

**SİLİS DUMANI VE UÇUCU KÜL KATKILI
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA
FARKLI KÜR KOŞULLARININ
BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ**

İlhan TOHUMCU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL
2011**

Her hakkı saklıdır.

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİLİS DUMANI VE UÇUCU KÜL KATKILI
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA
FARKLI KÜR KOŞULLARININ
BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ**

İlhan TOHUMCU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2011**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Farklı Kür Koşullarının Basınç Dayanımına Etkisi

Yrd. Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL danışmanlığında, İlhan TOHUMCU tarafından hazırlanan bu çalışma 11/11/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.**

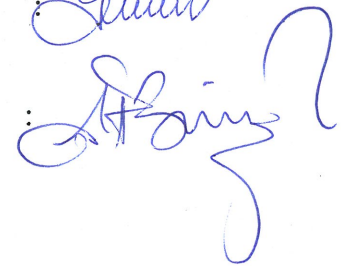
Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza : 

Üye : Prof. Dr. Yaşar TOTİK

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

İmza : 

Prof. Dr. Ömer AKBULUT
Yukarıdaki sonucu onaylıyorum
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİLİS DUMANI VE UÇUCU KÜL KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARDA FARKLI KÜR KOŞULLARININ BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

İlhan TOHUMCU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), geleneksel betona oranla işlenebilirlik, işçilik maliyetindeki azalmalar ve yüksek dayanım gibi önemli faydalar sağlayan beton teknolojisindeki gelişmelerdendir. KYB üretiminde yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, fazla miktarda toz malzeme ve/veya viskozite düzenleyici katkı maddesi kullanılmalıdır. KYB üretiminde toz malzeme olarak genellikle kireçtaşı tozu, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmaktadır.

Bu çalışmada mineral katkı maddesi olarak çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı (SD) ve %25, %40 ve %55 oranlarında uçucu kül (UK) kullanılarak KYB'ler üretilmiştir. Üretilen betonların kendiliğinden yerleşebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Sertleşmiş betonlarda hava kürü, farklı sürelerde su kürü ile farklı sıcaklık ve kürleme sürelerinde atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarının basınç dayanımına etkileri incelenmiştir.

Mineral katkıların kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerine olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir. Erken yaşlarda mineral katkıları basınç dayanımlarında azalmalara sebep olurken nihai dayanımlarda SD kullanımı olumlu, UK ise olumsuz etki yapmıştır. En yüksek basınç dayanımı %15 SD kullanılarak üretilen ve 28 gün su kürü uygulanan betonlardan elde edilmiştir. Hava kürü uygulaması tüm betonlarda basınç dayanımlarının azalmasına yol açmıştır. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarında mineral katkılı gruplarda katkısız gruba göre nispi dayanımlar daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Katkısız grupta nihai dayanımın %55'ine ulaşılırken %55 UK grubunda bu oran %95 olarak belirlenmiştir.

2011, 140 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, silis dumanı, uçucu kül, basınç dayanımı, taze beton, atmosferik basınçlı buhar kürü.

ABSTRACT

MS Thesis

EFFECT OF DIFFERENT CURING CONDITIONS ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF SETTING CONCRETE WITH SILICA FUME AND FLY ASH ADDITIVES

İlhan TOHUMCU

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. A. Ferhat BİNGÖL

Self Compacting Concrete (SCC), is one of the recent developments in concrete technology, which introduced benefits in workability, labor cost reductions and high-strength, compared to traditional concrete technology. In SCC production, high-range water reducing superplasticizer chemical additives, powder material and / or viscosity regulators must be used. Limestone powder, fly ash, granulated blast furnace slag and silica fume are used as powder materials in SCC production.

In this study SCC is produced with using silica fume (SF) instead of cement by weight, by the ratios of 5%, 10% and 15%, and fly ash (FA) with the ratios of 25%, 40% and 55%. Self settlement properties of produced concretes were determined. Effects of air curing, water curing and atmospheric pressure steam curing applications on the compressive strength of hardened concrete were examined.

It is observed that mineral admixtures have positive effects on the self settlement properties. While mineral admixtures cause losses in compressive strength at early ages, SF has positive, FA has negative effects on ultimate strengths. The highest compressive strength was observed in the concrete specimens with 15% SF, for 28 days water curing. Air curing caused compressive strength losses in all groups. Relative strengths of concretes under mineral admixtures were found to be higher than concretes without admixtures at atmospheric pressure steam curing conditions. While 55% of ultimate strength is reached in the group without mineral admixtures, this ratio is 95% for 55% in FA group.

2011, 140 pages

Keywords: Self setting concrete, silica fume, fly ash, compressive strength, fresh concrete, atmospheric pressure steam curing.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, bilgi ve tecrübeleri ile araştırmalarımı yönlendiren ve çalışma boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. A.Ferhat BİNGÖL'e ve katkı ve desteklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Rüstem GÜL'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneylerde kullanılan alet ve malzemelerin temininde yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Şahin ZAIİMOĞLU ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih HATTATOĞLU'na, Ezurum Beton A.Ş., Bursa Beton A.Ş. ve BASF Yapı Kimyasalları A.Ş. yetkililerine, atmosferik basınçlı buhar kürü kabininin temininden dolayı BAP 2008/154 nolu araştırma projesinin yürütücüsü Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Cüneyt AYDIN'a teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında yardımlarını esirgemeyen, Sayın Arş. Gör. Arif Emre SAĞSÖZ'e, Sayın Arş. Gör. Selim ŞENGÜL'e ve laboratuvar teknisyeni Sayın İlhami AYHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım süresince göstermiş oldukları büyük sabır ve özveriyle bana destek olan sevgili eşime ve çocuklarım Yiğit Alp ile Yağız Alp'e sevgilerimle.....

İlhan TOHUMCU

Ekim 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Keniliğinden Yereşen Beton	6
2.1.1. KYB'lerin taze beton özellikleri	11
2.1.2. KYB tasarım yöntemleri	14
2.2. Kür Yöntemleri	36
2.2.1. Hava kürü	38
2.2.2. Su kürü	39
2.2.3. Atmosferik basınçlı buhar kürü	39
2.2.3.a. Buhar kürü çevrimleri	42
2.2.3.b. Buhar kürü aşamaları	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM	57
3.1. Materyal	57
3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler	57
3.1.1.a. Çimento	57
3.1.1.b. İnce taneli malzemeler	60
3.1.1.c. Agrega	66
3.1.1.d. Karışım suyu	68
3.1.1.e. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı	69
3.1.1.f. Diğer malzemeler	71
3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler	71
3.1.2.a. Elekler	71
3.1.2.b. Betonyer	71
3.1.2.c. Kalıplar	72

3.1.2.d. Pres	72
3.1.2.e. Kür uygulamasında kullanılan aletler	73
3.1.2.f. KYB deneylerinde kullanılan aletler	74
3.2. Yöntem	77
3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler	77
3.2.2. KYB karışım hesapları	82
3.2.3. KYB’lerin taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler	84
3.2.3.a. Taze birim hacim ağırlığı tayini	84
3.2.3.b. Çökme-yayılma deneyi	85
3.2.3.c. V Hunisi deneyi	85
3.2.3.d. L Kutusu deneyi	86
3.2.3.e. U Kutusu deneyi	87
3.2.4. Kür seçeneklerinin belirlenmesi	88
3.2.4.a. Hava kürü seçeneklerinin belirlenmesi	88
3.2.4.b. Su kürü seçeneklerinin belirlenmesi	88
3.2.4.c. Atmosferik basınçlı buhar kürü seçeneklerinin belirlenmesi	88
3.2.5. Basınç dayanımı tayini yöntemi	91
3.2.6. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem	91
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	92
4.1. Agrega Deneyleri	92
4.1.1. Elek analizi (Granülometri).....	92
4.1.2. Birim ağırlık	95
4.1.3. Organik madde tayini	96
4.1.4. İnce madde oranı tayini	96
4.1.5. Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini	97
4.2. Taze Beton Deneyleri	99
4.2.1. Taze birim hacim ağırlığı deneyi	100
4.2.2. Çökme – yayılma deneyi	100
4.2.3. V Hunisi deneyi	102
4.2.4. L Kutusu deneyi	103
4.2.5. U Kutusu deneyi	104
4.3. Mineral Katkıların KYB’nin Taze Beton Özelliklerine Etkisi	105

4.3.1. Uçucu külün etkisi	106
4.3.2. Silis dumanının etkisi	108
4.4. Kür Koşulları ve Mineral Katkıların Basınç Dayanımına Etkileri	111
4.4.1. Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları.....	111
4.4.2. Suda kür edilen numunelerin basınç dayanımları	112
4.4.3. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı	114
4.5. Mineral Katkıların Basınç Dayanımına Etkileri	118
4.5.1. Uçucu külün etkisi	118
4.5.2. Silis dumanının etkisi	119
4.6. Kür Koşullarının Basınç Dayanımına Etkisi	121
4.6.1. Hava kürünün basınç dayanımına etkisi	121
4.6.2. Su kürü süresinin basınç dayanımına etkisi	123
4.6.3. Atmosferik basınçlı buhar kürünün basınç dayanımına etkisi.....	124
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR	134
ÖZGEÇMİŞ	141

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları	11
Şekil 2.2. Kendinden yerleşebilirliğin başarılması için temel yöntem	15
Şekil 2.3. Beton sıcaklığının, hava sıcaklığının, relatif nemin ve rüzgar hızının beton yüzeyindeki suyun buharlaşmasına etkileri	37
Şekil 2.4. Tipik bir ısıtım işlem çevriminin aşamaları	43
Şekil 2.5. Betonda kür sıcaklığının erken ve nihai dayanıma etkisi	46
Şekil 2.6. Betonun kürlenme sürecinde sıcaklık–zaman–dayanım ilişkisi	47
Şekil 3.1. Betonyer	71
Şekil 3.2. Kalıplar	72
Şekil 3.3. Pres	72
Şekil 3.4. Su kürü havuzu	73
Şekil 3.5. Buhar kürü kabini	74
Şekil 3.6. Çökme-yayılma deney aleti	74
Şekil 3.7. V Hunisi deney aleti	75
Şekil 3.8. L Kutusu deney aleti	76
Şekil 3.9. U Kutusu deney aleti	76
Şekil 3.10. Çökme-yayılma deneyi	85
Şekil 3.11. V Hunisi deneyi	86
Şekil 3.12. L Kutusu deneyi	87
Şekil 3.13. U Kutusu deneyi	87
Şekil 3.14. 60°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi	89
Şekil 3.15. 70°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi	90
Şekil 3.16. 80°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi	90
Şekil 4.1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi	94
Şekil 4.2. Kontrol ve UK katkılı grupların yayılma çaplarının	

karşılaştırılması	106
Şekil 4.3. Kontrol ve UK katkılı grupların akış sürelerinin karşılaştırılması	107
Şekil 4.4. Kontrol ve UK katkılı grupların bloklanma oranlarının karşılaştırılması	107
Şekil 4.5. Kontrol ve UK katkılı grupların yükseklik farklarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.6. Kontrol ve SD katkılı grupların yayılma çaplarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.7. Kontrol ve SD katkılı grupların akış sürelerinin karşılaştırılması	109
Şekil 4.8. Kontrol ve SD katkılı grupların bloklanma oranlarının karşılaştırılması	110
Şekil 4.9. Kontrol ve SD katkılı grupların yükseklik farklarının karşılaştırılması	110
Şekil 4.10. Havada kütleme sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri	112
Şekil 4.11. 3-7-28 gün su kürü uygulaması sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	113
Şekil 4.12. Su kürü uygulaması sonucu elde edilen 3, 7, 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.13. 60°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	115
Şekil 4.14. 70°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	116
Şekil 4.15. 80°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi	117
Şekil 4.16. Kontrol ve UK katkılı gruplarının 3-7-28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	119
Şekil 4.17. Kontrol ve SD katkılı gruplarının 3-7-28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	120
Şekil 4.18. Hava kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının standart dayanımlar ile karşılaştırması	122

Şekil 4.19. Su kürü sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi	123
Şekil 4.20. %0 gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	124
Şekil 4.21. %5 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	125
Şekil 4.22. %10 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	126
Şekil 4.23. %15 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	127
Şekil 4.24. %25 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	128
Şekil 4.25. %40 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	129
Şekil 4.26. %55 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1	KYB sınıfları	10
Çizelge 2.2.	KYB'nin tasarım yöntemine göre tavsiye edilen malzeme miktarları	17
Çizelge 3.1.	Çimentonun kimyasal analizi	59
Çizelge 3.2.	Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	60
Çizelge 3.3.	Orhaneli uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları	64
Çizelge 3.4.	Silis dumanının kimyasal analizi	66
Çizelge 3.5.	Glenium C303'ün teknik özellikleri	70
Çizelge 3.6.	KYB gurupları için malzeme miktarları	83
Çizelge 3.7.	KYB deneyleri içinsınır değerler	84
Çizelge 3.8.	Buhar kürü çevrimleri	89
Çizelge 4.1.	İri agrega için elek analizi deneyi sonuçları	93
Çizelge 4.2.	İnce agrega için elek analizi deneyi sonuçları	93
Çizelge 4.3.	Karışım da kullanılan agreganın tane dağılımları	94
Çizelge 4.4.	Gevşek birim ağırlık deneyi sonuçları	95
Çizelge 4.5.	Sıkışık birim ağırlık deneyi sonuçları	95
Çizelge 4.6.	İnce agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları	96
Çizelge 4.7.	İri agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları	96
Çizelge 4.8.	İnce agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için ölçülen değerler..	98
Çizelge 4.9.	İnce agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için hesaplanan değerler.....	98
Çizelge 4.10.	İri agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için ölçülen değerler	99
Çizelge 4.11.	İri agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için hesaplanan değerler	99
Çizelge 4.12.	KYB numunelerinin taze birim hacim ağırlıkları	100
Çizelge 4.13.	Çökme-yayılma deneyi sonuçları	101
Çizelge 4.14.	V Hunisi deneyi sonuçları.....	103
Çizelge 4.15.	L kutusu deneyi sonuçları	104
Çizelge 4.16.	U kutusu deneyi sonuçları	105

Çizelge 4.17. Havada kürlleme sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri	111
Çizelge 4.18. 3-7-28 gün su kürü uygulaması sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımları	113
Çizelge 4.19. Su kürü uygulaması sonucu elde edilen 3, 7, 28 günlük basınç dayanımları	114
Çizelge 4.20. 60 ⁰ C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları	115
Çizelge 4.21. 70 ⁰ C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları	116
Çizelge 4.22. 80 ⁰ C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları	117

1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Betonun üretilip, yapının bulunduğu yere kadar taşındıktan sonraki aşaması yerine yerleştirilmesidir. Betonun önceki safhalarında yer alan karışım oranlarının belirlenmesi, betonun karıştırılması ve taşınması gibi aşamaların tamamı kusursuz olarak yerine getirilse bile taze betonun yerleştirilmesi işlemi uygun yapılmadığı takdirde veya betonun yeterli işlenebilirliğe sahip olmadığı durumlarda, betondan beklenen performansı elde etmek mümkün değildir.

İşlenebilirlik, taze betonun karıştırılması, ayrışmadan taşınması, yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve yüzeyinin düzeltilmesi gibi aşamalarda betonun istenen akıcılığa ve kohezyona sahip olmasıdır. İşlenebilirlik, agreganın cinsine, en büyük tane boyutuna, granülometrik bileşimine, çimento dozajına ve karışım suyunun miktarına göre değişir (Erdoğan 2003).

Geleneksel yöntemlerle üretilen betonun yerleştirilmesinde uygulanan vibrasyon işlemi, betonun içinde bulunan boşlukları en aza indirerek dayanımı daha yüksek, dış etkilere karşı daha dayanıklı ve düzgün yüzeyli bir beton elde etmek için mutlaka yapılmalıdır. Vibrasyon uygulanmamış betonların basınç dayanımında, vibrasyon uygulanmış olanlara göre %30'lara varan düşüşler görülmektedir. Ayrıca sağlıklı vibrasyon yapılmamış beton elemanlarda yüzey bozuklukları görülebilir (Gürdal vd. 2004).

Betonun yeterli akıcılığa sahip olmaması durumunda yerleştirilme sorunları ortaya çıkmakta ve bazen betona işçiler tarafından kontrol dışı su ilave edildiği gözlenmektedir. Bu durumda, pratikte üretilen betonun dayanımının, hesaplarda belirlenen dayanımdan çok daha düşük olacağı açıktır. Bunun yanı sıra dar kesitlerde, donatıların yoğun olduğu birleşim bölgelerinde ve donatılar arası mesafelerin az olduğu elemanlarda betonun yerleştirilmesi esnasında sorunlar yaşanmaktadır. Özellikle

güçlendirme projelerinin tatbikinde bu sorunla sıkça karşılaşılmaktadır. Betonun yerleştirilmesinden kaynaklanan sorunlar dikkate alındığında yeterli akıcılığa sahip olan ve uygulamada ek bir sıkıştırma ya da vibrasyon işlemine gerek duyulmayan kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) kullanımının yaygınlaşması bir çözüm olarak düşünülebilir.

KYB'nin üretiminin ilk olarak 1980'lerin ikinci yarısında Japonya'da geliştirilmesi, sismik bölgelerde yoğun donatılı betonarme elemanlarda sıkıştırma işlemine gerek duyulmadan yerleştirilebilen bir betona olan gereksinimden kaynaklanmıştır (Okamura and Ouchi 2003; Eroğlu vd. 2007). KYB, kendi ağırlığı altında akabilmesi ve kalıba kolayca yerleşebilme özeliği nedeniyle yüksek performanslı beton olarak da tanımlanabilmektedir. KYB'nin kendiliğinden yerleşebilme özelliğinin yanında; imalat süresini kısaltma, işçilik maliyetini düşürme, özellikle yoğun donatılı betonarme elemanlarda betonun kalıba boşluksuz bir şekilde yerleşmesini sağlama ve vibrasyon kaynaklı ses kirliliğini azaltma gibi geleneksel betona göre birçok üstünlüğü vardır. Kendiliğinden yerleşen beton gerek prefabrike (hazır) olarak üretilen ve gerekse şantiyede yerinde üretilen ve lif takviyeli betonlarda da kullanılabilir. (Skarendahl and Peterson 2000; Sağlam ve Özkul 2006).

Uygun bir şekilde tasarlanmış KYB, yeterli akıcılığı sağlamak için düşük akma gerilmesine ve ayrışma olmadan homojen bir deformasyon sağlamak için de yeterli bir viskositeye sahip olmalıdır (Khayat 1999; Eroğlu vd. 2007). KYB'nin akıcı kıvamda olması, fakat akış sırasında engeller arasından bloklanma veya tıkanma olmadan geçebilmesi ve ayrışmaya uğramaması gereklidir (Felekoğlu ve Baradan 2004). KYB'nin iki temel özelliği, çok miktarda toz malzeme ve süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile elde edilen yüksek akıcılık ve ayrışmaya karşı dirençtir (Khayat and Guizani 1997; Felekoğlu vd. 2003).

KYB'de en fazla kullanılan toz malzemeler, endüstriyel atıklar olan silis dumanı ve uçucu küldür. Bu atıklar hem beton performansına olumlu etkiler yapmakta hem de beton üretiminde değerlendirilmeleri neticesinde çevre kirliliğini önlemede yarar

sağlamaktadır. Geleneksel beton karışımından farklı olarak KYB’de kullanılacak malzemelerin seçimi ve beton tasarımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir. KYB deneylerinde genellikle EFNARC tarafından belirlenen değerlendirmeler dikkate alınır. EFNARC; uzman yapı kimyascılarına ve beton sistemlerine ithafen oluşturulmuş bir Avrupa fedarasyonudur. Avrupa’da birçok Avrupalı şirketin bu fedarasyona üyeliği bulunmaktadır. EFNARC’ın ana faaliyet alanları; CEN teknik komitesinde ve Avrupa seviyesinde, zemin kaplamaları, beton koruma ve tamirleri, yumuşak zemin tünelleri, püskürtme betonlar ve kendiliğinden yerleşen betonlardır.

KYB’de özellikle işlenebilirlik konusunda farklı parametreler ölçen değişik deney yöntemleri vardır. KYB her ne kadar işlenebilirlik özelliklerine göre sınıflandırılrsa da belirli mekanik performans kriterlerini sağlaması gerekir. KYB’nin beklenen mekanik performansı vermesi aşağıdaki koşullara bağlıdır:

1. Talep edilen performansa uygun malzeme tip ve oranlarının seçimi (karışım optimizasyonu),
2. Üretim safhasında malzeme tip ve oranlarındaki değişiminin minimizasyonu (Homojen malzeme kullanımı, hammadde değişkenliğinden kaynaklanacak problemlerin azaltılması),
3. Ortam koşullarının KYB’lere etkisinin göz önüne alınması, bu koşullara uygun önlemlerin hem karışım tasarımında hem de üretim safhasında dikkate alınması,
4. Üretim safhasında taze beton kalitesinin seçilen deneylerle sürekli kontrolü, istenen özelliği sağlamayan karışıma anında müdahale edilmesi.

Yukarıdaki kriterlere uyulması halinde, KYB’den en yüksek mekanik performansı almak mümkün olacaktır. Bu koşul normal betonlar için de geçerlidir. Ancak KYB’lerde bu kriterlere hassasiyet daha üst seviyededir ve yapılacak yanlışlıkları düzeltmek normal beton üretimine kıyasla çok daha zordur (Felekoğlu ve Baradan 2004).

Karışım tasarımı yöntemleri ve kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri araştırmaları, KYB'yi standart beton haline getirmiştir. Bu araştırmaların sonucunda KYB'nin test edilebilmesi için bazı deneysel metodlar ve tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu deney yöntemleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

- a) Doldurma yeteneği:** Betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğidir. Bu özellik çökme-yayılma deney yöntemi ile ölçülebilir.
- b) Ayırmaya karşı direnç:** Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. L kutusu deney aleti (L-shape test) bu özelliği ölçmek için kullanılabilir.
- c) Geçiş yeteneği:** Betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. Bu özellik, V hunisi, U ve L kutusu deney aletleri kullanılarak belirlenebilir (Skarendahl and Peterson 2000; Sağlam ve Özkul 2006).

İyi bir beton elde etmek için iyi bir karışım ve yerleştirmenin yanı sıra dayanım kazanma evrelerinde betonun uygun bir ortamda kürü gerekmektedir. Kür, çimentonun hidratasyonunu sağlayan, sıcaklığa bağlı olarak beton içinde nem hareketlerini yükseltmek için sürdürülen işleme verilen isimdir (Neville 1995).

Endüstrileşmenin bir sonucu olarak, betona yeterli derecede erken dayanım kazandırılarak daha kısa sürede hizmete sunulabilmesi amacıyla yapılan ısıtılı işlemlerden birisi de atmosfer basıncı altında (atmosferik basınçlı) buhar kürü uygulanmasıdır.

Betona buhar kürü uygulanmasının başlıca amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- 1. Beton, normal koşullardaki kür yöntemine göre, daha kısa süre içerisinde dayanım kazanmaktadır.** O bakımdan, beton elemanlar daha erken bir zamanda kullanılabilirler. Kalıplara yerleştirilmiş betonun istenilen dayanıma daha kısa süre içerisinde erişebilmesi, kalıpların daha kısa süre içerisinde sökülebilmeye imkan

tanınmaktadır. Sökülen kalıplar bir başka beton dökümünde kullanılabilmekte, yapılması gereken iş daha hızlı yapılabilmekte ve buna bağlı olarak, ekonomiklik elde edilebilmektedir.

2. Betondan beklenen dayanımın daha kısa süre içerisinde kazanılabilmesi ve betonun daha erken hizmete sokulabilmesi nedeniyle, üretilen beton elemanların kür işlemi için muhafaza edildikleri sahada (depoda) uzun süreyle bırakılmalarına gerek kalmamaktadır. O bakımdan da ekonomiklik sağlanmış olmaktadır (Erdoğan ve Erdem 2002).

Buhar kürü uygulamasının beton elemanlara sağladığı en önemli yarar yüksek erken dayanım kazandırmasıdır. 24 saatlik bir çevrim sonunda betona 28 günlük standart basınç dayanımının %60'ına varan bölümü kazandırılabilir. Buna karşılık 28 gün ve daha ileri yaşlarda basınç dayanımında, standart küre oranla düşmeler görülebilir (Sağsöz 2007).

Yapılan bu çalışmada; farklı oranlarda silis dumanı (%5, %10, %15) ve uçucu kül (%25, %40, %55) ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek kendiliğinden yerleşen beton üretimi gerçekleştirilmiş, üretilen betonlarda kullanılan mineral katkıların ve beton numunelerine uygulanan farklı kür koşullarının (Havada kür, su kürü, atmosferik basınçlı buhar kürü) basınç dayanımlarına etkileri incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı ve geçişin zor olduğu dar kesitlere bile vibrasyon gerektirmeksizin ayrışma olmadan yerleşebilen özel bir beton türüdür.

Kandemir (2005) tarafından bildirildiğine göre, KYB birçok araştırmacı tarafından, beton teknolojisinde son birkaç on yılın en önemli atılımı olarak kabul edilmektedir (Wallevik 2003). 1988 yılında Tokyo Üniversitesinde geliştirilen KYB, inşaat süresini kısaltması, özellikle sık donatılı ve dar kesitlerde betonun yerleşmesi ve sıkışmasını garantilemesi ve beton uygulama alanındaki vibrasyon kaynaklı gürültüyü ortadan kaldırması sebepleriyle kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Okamura and Ouchi 2003).

Taze beton yerine yerleşirken iri agregaların beton içinde çarpışma ve sürtünmesi iç gerilmeleri arttırmakta bu da betonun akış enerjisini önemli şekilde düşürmektedir. Özellikle yoğun donatılı bölgelerde ve dar kesitlerde iri agregaların sürtünme ve çarpışması artmakta ve bloklanma tehlikesi meydana gelmektedir. KYB üretiminde önemli etkenlerden bir tanesi de betondaki mikrofiller kullanımıdır. Mikrofiller malzemelerin kullanılması ile birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmaktadır. Silis unu, silis dumanı, uçucu kül gibi mikrofiller malzemeler iri taneler arası sürtünmeyi azaltarak akıcılığı arttırmakta, viskoziteyi belli değerlerde tutarak ayrışma tehlikesini düşürmekte aynı zamanda boşluk dolduruculuk etkileri ile yoğunluğu ve geçirimsizliliği arttırırken mukavemete de önemli katkı sağlamaktadırlar. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedirler (Dinç 2007).

KYB, yüksek akıcılık özelliğinin yanında ayrışmaya karşı dirençli olarak da tasarlanmalıdır. KYB'nin yüksek akıcılık ve stabilitesinin (ayrışmaya karşı direncinin) sağlanması için geleneksel sıkıştırma işlemi gören normal betonlardan farklı bazı

tasarım ilkeleri vardır. KYB’de yüksek akıcılık özelliği yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanmaktadır. Yüksek akıcılığın yanında stabilitesinin de sağlanabilmesi için parçacık boyutu genellikle 0,125 mm’den küçük toz malzemeler (EFNARC 2002) yüksek oranda kullanılmaktadır. KYB’nin yüksek akıcılık ve ayrışmaya karşı yüksek direnç (stabilite) özelliğinin yanında dar engeller arasında geçiş yeteneği de yüksek olmalıdır. Bunun sağlanabilmesi için betonun şekil alabilme yeteneğinin geliştirilmesi gerekmektedir. KYB’nin şekil alabilme ve dolayısıyla dar engeller arasında geçiş yeteneğinin geliştirilmesi için hamur hacminin geleneksel sıkıştırma işlemi gören beton karışımlarda olduğundan daha yüksek, toplam agrega miktarı daha düşük ve en büyük agrega çapının ise sınırlı (EFNARC 2002’ye göre 20 mm’den düşük) olması gerekmektedir. KYB’nin anılan özellikleri sağlayabilmesi için düşük eşik kayma gerilmesine ve optimum viskoziteye sahip olması gerekmektedir. KYB’nin akıcılık, viskozite ve geçiş yeteneğinin değerlendirilmesine yönelik tek bir deney yöntemi geliştirilememiş olmasına karşın, bu temel özelliklerinin dolaylı olarak değerlendirildiği bazı test yöntemleri (henüz tam olarak standardlaşmamış olmasına rağmen) geliştirilmiştir (Yardımcı 2007).

Gürdal ve Yüceer (2004), bu test yöntemlerini üç grupta toplamışlardır;

1- Doldurma yeteneği: Betonun iyi deforme olabilmesi için, iri agrega, ince agrega ve her türlü bağlayıcı dahil katı tanecikler arasındaki sürtünmenin azaltılması faydalıdır. Ancak bu yeterli değildir; çimento hamuru fazı da iyi deforme olabilmelidir. Yüksek akışkanlıkla birlikte ayrışmaya karşı yüksek direncin sağlanması, KYB’nin engellerin arasında geçerek doldurma kapasitesinin artırılması açısından önemlidir.

Uygun doldurma yeteneği için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

a) Çimento hamuru fazının deformasyon yeteneğinin artırılması:

- Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı
- Dengelenmiş su/bağlayıcı oranı

b) Tanecikler arası sürtünmenin azaltılması:

- Düşük kaba agreganın hacmi (yüksek çimento hamuru fazı içeriği)
- Kullanılan agreganın ve çimentoya göre optimum gradasyon

2- Ayırmaya karşı Direnç: Taze betonda ayırma (segregasyon), bileşen malzemelerin homojen olmaksızın dağılarak yapıdaki özellikleri de dağılıma uğratması olayıdır. Normal akışta ayırma göstermeyen taze beton, örneğin sık donatıların bulunması durumunda ayırmaya uğrayabilir.

KYB gerek durağan, gerekse akış halinde aşağıdaki tip ayırmaları göstermemelidir:

- Terleme,
- Çimento hamuru fazı ve agreganın ayrışması,
- Bloklanmaya (kilitlenme) neden olan kaba agreganın ayrışması,
- Hava boşluğu dağılımında düzensizlik.

Uygun ayırma direnci için aşağıdakiler dikkate alınmalıdır:

a) Katı maddelerin ayrılmasını azaltmak,

- Sınırlı agreganın içeriği
- Azaltılmış en büyük agreganın tane çapı
- Düşük su/bağlayıcı oranı
- Viskozite artırıcı

b) Serbest terlemenin minimize edilmesi,

- Düşük su içeriği
- Düşük su/bağlayıcı oranı
- Yüksek yüzey alanına sahip bağlayıcılar
- Viskozite artırıcı

3- Geçiş yeteneği: KYB yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayırmaya karşı dirence sahip olduğunda etkili bir işlev görür. Ancak dar geçişler ve çok sık donatı söz konusu

olduğunda, ekstra bir ihtiyaç daha doğmaktadır ki, bu da kaba agregaların bloklanmamasıdır.

Mükemmel doldurma yeteneğine ve ayrışma direncine sahip olan bir KYB’de bile aşağıdaki hallerde bloklanma riski söz konusudur:

- Agregada en büyük tane çapının çok büyük olması durumunda
- İri agregaların içeriğinin çok yüksek olması durumunda

Uygun geçiş yeteneği için aşağıdakiler dikkate alınmalıdır:

a) Agregada ayrışmasını azaltmak için kohezyonu arttırmak gerekir. Bu durum;

- Düşük su/bağlayıcı oranı
- Viskozite artırıcı katkı kullanımıyla sağlanabilir.

b) Uygun iri agregada kullanımı gereklidir.

- Düşük kaba agregada hacmi
- Düşük en büyük tane çaplı agregada

Uygulanan bu test yöntemlerinden elde edilen sonuçlara göre KYB çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. KYB’nin sınıflandırılmasında yayılma çapı, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç göz önüne alınmaktadır. Çizelge 2.1’de bu sınıflar görülmektedir.

Çizelge 2.1. KYB sınıfları (EFNARC 2005) (Yardımcı 2007)

Yayılma sınıfları	Yayılma çapı (mm)	
SF1	550 – 650	
SF2	660 – 750	
SF3	760 – 850	
Viskozite sınıfları	50 cm çapa yayılma süresine göre, T_{500} (s)	V-kutusu akış süresine göre (s)
VS1 / VF1	≤ 2	≤ 8
VS2 / VF2	> 2	9 – 25
Geçiş yeteneği sınıfları	Bloklanma oranı	
PA1	$\geq 0,80$ (2 donatı engeli ile)	
PA2	$\geq 0,80$ (3 donatı engeli ile)	
Ayrışma direnci	Ayrışma direnci (%)	
SR1	≤ 20	
SR2	≤ 15	

Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi, kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip beton karışımların reolojik özellikleri birbirlerinden oldukça farklı olabilmektedir. Bu durum her KYB karışımının her türlü yapı elemanında kullanılamayacağını da bir ölçüde göstermektedir. Örneğin, çok yoğun donatılı bir kolon-kiriş birleşim bölgesinde oldukça akıcı (Örneğin yayılma sınıfı açısından SF2 veya SF3), akış hızı göreceli olarak yüksek (Viskozite sınıfı açısından VS1/VF1) ve dar engeller arasından geçiş yeteneği yüksek (Geçiş yeteneği açısından PA2 sınıfında) bir karışım gereklidir. Buna karşılık, hiçbir dar engelin bulunmadığı bir saha betonunda yayılma sınıfı açısından daha düşük yayılma çapına sahip ve akışını daha uzun sürede tamamlayabilen bir KYB karışımı yeterli olabilmektedir. Başka bir ifade ile, KYB’de hedeflenen reolojik özellikler ihtiyaca göre tasarım ile karşılanmalıdır. Bu nedenle EFNARC (2005)’de değişik yapı elemanlarında kullanılacak KYB’lerde göz önüne alınması gereken reolojik sınıflar gösterilmiştir. Bu sınıflamanın Walraven (2003)’in yaptığı çalışmalar doğrultusunda hazırlandığı belirtilmiştir. Şekil 2.1’de çeşitli uygulamalara göre tasarımda göz önüne alınması gereken KYB sınıfları görülmektedir (Yardımcı 2007).

Viskozite				Ayrışmaya karşı direnç / Geçiş yeteneği
VS2 VF2	Rampalar			SF1 ve 2 için geçiş yeteneği tanımlanmalı
VS1 veya 2 VF1 veya 2 Yada hedef değer	Duvarlar ve kazıklar			SF3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
VS1 VF1	Yer betonları ve döşemeler			SF2 ve 3 için ayrışma direnci SR tanımlanmalı
	SF1	SF2	SF3	
	Çökme - yayılma			

Şekil.2.1. Değişik tipte uygulamalar için KYB sınıfları (EFNARC 2005)

2.1.1. KYB' lerin taze beton özellikleri

İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, betonda viskozite, akma gerilmesi, içsel sürtünme, pompalanabilirlik, kararlılık, kohezyon, ayrışma, terleme, yerleşebilirlik, perdahlanabilirlik kavramlarını karşılamakta olup, bu bahsedilen özelliklerin ancak bazıları reolojik yöntemlerle ölçülebilen bilimsel değerler verir. Diğerleri ise ancak ampirik deneylerle değerlendirilebilir. Taze beton işlenebilirliğine etki eden başlıca faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Yılmaz 2007).

- Karışımın su muhtevası
- Agrega özellikleri (dane şekli, çapı, dokusu)
- Çimento özellikleri
- Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı kullanılması
- Süper akışkanlaştırıcı, priz geciktirici veya hava sürükleyici katkı kullanımı
- Lif kullanılması
- Granülometrik özellikler

Taze betonun işlenebilirliğini etkileyen bu faktörler birbirinden bağımsız olmayıp birbirleriyle etkileşim halindedirler.

Pompalanabilirlik

Taze beton üretildikten sonra kullanılacağı yere taşınmakta ve burada pompalanarak kalıplara yerleştirilmektedir. Taze beton, kullanılacağı yere kadar taşınması ve pompalanması sırasında özelliğini kaybetmemelidir. Bu nedenle KYB tasarımlarında, taze beton özelliklerinin 1 saat içerisinde kaybolmayacağı tasarımlar yapılmaktadır. Pompalama işleminin düşük basınçla kolay bir şekilde yapılması ve bu esnada, betonun da özelliklerini koruması beklenmektedir. Pompalamanın az basınçla yapılması daha düşük maliyetide beraberinde getirmektedir.

Ayrışmaya karşı direnç

Ayrışma; betondaki iri ve ince agregaların dağılım düzeninin, çeşitli sebeplerle bozulması olarak tanımlanabilir. Ayrışma olan betonlarda, bozulan dağılım düzeni nedeniyle sertleştikten sonra çatlaklar görülebilir. Bu durum da betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkileyecektir. KYB tasarımı yapılırken toz malzeme miktarının artırılması veya viskozite artırıcı katkı kullanımıyla taze betonun ayrışmaya karşı direnci artırılmaktadır.

Taze beton kararlılığı arzu edilen bir özellik olmasına rağmen, kararlılığın ölçülmesinde standartlaşmış bir deney yöntemi yoktur. Genelde yapılan deneylerden tecrübeye bağlı olarak anlaşılır. Mesela yayılma deneyinde ayrışmaya olan eğilim, yayılma deneyi sonucunda numunenin etrafını saran su veya çimento hamurundan anlaşılır. Betonda kararlılığı, dolayısıyla ayrışma ve terlemeye karşı olan eğilimi etkileyen bazı faktörler aşağıda verilmiştir (Yılmaz 2007).

1- Kararlılığı azaltıp, ayrışma riskini artıranlar:

- Boşluklu granülometriye sahip ve en büyük agregâ boyutu 40 mm civarında olanlar.
- Agregâ karışımındaki kum oranının, inceliğine bağılı olarak %30-%40 dan az olması.
- Çimento hamuru miktarının az olması
- İri agregâ, çimento hamuru ve ince agregâ yoğunluklarının birbirlerinden farklı olması
- Çok yüksek su/çimento oranından dolayı çimento hamurunun viskozitesinin düşmesiyle betonun, agregânın dağılımını sağlayacak kadar bir kohezifliğe sahip olamaması
- Süperakışkanlaştırıcıların gereğinden fazla kullanılması

2- Kararlılığı artırıp, ayrışma riskini azaltanlar:

- Sürekli bir agregâ granülometrisinin sağlanması ve en büyük tane çapının küçük olması
- Hava sürüklenme
- İnce malzeme oranının artırılması
- Karışımın sıvı fazını yoğunlaştırıcı katkıları kullanılması

Yerleşebilirlik

İyi yerleştirilmemiş beton içinde kalan hava, sertleşme gerçekleşikten sonra beton içerisinde boşluk oluşturmakta doğal olarak beton dayanımı üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Normal betonların içinde bulunan havanın dışarı atılması, diğeri bir deyişle betonun sıkışması, kendi akışıyla mümkün değildir. Bu nedenle normal betonların yerleştirilmesi işleminde, betona titreşim verilmesi yani vibrasyon işlemi uygulanması gerekmektedir. Bu durum uygulanacak enerji nedeniyle ek bir maliyet ve gürültü kirliliği oluşturmaktadır. KYB tasarımlarında betonun kendi ağırlığı ile sıkışabilmesi için yeni nesil hiperakışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak betonun dar kesitli ve yoğun donatılı kalıplara kendiliğinden yerleşebilmesi sağlanmaktadır.

KYB üretimiyle taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacak, böylece vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybı ortadan kalkacaktır. Vibratör kullanımının çevreye yaydığı gürültü kirliliği önlenecektir (Walraven 2002).

Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını arttıracaktır (Felekoğlu 2003).

Perdahlanabilirlik

Perdahlanabilirlik teriminin tatmin edici bir tanımı bulunmamaktadır. Her türlü perdah işinin kendine has işlenebilirlik derecesine ihtiyacı vardır. Bunun için uygun hareketlilik, kararlılık, terleme direnci ve yeterli kohezyon gibi ölçütlere ihtiyaç vardır. Perdahlanabilirlik, genelde döşeme kaplama gibi karmaşık şekilde uzanan kalıplarla karşılaşıldığında önem kazanır. Perdahlanabilirlik hakkındaki yorumlar çeşitli işlenebilirlik deneyleriyle veya tecrübeye dayalı görsel değerlendirmelerle yapılır (Yılmaz 2007).

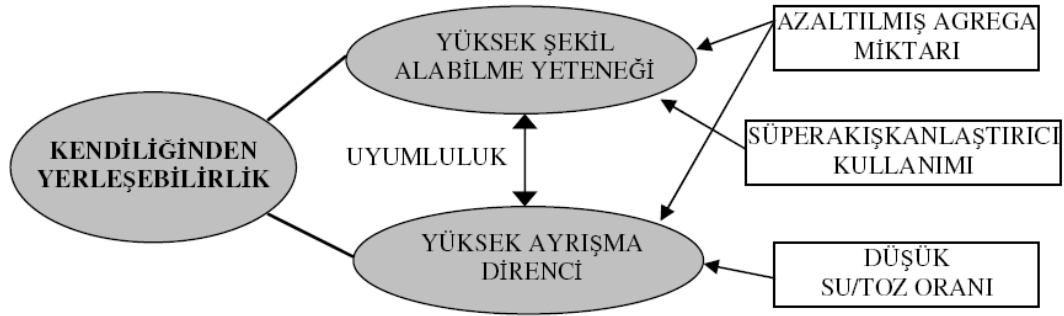
KYB'nin perdahlanabilirliği geleneksel betona kıyasla daha rahattır. Beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırır (Felekoğlu 2003).

2.1.2. KYB tasarım yöntemleri

EFNARC 2005'e göre KYB tasarımının temel ilkeleri:

- Azaltılmış kaba agrega içeriği,
- Arttırılmış hamur hacmi,
- Düşük su / toz malzeme oranı,
- Arttırılmış süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı ve gerektiğinde VMA kullanımıdır.

KYB'nin akışı sırasında kaba agregaların engeller arasında bloklanmasının önlenmesi için karışımın hamur miktarının ve viskozitesinin yüksek olması gereklidir. Öte yandan, KYB karışımının ayrışma olmadan şekil alabilme yeteneğinin de yüksek olması gereklidir. KYB karışımın şekil alabilme yeteneğinin geliştirilebilmesi, karışımın su/toz oranı düşük tutularak uygun bir süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile sağlanabilir. Karışımın şekil alabilme yeteneği ile ayrışma direnci arasında iyi bir dengenin kurulması önemlidir. Bu denge Şekil 2.2'de sistematik olarak gösterilmiştir (Yardımcı 2007).



Şekil 2.2. Kendinden yerleşebilirliğin başarılmaması için temel yöntem (Okamura and Ozawa 1995)

KYB tasarımında başlıca iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Japon tasarım yöntemi ve ikincisi ise CBI yöntemidir.

1- Japon tasarım yöntemi: Japon tasarım yöntemi Okamura and Ouchi (1999) tarafından önerilmiş bir yöntem olup, bu yöntemde KYB karışımının hamur ve harç fazı esas alınmaktadır. KYB deneyleri öncelikle hamur üzerinde yapılar harç fazı daha sonra oluşturulmaktadır. Japon tasarım yönteminde, maksimum agrega tane çapı 20 mm'den küçük olmalı, iri agrega miktarı karışımın en fazla %50 sini oluşturmalıdır.

2- CBI yöntemi (Bloklanma riski yöntemi): İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsü, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) tarafından önerilmiş olan bir yöntemdir. L Kutusu deney aleti kullanılarak, betonun dar engeller arasından geçiş yeteneğinin belirlenmesi esasına dayanır. Tasarımın yapılmasında ön görülen bloklanma riski, engel açıklığının, maksimum agrega çapının kaç katı olduğu ile ilişkilendirilmekte ve tasarımda bu oran dikkate alınmaktadır.

Geleneksel beton endüstrisinde mukavemet şartı göz önüne alındığından, su /çimento oranından yola çıkılarak karışım dizaynları yapılmaktadır. KYB'lerin karışım dizayn yaklaşımları daha farklıdır.

Ozawa ve Okamura hazır beton santralleri için hazırladıkları KYB karışım oranı dizaynına göre beton içindeki iri agrega miktarı toplam katı hacminin %50'si değerinde ve ince agrega miktarı harç fazının %40'ı değerinde sabitlenirken, pudra özeliğine bağlı olarak su/pudra oranının da hacimce 0,9-1,0 aralığında olacağını öngörmüşlerdir. Burada ince ve kaba agrega oranları sabitlenerek değişken sayısı düşürülür ve süper-akışkanlaştırıcı dozajı, su/pudra oranının gerçek değeri kendiliğinden yerleşme özellikleri sağlanacak şekilde deneylerle deneme-yanılma metodu ile bulunmaktadır. Bu yaklaşıma göre su/pudra oranı bulunduğu zaten su/çimento oranı istenen mukavemeti sağlayacak kadar düşük çıkmaktadır. Yani kendiliğinden yerleşen betonlar günümüzdeki sıradan yapılar için yeterli mukavemeti kolayca sağlamaktadır (Dinç 2007).

KYB'ler için kesinleşmiş dizayn yöntemi ve standart deneylerinin yokluğu kalite kontrol işlerinde genelleme yapılmasını engellemekte ve standartlaştırmada sıkıntılara yol açmaktadır. Geleneksel betona göre yüksek oranda toz malzeme içerdiği için, boyutsal stabilitesi toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar doğurabilir (Felekoglu 2003).

KYB’lerde 65-80 cm yayılabilme özelliğini sağlayabilmek ve işlenebilirliğini en az 1 saat koruyabilmek ve bunları yaparken de betonun ayrışmasını ve terlemesini engellemek tasarımın en önemli hedefleridir. Beton yüksek oranda kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcılarla yüksek akışkanlık özelliğine sahip olsa da, ayrışmasını engellemek ve uzun çalışma süresine sahip olabilmesi ancak iyi bir karışım dizaynı ve doğru kimyasal katkılarla mümkün olabilir.

- Hacimsel olarak; betonun %50’si harç ve %50’si kaba agregadan oluşmalıdır. %50’lik harç kısmında %30’u çimento, %30’u su ve %40’ı ince agregadan oluşmalıdır.
- Düşük W/C oranı elde edebilmek ve uzun süreli işlenebilirlik için polikarboksilik eter esaslı hiperakışkanlaştırıcı katkıları kullanılabilir.

Bu tasarım yöntemine göre tipik karışım için tavsiye edilen malzeme miktarları Çizelge 2.2’de verilmiştir (Aykan vd. 2004)

Çizelge 2.2. KYB’nin tasarım yöntemine göre tavsiye edilen malzeme miktarları

İnce mal. miktarı(<0,125mm)	400-600 kg/m ³
Kum miktarı (0,125-4 mm)	Yaklaşık olarak harç hacminin %40’ı
Kaba agr. miktarı D _{max} =15cm	Yaklaşık olarak gerçek birim ağırlığının 50’si
Mineral katkı miktarı	Yaklaşık, çimento + min. katkı hacminin %40’ı
Su / toz	0,9-1,0 (Hacimsel olarak)

Ülkeler bazında, değişik uygulama alanlarına yönelik çok farklı tasarım yaklaşımları bulunmaktadır. Deneyimler başarılı KYB üretmek için bir takım limitler oluşmasına imkan vermiştir. Bu limitler hacimsel olarak aşağıda verilmiştir.

- Beton hacminin % 30-34'ü iri agregâ kullanılmaldır. Bu değerler, normal işlenebilir bir beton için geçerli olan değerlerden daha azdır.
- Su/bağlayıcı oranı olarak 0.8-1.2 değeri kullanılmalıdır. Bu sınır zorladıkça genellikle bir viskozite arttırıcı kullanılma zorunluluğu doğmaktadır.
- Viskozite arttırıcı kullanılmadığında 155-175 lt/m³ su miktarı idealdir. Fakat viskozite arttırıcı ile su miktarı 200 lt/m³'lere kadar çıkarılabilir.
- Beton hacminin % 34-40'ı kadar bir çimento hamuru fazı hacmi kullanılmalıdır.
- Harç fazı hacminin % 40-50'si kadar ince agregâ hacmi olmalıdır.

Tüm bu sınır değerler ışığında, ağırlıkça aşığıdaki miktarlar önerilebilir (Gürdal ve Yüceer 2004).

İri agregâ : 750-920 kg/m³

İnce agregâ : 710-900 kg/m³

Bağlayıcı : 450-600 kg/m³

Su : 150-200 kg/m³

EFNARC (2005)'de KYB için, kaba agregâ miktarının 750-1000 kg/m³, toz madde miktarında 380-600 kg/m³ aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (Yardımcı 2007).

Bütün bu çalışmaların sonuçlarından da anlaşılacağı üzere KYB tasarımlarında en uygun yöntem karışımı tek bir deney üzerinden belirlemek yerine; akıcılık, viskozite, geçiş yeteneği ve ayrışma drenç parametrelerinin birlikte ele alınarak karışımın dizayn edilmesidir.

KYB hakkında teknik literaüterde yer alan çalışmalardan bazıları tarih sırasına göre düzenlenerek aşığıda özetlenmiştir.

Ozawa *et al.* (1989), yaptığı deneylerde uçucu kül gibi mineral katkı KYB'lerin, akışkanlıkları ve ayrışma dirençlerini incelemiştir. Çimento yerine uçucu kül ikame

ettiği betonların akışkanlıklarında dikkate değer bir artış gözlemiştir. Uçucu küle benzer şekilde yüksek fırın cürufunun çimento yerine ikame edilmesi taze betonun işlenebilirliğini artırmaktadır. Bu nedenle belirli bir kıvam için gerekli olan karışım suyu ihtiyacı azalmaktadır (Erdoğan 2003).

Jacobs and Hunkeler (1999), çalışmalarında çimento, kimyasal, mineral katkıları ve kum arasındaki etkileşimi incelemek üzere harç üzerinde bazı reolojik incelemeler yapmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına dayanarak en uygun beton bileşenlerini saptayarak, laboratuvar ortamında beton numuneleri üretmişlerdir. Betonun işlenebilirlik özelliği standart test yöntemlerine göre L kutusu yardımıyla belirlenmiş, böylece beton bileşimi tespit edilmiştir.

Çalışmada bununla beraber, donma-çözölmeye dayanıklı beton, düşük geçirimsliğe sahip ve düşük klor geçirimsliliğine sahip beton gibi değişik ihtiyaçlara cevap verebilen beton karışımları da tasarlanmıştır. Beton karışımı tasarımının uygunluğunu kanıtlamak üzere çeşitli beton karışımları ile saha deneyleri yapılmıştır.

Khayat and Roussel (1999), hacimce %0,5 ve %1 çelik lif içeren ÇLKYB karışımlar üzerinde yaptıkları çalışmada lif miktarı arttıkça reometre ile ölçölen plastik viskozitenin arttığını ve doldurma kutusu deneyinde (EFNARC 2002) dolma derecesinin azaldığını göstermişlerdir.

Ghezai *et al.* (2002), çimento yerine yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı ikame ederek yaptıkları deneylerde, yüksek fırın cürufu içeren KYB'lerin deformasyon kabiliyeti yönünden en iyi sonucu verdiğini belirtmişlerdir. Bunun nedenini ise, yüksek fırın cürufu parçacıklarının camsı yapıları ve düşük puzolanik aktivitelerine bağlamış, bu şekilde su emiliminin azalarak, betonun su bakımından zengin hale geldiğini ve akışkanlaştırıcı ihtiyacının azaldığını savunmuşlardır.

Dowson (2002), yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda, kendiliğinden yerleşebilirlik için yayılma değerinin 65-80 cm arasında ve 50 cm'ye yayılma süresinin 3 saniyeden fazla olmaması şartlarını önermiştir. EFNARC komitesi de (2002), yayılma çapının 65-80 cm arasında olmasını önermiştir. Yayılma deneyi sonucu 45-76 cm arasında olan ve herhangi bir ayrışma gözlenmeyen karışımlar farklı amaçlar için KYB olarak kabul edilebilirler. Farklı amaçlar farklı ihtiyaçlar doğuracağından, yayılma değerini genel olarak sınırlamak daha uygundur. Kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı amaca göre değişmektedir.

Grünwald and Walraven (2002), yaptıkları çalışmada, geleneksel sıkıştırma işlemi görmüş lifli betonlar ile kendiliğinden yerleşen lifli betonların mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada üretilen geleneksel sıkıştırma işlemi görmüş çelik lifli betonlar ile ÇLKBYB'ler benzer dayanım sınıfında olmalarına ve aynı tip ve dozajda lif içermelerine karşın, ÇLKBYB'lerin eğilme dayanımının belirgin bir şekilde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ÇLKBYB'lerin kırılma enerjisindeki değişkenliğin geleneksel çelik lifli betonlardan daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışmada, geleneksel lifli betonlarda uygulanan sıkıştırma enerjisinin liflerin dağılımı ve yöneliminde değişkenliklere neden olduğuda vurgulanmıştır.

Felekoğlu (2003), yaptığı çalışmada, KYB'lerde kum/iri agrega oranı olarak ağırlıkça 1,53 oranının en iyi sonucu verdiğini, altındaki oranlarda bloke olma riskinin, üstündeki oranlarda ise viskozitenin aşırı arttığını belirtmiştir.

Sağlam vd. (2004), yaptıkları çalışmada KYB'lerde kullanılan farklı katkıların farklı çimentolarla uyumları incelenmiş, hazır beton ve prefabrike sanayide kullanılabilir KYB'lerin üretilebilirliğini araştırmışlardır. Tüm karışımlarda çimento dozajı 350 kg/m^3 , uçucu kül 200 kg/m^3 ve katkı oranı %1,2 olarak sabit alınmış, taze beton numunelerinin KYB özelliklerini sağlaması için değişken su miktarları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda KYB özellikleri çökme yayılma deneyi, V hunisi deneyi ve L kutusu deneyleriyle belirlenmiş, aynı numunelerin sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımları ölçülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde;

Çökme yayılma,V hunisi ve L kutusu deney sonuçlarında; araştırmacıların su miktarıyla oynayarak tüm numunelerin KYB özelliği taşımasını sağladıkları görülmektedir.

Üretilen betonların 1 günlük dayanımlarının hem çimento, hem de katkı cinsinden etkilendiği, ayrıca bazı çimento ve katkıların birlikte kullanılmaları durumunda büyük miktarda hava sürüklendiği ve bu durumun dayanımları etkilediği görülmüştür. Taze beton özellikleri ve dayanımlar açısından çimento-katkı etkileşmesinin önemli olduğu, bu nedenle uygulamaya geçmeden önce çimento-katkı uyum deneylerinin yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Felekoğlu ve Baradan (2004), viskozite artırıcı toz malzeme olarak kireçtaşı tozu kullandıkları çalışmalarında, çimento dozajını sabit tutup karışım suyu ve katkı maddeleri gibi diğer malzemelerin miktarlarını değiştirerek 5 farklı dayanım sınıfında KYB'ler üretmiş, hazırlanan beton karışımlarının, taze halde kendiliğinden yerleşebilirlik ve sertleşmiş halde mekanik özelliklerini inceleyip, normal beton özellikleri ile kıyaslamışlardır. Araştırmacılar;

KYB tasarımında sabit bir çimento dozajında akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılıp karışım suyu azaltıldıkça, yayılma değeri belirli sınırlar arasında tutulurken viskozitenin hızla arttığı, sabit bir çimento dozajı ve agregada gradasyonunda, su/toz oranı artışıyla aynı anda katkı dozajının azaltılması, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini arttırdığını belirtmişlerdir.

Basınç dayanımının s/ç oranı ile değişimi incelendiğinde, aynı s/ç oranı ve çimento dozajı için normal betondan daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiş, bu durum kireçtaşı tozunun çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin yoğunluğunu artırıcı özelliğine ve kullanılan akışkanlaştırıcının çimentoyu daha iyi dağıtıcı etkisine bağlanmıştır.

Aykan vd. (2004), mineral katkı maddesi olarak uçucu kül (UK) kullanımıyla, 350 kg dozajda %1,2 oranında akışkanlaştırıcı katkı ekleyerek ürettikleri KYB'lerin taze beton

özellikleri ile sertleşmiş betonunun mekanik özelliklerini, geleneksel betonlarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

KYB 90. dakikada hala ilk karışım kıvamını korurken geleneksel beton 60. dakikada işlenebilme özelliğini kaybetmiştir. Bu nedenle KYB'nin uzun işlenebilme süresi ile daha avantajlı olduğunu ve üreticiye betonun kıvam kaybetmeden daha uzun mesafelere taşıma olanağı sağladığını belirtmektedirler.

KYB karışımında 350 kg çimento + 150 kg uçucu kül karışımı ile C45 beton sınıfı elde edilirken, geleneksel beton karışımında 375 kg çimento ile C35, 400 kg çimento ile C40 betonu elde edilmiştir. Bu durumun daha düşük çimento maliyeti nedeniyle KYB'leri geleneksel betonlarla, maliyet olarak karşılaştırılabilir duruma getireceğini belirtmektedirler.

Felekoğlu vd. (2004), PÇ 42,5 çimento, kireçtaşı tozu ve uçucu kül kullanılarak iki farklı seri KYB dizayn edilen çalışmada, prefabrike beton tesislerinde prototip üretimler gerçekleştirilmiş, bu üretimlerin taze beton deney sonuçları ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, hem uçucu küllü hem de taş tozlu karışımdan alınan örneklerde stabilite sorunu gözlenmemiş ve agrega dağılımının homojen olduğu tespit edilmiştir. Her iki karışım da hazırlandıktan sonra prototip kalıbına herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilebilmiştir. Prototipler bir gün sonra kalıptan alınmış, uçucu küllü prototipte çok iyi bir kalıp yüzeyi görüntüsü elde edilmiştir. Taş tozlu karışımda da kalıp yüzeyinde çok az boşluk olduğu ve oldukça iyi bir görünüm elde edildiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Aynı çalışmada 28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde, uçucu kül katkılı numunelerin 49,1 MPa, taştuzu katkılı numunelerin ise 43,9 MPa değerine ulaştığı görülmüştür.

Kadiroğlu (2005), Kayseri bölgesinden temin edilen pomza taşı agregalarını kullanarak kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif betonun üretilebilirliği konusunda, laboratuvar bazında deneysel araştırmalar yapmıştır. Çalışmada 1400, 1500, 1600 ve 1700 kg/m³ etüv kuru yoğunluklarında hafif kendiliğinden yerleşen özelliklere sahip betonlar üretilmiştir. Belirtilen yoğunluklardaki karışımlarda, bağlayıcı (çimento+uçucu

kül+silika dumanı) miktarları sabit tutmuş, agrega oranlarını değiştirilerek hedef yoğunlukları elde etmiştir. Üretilen betonlar üzerinde U kutusu, L kutusu, 50 cm'ye yayılma süresi, hava içeriği, birim hacim kütlesi deneylerini uygulanarak taze beton özellikleri tespit edilmiş, taze betonlardan alınan numunelerle betonların basınç, çekme, eğilme dayanımları ve elastisite modülleri belirlenerek sonuçları irdelenmiştir.

Yapılan çalışmada kendiliğinden yerleşen hafif betonda, yoğunluk arttıkça işlenebilirliğin de kolaylaştığı görülmektedir. Bu durum, yayılma ve yerleşme özelliğinin ağırlıkla sağlandığı bilindiğinden, yoğunluğun azalmasıyla yayılma ve yerleşme özelliklerinin de azalmasının kaçınılmaz bir sonuç olduğu belirtilmiştir.

Toplam bağlayıcı miktarının ve katkı dozajının sabit tutulması, buna karşılık agrega karışım oranlarında değişiklik yapılarak farklı yoğunlukların elde edilmesi durumunda, yoğunluk arttıkça su miktarının azalmasının, basınç dayanımlarını artırdığını belirten araştırmacı, bunun nedenini, hem kuvvetli bir bağlayıcı hamurunun oluşumu, hem de daha yüksek dayanımlı agrega iskeletinin oluşturulması olarak açıklamaktadır.

Kantarcı ve Türkmen (2005), yaptıkları çalışmada farklı kür şartlarında normal agrega (NA) ve genleştirilmiş perlit agregası (EPA) ile üretilen KYB'lerin basınç mukavemeti ve geçirimsizlik katsayıları zamana bağlı olarak belirlemişlerdir. Hazırlanan beton numuneleri için bağlayıcı dozajı (çimento+ silis dumanı) 450 kg/m^3 , su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen beton örnekleri, deney gününe kadar 5 farklı ortamda kür edilerek sonuçları karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Elde edilen taze betonun yayılma çapı deney sonucuna göre üretilen bütün numunelerin KYB özelliklerini taşıdığı belirlenmiştir. EPA oranı arttıkça numunelerin geçirimsizlik katsayılarının arttığı, birim ağırlıklarının ve basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Subaşı ve Emiroğlu (2005), yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda çelik ve polipropilen lif kullanımının kendiliğinden yerleşen betonlarda işlenebilirlik parametreleri ve basınç dayanımları üzerine olan etkileri arasındaki ilişkiyi incelemiş, bu amaçla bir seri lif katkısız kendiliğinden yerleşen beton karışımı hazırlandıktan sonra karışım içerisine çelik lif, polipropilen lif ve çelik+polipropilen lif ilave edilerek farklı karışım özelliklerine sahip kendiliğinden yerleşen betonlar elde etmişlerdir. Taze betonun işlenebilirlik parametrelerini tespit etmek amacıyla çökme yayılma deneyi ve V hunisi ile akma süreleri belirleyerek, işlenebilirlik parametrelerini sağlayan karışımlardan küp numuneler alınmak suretiyle basınç dayanımı testine tabi tutarak sonuçları karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Çökme yayılma deneyinde; yayılma çapı değerlerinin tüm KYB karışımlarında birbirinden farklı olduğu, lif katkısız KYB karışımının yayılma çapının en büyük değere, çelik lif+polipropilen lif katkılı KYB'nin ise en küçük değere sahip olduğu iki değer arasındaki farkın %17 seviyesinde olduğu belirtilmiştir.

V hunisi deneyinde lif katkısız KYB karışımının akma süresinin en küçük değerde, çelik lif+polipropilen lif katkılı KYB karışımının ise en büyük değerde olduğu belirlenmiş bunlar arasındaki farkın %121,4 olduğu tespit edilmiştir.

Basınç dayanımlarının tüm KYB karışımlarında birbirinden farklı olduğu, lif katkısız KYB karışımının basınç dayanımının en küçük, çelik lif+polipropilen lif katkılı KYB karışımın ise en büyük değere sahip olduğu, çelik lif+polipropilen lif katkılı KYB karışımının lif katkısız KYB karışımına göre basınç dayanımı değerlerinin %53,9 oranında arttığı sonuçlardan görülmektedir.

Araştırmacılar sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen beton karışımları içerisinde çelik lif ve polipropilen lif kullanımı ile taze beton işlenebilirlik parametrelerinin azaldığı, basınç dayanımlarının ise ters orantılı olarak arttığı, lif katkılı kendiliğinden yerleşen betonlarda akma süresi ve yayılma çapı ile basınç dayanımı değerleri arasında yüksek

oranda ilişkinin bulunduğunu yaptıkları varyans analizi sonuçlarına bağlayarak açıklamışlardır.

Kandemir (2005), beton yol uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla kendiliginden yerleşen beton özelliklerini sağlayan karışımlar dizayn etmiştir. Bazalt ve kireçtaşı olmak üzere iki farklı tip agrega, filler olarak uçucu kül ve taş tozu kullanılan, hava sürükleyici katkı ilave edilen örneklerin yayılma çapı ile V hunisi deneylerini yapmıştır.

Deney sonuçlarına göre hava sürükleyici katkı eklenmiş filler olarak uçucu kül, agrega olarak kireçtaşı kullanılarak üretilen numuneler ortalama 77 cm yayılma çapıyla en fazla yayılma gösteren numuneler olmuştur.

V hunisi deneyinin ilk aşamasında, hazırlanan bütün karışımlar belirli sürelerde huni ağzından akışı gerçekleştirmiş olmasına rağmen, V hunisi 5 dakika gecikmeli deneyde ise üç gurup numunenin huni ağzında tıkanıldığı saptanmıştır.

Yine aynı çalışmada hazırlanan bu numunelerin farklı yaşlarda basınç ve eğilme dayanımları bulunarak mekanik özellikleri incelenmiştir. 3, 7, 28. gün sonunda yapılan kırımların hepsinde basınç mukavemeti değerlerinin en düşük ve en yüksek olduğu beton numunelerinin değişmediği gözlenmektedir. En yüksek basınç dayanım değeri (54,9 MPa) hava sürükleyici katkı eklenmiş, filler olarak uçucu kül, agrega olarak bazalt kullanılmış sertleşmiş beton numunelerinde belirlenmiş, en düşük basınç dayanımı değeri (23,3 MPa) ise hava sürükleyici katkı eklenmiş, filler olarak taş tozu, agrega olarak bazalt kullanılmış olan numunelerde ölçülmüştür.

Filler olarak uçucu kül kullanılan örnekler 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının tamamında taş tozlu karışımlardan daha yüksek basınç dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Uçucu külün sahip olduğu puzolanik aktivite özelliğinin taş tozuna

kıyasla oldukça fazla olmasının basınç dayanım değerlerinin yüksek çıkmasına neden olduğu araştırmacı tarafından belirtilmiştir.

Felekoğlu vd. (2006), aynı çimento dozajında (350 kg/m^3) farklı viskozite arttırıcı mineral katkıları (uçucu kül ve taş tozu) ve farklı agrega granülometreleri ile kendiliğinden yerleşen betonlar üretmiş ve bu betonların dayanım sınıfına eşdeğer, geleneksel sıkıştırma işlemi görmüş betonların yüzeysel aşınma performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma sonucunda araştırmacılar, aynı karışım oranlarında KYB serilerinde toz malzeme olarak taş tozu yerine uçucu kül kullanımının 28 günlük basınç dayanımında artırdığını, fakat uçucu kül miktarının çok fazla artırılmasının dayanımda düşüşe neden olduğunu, bu nedenle KYB teknolojisinde kullanılan uçucu kül miktarının belirli bir optimumda tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmada belirtilen bir diğer sonuca göre, 7 ve 28 günlük KYB'ler geleneksel betona göre sırasıyla % 47,6 ve % 30 oranlarında daha az aşınma ve ağırlık kaybına uğramışlardır.

Sağlam ve Özkul (2006), kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisinin incelendiği çalışmalarında, değişken olarak, su/bağlayıcı, mineral katkı/bağlayıcı, kimyasal katkı/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranlarını seçmişlerdir. Çalışmanın reolojik parametreleri ise, çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği değerleri olarak belirlenmiştir. Mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmış, bu katkıları normal portland çimentosu ile yer değiştirilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre KYB'ler için parametrelerin etkisini aşağıdaki sonuçlarla açıklanmıştır:

- Uçucu kül yerine silis dumanı kullanımı çimento hamurlarında viskoziteyi artırmış, ancak harç ve betonda bunun tersine viskoziteyi düşüren bir etki oluşturmuştur.
- Kayma eşikleri karşılaştırıldığında, silis dumanlı çimento hamurlarının uçucu küllülere göre daha büyük değerler aldığı gözlenirken, harçlarda durum değişmiş ve silis dumanlı karışımların kayma eşiklerinin daha düşük kaldığı belirlenmiştir.

- Genel olarak uçucu küllü hamurlarda en etkin bileşim parametreleri, minarel katkı/bağlayıcı ve su/bağlayıcı iken, harçlarda ek olarak kum/bağlayıcı da etkili olmuştur. Uçucu küllü ve silis dumanlı betonların her ikisinde de kum/bağlayıcı ve su/bağlayıcı etkin parametreler olarak öne çıkmıştır.

Aruntaş vd. (2007), kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri üzerine atık mermer tozunun (AMT) etkisini inceledikleri çalışmalarında, S/Ç oranı, hiperakışkanlaştırıcı (HA) miktarı ve bağlayıcı miktarını sabit tutmuşlardır. HA katkı, beton karışımlarına çimento miktarının ağırlıkça % 1,5'i oranında, AMT çimento ile ağırlıkça % 5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Taze betonun KYB özellikleri ile sertleşmiş betonun 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, AMT katkılı KYB'ler fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından hem birbirleriyle hem de kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır.

Çökme yayılma deneyi sonuçlarına göre bütün karışımların yayılma miktarları 540-650 mm, 50 cm genişliğe erişme süresi ise 2,4-6 sn arasında değişmektedir. Yayılma deneyi sonuçlarına göre kontrol betonu hariç hiçbir karışım KYB özelliği göstermemektedir. KYB içinde AMT oranı arttıkça yayılma azalmaktadır. Aynı durum V hunisi için de geçerlidir. Burada da AMT miktarı arttıkça V hunisinden KYB'lerin geçiş süresi de artmaktadır. Taze beton deney sonuçlarına göre, yayılma çapının azalması buna karşılık T_{50} süresi ile V hunisinden geçiş süresindeki artma, KYB içerisindeki AMT miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Dökülen numuleler arasında en yüksek basınç dayanımı 58,7 MPa değeriyle % 20 AMT katkılı betonlarda elde edilmiştir.

Yardımcı (2007), lifsiz ve lifli kendiliğinden yerleşen karışımların reolojik özelliklerini, J halkalı çökme yayılma deneyi, V hunisi deneyi ve L kutusu deneyi ile değerlendirmiştir. KYB deney sonuçlarına göre, tüm lifsiz seriler hem taze hal deneylerinin sonuçlarına göre, hem de gözlemsel olarak kendiliğinden yerleşebilirliği

sağlamış ve lifsiz hiç bir seride ayrışma gözlenmemiştir. Lifsiz seriler içerisinde en fazla yayılma çapına 78 cm ile UK/B oranı 0.40 olan serilerde ulaşılmıştır.

Yine aynı çalışmada; çelik lif narinliği, miktarı ve karışımın ince agrega(İA)/kaba agrega(KA) oranının ÇLKBY'lerin basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri yanında kırılma davranışı ve kırılma enerjisi üzerine etkileride araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde lifsiz serilerde artan İA/KA oranına karşılık 28 günlük basınç dayanımlarının belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. İA/KA oranı 0,94 olan sertleşmiş beton numunelerin ölçülen ortalama 28 günlük basınç dayanımı değeri 73,3 MPa iken, İA/KA oranı 1,72 olan sertleşmiş beton numunelerinin ölçülen ortalama 28 günlük basınç dayanımı değeri 65,1 MPa, İA/KA oranı 2,50 olan karışımda elde edilen basınç dayanımı değeri ise 63,5 MPa olarak ölçülmüştür.

Eroğlu vd. (2007), karışım parametrelerinin KYB'lerin taze beton özellikleri üzerine etkilerini, bir istatistiksel deney tasarım tekniği olan “merkezi kompozit tasarım” yöntemini kullanarak oluşturulan deney programı çerçevesinde araştırmışlardır. Bu amaçla, karışımlarda uçucu kül yüzdesi, su/bağlayıcı oranı, süper akışkanlaştırıcı (SA) ve viskozite düzenleyici katkı (VDK) miktarları deneysel programın değişkenleri olarak belirlenmiş ve yayılma çapı, V hunisi, L kutusu ve ayrışma deneyleri, üretilen 21 farklı beton karışımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmanın sonucunda; su/bağlayıcı oranının, KYB'lerin akıcılığı ve dar kesitlerden geçebilme yeteneği üzerinde kurulan modellerdeki parametrelerle karşılaştırıldığında en etkili parametre olduğunu belirlemişlerdir.

Uçucu kül kullanımının, KYB'nin akıcılığını, dar kesitlerden geçebilme yeteneğini ve ayrışma direncini artırdığı, ayrıca uçucu külün kendiliğinden yerleşebilme özelliklerini elde etmek için gerekli süper akışkanlaştırıcı miktarının azaltmasında kullanılabileceği ve böylece KYB'lerin kimyasal katkı kullanımı nedeniyle ortaya çıkan yüksek maliyetini azaltmada faydalı olacağı sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışmada ayrıca; Polikarboksilik eter bazlı süperakışkanlaştırıcı katkının beton karışımlarının akıcılığını

ve dar kesitlerden geçebilme yeteneğini artırdığı, özellikle düşük oranlarda uçucu kül kullanımının ise beton karışımlarının ayrışma direncini azalttığı belirlenmiştir. Sentetik polimer esaslı viskozite düzenleyici katkının ayrışma oranını önemli ölçüde azalttığı, fakat akıcılık ve dar kesitlerden geçme yeteneği üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı saptanmıştır.

Yılmaz (2007), tez çalışmasında hacimsel sabit su/pudra oranlı (0,52), 5 farklı su(S)/çimento(Ç) oranına sahip karışımlar oluşturmuş, bu karışımlarda (0-45) mikron arası tane boyutuna sahip silis ununu çimentoyla ikameli olarak kullanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda su/ince malzeme oranı sabitken çimento yerine ikame edilen silis unu nedeniyle artan su/çimento miktarının, betonun gerek taze haldeki KYB özelliklerini ve gerekse sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını nasıl etkilediğini araştırmıştır.

Çökme yayılma deneyinde, en fazla yayılmayı 74 cm ile, lif içermeyen 0,38 S/Ç oranına sahip numunelerin gerçekleştirdiğini belirten araştırmacı, S/Ç oranı arttıkça betonun kohezyonunun azaldığını ve paralelinde taze betonun agregaları taşımakta zorlandığını tespit ederek lifsiz beton üretimi için en uygun su/çimento oranının 0,45 olduğunu belirtmektedir.

V hunisi deney sonuçları incelendiğinde lifsiz numunelerde 0,24 su/çimento oranından 0,38 su/çimento oranına kadar V hunisi akış süresinin birkaç saniye arttığını belirlemiş, bu durumu, ince malzeme içeriği olarak aynı bileşime sahip karışımlarda, karışımın içerdiği çimento miktarının, betonun kendi ağırlığı ile yerleşebilme davranışı açısından önemli olduğu vurgusuyla açıklamıştır.

U kutusu deney sonuçlarının yorumunda ise; hareket süresinin, artan su/çimento oranıyla beraber azaldığını tespit etmiştir. Düşük su/çimento oranlarında betonun, yüksek çimento dozajından dolayı daha viskoz olduğunu ve aynı zamanda U kutusu

deney aletinin yüzeylerine daha çok yapıştığını, bu durumun taze betonun hareket süresini de artırdığını belirtmiştir.

Üretilen KYB'ler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinde; 0,24, 0,31, 0,38 S/Ç oranlarına sahip karışımların, S/Ç oranının artmasına paralel olarak düşmesi gereken basınç dayanımlarında, beklenenin aksine herhangi bir azalma gözlemlenmemiş 0,45 S/Ç oranında üretilen numunelerde 0,24 S/Ç oranına sahip numunelerin basınç dayanımına göre sadece % 6 lık bir düşüş tespit edilmiştir. Araştırmacı bu durumu; 0,24 ve 0,38 S/Ç oranlarına sahip numuneler arasında hidrate olmayan çimentonun ve çimento ile ikameli olarak kullanılan silis ununun mukavemete olan etkilerinin benzer olduğu şeklinde açıklamıştır.

Aydın (2007), hacimce % 2'ye kadar tekil ve karma olarak karbon ve çelik mikrolif donatılı betonların kendiliğinden yerleşebilirliği üzerinde yaptığı çalışmada, yüksek hacimde mikrolif donatılı betonlardan elde edilen yayılma çapı, J halkası yüksekliği, L kutusu bloklanma oranı ve V hunisi akış süresi değerlerinin EFNARC (2002)'de lifsiz KYB'ler için önerilen sınır değerleri aştığını belirtmiştir. Aynı çalışmada karışık mikrolif donatılı betonların akış davranışının lifsiz KYB'lerden farklı olduğunu vurgulamıştır.

Ding *et al.* (2007), ise çelik ve polipropilen lifli KYB karışımları üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada makro lifli KYB'lerin işlenebilirliğinin sadece çökme yayılma testi yerine, J halkası ve L kutusu deneyi gibi testlerle de ölçülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çökme yayılma deneyinin lifli KYB'lerin akıcılığı hakkında fikir verebileceğini, ancak geçiş yeteneği ve ayrışma direncinin bu deneyle belirlenemeyeceğini özellikle vurgulamışlardır. Aynı çalışmada J halkası testi ile elde edilen geçiş yeteneği sonuçlarının L kutusu ile elde edilen geçiş yeteneği sonuçları ile paralel olduğu da belirtilmiştir.

Sağlam vd. (2007), polikarboksilat esaslı altı farklı süperakışkanlaştırıcı katkı ve dört farklı çimento (üç farklı fabrikanın ürünü olan CEM I 42,5 ve bir tür CEM II 42,5 çimentoları) kullanılarak üretilen çimento hamuru ve betonların taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri belirlemiş ve bu karışımlarda çimento-katkı uyumunu incelemişlerdir.

Denenen bazı çimento ve süperakışkanlaştırıcı katkıları arasında çimento-katkı uyumsuzluğuna rastlanmış, taze betonda bu uyumsuzluk genel olarak hızlı kıvam kaybı şeklinde, sertleşmiş betondaki çimento-katkı uyumsuzluğu ise 1 ve 7 günlük dayanımlardan düşük değerler elde edilmesi, şeklinde ortaya çıkmıştır.

Dinç (2007), yaptığı çalışmada hacimsel sabit 0,52 su/pudra oranına sahip 5 farklı karışım üretmiştir. Bu karışımlarda farklı su(S)/çimento(Ç) oranları mevcut olup, çimento ile benzer inceliğe sahip olan silis ununu çimento yerine hacimce ikame ederek kullanmıştır. Karışımlarda azalan çimento miktarına karşılık aynı hacimde çimento inceliğinde öğütülmüş silis unu eklenerek toplam ince malzeme hacminin sabit kalmasını sağlamıştır. Üretilen KYB'lere çekme dayanımı 2250 MPa olan çelik lifleri yine hacimce %1 oranında eklemiştir. Ürettiği lifsiz ve lifli betonların KYB özelliklerini ve sertleşmiş haldeki mekanik davranışlarını incelemiştir.

Çökme yayılma deneyinde; lif içermeyen numunelerde 0,24 S/Ç oranlı karışımın 50 cm çaplı dairesel alana yayılma süresinin, düşük S/Ç oranı ve yüksek çimento dozajı ile artan kohezyondan dolayı en yüksek değerde olduğunu belirtmiştir.

V hunisi deney sonuçlarına göre, lifsiz numunelerde 0,24 S/Ç oranından 0,38 S/Ç oranına kadar V hunisi geçiş süresinin çok fazla değişmediğini gözlemlemiş, ayrıca 0,63 S/Ç oranında üretilen KYB'lerde kohezyon kaybı ve segregasyon tehlikesinin oluşmaya başladığını saptamıştır.

U kutusu deneyinin sonuçlarını yorumlarken, lifsiz numunelerde akış süresinin, artan S/Ç oranıyla beraber azaldığını tespit etmiş, bunun nedenini düşük S/Ç oranlarında taze betonun, yüksek çimento dozajından dolayı daha viskoz olmasıyla açıklamıştır.

Araştırmacı, silindir basıç deneyi sonuçlarında en yüksek dayanımını (131,9 MPa) lif katkılı 0,24 S/Ç oranıyla üretilmiş olan numunelerde elde etmiştir.

Gesoğlu vd. (2007), yaptıkları çalışmada, uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve metakaolinin (MK), çimento ile tek, ikili ve üçlü olarak belirli oranlarda yer değiştirilmesi ile kendiliğinden yerleşen betonlar üretmişlerdir. Taze beton numuneleri için çökme yayılma, V hunisi akma süresi, L kutusu yükseklik oranı, priz başlangıç/bitiş süresi tayini ve viskozite deneyleri, sertleşmiş beton numuneler üzerinde ise basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimsizliği deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Beton karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0.32 ve toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m³ olarak seçilmiş ve bu şekilde 22 farklı karışım tasarlanmıştır. UK ve YFC % 20, 40 ve 60, metakaolin ise %5, 10 ve 15 oranlarında çimento ile ağırlıkça ikame edilerek kullanılmıştır. Çalışmada, kullanılan mineral katkılarla üretilen KYB'lerin klorür geçirimsizliğinin belirgin bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Çökme yayılma deneyinde, tüm KYB karışımlarında hedeflenen yayılma çapı kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı değiştirilerek sağlanabilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, UK katkılı karışımlarda süperakışkanlaştırıcı miktarı azalırken, MK ve YFC içeren karışımlarda kontrol betonuna göre süperakışkanlaştırıcı miktarı artmıştır. V hunisi deney sonuçları incelendiğinde; MK'nın portland çimentosu ile tekli kullanımında MK miktarının artması ile V hunisi akma süresinin arttığı, UK+MK'nın portland çimentosu ile ikili kullanımında ise V hunisi akma süresinin toplam mineral katkı miktarının artması ile azaldığı gözlenmiştir.

Üretilmiş olan tüm mineral katkılı KYB'lerin L kutusu yükseklik oranı EFNARC tarafından önerilen (0,8-1) sınırları sağlamakta olup kontrol betonunun L kutusu yükseklik oranı değeri ise alt sınır olan 0.8 değerinin bir miktar altında kalmıştır.

Araştırmacılar, UK ve YFC'nun kendiliğinden yerleşen betonların taze özelliklerini iyileştirip, viskoziteyi azaltıp priz başlangıç ve bitiş sürelerini uzattıklarını, MK kullanılarak elde edilen betonlarda ise viskozitenin önemli oranda arttığını belirterek, MK'in bu zararlı etkisini azaltmak için YFC ve/veya UK ile birlikte kullanılmasının daha uygun olduğunu önermişlerdir.

Basınç dayanımları incelendiğinde; en yüksek basınç dayanımı 28. günde 98,6 MPa değeri ile %15 MK içeren beton karışımlarında elde edildiği görülmektedir. UK içeren tekli sistem karışımlarının basınç dayanımlarının kontrol betonun basınç dayanımlarına göre belirgin bir şekilde azaldığı, YFC içeren karışımların basınç dayanımlarının kontrol betonuna göre önemli bir değişim göstermediği, MK içeren betonların ise kontrol betona göre daha yüksek basınç dayanımlarına ulaştığı görülmektedir.

Benli vd. (2008), yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlardan üretilmiş kirişlerde aderans dayanımını belirlemek için, mineral katkılı normal ve KYB'lerden 200*300*2000 mm boyutlarında 12 adet kiriş numunesi üretmişler ve bu numuneleri dört noktalı eğilmeye maruz bırakılarak test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, normal betondan üretilen kiriş numunelerindeki göçmenin ani ve gevrek olduğu, KYB'lerden üretilen kiriş numunelerindeki göçmenin ise, ani ve gevrek olmayan bir şekilde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca KYB numunelerinin göçme yükleri arasındaki farkın normal betondan üretilenlere göre daha az olduğunu belirleyerek, bu durumu KYB'nin reolojik ve dayanım özelliklerinden kaynaklanan avantajlarının sonucu olarak değerlendirmişlerdir.

Kurt (2009), doğal hafif agrega (pomza) ile kendiliğinden yerleşen, taşıyıcı hafif beton ve ısı yalıtımlı hafif betonların, üretim ve kullanılabilirliği üzerine yaptığı

araştırmasında iki farklı grupta numuneler hazırlamıştır. Birinci grupta %100 pomzadan oluşan ve üç farklı su(S)/bağlayıcı(B) (0,35, 0,40 ve 0,45) oranıyla kendiliğinden yerleşen hafif betonlar (KYHB) üretmiştir. İkinci grupta ise pomza agregası %20, %40, %60, %80 ve %100 oranında normal agregası ile yer değiştirilerek sabit su/bağlayıcı oranıyla KYHB'ler üretmiş bunların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Çökme yayılma deney sonuçları incelendiğinde; en düşük yayılma çapı 560 mm ile %40 pomza tozu içeren, S/B oranı 0,35 olan karışımında ölçülürken, en yüksek yayılma çapı 740 mm ile %40 uçucu kül içeren S/B oranı 0,45 olan karışımında ölçülmüştür. Karışımlarından S/B oranı 0,40 olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufunda çok az ayrışma gözlenirken, diğer karışımlarda ayrışma gözlenmemiştir. V hunisi deney sonuçlarına göre; en uzun akış süresi 24 sn ile S/B oranı 0,35 olan ve %40 pomza tozu içeren karışımlarda ölçülürken, en kısa akış süresi ise 7 sn ile S/B oranı 0,40 olan ve %45 uçucu kül içeren karışımlarda ölçülmüştür. Uçucu kül içeren karışımların tümünde akış süresi standart akış süresi olan 8-12 sn arasında kalırken, yüksek fırın cürufu içeren karışımların akış sürelerinin 12-17 sn arasında, pomza tozu içeren karışımların ise 17-24 sn arasında olduğu görülmüştür.

L kutusu deney sonuçlarında; H_2/H_1 oranının 0.77 ile 0.93 değerleri arasında ölçüldüğü belirtilmektedir. Tüm karışımlarda S/B oranı arttıkça, L kutusu oranının (H_2/H_1) arttığı, pomza tozu miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında araştırmacı aynı hafif agregası oranında genellikle uçucu kül içeren karışımların daha iyi sonuç verdiğini ifade etmektedir.

Aynı çalışmanın 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde ise en yüksek dayanımların %35 S/B oranına sahip uçucu kül katkılı hafif betonlarda elde edildiği görülmektedir.

Gönen ve Yazıcıoğlu (2010), bazaltik pomza ve genleştirilmiş perlit agregası ile üretilen KYHB'lerin mekanik özellikleri araştırmışlardır. Çalışmada üretilen KYHB'lerin harç fazı CEM I 42,5 N tipi çimento ve C sınıfı uçucu külden oluşmaktadır. Agregada fazında ise bazaltik pomza ve genleştirilmiş perlit agregası farklı oranlarda yer değiştirilerek kullanılmıştır. Dere agregalı normal ağırlıklı kendiliğinden yerleşen betonların ve vibrasyonla sıkıştırılan hafif betonların mekanik özellikleri, farklı kür ortamlarına göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışma sonucunda;

Bazaltik pomza agregası ile KYHB üretilbildiği gibi, bazaltik pomza agregasıyla genleştirilmiş perlit agregasını en fazla %30 oranına kadar yer değiştirerek daha hafif KYHB'lerin üretilbileceği vurgulanmıştır.

Bazı serilerin V hunisi 5 dakika gecikmeli deneyi sonuçlarına göre ayrışma direnci açısından kendiliğinden yerleşebilme kriterini sağlamadıkları görülse de diğer kriterler dikkate alındığında, üretilmiş olan tüm serilerin EFNARC 2002'ye göre kendiliğinden yerleşebilme özelliğini gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Basınç dayanımları açısından tüm numuneler ele alındığında, en düşük dayanımlar vibratör ile sıkıştırılmış ve kendiliğinden yerleşme özelliği olmayan HB'lerden elde edilmişken, en yüksek dayanım dere agregası ile üretilmiş KYB'lerde görülmüş, KYHB'lerin dayanımları ise 50 ile 65 MPa arasında bulunmuştur. Numunelerin bulundukları kür ortamı basınç dayanımlarını etkilemiştir. Tüm serilerde hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarında, standart su kürüne göre azalmalar olmuştur. Basınç dayanımlarındaki azalma en fazla dere agregalı karışımlarda gözlenirken, pomza kullanılarak üretilen numunelerde dayanım düşüşü azalmıştır. Bu durum pomzanın yüksek nem tutabilme kabiliyetine bağlanmıştır. Beton kuru ortamda olsa bile pomzanın nem tutma kabiliyeti nedeniyle, hidrasyonun devamının sağlanabildiği bunda basınç dayanımında iyileşmelere neden olduğu belirtilmiştir.

Mohammed (2011), çalışmasında farklı oranlarda uçucu kül (%10, %15, %20, %25, %30, %35, %40, %50) ile silis dumanını (%10, %15, %20) çimento yerine ayrı ayrı ve birlikte ikame ederek KYB nuneleri üretmiştir. Bu numuneler hava kürü, 7 ve 28 gün su küründe bekletilerek basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, en düşük dayanımlar hava kürü uygulanan numunelerde, en yüksek dayanımlar da 28 gün su kürü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. Çalışmada katkı oranlarının optimum değerleri, uçucu kül için %30, silis dumanı için %15 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca en yüksek basınç dayanımına (29,1 Mpa), %10 uçucu kül ve %10 silis dumanının birlikte kullanılmasıyla üretilen 550 kg dozajlı numunelerde ulaşılmıştır.

2.2. Kür Yöntemleri

Betonun, özellikle ilk günlerinde, yeterince hidrasyon yapabilmesini sağlayabilmek için, betonun içerisinde yeterli miktarda suyun ve sıcaklığın bulundurulması ve bu ortamın korunması işlemi, “betonun kürü” veya “betonun bakımı” olarak tanımlanmaktadır (ACI 308-92 1994). Farklı araştırmacılara ait farklı kür tanımları ise şöyledir:

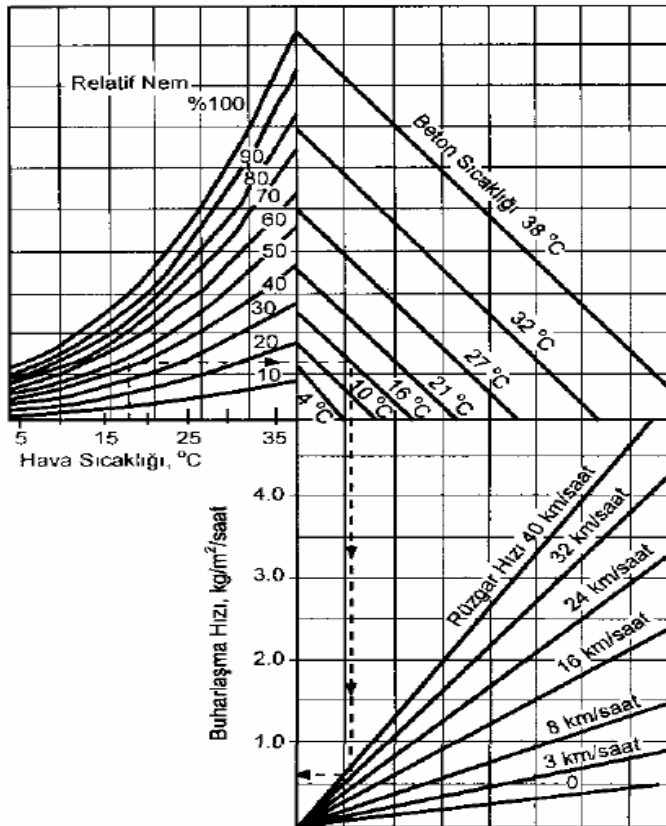
Kür, çimentonun hidrasyonunu sağlayan, sıcaklığa bağlı olarak beton içinde nem hareketlerini yükseltmek için sürdürülen işleme verilen isimdir (Neville 1995).

Kotan (2009) tarafından bildirildiğine göre, kür, portland çimento betonunun olgunluğunu sağlayan, yeterli su ve sıcaklığın bulunduğu ortamda çimento tanelerinin hidrasyonunun bir sonucu olarak, zaman içinde gelişen prosestir (Anonymous 1989).

Daha spesifik olarak kürün amacı çimentonun hedeflenen miktarı hidrasyonu sağlayıncaya kadar betonu suya doymuş veya neredeyse suya doymuş ortamda bulundurmaktır (Karahana vd. 2005).

Kür, betonun yeterli bir zaman periyodu içinde hedeflenen dayanıma erişebilmesi ve çimento hidratasyonunun devamı için gerekli nem ve sıcaklık şartlarının sağlandığı süreç olarak tanımlanabilir (Kotan 2009).

Taze betonda hidratasyon için yeterince su bulunmamasının bir nedeni de beton yapımında kullanılan su/çimento oranının 0,5'den (teorik olarak 0,42'den) daha düşük olmasıdır. Bu tür betonların kapiler boşluklarındaki suyun bir miktarının çimentonun hidratasyonu için kullanılarak azalması sonucunda, hidratasyonun devam edebilmesi için kapiller boşlukların içerisinde yeterli miktarda su kalmamaktadır. Bu olay “öz kuruma” veya “kendiğilinden kuruma (self desiccation)” olarak adlandırılmaktadır. Su/çimento oranı 0,5'den daha düşük olan betonlarda hidratasyonun devamını sağlayabilmek için betonun sulanması ve böylece dışarıdan su takviye edilmiş olması gerekmektedir (Erdoğan 2003).



Şekil 2.3. Beton sıcaklığının, hava sıcaklığının, relatif nemin ve rüzgar hızının beton yüzeyindeki suyun buharlaşmasına etkileri (Erdoğan 2003).

Beton dayanımı için çok büyük öneme sahip olan kür yöntemleri üç ana başlık altında toplanabilir:

1- Betonun ıslak durumda kalabilmesini sağlayan kür yöntemleri

- Beton yüzeyinin tamamen su altında bırakmak
- Beton yüzeyine su serpiştirerek beton yüzeyini ıslak tutmak
- Beton yüzeyine su tutucu malzemeler serilerek yüzeyi ıslak tutmak

2- Beton yüzeyini bir zar ile örterek buharlaşmayı önleyen kür yöntemleri

- Beton yüzeyini su geçirmeyen örtülerle kaplamak
- Beton yüzeyini sıvı kimyasal maddelerle kaplamak

3. Betonun erken dayanımını arttıran hızlandırılmış kür yöntemleri

- Priz hızlandırıcı kimyasal katkıları kullanmak
- Kristal çekirdekleri kullanmak (Jerm Metodu)
- Isıl işlem uygulamak
- Yüksek basınç altında sıcaklığı artırmak

2.2.1. Hava kürü

Bu yöntemde beton yerine yerleştirildikten sonra bulunduğu doğal ortamda bırakılır. Açık havada kalan betonun içindeki su, buharlaşarak kaybolur ve hidratasyon için gerekli olan su miktarı azalır. Buharlaşan su miktarı havanın rölatif nemine, betonun sıcaklığına, rüzgar hızına ve rüzgara maruz kalan yüzey alanının büyüklüğüne göre değişmektedir. Hidratasyon için yeterli su miktarının bulunmaması durumunda hidratasyon tamamlanamayacak ve betonda ciddi dayanım kayıpları meydana gelecektir.

Beton içinin bağıl neminin %80 civarında tutulması durumunda hidrasyon devam edecektir. Dış bağıl nemin de bu seviyede tutulması halinde kür işlemine gerek kalmadan beton içinde hidrasyon devam edecektir. Beton ve dış ortam arasında sıcaklık farkının bulunmadığı, rüzgâr ve güneş etkilerinin olmadığı durumlar için geçerli olabilir. Ancak, dünyanın birçok yerinde bağıl nem gün içinde %80'in altındadır. Bundan dolayı nemli havanın yeterli bir kür sağlayabileceği de geçerli değildir (Neville 1995).

2.2.2. Su kürü

Hazırlanan beton numunelerinin döküldükten 24 saat sonra kalıplarından çıkarılıp mekanik testlerinin yapılacağı güne kadar, 22°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) sıcaklıkta kirece doymuş su içinde bekletilmesi suretiyle uygulanan kür yöntemine su kürü denilmektedir. Su kürü yöntemiyle, beton numunelerinin kılcal boşluklarda bulunan hidrasyon için gerekli olan su buharlaşma yoluyla kaybolmamakta böylelikle hidrasyon reaksiyonunun devamlılığı sağlanmaktadır.

Buhar kürü tekniğinde erken yaşlardaki dayanımlar yüksek olmasına rağmen ileriki yaşlarda düşüş olmaktadır. Su kürü kür yönteminde bu durumun tam tersi olarak erken yaşlarda dayanım düşük fakat ilerleyen yaşlarda artışlar gözlenmektedir. Nihai dayanım açısından en ideal kür yöntemi su kürüdür (Sağsöz 2007).

2.2.3. Atmosferik basınçlı buhar kürü

Betonun yüksek sıcaklıklarda kür edilmesi sonucunda hidrasyon hızının arttığı ve ilk zamanlarda yüksek dayanım elde edildiği bilindiği için, endüstrinin gelişmesiyle birlikte erken dayanım için betonun buhar ortamında kür edilmesine dair bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri de atmosferik basınçlı buhar kürü yöntemidir.

Hazırlanan beton numunelerinin, belirlenen deney süresince farklı sıcaklıklarda (60-85°C) 0,1-0,3 MPa atmosfer basıncı altında buhar verilerek doygun hale getirilen ünitelerde bekletilmek suretiyle uygulanan kür yöntemine atmosferik basınçlı buhar kürü denilmektedir. Deney süresince ısı ve nem değerlerinin sabit olmasının sağlanması için atmosferik basınçlı buhar kürü yalıtımlı ünitelerde (Kür odası, kür kabini, tüp vb.) yapılmalıdır.

Betonun atmosferik basınçlı buhar kürü yöntemiyle kür edilebilmesi işleminde, genellikle, içerisine beslenen buharı tutabilecek tarzda hazırlanmış kür odaları, veya tüp olarak adlandırılan buhar tünelleri kullanılmaktadır. Betonun bu yöntemle kür edileceği ortamdaki buhar atmosferik basınçtır. Kür mekanlarında bulunması gereken sıcaklığın sınır değerleri 40-100°C olarak belirtilebilmekle beraber, genellikle, 65-85°C arasında bir sıcaklık uygulanmaktadır (Erdoğan ve Erdem 2002).

Buhar kürü tekniğinin amacı dayanım artışını hızlandırarak betona kısa sürede yüksek dayanımı kazandırmaktır. Ancak, buhar kürü yöntemleri erken yaşlarda dayanımı artırmalarına karşın ileri yaşlarda dayanım kayıplarına neden olurlar. Buhar kürü çevriminin her parametresi betonun özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Kısa ön bekleme süresi, yüksek sıcaklık artış hızı, yüksek işlem sıcaklığı ve süresi, yüksek soğutma hızları, ısıtma işlem sonucu ileri yaşlarda dayanım kayıplarına neden olan ısıtma işlem özellikleridir (Sağsöz 2007).

Betonda dayanım artışının fazla olması için sıcaklık artışının yanında ortamın yeterince neme doygun olması da gereklidir. Ortamı ısıtmak için gerekli ısı, buhar kürü ile de sağlanabilir. Bu süreç 100°C'nin altında ve atmosferik basınçta gerçekleşirse nem kürlenmesinin özel bir durumu olarak sayılabilir (Neville 1987).

Buhar kürünün amacı betonun dayanım kazanmasını erken yaşlarda hızlandırmaktır. Yüksek sıcaklıkların dayanım gelişimi için gerekli kimyasal reaksiyonları hızlandırdığı bilinmekle birlikte, bazı sınırlamalar getirilmesi gereklidir, aksi halde beton bu işlemde

yarardan çok zarar görebilir. Ancak buhar kürü uygulanan numunelerde ileri yaşlarda görülen dayanım kazancındaki bu azalmanın derecesi, başlangıçtaki buhar kürü koşullarıyla ve beton karışım-işleme özellikleriyle yakından ilgilidir. Buhar kürünün doğru uygulamalarından sonra 28 günlük dayanımdaki kayıp önemsenmeyecek ölçüde kalır (TS 3648, 1984).

Buhar kürü işleminde etkili sonuçların elde edilebilmesi için kür adımlarının iyi koordine edilmesi ve her farklı uygulama için optimum kür şartlarının yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Duvar blokları, beton boru, ön gerilmeli ve tünel kalıplı beton elemanların üretiminde yaygın olarak kullanılan bu yöntemde, ekonomik bakımdan gecikme süreci dışındaki bütün kür adımlarının en fazla 18 saatte tamamlanması istenmektedir (Erdoğan 2003).

Betona buhar kürü uygulanmasının başlıca amaçları şu şekilde özetlenebilir:

1- Beton, normal koşullardaki kür yöntemine göre, daha kısa süre içerisinde dayanım kazanmaktadır. O bakımdan, beton elemanlar daha erken bir zamanda kullanılabilirler. Kalıplara yerleştirilmiş betonun istenilen dayanıma daha kısa süre içerisinde erişebilmesi, kalıpların daha kısa süre içerisinde sökülebilmesine imkan tanımaktadır. Sökülen kalıplar bir başka beton dökümünde kullanılabilme, yapılması gereken iş daha hızlı yapılabilme, ve buna bağlı olarak, ekonomiklik sağlanabilmektedir.

2- Betondan beklenen dayanımın daha kısa süre içerisinde kazanılabilmesi ve betonun daha erken hizmete sokulabilmesi nedeniyle, üretilen beton elemanların kür işlemi için muhafaza edildikleri sahada (depoda) uzun süreyle bırakılmalarına gerek kalmamaktadır. Bu bakımdan da ekonomiklik sağlanmış olmaktadır. (Erdoğan ve Erdem 2002).

2.2.3.a. Buhar kürü  evrimleri

Isıl işlem aşamalarında betona, farklı işlem sıcaklıklarının farklı sürelerle uygulanması ısıtma işlem çevrimlerinde çeşitliliğe neden olmaktadır. Pratikte uygulanan ısıtma işlem çevrimlerini üç grupta toplamak mümkündür ( ztekin 1983; Sağsöz 2007).

1- Hızlı  evrimler

İşlem sıcaklığı 80-90 C gibi yüksek sıcaklıklarda olup, toplam çevrim süresi 6-7 saat süren çevrimlerdir. Hızlı çevrimlerde  n dinlendirme süresi 1 saat veya daha az, sıcaklık yükseltme ve soğutma hızı 30 C/saat civarındadır. Soğutma tamamlanmadan kalıp alınır. Hızlı çevrimlerde toplam çevrim süresi kısa olduğundan dolayı günde üç rotasyona olanak sağlanır (Kotan 2009).

2- Orta  evrimler

İşlem sıcaklığı 70-75 C civarında olan ve toplam çevrim süresi 9-11 saat süren ısıtma işlem  evrimleridir. Bu çevrimde  n dinlendirme süresi 2-3 saat olup ısıtma ve soğutma hızları 15-20 C/saat civarındadır. Soğutma tamamlanmadan, beton elemanın sıcaklığı 30-40 C iken kalıp alınabilir (Sağsöz 2007).

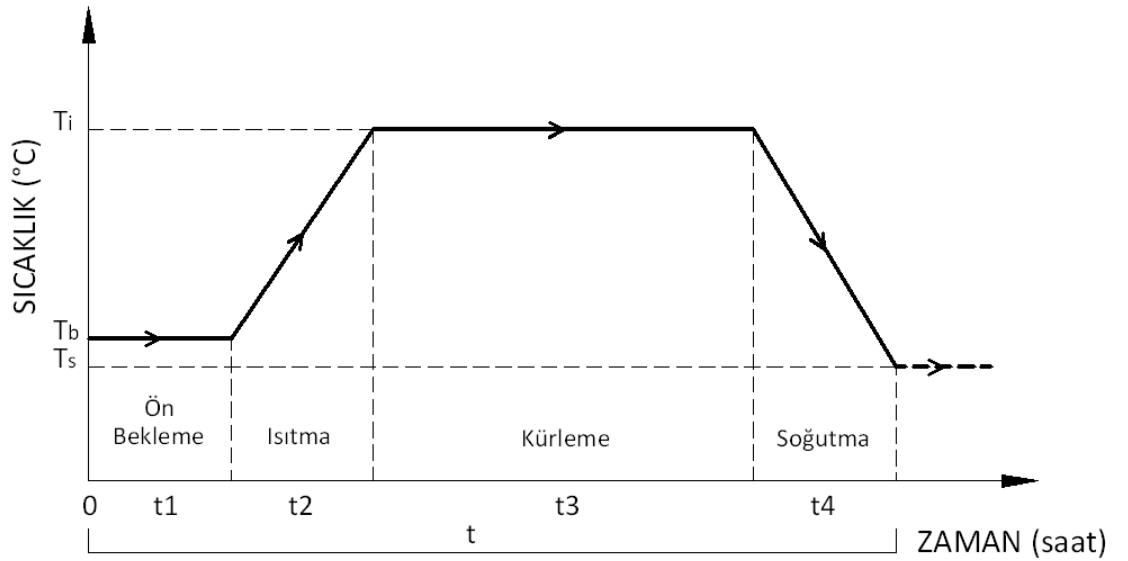
3- Yavaş  evrimler

İşlem sıcaklığı 55-60 C'yi aşmayan ve toplam çevrim süresi 20-22 saat olan çevrimlerdir.  n dinlendirme süresi 4 saat olup sıcaklık yükseltme ve soğutma hızları 10 C/saat dolayındadır. Beton elemanın kalıbı alınırken soğuma süreci tamamlanmış olur. Yumuşak  evrimli ısıtma işlemlerde ise günde ancak bir rotasyona olanak sağlanır (Kotan 2009).

2.2.3.b. Buhar kürü aşamaları

Taze betonda yeterli sıcaklık ve nem hareketleri sağlayarak daha kısa periyotlarda daha yüksek dayanımlar elde edilmesi esasına dayanan bu kür yöntemi, betonun farklı sıcaklıklara maruz bırakıldığı 4 farklı süreçten oluşmaktadır. Tipik bir ısıtma işlem çevrimini oluşturan bu süreçler, Şekil 2.4'te grafiksel olarak gösterilerek her biri alt başlıklar halinde açıklanmıştır (Öztekın 1983).

- a. Ön bekleme veya gecikme süreci
- b. Kontrollü ısıtma süreci
- c. Maksimum sıcaklık veya kürleme süreci
- d. Kontrollü soğutma süreci



Şekil 2.4. Tipik bir ısıtma işlem çevriminin aşamaları (Öztekın 1983)

a- Ön bekleme süreci

Ön bekletmeden amaç, çimento hidratasyonun bir kısmının başlamasına izin vererek çimento hamuru fazına jelleşme doğrultusunda başlangıç kararlılığını kazandırmaktır.

Özellikle ön bekletme süresinin çok kısa olduğu hızlı çevrimlerde, betonun kohezyonu su ve hava fazlarının genleşmelerini önlemeye yetersizdir. İşlem döneminde hızlı hidratasyona giren beton içerisindeki fiziksel olarak bağlı suyu kullanmadan sertleşir. Böylece başlangıçtaki kararsız yapı sertleşme sonrasına da taşınmış olunur. Bu nedenle ön bekletme süresi ne kadar uzunsa, priz ve sertleşme o kadar ilerler, hacim artışı da o oranda az olur (Öztekin 1980; Sağsöz 2007).

TS 3648 (1984)'de ön yapımlı elemanlar için, Ön bekleme süresini 1-7 saat; kütleleri fazla, dolu elemanlarda ise en az 3 saat buhar kürü öncesi bekleme uygulanması istenmiştir. Ayrıca bu işlemin rüzgar ve güneşin etkilerinden uzak 5-30°C arasında yapılması öngörülmüştür.

Isıl işlemin ilk halkasını oluşturan ön bekletme süreci, kendisinden sonra gelen sıcaklık yükselmesi aşaması ile yakından ilgilidir. Ön dinlendirme süresi genel olarak çimento cinsine, su/çimento oranına, beton elemanın kütle/yüzey oranına ve beton üretilen yerin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu sürenin en az 3 saat olması gerektiği, optimum sürenin ise 7 saat olduğu belirtilmektedir (ACI 517, 1980).

Ön bekletme süresi, malzemelerin karılma işleminin bittiği ve beton elemanın hazırlandığı andan, buhar kürünün uygulandığı ana kadar geçen süredir. Bekleme süresinin uzunluğu, normal olarak, 3-5 saat arasında değişmektedir (Erdoğan ve Erdem 2002).

Ön bekletme zamanı CEM I ve CEM III tipi çimentolar için 2-3 saat, CEM II ve CEM V tipi çimentolar için 4-5 saattir. Çevresel sıcaklıkların çok yüksek veya çok düşük olması durumunda bu zaman değerleri düzeltilmelidir (Erdem 2000).

b- Kontrollü ısıtma süreci

Dayanım kayıpları, ani ısı şokuna uğrayan çimento hamuru fazındaki bazı oluşumlardan

kaynaklanır. Bunun temelinde katı fazların yaklaşık 10 katı büyüklüğündeki havanın genleşme katsayısı yatar. Ekonomik ve teknik açıdan kabul edilen sıcaklık artış hızları genellikle 20 ila 30°C/saat arasındaki hızlardır. Yetersiz ya da bir başka deyişle 1 saatin altında ön dinlendirme yapılmış elemanlarda sıcaklık yükseltme hızı 11°C/saat veya daha düşük olmalıdır (Öztekin 1978; Sağsöz 2007).

TS 3648 (1984)'de sıcaklık yükseltme hızı, ön dinlendirme süresi ve şartlarına uyulması koşulu ile 35°C/saat olarak verilmiştir. 30°C'nin üzerindeki sıcaklık yükseltme hızlarında yeterli bir ön dinlendirme yapılsa bile ısı şoku ihtimalinin artması nedeniyle betonda dayanım kayıplarının ortaya çıktığı belirtilmektedir.

Kontrollü ısıtma süreci çok kısa ve ısı değeri çok yüksekse bu durum betonun basınç dayanımını olumsuz yönde etkiler. Bu etki su/çimeto oranına bağlı olarak daha da belirgin bir hal alır. Bu nedenle sıcaklık artışı 22-33°C/saat ölçüsünde olmalıdır (Erdem 2000; Erdoğan ve Erdem 2002).

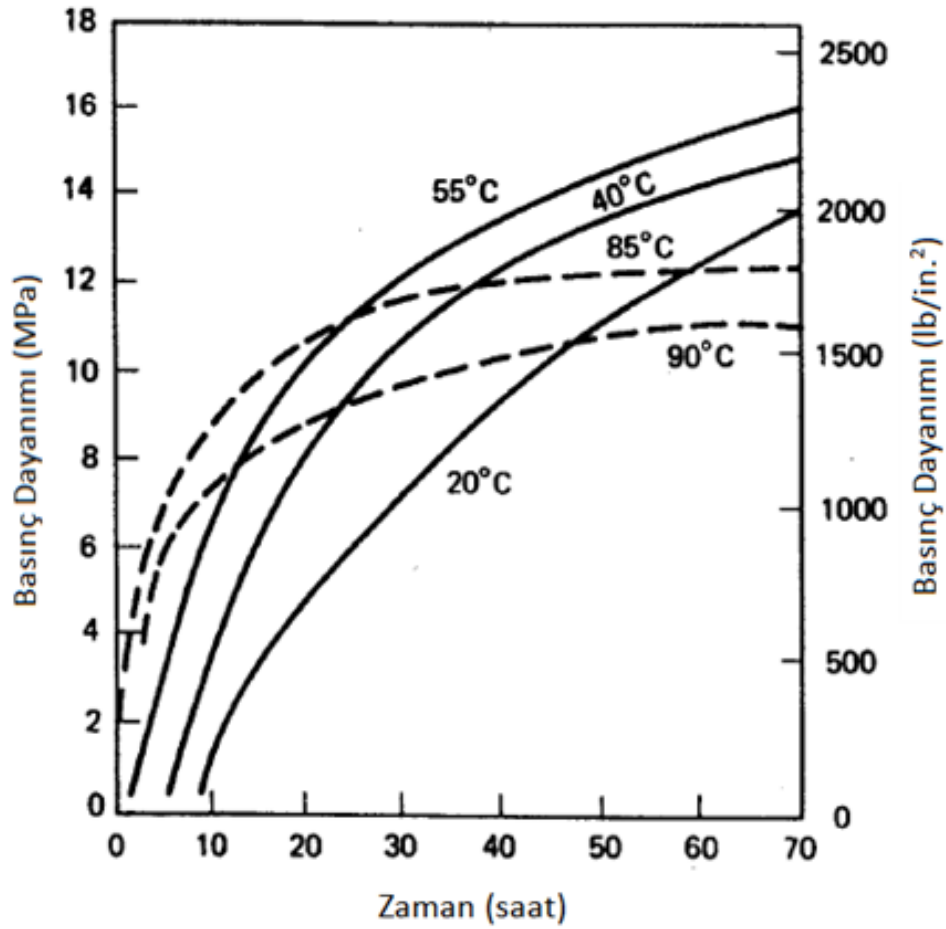
c- Kürleme süreci

Bu süreci belirleyen; ısı emdirme sıcaklığı ve ısı emdirme süresidir. Bu süreç ile amaçlanan beton elemana istenilen dayanımı kazandırabilmektir, TS 3648 (1984)'de ön yapılı beton elemanlar için önerilen 65-85°C arasındaki sıcaklıklardır. Buna karşın ACI Manuel of Concrete Practice'de (1970) ise bu sıcaklıkları 66-82°C olarak verilmiştir. Uzun bir ön dinlendirme yapıldığında ve bunu takiben düşük sıcaklık artış hızı uygulandığında maksimum sıcaklığı 100°C'ye çıkartmak mümkündür (Kotan 2009).

Aynı dayanım, düşük sıcaklıkta uzun bir çevrimle sağlanabileceği gibi, yüksek sıcaklıkta kısa bir çevrimle de elde edilebilir. Olgunluk derecesi kavramı, işlem sıcaklığı ve süresinin seçiminde çok yararlı bir araçtır. Optimum kür sıcaklığı, pratik olarak 80-85°C'nin üstüne çıkmamalıdır (Sağsöz 2007).

Maksimum kür sıcaklığı olarak genellikle 65-85°C arasındaki değerler hedeflenmektedir. Maksimum sıcaklığa eriştikten sonra beton elemanlar bu sabit sıcaklıkta genellikle yaklaşık 10-15 saat bekletilmelidirler (Erdoğan ve Erdem 2002).

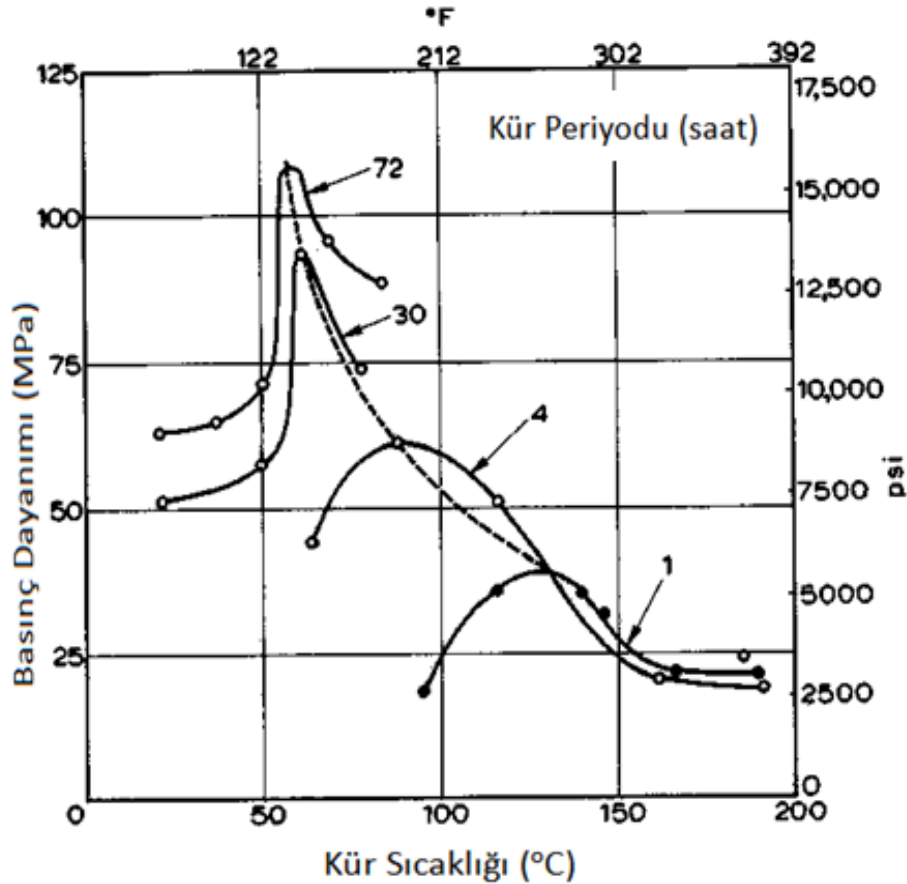
Betonun dayanım kazanma sürecinde yüksek sıcaklıkların erken dayanıma olumlu etkileri gözlenirken, nihai dayanımda yaklaşık %30'a varan dayanım kayıplarına neden olduğu Şekil 2.5'de verilen grafikten görülmektedir. Grafikten çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise; düşük kür sıcaklıklarının erken dayanımda fazla etkili olmadığı, ancak nihai dayanımda önemli derecede artışlar sağladığıdır. Bu durumun betonun hızlandırılmış küründe 85°C ve üzeri kür sıcaklıklarının nihai dayanıma olumsuz etkilerinden dolayı uygun olmadığı söylenebilir (Erdem 2000).



Şekil 2.5. Betonda kür sıcaklığının erken ve nihai dayanıma etkisi

Sağsöz (2007) tarafından bildirildiğine göre, ısı emdirmе süreci zamanı konusunda kesin bir süre olmamakla birlikte toplam kür çevriminin 18 saati geçmemesi kuralı esas alındığında, tatminkar bir ısı emdirmе süreci 3-5 saat arasında olmaktadır. Bu süre su/çimento oranı, çimento dozajı, kütle/yüzey oranı gibi parametrelere göre değişebilir (Neville 1997).

Maksimum kür sıcaklığında, betonun dayanım kazanma hızı ile nihai dayanım arasındaki bir denge söz konusudur. Çünkü yüksek kür sıcaklıklarında daha düşük nihai dayanımlar elde edilmektedir. Sıcaklığın optimum değeri, uygulamaya bağlı olmakla birlikte, daha düşük kür sıcaklıklarının daha uzun bir periyotta uygulanması gerekecek ancak daha iyi nihai dayanımlar elde edilebilecektir. Betonun farklı kür sıcaklıkları ve kür sürelerindeki dayanım gelişimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Erdem 2000).



Şekil 2.6. Betonun kürleme sürecinde sıcaklık–zaman–dayanım ilişkisi

d- Kontrollü soğutma süreci

Sabit maksimum sıcaklığın uygulandığı kürleme süreci sonunda sıcaklığın tıpkı ısıtma aşamasında olduğu gibi dereceli olarak gecikme periyodundaki sıcaklıklara düşürülmesi gerekmektedir. Isıtma sürecinde hızlı sıcaklık artışlarının taze betona olumsuz etkileri olduğu kesin olarak bilinmekle birlikte soğutma hızının etkileri konusunda yeterli bilgi bulunmamaktadır. Ancak ince ve büyük boyutlu öndöküm veya öngerilmeli beton elemanlarda hızlı soğutmanın yüzey çatlaklarına neden olduğu bilinmektedir. Soğutma sürecinde soğutma hızının 22-33°C/saat aralığında tutulması tavsiye edilmektedir (Kotan 2009).

Bu süreç, kür zincirinin belki de en önemli halkasıdır. Isı emdirilmeye son verilip beton elemanın çevre sıcaklığına erişinceye kadar soğumaya bırakıldığı süreçtir. Bu süreci belirleyen en önemli husus soğutma hızıdır. Kalıpların ısıtılması yöntemi ile yapılan kür işleminde, kontrollü soğumayı sağlamak üzere kalıp ya da beton elemanın üzeri örtülerek ani soğuma önlenmelidir (Sağsöz 2007).

Taze betonun hızlı sıcaklık artışına maruz kalmaması gerekliliğini belirten bir çok çalışma vardır. Hızlı soğuma durumunda betonun zarar gördüğünü belirten yayınlanmış bir bilgi yoktur. Fakat yinede soğutma oranını 22-23°C / saat civarında tutmak uygundur (Mindess and Young 1981; Erdem 2000; Erdoğan ve Erdem 2002).

Kür hakkında teknik literatürde yer alan çalışmalardan bazıları tarih sırasına göre düzenlenerek aşağıda özetlenmiştir.

Higginson (1961), yaptığı çalışmada, buhar kürü uygulanan betonlarda genel olarak normal betonlarda bilinen ilişki ve kuralların geçerli olduğunu, buhar kürü işleminde betonun çekirdeğindeki sıcaklığın çimentonun hidrasyon ısısına bağlı olarak, oda sıcaklığının üstüne çıktığını belirtmiştir. Buhar kürü işlemi sırasında, ısıtma arttıkça, betonun sıcaklığı suyun kaynama noktasına yaklaşmadığı sürece, erken dayanımın

artacağını bildiren araştırmacı buhar kürünün başlangıç sıcaklığının yüksek olması halinde beton dayanımının ileri yaşlarda düşük değerler alacağını kaydetmiştir.

Hanson (1963), çimentolarda doğal katkılı puzolan kullanarak ürettiği betonlar üzerinde buhar kürü uyguladığı çalışmada, 5 saatlik ön bekleme süresi ve 22°C/saat lik ısıtma hızı ve maksimum 66°C sıcaklığın, normal betonlar için en iyi atmosferik basınçlı buhar kürü koşulu olduğunu belirtmiştir (Sağsöz 2007).

Keiser (1964), buhar kürüne uygun çimento bileşimini ortaya koymak amacıyla yaptığı çalışmada, C₃A ve C₃S oranları farklı 9 ayrı çimento tipini incelemiştir. 7 cm boyutlu küp harç numuneleri üzerinde, 80-85°C kürleme sıcaklığı ve 4, 6, 12 ve 18 saat süre ile buhar kürü uygulamış, daha sonra numuneleri dayanım testlerine tabi tutmuştur. Yaptığı çalışmada elde ettiği sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Sabit C₃A miktarı için C₃S oranı arttıkça çimentonun buhar kürü altındaki erken dayanımı artmaktadır. Ancak C₃S'in %60'ı geçmesi halinde artış görülmemektedir.
- Sabit C₃S miktarı için C₃A oranı azaldıkça çimentonun ilk dayanımı artmaktadır.
- C₃A/C₃S oranı %15'i geçmedikçe C₃A miktarının %6-8'e çıkmasına izin verilebilir. Ancak C₃A oranı yükseldikçe ısıtma süresi azaltılmalıdır. Üretilen elemanlarda durabilite fonksiyonu aranmamalıdır.
- İnceliğin artmasının yararlı etkisi görülmektedir.
- C₃S oranı düşük çimentolar hiçbir şekilde buhar kürü uygulamalarında kullanılmamalıdır (Kotan 2009).

Reinsdorf (1964), betonu kalıptan alabilmek için, üretilen betonun dayanımı, 28 günlük dayanımının %50'sine, nakil ve montaj için %80'ine ve 28. günde de öngörülen beton sınıfının %100'üne ulaşması gerektiğini belirtmiştir. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulanacak taze beton 1,5 saat ile 5 saat arasında ön beklemede kalmalıdır. Portland çimentosu ile üretilen betonlarda bu sürenin 1,5-3 saat kadar, cüruf çimentosu kullanılması halinde ise 5 saat civarında olabileceğini öne sürmüştür. İlke olarak beton

sıcaklığının 2 saatten önce 50°C'yi, 4 saatten önce de 75°C'yi geçmemesi önerilmiştir. Ön bekleme süresini göz önüne alarak büyük boyutlu ince beton duvar elemanlarında sıcaklık artış hızının 25-30°C/saat, masif elemanlarda ise 20°C/saat olması, düşük su/çimento oranlarında (0,40'ın altı) ise daha hızlı sıcaklık artışlarının kullanılabileceği ve bunun 35°C/saat olması gerektiği belirtilmiştir. Portland çimentosu kullanıldığında buhar kürü sıcaklığının 75°C, cüruf çimentosunda ise 90°C'ye kadar olması halinde buhar kürü sonucu beton özellikleri uygun değerler alabilecektir. 50°C'nin altı ise yararsızdır ve ekonomik değildir. Çimento bileşiminin etkisini ortaya koymak amacıyla yaptığı araştırmada ise uçucu kül ve yüksek fırın cürufu çimentolarda buhar kürünün daha iyi sonuç verdiğini tespit etmiştir (Kotan 2009).

Kilian (1967)'de yaptığı çalışmada, portland tipi çimentoların tüm çeşitlerinin hızlandırılmış kür uygulamalarında kullanılabileceği, kullanılacak çimento tipinin normal kurlenen betonlarda olduğu gibi seçilebileceğini belirtmiştir. Optimum atmosferik buhar kürü çevriminin seçilen çimentonun tipine ve dozajına bağlı olduğunu, karışık çimento hidratasyon reaksiyonlarının sıcaklık, zaman, nem ve diğer kür şartlarından etkilendiği ortaya koymuştur (Sağsöz 2007).

PCI "Öngerilmeli Beton Enstitüsü" (1977)'de, dökümden 1 saat sonra buhar kürü uygulamasının beton basınç dayanımına zarar verebileceği, 10 saatten daha uzun ön beklemenin ise buhar kürünün etkinliğini azaltacağı belirtilmiştir. Ayrıca, ısıtma hızının 22°C/saat ve maksimum sıcaklığın 60-70°C olması tavsiye edilirken, ılımlı avantajların 65°C ve üzerindeki kür sıcaklığında elde edildiği, hiçbir koşulda, 80°C'nin üzerinde kür sıcaklığı uygulanmaması gerektiği önerilmiştir (Kotan 2009).

Al-Rawi (1977), en etkili sonucu veren kür sıcaklığının, çimentonun kimyasal bileşimine bağlı olduğunu ve her tip çimentoya hızlandırılmış kür önerilmediğini belirtmiştir. İnceliğin ve çimento bileşiminin ısıtma sıcaklığının seçimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yaptığı çalışmada;

- İncelik arttıkça ısıtıl işlem sonundaki ilk dayanımın arttığını, buna karşılık 28 ve 180 günlük dayanımların azaldığını ve ileri yaşlarda dayanımlardaki bu azalmanın sıcaklık yükseldikçe belirginleştiğini gözlemiştir.
- Isıtıl işlem sıcaklığının optimum değeri çimentonun bileşimine bağlıdır. Düşük C_3A oranlı çimentolar $90^{\circ}C$ gibi yüksek sıcaklıklarda iyi sonuç verirken orta ve yüksek C_3A oranlı çimentolar $70^{\circ}C$ 'nin üstünü sevmemektedirler. Yüksek sıcaklıkta ısıtıl işlem görecekt çimentolarda C_3S oranının da yüksek olmaması yararlı olacaktır.

Öztekin (1983), yaptığı çalışmada, betonun harç fazı ne kadar zenginse buhar küründen o oranda fazla yararlandığını belirtmektedir. Bu nedenle buhar kürünü etkileyen faktörler arasına, beton bileşimindeki iri agrega/harç oranının da eklenmesi gerektiğini belirtmiştir. Araştırmacı, beton sertleşmesinde hızlı gelişme ve yüksek dayanım sağlayan yüksek çimento dozajı, yüksek incelik, düşük su/çimento oranı ve yüksek komposite gibi faktörlerin buhar kürü sırasında da bu özelliklerini koruduklarını belirtmiştir.

Neville (1995)'e göre, beton içinin bağıl neminin %80 civarında tutulması durumunda hidrasyon devam edecektir. Dış bağıl nemin de bu seviyede tutulması halinde kür işlemine gerek kalmadan beton içinde hidrasyon devam edecektir. Beton ve dış ortam arasında sıcaklık farkının bulunmadığı, rüzgâr ve güneş etkilerinin olmadığı durumlar için geçerli olabilir. Ancak, dünyanın birçok yerinde bağıl nem gün içinde %80'in altındadır. Bundan dolayı nemli havanın yeterli bir kür sağlayabileceği de geçerli değildir.

Balayssac *et al.* (1995), karışımların düzenlenmesinde çimento (çimento içeriği, oranı), kür koşulları, özellikle kür zamanı ile karıştırmanın betonun dayanımı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmanın sonucunda, çimento miktarı ve beton karışımındaki düzenlemelerin kür zamanının seçimine bağlı olduğunu, böylece düşük çimento dozlu bir betonun, çok yüksek çimento dozlu betondan daha fazla kür süresine ihtiyacı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Weber and Reinhardt (1997), çalışmalarında yüksek performanslı betonlara dört farklı kür yöntemi uygulayarak, betonların mekanik özellikleri ve sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısını araştırılmıştır. Araştırmacılar hidratasyonun hızlı bir şekilde geliştiğini, hidrate çimento hamurunun çok yoğun olduğunu ve dışarıdaki suyun hidratasyonu tamamlamak için beton içine ulaşamadığını, bu nedenle, kürün sürekliliğini sağlamak için beton içine agrega hacminin %25 kadar önceden ıslatılmış, su rezervi sağlayan hafif agregalar ilave edilebileceğini belirtmektedirler. Bir su rezervi şeklinde çalışan hafif agregaların, kürün yetersiz olduğu durumlarda yüksek performanslı betonların özelliklerinin gelişiminde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini gözlemlemişlerdir.

Kim *et al.* (1998), belirli sıcaklıklar ile kür sürelerinin etkileri karşılaştırdıkları çalışmalarında, çeşitli kür süreleri için beton dayanımdaki gelişmeleri araştırmışlardır. Bunun için 24 saat aralıklarla dört farklı kür zamanı dikkate alınarak 20°C de referans kür koşullarını, 5°C ve 40°C de iki farklı sıcaklıkta yapılan kürle karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar deney sonuçlarında; erken yaşta yüksek sıcaklıkta küre tabi tutukları beton numunelerinin, erken yaşlardaki dayanımlarının yüksek, buna karşılık ileri yaşlardaki dayanımlarında ise düşüşün olduğunu belirlemişlerdir. Aynı numuneleri, erken yaşta düşük sıcaklıkta küre tabi tutuklarında ise beton numunelerin erken yaşlarda çok düşük dayanımları olduğu halde ileri yaşlardaki dayanımlarının diğerleriyle hemen hemen aynı değere ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Erdem (2000), yaptığı çalışmada iki farklı beton sınıfını temsil eden (C25 ve C40) numuneler hazırlamış ve bu numunelere atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamıştır. Deneyde, iki farklı kür süresi (5 ve 10 saat) ve sabit kürlenme sıcaklığı (80°C) kullanarak, ön bekleme sürelerini değiştirmiş deney sonunda numunelerin dayanımlarını incelemiştir. Çalışmada, ön bekleme süresinin uzamasına paralel olarak betonların dayanımlarının arttığını belirlemiştir.

Erdoğan ve Erdem (2002), buhar kürü uygulamasında beton özelliklerini etkileyen faktörlerden bekleme süresinin beton dayanımına etkisini araştırmak üzere PÇ 42.5 tipte

Çimento ve maksimum tane b y kl   25 mm olan kırmataş agregası kullanılarak 28 günlük dayanımı yaklaşık 40 MPa olacak seviyede beton üretmişlerdir. Numunelere uygulanacak buhar kürü işlemine maksimum sıcaklık 80 C, maksimum sıcaklığın uygulanacağı süre ise 5 saat ve 10 saat olarak seçilmiştir. Kontrol betonunun numuneleri deney gününe kadar 23 C ve %100 rutubet koşullarında kür edilmiş, buhar k r ne tabi tutulan beton numuneler ise buhar kürü devresini takiben, deney gününe kadar 23 C ve %100 rutubet koşullarında k r u ulandıktan sonra sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Buhar kürü uygulanan betonların ilk zamanlarındaki dayanımı, normal kür işlemi gören betonlarınkinden daha yüksek, buhar k r ne tabi tutulan 3, 7, 28 ve 90 günlük beton numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımlarının, aynı yaşlardaki kontrol betonlarının basınç dayanımlarından daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Buhar kürü devresinde uygulanan 5 saatlik ve 10 saatlik maksimum sıcaklık süresinin etkileri karşılaştırıldığında, aynı bekleme süresi ve aynı beton yaşı koşullarında 10 saatlik maksimum sıcaklık süresi sonunda elde edilen basınç dayanımlarının, 5 saatlik maksimum sıcaklık süresi sonunda elde edilen dayanımlardan daha yüksek olduğu belirlenmiş, buhar kürü devresinde maksimum sıcaklığın uygulandığı süre arttıka, beton basınç dayanımında da artma olacağı belirtilmiştir.

Bekleme süresinin priz başlama süresine eşit olması kabul edilerek buhar k r ne tabi tutulan betonlarda elde edilen basınç dayanımı değerleri, bekleme süresinin priz başlama s resinden daha kısa kabul edilerek buhar k r ne tabi tutulan betonlarda elde edilen basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve bekleme süresinin, buhar kürü sonucunda elde edilecek basınç dayanımlarına doğrudan etkisi olduğu belirtilerek, bu sürenin taze betonun priz başlama s resinden daha kısa tutulmaması tavsiye edilmiştir.

Erdoğan (2003)'e göre, çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan hidratasyon ürünleri (çimento jelleri), çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlamakta, çimento hamurundaki kapiler boşluk oranını azaltmaktadır. Çimento hamurunun (ve betonun) kazanacağı dayanımın hızı ve miktarı, hidratasyonun ne ölçüde gerçekleşmiş olduğuna bağlıdır. Hidratasyon olayının gerçekleşebilmesi ve normal hızda devam edebilmesi için, betondaki çimento hamurunun içerisinde yer alan kapiler boşluklarda yeterli miktarda suyun bulunması ve beton sıcaklığının çok düşük derecelerde olmaması gerekmektedir. Yerine yerleştirilen taze betonun içerisindeki suyun azalmasının en önemli nedeni buharlaşmadır. Buharlaşma hızı havanın bağıl nemine, hava sıcaklığına, beton sıcaklığına ve ortamdaki rüzgar hızına bağlıdır. Havadaki bağıl nemin azalması, betonun içerisindeki suyun daha çok buharlaşmasına, hava sıcaklığının yüksek olması, betonun sıcaklığı ile birlikte buharlaşmanın artmasına ve rüzgar hızının yüksek olması da betondaki suyun daha çok buharlaşmasına neden olmaktadır.

Türkel and Alabaş (2004), iki farklı çimento (PÇ 42,5 ve PKÇ/A 42,5) tipi ve 0,44 sabit su/çimento oranı ile hazırlanmış numunelere; 65°C ve 85°C'lerde 5 farklı kürleme süreci (4, 8, 16, 24 ve 36 saat) için atmosferik basınçlı buhar kürü uygulayarak basınç dayanımlarındaki değişimleri incelenmişlerdir. Erken basınç dayanımında PÇ 42,5 tipi çimento için 65°C'de 31 saat süreyle buhar kürü uygulamasında optimum sonuçlar alınmıştır. Aynı performans PKÇ/A 42,5 tipi çimentonun kullanıldığı betonlarda 85°C'de 29 saat süreyle buhar kürü uygulamasından elde edilmiştir. Sonuç olarak, her iki çimento tiplerinde ilk dayanımların yüksek olduğu gözlenmekle birlikte, buhar kürü uygulamasının PKÇ/A 42,5 çimento tipinde daha etkili olduğu ve öndökümlü beton üretiminde PÇ 42,5 çimento tipi yerine PKÇ/A 42,5 çimento tipinin kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca erken yüksek dayanımın istendiği durumlarda PKÇ/A 42,5 çimento tipi çimentonun kullanıldığı betonlar için 85°C kür sıcaklığında buhar kürü uygulanabileceği belirtilmiştir.

Karahan vd. (2005), iki farklı çimento ile 250, 300, 350 kg/m³ dozajlı, çökme değeri 10-15 cm ve su/çimento oranları ise 0,75, 0,62, ve 0,53 olan betonlar üretmiş, ürettikleri bu

betonları farklı kür koşullarında 2, 7, 28, 180, 360 gün beklettikten sonra standart basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Böylece suda kür ile havada kalma arasındaki, kürün betonun basınç dayanımına olan etkisinin tespit edilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, ürettikleri bütün beton numunelerinin basınç dayanımlarının zaman içinde arttığı, her iki çimentoda da su/çimento oranı arttıkça dayanımlarda azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Her iki çimento ile üretilen beton numunelerinin dayanımları arasındaki farkın 28. günde yaklaşık %20 civarında olduğu belirlenmiş ve bu farkın hem 180 gün hem de 360 gün sonunda yaklaşık olarak aynı kaldığı tespit edilmiştir.

Avar (2006), yaptığı tez çalışmasında yüksek dayanımlı karma lifli betonların mekanik davranışına buhar kürünün etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada iki farklı kür rejimi uygulayan araştırmacı, ilk olarak numunelerin 20°C’de kirece doygun kür havuzunda deney tarihine kadar tutulmasını içeren standart su kürü yöntemini, ikinci olarak numunelere 3 gün boyunca 90°C’de buhar kürü ve daha sonra aynı numunelere deney gününe kadar tekrar standart su kürü yöntemini uygulamıştır. Yaptığı çalışmanın silindir basınç dayanımlarının değerlendirmesinde buhar kürü uygulanmasının, tüm numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar artış meydana getirdiğini belirtmiştir.

Sağsöz (2007), doğal perlit agregasını kullanarak iki farklı dozajda ürettiği beton numunelerin hava, su ve atmosferik buhar kürü uygulamalarında, mekanik özelliklerini araştırmıştır. Araştırmada üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı sürede buhar kürü uygulanan numuneler, 28 gün su kürü uygulanan kontrol gurubu numuneleriyle karşılaştırılmıştır. 6, 12, 24 saat süreyle farklı sıcaklıklarda kür edilen, iki farklı dozajda (350-450 kg/m³) üretilen numuneler için şu sonuçlar bulunmuştur.

- 65°C buhar kürüne tabi tutulmuş 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ dozajla ürettiği numuneler sırasıyla, kontrol gurubunun %61, %69, %101 ve %64, %88, %101’ine denk gelen basınç dayanımları elde etmiştir.
- 75°C buhar kürüne tabi tutulmuş 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ dozajla ürettiği numuneler sırasıyla, kontrol gurubunun %80, %84, %88 ve %88, %97, %102 ’sine denk gelen basınç dayanımları elde etmiştir.

- 85°C buhar kürüne tabi tutulmuş 350 kg/m³ ve 450 kg/m³ dozajla ürettiği numuneler sırasıyla, kontrol gurubunun %80, %84, %88 ve %88, %97, %102'sine denk gelen basınç dayanımları elde etmiştir.

Araştırmacı, elde ettiği bu sonuçlara dayanarak ürettiği her iki dozajdaki numuneler içinde atmosferik buhar kürü süresinin artması durumunda betonların basınç dayanımlarında arttığını belirtmiştir.

Kotan (2009), yaptığı tez çalışmasında, Pasinler Demirdöven pomzasını kullanarak ürettiği hafif betonların mekanik özelliklerine atmosferik basınçlı buhar kürünün etkisini araştırmıştır. Yapılan bu çalışmada çalışmada dozaj sabit (400kg/m³) tutulmuş, buhar kürü uygulamasında üç farklı sıcaklık (60, 70, 80°C), üç farklı ön bekleme (3, 4, 5 saat) ve üç farklı kürleme süresi (8, 12, 16 saat) seçilmiştir.

Çalışmada, standart su kürü uygulanan numunelerin ortalama basınç dayanımı 23,8 MPa olarak bulunmuştur. Buhar kürü işlemi sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerlerininse, 60°C kür sıcaklığında; 15,2-20,5 MPa, 70°C kür sıcaklığında; 15,5-21,6 MPa ve 80°C kür sıcaklığında; 15,7-22,4 MPa aralıklarında değiştiği görülmektedir.

Araştırmacı elde ettiği bu sonuçlara dayanarak, uygulanan farklı ön bekleme süresi, kürleme süresi ve kür sıcaklıklarındaki artışların betonun dayanım gelişiminde yararlı olduğunu belirtmektedir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada farklı oranlarda silis dumanı (%5, %10, %15) ve uçucu kül (%25, %40, %55) ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek KYB'ler üretilmiş ve betonlara katılan mineral katkıların farklı kür koşullarında basınç dayanımlarına etkileri incelenmiştir.

Çalışma için yapılan deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

Çalışmanın bu bölümünde, KYB üretiminde kullanılan agrega, çimento, silis dumanı, uçucu kül, su azaltıcı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile deneylerde kullanılan alet ve cihazların genel özellikleri açıklanacaktır.

3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

3.1.1.a. Çimento

Çimento, ilkel maddeleri kalker ve kil olan mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, biriket vb.) yapıştırmada kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir (Gündeşli 2008). Kalkerli ve killi hammaddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucunda elde edilen klinkere alçı taşı ilave edilip, öğütülmesiyle elde edilen çimentonun ana bileşenlerini kalsiyum silikatlar (C_3S , C_2S) ve kalsiyum alüminatlar (C_3A , C_4AF) oluşturur.

EFNARC Komitesince (2002), kendiliğinden yerleşen betonda çimento dozajının belirlenmesindeki temel kriter dayanım sınıfıdır. Puzolanik filler kullanılması halinde, göreceli olarak daha düşük çimento dozajları yeterli olabildiği, dayanım ve dayanıklılık açısından çimento dozajının $350-450 \text{ kg/m}^3$ arasında seçilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir. Dozajın 500 kg/m^3 'ün üzerinde olması ise rötreyi artıracığı için önerilmemektedir. Ayrıca KYB'lerde kullanılacak çimentonun C_3A oranının %10'un üzerinde olması tavsiye edilmektedir.

Betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan çimento, buhar kürü uygulamasında da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Buhar kürü yöntemiyle sağlanan sıcaklık artışının hızlandırdığı reaksiyonlar çimentonun hidratasyon reaksiyonlarıdır. Hidratasyon reaksiyonlarının normal sıcaklıktaki gelişimi ve oluşan hidratasyon ürünleri nasıl çimento tipine, bileşimine ve özelliklerine bağlı ise buhar kürü altındaki davranışı da öncelikle aynı faktörlere bağlıdır. Buhar kürü altında betonun davranışını etkileyen çimento parametreleri, portland çimentoları için bileşim ve incelik, katkı çimentolar için ise bu parametrelere ek olarak kullanılan katkı maddesinin türü ve miktarı olmaktadır (Sağsöz 2007).

Postacıoğlu (1986), çalışmasında buhar kürü uygulanacak çimentoların özelliklerinden;

- C_3S miktarının %55-60 arasında
- C_3S/C_2S oranının 3 den büyük
- C_3A miktarının %10'u geçmemesi
- C_4AF miktarının %5-15 arasında
- SO_3 miktarının %3,5 den küçük
- Blaine özgül alanının en az $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ olmasının, istenilen hedeflere ulaşmak için faydalı olacağını belirtmektedir.

Bu çalışmada TS EN 197-1 standartlarına uygun, Aşkale Çimento Fabrikasında üretilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal analizi Çizelge 3.1’de, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal analizi

Kimyasal Analizler %	
SiO ₂	18,73
Al ₂ O ₃	4,56
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	63,91
MgO	2,08
SO ₃	2,90
Kızdırma kaybı	3,36
K ₂ O	0,62
Na ₂ O	0,29
(Na ₂ O); Na ₂ O+0,658* K ₂ O	0,70
Cl	0,0185
Ölçülemeyen	0,46
Toplam	100
CaO (sebest kireç)	0,56
Çözünmeyen kalıntı	0,85

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve mekanik testler	
İncelik 45 ^u m elek üstü %	8,98
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,14
Özgül yüzey (cm ² /g)	3807
Piriz başı (Saat-dakika)	2 sa-21 dk
Piriz sonu (Saat-dakika)	2 sa-55 dk
Hacim genleşmesi (mm)	1
Basınç dayanımı 2 Gün (MPa)	27,7
Basınç dayanımı 28 Gün (MPa)	57,2
Su ihtiyacı (%)	28,6

3.1.1.b. İnce taneli malzemeler

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkıların kullanımı KYB'nin ayrışma direncinde bir miktar düşüşe yol açmaktadır. Bu nedenle genellikle karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla meydana gelebilecek ayrışmayı azaltmak için ince agrega ve/veya bağlayıcı miktarını artırma yoluna gidilmektedir. Başka bir çözüm yolu olarak süperakışkanlaştırıcı katkılarla birlikte, viskozite düzenleyici katkıların kullanımı tercih edilmektedir. KYB üretiminde kullanılan kimyasal katkı ve bağlayıcı miktarının geleneksel betonlara göre daha fazla olması nedeniyle yüksek maliyetlerle karşılaşilmektedir. Yüksek maliyeti azaltma ve kendiliğinden yerleşen beton özelliklerini elde etmenin olası bir yolu ise beton karışımlarında ilave mineral katkı kullanımıdır. KYB'de viskozite arttırıcı toz malzeme olarak uçucu kül, taş tozu, öğütülmüş yüksek fırın curufu, silis dumanı kullanılabilir (Khayat and Guizani 1997; Felekoğlu vd. 2003). Bu konu ile ilgili yapılan birçok araştırmada, yüksek oranda (%70'e varan) uçucu kül kullanılarak KYB üretiminin gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir (Eroğlu vd. 2007; Bouzoubaa and Lachemi 2001; Şahmaran vd. 2007).

İnce taneli malzemeler betonda puzolanik etki ve filler etkisi sağlamak için kullanılırlar. Tek başına bağlayıcılık özeliği olmayan ancak ince öğütölüp normal sıcaklıktaki nemli ortamda kalsiyum hidroksitle kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcılık özeliği gösteren malzeme “puzolanik malzeme” olarak tanımlanır (ASTM C618-85).

Erdoğan S.T ve Erdoğan T.Y. (2007), beton içerisinde kullanılan, ince taneli puzolanik katkı maddelerinin;

- İşlenebilmeyi artırdığını,
- Terlemeyi ve segregasyonu azalttığını,
- Hidratasyon ısısının hızını ve miktarını azalttığını,
- Su geçirgenliği azalttığını,
- Alkali-agrega reaksiyonunu azalttığını,
- Sülfat hücumlarına karşı dayanıklılığı artırdığını,
- Nihai basınç dayanımının yeterince yüksek olmasını sağladığını,
- Ekonomiklik oluşturduğunu belirtmektedirler.

Her yıl termik santrallerde elektrik üretim amacıyla kömür yakılması sonucu, milyonlarca ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Bu külün ancak %20'si değerlendirilebilmektedir. Arta kalanlar ise karasal dolgu şeklinde biriktirilmektedir (Şengöl 2002). Termik santrallerden kaynaklanan uçucu küllerin depolanması oldukça büyük bir sorundur (Tuna ve Girgin 2005). Bu sebeple endüstriyel atıkların betonda mineral katkı olarak kullanılması önemli çevresel katkı sağlamaktadır.

Çalışmada üretilen KYB'lerde ince taneli malzeme olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır.

Uçucu kül

Birçok termik santralde, elektrik üretimi için gerekli enerjiyi sağlayabilmek amacıyla, yakıt olarak pulvarize kömür kullanılmaktadır. Pulvarize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan küllerin bir kısmı ocak tabanında birikirken yaklaşık %75-80'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenmektedir. Bu küllere “uçucu kül” ya da “pulverize yakıt külü” denilmektedir (Erdoğan, 2004).

Tane boyutları 0,5-150 µm olan, kısmen veya tamamen küresel şekilli küllerin bacadan çıkarak çevreye yayılmasını önlemek gerekmektedir. TS EN 197-1 standardında belirtilen tipteki uçucu küller, elektrostatik veya mekanik olarak çöktürme ile elde edilmektedirler. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a- F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda bu küllerde reaktif kireç (CaO) miktarı %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b- C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO %10'dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Genellikle, çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması betonun su ihtiyacını, uçucu külsüz olarak üretilecek betona göre aynı slump değeri için azaltmaktadır. Uçucu külün su ihtiyacını azaltmaktaki esas rolü inceliğine dayanmaktadır. Normal şartlarda inceliğin artması ile su ihtiyacı artacaktır. Fakat uçucu külün küresel şekillenmiş olan taneleri içsel sürtünmeyi azalttığından, karışımın su ihtiyacında da azalma olmaktadır (Gündeşli 2008).

Kandemir (2005)'e göre, uçucu külün KYB üzerine sağladığı olumlu katkılar şöyle sıralanabilir:

- Hidratasyon ürünlerini artırır ve betonun porozitesini azaltır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artar (Jianxiong vd. 1999).
- Hidratasyon hızını ve ısınısını düşürür. Sıcaklık yükselmesinden doğan su kaybını ve çatlakları azaltır. Fakat priz alma süresini geciktirmesi erken dayanımı olumsuz etkiler (Bouzoubaa and Lachemi 2001)
- Normal betona kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli çimento miktarını azaltarak ekonomik fayda sağlar. Aynı zamanda atık bir ürün değerlendirildiği için ilave ekonomik ve çevresel yararları da hesaba katılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde Bursa Orhaneli Termik Santralinden temin edilen TS EN 197-1, ASTM C 618 ve TS 639 standartlarındaki koşullara uygun olan F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Orhaneli uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal analiz	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	48,93
Al ₂ O ₃	24,63
Fe ₂ O ₃	7,59
S+A+F	81,15
CaO	9,06
MgO	2,28
SO ₃	2,48
K ₂ O	2,51
Na ₂ O	0,35
Kızdırma kaybı	1,69
CI	0,005

Silis dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 µm'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO₂) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85-98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Silis dumanı aşırı ince parçalara ve yüksek reaktiviteye sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip (≥100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanıma sahip beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır (Güneşli 2008).

Beton içerisindeki malzemelerin çimento ile bağlanabilmesi için tüm yüzeyinin ince bir su filmi ile çevrelenmiş olması gerekir. Kullanılan malzemelerin tane boyutu

küçüldükçe toplam yüzeyi artacak, dolayısı ile betonun su ihtiyacını da arttıracaktır. Yüksek incelige sahip silis dumanı çok yüksek su ihtiyacına sahiptir. Fazla su, su/çimento oranını yükselteceğinden silis dumanı ile beton üretebilmek için nitelikli süperakışkanlaştırıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca silis dumanının ortamda bulunması beton içinde bulunan alkalileri hızla bağlamasından dolayı aktif silis içeren agregalarla muhtemel bir alkali-silika reaksiyonunu engelleyebilmektedir (Dinç 2007).

Silis dumanı katkısı, diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamalarının yanı sıra, agrega-hamur ara yüzey bölgesini kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırmaları. Buna karşın belli bir işlenebilirlik için su ihtiyacı artmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tipi ve miktarlarından etkilenecektir. Bazı araştırmacılara göre silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega hamur ara yüzeyini kuvvetlendirmesinden dolayıdır. Diğer taraftan en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da öne sürülmektedir (Demir vd. 2009).

Bu çalışmada, Antalya Electrometalorji işletmesinde Silico Ferrokrom üretimi yapan tesisten elde edilen silis dumanı kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal analizi Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Silis dumanının kimyasal analizi

Kimyasal analiz	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	93,4
Al ₂ O ₃	0,30
Fe ₂ O ₃	0,35
CaO	0,38
MgO	0,85
C	-
S	-
Kızdırma kaybı	4,45

3.1.1.c. Agregat

Betonun ana iskeletini oluşturan, toplam hacmin yaklaşık % 60-80 oranlarında yer işgal eden mineral kökenli, taneli malzeme, agregat olarak isimlendirilir. Agregatlar elde edilmesine göre doğal ve yapay agregat olarak ikiye ayrılır. Agregat; suyun etkisi altında yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile birlikte zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir.

Yıldız (2006), agregalarda aranan en önemli özellikleri aşağıdaki şekilde belirtmiştir:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmalı,
- Zayıf taneler içermemeli (deniz kabuğu, odun, kömür vb.)
- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmalı,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeli,
- Yassı ve uzun taneler içermemeli,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeli.
- Agregada silt ve kil olmamalıdır.

Diğer taraftan agrega tane çapının (D_{max}) büyük olması, genel olarak betonda iri tanelerin fazla bulunduğunu gösterir. Bu durum agrega için gerekli su miktarının azalmasına neden olur. Tane çapı büyük olan agregalar kullanılarak üretilen betonların kompasitesi büyük olur ve ayrıca bunlar az miktarda su ihtiyacı gösterirler. Böylece agrega tane çapı büyük olan betonların mukavemetinde önemli bir artış sağlanabilir. Yalnız mukavemetin yüksek olmasını sağlamak için agrega çapının arttırılması yönünde fazla ilerlemek, bu karakteristiğin işlenebilme özelliğini azaltması bakımından elverişli değildir (Postacıoğlu 1987).

Ouchi (1999), kendiliğinden yerleşen betonda kullanılan agregaların en büyük tane çapı için farklı görüşlerin mevcut olduğunu, genel görüşün ise, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneği de dikkate alındığında agrega en büyük tane çapının azaltılmasının gerektiğini, burada üst sınırın 16-20 mm arasında olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca kütle betonu gibi özel durumlarda viskozite arttırıcı katkı kullanımıyla ek tedbirler alınarak en büyük agrega çapı 40 mm'ye kadar çıkan kendiliğinden yerleşen beton tasarımları kullanıldığında belirtmiştir. (Kurt 2009).

KYB üretiminde kullanılacak agrega mineralojik köken açısından normal betonda kullanılabilecek özellikte olmalıdır. Kırma kireçtaşı iri agrega olarak kullanılabilir. Doğal kum, kırma kuma göre işlenebilirlik açısından avantajlıdır. Aynı şekilde iri agrega olarak dere çakılı kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı arttıracaktır (EFNARC 2002).

KYB üretiminde genel olarak kübik veya küre şekilli agregalar tercih edilmelidir. Uzun silindir ve yassı disk şekilli taneler KYB'nin işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden bunların miktarının sınırlandırılmasında yarar vardır (Khurana and Topçu, 2002).

Sari at al. (1999)'a göre kendiliğinden yerleşen betonda en büyük agrega çapı 5 - 20 mm arasında değişir fakat V hunisinde bloke olma tehlikesini engellemek için 15 mm seçilmesi en uygundur.

Felekoğlu (2003), yaptığı çalışmasında KYB üretiminde, kum/iri agrega oranı için en uygun değer 1.53 olduğunu tespit etmiştir. Bu değer altındaki oranlarda taze betonun bloke olma riskinin arttığını, üstündeki oranlarda ise viskozitenin aşırı arttığını belirlemiştir.

Agrega, cinsi ve ısı özellikleri ile buhar kürü uygulamasını etkilemektedir. Agrega ile çimentonun ısı iletkenlik ve ısı genleşme katsayıları arasındaki fark arttıkça, agregaçimento hamuru ara yüzey bölgesinde ısı gerilmeler artmakta, esasen zayıf olan bu aderans bölgelerinde mikro çatlaklar oluşabilmektedir (Sağsöz 2007).

Silisi zengin agregalarla üretilen betonlarda, 80-85°C gibi yüksek sıcaklıklarda buhar kürü uygun iken, kalker agregalı betonlarda ise 40-50°C gibi düşük sıcaklıkların üstüne çıkılması pek yarar sağlamamaktadır (ACI 517 1970).

Bu çalışmada, Erzurum ili sınırları içerisindeki Horasan mevkiinden temin edilen doğal kum ve çakıl kullanılmıştır. Kullanılan agrega dere malzemesi olup max. agrega tane çapı 16 mm dir. Yıkanmış olarak temin edilen malzeme üzerinde yapılan agrega deneylerinin sonuçları ve hazırlanan karışımın granülometri eğrisi Araştırma Bulguları Bölümünde verilmiştir.

3.1.1.d. Karışım suyu

Beton karışımında kullanılan çimentonun bağlayıcılık özelliği, büyük ölçüde çimentonun kalsiyum silikat bileşenleri ile karışım suyu arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jel ürünlerinin oluşumuna dayanmaktadır. Karışımında kullanılacak suyun içerisinde fazla miktarda bulunabilecek

yabancı maddeler hidratasyon ürünlerinin oluşum hızını ve miktarını etkileyebileceğinden, çimento hamurunun katılaşma süresini ve bağlayıcılık özelliğini de etkileyeceklerdir (Erdoğan 1995).

İçilebilir nitelikteki suyun beton üretiminde kullanımının uygun olduğu kabul edildiğinden, çalışmada Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır.

3.1.1.e. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Kimya alanındaki gelişmeler ve polimer teknolojisinin ilerlemesi, 1980'li yılların ortalarından itibaren çok etkili akışkanlaştırıcıların keşfine sebep olmuştur. Yüksek oranda su kesme yeteneğine sahip bu akışkanlaştırıcılar aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Yeni nesil akışkanlaştırıcıların sağladığı bu etki, bilim adamlarını taze betonun yerleştirilmesi sırasında gereken sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmak için araştırma yapmaya yöneltmiştir. Böylece kendiliğinden yerleşen beton kavramı ortaya çıkmıştır (Felekoğlu 2003).

Geleneksel süperakışkanlaştırıcılar, sülfone naftalin formaldehit veya sülfone melamin formaldehit esaslı iken, yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılar ana zincirinde karboksilik grubunun bulunduğu ve polietilen glikol grubunun yan zincir olarak bağlandığı kopolimerlerdir (Houst *et al.* 1999; Sağlam ve Özkul 2006).

Hollingsworth (2002), KYB üretiminde yüksek deformasyon yeteneği ve ayrışmaya karşı yüksek direnç sağlamak gibi birbirinin tersi iki koşul bir arada sağlanması gerektiğini, bunun da ancak etkili bir akışkanlaştırıcı kimyasal kullanımıyla mümkün olabileceğini belirtmektedir. KYB tasarımında akışkanlaştırıcılardan beklenenlerin üç grupta toplanabileceğini vurgulamıştır (Kurt 2009).

1. Su kesmede ve akışkanlık sağlamada etkinlik
2. Diğer kimyasal katkılarla uyumluluk, priz ayarlayıcı özellikleri sağlama
3. İşlenebilirlik ihtiyacını sağlama (istenilen sürede akışkanlığını koruma)

Gürol (1999), polikarboksilat bazlı katkıların çimentoya etkisini şöyle açıklamaktadır; Katkı, dispersiyon etkisi ile topaklaşmayı önler, hidrasyona giren çimento miktarı artar, topaklar arasına hapsolma potansiyeli olan su molekülleri serbest kalarak işlenebilirliği artırır ve hidrasyona katılır.

Çimento miktarı arttıkça plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi artacağından yüksek çimento dozajlarında akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı artar (Roshavelov, 2002).

KYB üretimi için yapılan deneysel çalışmalarda, BASF firmasınca üretilen TS EN 934-2 ve ASTM C 494 standartlarına uygun polikarboksilik eter esaslı klor içermeyen yüksek oranda su azaltıcı özelliğine sahip yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi Glenium C303 kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının üretici firma tarafından beyan edilen (+20°C, %50 bağıl nem koşullarında) teknik özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Glenium C303’ün teknik özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Renk	Açık yeşil
Yoğunluk	1,023-1,063 kg/litre
Klor içeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-12)	< 3

3.1.1.f. Diğer malzemeler

Beton numunelerinin kuru için kirece doymun su ortamının sağlanmasında sndrlmş torba kireç ve numunelerin kalıplardan kolayca çıkmasını sağlamak için kalıplarda ince motor yağı kullanılmıştır.

3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler

3.1.2.a. Elekler

Deneylerde TS1227 ISO 3310-1 (2007)'ye uygun toplama kabı ile TS1226 ISO 3310-2 (2009)'ya uygun 0,25 mm, 0,50 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

3.1.2.b. Betonyer

Deneyisel çalışmalardaki numune betonlarının karılması işleminde, ELE firmasının ürettiği 135° aı ile manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuar tipi betonyer kullanılmıştır (şekil 3.1).



şekil 3.1. Betonyer

3.1.2.c. Kalıplar

Deneysel alışmalar kapsamında sertleştirilmiş plastikten imal edilmiş, 15*15*15 cm boyutlarında kp kalıplar kullanılmıştır (şekil 3.2).



şekil 3.2. Kalıplar

3.1.2.d. Pres

Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımını belirlemek amacıyla, kapasitesi 300 ton olan, ELE marka AUTOTEST 3000 modeli hidrolik pres kullanılmıştır (şekil 3.3).



şekil 3.3. Pres

3.1.2.e. Kür uygulamasında kullanılan aletler

Su kürü uygulamasında kullanılan aletler

Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doymun durumdaki suyu $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulabilen, çevrim pompalı tam dijital su kürü havuzu kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Su kürü havuzu

Buhar kürü uygulamasında kullanılan aletler

Hazırlanan KYB numunelerinin atmosferik basınçlı buhar kürü çevriminde, Ankatest firması tarafından yapılmış olan ön bekleme, kontrollü ısıtma, ısı emdirme ve kontrollü soğutma sürelerini otomatik olarak ayarlayabilen buhar kürü kabini kullanılmıştır (Şekil 3.5).

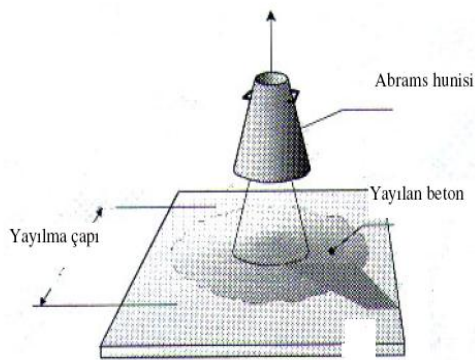


Şekil 3.5. Buhar kürü kabini

3.1.2.f. KYB deneylerinde kullanılan aletler

Çökme - yayılma deneyi aleti

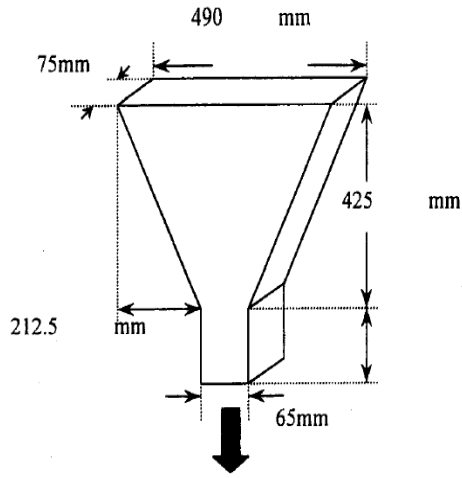
Yapılan deneysel çalışmalarda, üzerinde 20 cm ve 50 cm çaplı daireler çizili olan çelikten yapılmış, 800 x 800 mm boyutlarında bir tabla ve bilinen Abrams hunisi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Çökme-yayılma deney aleti

V Hunisi deneyi aleti

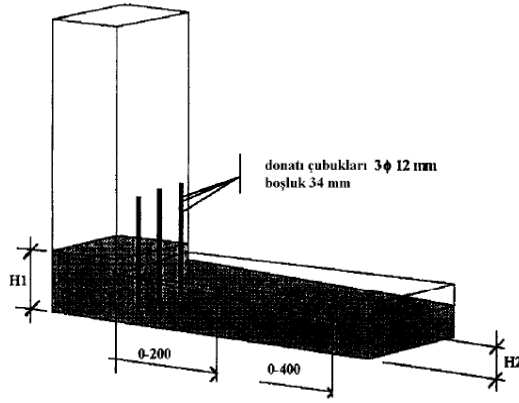
Yapılan deneysel çalışmalarda, EFNARC (2002) standardına uyumlu 10 litre kapasiteli ölçüleri şekil üzerinde belirtilmiş olan çelikten yapılmış olan V şekilli huni kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. V Hunisi deney aleti

L Kutusu deneyi aleti

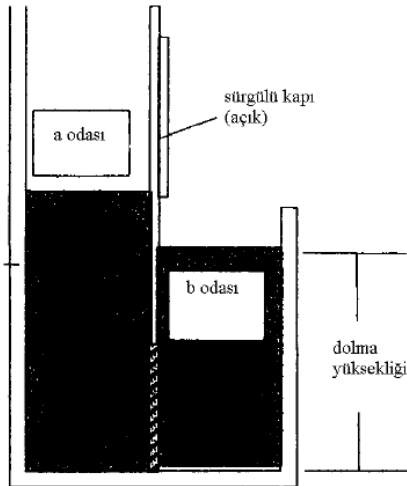
Yapılan çalışmalarda, EFNARC (2002) standardına uyumlu L şeklinde çelikten yapılmış, kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel oluşturacak demir çubuklar bulunan deney aleti kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. L Kutusu deney aleti

U Kutusu deneyi aleti

Yapılan çalışmalarda, EFNARC (2002) standardına uyumlu U şeklinde, alt ortasında sürgülü bir kapak olan ve aynı zamanda engel oluşturacak demir çubuklar bulunan çelikten yapılmış deney aleti kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. U Kutusu deney aleti

3.2. Yöntem

Bu bölümde, agrega özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan yöntemler, KYB üretiminde karışım seçeneklerinin belirlenmesi, taze beton numunelerine uygulanan deney yöntemleri, kür koşulları ve sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneylerde kullanılmak üzere Erzurum Beton A.Ş.'den temin edilerek labaratuara getirilen yıkanmış ve elenmiş dere agregaları üzerinde yapılacak agrega deneyleri için numune alınması işleminde, TS EN 1097-3 (1999)'da belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılmıştır. Bu metot gereği, laboratuardaki malzemenin tümünü temsil etmesi için yığının her tarafından alınan örnekler düz bir zemin üzerine her tarafı eşit ve çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra bu dairesel yığın kürekle dörde bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar çeyrekleme işlemine devam edilmiştir.

Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Agreganın tane büyüklüğü dağılımı, TS 3530 EN933-1/A1 (2007)'ye uygun olarak belirlenmiştir. Bu standarda göre yapılan deneyde yıkanmış ve kurutulmuş malzeme elek takımına dökülmüştür. Elek takımı, TS EN 1227 ISO 3310-1 (2007) ve TS EN 1227 ISO 3310-2 (2009)'ye uygun toplama kabı, 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm 4 mm, 8 mm, 16 mm göz açıklıklı kare delikli düzenlenmiş elekler, tava ve kapaktan ibarettir.

Elek takımı düzenlenirken yukarıdan aşağıya elek göz açıklıkları düzenli bir biçimde azalacak şekilde birbirine geçirilmiştir. Tüm ince tanelerin yıkama ile

uzaklaştırmadığı bilindiğinden, 63 µm göz açıklıklı deney eleği de elek takımına ilave edilmiştir. Malzeme kaybına meydan vermemek için elek takımı tava ve kapak kullanılarak makine ile sarsılmıştır. Daha sonra sırayla büyük göz açıklıklı elekten başlamak üzere altına tava ve üzerine kapak konularak her bir elek takımından ayrılarak, elle tek tek eleme işlemine devam edilmiştir. Her eleği geçen malzeme elek setinde bulunan bir sonraki elek üzerine konularak işleme devam edilmiştir. Standarda göre eleme işlemi esnasında, bir dakika süre içerisinde elek üstü malzemede kütlece %1'den daha fazla değişiklik olmuyorsa eleme işleminin tamamlandığı kabul edilebilir. En büyük göz açıklığına sahip elek üzerinde kalan kısım tartılıp, kütlesi %1 hassasiyette R_1 olarak kayıt edilmiştir. Altındaki elekte kalan kısım için aynı işleme devam edilmiş ve kütlesi R_2 olarak kayıt edilmiştir. Elek takımındaki bütün eleklerde aynı işleme devam edilerek her bir elek üzerinde kalan numunelerin kütlesi $R_3, R_4 \dots R_i$ kayıt altına alınarak tartma işlemine devam edilmiştir. Tavada kalan malzemede tartılıp kütlesi P olarak kayıt edilmiştir. Her bir elek fraksiyonunun kütlesi (R_i), orijinal kuru kütlenin (M_1) yüzdesi olarak hesaplanmıştır. 63 µm kadar her bir elekten geçen orijinal kütlenin kümülatif yüzdesi hesaplanmıştır.

Yukarıda anlatıldığı şekilde standarda uygun olarak iki farklı tane sınıfına ayrılmış olan agregalar üzerinde yapılan elek analizi deneylerinin sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

Birim ağırlık deneyleri TS 3529 (1980)'a göre yapılmıştır. Standartta belirtildiği üzere maksimum agrega çapına bağlı olarak, iç çapı ile yüksekliği 155 mm ve hacmi yaklaşık 3 dm^3 olan standart birim ağırlık kabı kullanılmıştır. Sıkışık birim hacim ağırlık tayininde bu kaba yaklaşık üç eşit tabaka halinde doldurulan agregaların her bir tabakası 25 defa şişlenmiştir. Gevşek ve sıkışık birim hacim ağırlık deney sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

Deneylerde her bir agrega tane sınıfı için TS EN1097-6/A1 (2007)'ye uygun olarak tane yoğunluğu ve su emme deneyleri yapılmıştır. Bu standart gereğince ince ve iri agregaların tane yoğunlukları ve su emmeleri farklı yöntemlerle belirlenir. Uygulanan yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiştir:

a) İnce agregâ için tane yoğunluğu ve su emme miktarlarının belirlenmesi:

Hazırlanan deney numunesi, piknometrede bulunan, $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suya daldırılmış ve hapsolmuş hava uzaklaştırılmıştır. Piknometre, su banyosu içerisinde düşey hale getirilmiş ve deney numunesi, $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ 'de, $(24\pm0,5)$ saat süreyle bekletilmiştir. Islatma süresinin sonunda, piknometre su banyosundan çıkarılmıştır. Daha sonra piknometreye, su ilâve edilerek tamamen doldurulmuş ve kap içerisinde hiç hava kalmayacak şekilde kapak kapatılmıştır. Piknometrenin dış kısmı silinerek kurutulduktan sonra tartılmış ve tartım değeri kaydedilmiştir (M_2). Deney numunesi kısmını kaplayan su süzülerek, piknometre bir tepsiye boşaltılmıştır. Piknometre, tekrar su ile doldurularak, kapak tekrar kapatılmıştır. Yine piknometrenin dış kısmı silinerek kurutulmuş ve tartılarak değeri kaydedilmiştir (M_3). Islak deney numunesi, tepsinin tabanına üniform bir tabaka hâlinde yayılarak, yüzey rutubetini buharlaştırmak amacıyla, agregâ taneleri, hafif bir sıcak hava akımına maruz bırakılmıştır. Agregâ taneleri, üniform bir kurumanın elde edilmesi amacıyla, hiçbir yüzey nemi görülmeyinceye ve taneler artık birbirlerine yapışmayıncaya kadar, sık aralıklarla karıştırılmıştır. Yüzey kuruluşunun sağlanıp sağlanmadığının tespiti için, metal koni kalıbı, tepsinin tabanına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Koni kalıbı, bir miktar kuru deney numunesi kısmıyla gevşek olarak doldurulmuş ve kalıbın üst kısmındaki delikten geçirilen bir sıkıştırıcıyla agregâ yüzeyine hafifçe vurularak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra, metal koni kalıbı numune üzerinden dikkatlice kaldırılmıştır. Elde edilen agregâ konisinde çökme olayı meydana gelene kadar, kurutmaya devam edilerek koni deneyi tekrarlanmıştır.

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş deney numuneside tartılarak, tartım değeri kaydedilmiştir (M_1). Daha sonra numune kısmı, hava dolaşımli etüvde, $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat kututularak tartılıp değeri kaydedilmiştir (M_4). Kaydedilen bu değerler yardımıyla standartta verilen eşitliklerden tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), hesaplanmıştır. Hesaplanan tane yoğunlukları değerleri detaylı şekilde Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

b) İri agregalar için tane yoğunluğu ve su emme miktarlarının belirlenmesi:

Hazırlanan deney numunesi kısmı, tel sepete yerleştirilerek ve tel sepet suya daldırılarak, $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ deneye başlanmıştır. Daldırmadan hemen sonra sepet su içerisinde birkaç kez tabana düşürülüp hapsolmuş hava deney numunesi kısmından uzaklaştırılmıştır. Sepet ve agregalar, $(24\pm0,5)$ saat süreyle $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda bekletilmiştir. Sepet ve deney numunesi kısmı $(22\pm3)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda tartılarak değeri kaydedilmiştir (M_2). Sepet ve agregalar, sudan çıkarılıp, suyun süzülmesi için için birkaç dakika bekletilmiştir. Daha sonra agregalar, kuru bir bez üzerine boşaltılarak üzerleri doymuş kuru yüzey haline getirilinceye kadar silinmiştir. Agregalar ikinci bir bez üzerine yayılarak görülebilir bütün su filmleri uzaklaştırılana kadar, güneş ışığının ve herhangi bir ısı kaynağının bulunmadığı bir noktada atmosfere maruz bırakılmıştır. Agregalar taneleri tartılarak elde edilen değer kaydedilmiştir (M_1). Tartılan agregalar, bir tepsiye aktararak etüvde, $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 24 saat bekletilmiştir. Kuruyan numuneler etüvden çıkarılarak tartılmış ve tartıdan elde edilen değer kaydedilmiştir (M_4). Bu arada agregaların çıkarıldığı boş sepet, tekrar suya daldırılarak, su içinde tartılmış ve tartıdan elde edilen değer kaydedilmiştir (M_3). Kaydedilen bu değerler yardımıyla standartta verilen eşitliklerden tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), hesaplanmıştır. Hesaplanan tane yoğunlukları değerleri detaylı şekilde Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

Organik madde tayini deneyi TS EN 1744-1 (2011)'e göre yapılmıştır. Bu deneyde 8 mm göz açıklıklı kare gözlü tel elekten elenen malzeme %3'lük NaOH (Sodyum hidroksit) çözeltisi içinde 24 saat bekletilerek gözlem yapılmıştır.

Standart, içinde bekletilen numuneden kaynaklı sıvının renk değişiminin gözlemini kapsamaktadır. Bekletilen süre sonunda sıvının renksiz veya açık sarı olması malzeme içerisinde beton üretimi için zararlı oranda organik madde bulunmadığına, koyu sarı, kahve rengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise beton üretimi için zararlı organik madde bulunduğunu belirtmektedir. Yapılan deney sonucundaki gözlem Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

Çok ince malzeme miktarı tayini TS706 EN12620 (2009) ve TS3530 EN933-1/A1 (2007)'e uygun olarak yapılmıştır. TS 706 EN 12620+A1'de çok ince malzeme muhtevası 63 µm göz açıklıklı elekten geçen agrega tane sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Bu standarda göre çok ince malzeme, aşağıda belirtilen dört durumdan birinin söz konusu olması halinde zararsız olarak kabul edilmelidir:

- İnce agreganın toplam çok ince malzeme muhtevasının, %3'ten veya agreganın kullanıldığı yerde geçerli olan mevzuata göre belirtilmiş olan başka bir değerden daha az olması.
- EN933-8'e uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, kum eş değerinin (SE), belirtilen alt sınırı aşması.
- EN933-9'a uygun olarak deneye tabi tutulduğunda, metilen mavisi deneyinin (MB), belirtilen alt sınır değerinden daha küçük bir değer vermesi.
- Bilinen bir performans yeterliliğine sahip agreganın kine eşit performansın elde edilmesi veya herhangi bir problemle karşılaşmadan kullanım performans yeterliliğinin kanıtlanması.

Standarda uygun olarak yapılan deneyde bir miktar malzeme etüve atılarak, $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat beklenmiş ve malzemelerin kuruması sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan malzemelerden, iri agregadan 5000 gr, ince agregadanda 2000 gr malzeme alınarak bu malzemeler 63 µm göz açıklıklı deney eleği üzerinde yıkanmış elek üzerinde kalan malzemeler tekrar etüve atılarak, $(110\pm5)^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat beklenmiş ve malzemelerin kuruması sağlanmıştır. Etüvden çıkarılan malzemelerin tartımı yapılarak değerler kaydedilmiş ve çok ince malzemenin ince malzemeye oranı belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

3.2.2. KYB karışım hesapları

KYB'ler için yapılacak karışım hesapları için belirlenmiş bir standardın olmadığı bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada, karışıma girecek agrega (İri-ince), toz malzeme, çimento ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların seçimi ile karışımında kullanılacak bu malzemelerden hangi oranda kullanılması gerektiğinin tespiti için EFNARC (2002-2005) ve KYB'ler üzerine yapılmış olan çalışmalardan faydalanılmıştır.

Çalışmada, Erzurum ili Horasan ilçesi civarından temin edilen doğal dere agregası, Aşkale çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R tipi çimento, Bursa Orhaneli Termik Santralinde üretilen uçucu kül (UK), Antalya Electrometalorji işletmesinde Silico Ferrochrom üretilen yapan tesisten elde edilen silis dumanı (SD) ve BASF Firmasınca üretilmiş olan polikarboksilik eter esaslı klor içermeyen yüksek oranda su azaltıcı özelliğine sahip yeni nesil süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi Glenium C303 kullanılmıştır.

Agrega tane sınıflarının oranları belirlenirken ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmış, 0-4 tane sınıfı ince agregadan %60 ve 4-16 tane sınıfı iri agregadan %40 oranlarında malzeme, karışıma katılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen taze beton numuneleri için hazırlanan karışımlarda, çimento dozajı 500 kg/m^3 , su/bağlayıcı oranı ise 0,35 olarak sabit tutulmuştur.

Mineral katkı malzemelerinden silis dumanı ağırlıkça %5, %10, %15, uçucu kül ise %25, %40, %55 oranlarında çimentoyla yer değiştirerek hazırlanan taze beton karışımlarına eklenmiştir.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı başlangıçta tüm seriler için %1,5 oranında sabit tutulmuştur. Fakat kontrol grupları ve silis dumanı katkılı gruplarda hazırlanan

karışımlarda yeterli yayılma çapları elde edilemediği için akışkanlaştırıcı katkı oranları kontrol gurubu ve %5 SD katkılı guruplarda %1,6, %10 SD katkılı guruplarda %1,8, %15 SD katkılı guruplarda ise %2,0 oranlarında kullanılarak KYB üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Belirlenmiş olan sabit dozaj ve su/çimento oranından yola çıkılarak karışım suyu miktarı 175 kg olarak hesaplanmıştır. Su miktarlarına, bağlayıcı hacmi ve bütün karışımlar için seçilen %10 hava hacmi eklenmiş ve 1000 dm³'den çıkarılarak 1 m³ betondaki toplam agrega hacmi hesaplanmıştır. Elde edilen agrega hacmi ince ve iri tane sınıflarına ayrılmıştır.

Tüm guruplar için karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmış ve karışımlar hazırlanmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. KYB gurupları için malzeme miktarları (1 m³ beton için)

Malz. Gurup	Çimento (kg)	SD (kg)	UK (kg)	Toplam Bağlay. (kg)	İnce Agr. (kg)	İri Agr. (kg)	Su (kg)	Akış. Katkı (kg)
KNTR	500	----	----	500	967	694	175	8
%5 SD	475	25	----	500	958	687	175	8
%10 SD	450	50	----	500	954	685	175	9
%15 SD	425	75	----	500	948	681	175	10
%25 UK	375	----	125	500	938	673	175	7,5
%40 UK	300	----	200	500	923	663	175	7,5
%55 UK	225	----	275	500	908	652	175	7,5

Karışımındaki malzeme miktarları, karışıma ağırlık olarak konularak deney numuneleri üretilmiştir. Bu işlem sırasında malzeme kayıpları göz önünde bulundurularak gerekli miktarlar %10 oranında artırılmıştır. 7 gurup için toplam 378 numune dökülmüş ve bu numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Betonyer kapasitesi ve buhar kürü çevrimleri dikkate alınarak bir seferde 22,28 dm³ beton üretilmiştir. Üretilen toplam beton hacmi 1276 dm³ tür.

3.2.3. KYB’lerin taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Çalışmanın bu bölümünde, taze beton deneylerinden taze birim hacim ağırlığı tayini ve çökme-yayılma, V hunisi, L kutusu ile U Kutusu deneylerinde izlenen yöntemler açıklanmıştır.

KYB deneylerinin sonuçları EFNARC (2002)’de tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilerek taze beton karışımlarına gerekli müdahaleler yapılmış belirtilen değerler arasında kalması sağlanmıştır. KYB deney sonuçları için tavsiye edilen sınır değerler Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. KYB deneyleri için sınır değerler (EFNARC 2002)

Deney	Birim	Min. Değer	Max. değer
Çökme-yayılma	mm	650	800
T ₅₀ cm yayılma süresi	sn	2	5
V hunisi	sn	6	12
V hunisi 5 dakika gecikmeli	sn	0	+ 3
L kutusu	H ₂ /H ₁	0,8	1,0
U kutusu	(H ₂ -H ₁) mm	0	30

3.2.3.a. Taze birim hacim ağırlığı tayini

Taze birim hacim ağırlığının (TBHA) belirlenmesi için TS 2941 (2006)’standardına uygun proktor kabı kullanılmıştır. Numuneler 1 g hassasiyetindeki laboratuvar terazisi ile tartılarak, ağırlığın hacime bölünmesiyle taze birim hacim ağırlığı tayini gerçekleştirilmiştir.

Taze birim hacim ağırlığı tayini tüm seriler için üçer kez yapılmış olup ortalama değerler alınmıştır. Çalışmanın sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü’nde verilmiştir.

3.2.3.b. Çökme-yayılma deneyi

EFNARC (2002)'ye uygun olarak yapılan deneyde, deney aparatlarından olan tabla üzerinde, tabla merkezinden 200 mm ve 500 mm çaplı iç içe iki daire çizilmiştir. Abram's hunisi içindeki 200 mm çaplı daire üzerine konulmuştur. Taze beton mikserden alınarak, Abrams hunisine sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra Abrams hunisi kaldırılarak taze betonun tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Bu sırada taze betonun Abrams hunisi kaldırıldıktan sonra 50 cm çapa yayılma süresi bir kronometre ile ölçülerek not edilmiştir (T_{50}). Yayılma tamamlandıktan sonra tabla üzerine yayılan betonun yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek ortalaması alınmış ve bu değer yayılma çapı olarak kaydedilmiştir.

Çökme-yayılma deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.



Şekil 3.10. Çökme-yayılma deneyi

3.2.3.c. V Hunisi deneyi

EFNARC (2002)'ye uygun olarak yapılan deneyde, taze beton, V hunisi deney aparatına hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra alt kapak açılıp üstten bakıldığında ışık görülene kadar geçen betonun akış süresi bir kronometre yardımıyla ölçülmüş ve V hunisi akış süresi olarak kaydedilmiştir. Daha

sonra V hunisinin ağızı kapatılarak tekrar taze betonla doldurulmuş 5 dakika beklendikten sonra alt kapak açılıp üstten bakıldığında ışık görülene kadar geçen betonun akış süresi bir kronometre yardımıyla ölçülmüş ikinci değer olarak V₅ dakika gecikmeli akış süresi olarak kaydedilmiştir.

V hunisi deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.



Şekil 3.11. V Hunisi deneyi

3.2.3.d. L Kutusu deneyi

EFNARC (2002)'ye uygun olarak yapılan deneyde, taze beton mikserden alınarak L kutusuna hiç bir şıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra kapak açılarak, betonun donatılar arasından geçerek diğer bölüme 20 cm ve 40 cm ilerleme süreleri ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra betonun engeller arasından akışını tamamlayıp durması beklenmiş, L kutusu ucundaki beton yüksekliği (H_2) ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği (H_1) ölçülerek L kutusu bloklanma oranı (H_2/H_1) hesaplanarak kaydedilmiştir.

L Kutusu deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

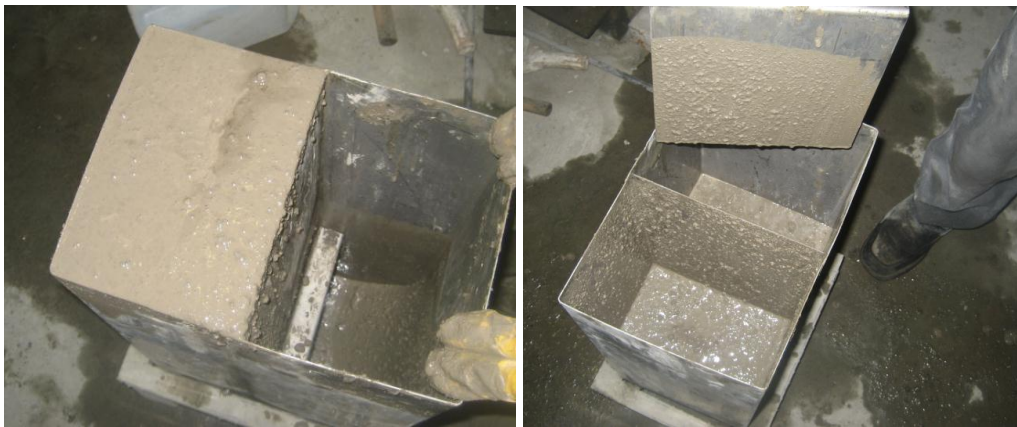


Şekil 3.12. L Kutusu deneyi

3.2.3.e. U Kutusu deneyi

EFNARC (2002)'ye uygun olarak yapılan deneyde, taze beton betoniyeerden alınarak U kutusuna hiç bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmiştir. Daha sonra sürgülü kapak çekilmiş, betonun diğer kısma doğru dolarak yükselmesi beklenmiştir. Kutunun iki kolu arasındaki yükseklik farkı ölçülerek kaydedilmiştir.

U Kutusu deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.



Şekil 3.13. U Kutusu deneyi

3.2.4. Kür seçeneklerinin belirlenmesi

3.2.4.a. Hava kürü seçeneklerinin belirlenmesi

Deneysel çalışmada, karşılaştırma ve değerlendirme için üretilen tüm guruplardan hava kürü için 21 numune üretilmiştir. Bu numunelere labaratuvar ortamında ($20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %55 bağıl nem) basınç deneyinin yapılacağı güne kadar, kür işlemi uygulanmadan bekletilmiştir.

3.2.4.b. Su kürü seçeneklerinin belirlenmesi

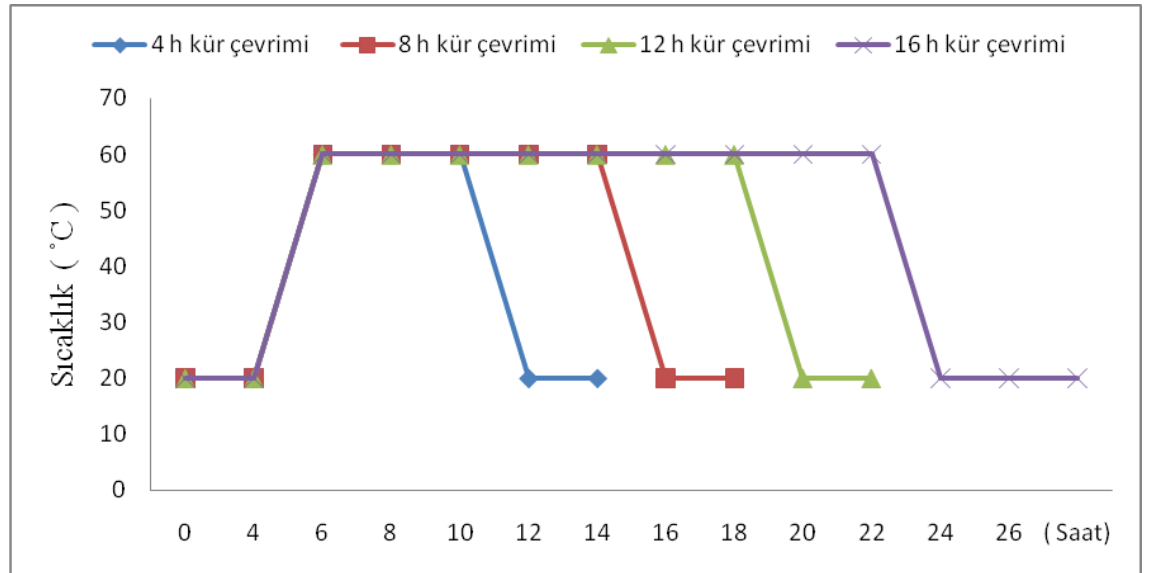
Su kürü seçenekleri belirlenirken, karşılaştırma ve değerlendirme için tüm guruplara ait toplam 105 numune üretilmiş ve bu numuneler üzerinde 3, 7, 28 günlük su kürü uygulamaları yapılmıştır.

3.2.4.c. Atmosferik basınçlı buhar kürü seçeneklerinin belirlenmesi

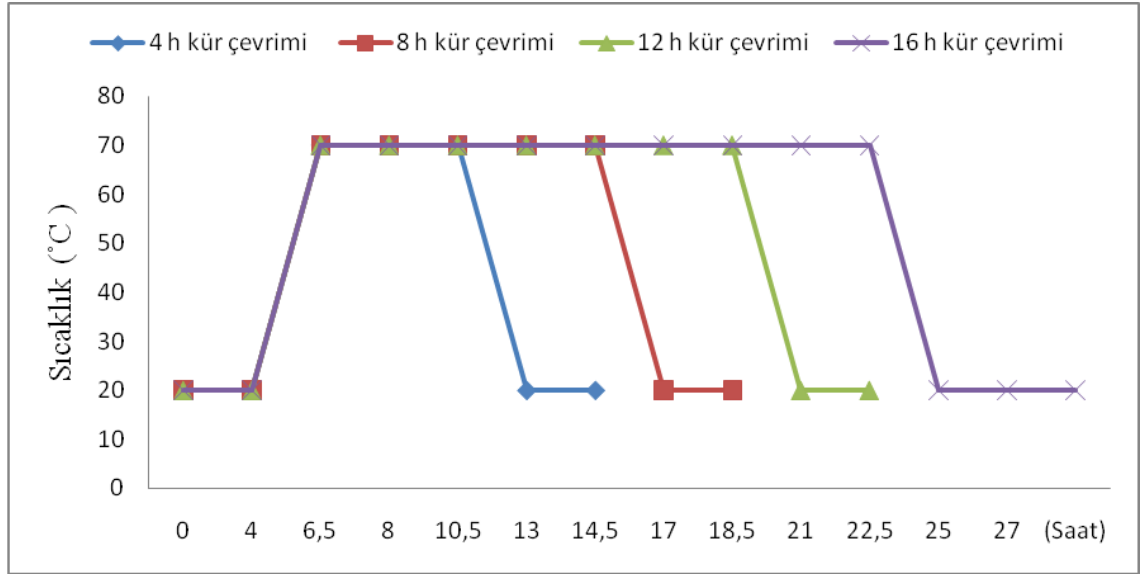
Atmosferik buhar kürü seçeneklerinin belirlenmesinde standartlar ve farklı araştırmacıların yaptığı çalışmalar dikkate alınarak, ön bekleme süresi tüm çevrimlerde sabit ve 4 saat olarak belirlenmiştir. Bu süre zarfında buhar kabini içerisindeki sıcaklık 20°C olarak ayarlanmıştır. Deneysel çalışmada kürleme sıcaklıkları 60°C , 70°C ve 80°C olmak üzere üç farklı değer olarak alınmıştır. Dört farklı kürleme süresinin (4, 8, 12, 16 saat) uygulandığı çalışmada, atmosferik basınçlı buhar kürü için toplam 252 adet numune üretilerek bu numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Buhar kürünün bir diğer aşaması olan kontrollü ısıtma ve soğutma devrelerinde ise sıcaklık değişimi her iki durumdada sabit olarak artırılmış ve azaltılmıştır. Kontrollü ısıtma ve soğutma sürecinin uygulandığı zamanlar 60°C için 2 saat, 70°C için 2,5 saat, 80°C için 3 saat uygulanmış olup, kürleme sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık artış ve azalış hızları 20°C/saat olarak sabit tutulmuştur. Yapılan buhar kürü çevrimleri topluca Çizelge 3.8’de, çevrimlerin şematik olarak gösterimleri ise Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Buhar kürü çevrimleri

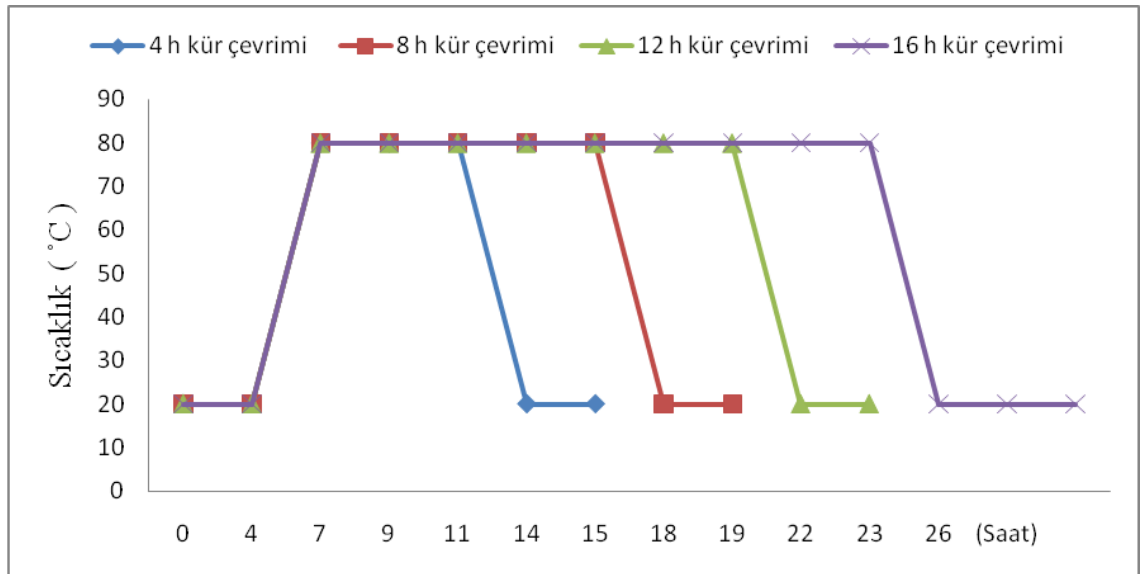
Kür Sıc.	Ön bekleme süreci		Kontr. ısıtma süreci		Kürleme süreci		Kontr. soğutma süreci		Toplam çevrim
	Sıc. °C	Zam. (saat)	Sıc. °C	Zam. (saat)	Sıc. °C	Zam. (saat)	Sıc. °C	Zam. (saat)	Zam. (saat)
60 °C	20	4	20-60	2	60	4	60-20	2	12
	20	4	20-60	2	60	8	60-20	2	16
	20	4	20-60	2	60	12	60-20	2	20
	20	4	20-60	2	60	16	60-20	2	24
70 °C	20	4	20-70	2,5	70	4	70-20	2,5	13
	20	4	20-70	2,5	70	8	70-20	2,5	17
	20	4	20-70	2,5	70	12	70-20	2,5	21
	20	4	20-70	2,5	70	16	70-20	2,5	25
80 °C	20	4	20-80	3	80	4	80-20	3	14
	20	4	20-80	3	80	8	80-20	3	18
	20	4	20-80	3	80	12	80-20	3	22
	20	4	20-80	3	80	16	80-20	3	26



Şekil 3.14. 60°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi



Şekil 3.15. 70°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi



Şekil 3.16. 80°C buhar kürü çevrimlerinin şematik gösterimi

3.2.5. Basınç dayanımı tayini yöntemi

Basınç dayanımları hava ve suda kür edilen numunelerde 3, 7 ve 28. günde belirlenmiştir. Buhar kürü numunelerinin basınç dayanımı ise kür çevrimi tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmiştir.

Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı, betonun basınç mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir (Baradan 1991). Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. TS EN 12390-3 (2010)'a göre bu değer 0,2 MPa/s ile 1,0 MPa/s arasında olmalıdır. Beton numunelerin kırılması işlemi, yükleme hızı 0,4 MPa/s seçilerek yapılmıştır.

Farklı kür koşulları altında bekletilen, değişik oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunelerde, mineral katkıların ve kür koşullarının basınç dayanımına etkileri incelenmiştir.

3.2.6. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem

Bu çalışmada kontrol numuneleri ve ağırlıkça silis dumanının, %5, %10, %15, uçucu külün ise %25, %40, %55 oranlarında çimentoyla yer değiştirilmesi sonucu üretilen 7 gruptaki KYB numuneleri üzerinde basınç dayanımı tespiti yapılmıştır.

Mineral katkıların ve farklı kür koşullarının basınç dayanımına etkilerinin incelendiği araştırmada, deneylerden elde edilen sonuçlar en güvenilir metodlardan birisi olan karşılaştırma metodu ile değerlendirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, agrega ve beton deneylerinden (taze ve sertleşmiş) elde edilen sonuçlar verilmiş, çizelge ve şekillerle desteklenerek teknik literatür ışığında yorumlanmıştır.

Karşılaştırma, farklı oranlarda ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek üretilen mineral katkılı KYB numuneleri ile kontrol numuneleri arasında yapılmıştır. Yapılan çalışmada, silis dumanı ile uçucu külün ve KYB numunelerine uygulanan değişik kür koşullarının basınç dayanımına etkileri incelenmiştir.

4.1. Agrega Deneyleri

4.1.1. Elek analizi (Granülometri)

Standart kare açıklıklı eleklerle, etüv kurusu durumundaki numuneler üzerinde yapılan elek analizi deneyi sonucunda, iri (4-16 mm) ve ince (0-4 mm) agregalar için ayrı ayrı elde edilen tane dağılımlarına ait değerler yığışımlı ağırlık yüzdesi olarak Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir.

KYB numunelerinin üretimi için, iri agregadan %40, ince agregadan %60 oranında malzeme alınarak karışıma katılmıştır. Oluşturulan yeni agrega karışımının tane dağılımına ait değerler yığışımlı ağırlık yüzdesi olarak Çizelge 4.3’de, granülometri eğrisi ise TS 802 (1985)’de verilen standart eğrilerle birlikte Şekil 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi KYB numunelerinin üretimi için %40 iri agrega, %60 ince agrega oranlarıyla hazırlanan karışımının granülometri eğrisi A16 ve B16 eğrileri arasında kalmıştır. KYB üretiminde karışıma girecek agregalar için kullanılan bu oranın uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1. İri agrega için elek analizi deneyi sonuçları

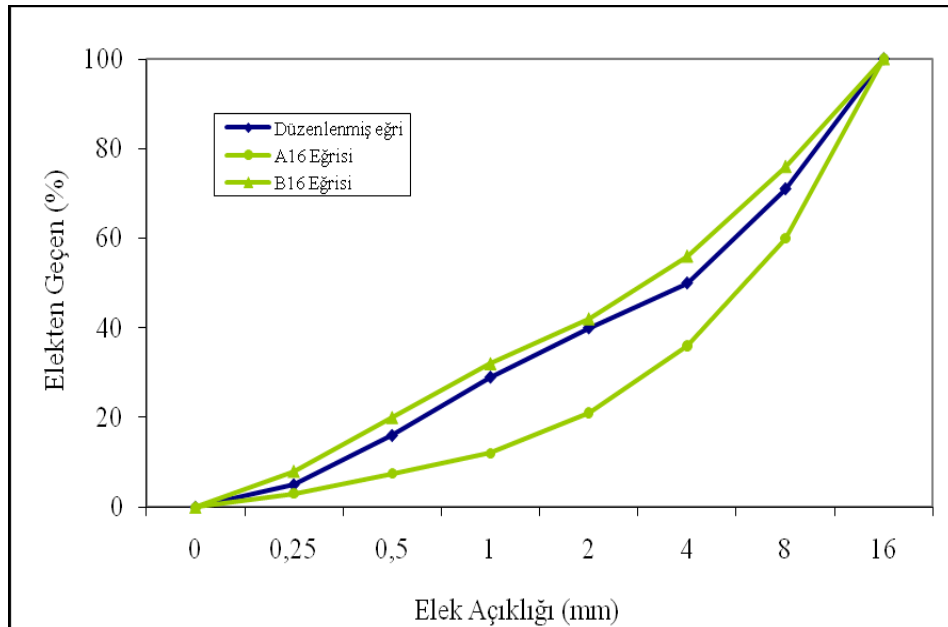
Elek açıklığı (mm)	Elek üzerinde kalan (g)	Kümülatif toplam (g)	% Kalan	% Geçen
16	0	0	0	100
8	3582	3582	72	28
4	1272	4854	97	3
2	146	5000	100	0
1	0	5000	100	0
0,50	0	5000	100	0
0,25	0	5000	100	0
0,125	0	5000	100	0
Elek altı	0	5000	100	0

Çizelge 4.2. İnce agrega için elek analizi deneyi sonuçları

Elek açıklığı (mm)	Elek üzerinde kalan (g)	Kümülatif toplam (g)	% Kalan	% Geçen
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	958	958	19	81
2	765	1723	34	66
1	904	2627	52	48
0,50	1096	3723	74	26
0,25	918	4641	93	7
0,125	322	4963	99	1
Elek altı	37	5000	100	0

Çizelge 4.3. Karışımda kullanılan agreganın tane dağılımları

Elek açıklığı (mm)	İri agrega % Geçen	İnce agrega % Geçen	Karışım oranları (%40+%60)	% Geçen
16	100	100	100	100
8	28	100	71	71
4	3	81	50	50
2	0	66	40	40
1	0	48	29	29
0,50	0	26	16	16
0,25	0	7	4	4
0,125	0	1	1	1
Elek altı	0	0	0	0



Şekil.4.1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

4.1.2. Birim ağırlık

Standart birim ağırlık kabının kullanıldığı bu deneyde, ince ve iri agregaların, birim ağırlık değerleri ayrı ayrı bulunmuştur. Birim ağırlık deneyleri hava kurusu durumunda bulunan agregalar üzerinde yapılmıştır. Agregada deneylerinden elde edilen gevşek birim ağırlık değerlerinin ortalaması Çizelge 4.4'te, sıkışık birim ağırlık değerlerinin ortalaması ise, Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Gevşek birim ağırlık deneyi sonuçları

Ölçülen değer	Agrega sınıfı	
	İnce (0 – 4 mm)	İri (4 – 16 mm)
Ölçü kabı boş ağırlığı (w_1), g	6705	6705
Ölçü kabı hacmi (v), cm^3	2148	2148
Kap + Numune ağırlığı (w_2), g	9756	9863
Numune ağırlığı ($w_2 - w_1$), g	3051	3158
G. Birim ağır. ($w_2 - w_1$)/ v , kg/m^3	1420	1470

Çizelge 4.5. Sıkışık birim ağırlık deneyi sonuçları

Ölçülen değer	Agrega sınıfı	
	İnce (0 – 4 mm)	İri (4 – 16 mm)
Ölçü kabı boş ağırlığı (w_1), g	6705	6705
Ölçü kabı hacmi (v), cm^3	2148	2148
Kap + Numune ağırlığı (w_2), g	10335	10099
Numune ağırlığı ($w_2 - w_1$), g	3630	3394
S. Birim ağır. ($w_2 - w_1$)/ v , kg/m^3	1690	1580

4.1.3. Organik madde tayini

İnce agregadan alınan malzeme üzerinde yapılan organik madde tayini deneyinde ölçü silindirlerindeki malzeme üzerinde kalan sıvıda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir. Yani sıvı renksizdir. TS EN 1744-1 (2011)'e göre bekletilen süre sonunda sıvının renksiz veya açık sarı olması malzeme içerisinde beton üretimi için zararlı oranda organik madde bulunmadığını, koyu sarı, kahve rengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise beton üretimi için zararlı organik madde bulunduğunu belirtmektedir.

Yapılan gözlemsel değerlendirmeye göre kullanılan agregaların beton üretimi için uygun olduğu belirlenmiştir.

4.1.4. İnce madde oranı tayini

Bu deney kullanılan agreganın ince ve iri kısımları için ayrı ayrı yapılmış ve elde edilen ortalama sonuçlar; ince agrega için Çizelge 4.6, iri agrega için Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. İnce agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları

Numunenin etüv kuru ağırlığı (w), g	Yıkandıktan sonra 0,063 mm elek üstünde kalan numunenin etüv kuru ağırlığı (w ₁), g	İnce malzeme oranı $w-w_1/w$ (%)
2000	1953	2,35
TS706 EN 12620 'ye göre beton agregalarında ince madde oranı ince agrega için %3'ten küçük olmalıdır		

Çizelge 4.7. İri agrega için ince madde oranı tayini deney sonuçları

Numunenin etüv kuru ağırlığı (w), g	Yıkandıktan sonra 0,063 mm elek üstünde kalan numunenin etüv kuru ağırlığı (w ₁), g	İnce malzeme oranı $w-w_1/w$ (%)
5000	4976	0,48
TS706 EN 12620 'ye göre beton agregalarında ince madde oranı ince agrega için %3'ten küçük olmalıdır		

Beton agregalarında ince maddelerin (kil-silt) fazla miktarda olması, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına ve çimentonun prizini geciktirmesine neden olduğundan istenmeyen bir durumdur (Postacıoğlu 1987; Bingöl 2002). Deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili standartlar ile karşılaştırıldığında kullanılan agregalarda betona zarar verecek oranda ince taneli malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple agregaların beton üretimin için kullanılabilir olduğuna karar verilmiştir.

4.1.5. Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini

Agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranının belirlendiği bu deneyde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. TS EN1097-6/A1 (2007)'ye göre yapılan bu deneyde ince agrega için ölçülen değerler Çizelge 4.8'de, hesaplanan tane yoğunluğu ve su emme oranları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır:

Görünür tane yoğunluğu: $\rho_a = M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{rd} = M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Doymun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{ssd} = M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Su emme oranı: $WA_{24} = 100 \times (M_1 - M_4) / M_4$

Burada;

M_1 : Doymun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M_2 : Doymun agrega numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi (g),

M_3 : Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

M_4 : Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g)'dir.

Çizelge 4.8. İnce agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için ölçülen değerler

Ölçülen değerler	Ağırlık (g)
Su + piknometre (M_3)	1520
Su + piknometre + Numune (M_2)	1878
DKY numune (M_1)	599
Etüv kurusu numune (M_4)	579

Çizelge 4.9. İnce agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için hesaplanan değerler

Hesaplanan değerler	Yoğunluk (g/cm^3)
Görünür tane yoğunluğu (ρ_a)	2,62
Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{rd})	2,40
Doygun ve yüzeyi kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{ssd})	2,49
Su emme oranı (WA_{24})	3,45

TS EN1097-6/A1 (2007)'e göre yapılan bu deneyde iri agrega için ölçülen değerler Çizelge 4.10'da, hesaplanan tane yoğunluğu ve su emme oranları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Tane yoğunlukları (ρ_a , ρ_{rd} ve ρ_{ssd}), aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

Görünür tane yoğunluğu: $\rho_a = M_4 / M_4 - (M_2 - M_3)$

Etüvde kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{rd} = M_4 / M_1 - (M_2 - M_3)$

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş esasta tane yoğunluğu: $\rho_{ssd} = M_1 / M_1 - (M_2 - M_3)$

Su emme oranı: $WA_{24} = 100 \times (M_1 - M_4) / M_4$

Burada;

M_1 : Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M_2 : Doygun agrega numunesini ihtiva eden sepetin sudaki görünür kütlesi (g),

M₃: Boş sepetin sudaki görünür kütlesi (g),

M₄: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi (g)'dir.

Çizelge 4.10. İri agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için ölçülen değerler

Ölçülen değerler	Ağırlık (g)
Boş sepet (M ₃)	434
Sepet + Numune (M ₂)	1405
DKY numune (M ₁)	1550
Etüv kurusu numune (M ₄)	1522

Çizelge 4.11. İri agrega tane yoğunluğu ve su emme deneyi için hesaplanan değerler

Hesaplanan değerler	Yoğunluk (g/cm ³)
Görünür tane yoğunluğu (ρ_a)	2,76
Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{rd})	2,63
Doygun ve yüzeyi kurutulmuş tane yoğunluğu (ρ_{ssd})	2,68
Su emme oranı (WA ₂₄)	1,84

4.2. Taze Beton Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde mineral katkılı ve katkısız KYB gurupları için, taze betonda birim hacim ağırlık, çökme-yayılma, V hunisi, L kutusu ve U kutusu deneyleri yapılmış, KYB'lerin taze beton özellikleri belirlenerek sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir.

Çalışmada kullanılan mineral katkıların (UK ve SD), KYB'nin taze beton özelliklerine etkileri ayrı ayrı ele alınarak, grafiklerle birlikte 4.3 Bölümünde detaylı şekilde tartışılmıştır.

4.2.1. Taze birim hacim ağırlığı deneyi

TBHA'nın belirlenmesi için standart proktor kabı kullanılmıştır. Üretilen KYB'ler laboratuvar betoniyesinden homojen olarak alınmış ve proktor kabına sıkıştırma işlemi uygulanmadan doldurulmuştur. Numuneler 1 g hassasiyetindeki terazide tartılmış, bu değer hacime bölünerek numunelerin taze birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Deney sonucunda hesaplanan değerler Çizelge 4.12'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4.12. KYB numunelerinin taze birim hacim ağırlıkları

Numune grubu	Taze birim hacim ağırlığı (kg/m ³)
Kontrol	2383
%5 S.D.	2372
%10 S.D.	2367
%15 S.D.	2364
%25 U.K.	2360
%40 U.K.	2348
%55 U.K.	2334

4.2.2. Çökme – yayılma deneyi

Bu deneyde betonun çökerek yayılma hareketini devam ettirmesi, eşik kayma gerilmesi değerini aşmasına bağlıdır. Betonun eşik kayma gerilmesi ne kadar düşükse, beton kendi ağırlığı ile o kadar çok çöküp yayılacaktır ve eşik kayma gerilmesiyle kendi ağırlığının oluşturduğu ve yayılma süresince giderek düşen gerilme eşitlenince yayılma duracaktır. Bu nedenle nihai yayılma deneyi eşik kayma gerilmesiyle ilişkilendirilebilir. Yayılma çapının yanında 50 cm'ye yayılma süresi de kendiliğinden yerleşebilirliği kontrol etmekte yararlı olmaktadır. Bu değer taze betonun akış hızını belirler ve plastik viskozite ile ilişkilendirilmiştir. Daha düşük akış süresi daha düşük viskoziteyi gösterir. 50 cm çapa yayılma süresi T_{50} olarak adlandırılır (Kurt, 2009).

EFNARC (2002)'de yayılma çapı değeri 650-800 mm, T_{50} süresi 2-5 sn olarak belirlenmiştir. EFNARC (2005)'te değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip

KYB'ler kullanılabileceği belirtilerek yayılma çapı için 3 farklı (S1, S2, S3), viskozite için ise 2 farklı (VS1, VS2) sınıflandırma yöntemine gidilmiştir.

Yayılma çapına göre;

- 1- 550-650 mm yayılma çapına sahip betonlar VS1
- 2- 660-750 mm yayılma çapına sahip betonlar VS2
- 3- 760-850 mm yayılma çapına sahip betonlar VS3 sınıfı olarak tanımlanırken,

Viskozite için belirlenen T_{50} süresine göre ise;

- 1- $T_{50} \leq 2$ değerinde ise KYB'ler VS1
- 2- $T_{50} > 2$ değerinde ise KYB'ler VS2 sınıfı olarak tanımlanmıştır.

EFNARC (2002)'ye uygun olarak tüm seriler için yapılan çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı ve 50 cm'ye yayılma süresi (T_{50}) değerleri tüm gruplar için topluca Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Çökme-yayılma deneyi sonuçları

Numune Grubu	Yayılma miktarı (cm)	EFNARC'a göre yayılma çapı sınıfı	T_{50} süresi (sn)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	63	SF1	2,4	VS2
%5 S.D.	65	SF1	2,4	VS2
%10 S.D.	67	SF2	2,3	VS2
%15 S.D.	66	SF2	2,4	VS2
%25 U.K.	66	SF2	2,8	VS2
%40 U.K.	68	SF2	2,6	VS2
%55 U.K.	70	SF2	2,3	VS2

Hazırlanmış olan tüm gruplardan elde edilen sonuçlar EFNARC 2005'te belirtilen sınır değerler arasında kalmıştır. En düşük yayılma çapı 63 cm ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı grup 70 cm yayılma çapıyla en yüksek değere ulaşmıştır. EFNARC 2005'e göre yayılma çapları dikkate alındığında kontrol ve %5 SD

katkılı grup numuneleri SF1, diğer grup numuneleri ise SF2 sınıfındadır. Viskozite için belirlenen T_{50} süresine göre ise; tüm gruplar VS2 sınıfı içerisinde kalmaktadır.

4.2.3. V Hunisi deneyi

Deney taze KYB'nin kendi ağırlığı ile özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Betonun, boşluklardan geçebilme yeteneğini ölçmek için yapılan kendiliğinden yerleşebilirlik deneyidir. Deney, KYB'nin viskozitesi ve geçiş yeteneği hakkında fikir verir.

EFNARC (2002)'de V hunisi akış süresi 6-12 sn, V hunisi 5 dakika gecikmeli akış süresi +3 sn olarak belirlenmiştir. EFNARC (2005)'te ise değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceği belirtilerek viskozite için 2 farklı (VF1, VF2) sınıflandırma yöntemine gidilmiştir.

Viskozite için belirlenen akış süresine göre;

- 1- $t < 8$ değerinde ise KYB'ler VF1
- 2- $t = 9-25$ sn değerinde ise KYB'ler VF2 sınıfı olarak tanımlanmıştır.

EFNARC (2002) standardına uyumlu 10 litre kapasiteli V şekilli huni kullanılarak tüm seriler için yapılan deneyde V hunisi akış süresi ile V 5 dakika gecikmeli akış süreleri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4.14. V Hunisi deneyi sonuçları

Numune Grubu	t (sn)	t ₅ dakika gecikmeli (sn)	EFNARC'a göre viskozite sınıfı
Kontrol	6,08	6,13	VF1
%5 S.D.	6,25	6,75	VF1
%10 S.D.	6,55	7,48	VF1
%15 S.D.	6,80	7,30	VF1
%25 U.K.	6,95	7,70	VF1
%40 U.K.	6,20	6,80	VF1
%55 U.K.	7,00	7,60	VF1

Tüm guruplardan elde edilen sonuçlar EFNARC 2002'te belirtilen 6-12 sn olan akış süresi sınır değerleri arasında kalmıştır. En düşük akış süresi 6,08 sn ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı gurup 7 sn akış süresiyle en yüksek değere ulaşmıştır. V₅ dakika gecikmeli akış süreleri incelendiğinde tüm guruplar belirtilen +3 sn sınır değerini sağladığı belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, hazırlanan tüm karışımlarda bloklanma riski olmadığı söylenebilir. EFNARC 2005'e göre akış süreleri dikkate alındığında hazırlanan tüm numune gurupları VF1 sınıfındadır.

4.2.4. L Kutusu deneyi

Taze KYB'nin doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışma karşı direncin L şeklindeki bir kutu kullanılarak belirlendiği deneyde, L kutusu ucundaki beton yüksekliği (H₂) ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği (H₁) ölçülür. Ölçülen bu değerlerle L kutusu bloklanma oranı (H₂/H₁) hesaplanır. Bu oran, betonun KYB özelliği taşıyıp taşımadığının göstergesi olarak kabul edilmektedir.

EFNARC (2002)'de L kutusu bloklanma oranının (H₂/H₁) 0,8-1,0 değerinde olması istenmektedir. EFNARC (2005)'te ise değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceğini belirtilerek geçiş yeteneği için L kutusunda bulunan donatı sayısına bağlı olarak 2 farklı (PA1, PA2) sınıflandırma yöntemine gidilmiştir.

Geçiş yeteneği için belirlenen sınıflar;

- 1- $(H_2/H_1) \geq 0,80$ (2 donatı engeli mevcutsa) PA1
- 2- $(H_2/H_1) \geq 0,80$ (3 donatı engeli mevcutsa) PA2 sınıfı olarak tanımlanmıştır.

EFNARC (2002) standardına uygun olarak yapılan bu deneyde, betonun donatılar arasından geçerek diğer bölüme 20 cm ve 40 cm ilerleme süreleri ve L kutusu ucundaki beton yüksekliği (H_2) ile kapağın hemen önündeki beton yüksekliği (H_1) belirlenmiş, L kutusu bloklanma oranı (H_2/H_1) hesaplanarak, elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15. L kutusu deneyi sonuçları

Numune Grubu	t_{20} (sn)	t_{40} (sn)	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_2/H_1
Kontrol	1,55	2,80	8,0	6,7	0,84
%5 S.D.	1,95	3,70	9,3	8,1	0,87
%10 S.D.	1,40	2,30	8,7	7,6	0,87
%15 S.D.	1,30	1,90	8,1	7,0	0,86
%25 U.K.	1,38	2,70	8,8	7,5	0,85
%40 U.K.	1,35	2,55	8,5	7,5	0,88
%55 U.K.	1,30	2,50	7,5	6,8	0,91

Hazırlanan bütün guruplarda H_2/H_1 oranı, EFNARC 2002 ve 2005'te belirtilen 0,8-1 sınır değerleri arasında kalmıştır. En düşük H_2/H_1 oranı 0,84 değeri ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı grupta 0,94 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Çalışmada 3 donatı engelli deney aleti kullanıldığı için üretilen bütün guruplar EFNARC 2005'e göre PA2 sınıfındadır.

4.2.5. U Kutusu deneyi

Bu deney, taze KYB'nin kendiliğinden yerleşme yeteneğinin belirlenmesi için yapılır ve numunenin özel bir kutu içerisinde, kendi ağırlığı ile yükselmesinin gözlenmesini kapsar. U kutusunun iki kolunda bulunan taze betonların arasındaki yükseklik farkının ölçülmesi sonucu üretilen betonun KYB özelliği taşıyıp taşımadığına karar verilir.

EFNARC (2002)'de U kutusunun iki kolunda bulunan taze betonlar arasındaki yükseklik farkının (Δh) 0-3 cm değerleri arasında olması istenmektedir.

EFNARC (2002) standardına uygun olarak yapılan bu deneyde, betonun U kutusunun alt bölümünde bulunan donatılar arasından geçerek diğer bölüme yükselmesinden sonra kutunun her iki kolunda bulunan taze betonlar arasındaki yükseklik farkı ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. U kutusu deneyi sonuçları

Numune Grubu	Δh (cm)
Kontrol	2,7
%5 S.D.	1,5
%10 S.D.	1,0
%15 S.D.	1,0
%25 U.K.	0,5
%40 U.K.	0,5
%55 U.K.	0,4

Hazırlanmış olan tüm guruplardan elde edilen sonuçlar EFNARC 2002'de belirtilen $\Delta h_{\max} = 3$ cm sınır değerini aşmamıştır. En düşük değer $\Delta h_{\max} = 0,4$ cm ile %55 UK katkılı gurupta belirlenirken, $\Delta h_{\max} = 2,7$ cm ile kontrol gurubunda en yüksek değere ulaşmıştır.

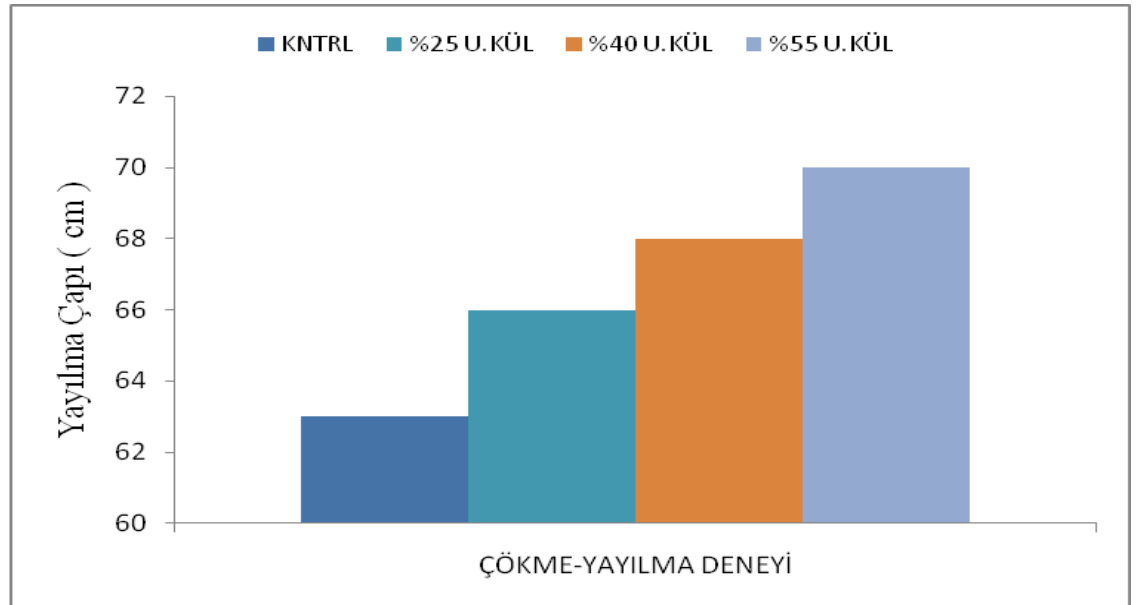
4.3. Mineral Katkıların KYB'nin Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Çalışmada kullanılan mineral katkılardan uçucu külün KYB'nin taze beton özelliklerine etkisi 4.3.1 konu başlığı altında, silis dumanının etkisi ise 4.3.2 konu başlığı altında incelenmiştir.

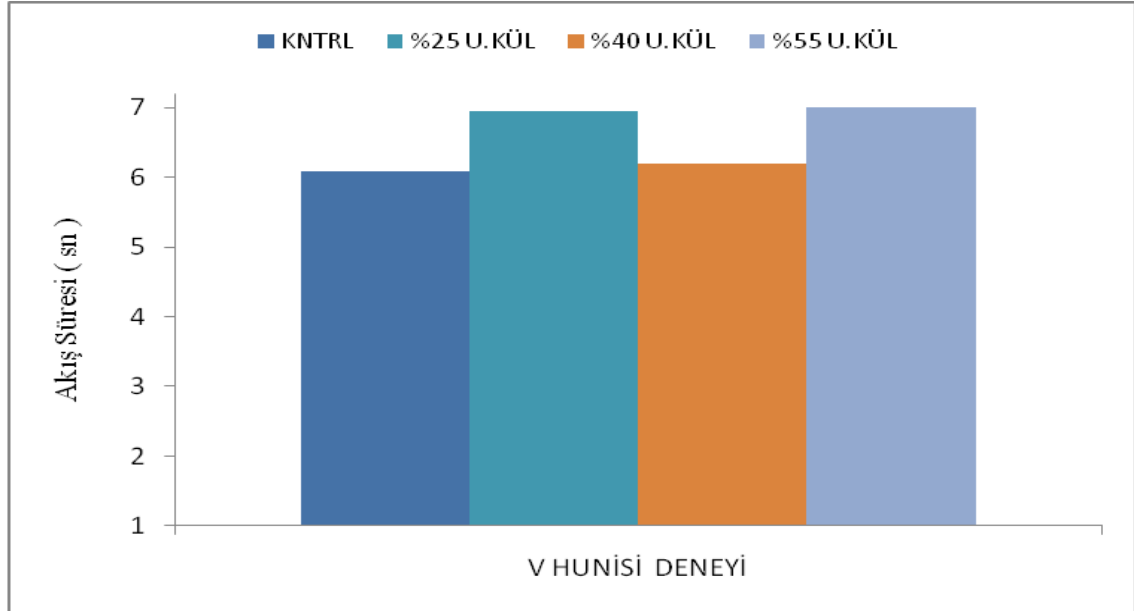
4.3.1. Uçucu külün etkisi

Şekil 4.2-4.5 incelendiğinde, çalışmada çimento yerine ikame edilen UK'nın kullanım oranı arttıkça KYB'nin kendi ağırlığı ile yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerinde iyileşme olduğu görülmektedir. Uçucu kül oranının fazla artırılması ise viskoziteyi düşürmektedir. Bu nedenle KYB'de kullanılan UK miktarının optimum değerde tutulması veya viskozite düzenleyici katkı kullanılması gerektiği söylenebilir. Aynı S/B oranı kullanılarak üretilen betonların, KYB özelliklerini taşıması için, süperakışkanlaştırıcı katkı miktarının değiştirildiği çalışmada, UK katkılı guruplarda diğer guruplara oranla daha az kimyasal katkı kullanılmıştır.

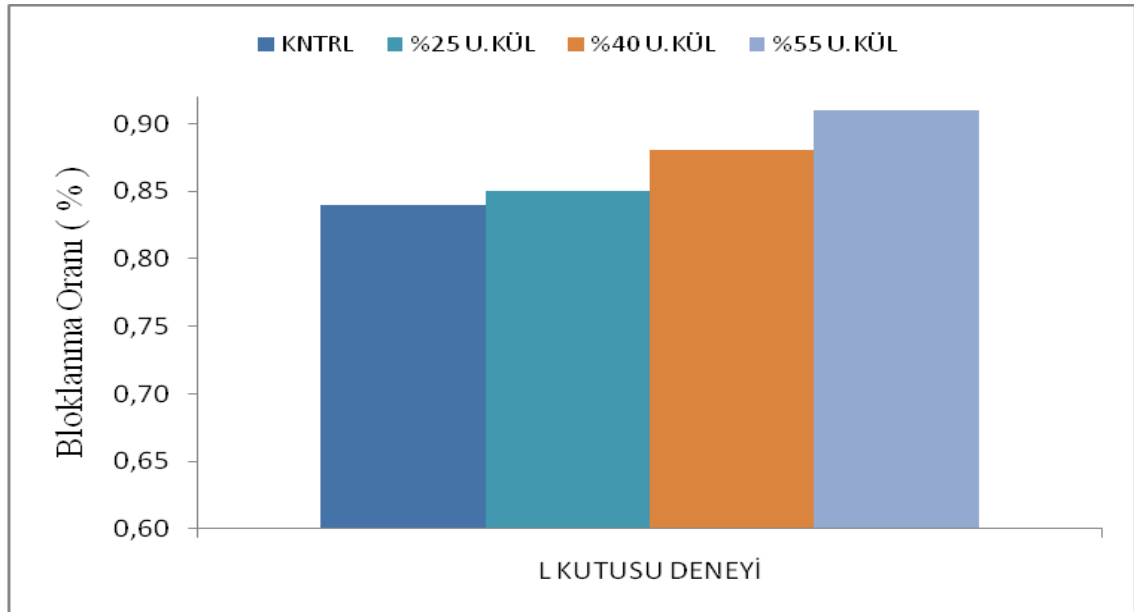
Eroğlu vd. (2007)'de yaptıkları çalışmalarında, uçucu kül kullanımının, KYB'nin akıcılığını, dar kesitlerden geçebilme yeteneğini ve ayrışma direncini artırdığı, ayrıca uçucu külün kendiliğinden yerleşebilme özelliklerini elde etmek için gerekli süper akışkanlaştırıcı miktarının azaltmasında kullanılabileceği ve böylece KYB'lerin kimyasal katkı kullanımı nedeniyle ortaya çıkan yüksek maliyetini azaltmada faydalı olacağını belirtmişlerdir.



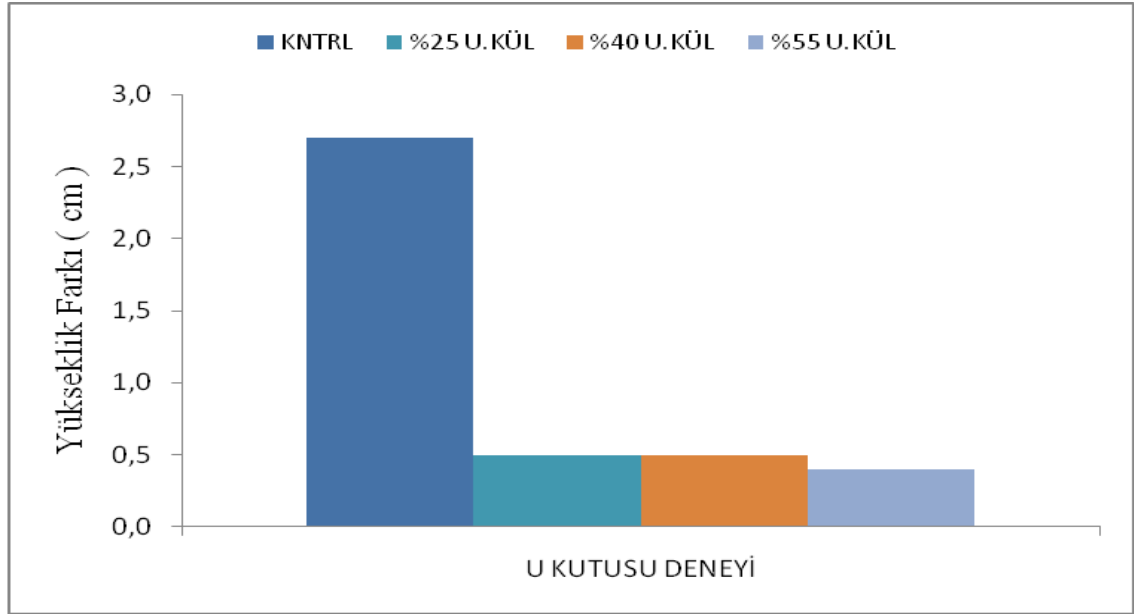
Şekil 4.2. Kontrol ve UK katkılı gurupların yayılma çaplarının karşılaştırılması



Şekil 4.3. Kontrol ve UK katkılı grupların akış sürelerinin karşılaştırılması



Şekil 4.4. Kontrol ve UK katkılı grupların bloklanma oranlarının karşılaştırılması

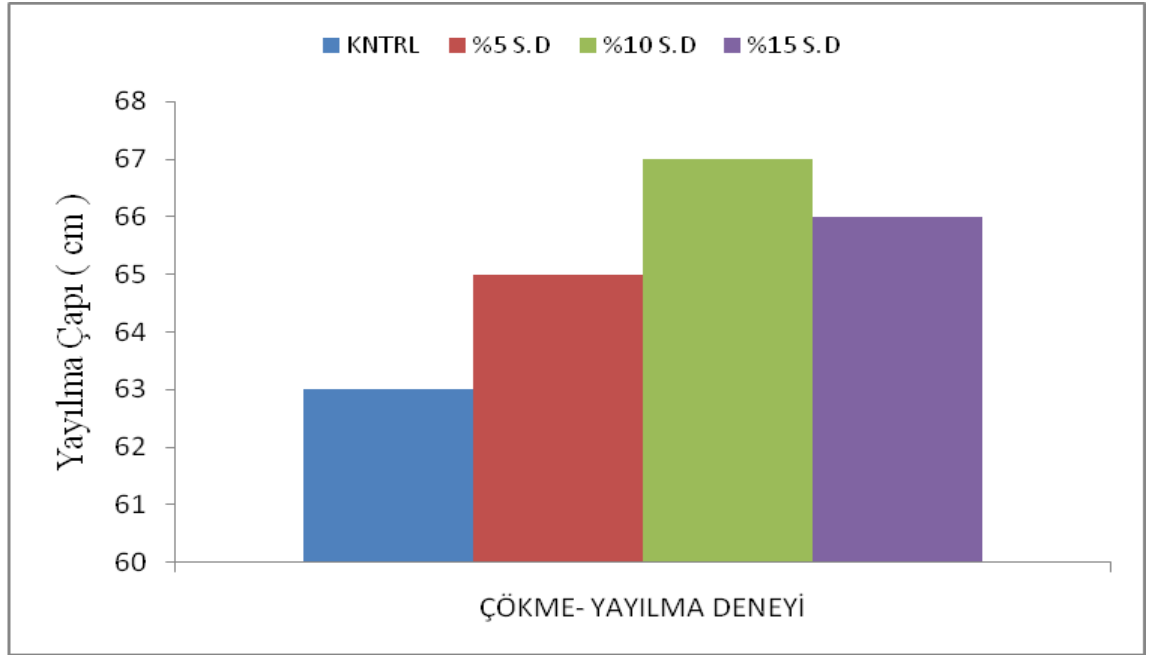


Şekil 4.5. Kontrol ve UK katkılı gurupların yükseklik farklarının karşılaştırılması

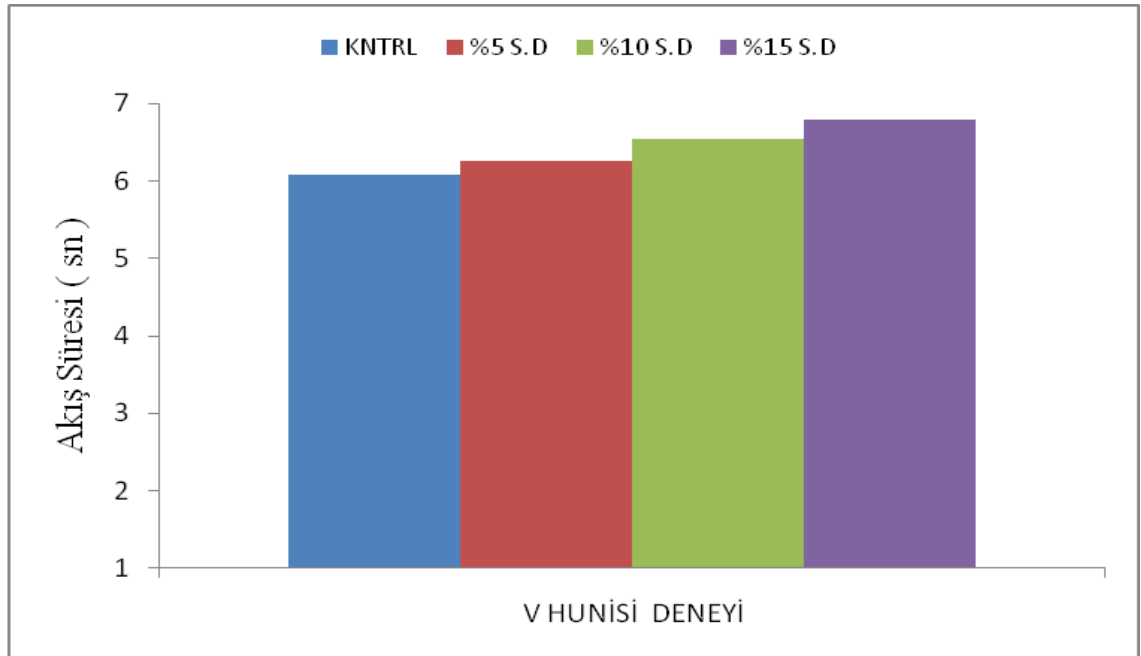
4.3.2. Silis dumanının etkisi

Şekil 4.6-4.9 incelendiğinde, çimento yerine ikame edilen SD'nin kullanım oranı arttıkça KYB'nin kendi ağırlığı ile yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerine, UK'nın aksine, olumsuz etki yaptığı görülmüştür. Bununla birlikte, SD oranının artırılması viskoziteyi artırmaktadır. SD kullanım oranı arttıkça su ihtiyacı artacağından, karışımın KYB özelliklerini taşıması için karışım suyu miktarı veya akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılmalıdır. Tüm guruplar için sabit S/B oranı kullanılan çalışmada, karışımlardaki SD miktarı arttıkça süperakışkanlaştırıcı katkı miktarında artırılması gerektiği belirlenmiştir.

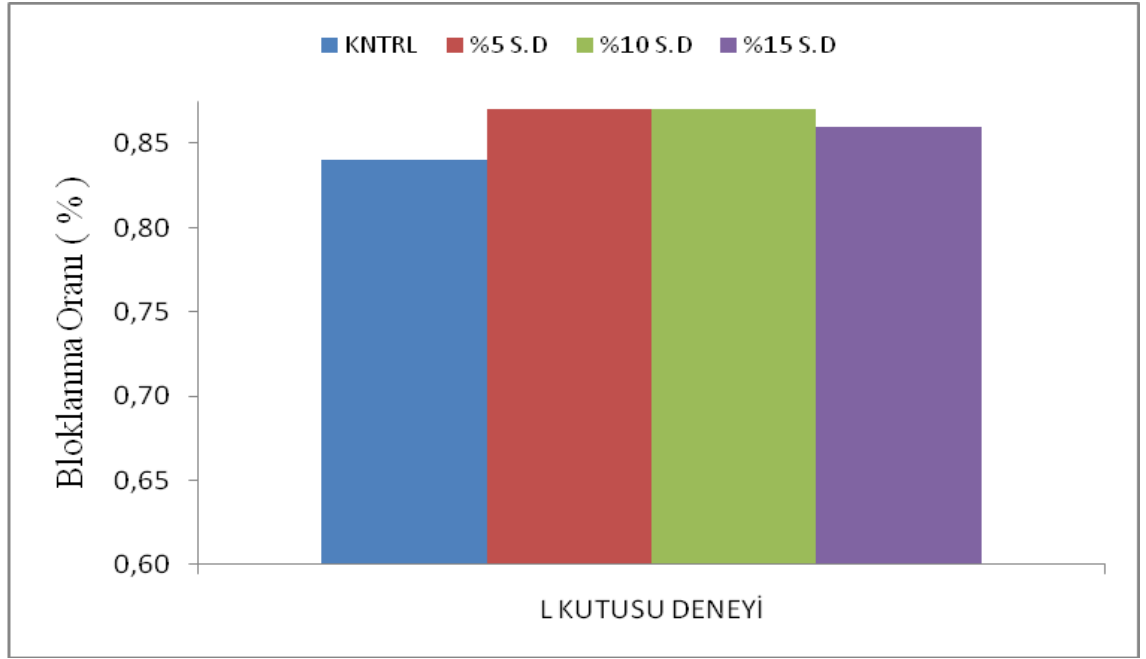
Sağlam ve Özkul (2006)'da yaptıkları çalışmalarında, UK ve SD betonların her ikisinde de MK/B ve S/B etkin parametreler olarak öne çıktığını, SD içeren betonlarda ek olarak, katkı/bağlayıcı oranının da etkili olduğunu belirtmişlerdir.



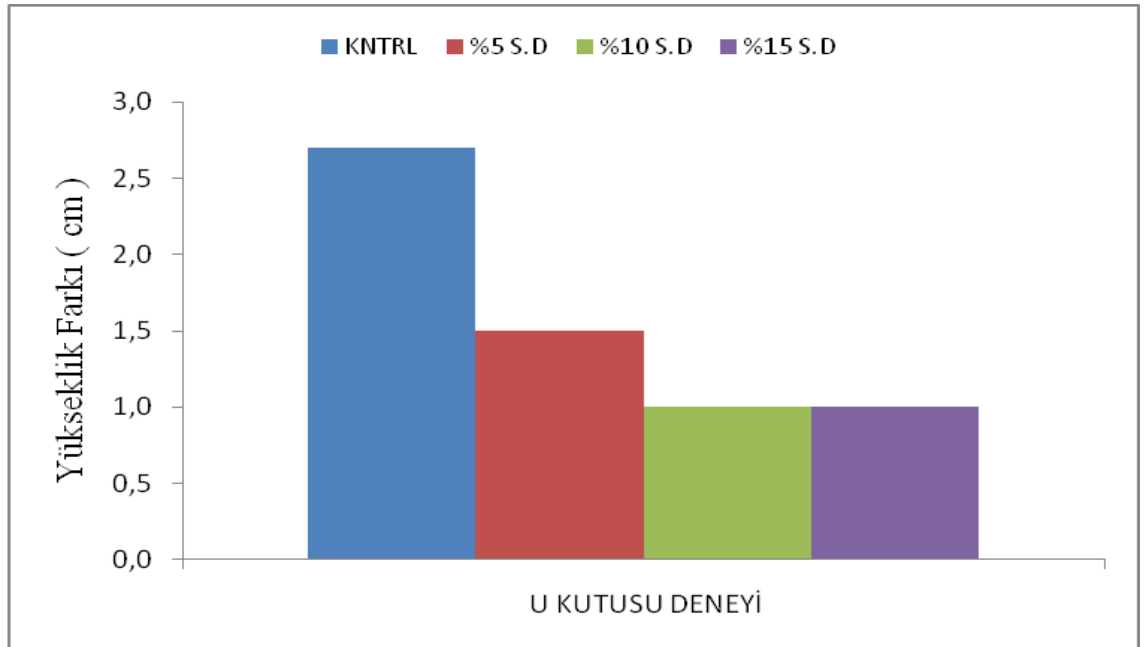
Şekil 4.6. Kontrol ve SD katkılı gurupların yayılma çaplarının karşılaştırılması



Şekil 4.7. Kontrol ve SD katkılı gurupların akış sürelerinin karşılaştırılması



Şekil 4.8. Kontrol ve SD katkılı gurupların bloklanma oranlarının karşılaştırılması



Şekil 4.9. Kontrol ve SD katkılı gurupların yükseklik farklarının karşılaştırılması

4.4. Kür Koşulları ve Mineral Katkıların Basınç Dayanımına Etkileri

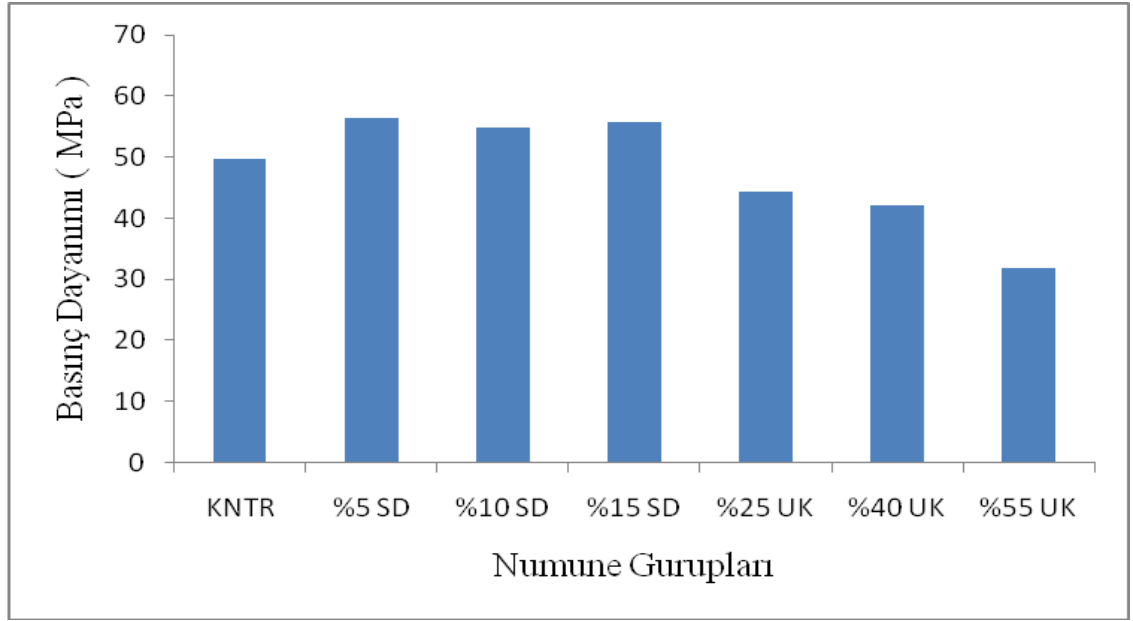
Bu bölümde, farklı kür koşulları uygulanan sertleşmiş beton numunelerindeki basınç dayanımı değişimleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan mineral katkıları (UK ve SD) ve kür koşullarının basınç dayanımına etkileri ayrı ayrı ele alınarak, grafiklerle birlikte 4.5 ve 4.6 Bölümlerinde tartışılmıştır.

4.4.1. Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları

Materyal ve Yöntem bölümünde açıklandığı şekliyle kür yöntemlerinin uygulandığı çalışmada, tüm gruplar için yapılan havada kürleme sonrası elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.17’de ve Şekil 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.17. Havada kürleme sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Numune Grubu	Basınç dayanımı (Mpa)
Kontrol	49,77
%5 S.D.	56,43
%10 S.D.	54,93
%15 S.D.	55,67
%25 U.K.	44,40
%40 U.K.	42,17
%55 U.K.	31,83



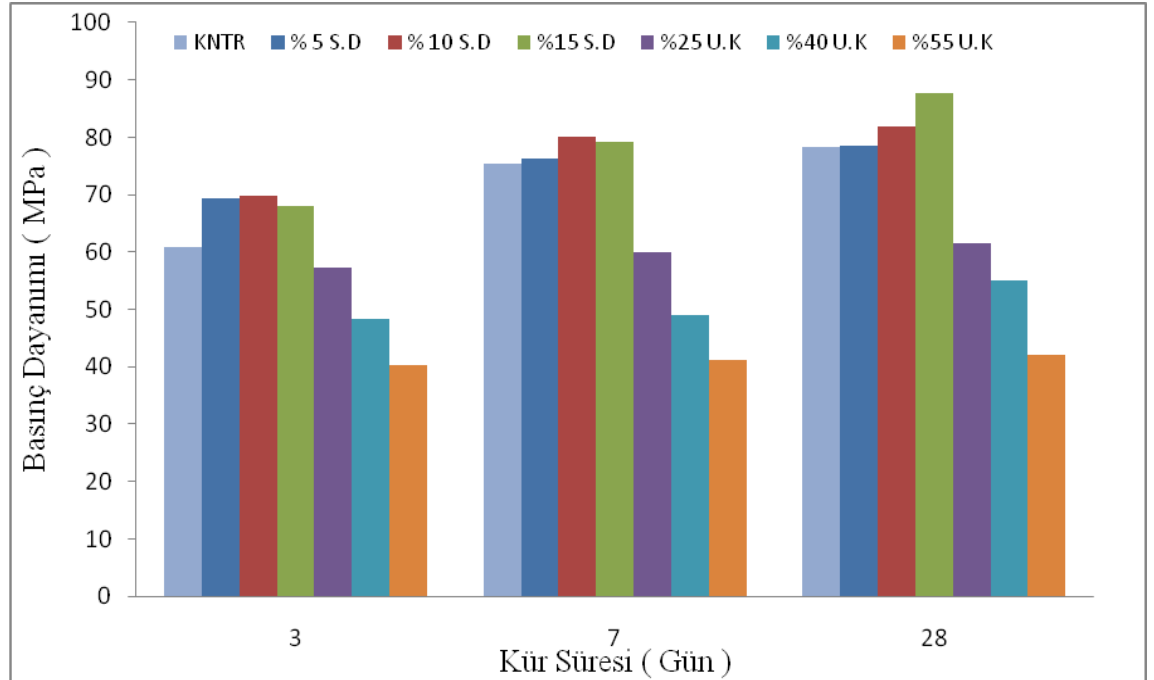
Şekil 4.10. Havada kürlene sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri

4.4.2. Suda kür edilen numunelerin basınç dayanımları

Tüm gruplara ait numuneler için 3, 7, 28 gün su kürü uygulamasından sonra elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.18’de ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Aynı gruplar için 3 gün su kürü, 3 günlük basınç dayanımı değerleri, 7 gün su kürü, 7 günlük basınç dayanım değerleri ve 28 gün su kürü, 28 günlük basınç dayanım değerleri, Çizelge 4.19’da ve Şekil 4.12’de sunulmuştur.

Çizelge 4.18. 3-7-28 gün su kürü uygulaması sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımları

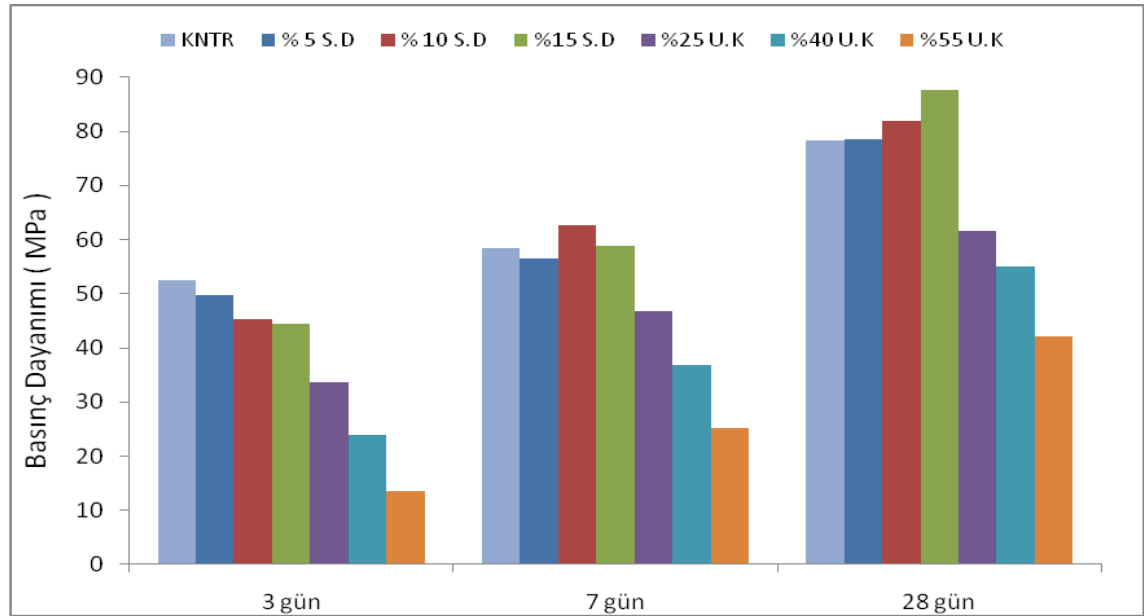
Numune grubu	28 günlük basınç dayanımı değerleri (MPa)		
	3 gün su kürü	7 gün su kürü	28 gün su kürü
Kontrol	60,90	75,40	78,30
%5 S.D.	69,30	76,37	78,43
%10 S.D.	69,73	80,10	81,93
%15 S.D.	68,10	79,30	87,63
%25 U.K.	57,20	59,93	61,53
%40 U.K.	48,37	49,07	55,10
%55 U.K.	40,17	41,13	42,03



Şekil.4.11. 3-7-28 gün su kürü uygulaması sonucu elde edilen 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırması

Çizelge 4.19. Su kürü uygulaması sonucu elde edilen 3, 7, 28 günlük basınç dayanımları

Numune grubu	Basınç dayanımı değerleri (MPa)		
	3 günlük	7 günlük	28 günlük
Kontrol	52,57	58,50	78,30
%5 S.D.	49,67	56,43	78,43
%10 S.D.	45,23	62,60	81,93
%15 S.D.	44,37	58,83	87,63
%25 U.K.	33,70	46,87	61,53
%40 U.K.	24,00	36,87	55,10
%55 U.K.	13,60	25,23	42,03



Şekil 4.12. Su kürü uygulaması sonucu elde edilen 3, 7, 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

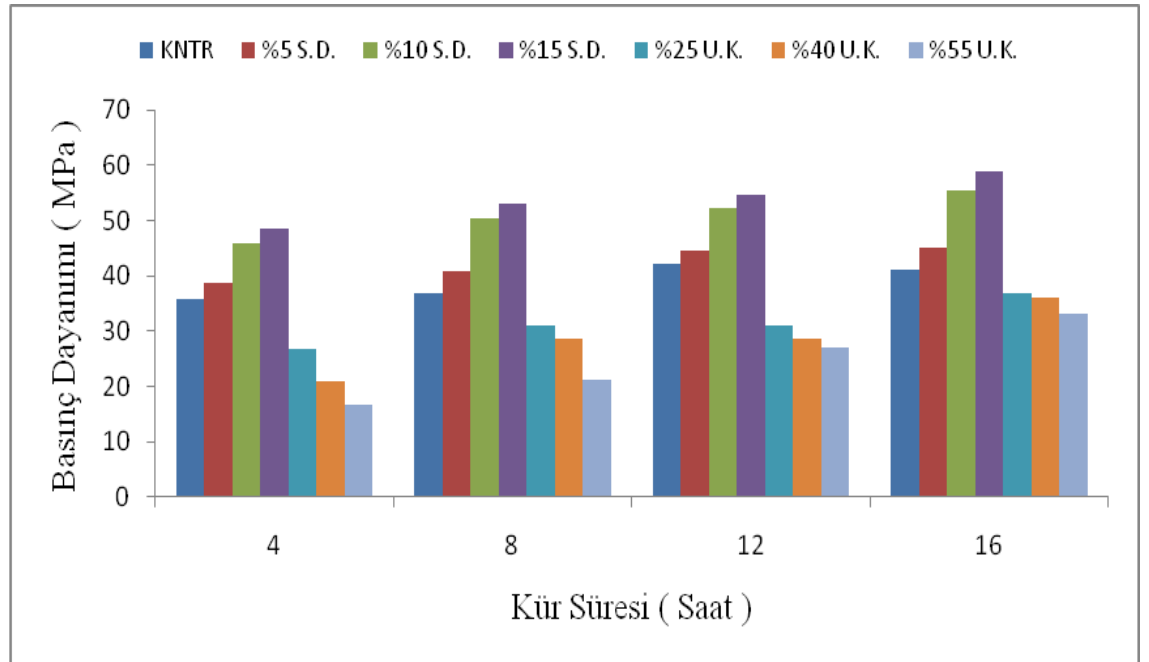
4.4.3. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı

Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarının tümünde ön bekleme süresi 4 saat, kontrollü ısıtma ve soğutma süreleri de kürleme sıcaklığına bağlı olarak 2, 2,5 ve 3 saat

olarak belirlenmiştir. Tüm gruplarda 60°C, 70°C ve 80°C sıcaklıklarda, 4, 8, 12 ve 16 saat süreyle buhar kürü uygulaması yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.20-4.22’de ve Şekil 4.13-4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. 60°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları

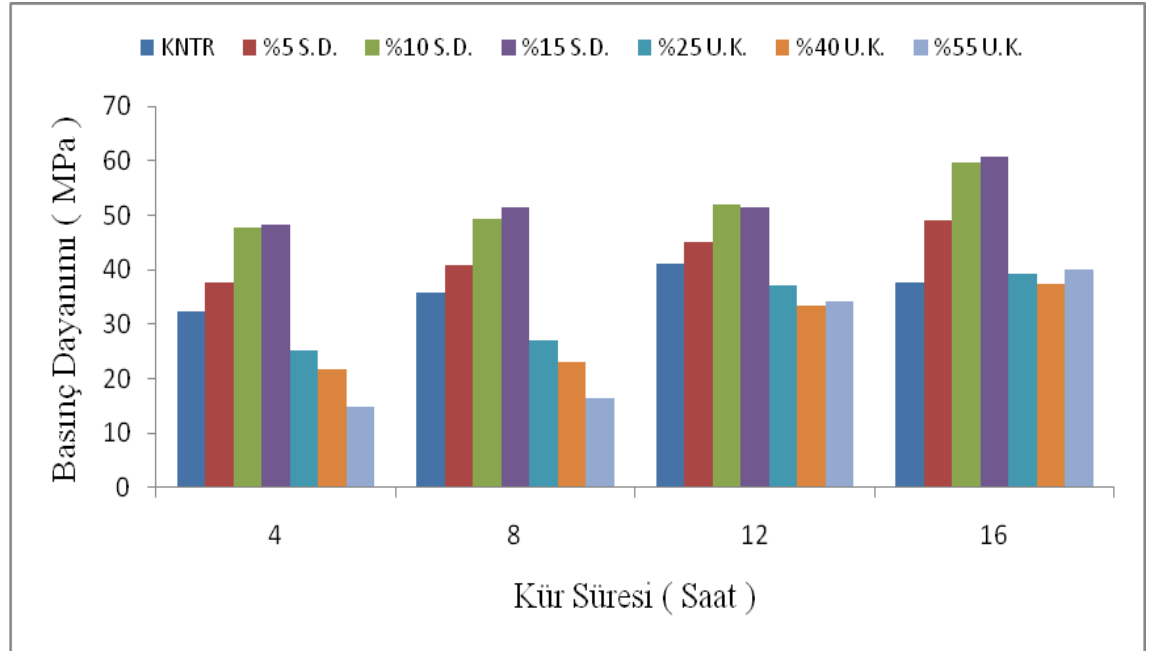
Numune gurubu	Basınç dayanımı (MPa)			
	Kürleme süresi			
	4 saat	8 saat	12 saat	16 saat
Kontrol	35,80	36,87	42,07	41,10
%5 S.D.	38,70	40,87	44,50	45,20
%10 S.D.	46,00	50,30	52,37	55,50
%15 S.D.	48,53	52,97	54,70	58,80
%25 U.K.	26,87	30,93	31,07	37,00
%40 U.K.	20,87	28,70	28,73	35,97
%55 U.K.	16,80	21,20	27,17	33,07



Şekil 4.13. 60°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.21. 70°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları

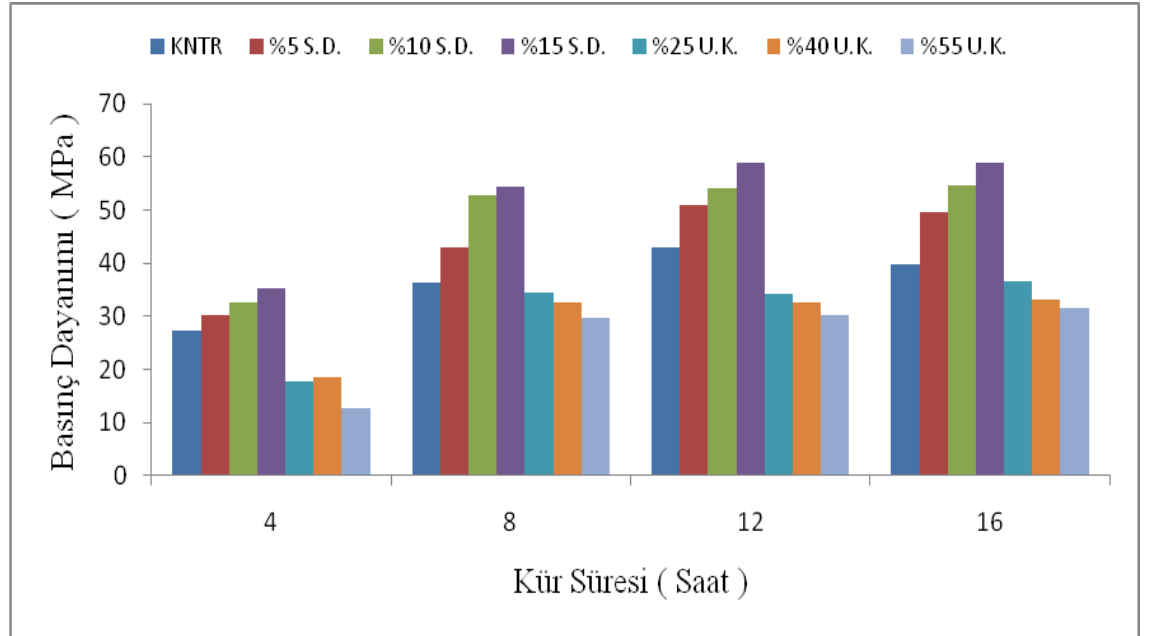
Numune gurubu	Basınç dayanımı (MPa)			
	Kürleme süresi			
	4 saat	8 saat	12 saat	16 saat
Kontrol	32,27	35,70	41,23	37,80
%5 S.D.	37,57	40,83	45,03	48,97
%10 S.D.	47,63	49,30	52,07	59,77
%15 S.D.	48,33	51,37	51,53	60,83
%25 U.K.	25,20	27,07	37,03	39,27
%40 U.K.	21,83	23,03	33,43	37,30
%55 U.K.	14,87	16,40	34,13	39,93



Şekil 4.14. 70°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.22. 80°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımları

Numune gurubu	Basınç dayanımı (MPa)			
	Kürleme süresi			
	4 saat	8 saat	12 saat	16 saat
Kontrol	27,27	36,37	42,97	39,87
%5 S.D.	30,13	43,10	50,87	49,53
%10 S.D.	32,73	52,80	54,03	54,57
%15 S.D.	35,33	54,47	58,83	58,90
%25 U.K.	17,83	34,60	34,30	36,67
%40 U.K.	18,43	32,50	32,50	33,07
%55 U.K.	12,77	29,60	30,13	31,67



Şekil 4.15. 80°C sıcaklıkta buhar kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının kür süresine bağlı olarak değişimi

4.5. Mineral Katkıların Basınç Dayanımına Etkileri

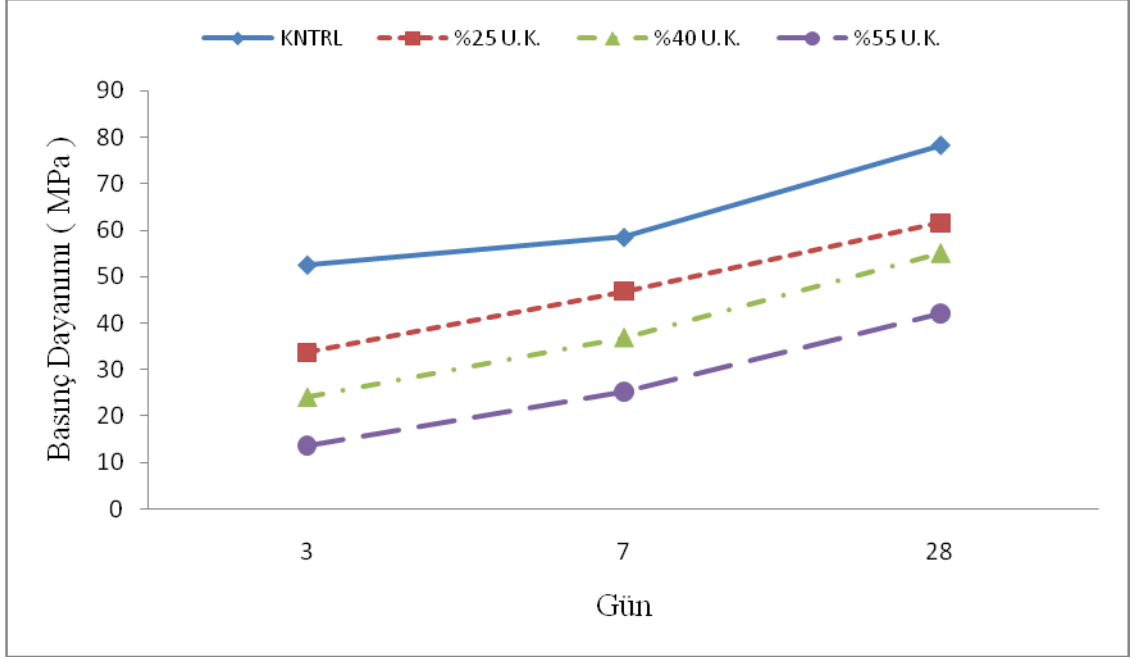
Çalışmada kullanılan mineral katkılardan uçucu külün KYB'nin taze beton özelliklerine etkisi 4.5.1 konu başlığı altında, silis dumanının etkisi ise 4.5.2 konu başlığı altında incelenmiştir.

4.5.1. Uçucu külün etkisi

Beton karışımlarında %25, %40 ve %55 oranlarında UK kullanılarak üretilen KYB'lerin 3, 7 ve 28 günlük dayanımları Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, UK ilavesinin her yaşta dayanımda azalmalara yol açtığı görülmektedir. UK miktarı arttıkça dayanımlardaki düşüş oranları da artmıştır. Her yaş için en yüksek dayanımlar kontrol grubunda belirlenirken, UK miktarının en fazla olduğu %55 grubu en düşük dayanımları vermiştir. 3 günlük dayanımlarda %25, %40 ve %55 UK katkılı betonların dayanımları kontrol grubuna göre sırasıyla yaklaşık %36, %46 ve %74 oranlarında azalmıştır. Bu azalma oranları 7 günlük numuneler için sırasıyla yaklaşık %20, %37 ve %57 olarak belirlenirken 28 günlük dayanımlarda da benzer olarak sırasıyla yaklaşık %21, %30 ve %46 oranlarında azalmalar tespit edilmiştir. Zamana bağlı olarak UK katkılı betonlarda dayanımlardaki düşüş miktarları azalmıştır. Bu duruma puzolanik etkinin sebep olduğu düşünülmektedir. UK erken yaşlarda puzolanik etkisini ortaya koymadığı için dayanımlarda azalmalara sebep olmuştur. Ancak 28 günden sonraki yaşlarda deneyler yapılmadığı için UK'nın puzolanik etkisi ve dayanımları geç yaşlarda ne oranda etkileyeceği tespit edilememiştir.

Şengül vd. (2007)'de yapıtları çalışmada, 28. günde, uçucu kül içeren betonların basınç dayanımları normal betona göre daha düşük olduğunu, 56 ve 120. günlerde ise %30 oranına kadar uçucu kül içeren betonların dayanımlarının normal betonla yaklaşık aynı değerde olduğunu, %30 dan daha fazla oranda uçucu kül kullanımının ise dayanımda düşüslere neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Gesoğlu vd. (2007)'de yaptıkları çalışmalarında UK içeren karışımların basınç dayanımlarının, kontrol betonunun basınç dayanımlarına göre belirgin bir şekilde azaldığını belirlemişlerdir.



Şekil 4.16. Kontrol ve UK katkılı guruplarının 3-7-28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

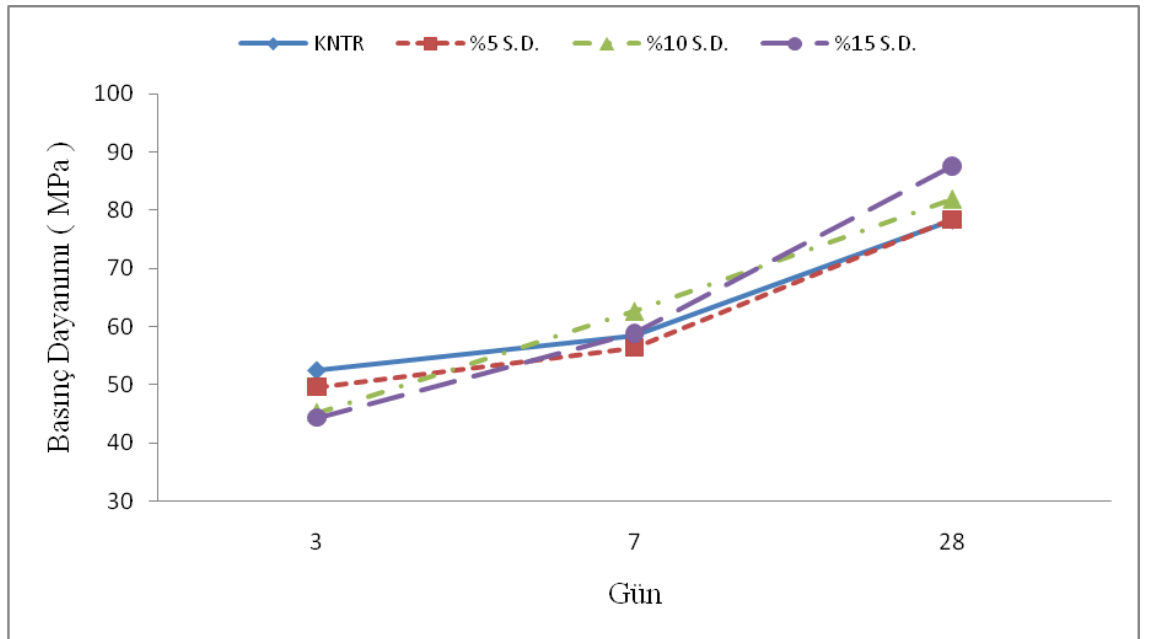
4.5.2. Silis dumanının etkisi

Beton karışımlarında %5, %10 ve %15 oranlarında SD kullanılarak üretilen KYB'lerin 3, 7 ve 28 günlük dayanımları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, SD ilavesinin 28 günlük dayanımlarda önemli ölçüde artışa sebep olduğu görülmektedir. Bununla birlikte erken yaşlarda SD ilavesi dayanımda önemli ölçüde etki göstermemiştir. 3 günlük dayanımlarda kontrol grubu numuneleri 52,57 MPa değeriyle en yüksek dayanıma sahip beton olarak belirlenirken, SD oranı artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde azalmalar görülmüştür. 3 günlük numunelerde en düşük değer 44,37 MPa ile %15 SD kullanılan numunelerde tespit edilmiştir. 7 günlük dayanımlar incelendiğinde %10 SD katkılı grup 62,60 MPa değeriyle en yüksek dayanıma sahip

olurken kontrol grubunun basınç dayanımı 58,50 MPa olmuştur. 28 günlük numuneler için %15 SD katkılı betonlar, kontrol grubuna göre yaklaşık %12 daha fazla dayanım kazanarak 87,63 MPa değerine ulaşmıştır. Bu oran %10 SD katkılı betonlar için %4,5 olurken %5 SD katkılı betonlarda çok belirgin bir artış görülmemiştir. Bu betonların basınç dayanımları kontrol grubuyla hemen hemen aynı değerde kalmıştır. SD ikameli KYB karışım numunelerine ait basınç dayanımı değerlerinin yüksek oluşunun sebebi olarak, puzolanik etkileşim sonucu serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in dayanımı sağlayan C-S-H jeline dönüşümünün olumlu etkisi düşünülebilir.

Demir vd. (2009)'da yaptıkları çalışmada, UK'nın erken yaşlarda basınç dayanımında düşüslere, SD'nin ise basınç dayanımında artışlara sebep olduğunu, SD katkılı betonların hem basınç dayanımı, hemde yarmada çekme dayanımı değerleriyle 7 ve 28. günde UK'ya oranla çok daha fazla dayanım gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar da teknik literatürde yer alan sonuçlara benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.17. Kontrol ve SD katkılı gruplarının 3-7-28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

4.6. Kür Koşullarının Basınç Dayanımına Etkisi

Çalışmada uygulanan kür koşullarından hava kürünün basınç dayanımına etkisi 4.6.1, su kürünün basınç dayanımına etkisi 4.6.2 ve atmosferik basınçlı buhar kürünün basınç dayanımına etkisi ise 4.6.3 konu başlıkları altında incelenmiştir.

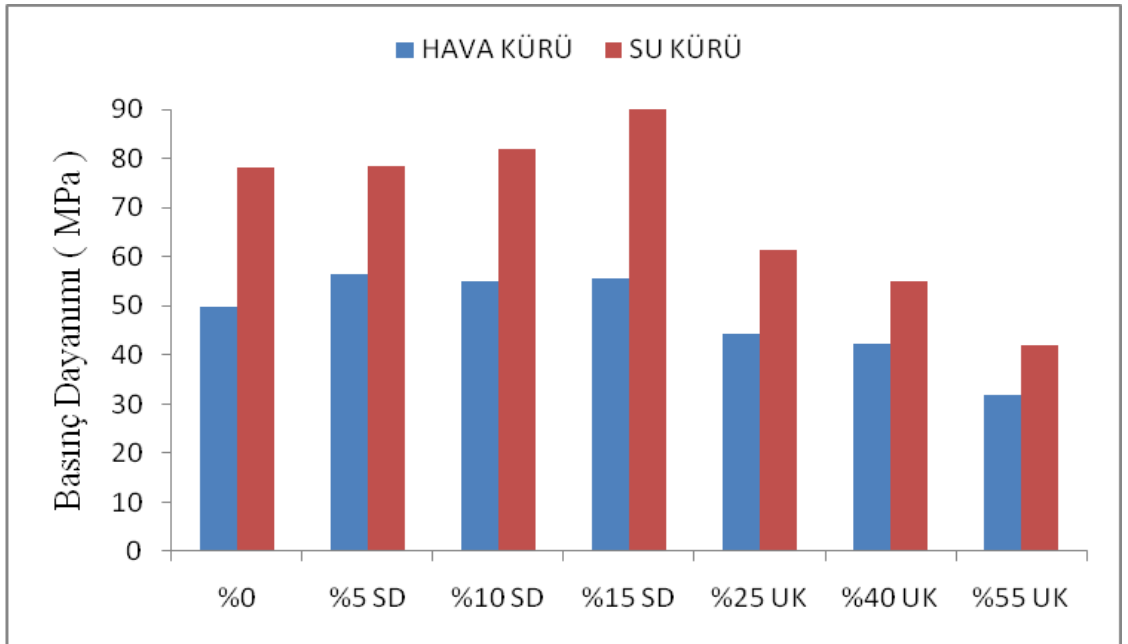
4.6.1. Hava kürünün basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.17’de 28 gün boyunca havada kür edilen numunelerin basınç dayanımları, her guruba ait standart basınç dayanımları ile birlikte verilmiştir. Su içerisinde kür edilen betonların 28 günlük dayanımları standart dayanım olarak kabul edildiğinden hava kürü uygulanan numunelerin dayanımlarının karşılaştırılmasında, 28 günlük su kürü numuneleri kullanılmıştır. Tüm guruplarda hava kürü uygulanması, dayanımlarda azalmalara yol açmıştır. Bu azalma %0 gurubunda (mineral katkı kullanılmamış), %37, %5 SD gurubunda %28, %10 SD gurubunda %33, %15 SD gurubunda %37, %25 UK gurubunda %28, %40 UK gurubunda %24, %55 UK gurubunda ise % 25 oranında gerçekleşmiştir. Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmanın sebebi olarak, beton bünyesinde bulunan suyun buharlaşarak uzaklaşması sonucu hidratasyon için gerekli su miktarının azalması ve bu nedenle hidratasyonun tamamlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Hava kürü uygulanan, UK katkılı betonlardaki basınç dayanımı azalmaları, diğer guruplara göre daha düşük oranda gerçekleşmiştir. %20-30 oranlarında UK kullanımı betonun su ihtiyacını yaklaşık %7 oranında azaltır (Erdoğan 2003). Bunun sonucu olarak, beton içerisinde hidratasyon için kullanılacak su miktarı, aynı S/B oranıyla üretilen diğer beton guruplarına göre artacaktır. Böylece hidratasyon daha fazla oranda gerçekleşecektir. Diğer beton guruplarına göre daha düşük oranda gerçekleşen dayanım kayıpları, UK kullanımının betondaki su ihtiyacını azaltmasıyla açıklanabilir.

SD katkılı betonlardaki basınç dayanımı azalma oranları, SD oranı arttıkça artmaktadır. Bu azalma, %15 SD katkılı betonlarla %0 gurubu betonlarında aynı oranda gerçekleşmiştir. UK'nın aksine beton üretiminde SD kullanımı su ihtiyacını artırmaktadır. Dolayısıyla hidratasyon için kullanılabilecek su miktarı SD katkılı guruplarda daha az olacaktır. Bu durumda, %15 SD katkılı betonlardaki dayanım kaybının %0 gurubundan daha fazla olması beklenmektedir. Her iki beton gurubunda da dayanım kaybının aynı oranda gerçekleşmesi, SD katkılı betonlarda terlemenin daha az olmasıyla ilişkilendirilebilir.

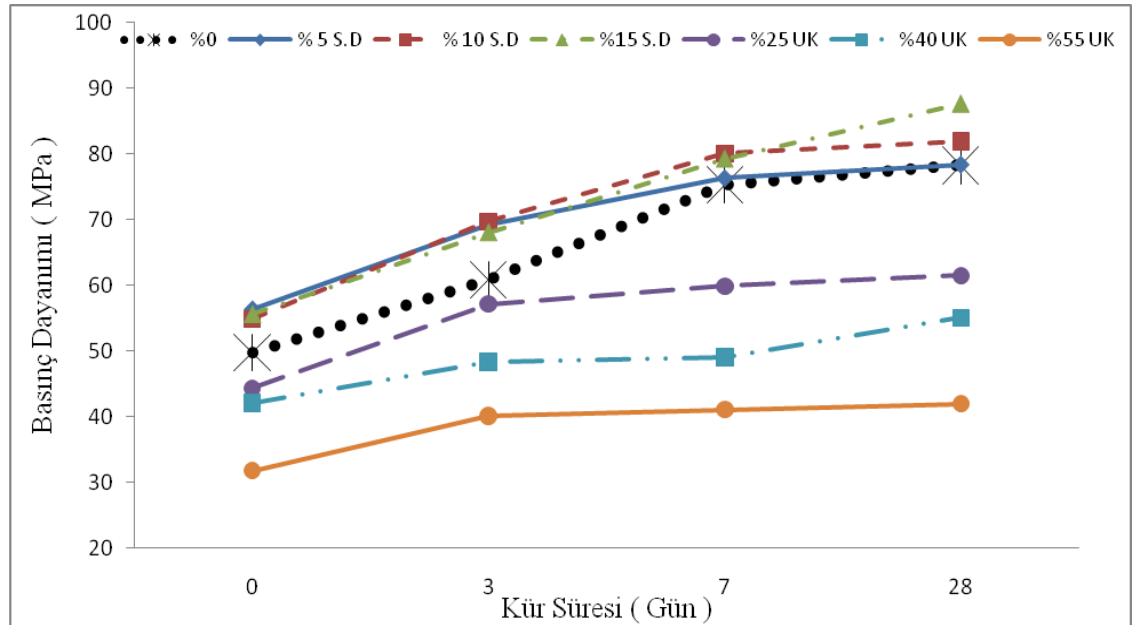
SD tanelerinin yüzey alanlarının çok büyük olması, taze beton içerisindeki serbest suyun önemli ölçüde bağlanmasına ve bu suyun beton yüzeyine çıkmasının yavaşlamasına neden olurlar. Yani SD katkılı betonlarda terleme önemli miktarda azalmaktadır (Avar 2006).



Şekil 4.18. Hava kürü uygulaması sonucu elde edilen basınç dayanımlarının standart dayanımlar ile karşılaştırması

4.6.2. Su kürü süresinin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.19'da katkısız (%0) ve mineral katkılı (%5 SD, %10 SD, %15 SD, %25 UK, %40 UK, %55 UK) betonların 0, 3, 7 ve 28 günlük su kürü sonucu elde edilen basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Kür süresi uzadıkça her grup için basınç dayanımının beklenildiği şekilde arttığı belirlenmiştir. 3 gün su kürü uygulanan %0 grubu numunelerinde standart dayanımın %77'sine ulaşılırken, aynı grupta 7 gün su kürü uygulanması durumunda ise nihai dayanımın %96'sı elde edilmiştir. UK ve SD katkıli betonlarda da kür süresinin artması dayanımda artışlara yol açmakla beraber, katkısız betonlardan farklı olarak daha kısa kür sürelerinde daha yüksek dayanım kazanma oranları elde edilmiştir. 3 günlük su kürü uygulanması neticesinde özellikle UK katkıli betonların dayanımlarının önemli bir kısmını kazandığı ve standart dayanımlara yakın değerlere ulaşıldığı görülmektedir. %25, %40 ve %55 UK katkıli grupların 3 gün su kürü neticesinde nihai dayanımlarının sırasıyla %93, %87 ve %95'lik kısımlarını kazandıkları belirlenmiştir. SD katkıli gruplarda ise %5, %10 ve %15 kullanım oranları için %88, %85 ve %77 oranlarında dayanım kazanımları hesaplanmıştır.

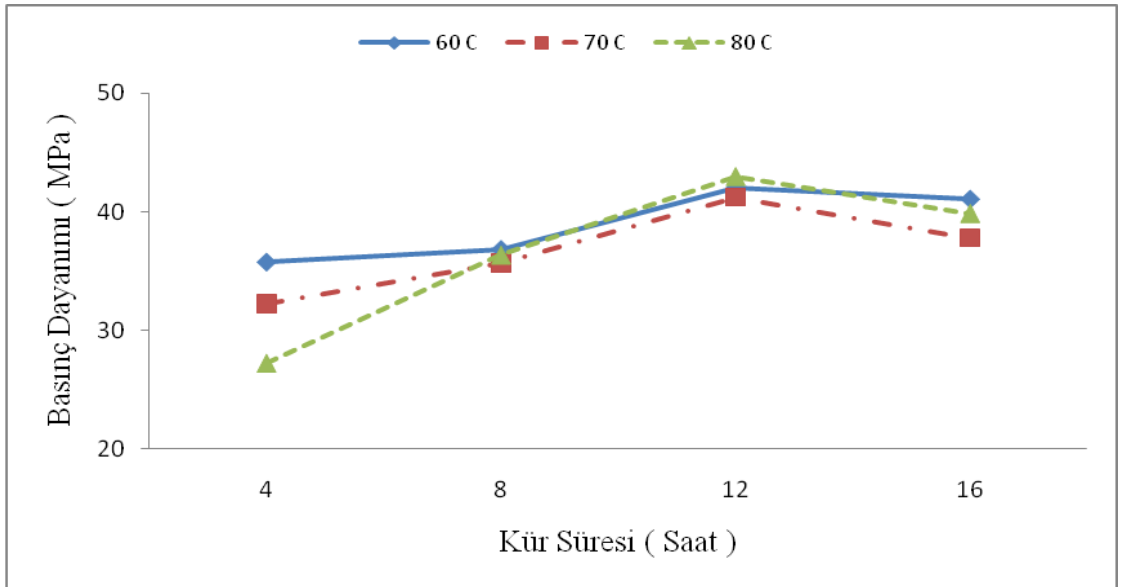


Şekil 4.19. Su kürü sürelerinin basınç dayanımlarına etkisi

SD katkılı betonlardan, bütün kür sürelerinde katkısız betonlara göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. UK katkılı betonlarda ise elde edilen dayanımlar katkısız betonlardan daha düşük olmuştur.

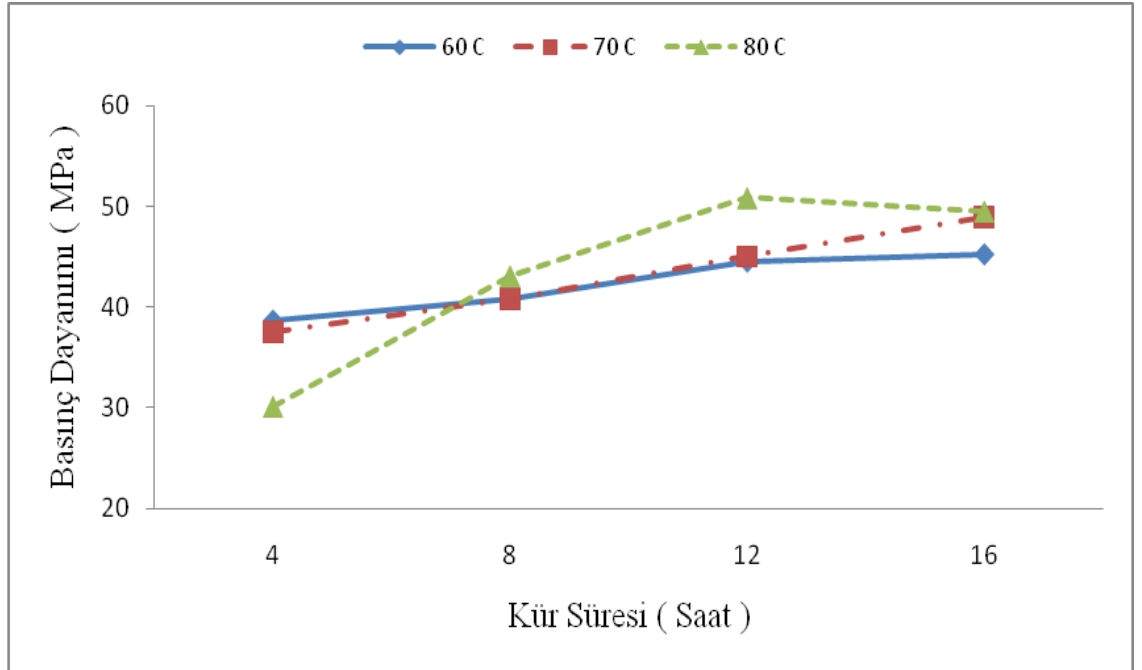
4.6.3. Atmosferik basınçlı buhar kürünün basınç dayanımına etkisi

Mineral katkı kullanılmayan (%0 gurubu) betonların, atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamasında, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak, basınç dayanımları değişimi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. En kısa kür süresi olan 4 saat için bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu durum 4 saat kür süresinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Kür süresinin artırılmasıyla beraber, 12 saate kadar tüm sıcaklıklarda basınç dayanımı değerleri artmış, 16 saat kür süresi sonucunda dayanımlarda azalmalar tespit edilmiştir. Mineral katkı kullanılmayan betonlar için 60°C, 70°C ve 80°C kür sıcaklıklarının hepsinde optimum kür süresinin 12 saat olduğu belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı (42,97 Mpa), 80°C sıcaklık 12 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %55’ine karşılık gelmektedir.



Sekil 4.20. %0 gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulanan betonlar, sahip oldukları hidratasyon ürünlerinin yapısı itibariyle, normal koşullarda kür edilen betonlardan fazla bir farklılık göstermemektedir. Hidratasyon sonucunda oluşan ve bağlayıcılık sağlayan C-S-H jelleri, normal koşullarda kür edilen betonlardaki gibi, amorf yapıdadır. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulandığında hidratasyon olayı daha hızlı yer almakta ve beton daha kısa sürede dayanım kazanmaktadır. Betonun ileriki yaşlarda dayanımı ise normal koşullarda kür edileninkine göre biraz daha düşük olmaktadır. Buna neden olarak yüksek sıcaklığın etkisiyle ilk zamanlarda oluşmuş olan çimento jellerinin dağılımının üniform olmaması öne sürülmektedir (Erdoğan,2003).

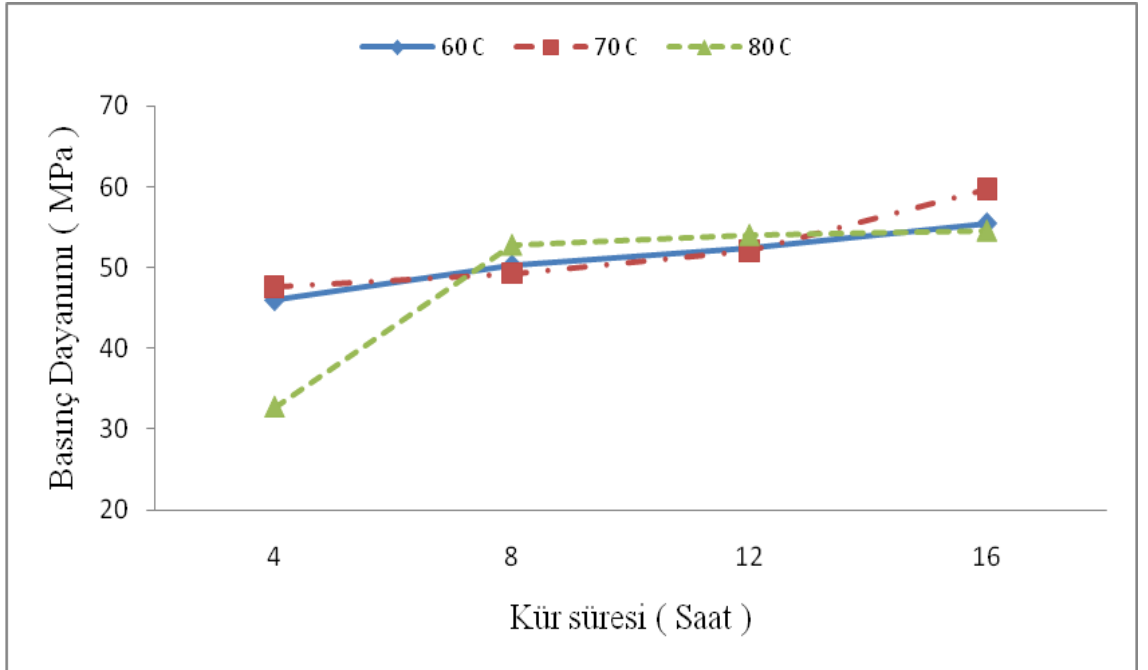


Şekil 4.21. %5 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

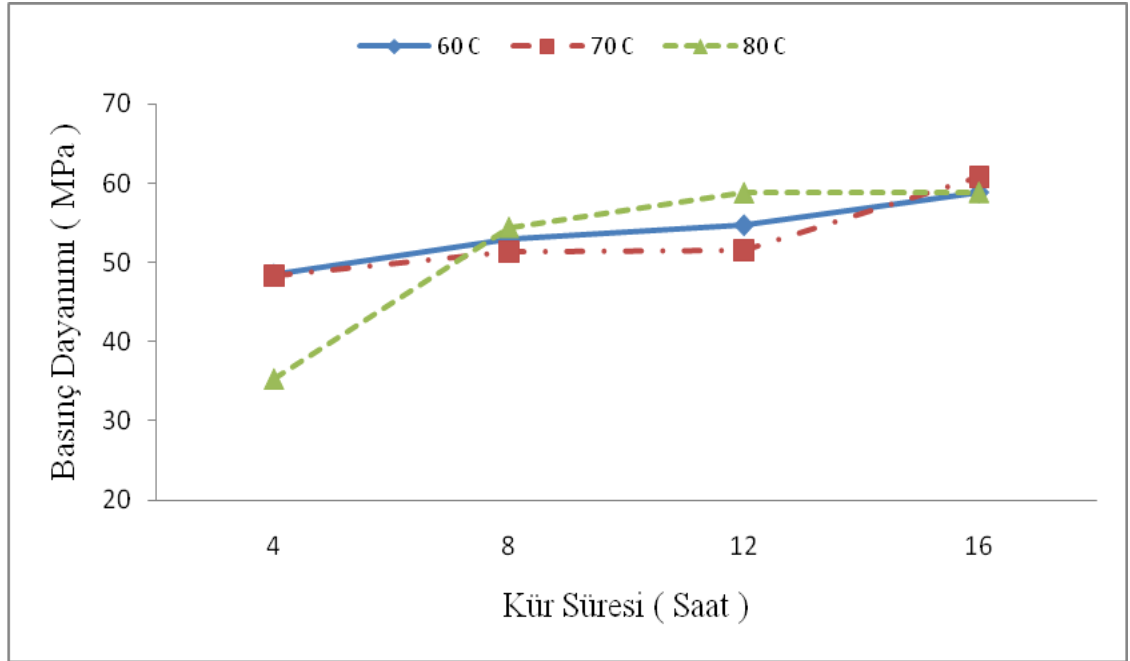
Şekil 4.21’de %5 SD katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları değişimleri gösterilmiştir. % 0 gurubuna benzer şekilde 4 saat kür uygulamasında, bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Kür süresinin artırılmasıyla birlikte, 12 saate kadar tüm sıcaklıklarda basınç dayanımı değerleri artmış, 16 saat kür süresi sonucunda dayanımlarda azalmalar tespit edilmiştir.

%5 SD katkılı betonlar için 60°C, 70°C ve 80°C kür sıcaklıklarının hepsinde optimum kür süresinin 12 saat olduğu belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı (50,87 Mpa), 80°C sıcaklık 12 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %65'ine karşılık gelmektedir.

%10 SD katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak, basınç dayanımları değişimi Şekil 4.22'de gösterilmiştir. En kısa kür süresi olan 4 saat için bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. 80°C kür sıcaklığında 8 saat kürlemeden sonra basınç dayanımındaki artış oranı çok düşük olduğundan 80°C kür sıcaklığı için optimum kür süresinin 8 saat olduğu söylenebilir. 60°C ve 70°C kür sıcaklıklarında kür süresinin artırılmasıyla basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı (59,77 Mpa), 70°C sıcaklık 16 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %73'üne karşılık gelmektedir.



Şekil 4.22. %10 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

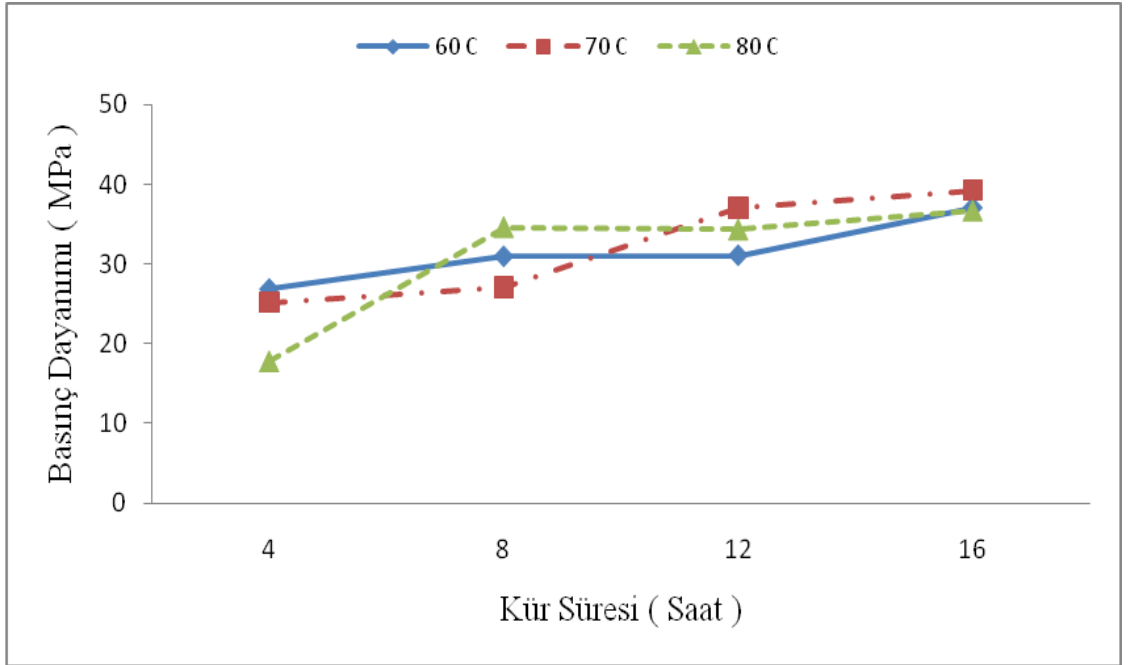


Şekil 4.23. %15 SD gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.23’de %15 SD katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları değişimleri gösterilmiştir. Bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları atmosferik basınçlı buhar kürünün 4 saat uygulandığı numunelerde elde edilmiştir. 80°C kür sıcaklığında 12 saate kadar basınç dayanımları artarken, 16 saatin sonunda ise basınç dayanımında azalma tespit edilmiştir. 80°C kür sıcaklığı için optimum kür süresi 12 saat olarak belirlenmiştir. 60°C ve 70°C kür sıcaklıklarında %10 SD katkılı betonlara benzer şekilde, kür süresinin artırılmasıyla basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı (60,83 Mpa), 70°C sıcaklık 16 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %69’una karşılık gelmektedir.

%25 UK katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak, basınç dayanımları değişimi Şekil 4.24’te gösterilmiştir. En kısa kür süresi olan 4 saat için bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu durum 4 saat kür süresinin yetersiz olduğunu göstermektedir. 80°C kür sıcaklığında 8 saat kürleme süresi sonunda elde edilen basınç dayanımı 12 ve 16 saat kürleme sürelerinde çok fazla

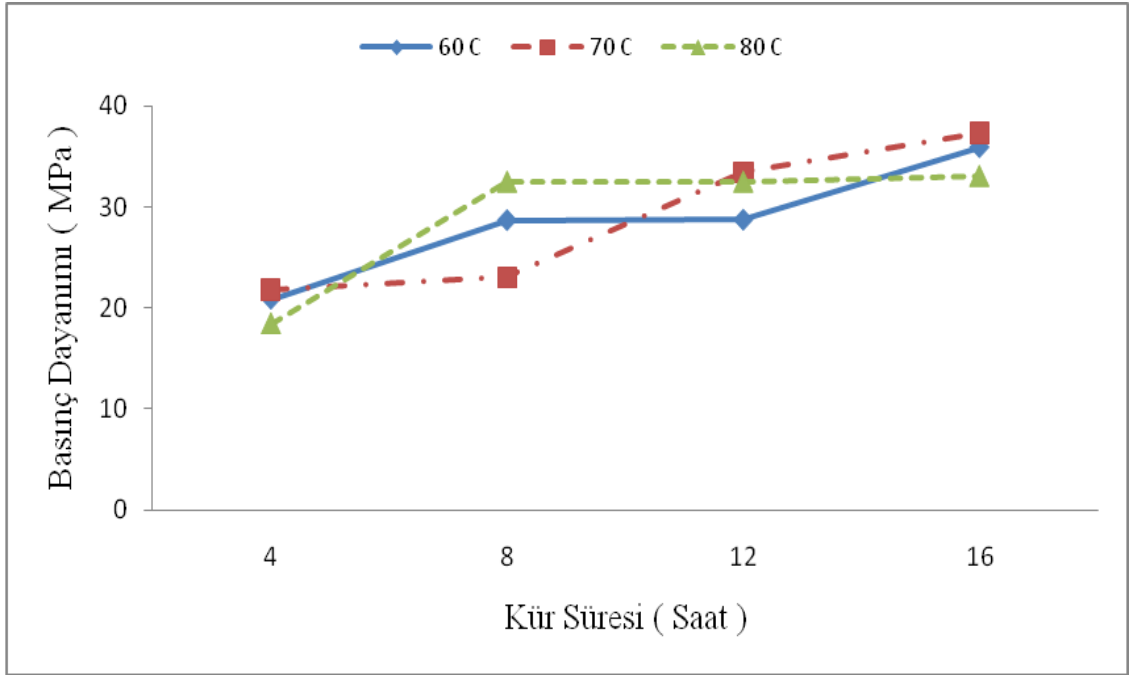
artış göstermemiştir. Bu nedenle %25 UK katkılı grup için, 80°C sıcaklıkta 8 saat kürleme süresinin optimum değer olduğu söylenebilir. 60°C sıcaklıkta ise basınç dayanımının artışı 12 saatten sonra daha belirgin şekilde artmıştır. Bu durum düşük sıcaklıklarda basınç dayanımının artışının uzun kürleme süreleriyle ilişkilendirilebilir. 70°C kürleme sıcaklığında ise basınç dayanımı artışı 8-12 saat kürleme süresinde daha fazla olmuştur. En yüksek basınç dayanımı (39,27 Mpa), 70°C sıcaklık 16 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %64'üne karşılık gelmektedir.



Şekil 4.24. %25 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 4.25’de %40 UK katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak basınç dayanımları değişimleri gösterilmiştir. Bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları atmosferik basınçlı buhar kürünün 4 saat uygulandığı numunelerde elde edilmiştir. 80°C kür sıcaklığında 8 saat kürleme süresi sonunda elde edilen basınç dayanımı 12 ve 16 saat kürleme sürelerinde çok fazla artış göstermemiştir. Bu nedenle %40 UK katkılı grup için, 80°C sıcaklıkta 8 saat kürleme süresinin optimum değer olduğu söylenebilir. 60°C kür sıcaklığında, basınç dayanımının artışı 12 saatten

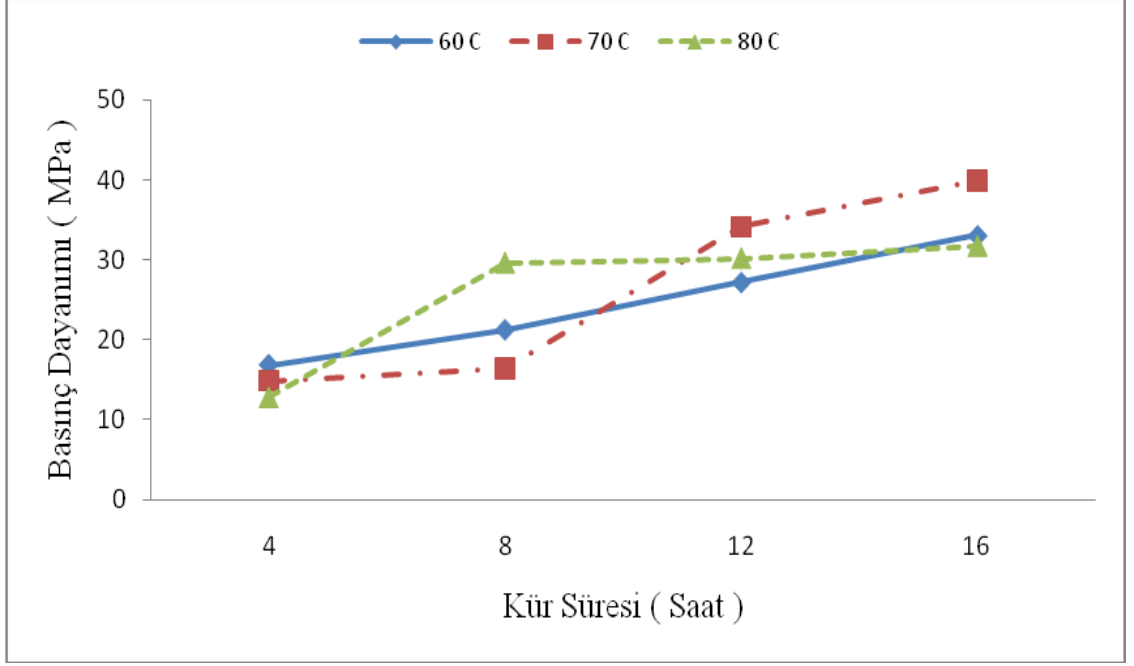
sonra daha beirgin şekilde artmıştır. Bu durum düşük sıcaklıklarda basınç dayanımının artışının uzun kürleme süreleriyle ilişkilendirilebilir. 70°C kürleme sıcaklığında ise basınç dayanımı artışı kürleme süresine bağlı olarak artış göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı (37,30 Mpa), 70°C sıcaklık 16 saat kür süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %68'ine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.25. %40 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

%55 UK katkılı betonların, kür sıcaklığı ve kür süresine bağlı olarak, basınç dayanımları değişimi Şekil 4.26'da gösterilmiştir. En kısa kür süresi olan 4 saat için bütün kür sıcaklıklarında en düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. 80°C kür sıcaklığında 8 saat kürleme süresi sonunda elde edilen basınç dayanımı 12 ve 16 saat kürleme sürelerinde çok fazla artış göstermemiştir. %55 UK katkılı grup için, 80°C sıcaklıkta 8 saat kürleme süresinin optimum değer olduğu söylenebilir. 60°C ve 70°C sıcaklıkta ise basınç dayanımlarının artışı kür süresiyle doğru orantılı olarak artmıştır. 70°C kürleme sıcaklığında ise basınç dayanımı artışı 8-12 saat kürleme süresinde daha fazla olmuştur. En yüksek basınç dayanımı (39,93 Mpa), 70°C sıcaklık 16 saat kür

süresinde elde edilmiştir. Bu değer standart basınç dayanımının %95'ine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.26. %55 UK gurubu numunelerinin farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Yukarıda verilen sonuçlar değerlendirildiğinde, atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarında mineral katkı kullanılan gruplarda katkısız betonlara göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Katkısız grupta nihai dayanımlara göre yapılan kıyaslamada en yüksek dayanım kazanma oranı %55 olarak hesaplanırken bu değer %55 UK kullanılması durumunda %95'e çıktığı belirlenmiştir. Bu durumun kullanılan çimento türünden kaynaklandığı düşünülebilir. Türkel and Akbaş (2004)'e göre katkılı çimentolar normal portland çimentolarına nazaran atmosferik basınçlı buhar küründe daha olumlu sonuç vermektedir. Bu çalışmada da mineral katkı kullanılması suretiyle çimento miktarları azaltılmış ve katkı miktarının artışıyla çimento türünden kaynaklanan olumsuz etki azalmıştır. Böylelikle mineral katkılı gruplarda atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarında daha yüksek nispi dayanımlar elde edildiği belirlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

1. Çalışmada su/bağlayıcı miktarı sabit tutularak çimento yerine değişik oranlarda UK ve SD ikame edilerek 7 farklı grupta betonlar üretilmiştir. Çökme-yayılma deney sonuçlarına göre, en düşük yayılma çapı 63 cm ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı grup 70 cm yayılma çapıyla en yüksek değere ulaşmıştır. EFNARC 2005'e göre yayılma çapları dikkate alındığında kontrol ve %5 SD katkılı grup numuneleri SF1, diğer grup numuneleri ise SF2 sınıfındadır. Viskozite için belirlenen T_{50} süresine göre ise; tüm serilerdeki numuneler VS2 sınıfı içerisinde kalmaktadır.

2. V hunisi deney sonuçlarına göre; en düşük akış süresi 6,08 sn ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı grup 7 sn akış süresiyle en yüksek değere ulaşmıştır. $V_{5 \text{ dakika gecikmeli}}$ akış süreleri incelendiğinde tüm gruplar belirtilen +3 sn sınır değerini sağladığı belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların hiçbirinde bloklanma riski olmadığı söylenebilir. EFNARC 2005'e göre akış süreleri dikkate alındığında hazırlanan tüm numune grupları VF1 sınıfındadır. İnce taneli malzeme olarak SD kullanımı, V hunisi deney sonuçlarına göre betonun viskozitesini genellikle artırırken UK kullanılması durumunda viskozitenin azaldığı belirlenmiştir.

3. L kutusu deney sonuçlarına göre; en düşük H_2/H_1 oranı 0,84 değeri ile kontrol gurubunda gerçekleşirken, %55 UK katkılı grupta 0,94 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Çalışmada üretilen tüm beton grupları EFNARC 2005'e göre PA2 sınıfındadır.

4. U kutusu deney sonuçlarına göre; en düşük değer $\Delta h_{\max} = 0,4 \text{ cm}$ ile %55 UK katkılı grupta belirlenirken, $\Delta h_{\max} = 2,7 \text{ cm}$ ile kontrol gurubunda en yüksek değer elde edilmiştir.

5. UK'nın kullanım oranı arttıkça KYB'nin kendi ağırlığı ile yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerinde iyileşme olduğu görülmüştür. Uçucu kül oranının fazla artırılması ise viskoziteyi düşürmektedir. Bu nedenle KYB'de

kullanılan UK miktarının optimum değerde tutulması veya viskozite düzenleyici katkı kullanılması gerektiği söylenebilir.

6. SD'nin kullanım oranı arttıkça KYB'nin kendi ağırlığı ile yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerine, UK'ün aksine, olumsuz etki yaptığı görülmüştür. SD kullanım oranının artırılması viskoziteyi artırmaktadır. SD kullanım oranı arttıkça betonun su ihtiyacı artacağından, karışımın KYB özelliklerini taşıması için karışım suyu miktarı veya akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılmalıdır.

7. Yukarıda özetlenen taze beton deney sonuçlarına göre KYB'de ince taneli malzeme olarak UK ve SD kullanımının olumlu etki yaptığı belirlenmiştir. Bu tür atık malzemelerin beton üretiminde kullanılması hem KYB özelliklerini iyileştirmekte hem de çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

8. Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, SD kullanımı önemli ölçüde artışa sebep olurken UK ilaveli guruplarda ise dayanım kayıpları belirlenmiştir. Nihai dayanımlar için %15 SD katkılı gurupda kontrol grubuna göre yaklaşık %12 artış tespit edilmiştir. Bu artış oranı %10 SD katkılı betonlar için %4,5 olurken %5 SD katkılı betonlarda çok belirgin bir artış görülmemiştir. UK ilave edilen guruplarda ise bunun aksine dayanım kayıpları görülmüştür. Nihai dayanımlarda %25, %40 ve %55 UK kullanılan guruplarda dayanım kayıpları sırasıyla %21, %30 ve %46 olarak hesaplanmıştır.

9. Erken yaşlardaki dayanımlar incelendiğinde, hem SD hem de UK ilavesinin olumsuz etki yaptığı görülmüştür. Bu etki SD guruplarında düşük seviyede kalırken UK guruplarında çok belirgin azalmalar tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak erken yaşlarda puzolanik reaksiyonların tamamlanmamış olması düşünülmektedir.

10. Kür koşullarının etkisi incelendiğinde, hava kürü uygulanmasının tüm guruplarda dayanımlarda azalmalara yol açtığı görülmüştür. Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmanın sebebi olarak, beton bünyesinde bulunan suyun

buharlaşarak uzaklaşması sonucu hidratasyon için gerekli su miktarının azalması ve bu nedenle hidratasyonun tamamlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Su kürü süresinin etkisi göz önüne alındığında; kürlenme süresi uzadıkça her grup için basınç dayanımının beklenildiği şekilde arttığı belirlenmiştir.

11. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarında ise mineral katkı kullanılan gruplarda katkısız betonlara göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Mineral katkı kullanılmayan grupta nihai dayanımlara göre yapılan kıyaslamada en yüksek dayanım kazanma oranı %55 olarak hesaplanırken bu değerin %55 UK kullanılması durumunda %95'e çıktığı belirlenmiştir. Böylelikle mineral katkılı gruplarda atmosferik basınçlı buhar kürü uygulamalarında daha yüksek nispi dayanımlar elde edildiği belirlenmiştir.

12. Tüm gruplar incelendiğinde, 28 günlük dayanım değerlerinin 42,03-87,63 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu değerlerin, uygulamada kullanılan beton sınıfları dikkate alındığında, oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Böylece yerleştirme sorununu ortadan kaldıran, işçilik ve enerji maliyetlerini azaltan, düzgün yüzeyler elde edilmesine olanak sağlayan ve yüksek dayanıma sahip KYB'lerin kullanımının yaygınlaşmasının uygulamada karşılaşılan pek çok sorunu ortadan kaldıracığı düşünülmektedir.

13. Bundan sonra konu hakkında yapılacak çalışmalarda mineral katkılı KYB'lerin ilerki yaşlarda dayanımlarının araştırılması tavsiye edilmektedir. Bu çalışmada 28 günden sonraki yaşlarda dayanım değerleri belirlenmediği için ilerleyen yaşlarda pozolanik etkinin seviyesi tespit edilememiştir. Ancak ilk yaşlarda belirlenen dayanım kayıplarının pozolanik aktivitenin tamamlanmasıyla ortadan kalkacağı düşünülmekte ve daha sonra yapılacak çalışmalarda bu durumun deneysel olarak belirlenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Al-Rawi, R.S., 1977. Effect of Cement Composition and W/C Ratio on Strength of Accelerated Cured Concrete, Cement and Concrete Research, 7 (3), 313.
- Anonim, 1980. TS 3529, Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini. TSE, Ankara.
- Anonim, 1984. TS 3648, Önyapımlı Beton Elemanlara Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Uygulama Kuralları. TSE, Ankara.
- Anonim, 1985. TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları. TSE, Ankara.
- Anonim, 1997. TS EN 932-1, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler, Kısım 1, Numune Alma Metotları. TSE, Ankara.
- Anonim, 1998. TS 639/T1, Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan Uçucu Küllerin Uygunluk kriterleri. TSE, Ankara.
- Anonim, 1999. TS EN 932-2, Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler, Bölüm 2, Laboratuvar Numunelerin Azaltılması Metodu. TSE, Ankara.
- Anonim, 1999. TS EN 1097-3, Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 3: Gevşek Yığın Yoğunluğunun ve Boşluk Hacminin Tayini TSE, Ankara.
- Anonim, 2002. TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- Anonim, 2006. TS 2941, Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi İle Tayini. TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS EN 1227 ISO 3310-1, Deney elekleri - Teknik özellikler ve deneyler - Kısım 1: Tel örgülü deney elekleri. TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS 3530 EN 933-1/A1, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS EN 1097-6/A1, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler. Bölüm 6, Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. TS EN 1227 ISO 3310-2, Deney Elekleri - Teknik Özellikler ve Deneyler - Kısım 2: Delikli Metal Levhalı Deney Elekleri TSE, Ankara.
- Anonim, 2007. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri TÇMB/ARGE/YO3.03 Nisan 2007 3.Baskı
- Anonim, 2009. TS 706 EN 12620+A1, Beton Agregaları. TSE, Ankara.
- Anonim, 2010. TS EN 12390-3, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri, Bölüm 3, Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- Anonim, 2011. TS EN 1744-1, Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Kimyasal analiz, TSE, Ankara.
- Anonim, 2011. TS EN 934-2, Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet İçin Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme. TSE, Ankara.
- Anonymous, 1970. ACI Committee 517, Recommended Practices for Atmospheric Pressure Steam Curing, ACI standart, American Concrete Institute, Michigan.
- Anonymous, 1977. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Concrete. ACI Publication, pp 103,105, Detroit.

- Anonymous, 1980. ACI Committee 517, Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure Steam, ACI Journal. Vol. 77, pp. 429-449, American Concrete Institute.
- Anonymous, 1994. Construction Practices & Inspection Pavements, ACI Manual. ACI Publication, Michigan.
- Anonymous, 2002. ASTM C 494-99a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Anonymous, 2002. ASTM C618-85, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM, Philadelphia.
- Aruntaş, H.Y., Dayı, M., Tekin, İ., Birgöl, R. ve Şimşek, O., 2007. Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Atık Mermer Tozunun Etkisi. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 173-180, Ankara.
- Avar, D., 2006. Karma Lifli Betonların Mekanik Davranışına Buhar Kürü Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, A.C., 2007. Self Compactibility of High Volume Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Construction and Building Materials, 21 (2007), 1149 – 1154.
- Aykan, G., Gürol, G., Tezel, O.O. ve Yüceer, Z., 2004. “Kendiliğinden Yerleşen Beton” Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri. Hazır Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, 266-276, İstanbul.
- Balayssac, J.P., Detriche, Ch.H. and Grandet, J., 1995. Effects of Curing Upon Carbonation of Concrete. Construction and Building Materials, v 9, pp 91-95.
- Baradan, B., 1991. Yapı Malzemesi-II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayını, s 1-3, İzmir.
- Benli, A., Türk, K. ve Calayır, Y. 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betondan Üretilmiş Kirişlerin Aderans Dayanımının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bil. Dergisi, 20(4), 599-607, Elazığ.
- Bingöl, A.F., 2002. Pomza İle Üretilen Hafif Betonların Yangına Karşı Dayanımı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bouzoubaa, N. and Lachemi M., 2001. Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results, Cement Concrete Research, Vol. 31, No. 3, 413-420.
- Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S. ve Yeprem, H.A., 2004. Farklı Puzolanik Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Doğu Üniversitesi Dergisi, 5 (2), 147-154, İstanbul.
- Demir, İ., Durgun, M.Y. ve Kurt, D., 2009. İki Farklı Puzolanik Katkının Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisinin Karşılaştırılması. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- Dinç, A., 2007. Kendiliğinden Yerleşen Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışına Su/İnce Malzeme Oranı ve Lif Dayanımının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ding, Y., Liu, S., Zhang, Y. and Thomas, A., 2007. The Investigation on the Workability of Fibre Cocktail Reinforced Self-Compacting High Performance Concrete, Construction and Building Materials.

- Dowson A.J., 2002. The Application, Self-Compacting Concrete (SCC) in Precast Products. BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry, İstanbul.
- EFNARC, 2002. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org,
- EFNARC, 2005. The European Guidelines for Self Compacting Concrete-Specification, Production and use, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- Erdem, T.K., 2000. Effect of Delay Period and Maximum Temperature Period on Compressive Strength of Steam Cured Concrete. MS Thesis, METU Department of Civil Engineering, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 1995. Beton Karışım ve Beton Suları. Türkiye Hazır Beton Birliği, S 1,3,9,12, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y. ve Erdem, T.K., 2002. Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden “Bekleme Süresinin Önemi”. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, ODTÜ, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- Erdoğan, T.Y. 2004. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri. Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y. 2007. Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu 263-275, Ankara.
- Eren, Ö. and Çelik, T., 1997. Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete, Construction and Building Materials, 11, 373-392.
- Eroğlu, L., Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö. ve Tokyay M., 2007. Karışım Parametrelerinin Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 249-259.
- Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y. ve Baradan, B., 2003. A Comparative Study on the Use of Powder and Chemical Types of Viscosity Enhancers in Self Compacting Concrete, Proceedings of the 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 446-456. Iceland.
- Felekoğlu, B. ve Baradan, B., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 234-243.
- Felekoğlu B., Yardımcı M.Y. ve Baradan B., 2004. Geleneksel Prefabrike Beton Üretiminden Kendiliğinden Yerleşen Betona Geçişte Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri. 11. Beton Prefabrikasyon Kongresi, İzmir.
- Felekoğlu, B., Yardımcı, M.Y. ve Baradan, B., 2006. Uçucu Külün ve Taş Tozunun Kendiliğinden Yerleşen Betonda Aşınma Direncine Etkileri. Osman Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, C.XIX, S.1, Eskişehir.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E. ve Özbay, E., 2007. Mineral Katkılar Kullanılarak Elde Edilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri. 7. Ulusal Beton Kongresi, T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 87-98, İstanbul.
- Ghezai A., Khayat K.H., Beaupre D., 2002. Effect of High-Range Water Reducer-Viscosity Enhancing Admixture Combination on Rheological Properties of

- Concrete Equivalent Mortar. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 159-166.
- Gönen, T. ve Yazıcıoğlu, S., 2010. Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Kür Ortamı ve Agrega Tipinin Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, No:3, 459-467, Ankara.
- Grünnewald, S., Walraven, J.C. 2002. Self-Compacting Fibre Reinforced Concrete – Orientation and Distribution of Steel Fibres in Beams, Stevin-report No. 25.5-02-33, Department of Structural and Building Engineering, Delft University of Technology.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Gürdal, H. ve Yüceer, Z., 2004. Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 244-254.
- Gürol, G., (1999). “Ekonomik Beton İçin Beton Bileşenleri Çimento/Su/İnce ve Kaba Agrega/Kimyasal ve Mineral Katkıları”, Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi, 164
- Hanson, J.A., 1963. Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants. Journal of Materials American Concrete Institute, vol. 60, pp. 75-100, PCI-Chicago.
- Houst, Y.F., Maeder, U., Flatt, R.J., Widmer, J., Bowen P., Hoffmann, H., Sulser, U. and Buerge, T.A., 1999. New Superplasticizers From Research to Application, Creating With Concrete, International Conf. on Modern Concrete Materials Binders, Additives and Admixtures, 445-456, Scotland.
- Jacobs, F. and Hunkeler, F., 1999. Design of Self-Compacting Concrete for Durable Concrete Structures. 1.st. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 397-407, Stockholm, Sweden.
- Jianxiong, C., Xincheng, P. and Yubin, H., 1999. A Study of Self-Compacting HPC With Superfine Sand and Pozzolanic Additives, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson.
- Kadiroğlu, İ., 2005. Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine DeneySEL Bir Çalışma. Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi, Isparta.
- Kandemir, A., 2005. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kantarıcı, 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, İstanbul.
- Karahan, O., Arı, K., Haktanır, T. ve Atış, C.D., 2005. İki Farklı Portland Çimentolu Betonların Dayanımına Zaman ve Kür Etkisinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (1-2), 62-68, Kayseri.
- Khayat, K.H. and Guizani, Z., 1997. Use of Viscosity-Modifying Admixture to Enhance Stability of Fluid Concrete, ACI Materials Journal, 332-340.
- Khayat, K.H., 1999. Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 96, No.3, 346-353.

- Khayat, K.H. and Roussel, Y., 1999. Testing and Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete. Proceedings of 1st International Symposium on SCC, A. Skarendahl and Ö. Petersson eds., RILEM publications PRO 7, 509-521.
- 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, Istanbul.
- Kim, J.K., Moon, Y.H. and Eo, S.H., 1998. Compressive Strength Development of Concrete With Different Curing Time and Temperature. Cement and Concrete Research, v 28, pp 1761-1773.
- Kurt, M., 2009. Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Long, G., Wang, X. and Xie, Y., 2002. Very- High Performance Concrete With Ultrafine Powders, Cement and Concrete Research, 32, 601-605.
- Mindess, S. and Young, J.F., 1981. Concrete, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Mohamet, H.A., 2011. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Under Different Curing Conditions, Ain Shams Eng J. doi:10.1016/j.asej.
- Neville, A.M., and Brooks, J.J., 1987. Concrete Technology. Longman Scientific and Technical, 155.
- Neville, A.M., 1995. Properties of Concrete. Third Edition, Singapore, 605-647.
- Okamura, H. and Ozawa, K., 1995. Mix-Design for Self Compacting Concrete, Concrete Library of JSCE, No. 25, 107-120.
- Okamura, H. and Ouchi, M., 2003. Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology”, V.1 No.1, 5-15.
- Ouchi M., 1999. Self-Compacting Concrete–Development, Applications and Investigations. Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p.
- Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M. and Okamura, H., 1989. Development of High Performance Concrete Based on the Durability of Concrete Structures. Proceedings of the Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction(EASEC-2), 1, 445-450
- Öztek, E., 1980. Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Isıl İşlem Çevrimi ve Çimento Seçimi. Tübitak Kurumu Bilgi Profili, No: 31, Ankara.
- Öztek, E., 1983. Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Kullanılan Isıl İşlemler–Eğilme Dayanımına Etkileri. Doçentlik Tezi, Karadeniz Üniversitesi, Mühendislik–Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- Postacıoğlu, B., 1986. Beton. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, (2), 404, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., 1987. Beton, (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar ve Beton). 177-402, İstanbul.
- Roshavelov, T., 2002. Concrete Mixture Proportioning Based on Rheological Approach, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, Ü.A. ve Özkul, M.H., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu. Beton Kongresi Bildirileri. T.H.H.B.B., 213-224, İstanbul.
- Sağlam, A.R. ve Özkul, M.H., 2006. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Bileşim Parametrelerinin Etkisi. İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt:5,

Sayı:1b, 239-250, İstanbul.

- Sağlam, A.R., Parlak, N. ve Özkul, M.H., 2007. Polikarboksilat Esaslı Kimyasal Katkıların Beton Üretiminde Kullanımı. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 107-120, Ankara.
- Sağsöz, A.E., 2007. Farklı Kür Şartlarının Doğal Perlit Agregalı Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- 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
- Skarendahl, A. and Peterson O., 2000. Self-Compacting Concrete, State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee, 174 - SCC.
- Subaşı, S. ve Emiroğlu, M., 2008. Lif Kullanılan Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda İşlenebilirlik ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki Analizi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bil. Dergisi, 20(3), 527-539, Elazığ.
- Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö. ve Tokyay, M., 2007. Development of High Volume Low-Lime and High-Lime Fly Ash Self Consolidating Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 59, Issue 2, 97-106.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. and Gjorv, O.E., 2007. Puzolanik Malzemelerin Betonun Mekanik Özellikleri ve Klor İyonu Yayınımına Etkisi. İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt:6, Sayı:1, 53-64, İstanbul.
- Şengül, Ü., 2002. Kangal Termik Santralinde Uçucu Kül Atımının Çevresel Etkileri. Ekoloji 11 (44) 23-24.
- Tuna, A.L. ve Girgin, A.R., 2005. Mısırd (Zea mays L.) Gelişme, Mineral Beslenme ve Ağır Metal İçeriği Üzerine Termik Santral Ucucu Kullerinin Etkisi. Ekoloji 14 (57) 7-15.
- Türkel, S. and Alabaş, V., 2004. The Effect of Excessive Steam Curing on Portland Composite Cement Concrete. Cement and Concrete Research, 35 (2005), 405-411.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş F. ve Yeğınobalı, A., 2007. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB/ARGE/YO3.03, 3.Baskı, Ankara.
- Wallevik, O.H., 2003. Rheology-A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete, 3rd Int. Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM Publications PRO 33, 23-34.
- Walraven, J., 2002. Self-Compacting Concrete in the Netherlands, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- Walraven, J., 2003. Structural Aspects of Self Compacting Concrete, 3rd Int. Symposium of SCC, Reykjavik, Edited by Wallevik and Nielsson, RILEM Publications PRO 33, Bagneux, 15-22.
- Weber, S. and Reinhardt, H.W., 1997. New Generation of High Performance Concrete: Concrete With Autogeneous Curing. Advanced Cement Based Materials, V. 6, pp 59-68.
- Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Yıldız, E., 2006.Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, B., 2007. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik ve Mekanik Özelliklerine Su/İnce Malzeme Oranı ile Lif Katkısının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1994 yılında yükseköğrenimine başladığı Selçuk Üniversitesi Ermenek Meslek Yüksekokulu İnşaat Programını 1996 yılında Yüksekokul birinciliği derecesiyle tamamladı. 1996-1999 yılları arasında çeşitli şantiyelerde inşaat teknikeri olarak görev yaptı. 2003 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Fakülte Birinciliği derecesiyle mezun oldu.

2003-2005 yılları arasında Erzurum’da yapılan farklı projelerde şantiye şefliği görevi yapan Tohumcu, 2005 yılında İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş. firmasının Erzurum Bölge yöneticisi olarak göreve başladı. Halen bu görevini devam ettirmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.