırması doğrulamaktadır. C sınıfı UK'lerin karbonatlaşma hızları F sınıfına göre daha hızlı çıkmıştır. Ayrıca UK miktarındaki artış karbonatlaşmayı arttırmıştır. UK ile TP'nin birlikte kullanıldığı serilerde de yüksek karbonatlaşma hızları görülmüştür. SD karbonatlaşma hızını UK'ye göre daha az arttırmıştır. Karbonatlaşma açısından KYHB'ler içerisinde en uygun seri hiçbir mineral katkının kullanılmadığı Ref-T serisidir.

Sülfürik asit deneyleri neticesinde numunelerin hacimlerinde düşüş ve porozitede artış olmuştur. Yüzeylerde bulunan hamur matrisi çözünmek suretiyle kaybolmuş ve agregalar ortaya çıkmıştır. UK'ler sülfürik asit direncini düşürmüş SD'ler ise arttırmıştır. Sülfürik asit deneyleri sonrasında basınç dayanımındaki kayıp olarak incelendiğinde KYHB'lerin dayanım kaybı KYB ile aynı HB'den ise daha az olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak Türkiye'de zengin yatakları bulunan pomza agregası ile KYHB, toz malzemeli ya da viskozite arttırıcı kimyasal katkı ile üretiler. Ancak toz malzemeler ile üretilmesi hem ekolojik ve ekonomik yarar hem de yüksek mukavemet elde edilmesi açısından daha faydalı olacaktır. KYB'de hafif agrega kullanımı ile elde edilen KYHB'nin birim ağırlığı %25 azalırken buna mukabil mukavemette azalma %15 kadardır. Ancak bunun yanında ısı geçirgenliğinin azalması, iç kürleme yapması, yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı oluşu KYHB'yi tercih edilebilir bir beton türü yapmaktadır. KYHB kullanılması ile yetersiz sıkıştırmadan ve yetersiz kürden kaynaklanan dayanım ve dayanıklılık kayıpları en aza indirgenmiş olacaktır. Bu betonun hafiflik ve kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği, deprem bölgelerindeki yapılar ve ayrıca prefabrikasyon için tercih sebebi olabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda lif takviyesine yönelik araştırmaların yapılması ve ayrıca betonarme yapılar için önemli olan korozyon davranışının incelenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Zhu, W. Gibbs, J.C. and Bartos, P.J.M., 2001, Uniformity of in situ properties of self compacting concrete in full-scale structural elements, *Cement and Concrete Composites*, 23, 1, 57-64.
2. Shindoh, T., 1991, Fundamental study on properties of super workable concrete, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 13, 1, 179–184.
3. Ozawa, K. Mackawa, K. and Okmura, H., 1989, High performance concrete based on the durability of concrete, *Proceedings of the 2nd East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, vol. 1, 445–456.
4. Tanaka, S. 1992, The application of super workable concrete and polymer impregnated concrete form to PC cable-stayed bridge, *Proceedings of FIP Symposium*, 729–735.
5. Matsuoka, Y. Shindoh, T. and Akatsuka, H., 1992, Application of super workable concrete to construction of actual structure, *Concrete Journal*, 30, 2.
6. Nagataki, S. and Fujiwara, H., 1995, Self compacting property of highly flowable concrete, *Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology*, 301–314.
7. Rols, S. Ambroise, J. and Péra, J., 1999, Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 261–266
8. Erdoğan, T.Y., 2003, *Beton*, Metu Pres, Ankara.
9. Sonebi, M. ve diğ., 2000, *Properties of Hardened Concrete*, Brite EuRam, No. BRPR-CT96–0366.
10. EFNARC 2005, *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
11. Topçu, İ.B., 2006, *Beton Teknolojisi*, Uğur Ofset, Eskişehir.
12. Gündüz, L. ve diğ., 2006, 2006, Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği, *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 1(2) 43 – 49
13. Şimsek, O., 2004, *Beton Çesitleri*, Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 23-26.
14. Rilem, 1978, *Functional Classification of Lightweight Concretes*, Recommendation LC 1, Second Ed.
15. Sezgin, M., 1999, *Diatomitin Hafif Yapı Eldesinde Değerlendirilebilirliği*, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. A.B.D., Yüksek Lisans Tezi, Isparta.

16. İhtiyaroğlu, E., 1984, Tabii Hafif Agregalarla İmal Edilen Hafif Beton Blokların DuvarElemanı Olarak Özelliklerinin Tayini Üzerinde Araştırmalar, İmar ve İskan Bakanlığı yayınları, No: 5-76, s.61,Ankara.
17. Demirboğa, R. Örüng, İ. ve Gül, R., 2001, Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes, Cement and Concrete Research, 31, 1627–1632.
18. Sancak, E., 1999, Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi, S.D.Ü., Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
19. TS 2511, 1977, Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
20. TS EN 206–1, 2002, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. Doğan, H. ve Şener F., 2004, Hafif Yapı Malzemeleri, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 1, 51-53.
22. Borat, M., 1992, Türkiye Diyatomitlerinin Özellikleri ve Filtrasyon Karakteristikleri, İTÜ, Fen bilimleri Enst.Doktora tezi.
23. Nuhoglu, İ. ve Elmas, N., 1999, Alayunt Diyatomit Yataklarının Oluşumu ve Ekonomik Olarak İncelenmesi, I.Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, İzmir, 82-95.
24. Mete, Z., 1988, Kütahya-Alayunt Yöresi Diyatomit Yataklarının Zenginleştirilmesi, Akdeniz Üniversitesi Isparta Müh. Fak. Dergisi, Maden Mühendisliği Seksiyonu, Yamık (Ed), S: 1, Isparta, 184–201.
25. Açıkalin, N., 1991, Türkiye’de ve Dünya’da Diyatomit, MTA Genel Müd. F.E.D., Ankara.
26. Bircan, A., 1968, Türkiye Diyatomit Envanteri, MTA Yay. No = 138, Ankara.
27. Mete, Z., 1982, Kimi Batı Anadolu Diyatomit Yataklarının Özelliklerinin İncelenmesi ve Kullanımı Alanlarının Araştırılması, Doçentlik Tezi, E. Ü. Kimya Fak. Kimya Müh. Böl., İzmir.
28. DPT, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri IV.
29. Ünal O. ve Uygunoğlu, T., 2007, Diyatomitin Hafif Beton Üretiminde Kullanılması, İMO Teknik Dergi, Yazı 266, 4025 -4034.
30. DPT, 2005, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Yapı malzemeleri - Genleşen Kiler, s: 69–73.
31. Kırıl, N., 2002, Genlesen Kil Aramaları”, MTA Raporu, 1-25.

32. Gökçe, M., 2007, Genleşmiş Kil Agregalarının Hafif Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ANKARA
33. Kantarcı, A. ve Türkmen, İ., 2005, Kendiliğinden Yerleşen Betonların Geçirimlilik Katsayısı Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Farklı Kür Şartlarının Ve Genleştirilmiş Perlit Agregasının Etkileri, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK İstanbul.
34. Kaya, A., 2002, Styropor kullanılarak elde edilen hafif betonun karakteristik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
35. BASF, Styropor. Technical Information, 1996
36. Sönmez, R., Demir, M. Ve Ekim, H., Stiropor Hafif Agregalı Beton, Beton 2004 Kongresi, İstanbul.
37. Yıldız, S., Kaya, A., ve Keleştemur, O., 2007, Styropor Katılarak Elde Edilen Betonun Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi. 19 (2), 155-165,
38. Strand, P.R., 1983, Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J., Vol: 2, AIME, 1375-81
39. Loughbrough, R., 1991, Minerals in Lightweight Insulation, Industrial Minerals, October, 21-35
40. DORUK, M., 1974, Volkanik Tüflerin Karayolu Yapımında Kullanılması İle İlgili Bir Çalışma, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Fen Heyeti Müdürlüğü.
41. LEA, F.M., 1971, The Chemistry of Cement and Concrete, Chemical Publishing C.O. New York
42. Neville, A.M., 1993, Properties of Concrete. Pitmann Publishing, London
43. Şentürk, A. Gündüz, L. ve Sarıışık, A., 1995, Hafif inşaat ve izolasyon ham maddesi olarak pomza taşının değerlendirilmesi. Endüstriyel Ham maddeler Sempozyumu izmir. 213-219
44. Gündüz, L., 1998, Pomza Teknolojisi, İsparta.
45. Yazıcıoğlu, S. Arıcı, E. ve Gönen, T., 2003, Pomza Taşının Kullanım Alanları ve Ekonomiye Etkisi, F.Ü. DAUM Dergisi, 1, 118-123.
46. DPT, 1996, Yapı-Endüstrisi Hammaddeleri, TC. DPT Müsteşarlığı-Ankara
47. Carr, D.,1994, Industrial Minerals and Rocks- 6.Edition CA-USA

48. Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., 2006, Pomza ve mineral katkılı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin araştırılması, Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: 21 No:4, 675–680
49. Yaşar, E. Atış, C.D. Kılıç, A. ve Gülsen, H., 2003, Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash, Materials Letters, vol:57, 2267-2270.
50. Weber, S. and Reinhardt H.W., 1997 A new generation of high performance concrete: Concrete with autogenous curing. Advanced Cement Based Materials, Vol. 6, pp. 59-68.
51. Sadouki, H. and Wittmann, F.H., 2001, Numerical Investigations on damage in cementitious composites under combined drying and shrinkage and mechanical load. 4th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures(Framcos), In: de Borst et al. (Eds), Cachan, France, pp. 95-98.
52. Philleo, R., 1991 Concrete science and reality. Materials Science of Concrete II, American Ceramic Society, Westerville, 1–8.
53. Bentz, D.P. and Snyder, K.A., 1999, Protected paste volume in concrete extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1863–1867.
54. Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T. and Mori, H., 1999, Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 611–614.
55. Takada, K. Van Bruegel, K. Koenders, E.A.B. and Kaptijn, N., 1999, Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete. International Workshop Autoshrink'98. In: Tazawa, E-I. Ed., Hiroshima, Japan, pp. 229–239.
56. Bentur, A., Igarashib, S-I. and Kovler, K., 2001, Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1587–1591.
57. Lura, P., Bentz, D.P., Lange, D.A., Kovler, K. and Bentur, A., 2004, Pumice aggregates for internal water curing. International RILEM Conference on the Advances in Concrete Through Science and Engineering, Evanston, IL, pp. 137–151.
58. Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., 2006a, Effects of Lightweight Aggregates on Autogenous Deformation in Concrete, 16th European Conference of Fracture (ECF16), Measuring, Monitoring, and Modeling Concrete Properties: MMMCP in Honor of Surendra P. Shah, plenary lecture. In: Konsta-Gdoutos (Ed), Greece, pp.163–170.

59. Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., 2006b, Influence of lightweight aggregates on internal curing and fracture of concrete, International RILEM Conference, Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, In: Jensen, Lura, and Kovler (Eds), Lyngby, Denmark, PRO 52, pp. 31–40.
60. Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B., 1999, Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1835–1840.
61. Rols S., Ambrosie J., and Pera J., 1999, Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, Cem. Concr. Res., Vol: 29, pp. 261–266.
62. Ambrosie J. and Pera J., 2002, Design of Self-Levelling Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 93–98.
63. Khayat K.H. Bickley J. and Lessard M., 2000, Performance of Self-Consolidating Concrete for Casting Basement and Foundation Walls, ACI Materials Journal, May-June, pp. 374–380.
64. Okamura, H. and Ouchi, M., 1999, Self Compacting Concrete Development, Present and Future”, proceeding of 1st International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete, Sweden.
65. Ouchi M., 1999, „Self-compacting concrete – Development, applications and investigations,, Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p.
66. Collepardi M., ,2001, A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC), unpublished data, 10p.
67. Jacobs F. and Hunkeler F., 1999, Design of self-compacting concrete for durable concrete structures, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 397–410.
68. www.rilem.org, The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, from the name in French).
69. Walraven, J., 2003, Structural Aspects of Self Compacting Concrete, Proceeding of 3rd International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete, Iceland.
70. Brouwers, H. J. H. and Radix, H. J., 2005, Self-compacting Concrete: Theoretical and Experimental Study, Cement and Concrete Research, 35, pp. 2116–2136
71. Yu, Z. Pan, Z. Liu, X. and Liu Z., 2005, Optimal Mixture Design of High Performance Self-compacting Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 181-190.

72. EFNARC 2002, Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
73. Stark, J. and Friebert, M., 2005, Some Aspects of Cement Chemistry Regarding Self-Compacting Concrete (SCC), First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 237-244
74. Sağlam, A.R. Parlak, N. Doğan, Ü.A. ve Özkul, M.H., 2004, Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 213-224.
75. Yazıcıoğlu, S. Çalışkan, S. and Türk, K., 2006, Effect of Curing Conditions on The Engineering Properties of Self-Compacting Concrete, Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 13, pp. 25–29.
76. Alyamaç, K.E., 2008, Kendiliğinden yerleşen betonun lineer olmayan kırılma mekaniği prensipleriyle incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
77. Wattanalamerd, C. and Ouchi, M. 2005, Flowability of Fresh Mortar in Self-Compacting Concrete Using Fly Ash, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 261-270
78. Khatib, J. M., 2007, Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash, Construction and Building Materials, 22, 9, 1963-1971.
79. Li, Y. Zhou, S. Yin, J. and Zhou, W. 2005, Experimental Study on Bond Strength of Rebar in High Performance Concrete Containing Ultra Fine Fly Ash, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 449–456
80. Ho, D.W.S. Sheinn, A.M.M. Ng, C.C. and Tam, C.T., 2002, The Use of Quarry Dusr For SCC Applications, Cement and Concrete Research, 32, pp. 505–50.
81. Yahia, A. Tanimura M. and Shimoyama Y., 2002, Evaluation of Deformability of Different Types of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 303–310.
82. Zhu, W. and Gibbs, J.C., 2005, Use of Different Limestone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 35, pp. 1457–1462.
83. Ye, G. Liu, X. Schutter, G.D. Poppe, A.M. and Taerwe, L., 2007, Influence of Limestone Powder Used as a Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Pastes, Cement and Concrete Compozites, 29, pp. 94–102.

84. Petersson, Ö., 2002, Limestone Powder as Filler in Self-Compacting Concrete – Frost Resistance, Compressive Strength and Chloride Diffusivity, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 391–396.
85. Felekoglu B., Baradan B., (2003). “Utilisation of Limestone Powder in Self-Levelling Binders”, International Symposium on Advances in Waste Management and Recycling, (Accepted to be published), 10p.
86. Erdoğan, T.Y., 1997, Admixtures for Concrete, METU Press, Ankara
87. Punkki J. Golaszewski J. and Gjorv O.E., 1996, Workability Loss of High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, September-October, pp. 427–431.
88. Kadri E.H. Aggoun S. Duval R. and Petruk M.P., 2000, Influence of C3A on physico-chemical and mechanical properties of high performance concretes, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume II, Istanbul, Turkey, pp. 31-39.
89. Meng, Y. Sui, K. Sun, Q. and Lu, Y., 2005, Effect on Properties And Of Concrete With Mix Materials of Gangue, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete China, 565-578
90. Yoo, J.H. Choi, J.J. and Choi D.S., 2005, Self Compacting Concrete Incorporating Atomized Steel Slag Aggregate, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 253-260
91. Xie, Y. Li, Y. and Long, G., 2005, Influence of Aggregate on Properties of Self-Consolidating Concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 161-171
92. Assaad, J. and Khayat, K.H. 2005, Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 102, pp. 145–153.
93. Aksoy, F., 2002, Effect of Aggregate Grading and Coarse Aggregate Type on the Properties of Self-Compacting Concrete, Master Thesis, Boğaziçi University Science and Engineering Institute, 98s.
94. Brouwers, H.J.H. and Radix, H.J., 2005, Self-Compacting Concrete: The Role of The Particle size Distribution, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 109-118
95. Bosiljkov, V. B., 2005, SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, Cement and Concrete Research, 33, pp. 1279–1286.

96. Sari, M. Prat E. and Labastire J.F., 1999, High strength self-compacting concrete – Original solutions associating organic and inorganic admixtures, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 29, pp. 813–818.
97. Su, N. Hsu K.C. and Chai H.W., 2001, A simple mix design of self-compacting concrete, *Cem. Concr. Res.*, Vol: 31, pp. 1799–1807.
98. Fang, W. Jianxiong, C. and Changhui, Y., 1999, Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives, *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, pp. 569–578.
99. Tu, T.Y. Jann, Y.Y. and Hwang, C.L., 2005, The Application of Recycled Aggregates in SCC, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Selfconsolidating Concrete, China*, 145-152.
100. Pichler R., 1999, The use of SCC for building the millenium tower in Vienna, *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, pp. 729–732.
101. Yazıcı, Ş., 2003, Süper Akışkanlaştırıcıların Betondaki Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5, pp. 1–10.
102. Akman, S., 1999, Yüksek Performanslı Betonların Taze Haldeki Özellikleri Üzerine Katkı Maddelerinin Etkisi, *Sika Teknik Bülten*, sayı: 2000/1, 4-7.
103. Özkul, M.H. Işık, İ.E. Sağlam, A.R. and Parlak, N., 2005, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Düzenleyici Katkı Kullanımı, *6. Ulusal Beton Kongresi Bildirileri, İMO İstanbul Şubesi*, 421-435.
104. Şahmaran, M. Christiano, H.A. amd Yaman, İ.Ö. 2006, The Effect of Chemical Admixtures and Mineral Additives on the Properties of Self-Compacting Mortars, *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 432–440.
105. Miao, C. Tian, Q. and Liu, J., 2005, High Performance Admixtures For Self-Compacting Concrete: Mechanism and Application in China Building, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China*, 75-85.
106. Felekoğlu, B. and Sarıkahya, H., 2007, Effect of Chemical Structure of Polycarboxylate based superplasticizers on workability retention of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, vol:22, 9, 1972-1980.
107. Jiang, Z. Sun, Z. and Wang, P., 2005, Effects of Polymers on Properties of Underwater Anti-Washout Self-Compacting Concrete, *First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete China*, 153-160.
108. Yahia, Y., Tanimura, M., and Khayat, K. H., 2005, Experiment Design to Evaluate the Effect of Mixture Parameters on Rheological Properties of Self-Consolidating

- Concrete Equivalent Mortar, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 271-281.
109. Tandırılı, E. Akalın, Ö. and Arca E., 2000, The effect of melamine based superplasticizers on the properties of concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, Istanbul, Turkey, pp. 453–462.
 110. Yoshioka K. Tazawa E.I. Kawai K. and Enohata T., 2002, Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, Cem. Concr. Res., Vol: 32, pp. 1507–1513.
 111. Sağlam, A.R., 2000, Süper akışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi, Sika Teknik Bülten, 4, 9-16.
 112. Topçu, İ.B. and Canbaz, M., 2007, Effect of Different Fibers on The Mechanical Properties of Concrete Containing Fly Ash, Construction and Building Materials, 21, pp. 1486–1491.
 113. TS EN 1008, 2003, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dâhil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
 114. Japanese Society of Civil Engineering, 1998, Guide to Construction of High Flowing Concrete, Gihoudou Pub. Tokyo.
 115. Hwang, C.L. and Hung, M.F., 2005, Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete, Construction and Building Materials, vol: 19, 619-626.
 116. Ferraris, C.F. Brower L. Ozyildirim C. and Daczko J., 2000, Workability of Self-Compacting Concrete, The Economical Solution for Durable Bridges and Transportation Structures, Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, Florida, pp. 398–407.
 117. Khurana, R. and Topçu O., 2000, Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I, Istanbul, Turkey, pp. 473–482.
 118. Bernabeu, M., 2000, Brite Euram Project: Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete- FINAL REPORT: TASK 8.3 Production System for Civil Engineering, GTM Construction, 40p.
 119. Bartos, P.J.M., 2005, Testing-SCC: Towards new European Standards for Fresh SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, China, 25-44

120. Person, B., 2001, A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, Cement and concrete research, 31, pp 193-198.
121. Uyan, M. Pekmezci, B.Y. ve Yıldırım, H., 2003, Akışkanlaştırıcı Katkı Kür ve Koşullarının Betonun Geçirimlilik Özellikleri Üzerine Etkileri, Sika Teknik Bülten, 1, 10–14.
122. Uyan, M., 1975, Betonda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İTÜ.
123. Kocataşkın, F., 1995, Permeability of Concrete, Bulten of Technical University of İstanbul, 8, ss. 50–56.
124. Buenfeld, N.R. ve diğ, 1998, Chloride Transport in Concrete Subjected to Electiricalal Field, Journals of Materials in Civil Engineering 10 (4), ss. 220–228.
125. Kropp, J. ve Hilsdorf, H.K., 1995, Performance criteria for concrete durability, RILEM report 12, E&FN Spon London.
126. Felekoğlu, B. Yardımcı, M.Y. ve Baradan, B., 2005, Kendiliğinden yerleşen betonların donma çözülme direnci, V. Ulusal Beton kongresi, İMO, İstanbul.
127. Baradan, B. Yazıcı, H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), DEÜ Mühendislik Fak. Yayınları, İzmir, 2002.
128. Person, B., 2003, Internal frost resistance and salt frost scaling of self compacting concrete, Cement and concrete research, 33, pp, 373-379.
129. Xie, Y. Liu, B. Yin, J. and Zhou, S., 2002, Optimum mix parameters of high strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash, cement and concrete research 32, pp 477-480.
130. TS 4834, 1986, Beton İle İlgili Terimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
131. Loo, Y.H. Chin M.S., Tam C.T. and K.C.G. and Ong, A, 1994, Carbonation Prediction Model For Accelerated Carbonation Testing of Concrete, Magazine of Concrete Research, 68, 191-200.
132. Tokyay, M., 1997, Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler, Çimento ve Beton Dünyası, sayı:8, 13-15.
133. De Ceukelaire, L. and Van Nieuwenburg D., 1992, Accelerated Carbonation of A Blast Furnace Cement Concrete, Cement and Concrete Research, 23, 443-452.
134. Gönen, T., 2003, Betonda sıkıştırma faktörünün karbonatlaşmaya etkisi, Yüksek lisans tezi, Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
135. Haque, M.N. and Kayyali O.A. 1995, Free and water soluble Chloride in concrete, Cement and Concrete Research 25(3), 531-542.

136. Neville, A.M. and Brooks, J.J., 1987, Concrete Technology. Addison Wesley Longman Ltd, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE 290.
137. Mehta, P.K., 1986, Concrete, structure properties and materials, Printice Hall, USA 152–158.
138. Güneysi, E. Özturan, T. ve Gesoğlu, M., 2005, Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Betonların Klorür Difüzyon Katsayılarının Belirlenmesi, V. Ulusal Beton Kongresi, ss. 143–152. İstanbul.
139. Yılmaz, A.B., 1994, Bazı İyonların Beton Dayanımı ve Beton Çeliği Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Adana, 11, 20, 23, 26-38.
140. ACI, Manual of Concrete Practice, Part I, 201.2R–9, Chapter II, Sulfate attack
141. Person, B., 2003, Sulphate resistance of self compacting concrete, Cement and concrete research, 1933-1938.
142. Lide, D.R., 1992, Handbook of Chemistry and Physics, 72nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
143. Bensted, J., 1993, Effect of silage upon hardened cement and concrete, Il Cem. 1, 3–10
144. Aköz, F. and Yüzer, N., 1994, Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri, Y.T.Ü. Dergisi, 3, 89-98.
145. Perkins, P.H. 1987, Concrete structures: repair, waterproofing and protection, Applied Science Publ. London, pp. 99–105.
146. Özturan, T. and Culfık, M.S., 2000, Residual Strength and elastic properties of normal and high strength concrete subjected to high temperature, Proc. Cement and Concrete Technology in the 2000 s, İstanbul, V2, pp. 97–106,
147. Noumowe, A.N. Clastres, P. Debicki, G. and Bolvin, M., 1994, High temperature effect on high performance concrete, (70–600 C), Strength and porosity, ACI-SP145, Proc. 3rd. Intern. Conf. On Durability of Concrete, pp. 157–172.
148. Hertz, K.D., 1992, Danish investigation on silica fume concretes at elevated temperatures, Technical paper, ACI Materials Journal, 89(4), 345-347.
149. Sanjayan, G. and Stocks, L.J., 1993, Spalling of high strength silica fume concrete in fire, Technical paper ACI material Journal, 90(2), 170-173.
150. Sancak, E. ve Şimşek, O., 2006, Yüksek sıcaklığın silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı hafif betona etkileri, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21, No 3, 443–450.

151. Poon, C.S. et al., 2001, Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research* (31) 1291-1300.
152. Shoaib, M.M. Ahmed, S.A. and Balaha, M.N., 2001, Effect of fire and cooling mode on properties of slag mortars, *Cement and concrete research*, 31, ss, 1533-1538.
153. Türker, P. Erdoğan, K. ve Erdoğan, B., 2001, Farklı tiplerde agregalar içeren yangına maruz kalmış harçların incelenmesi, *Çimento ve beton dünyası TÇMB*, 31, 52–60.
154. Kadiroglu, İ., 2005, Kendiliğinden yerlesen normal dayanımlı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma, *Batıçim Der. A.S.*, İzmir, 1-8.
155. Açikel, H. ve Günaydın, M., 2007, Nevşehir bims agregasından kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmesi, 7. Ulusal Beton Kongresi, İMO.
156. Türkmen, İ. and Kantarcı, A., 2007, Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Building and Environment* 42 2378–2383.
157. Topçu, İ.B. Uygunoğlu, T. ve Ünal, O., 2007, Kendiliğinden yerleşen yarı hafif betonların özelliklerinin araştırılması, 3 rd. International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul, 834-844.
158. Wu, Wu, Z. Zhang, Y. Zheng, J. and Ding Y., 2008, An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials* (article in pres)
159. Papadakis, V.G. Fardis, M.N. and Veyenas, C.G., 1992, Hydration and carbonation of pozzolonic cements, *ACI Materials Journal Technical Paper* (89); 2.
160. Cabrera, J.G., Lynsdale, C.J., 1988, A new gas parameter for measuring the permeability of mortar and concrete, *Magazine of Concrete Research*, (40):177-182.
161. Rossignolo, J.A. Agnesini, M.V. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites* (26): 375-380, 2004.
162. Taşdemir, C., 2003, Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33 1637-1642.
163. Dias, W.P.S, 2000, Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation, *Cement and Concrete Research*, 30, 1255-1261.
164. Atiş, C.D., 2003, Accelerated Carbonation and Testing of Concrete Made with Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 17,3, 147-152.
165. Yazıcı, H., 1997, Accelerated Carbonation Test of Concrete, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

166. Gönen, T. ve Yazıcıoğlu, S., 2005, Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatı Politeknik Dergisi Journal Cilt: 8 Sayı: 2 s. 233-237.
167. Gönen, T. Yazıcıoğlu, S., 2007, The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete. Construction and building materials, 21(5):1040–5.
168. ASTM C 666–92, 1992, Standart Test method for Freezing and Thawing Resistance,
169. TS 3449, 1980, Çabuk donma ve çözülme koşulları altında betonda dayanıklılık faktörü tayini, Türk standartları enstitüsü, Ankara.
170. Jansen, D.J., 2002, Requirements for a test of frost resistance of concrete, Frost resistance of concrete, edited by Setzer, Auberg and Keck, RILEM Proceeding PRO24, Germany.
171. The Concrete Society, “Permeability Testing of Site Concrete – A Review of Methods and Experience”, Technical Report No. 31, 1987.
172. Goldman. A., and Bentur, A. 1993, The Influence of Microfiller on Enhancement of Concrete Strength, Cement and Concrete Research, vol.23, pp.962-972.
173. Atış, C.D. and Bilim, C., 2007, Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag, Building and Environment, 42, 8, 3060-3065
174. Bai, J. Wild, S. and Sabir, B.B. 2002, Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC–PFA–MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth, Cement and Concrete Research, 32, 1813–1821.
175. Karahan, O. ve diğ., 2005, İki Farklı Portland Çimentolu Betonların Dayanımına Zaman Ve Kür Etkisinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 21 (1-2), 62-68,
176. ASTM C–125, 1994, Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, Annual book of ASTM Standards.
177. ACI, 1994, Cement and concrete terminology, ACI manual of concrete practice, 116R–90.
178. Kumar, R. and Bhattacharjee B., 2003, Porosity, pore size distribution and situ strength of concrete, Cement Concrete Research, 33, 155–64.
179. Mehta, P.K. Monteiro, P.J.M., 1997, Concrete Microstructure, Properties and Materials, Indian Concrete Institute, 548p.
180. Hale, W.M., Freyne, S.F. and Russell, B.W., 2009, Examining the frost resistance of high performance concrete, Construction and Building Materials 23, 878–888.
181. Özyurt, N. Taşdemir, C. Kara, G. ve Ertuğrul, C., 2005, Uçucu küllü betonlarda kırma kum içeriğinin beton özelliklerine etkisi, V. Ulusal beton kongresi, İMO, İstanbul.

182. Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., 2004, Silis dumanlı betonlarda donma çözülme etkisinin incelenmesi, Beton 2004 Kongresi, 367-375.
183. Aydın, S. ve Baradan, B., 2005, Yüksek sıcaklığı dayanıklı harç geliştirilmesi, V. Ulusal beton kongresi, İMO, ss. 451–460.
184. Sanjuan, M.A. and Olmo, C., 2001, Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating, Building and Environment, 36, 949–953.
185. Byfors, K., 1985, Carbonation of concrete with silica fume and fly ash. Nordic Concrete Research, Publication No. 4, Oslo, pp. 26–35
186. Maage, M., 1986, Carbonation in concrete made of blended cements, in: G.J. McCarthy, M. Maage, F.P. Glasser, D.M. Roy (Eds.), Symposium of Materials Research Society, vol. 65, Boston, USA, pp. 193–197
187. Khan, M.I. and Lynsdale, C.J., 2002, Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 32, 123–131.
188. Karahan, O. Arı, K. Haktanır, T. ve Atış, C.D., 2005, Farklı portland çimentolu betonların sülfürik asitli ortamlardaki dayanıklılığının karşılaştırılması, V. Ulusal Beton kongresi, İMO, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Tahir GÖNEN 1977 İstanbul doğumludur. İlk, orta ve liseyi İstanbul’da tamamlamıştır. 1996–2000 yılları arasında F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde lisans eğitimini tamamlamıştır. 2001–2002 güz yarıyılında 1 dönem için misafir öğretim elemanı olarak F.Ü Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünün Bilgisayar Destekli Tasarım derslerini yürütmüştür. 2001 yılı aralık ayında aynı bölüme araştırma görevlisi olarak atanmıştır. 2003 yılında Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU danışmanlığında “Betonda Sıkıştırma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi” başlıklı tezi ile yüksek lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2003 yılında girdiği aynı anabilim dalındaki doktora eğitimi devam etmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.