NEVŞEHİR BİMS AGREGASINDAN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HAFİF BETON ÜRETİLMESİ

MURAT GÜNAYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NEVŞEHİR BİMS AGREGASINDAN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HAFİF BETON ÜRETİLMESİ

MURAT GÜNAYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 15.06.2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI
(Üye)

Yrd.Doç.Dr. Hicran AÇIKEL
(Danışman)

Yrd.Doç.Dr. Mehmet KAMANLI
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NEVŞEHİR BİMS AGREGASINDAN

KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HAFİF BETON ÜRETİLMESİ

MURAT GÜNAYDIN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Hicran AÇIKEL

2006, 110 sayfa

Jüri: Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI

Yrd.Doç.Dr. Hicran AÇIKEL

Yrd.Doç.Dr. Mehmet KAMANLI

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özellikleri sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmayarak, kohezyonunu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür. Sıkıştırma enerjisi ihtiyacını ortadan kaldırarak; işçilik kusurlarını azaltması, üretimi hızlandırması, estetik kalıp tasarımına imkân vermesi, vibratör kullanımının imkânsız olduğu yerlerde ve güçlendirme projelerinde kullanılabilmesi, kendiliğinden yerleşen beton kullanımının getirdiği avantajlar arasında sayılabilir. Bu çalışmada, normal ağırlıklı olarak üretilen ve gittikçe kullanımı yaygınlaşan kendiliğinden yerleşen betonun, kendiliğinden yerleşen hafif beton olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Deneylerde, doğal hafif agrega kullanımının beton maliyetini önemli ölçüde azaltması ve ülkemizin zengin doğal hafif agrega kaynaklarına sahip olması nedeniyle, Nevşehir Bims agregası kullanılmıştır. Uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri de kullanılarak üretilen taze betonlara kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden; çökme yayılma deneyi, V hunisi akış deneyi, L kutusu deneyi uygulanarak taze beton özellikleri tespit edilmiştir. S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuarında üretilen betonlardan alınan küp, silindir ve kiriş numunelere basınç, yarılma ve eğilme deneyleri yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, uçucu kül, süperakışkanlaştırıcı, hafif agrega, hafif beton, kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemleri.

ABSTRACT

Master Thesis

SELF COMPACTING LIGHT WEIGHT CONCRETE MANUFACTURE FROM NEVŞEHİR BYMS AGGREGATES

MURAT GÜNAYDIN

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof.Dr. Hicran AÇIKEL

2006, 110 pages

Jüri: Prof.Dr. M. Yaşar KALTAKCI

Assist.Prof.Dr. Hicran AÇIKEL

Assist.Prof.Dr. Mehmet KAMANLI

Self compacting concrete is a sort of concrete, very plastic and viscous, which has dense reinforcement under its own weight, can place into narrow and deep cross sections, is self-compressible without requiring internal or external vibration, can keep cohesion; while meeting these requirements, not creating problems such as being segregating and bleeding, Eliminating the need of compacting energy, reducing the work faults, accelerating the production, making possible esthetic framework design, being able to use in the places, where the use of vibrator is impossible, and using in reinforcing project can be deemed as the advantages provided by using self compacting concrete. In this study, it is aimed to produce the self-compacting concrete, which is produced in normal weight and its use becoming widespread increasingly as self-compacting light weight concrete. Nevşehir Byms aggregates has been used for experiments due to the fact that the use of natural light weight aggregates has reduced the cost of concrete significantly and our country has the sources of rich natural light weight aggregates. Fresh concrete specifications have been identified by being applied settling diffusion test, V cone flow test, L box test, which are of self compacting concrete test methods onto the produced fresh concretes, using fly ash and super politicizing additives, In the structure laboratory, Civil Engineering Department, Engineering and Architecture Faculty of Selçuk University, the cubic, cylindrical and beam samples from produced concretes have been subjected to the tests of compressive strength, splitting strength and bending strength, and the results are discussed.

Keywords: Self compacting concrete, fly ash, super politicizer, light weight aggregates, light weight concrete, test methods for self compacting concrete.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bilgi ve deneyimlerinden daima yararlandığım değerli hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Hicran AÇIKEL'e ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. M.Yaşar KALTAKCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmada kullanılan bims agregasını temin eden TERMOBİMS AŞ.'ye ve Maden Müh. Mehmet KARAKUŞ'a,

Çimento ve ince kumu temin eden KONYA ÇİMENTO AŞ.'ye ve İnşaat Müh. Ercan KARATAŞ'a,

Deney aparatlarını ve kullanılan uçucu külü sağlayan Okutman Mustafa ALTIN'a ve İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuarı teknisyeni Yüksel ÇİFTÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **I**
ABSTRACT ..... **II**
TEŞEKKÜR ..... **III**
İÇİNDEKİLER ..... **IV**
SEMBOLLERİN LİSTESİ ..... **VII**
KISALTMALARIN LİSTESİ ..... **VIII**
TABLOLARIN LİSTESİ ..... **IX**
ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... **XI**
RESİMLERİN LİSTESİ ..... **XIII**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Taze Betonun Sıkıştırılmasının Önemi 2
1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton 5
1.2.1.Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri 6
1.2.1.1. Taze beton özellikleri - işlenebilme 8
1.2.2. Kendiliğinden yerleşen betonda kullanılan malzemeler 11
1.3. Beton Katkı Maddeleri 12
1.3.1. Akışkanlaştırıcılar 15
1.3.1.1. Akışkanlaştırıcıların özellikleri 15
1.3.2. Uçucu küller 20
1.3.2.1. Uçucu küllerin özellikleri 21
1.4. Hafif Beton 24
1.4.1. Hafif betonların sınıflandırılması 26
1.5. Hafif Agregalı Taşıyıcı Betonlar 29
1.5.1. Hafif agregalar 31

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **33**

3. METERYAL VE METOT **44**

3.1. Materyal 44
3.1.1. Hafif agreganın özellikleri 44
3.1.2. Beton karma suyu ve çimentonun özellikleri 47
3.1.3. Uçucu külün özellikleri 48
3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri 49
3.2. Metot 50
3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan metotlar 50
3.2.2. Beton numunelerinin hazırlanmasında uygulanan metotlar 50
3.2.2.1. Agrega oranları 50
3.2.2.2. Çimento dozajı ve su miktarı 51
3.2.2.3. Uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri oranları 51
3.2.2.4. Beton karışım hesapları 54
3.2.2.5. Beton karışımlarının hazırlanması 58
3.2.2.6. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemleri 59
3.2.2.7. Beton karışımlarının kalıba konulması ve kürü 65
3.2.2.8. Numune boyutları ve sayıları 65
3.2.4. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan deneyler 65
3.2.4.1. Deney Düzeni 71

4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN ÖLÇÜMLER ve DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 75
4.1. Deneylerden Elde Edilen Ölçümler 75
4.1.1. Agrega deneyleri sonuçları 75
4.1.2. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar 75
4.1.3. Kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmasından elde edilen deney sonuçları 75
4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 89
4.2.1. Agrega deneyleri 89
4.2.2. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesi 89

4.2.3. Kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmasından elde edilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi 90

5. SONUÇLAR 103

6. KAYNAKLAR 105

SEMBOLLERİN LİSTESİ

C : 1 m^3 yerleşmiş betondaki çimentonun ağırlığı

d : Çap

d_1 : Kiriş numunesinin enkesit boyutu

d_2 : Kiriş numunesinin enkesit boyutu

E : 1 m^3 yerleşmiş betondaki suyun hacmi

f_{cd} : Hesapta kullanılan beton basınç dayanımı

f_{cf} : Betonun eğilme dayanımı

f_{ck} : Betonun karakteristik dayanımı

f_{ct} : Betonun yarmada çekme dayanımı

f_{ctk} : Betonun çekme dayanımı

h : Yükseklik

h : 1 m^3 yerleşmiş betondaki hava hacmi

L : Açıklık

L_o : Eleman boyu

P : Yük

Va : Toplam agrega hacmi

W : Ağırlık

Δ : Birim ağırlık

γ_c : Çimentonun özgül ağırlığı

γ_{UK} : Uçucu külün özgül ağırlığı

γ_{SA} : Süperakışkanlaştırıcının özgül ağırlığı

KISALTMALARIN LİSTESİ

ACI : Alman Beton Enstitüsü

DIN : Alman Standardı

KYB : Kendiliğinden Yerleşen Beton

KYHB : Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton

MLS : Modifiye Lignosülfonatlar

SA : Süperakışkanlaştırıcı

SMF : Melamin Formaldehit Sülfonat

SNF : Naftalin Formaldehit Sülfonat

TS : Türk Standardı

UK : Uçucu Kül

VAK : Viskozite Artırıcı Katkı

TABLOLARIN LİSTESİ

Tablo 1.1. Hafif agregalı taşıyıcı betonlar için öngörülen birim ağırlık ve dayanım sınırları

Tablo 3.1. Çimentoya ait Konya Çimento A.Ş. laboratuarlarında bulunan değerler ve TS EN 197-1'de istenen değerler

Tablo 3.2. Baştaş Çimento Aş. laboratuarlarında bulunan değerler ve TS EN 450'de istenen değerler

Tablo 3.3. 1. Seri KYHB için kullanılan agrega ve karışımların elekten geçen malzeme yüzdeleri

Tablo 3.4. 2. Seri KYHB için kullanılan agrega ve karışımların elekten geçen malzeme yüzdeleri

Tablo 3.5. KYB deney yöntemleri ve sağlanması gereken kriterler

Tablo 3.6. 1. Seri KYHB karışımdaki beton bileşimleri

Tablo 3.7. 2. Seri KYHB karışımdaki beton bileşimleri

Tablo 3.8. 1. Seri KYB deney yöntemlerini sağlamayan bazı karışımlar

Tablo 3.9. 2. Seri KYB deney yöntemlerini sağlamayan bazı karışımlar

Tablo 4.1. Sıkışık birim ağırlık deney sonuçları

Tablo 4.2. Gevşek birim ağırlık deney sonuçları

Tablo 4.3. İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları

Tablo 4.4. İri agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları

Tablo 4.5. 1. ve 2. Seri KYHB için kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar

Tablo 4.6. 1. Seri taze KYHB birim hacim ağırlık ve etüv kurusu birim hacim ağırlık deney sonuçları

Tablo 4.7. 2. Seri taze KYHB birim hacim ağırlık ve etüv kurusu birim hacim ağırlık deney sonuçları

Tablo 4.8. 1. Seri KYHB basınç dayanımı deney sonuçları

Tablo 4.9. 2. Seri KYHB basınç dayanımı deney sonuçları

Tablo 4.10. 1. Seri KYHB yarılma deneyi sonuçları

Tablo 4.11. 2. Seri KYHB yarılma deneyi sonuçları

Tablo 4.12. 1. Seri KYHB eğilme deneyi sonuçları

Tablo 4.13. 2. Seri KYHB eğilme deneyi sonuçları

Tablo 4.14. 1. ve 2. Seri KYHB için basınç, silindir yarma ve eğilme deneyi sonuçları

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3.1. Tuvenan hafif agreganın ve ince hafif agreganın granülometri eğrileri

Şekil 3.2. Tuvenan hafif agreganın ve ince kumun granülometri eğrileri

Şekil 3.3. 1. Seri karışımın granülometrisi ve TS 3234'de bims agregaları için verilen elverişli granülometrik bölge

Şekil 3.4. 2. Seri karışımın granülometrisi ve TS 3234'de bims agregaları için verilen elverişli granülometrik bölge

Şekil 3.5. V hunisi akış deney aparatı

Şekil 3.6. L kutusu deney aparatı

Şekil 3.7. KYHB'de yarmada çekme dayanımı deney düzeni

Şekil 3.8. KYHB'de eğilme dayanımı deney düzeni

Şekil 4.1. 1. Seri KYHB için yayılma çapı değerleri

Şekil 4.2. 2. Seri KYHB için yayılma çapı değerleri

Şekil 4.3. 1. Seri KYHB için yayılma deneyinde 50 cm çapa ulaşma süresi

Şekil 4.4. 2. Seri KYHB için yayılma deneyinde 50 cm çapa ulaşma süresi

Şekil 4.5. 1. Seri KYHB için V hunisinden akış süresi

Şekil 4.6. 2. Seri KYHB için V hunisinden akış süresi

Şekil 4.7. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 20 cm'ye ulaşma süresi

Şekil 4.8. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 20 cm'ye ulaşma süresi

Şekil 4.9. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 40 cm'ye ulaşma süresi

Şekil 4.10. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 40 cm'ye ulaşma süresi

Şekil 4.11. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde h_2/h_1 oranı

Şekil 4.12. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde h_2/h_1 oranı

Şekil 4.13. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile yayılma çapı arasındaki ilişki

Şekil 4.14. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile 50 cm çapa ulaşma süresi arasındaki ilişki

Şekil 4.15. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile V Hunisinde akış süresi arasındaki ilişki

Şekil 4.16. 1. Seri KYHB için dozaj-basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 4.17. 2. Seri KYHB için dozaj-basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 4.18. 1. Seri KYHB için dozaj-yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Şekil 4.19. 2. Seri KYHB için dozaj-yarmada çekme dayanımı ilişkisi

Şekil 4.20. 1. Seri KYHB için dozaj-eğilme dayanımı ilişkisi
Şekil 4.21. 2. Seri KYHB için dozaj-eğilme dayanımı ilişkisi

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 3.1. Çökme yayılma deneyi

Resim 3.2. V hunisi akış deneyi

Resim 3.3. L kutusu deneyi

Resim 3.4. KYHB'lerin mikserde üretilmesi, kalıplara konulması ve kür edilmesi

Resim 3.5. Küp KYHB numunenin basınç deneyine tabi tutulması

Resim 3.6. Silindir KYHB numunenin yarma deneyine tabi tutulması

Resim 3.7. Kiriş KYHB numunenin eğilme deneyine tabi tutulması

1. GİRİŞ

Beton teknolojisindeki gelişmeler, dayanım ve dayanıklılık açısından yüksek performanslı beton üretimine olanak sağlamaktadır. Betonun mekanik özellikleri büyük ölçüde malzeme bileşenleri, taze beton performansı ve bakım koşullarına bağlıdır. Normal beton, taze halde sıkıştırma enerjisi uygulanarak yerleştirilmektedir. Özellikle şantiyede yaşanan sıkıştırma sorunları, betonun mekanik özelliklerinde önemli değişikliğe sebep olmaktadır.

Günümüzde beton kalitesi, yoğun emek ve enerji kullanımı gerektiren mekanik vibrasyon işine bağımlıdır. Bu derece yoğun tüketilen bir malzemenin de teknolojiye paralel gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Bileşenleri itibari ile önceleri sadece su, çimento ve agregadan oluşan beton, bünyesine kimyasal ve mineral katkıların girmesiyle pek çok olumlu özellik kazanmıştır. Kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile birlikte üretim ve uygulama safhasında karşılaşılan pek çok sorun çözülebilmiştir.

Kimya alanındaki gelişmeler ve polimer teknolojisinin ilerlemesi, 80'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 (KYB) kavramı ortaya çıkmıştır.

1980'li yılların başında Japonya'da betonarme yapılarda kalıcılık sorunları incelenmiş ve bu sorunların en önemli sebeplerinden birinin, taze betonun yeterli sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmesi olduğu saptanmıştır. Özellikle taze betonun sıkıştırılması için gerekli kalifiye işçi yetersizliği, yerleştirilen betonun kalitesini olumsuz etkilemektedir. Öte yandan işçi ne kadar eğitilmiş olursa olsun,

taze betona homojen sıkıştırma enerjisi verilebilmesi, özellikle işlenebilirliğin düşük olması halinde pratikte mümkün değildir. Bu problemi çözmek amacıyla sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadan kendi ağırlığı ile sıkışarak yerleşebilecek özel bir tip beton üretilmesi tasarlanmıştır.

KYB, kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmayarak, kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür (Felekoğlu ve Baradan 2004).

Günümüzde her türlü yapıda geleneksel olarak kullanılan betonun hafif betona göre ağırlığı daha fazla, ısı yalıtımı özelliği de iyi değildir. Bu özellikler dikkate alındığında hafif betonun taşıyıcı elemanlarda kullanılması, hafifliği, ısı yalıtımı, yangına dayanıklılığı bakımlarından önem kazanmaktadır. Isı yalıtkanlığının yanında, donmaya ve ateşe karşı dayanıklı olması ve bu betondan yapılan yapıların zati ağırlığından dolayı depremden doğacak yatay tesirlerin azalması, hafif betonların üstünlüklerinden bazılarıdır (Açıkel 1995).

Bütün bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada normal ağırlıklı olarak üretilen ve gittikçe kullanımı yaygınlaşan kendiliğinden yerleşen betonun, hafif agrega kullanarak, kendiliğinden yerleşen hafif beton (KYHB) olarak üretilmesi amaçlanmıştır.

1.1. Taze Betonun Sıkıştırılmasının Önemi

Ülkemizin büyük bölümü deprem kuşağında yer almakta ve sıkça yaşanan depremlerde büyük can ve mal kaybı olmaktadır. Bunun en yakın örneği 17 Ağustos Marmara ve 12 Kasım Düzce Depremleri ile yaşanmıştır. Bu depremlerde, projelendirme hatalarının yanında yetersiz beton dayanımının da etkili rol oynadığı ortaya çıkmıştır.

Beton kalitesi tasarım, üretim, taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve bakım aşamaları sonucunda oluşmaktadır. Bu aşamaların her birinde aynı ve yeterli özen gösterildiğinde istenen sonuç alınabilir. Aksi halde "zincirin gücü en zayıf halkası kadardır" özdeyişi gereği birindeki bir kusur veya eksikliğin diğerlerinde paylaşılma şansının olmamasından dolayı beton kalitesi istenen düzeyin çok altında kalabilmektedir. Bu aşamalardan biri olan vibrasyon, şantiye yetkililerinin sorumluluğu altında yerine getirilmesi gereken bir işlemdir. Ne yazık ki günümüzde bu işlemin önemi konusunda yeterli bilincin oluştuğu ve bu sektörde vibrasyonun doğru ve gerektiği biçimde yapıldığı söylenemez.

Üretilen taze betonun kalıbına yoğun ve homojen olarak yerleşmesini sağlamak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Yerinde üretilen geleneksel betonarme yapı sistemleri için en uygun vibrasyon yöntemi dalgıç vibratörlerle betonun sıkıştırılmasıdır. Uygulanan vibrasyon sonucu beton kütlesi içerisinde titreşim dalgaları oluşmakta, tanelerin titreşime uğraması ve hareketliliği sonucu hava boşlukları yok edilerek beton sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırılmış taze betonda kompasitenin yükseltilmesi sonucu beton kalitesi, yani sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığı önemli oranda artırılmış olmaktadır. Ayrıca betonla donatı arasındaki aderans güçlenerek betonarmenin monolitik davranışına olumlu katkı sağlamaktadır.

Yetersiz yerleştirme, yerel bozukluklara sahip boşluklu ve homojen olmayan bir beton içyapısının ortaya çıkmasına neden olur. Yetersiz yerleştirme, dayanımdaki düşüklüğün yanı sıra su, klorürler, sülfatlar, oksijen ve karbondioksit gibi zararlı maddelerin betonun içerisine girmesinin sonucunda da beton ve donatı üzerinde korozyona neden olur. Ayrıca betonda oluşan bu boşluklar betonla donatı arasındaki aderansı zayıflatmaktadır.

Betonda sıvı, gaz ve iyon hareketini kolaylaştırarak geçirgenliğin artmasına yol açan boşluk hacminin minimize edilmesi yerleştirmede esas amaç olmalıdır. Beton içinde kalan her %1 hava boşluğu dayanımda yaklaşık %6 kayıp oluşturur. Taze betonda

boşlukların azaltılması dayanım ve dayanıklılığı olumlu yönde etkileyerek betonarme yapının servis ömrünü artıracaktır.

Khalaf ve Yousif (1985) tarafından vibrasyonun ve ikinci vibrasyonun betonun kararlılığı ve sıkışabilirliği üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, su-çimento oranı 0.35 ile 0.62 arasında değişen betonlara 0 ila 120 saniye kadar değişen sürelerde ilk vibrasyon yapılmış; daha sonra aynı betonlara 1 saatten 4.5 saate kadar değişen süreler sonunda ikinci vibrasyon uygulanmıştır. Araştırmacılar basınç dayanımlarına göre yaptıkları değerlendirmede optimum su-çimento oranının 0.45, sıkıştırma süresinin ise tabaka başına 10 saniye olduğunu belirtmişlerdir. İkinci vibrasyon uyguladıkları betonların tümünde kontrol betonlarına göre dayanım artışları elde etmişlerdir. Basınç dayanımlarındaki bu artışlar 7. ve 28. günlerde sırasıyla %28.4 ve %24.7 olarak elde edilmiştir.

Yılmaz ve Canpolat (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada ise C20 ve C35 kalite sınıfında ve iki farklı çökme deney grubu üzerinde ilk ve ikinci vibrasyonun betonun basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan betonlar üretim tesisinden alınan C20 ve C35 sınıfı betonlar olup, yine iki farklı (h = 100 ve h =200 mm) çökme elde edilecek şekilde belirlenmiştir. İlk seri betona hiç vibrasyon uygulanmamış, kendi ağırlığı ile yerleştirilmiştir. Diğer serideki betonlara üretimin hemen ardında 30 sn süreyle vibrasyon uygulanmıştır. İkinci seri betona tek vibrasyon uygulanmış bunun dışındaki numunelere 30, 60 ve 90 dakika sonra 20 sn süreyle ikinci bir vibrasyon daha uygulanmıştır. Vibrasyon yapılmamış, ya da kurallara uygun yapılmamış betonların dayanımlarında ciddi oranda azalma olduğu, özellikle çökmesi düşük betonlarda kendi ağırlığı ile yerleşme zorluğundan dolayı bu azalmanın daha yüksek olduğu (%35'e yakın) görülmüştür. İkinci vibrasyonun uygulandığı betonların dayanımlarında anlamlı artışlar gözlenmiştir. Çökmesi yüksek, çok akıcı kıvamlı betonlarda bu artış %20 düzeyine çıkabilmiştir. Bu durum, taze betonda fazla suyun neden olduğu artan terlemeyle paralel oluşan boşlukların artması ve ikinci bir vibrasyonla bunların azaltılması sonucu ile açıklanabilir. Gerçekte betonun kullanıldığı yapıda donatı yoğunluğu ve kalıp darlığı gibi zor koşulların yanı sıra kalıp yüzeyinin pürüzlülüğü ve sıkıştırılacak beton kütlesinin

büyüklüğü de göz önünde bulundurulursa ikinci vibrasyonun deney numunelerine göre yapıda çok daha etkili olacağı söylenebilir (Yılmaz ve Canpolat 2002).

Tek yapılan vibrasyon işleminin bile tam yeterli olmadığı görülen taze betonda sıkıştırma işleminin, ne yazık ki bu sektörde doğru ve gerektiği biçimde yapıldığı söylenemez. Ayrıca özellikle gerekli kalifiye işçi yetersizliğinden dolayı vibrasyon gerektiği biçimde yapılamıyor veya işçinin eğitilmiş olması durumunda bile taze betona homojen sıkıştırma enerjisi verilebilmesi, özellikle işlenebilirliğin düşük olması halinde pratikte mümkün olmayabiliyor. Bütün bunların yanında güçlendirme problemlerinde, sık donatılı elemanlarda, estetik kalıp tasarımlarında, zor ve ulaşılmaz alanlarda ve vibratör kullanımının imkânsız olduğu yerlerde dikkate alındığında sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadan kendi ağırlığı ile sıkışarak yerleşebilecek KYB kullanılması gerekli olmaktadır.

1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendiliğinden yerleşen beton; kendi ağırlığı altında istenen yere yayılabilen, iç ve dış vibrasyon gerektirmeyen, ayrışma ve terlemeye bağlı kusurlar göstermeksizin, iyi sıkışma elde edilebilen, çok akıcı kıvamlı betondur (Aykan ve ark. 2004).

Klasik beton karışımından farklı olarak KYB'de; kimyasal katkı, viskozite arttırıcı katkı ve çok miktarda inert veya puzolanik mineral katkının tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton tasarımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir. Özellikle işlenebilirlik konusunda farklı parametreler ölçen değişik deney yöntemleri vardır. KYB her ne kadar işlenebilirlik özelliklerine göre sınıflandırılsa da belirli mekanik performans kriterlerini sağlaması gerekir.

KYB'nin beklenen mekanik performansı vermesi aşağıdaki kriterlere bağlıdır:

1. Talep edilen performansa uygun malzeme tip ve oranlarının seçimi (karışım optimizasyonu)

2. Üretim safhasında malzeme tip ve oranlarındaki değişimin minimizasyonu (homojen malzeme kullanımı, hammadde değişkenliğinden kaynaklanacak problemlerin azaltılması)

3. Ortam koşullarının KYB'ye 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 yapılması.

Yukarıdaki kriterlere uyulması halinde, KYB'den en yüksek mekanik performansı almak mümkün olacaktır. Uyulmayacak her kriter mekanik özelliklerde düşüşe sebep olur. Bu nedenle her KYB karışımından olumlu sonuç alınamayabilir.

Normal beton üretiminde de yukarıda sözü edilen kriterlere uyulması performansı arttırmaktadır. Ancak KYB'de bu kriterlere hassasiyet daha üst seviyede olup, yapılacak yanlışlıkları düzeltmek klasik beton üretimine kıyasla çok daha zordur (Felekoğlu ve Baradan 2004).

1.2.1. Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri

Geleneksel beton dökümünde vibrasyon, yani yerleştirme ve sıkıştırma işlemi, betonun içindeki hava miktarını dışarı atmak, böylece dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek ve aynı zamanda daha düzgün yüzeyli bir beton elde etmek için zorunludur.

Vibrasyon uygulanmamış betonların basınç dayanımlarında, vibrasyon uygulanmış olanlara göre %30'lara varan düşüşler görülmektedir. Ayrıca sağlıklı vibrasyon yapılmamış beton elemanlarda yüzey bozuklukları görülebilir. Özellikle binaların depreme karşı güçlendirilmesi için yapılan güçlendirme projelerinde tüm bu etkenlere dar beton kesitleri ve sık donatı eklenince, vibrasyon uygulaması daha da

zahmetli, bazen de olanaksız hale gelir. Oysa KYB, kendi kendine sıkışma yeteneği sayesinde vibrasyon gerektirmez ve tüm olumsuz etkenleri elimine ederek, işçilikten ve zamandan tasarruf sağlar (Gürdal ve Yüceer 2004).

Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların üretiminin, geleneksel betonla üretim yerine KYB kullanılması durumunda 1/5 oranında daha kısa sürede gerçekleşebileceği belirtilmiştir (Sağlam ve ark. 2004). Ayrıca gürültü probleminin ortadan kalkması, şehir merkezlerinde ve özellikle gece beton dökümlerinde üstünlük sağlar. KYB, düzgün yüzey elde edilmesine olanak vermeleri ve üretim sırasında vibratör gerektirmemeleri nedeniyle prefabrike eleman endüstrisinde de kullanılmaları yaygınlaşmaktadır.

KYB'lerin diğer kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Gürdal ve Yüceer 2004):

1. Güçlendirme problemlerinde
2. Sık donatılı elemanlarda
3. Estetik kalıp tasarımlarında
4. Zor ve ulaşılmaz alanlarda
5. Vibratör kullanımının imkansız olduğu yerlerde kullanılmaktadır.

KYB'nin bütün bu avantajlarının yanında tüm inşaatlarda yaygın olarak kullanılmasına henüz geçilememiştir. Bu durumun en önemli nedeni olarak söz konusu betonların maliyetlerinin henüz istenilen düzeylere indirilememiş olması sayılabilir. Ancak durabiliteye verilecek önemle birlikte, KYB kullanımının yapının ömrüne getireceği katkılar, bakım ve onarım harcamalarındaki azalmalar, yapım süresi kısalması ve işçiliğin azalması, gürültü faktörünün düşürülmesi gibi avantajlar göz önüne alındığında zaman içinde yaygınlaşması beklenmektedir (Sağlam ve ark. 2004).

Bugün KYB kullanılarak elde edilen üstünlüklerin ötesinde, bu kullanımı geleneksel hale getirerek genele yayma fikri ulaşılmak istenen bir hedef olarak görünmektedir. KYB ile ilgili dünyada yapılmış araştırmalar, KYB'nin tüm sertleşmiş ve taze

haldeki özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Pratikteki sorunları görmek için pilot uygulama projeleri geliştirilmiştir. Günümüz itibariyle önemli deneyimler elde edilmiş ve büyük gelişme kaydedilmiştir, ancak bazı noktalarda halen yanıtlanması gereken sorular bulunmaktadır (Gürdal ve Yüceer 2004).

1.2.1.1. Taze beton özellikleri - işlenebilme

KYB'lerin performansları ile taze beton özellikleri arasında önemli bir ilişki vardır. Reoloji ve işlenebilirlik parametreleri KYB'nin pratikteki kullanım performansını etkilemektedir. Kendiliğinden yerleşme yeteneği üç parametre ile karakterize edilebilir. Bunlar; doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneğidir.

1. Doldurma yeteneği

KYB kendi ağırlığı ile şeklini değiştirme ve deforme olma özelliğine sahip olmalıdır. Doldurma yeteneği, betonun boşaltma noktasından ne kadar uzaklığa akabildiği ve bu akışın hızı (deformasyon hızı) kavramlarını içermektedir. Yayılma deneyi ile ölçülen betonun yayılma çapı ve bu çapa ulaşılması için geçen süre ile söz konusu özellik değerlendirilebilir. İyi bir doldurma yeteneği için, deformasyon kapasitesi ile deformasyon hızı arasında denge olmalıdır.

Betonun iyi deforme olabilmesi için, iri agrega, ince agrega ve her türlü bağlayıcı dâhil 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 arasından geçerek doldurma kapasitesinin arttırılması açısından önemlidir.

Uygun doldurma yeteneği için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

1. Çimento hamuru fazının deformasyon yeteneğinin arttırılması:
    a. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı
    b. Dengelenmiş su/bağlayıcı oranı tespiti
2. Tanecikler arası sürtünmenin azaltılması:
    a. Kullanılan agrega ve çimentoya göre optimum gradasyon
    b. Düşük kaba agrega hacmi kullanımı (yüksek çimento hamuru fazı içeriği)

ile sağlanmaktadır.

2. Ayrışmaya karşı direnç

Taze betonda ayrışma (segregasyon), bileşen malzemelerin homojen olmaksızın dağılarak yapıdaki özellikleri de dağılıma uğratması olayıdır. Normal akışta ayrışma göstermeyen taze beton, örneğin sık donatıların bulunması durumunda ayrışmaya uğrayabilir.

KYB gerek durağan, gerekse akış halinde; terleme, hava boşluğu dağılımında düzensizlik, çimento hamuru fazı ve agrega ayrışması, blokaja (kilitlenme) neden olan kaba agrega ayrışması gibi durumları göstermemelidir.

Uygun ayrışma direnci için aşağıdakiler dikkate alınmalıdır:

1. Katı maddelerin ayrılmasını azaltmak:
    a. Sınırlı agrega içeriği
    b. Azaltılmış en büyük agrega tane çapı kullanımı
    c. Düşük su/bağlayıcı oranı
    d. Viskozite arttırıcı kullanımı
2. Serbest terlemenin minimize edilmesini gerçekleştirmek:
    a. Düşük su içeriği
    b. Düşük su/bağlayıcı oranı
    c. Yüksek yüzey alana sahip bağlayıcılar kullanımı
    d. Viskozite arttırıcı kullanımı ile sağlanmaktadır.

3. Geçiş yeteneği

KYB yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayrışmaya 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 blokajlaşmamasıdır.

Mükemmel doldurma yeteneğine ve ayrışma direncine sahip olan bir KYB'de bile agrega en büyük dane çapı çok büyükse veya iri agregaların içeriği çok yüksekse blokaj riski söz konusu olur.

Uygun geçiş yeteneği için aşağıdakiler dikkate alınmalıdır:

1. Agrega ayrışmasını azaltmak için kohezyonu arttırmak:
    a. Düşük su/bağlayıcı oranı
    b. Viskozite arttırıcı kullanımı
2. Uygun iri agrega kullanmak:
    a. Düşük kaba agrega hacmi
    b. Düşük en büyük dane çaplı agrega kullanılmalıdır (Gürdal ve Yüceer 2004).

KYB'nin üstün davranış özelliklerini sağlayabilmesi için yüksek akıcılıkta olması, yüksek ayrışma direnci ve şekil değiştirme yeteneğine sahip olması gereklidir.

Yüksek akıcılık, üstün akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar (süperakışkanlaştırıcılar) yardımı ile sağlanırken betonun kararlılığı (ayrışma direnci), ince malzeme miktarını yüksek tutmakla ve viskozite artırıcı maddeler kullanarak gerçekleşmektedir. KYB'nin sadece doldurma özelliğine sahip olması yetmemekte, aynı zamanda donatılar arasından kolayca geçebilir özellikte olması da gerekmektedir. Betonun kolayca şekil değiştirebilmesi için kayma eşiğinin küçük olması gerekir. Bu özelliğin, su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun kararlılığı bozulmakta, yani ayrışma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ayrışmanın göstergesi olan viskozite özelliği çok küçülmemelidir.

KYB'lerin bu özelliklerini düşük su/ince malzeme oranlarında sağladıkları görülmekte, ince maddenin bağlayıcı özellikte seçilmesi durumunda hem dayanım hem de dayanıklılıkları yüksek olmaktadır. Bu nedenle yüksek performanslı betonlar sınıfına sokulabilmektedir.

Ayrışma dirençlerinin yüksek oluşu KYB'lere su altında kullanılma olanağı vermektedir. Öte yandan bu betonlarda, bir yatay yapı elemanında (kiriş gibi) kesitin üst kenarına yakın çelik çubukların, alt kenara yakın olanlara göre daha düşük aderansa sahip olma özelliğini göstermedikleri anlaşılmıştır (Sağlam ve ark. 2004).

1.2.2. Kendiliğinden yerleşen betonda kullanılan malzemeler

Geleneksel betonda kullanılan normal Portland çimentoları KYB üretiminde de kullanılabilir. Ancak bazı çimentolarla KYB üretimi daha başarılı olabilmektedir. Bu konuda yapılan bir çalışmada TÇ 32,5 ve PZÇ 32,5 çimentolarının KYB katkılarının ilk kuşak türleri ile uyumsuzluk gösterdiği görülmüştür. Ancak bu katkılar üzerinde çok hızlı gelişmeler gerçekleşmekte ve bu uyum sorunu azaltılmaktadır.

Süperakışkanlaştırıcı olarak yüksek oranda su kesici özelliğe sahip ve molekül ağırlığı optimize edilmiş bir kimyasal katkı kullanılabilir. Bu amaçla polikarboksilat veya naftalin esaslı polimerler yaygın kullanılan katkılardır.

İnce madde olarak 100 mikrondan ince taneler düşünülmelidir. Bu amaçla uçucu kül, taş unu, cüruf (öğütülmüş), silis dumanı kullanılabilir. KYB'lerin ayrışma direnci viskozite arttırıcı katkılar (VAK) ile de arttırılabilir. Bu maddeler taze betonun viskozitesini artırarak ayrışmayı (terleme dahil) azaltan, betonun kararlılığının bozulmamasını sağlayan ve agreganın çimento hamuru içinde askıda kalmasını gerçekleştiren maddelerdir. VAK'ler nişasta ve doğal zamk (sakız) gibi doğal, ayrışmış nişasta, selüloz eter türevleri (hidroksipropil metil selüloz) gibi yarı sentetik

olabilirler. Ayrıca etilen kökenli (polietilen oksit) ve vinil kökenli (polivinil alkol) gibi sentetik polimerler olabilirler.

Geleneksel betonda kullanılan ince ve iri agregalar KYB'de de kullanılabilir, ancak maksimum agrega boyutu geleneksel betondakinden daha küçüktür ve genellikle 20 mm'nin altında kalır. Ayrıca geleneksel betondan farklı olarak kum oranı artmış, buna karşılık iri agrega miktarı azaltılmıştır (Sağlam ve ark. 2004).

1.3. Beton Katkı Maddeleri

Katkı maddeleri, taze ve sertleşmiş betonun bir veya birkaç özelliğini istenilen yönde iyileştirmek için kullanılır. Katkı maddelerinin taze beton özelliklerini değiştirmek üzere kullanım amaçları şu şekilde özetlenebilir:

1. Karma suyu miktarını arttırmadan, işlenebilirliği arttırmak
2. Segregasyonu azaltmak
3. Terleme kapasitesini veya hızını değiştirmek
4. Küçük hacimsel artışlar meydana getirerek, plastik rötreyi önlemek veya azaltmak
5. Çökme kaybı hızını azaltmak
6. Pompalanabilirliği geliştirmek
7. Priz başlangıcı esnasında hidratasyon ısısını düşürmek
8. Priz geciktirmek veya hızlandırmak.

Katkı maddelerinin sertleşmiş beton özelliklerini değiştirmek üzere, kullanım amaçları şunlardır:

1. Erken yaşlarda dayanım gelişimini hızlandırmak
2. Basınç dayanımını arttırmak
3. Çekme ve eğilme dayanımını arttırmak

4. Permeabiliteyi azaltmak
5. Donma-çözülme dayanıklılığını arttırmak
6. Betonun çarpma ve aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirmek
7. Beton ile donatı çeliği arasındaki aderansı arttırmak
8. Alkali-agrega reaksiyonunu kontrol altında tutmak
9. Donatı çeliğinin korozyonuna mani olmak
10. Renklendirilmiş beton ve harç üretmek.

Beton katkı maddeleri, kimyasal ve mineral katkılar olarak iki grupta incelenebilir. TS 3452'de kimyasal beton katkı maddeleri, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden bazılarında değişiklik yapmak amacıyla, beton karışım suyuna belirli oranlarda katılan kimyasal maddeler olarak tanımlanır. Kimyasal katkılar, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek için, genellikle çimento dozajının %5'ini aşmayan oranlarda betona katılırlar.

TS 3452'ye göre kimyasal katkı tipleri şunlardır:

1. Priz hızlandırıcılar
2. Priz geciktiriciler
3. Karışım suyunu azaltıcılar
4. Karışım suyunu azaltıcı ve priz hızlandırıcılar
5. Karışım suyunu azaltıcı ve priz geciktiriciler
6. Karışım suyunu yüksek miktarda azaltıcılar
7. Karışım suyunu yüksek miktarda azaltıcı ve priz geciktiriciler.

Mineral katkı maddeleri ise puzolan özelliğe sahip, doğal veya yapay olarak elde edilebilen maddelerdir. TS 25'de puzolan kendi başına bağlayıcılık özelliği olmayan ancak öğütüldüğünde nemli ortamlarda kireç ile birleşerek bağlayıcılık özelliği gösteren, silisli veya silisli-alüminli inorganik maddeler olarak tanımlanmaktadır. Mineral katkı maddesi olarak değerlendirilebilen uçucu küller ve bazı bitümlü şist külleri, yaklaşık %10'dan fazla kireç içermeleri durumunda hem bağlayıcı hem de puzolan özelliklere sahiptir (Duran 2003).

Volkanik curuflar, volkanik tüfler, kalsine kil ve şeyl, opalin silika doğal puzolanlar grubuna girmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kapçığı külü ve demir olmayan cüruflar ise yapay puzolanlar grubuna girmektedir.

Mineral katkı maddeleri bağlayıcılık değerleri ve çimento ile reaksiyona girme derecelerine bağlı olarak şu şekilde sınıflandırılabilir (Yeniobalı ve Erdoğdu 1999):

1. Bağlayıcı özellikte olanlar
    a. Suda soğutulmuş yüksek fırın cürufu
2. Bağlayıcı ve puzolanik özellikte olanlar
    a. Yüksek kireçli uçucu kül
    b. Bazı bitümlü şist külleri
3. Puzolanik aktivitesi yüksek olanlar
    a. Silis dumanı
    b. Çeltik kapçığı külü
4. Normal Puzolanlar
    a. Düşük kireçli uçucu kül
    b. Doğal puzolanlar
    c. Pişmiş kil
5. Puzolanik aktivitesi düşük olanlar
    a. Havada soğumuş yüksek fırın cürufu
    b. Kazan cürufları
    c. Bazı bitümlü şist külleri
    d. Bazı doğal puzolanlar
    e. Bitki külleri
6. Atıl olanlar
    a. İnce öğütülmüş kuvars
    b. Kalker
    c. Bentonit
    d. Kireç hidrat.

1.3.1. Akışkanlaştırıcılar

Akışkanlaştırıcılar kimyasal katkılar içersinde uygulamada en çok kullanılan ve en çok bilinen katkılar grubunu oluştururlar. Normal akışkanlaştırıcıların kimyasal içerik bakımından çeşitli tipleri vardır. Ancak bu katkıların çoğunluğu kâğıt üretiminde yan ürün olarak kullanılan sodyum ve kalsiyum linyosüfonatlardır.

Akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyerek, çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek ve taneleri beton içine dağıtarak etkili olurlar. Böylece çimento tanelerinin bütünüyle hidrate olmasına sebep olurlar ve suyun yüzey gerilimini azaltır, ıslatma gücünü artırırlar. Betoniyerde çeperlere yapışma olmaz, betonda agrega tanelerinin ayrışması minimum düzeye iner. Çimento hamuru ve agrega bağlantısı düzelir.

Akışkanlaştırıcılar genelde üç amaç için kullanılırlar:

1. Katkısız betonla aynı işlenebilirlikte olmak şartıyla su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet kazanmak
2. Kütle betonlarında hidratasyon ısısını düşürmek için çimento miktarının azaltılması durumunda aynı işlenebilirliği kazanmak. Katkının bu şekilde diğer beton türleri içinde kullanılması aynı zamanda daha ekonomik bir beton üretimi sağlaması anlamına gelmektedir.
3. Kolay yerleşmeyi sağlamak için (özellikle ulaşılamayan köşelerde) işlenebilmeyi artırmak (Yazıcı 2002).

1.3.1.1. Akışkanlaştırıcıların özellikleri

Günümüz beton teknolojisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı işlenebilirlik açısından sağladığı kolaylıklarla bir zorunluluk haline gelmiştir. Kimyasal katkıların

çeşitliliğinin ve etkinliğinin artması bunların kullanımında üreticiye daha kontrollü davranma zorunluluğunu getirmektedir (Türkel ve Felekoğlu 2004).

Katkı miktarı betonun diğer bileşenlerinin yanında çok küçük mertebelerde olduğundan beton üretimi sırasında insan ve ekipman faktörlerinden kaynaklanan hatalardan dolayı hesaplanandan fazla miktarda katkının karışıma girmesi uygulamada zaman zaman karşılaşılan problemdir. Bu gibi durumlarda betonun çökme değeri aşırı artmakta, beton stabilitesini kaybederek ayrışabilmekte, hava sürükleme etkisinde değişiklikler olmaktadır. Bazı kimyasal katkıların aşırı dozajda kullanımı ise betonda stabilite kaybına sebep olmamakta, fakat betonun priz almasını aşırı geciktirerek kalıp alma süresini haftalarca uzatabilmektedir. Öte yandan katkı oranı değişimiyle karakter değiştiren katkılarda rapor edilmiştir. Örneğin $CaCl_2$ düşük dozajlarda (çimento ağırlığının %0.1'i ila %0.3'ü) priz geciktirici, yüksek dozajlarda ise priz hızlandırıcı etki göstermektedir.

Yüksek dozajda katkı kullanımı halinde önlem olarak stabilizatör bir kimyasal katkıdan yararlanılabilir. Bir diğer çözümde mümkünse karışıma çimento ilavesi yapılmasıdır. Yüksek oranda kimyasal katkı betonda iç kanamaya yol açarak kireç, kalsiyum sülfat ve kalsiyum karbonat gibi maddeleri su ile dolu boşluklara sürükler. Bu olaya kimyasal segregasyon denilmektedir. Kimyasal segregasyon betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyerek servis ömrünü kısaltır.

Akışkanlaştırıcılar su kesme yeteneklerine göre normal (%10- 15 arası su kesebilenler) süper (%15- 30 arası su kesebilenler) ve hiper (%30'un üzerinde su kesme özelliği olanlar) olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma performansa dayalı bir sınıflandırma olduğundan katkının kimyasal özelliğini yansıtmaz. Ama çoğunlukla lügnosülfonat bazlı katkılardan normal, melamin ve naftalin sülfona formaldehit bazlılardan süper ve polikarboksilat bazlılardan hiperakışkanlaştırıcılar üretilmektedir. Bir lügnosülfonat bazlı katıdan tek başına hiperakışkanlaştırıcı performans beklemek mümkün değildir. Fakat bu katkılarda yapılacak modifikasyonlarla su kesme ve priz ayarlama gibi özellikleri değiştirilebilir. Bu

sebeple pratikte, performansa dayalı bir sınıflandırma yapılması, kimyasal yapıya dayalı bir sınıflandırmadan daha uygundur.

Kimyasal katkıların tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, uygulamada karşılaşılan sorunların ve bu sorunlara aranan çözüm yollarının katkıların gelişmesinde itici güç olduğu görülmektedir. Örneğin ilk akışkanlaştırıcılardan olan lignosülfonat bazlı katkılar yüksek oranda şeker içerdikleri için priz gecikmesine sebep olmuştur. Öte yandan özellikle lignosülfonatların sürüklediği hava kabarcıklarının çapı, donma çözülme direnci için etkili çaptan (0.2 mm) çok daha büyüktür. Bu nedenle lignosülfonatlar betonun bünyesinde sürüklenmiş hava boşluğundan çok daha başka miktarda hapsolmuş hava boşluğu oluşturarak dayanım ve dayanıklılık kaybına sebep olurlar.

Lignosülfatlar üzerinde çalışan araştırmacılar şekeri rafine ederek ayrıştırmış ve modifiye lignosülfonatlar (MLS) geliştirilmiştir. Ne var ki yüksek dozajda kullanılmaları halinde stabilite kaybı ve priz gecikmesi gibi önemli problemler oluşturacağından, klasik lügnosülfonatlarla betonda yakalanabilecek en yüksek su kesme oranı %10'u geçememektedir.

İkinci nesil olarak adlandırılabilecek katkılar melamin (SMF) ve naftalin (SNF) formaldehit sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcılardır. İlk olarak 60'lı yılların sonunda Japonya'da, 70'lerin başında Almanya'da ve 1974'de Kuzey Amerika'da kullanılmışlardır. Bazı modifiye lignosülfonat türleri de süperakışkanlaştırıcı sınıfına sokulabilir, fakat en çok kullanılanları SNF ve SMF bazlı katkılardır. Bunların dışında poliakrilatlar, polistiren sülfonatlar da kullanılabilir. Süperakışkanlaştırıcılar gerek su kesme açısından gerekse akışkanlık sağlama açısından lignosülfonatlardan çok daha etkilidir. SNF ve SMF esaslı katkılar birbiriyle karşılaştırıldığında akışkanlaştırıcı etkinliği açısından, naftalin bazlı süper akışkanlaştırıcıların daha etkili olduğu belirlenmiştir. Melamin ve naftalin sülfonat esaslı katkılarla uygulamada karşılaşılan en sık sorun zamanla betonda meydana gelen işlenebilirlik kaybıdır. Bu sorunun çözümünde işlenebilirliği azalmış karışıma ek katkı ilavesi

düşünülmüş ve uygulanmıştır. Bu çözüm ekonomik olmamakla beraber bazı hazır beton üreticileri tarafından halen kullanılmaktadır.

İşlenebilirlik kaybı sorununu çözmek için 3. nesil olarak adlandırılan polikarboksilat bazlı katkılar geliştirilmiştir. Bu katkılar, yüksek oranda su kesme özelliğine sahip olup aynı zamanda yüksek işlenebilirlik etkisi sağlayan katkılardır.

Bir katkının etkinliği kullanım amacına göre değişir. Katkı kullanımı için beton özellikleri (istenen işlenebilirlik derecesi, dayanım kriteri için su kesme oranı) ve ortam koşulları (hava sıcaklığı ve bağıl nem), tam olarak belirlenmelidir. Etkinin olumlu olup olmadığı kullanım amacına göre de değiştiği için, her katkı kendi özelliklerinin maksimum fayda getireceği şekilde kullanılmalıdır. Örneğin priz geciktirici katkıların kış aylarında kullanımı sorun oluşturmazken, yaz aylarında beton dökümünün sorunsuz yapılmasını sağlayarak fayda sağlamaktadır. Uygun kimyasal katkının uygun miktarda kullanımıyla olumsuz hava koşullarına karşı önlem alınabilir. Bu optimum değerlerin tespitinde her katkının kullanılacağı malzemeden özellikle çimento ile uyumluluğu ve hava sıcaklılığıyla etkinliğinin nasıl değiştiği laboratuar deneyleri ile tespit edilmelidir.

Kimyasal katkı maddeleri, çimento ile elektriksel, fiziksel ya da fizikokimyasal bir etkileşime girip çimentonun hidratasyon hızını ve oranını değiştirebilirler. Ancak temel etkisi fizikseldir. Kimyasal katkılar, çimento hamuru ile kimyasal bir tepkimeye girmemekte fakat dolaylı yoldan çimento hamurunun hidratasyonunda hızlandırıcı veya yavaşlatıcı etki gösterebilmektedirler. Bu etkiler araştırmacılar tarafından farklı mekanizmalarla (çökelme, iyon konsantrasyonu değişimi, ayrıştırma veya kümeleştirme, yüzey alanını kaplayarak hidratasyonu engelleme vs.) açıklanmaktadır. Topaklaşmaya meyilli çimento tanecikleri kimyasal katkının ayırıcı etkisiyle (bu etki elektrostatik itki olarak adlandırılır) dağılır ve su ile temas eden yüzeyleri artar. Böylece hidratasyon kolaylaşır.

Polimer esaslı katkılarda elektrostatik itkinin yerini daha farklı ayırıcı etkiler alır. Özellikle polimer bazlı katkılarda elektrostatik itkinin yanında polimer zincirlerinin

çimento tanesinin üzerine yapışarak oluşturduğu fiziksel etki (stearik itki) daha baskındır. Stearik itkinin derecesi polimer zincirinin uzunluğuna, molekül ağırlığına, yan zincir yapısına ve ortam koşullarına (sıcaklık, nem, pH, iyon konsantrasyonu) bağlıdır. Özellikle polikarboksilat bazlı katkılarda stearik itki çimento dağılımını sağlayan temel faktördür. Ortamda aşırı miktarda katkı bulunması halinde çimento taneciklerinin yüzeyi tamamen sarılacağından bir miktar katkı açıkta kalacaktır. Artan katkının olumlu bir işlevselliği olmayacağından optimum miktar kullanılmalıdır. İşte bu kritik noktaya doyum noktası denir. Her katkıyı doyum noktasında kullanmak ekonomik avantaj sağlar. Doygunluk noktasını aşan dozajda katkı ilavesi çimento hamurunun viskozitesinin aşırı düşmesine yol açar, hamur katkı parçacıkları süspansiyonda tutamaz ve beton stabilitesini kaybederek ayrışır. Bu sebeple katkı kullanırken üretici tavsiyesi olan üst sınırı aşmamakta yarar vardır.

Kimyasal katkıların, akışkanlaştırıcı etkisini daha iyi anlayabilmek için çimento hamuru hidratasyonunun ilk saatlerde etkileşimlerinin araştırılması gerekmektedir. Farklı araştırmacılar bu konuda birbiri ile çelişen sonuçlar elde etmişlerdir.

Ramachandran ve Malhotra'ya (1984) göre çimento ile suyun karışmasından sonraki ilk birkaç dakika içinde eğer ortama katkı ilavesi yapılırsa C_3A ve alçı, bu katkıyı hızla absorbe ederek etkisini azaltırlar. Bu nedenle katkının karışıma 5 ila 30 dakika gecikmeli ilavesi katkı efektifliğini artırır. Böylece çimentonun daha sonra hidratasyon reaksiyonuna giren silikat bileşenleri için ortamda akışkanlaştırıcı katkı kalmış olur ve işlenebilirlik daha uzun süre korunur.

Öte yandan Bürge (1999), hidratasyonun ilk anlarında oluşan etrenjit, henüz hidratasyona girmemiş çimento tanecikleri ile zıt zeta potansiyeline sahip olduğu için kümelenmeye sebep olur. Bu açıdan bakıldığında katkının karışıma mümkün olduğunca erken girip etrenjitin oluşturduğu kümelenmeyi engellemesi gerekmektedir (Türkel ve Felekoğlu 2004).

1.3.2. Uçucu küller

Ülkemizde son yıllarda artan enerji ihtiyacı termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santrallerden açığa çıkan atıkların, özelliklede uçucu külün (UK) önemli çevre sorunları oluşturduğu bilinmektedir. Bu atığın inşaat sektöründe, özellikle beton ve çimento üretiminde değerlendirilmesi çevresel, teknik ve ekonomik yönden büyük faydalar sağlamaktadır (Yiğiter ve ark. 2004).

Gelişen teknolojiye paralel olarak günümüzde betonun dayanıklılığını arttırmak amacıyla bilimsel ve teknik çalışmalar devam etmektedir. Birkaç yıldır, portland çimentolu betonun üretimi ile ilgili olan enerjinin korunumu üzerinde inşaat sektöründe yapılmakta olan araştırmalar, mineral karışımlar gibi düşük enerjili yoğun malzemelerin portland çimentosuna daha fazla enerji kazandırması amacıyla ya doğrudan ya da çimentoyla yer değiştirilerek ilave edilmesini teşvik eder. Mineral karışımlardan olan UK, betonun dayanıklılık karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Hem taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini iyileştirmek, hem de üretimde ekonomikliliği sağlamak amacıyla betonda çimentonun bir kısmı yerine UK kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Küresel tane şekliyle taze betonda işlenebilmeyi iyileştiren, pompalanabilme ve kohezyonu artıran UK, puzolanik özelliği nedeniyle de sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılığı artırabilmektedir.

Betonda UK kullanımı pek çok avantaj sağlar. UK'lerin kullanımıyla elde edilebilecek yararlar yalnızca çevre koruma ve enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Uygun özelliğe sahip UK'nin betonun ekonomik ve uzun ömürlü performansı üzerine olumlu etkisi vardır. UK'nin betonda katkı maddesi olarak kullanılması özellikle kütle yapılarında daha pratik ve ekonomik olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir (Ünal ve Uygunoğlu 2004).

1.3.2.1. Uçucu küllerin özellikleri

Uçucu küller betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler. UK'ler elektrik üreten termik santrallerden elde edilir. Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen UK'ler, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon adı verilen toz tutuculardа, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar. Küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 μm mertebesindedir (Topçu ve Canbaz 2001).

Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup, bu santrallerden yılda toplam 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197–1 standartları baz alınmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar.

F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler.

C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı küllerde CaO %10'dan büyük olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

TS EN 197–1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve Alimunyum Oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı Demir Oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

W sınıfı küller ise, hidrolik ve puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al2O3'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir (Aktürk 2005).

UK'nin beton içindeki performansını etkileyen en önemli özelliği inceliğidir. UK'li betonların dayanım, aşınma direnci, donma çözülme direnci gibi özelliklerin kullanılan uçucu külün inceliğinin bir fonksiyonu olduğu anlaşılmıştır (Lane ve Best 1982).

Tokyay (1989) tarafından yapılan farklı elektrik santrallerinden alınan UK'lerle yapılan bir çalışmada, UK'lerin kimyasal, minerolojik yapıları ile hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlarının oluşumu ve hızları bakımından birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir.

UK'ler beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek UK'li çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artsa da, kumdan tasarruf sağlanır. UK'lerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. Daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar.

UK kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte, prizi geciktirmektedir. UK kullanımının betonun dayanımına etkilerinin incelendiği çalışmalarda farklı araştırmacılar farklı sonuçlar elde etmişlerdir.

Haque (1984) tarafından yapılan çalışmada, düşük işlenebilirliği olan betonlarda UK çimento oranının 0.5 ve üzerine çıkması durumunda basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Çökmesiz ve akışkanlaştırıcı katılmış, UK çimento oranının 0.75 olduğu betonların dayanıklılığı, dış yüzey uygulamaları için yeterli bulunmuştur. Ayrıca UK'li betonlarda, 325-400 dozaj ve UK çimento oranı 0.75 civarında olması halinde beton yapılarda yeterli dayanım, dayanıklılık ve yüzey uygulamaları için uygun olduğu belirtilmiştir.

Yazıcı ve Baradan (1995) tarafından yapılan çalışmada ise yüksek dayanımlı betonlarda çimento yerine %25 oranında UK kullanılması ile basınç dayanımlarının ve elastisite modüllerinin düştüğü, çekme ve eğilme dayanımlarının ise arttığı görülmüştür.

Turanlı ve ark. (1997) tarafından yapılan çalışmada UK ve portland çimentosu ile üretilen harçlarda basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Bu harçlarda yüksek miktarlarda UK kullanıldığında priz sürelerinde gecikme olduğu ve büzülme oranının arttığı görülmüştür.

Sümer (1994) tarafından UK ile yapılan bir çalışmada ise PÇ 32.5 çimentosu, Orhaneli termik santrali külü ve akışkanlaştırıcı kullanarak çeşitli karışımlar hazırlanmış ve sonuçta %20 UK kullanıldığında kontrol betonuna yakın basınç dayanımları elde edildiği belirtilmiştir. UK ile birlikte akışkanlaştırıcı da kullanıldığında birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiş, akışkanlaştırıcı kullanılmadığında birim ağırlıkların arttığı görülmüştür.

Küçük danelerden oluştuğu için UK katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. UK katkılı betonun hidratasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz

dolayısıyla kütle betonları için uygundurlar. Küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirliği sağlarlar. Sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimliliğini azaltırlar. UK'ler toprak stabilizasyonu, gaz beton üretimi, hafif agrega ve tuğla üretiminde kullanılabilirler.

UK içeren betonlarda uygulanacak olan kür şartları normal betonlara göre çok daha hassasdır. Koral ve Özkul (1997) tarafından yapılan çalışmada UK'li betonlarda kür sıcaklığının arttırılması basınç dayanımını iyileştirdiği, birim ağırlıkları düşürdüğü ve hacimce su emmelerde artışa neden olduğu belirtilmiştir.

Hanehara ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan çalışmada ise kür sıcaklığı 20 ^{o}C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 ^{o}C iken 7. günden sonra UK'ün puzolanik reaksiyona başladığı görülmüştür (Topçu ve Canbaz 2001).

1.4. Hafif Beton

Beton iyi bir taşıyıcı eleman olmasına rağmen, birim ağırlığının büyük olmasından dolayı yapıdaki ölü yük değeri oldukça büyük boyutlara ulaşmaktadır. Özellikle ölü yük değerinin toplam yüke oranının büyük olduğu köprü gibi büyük açıklıklı taşıyıcı yapı elemanlarında birim ağırlığın fonksiyonu daha çok önem kazanmaktadır. Diğer yandan normal betonun birim ağırlığının büyük olmasından dolayı ısı iletkenlik katsayısı da yüksektir. Normal betonun birim ağırlığının azaltılması ile hem ekonomiklik hem de ısı iletkenlik katsayısının küçük bir değer alması sağlanmış olur.

Hafif betonların birim kütleleri, kullanım yerlerine göre büyük değişiklik göstermekte ve buna bağlı olarak özellikleri de çok farklı olmaktadır. Türkiye dünyanın en zengin ve kaliteli hafif agrega yataklarına sahip olmasına rağmen Türkiye'de hafif beton yapımı yok denecek kadar azdır. Bunun başlıca nedeni bu tür betonların özelliklerinin iyi bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Son otuz yıl

içinde, hafif beton kullanımı bir çok sanayi ülkesinde özellikle; Belçika, Hollanda, Almanya, İngiltere, A.B.D ve Japonya'da çok hızlı bir şekilde artmıştır. Diğer sanayi ülkelerinde hafif betonla inşa edilmiş bir çok yapı mevcuttur (Yıldız ve ark. 2004).

Hafif agregalı betonun binalarda ilk kullanıldığı elemanlar döşemeler olmuştur. Döşemeler hacim olarak bina taşıyıcı sistemin önemli bir yüzdesini (%70-90) oluşturdukları için, toplam statik yükte önemli bir hafifleme elde edilmiştir. Taşıyıcı sistem kütlesinin azalması, depreme maruz bölgelerde büyük öneme sahiptir. Böylece taşıyıcı sistemde oluşan deprem kuvvetleri de azalmaktadır (Açıkel 1995).

Hafif betonların başlıca faydaları, düşük birim hacim ağırlık, ısı yalıtkanlığı ile donma dayanımı olarak bilinmektedir. Hafif beton, yapı zati ağırlığını azalttığından yatay deprem kuvvetlerinin yapıya etkisi önemli ölçüde azalacaktır. Ayrıca yapı yükünün azaltılması ile betonarme yapı elemanlarının kesit boyutları küçültülebilmekte ve temel ile ilgili problemler daha kolay çözülebilmektedir. Bu durum hafif agregalı beton kullanılarak üretilen yapıların maliyet bedelini aşağıya çekmektedir. Özellikle ısı yalıtkanlığı yüksek olduğundan, yalıtım hususunda ilave masrafa gerek kalmaksızın istenilen düzey sağlanabilmektedir. Donma dayanımının yüksek olması soğuk iklim bölgelerinde hafif betona yönelik talebi artırmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle hafif beton, hazır döşeme, çatı plağı ve duvar paneli gibi prefabrike yapı elemanlarının üretiminde ve yapı zati ağırlığını azalttığından, çok katlı ve büyük açıklıklı yapılarda kullanılmaktadır.

Hafif betonların olumsuz özelliklerinin başında basınç dayanımının düşük olması gelmektedir. Ayrıca elastisite özellikleri ve donatı-beton aderansı zayıftır. Hafif betonlarda ani ve zamana bağlı deformasyonlar ile geçirimliliğinin yüksek olması da olumsuz özellikleri arasında göze çarpmaktadır. Araştırmacılar normal beton özelliklerini iyileştirmek için katkı maddeleri kullanımını hafif betona uygulayarak, bu betonların özelliklerini incelemektedir.

Beton teknolojisindeki hızlı gelişmeyle beraber, betonun çeşitli özelliklerini belirli sınırlar içerisinde değiştirmek amacıyla katkı maddeleri kullanımı, beton üretiminin

vazgeçilmez unsurlarından biri olmuştur. Hafif beton özelliklerini iyileştirmek ve yüksek dayanımlı hafif beton elde etmek için silis dumanı, uçucu kül gibi mineral katkılar ile bunların arttırdığı su ihtiyacını karşılamak üzere, süperakışkanlaştırıcı, hava sürükleyici ve su azaltıcı katkılar kullanılmaktadır.

Çeşitli ülkelerde yapılan çalışmalar incelendiğinde katkı maddeleri kullanılarak 1700 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında yoğunluğa sahip, yüksek akıcılıkta ve 600 kg/cm^2 ile 1000 kg/cm^2 arasında basınç dayanımında hafif agregalı betonlar üretilebildiği görülmektedir. Ayrıca katkı maddeleri kullanımı ile hafif betonların işlenebilme ve segregasyon özelliklerinin iyileştiği, yorulma ömrü, donatı çeliği-beton aderansı, donma-çözülme dayanıklılığı ve klorid etkilerine karşı dayanıklılığının arttığı gözlenmektedir.

Türkiye'de de hafif beton özelliklerini iyileştirmeye yönelik katkı maddeleri kullanımı üzerine sınırlı sayıda da olsa çalışmalar yapılmıştır. Çeşitli yörelerden temin edilen volkanik tüf ve bims agregaları ile katkı maddeleri kullanılarak, 1900 kg/m^3 civarında yoğunlukta, 500 kg/cm^2 civarında basınç dayanımına sahip betonlar elde edilmiştir (Duran 2003).

1.4.1. Hafif betonların sınıflandırılması

Hafif betonlar genellikle hem birim ağırlıkları hem de dayanımlarına göre sınıflandırılmaktadır. Bununla beraber, imalat yöntemine ve kullanım yerlerine göre de sınıflandırılabilmektedir.

1. Kullanım yerine göre sınıflandırma

a) Hafif yalıtım betonları: Birim ağırlıkları 250-800 kg/m^3, basınç dayanımları 7-70 kg/cm^2 arasında değişen, ısı yalıtım amacıyla kullanılan betonlardır. Havalı veya hafif agregalı türlerden olabilir.

b) Orta dayanımlı betonlar: Birim ağırlıkları 800-1400 kg/m^3, basınç dayanımları 70-170 kg/cm^2 arasında değişen ve orta derecede ısı yalıtımı sağlayabilen betonlardır. Dayanımın yeterli olduğu yerlerde ve duvar elemanı yapımında kullanılırlar. Havalı, hafif agregalı veya kumsuz türden olabilirler.

c) Taşıyıcı hafif betonlar: Birim ağırlıkları 1400-1850 kg/m^3 arasında, dayanımı en az 170 kg/cm^2 olan betonlardır. Isı iletkenlikleri normal ağırlıklı betonlara göre daha az olup, yapılarda taşıyıcı elemanların üretiminde kullanılırlar.

2. Birim ağırlıklarına göre sınıflandırma

Yalıtım betonlarından taşıyıcı olanlara kadar bütün hafif betonların, birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında değişik kabuller vardır.

TS EN 206-1 (2002)'ye göre betonlar birim ağırlıklarına göre şu şekilde sınıflandırılmıştır.

Hafif beton: 800 kg/m^3 $\leq$ Etüv kurusu durumundaki yoğunluk < 2000 kg/m^3
Normal beton: 2000 kg/m^3 < Etüv kurusu durumundaki yoğunluk < 2600 kg/m^3
Ağır beton: Etüv kurusu durumundaki yoğunluk > 2600 kg/m^3

DIN 1045'e göre betonlar birim ağırlıklarına göre şu şekilde sınıflandırılmıştır.

Hafif beton: Birim ağırlık < 2000 kg/m^3
Normal beton: 2000 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 2800 kg/m^3
Ağır beton: Birim ağırlık > 2800 kg/m^3

ACI Committee 213 (1979)'e göre betonlar birim ağırlıklarına göre şu şekilde sınıflandırılmıştır.

Hafif beton: 400 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 1800 kg/m^3
Normal beton: 1800 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 2200 kg/m^3

Ağır beton: 2200 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 2500 kg/m^3

Taşdemir (1982) hafif betonları birim ağırlıkları bakımından şu şekilde sınıflandırmaktadır.

Hafif beton: Birim ağırlık < 1900 kg/m^3
Yarı hafif beton: 1800 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 2200 kg/m^3
Hafif agregalı beton: 2100 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 2300 kg/m^3
Normal beton: Birim ağırlık $\geq$ 2300 kg/m^3

Corman (1973) hafif agregaları birim ağırlıkları bakımından kullanım alanlarına göre şu şekilde sınıflandırmaktadır.

Yalıtım betonu: Birim ağırlık < 400 kg/m^3
Yalıtım orta mukavemetli beton: 400 kg/m^3 $\leq$ Birim ağırlık < 650 kg/m^3
Taşıyıcı beton: Birim ağırlık $\geq$ 650 kg/m^3

TS 1114 EN 13055-1'de hafif agrega şu şekilde tarif edilmiştir. Tane yoğunluğu 2000 kg/m^3'ü veya gevşek yığın yoğunluğu 1200 kg/m^3'ü aşmayan mineral kökenli agregadır.

3. İmalat yöntemine göre sınıflandırma

a) Kumsuz beton: Betonun ince agregasını çıkarmak suretiyle, yalnız iri agrega kullanılarak üretilen betonlardır. Çakıl, kırmataş ve tuğla kırığı iri agrega, belli oranda çimento ile karıştırılıp, plastik kıvamda sıkıştırılmaksızın kalıba dökülerek üretilmektedir. Sıkıştırılmadığından bileşiminde önemli miktarda hava kalmaktadır. Kum kullanılmadan beton üretmek suretiyle elde edilen hafif betonlar, birim ağırlıklarının 1.6-1.8 kg/dm^3 arasında bulunması nedeniyle o kadar ilginç bir malzeme değildir. Çimento dozajı 140-250 kg/m^3 arasında değişen bu malzemenin 28 günlük dayanımı 50-95 kg/cm^2 arasındadır.

b) Hafif agregalı beton: Betonda normal agreganın bir kısmı veya tamamı çıkarılarak yerine doğal veya yapay boşluklu hafif agrega kullanılmak suretiyle üretilmektedir (Duran 2003). Mineral agregalar ile üretilen betonların birim ağırlıkları 0.5 kg/dm^3'e kadar düşük değerler kolaylıkla alabilir. Bu betonların mukavemeti birim ağırlıkla birlikte azalmaktadır. Birim ağırlığı 0.5 kg/dm^3 olan 300 dozlu betonun 28 günlük basınç dayanımı 35 kg/cm^2 civarındadır. Kökeni organik olan agregaları kullanarak elde edilen betonların birim ağırlıkları 0.5-1.5 kg/dm^3 arasında değişmekte, dayanımları ise mineral agregalı betonunkine göre küçük değerler almaktadır (Yavuz 1999).

c) Havalı beton: Çimento hamuru içerisinde kimyasal maddeler yardımı ile gaz kabarcıkları veya köpük oluşturularak üretilen, sünger gibi boşluklu bir yapıya sahip betonlardır. Çimento hamuruna alüminyum tozu gibi kimyasal maddeler katılarak gaz kabarcıkları oluşturulmakta ve gaz beton üretilmektedir. Karışım suyuna çalkalandığında köpüren katkılar katılarak, özel betoniyerlerle köpüklü beton üretilmektedir (Duran 2003).

1.5. Hafif Agregalı Taşıyıcı Betonlar

Hafif ağırlıklı taşıyıcı betonların belirli bir birim ağırlığı geçmeden minimum basınç dayanımını sağlamaları istenir. TS 2511'de taşıyıcı hafif beton, havada kurutulmuş haldeki birim ağırlığı 1900 kg/m^3'den az olan ve en az B160 dayanım sınıfındaki beton olarak tanımlanmaktadır.

Çeşitli kuruluşların, hafif agregalı taşıyıcı betonların birim ağırlık ve basınç dayanımları, için öngördükleri sınır değerler Tablo 1.1'de verilişitir.

Bu tür betonların betonarme yapılarda kullanılmasıyla daimi yükün, %25 gibi belirgin bir ölçüde azalması sağlanmaktadır. Bundan dolayı betonarme yapı tekniğinde hafif taşıyıcı beton kullanılması eğilimi gittikçe artmaktadır. Önceleri

yalnız binaların yapımında kullanılan bu tür betonlarda günümüzde 140 m açıklığında betonarme köprülerin yapımına başlanmıştır. Bu tür malzemeye yönelmenin başlıca nedeni yapının tüm ağırlığının azaltılmasından yararlanılarak taşıyıcı elemanlarının kesitlerini küçültmek ve böylece işin maliyet bedelini düşürmektir. Hollanda'da Tholen köprüsünün hafif betondan meydana getirilmesiyle 260,000 Florin mertebesinde bir tasarruf sağlanmıştır (Yavuz 1999).

Tablo 1.1. Hafif agregalı taşıyıcı betonlar için öngörülen birim ağırlık ve dayanım sınırları

Kuruluş	**28 günlük maksimum kuru birim ağırlık (kg/m^3)**	**28 günlük minimum basınç dayanımı (kg/cm^2)**
Türk Standartları Enstitüsü (TS 2511)	1900	160
Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 213 R)	1850	170
Avrupa Beton Birliği (RILEM)	1900	160
Alman Standartları (DIN 1045)	2000	150

Hafif betonla ilgili Taşdemir (1984) tarafından yapılan çalışmada normal betona ait sürekli bir granülometrinin çeşitli bölümlerini ponza taşı ile değiştirerek yarı hafif ve hafif betonlar üretilmiştir. Granülometri ve maksimum agrega boyutu sabit tutulmuştur. Üretilen betonların 28. günde basınç dayanımları, maksimum yük altındaki birim kısalmaları, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1- Etkin su/çimento oranı 0.40 ve 0.50 olan betonlarda agreganın hafif malzeme

ile değiştirilen bölümünün ortalama boyutu azaldıkça basınç dayanımı da artmaktadır. Etkin su/çimento oranı 0.60 olan betonlarda ise basınç dayanımı ortalama hafif agrega boyutu ile değişmemektedir.

2- Su/çimento oranı 0.40, 0.50, 0.60 olan betonlarda agreganın hafif malzeme ile değiştirilen bölümünün ortalama boyutu azaldıkça, basınç dayanımındaki birim kısalmalar artmaktadır.

3- Bütün hafif agregalı betonlarda aynı bir bileşim ve aynı bir birim ağırlık için ortalama hafif agrega boyutu azaldıkça tokluk önemli derecede artmaktadır. Granülometrisinin ince bölümü hafif agrega olan betonun, tokluk değeri, iri bölümü hafif agrega olan betonun tokluk değerinin yaklaşık iki katıdır.

Sonuç olarak normal bir betonun granülometrisinin ince bölümü hafif agrega ile değiştirilirse, bu tür betonların hem kırılıncaya kadar olan deformasyon yetenekleri hem de basınç dayanımları artmaktadır. Böylece bu niteliklere sahip betonların depreme daha dayanıklı bir malzeme olacakları sonucuna varılmaktadır. Öte yandan bu hafif agregaların, iklimi soğuk yöreler olan deprem bölgelerinde çok miktarda mevcut bulunması da göz önünde bulundurulması gerekli önemli bir husustur. Bu tür hafif betonun kullanılmasıyla ısı yalıtımı da sağlanacağından çok yönlü fayda elde edilecektir (Açıkel 1995).

1.5.1. Hafif agregalar

Hafif agregaları mineral ve organik kökenli olarak ikiye ayırmak mümkündür. Ayrıca hafif agregalar doğal veya yapay oluşlarına ve kırılma, eleme, yıkanma dışında bir işlem görüp görmediklerine bakılarak da sınıflandırılabilir.

a) Doğal hafif agregalar: Genellikle volkanik kökenli ve tortul olan doğal hafif agregalar, doğada bulunan bims, tüf, volkanik cüruf, scoria ve diotamit gibi volkanik kayaçların parçalanması sonucu meydana gelmekte olup, çok fazla miktarda boşluk içermektedir. Özgül ağırlıkları 500-1500 kg/m^3 arasında değişmektedir.

b) İşlenmiş doğal hafif agregalar: Doğadaki kil, şeyl, sleyt, perlit ve vermikülit gibi kayaçların özel bir ısıl işleme tabi tutularak işlenmesi ile elde edilmektedir. Döner fırınlarda veya hareketli ızgaralar üzerinde 1000^{o}C sıcaklığa kadar ısıtılan doğal taşların, kapalı gözenekleri içerisinde oluşan gazlar veya su buharı genleşerek yumuşamış olan taşın hacmini büyütmekte ve boşluk oranını arttırmaktadır. Genleştirilmiş kil, en yaygın kullanılan işlenmiş doğal hafif agrega olup, özgül ağırlığı 600-900 kg/m^3 arasında değişmektedir. Genleştirilmiş perlit ve vermikülit'in özgül ağırlıkları ise 240 kg/m^3'ün altındadır.

c) Yapay hafif agregalar: Çeşitli endüstriyel fırınlardan elde edilen ergiyerek topak haline gelmiş cüruflar genellikle gözeneli olduklarından hafif agrega olarak kullanılabilmektedir.

d) İşlenmiş yapay hafif agregalar: Sanayi yan ürünü olarak elde edilen malzemeyi bir kademe daha işleyerek üretilen genleştirilmiş cüruf, sinterleştirilmiş uçucu kül işlenmiş yapay hafif agregalardır. Yüksek fırından çıkan cürufun üzerine su püskürtülerek veya cüruf su ile hızla karıştırılarak oluşturulan su buharı, cürufun genleşerek gözenekli bir hal almasına yo açmaktadır. Genleştirilmiş yüksek fırın cürufunun hacim özgül ağırlığı 300-1100 kg/m^3 arasındadır. Kömür yakan termik santrallerden elde edilen uçucu kül ıslatılıp topak halinde fırınlandığında içerisindeki karbon yanmakta ve yuvarlak taneli sinterleştirilmiş uçucu kül elde edilmektedir. Sinterleştirilmiş uçucu küllerin özgül ağırlıkları 1000-1200 kg/m^3 arasında değişmektedir (Duran 2003).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapısal amaçla üretilen standart betonlara oranla KYB'nin en önemli avantajları mükemmel akıcılığı ve betonun kalıba boşluksuz bir şekilde yerleşmesinin sağlanmasıdır. KYB'lerde yüksek akışkanlığın elde edilebilmesi için karışımda yeni nesil yüksek akışkanlaştırıcılar kullanılır. Ancak bu tür kimyasal katkılar KYB'lerde uygun bir biçimde kullanılmadığı taktirde, ayrışma problemine sebep olabilmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda KYB'lerde bu tür problemleri ortadan kaldırmak ve maliyetini düşürmek amacıyla mineral katkılar kullanılmaktadır. **Şahmaran ve arkadaşları (2004)** yapmış oldukları çalışmada yüksek hacimde (%70) uçucu kül içeren, yeterli basınç dayanımına sahip KYB üretimini gerçekleştirmişlerdir. Uçucu küllü ve kontrol KYB'lerin taze ve sertleşmiş haldeki çeşitli özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sertleşmiş KYB'ler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, 28 günlük basınç dayanımı 46 MPa ile 30 MPa arasında değişmektedir. Uçucu kül miktarı toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %50'sine kadar olan karışımlarda ilk günlerdeki basınç dayanımı kontrol karışımına göre düşük olmasına rağmen, daha sonra aralarındaki dayanım farkı kapanmıştır. Yarmada çekme dayanımı testleri sonucunda görüldüğü üzere uçucu kül miktarı arttıkça, çekme dayanımındaki azalma basınç dayanımındakine göre bir miktar daha fazla olmaktadır.

KYB bileşimi, etkin bir süper akışkanlaştırıcının yanında toplam ince malzeme miktarı, viskozite artırıcı katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı, maksimum agrega boyutu, kum/toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betondan farklılıklar gösterir. Ayrıca bu betonlarda çimento-süper akışkanlaştırıcı katkı uyumu ayrı bir önem taşır. **Sağlam ve arkadaşları (2004)** yapmış oldukları çalışmada KYB'nin genel özelliklerini, bileşim özelliklerini ve çalışma mekanizmasını incelemişlerdir. Ayrıca hazır beton ve prefabrike sanayinde kullanılan farklı katkıların farklı çimentolarla uyumlarını araştırmışlardır. Yapılan çalışmada taze beton özellikleri ve dayanımlar açısından çimento-katkı

etkileşiminin önemli olduğu kanaatine varmışlardır. Bu nedenle uygulamaya geçmeden önce çimento-katkı uyum deneylerinin yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Aykan ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışmada, KYB'nin ilk kullanım gereksiniminden bugüne kadar geçen süre içinde, betonun daha kolay test edilebilmesi için geliştirilen test yöntemlerini incelemişlerdir. Hazırlanan betonların bu yöntemlere göre test edilmesi sonuçlarından alınan deneysel veriler, K4 kıvamlı geleneksel C35, C40 betonlarından alınan verilerle karşılaşmalı olarak değerlendirilmiştir. KYB ile geleneksel beton karşılaştırıldığında; KYB 90. dakikada hala ilk karışım kıvamını korurken geleneksel beton 1 saatte işlenebilme özelliğini kaybetmiştir. Yani KYB uzun işlenebilme süresi ile daha avantajlıdır. Üreticiye, betonu kıvam kaybetmeden daha uzun mesafelere taşıma olanağı sağlayacaktır. KYB karışımında 350 kg çimento ve 150 kg kül karışımı ile C45 beton sınıfı elde edilirken, geleneksel beton karışımında 375 kg çimento ile C35, 400 kg çimento ile iyi bir C40 betonu elde edilmiştir. Yani daha düşük çimento miktarı ile yüksek sınıflı betonlar elde etmeye imkân verecektir ve betonun maliyeti de geleneksel betonlar ile karşılaştırılabilir seviyelere gelecektir.

Felekoğlu ve Baradan (2004) yapmış oldukları çalışmanın ilk aşamasında, KYB üretimi için uygun malzeme tip ve miktarının seçimini yapıp, optimum karışım oranlarını belirlemişlerdir. Elde edilen veriler ışığında ikinci aşamada hazırlanan beton karışımlarının, taze halde kendiliğinden yerleşebilirlik ve sertleşmiş halde mekanik özellikleri incelenip, normal beton özellikleri ile kıyaslanmıştır. Buna göre KYB'de sabit bir çimento dozajında akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttırılıp karışım suyu azaltıldıkça, yayılma değeri belirli sınırlar arasında tutulurken viskozite hızla artmaktadır. Sabit bir çimento dozajı ve agrega gradasyonunda, su/toz oranı artışıyla aynı anda katkı dozajının azaltılması, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini artırmaktadır.

Kadiroğlu (2004) Kayseri bölgesinden temin edilen pomza taşı agregaları kullanılarak kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif betonun üretilebilirliği

konusunda, laboratuar bazında deneysel araştırmalar yapmıştır. Çalışmada 1400, 1500, 1600 ve 1700 kg/m^3 etüv yoğunluklarında hafif, aynı zamanda kendiliğinden yerleşen özelliklere sahip betonlar üretilmiştir. Belirtilen yoğunluklardaki karışımlarda, bağlayıcı (çimento, uçucu kül, silika dumanı) miktarları sabit tutulmuş, agrega oranları değiştirilerek hedef yoğunluklar elde edilmiştir. Üretilen betonlar üzerinde U-box, L-box, 50 cm'ye yayılma süresi, birim hacim kütlesi deneyleri uygulanarak taze beton özellikleri tespit edilmiştir. Taze betonlardan alınan numunelerle betonların basınç, çekme ve eğilme dayanımları ile elastisite modülleri tespit edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Yoğunluğu 1400, 1500, 1600 ve 1700 kg/m^3 olan KYHB'lerde elde edilen basınç dayanım değerleri, TS EN 206-1'deki öngörülen normal dayanımlı sınıf betonlarının dayanım değerlerini sağlamaktadır. Bağlayıcı miktarları bütün karışımlarda sabit tutularak, yoğunluklar agrega karışımlarındaki değişimle elde edildiğinden, beklenildiği üzere yoğunluk arttıkça dayanım değerleri de yükselmiştir. Basınç dayanımları arttıkça çekme dayanımları ve elastisite modülleri de artmaktadır. Sonuç olarak sadece taze beton ve dayanım özellikleri göz önüne alındığında, kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilebileceği kanaatine varılmıştır.

Yardımcı ve Baradan (2005) tarafından yapılan çalışmada sabit çimento dozajı altında, uçucu kül kullanılarak artan hamur hacmine sahip KYB'ler üretilmiş ve çeşitli miktar ve tiplerde çelik liflerin taze betonun reolojik parametreleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Buna göre kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip betonlarda lif kullanımı taze halde reolojik parametreleri etkilemektedir. Lif katkısı KYB'lerde karışımın özellikle geçiş yeteneğini olumsuz etkilemektedir. Hamur hacmi artışı lifli KYB'lerin geçiş yeteneğinde önemli düzeyde iyileşme sağlamaktadır. Uçucu kül kullanılarak hamur hacminde sağlanan artış, kendiliğinden yerleşen lifli betonlarda reolojik açıdan iyileşme sağlamaktadır. Uçucu külün yüksek oranda kullanımı ile meydana gelen viskozite artışı kimyasal katkı kullanımı ile kontrol altına alınmalıdır. Ayrıca yüksek oranda uçucu kül kullanımının özellikle erken yaştaki mekanik özellikleri ne şekilde etkilendiği de araştırılmalıdır. Lifli kendiliğinden yerleşen betonlarda işlenebilirlik, önemli bir dizayn parametresidir ve akış özellikleri sadece

yayılma çapı kontrolü ile değerlendirilmemelidir. Modifiye edilmiş L-kutusu testi, lifli karışımların geçiş yeteneklerinin göreceli kontrolünde kullanılabilir.

Altın ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan çalışmada, farklı dozajlarda hazırlanmış kendiliğinden yerleşen beton için bir bulanık uzman sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan bulanık uzman sistem için giriş parametreleri çimento, su, kum, I nolu agrega ve katkı maddesi, çıkış parametreleri için ise 7 günlük ve 28 günlük basınç seçilmiştir. Her karışımın yayılma deneyi sonuçları, L kutusu deneyi ve V hunisi boşalma süreleri tespit edilerek uluslar arası standartlara uygunluğu test edilmiş ve deney sonuçlarının uygun olduğu belirlenmiştir. Deneyler sonunda en ideal karışımın çimento 500 kg, su 203 kg, kum 1105 kg, I nolu agrega 569 kg ve katkı miktarı 7 kg olan karışımın olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçları ile bulanık uzman sistemden alınan sonuçlar SPSS istatistiksel paket programı varyans analizi testiyle sorgulamış, güvenilirliği tespit edilmiştir.

İnan ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmada, beton üretiminde yaygın olarak kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının betonun su ihtiyacına ve 28 günlük basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, yerli üretim olan Süperflow HW-100 adında bir tip süper akışkanlaştırıcı katkı, üç farklı boy sınıfında kırma kireçtaşı, bir tip doğal kum ve bir tip PÇ 42,5 çimentosu kullanılmıştır. Kimyasal katkı kullanımı ile betonun su ihtiyacındaki azalmalar belirlenmiştir. Buna paralel olarak betonun 28 günlük basınç dayanımındaki artışlar incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yeni nesil polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı kullanımı, karışımın çimento ve katkı içeriğine bağlı olarak, kontrol karışımına kıyasla, karışım suyunda %6 ile %43 arasında azalma gösterirken, basınç dayanımında %12 ile %109 arasında artış sağlamıştır.

Yazıcı (2002) tarafından yapılan "Değişik akışkanlaştırıcıların betondaki performansları" adlı çalışmada altı değişik akışkanlaştırıcının betondaki performansları incelenmiştir. Çalışma çerçevesinde değişik akışkanlaştırıcılar ile betonlar üretilmiş ve üretilen betonların çökme, priz başlangıç ve bitim süreleri, hava yüzdeleri ile 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Beton üretiminde;

dozaj, agrega kompozisyonları ve miktarları, çökme değeri sabit seçilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçları ilgili şartnamelerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcılar aynı esaslı olmalarına rağmen aynı agrega, aynı çimento ve aynı dozaj ile işlenebilme ve dayanım açısından birbirinden farklı sonuçlar vermiştir. Akışkanlaştırıcı katkılı betonlarda üretimden sonraki saatlerde işlenebilme problemleri ile karşılaşılabileceği de görülmüştür.

Türkel ve Felekoğlu (2004) tarafından yapılan "Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri" adlı çalışmada normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcı sınıfına giren farklı kimyasal kökenlere sahip akışkanlaştırıcı katkıların üretici firmalar tarafından tavsiye edilen dozajlarda veya daha fazla miktarda kullanılması halinde betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deney sonucunda süper ve hiper akışkanlaştırıcıların yüksek dozajlarda bile erken dayanımı etkilemediği fakat normal akışkanlaştırıcıların tüm dozajlarda priz gecikmesine sebep olduğu görülmüştür.

Yiğiter ve arkadaşları (2004) yapmış oldukları çalışmada, C tipi uçucu kül içeren beton karışımlarının bazı fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Su içerisinde kür ve havada kür olmak üzere iki farklı kür yöntemi kullanılmıştır. Çimento yerine %40'a kadar uçucu kül ikame edilerek, beton numunelerinin basınç dayanımı, elastisite modülü, asit etkisine karşı dayanıklılığı ve bağlayıcı hamurlarının priz süreleri ölçülmüştür. Bu çalışma sonucu, uçucu kül kullanımının betonun erken yaşlardaki dayanımını düşürdüğü, buna karşın 3 günden sonra, uçucu kül oranının artması ile basınç dayanımlarının arttığı bulunmuştur. Havada kür edilen numunelerin elastisite modülünün ve basınç dayanımlarının arttığı bulunmuştur. Havada kür edilen numunelerin elastisite modülünün ve basınç dayanımının suda kür edilen numunelere kıyasla daha düşük olduğu ve uçucu kül oranı arttıkça kür hassasiyetinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca uçucu kül kullanımı betonun sülfirik aside karşı dayanıklılığını arttırmıştır. Uçucu kül oranının artması bağlayıcı hamurlarının priz sürelerini uzattığı, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile bu

negatif etkinin ortadan kalktığı görülmüştür. Harç numuneleri üzerinde yapılan boy ölçümlerinde ise, uçucu kül oranı arttıkça genleşmenin arttığı gözlenmiştir.

Tandırlı (2004) yapmış olduğu çalışmada, Marmara Bölgesi'ndeki hazır beton tesislerinde kullanılmak üzere ekonomik olarak makul nakil mesafelerinde yer alan 6 adet termik enerji santralinin çıktısı olan 11 farklı uçucu külün, çimento ikamesi amacıyla kullanıldığında, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine vermiş olduğu etkileri incelemiştir. Bu amaçla betonlarda hapsolmuş hava miktarı, birim ağırlıklar, 0,30 ve 45. dakikalardaki çökme değerleri ile 1, 3, 7, 28 ve 56. günlerdeki basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Kullanılan uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel analizleri yapılmış, lazer defraksiyonu yöntemiyle tane dağılımları tespit edilmiş ve ölçülen beton özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Deney karışımlarda, aynı kaynaktan TS EN 197-1 CEM I ve CEM II tiplerinde iki çeşit çimento, lignosülfonat kökenli normal ve süper akışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. İri agregalar ve iri kum kireçtaşı kökenli, ince kum ise sadece bir grupta deniz kumu, diğer grupların tümünde dağ kumudur. Esas olarak beton karışım hesaplarına veri teşkil etmesi amacına yönelik 70 deney ve 15 gruptan oluşan bu serinin deneyleri uzun bir zaman dilimine yayılmış ve aynı kaynaktan farklı zamanlarda gelen ya da seperasyon işlemleri ile iyileştirilmiş küllerdeki nitelik ve etki değişimleri de gözlemlenmiştir. Her bir grup, bağlayıcısı sadece çimento olan bir şahit betona karşın bu çimento miktarının bir kısmının su/bağlayıcı oranı sabit kalmak üzere, değişen oranlarda uçucu kül ile yer değiştirdiği ve diğer tüm bileşenlerin hacimsel oranlarının aynı kaldığı deney karışımlarından oluşturulmuştur. Grupların tüm karışımları üzerinde çökme, çökme kaybı, basınç mukavemeti ve mukavemet kazanımındaki değişmeler ölçülmüştür. 28 günlük basınç mukavemet değerleri baz alınarak, sadece çimento kullanılması durumunda bu mukavemet değerlerini verecek su/çimento oranlarına göre uçucu küllerin k-eşdeğerlik katsayıları tespit edilmiştir. Külün tanecik yapısının, özgül yüzeyi ve tane dağılımına göre daha kritik olduğu, özgül yüzey ve tane dağılımına göre diğer küllere hatta yerine ikame edildiği çimentoya nazaran daha ince olan bir külün kararlı ve düzgün küresel tanecik yapısı nedeniyle kıvamı arttırabildiği görülmüştür. Aynı sebeple çimentoya nazaran daha iri bile olsa tanecik yapısı ve şekli düzensiz bir külün ikame oranı arttıkça kıvamı düşürdüğü görülmüştür. Kıvamı azaltıcı etki yapan

çoğu küllerin mukavemetlere olumlu etki yaptığı, kayıpları düşük mertebede tuttukları hatta mukavemet seviyesini korudukları görülmüştür.

Çelik (2004) tarafından yapılmış olan "Uçucu kül, silis dumanı ve atık çamur katkılarının çimento dayanımlarına etkileri" adlı çalışmada kullanılan endüstriyel atıklar; ülkemizde faaliyet gösteren termik santrallerden alınan 2 farklı uçucu kül ile silis dumanı ve Ovacık-Bergama Yöresindeki altın madeni tesisinden çıkan atık çamurdur. Uçucu küller ve silis dumanı %15, 25; atık çamur %5, 15 oranlarında PÇ 42,5 klinkerine katılmıştır. Atık çamur, uçucu kül ve silis dumanıyla da farklı oranlarda karıştırılarak PÇ 42,5 klinkerine katılmıştır. Üretilen harçların 2, 7, 28 ve 56. gün sonundaki basınç dayanımları tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde bütün kür süreleri için PÇ 42.5'a kıyasla en yüksek basınç dayanım değerlerini silis dumanı katkılı harçlar vermiştir.

Eren ve Yılmaz (2004) tarafından yapılan "Değişik sıcaklıklarda kür edilen salt portland çimentolu, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül katkılı betonlarda dayanım gelişimi" adlı çalışmada, yüksek fırın cürufu veya uçucu külün portland çimentosu yerine kısmi ikamesinin, değişik sıcaklıklarda kür edilen betonların dayanımlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Basınç dayanım sonuçları, hiperbolik dayanım-zaman fonksiyonuna göre n kuvvet indisi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada düşük, normal ve yüksek sıcaklıklarda uçucu kül ve cüruflu betonlar portland çimentolu betonlara göre daha yavaş dayanım gelişimi göstermişlerdir. Portland çimentolu betonlar en yüksek dayanım değerini 7 gün ve sonrasında 20°C kür sıcaklığında göstermiştir. 35°C' de kür edilen uçucu kül betonları, 28 ve 90 gün sonunda diğer sıcaklıklara göre daha yüksek dayanım kazanmışlardır. Cüruflu betonlar 28 gün kür süresinden sonra portland çimentolu betonlar ile aynı davranışı göstermişlerdir. Aynı zamanda, curuflu betonlar en yüksek dayanım değerini 20°C kür sıcaklığında kazanmışlardır.

Yazıcı (2005) tarafından yapılan çalışmada, Orhaneli termik santrali baca gazı temizleme ürünü yapay alçı, yine aynı santrale ait uçucu kül, kireç ve çimento değişik oranlarda kullanılarak hazırlanan bağlayıcıların mekanik özellikleri

incelenmiştir. Karışımlarda yapay alçının ağırlıkça %20-40 oranında kullanımı basınç dayanımında genellikle artışlar sağlarken daha yüksek oranda kullanımı düşüşlere yol açmıştır. Deney sonuçları, geliştirilen bağlayıcının blok eleman, panel eleman gibi taşıyıcı olmayan elemanların üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir.

Topçu ve Canbaz (2001) yapmış oldukları çalışmada endüstriyel bir atık olan uçucu külün betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanımının betondaki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül, Eskişehir bölgesi agregaları ve PKÇ/B 32.5R çimentosu kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Numuneler 300, 350, 400 kg/m^3 dozaj ve bu dozajların her biri için çimento yerine %20 ve %40 oranında uçucu kül katılarak elde edilmiştir. Üretim sırasında taze betonlarda çökme, VeBe, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Laboratuar ortamında bekletilen numuneler 7, 28 ve 60 günün sonunda yapılan deneylerle uçucu külün beton üzerindeki fiziksel ve mekanik etkileri belirlenmiştir. İşlenebilirlik açısından yapılan incelemelerde dozaj azaldıkça uçucu kül katılan betonlarda uçucu kül katkısız kontrol betonlarına göre VeBe süresinin azaldığı görülmüştür. Uçucu kül kullanımının beton basınç dayanımını azalttığı ve uçucu kül miktarının artırılması durumunda dayanımın daha da geç kazanıldığı anlaşılmıştır. 2000 yılı birim fiyatları ile yapılan maliyet analizinde çimento yerine %20 uçucu kül kullanılması ile beton birim maliyetinde ortalama %10'luk, %40 uçucu kül kullanılması ile de %18'lik bir ekonomik kazanç elde edildiği görülmüştür.

Ünal ve Uygunoğlu (2004) yapmış oldukları çalışmada, uçucu küllü betonların donma-çözülme etkisinde mekanik özeliklerini araştırmışlardır. Üretilen betonlarda, su/çimento oranı 0,65 olarak alınmış, çimento 300 kg/m^3 ve 30, 60, 90 ve 120 kg/m^3 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. 7 ve28 günlük numuneler üzerinde 1 hafta süre içerisinde 25 donma-çözülme çevirimi uygulanmıştır. Çevirimin tamamlanmasından sonra birim hacim ağırlık, su emme, ultrases geçiş süresi ve basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Ultrases hızına ve birim ağırlığa bağlı olarak elastisite modülleri ve buradan da dayanıklılık faktörleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak uçucu

kül miktarının %10-20 oranında ağırlıkça çimentonun yerine kullanılması betonun özelliklerine olumsuz bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

Yaprak ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel bir atık olan Çayırhan ve Çatalağzı termik santrali uçucu külleri ile Kardemir yüksek fırın cürufunun, süper akışkanlaştırıcı katkılı beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, ağırlıkça %0, 10, 20 ve 30 oranlarında portland çimentosu (PÇ 42,5) ile ikame edilerek süper akışkanlaştırıcı katkılı betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlar ile 15 cm boyutlu küp numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 gün kür edildikten sonra basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli betonlar, hem birbirleri ile hem de PÇ 42,5 ile üretilmiş olan kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı, %10 uçucu kül ve %20 yüksek fırın cürufu içeren betonlarda elde edilmiştir**.**

Aruntaş (2006) tarafından yapılan "Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli" adlı çalışmada UK'lerin inşaat sektöründe çok büyük kullanım potansiyelinin bulunduğu ve kullanımının özellikle çimento, beton ve yapı malzemelerinin üretiminde daha yaygın olduğu belirtilmiştir. Türkiye'de ve Dünyada bu atığın değerlendirilmesi durumunda, enerji tasarrufu sağlanması, daha ucuz ve kaliteli malzeme üretilmesi, atık malzemenin geri dönüştürülmesiyle ülke ekonomisine katkı sağlanmasının yanı sıra hem doğal hammadde ile ekolojik dengenin korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi mümkün görünmektedir.

Türkiye dışındaki ülkelerde genellikle genleştirilmiş kil, sinterleştirilmiş uçucu kül, genleştirilmiş tortulu şist gibi işlenmiş yapay hafif agregalar ile beton katkı maddeleri kullanılarak taşıyıcı hafif betonlar üretilmektedir. **Duran (2003)** tarafından doğal hafif agrega kullanımının beton maliyetini önemli ölçüde azaltabileceği düşünülerek yapılan çalışmada, Karapınar volkanik agregası ile üretilen hafif betonun bazı özelliklerine silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddelerinin etkileri incelenmiştir. Değişen oranlarda katkı maddeleri kullanılarak üretilen 18 seri hafif beton karışımının taze birim hacim ağırlık, kıvam,

kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı özellikleri tayin edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, çimentonun ağırlıkça %20'si oranında silis dumanı ve toplam bağlayıcının %2'si kadar süperakışkanlaştırıcı kullanılarak 400 kg/m^3 çimento dozajında 429 kg/cm^2 basınç dayanımı olan, 450 kg/m^3 çimento dozajında basınç dayanımı 447 kg/cm^2 olan ve kuru birim hacim ağırlıkları 1900 kg/m^3'ü geçmeyen betonlar üretilebilmektedir.

Altun ve Haktanır (1999) tarafından yapılan çalışmada Kayseri Erciyes dağı Develi yöresinden sağlanmış bims kumu ve agregası üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak özellikleri tespit edilmiştir. Bu agregalar yardımı ile değişik dozajlarda hafif beton üretilip, basınç dayanımı ve birim hacim ağırlığı gibi mekanik özellikleri tayin edilmiştir. Bu özellikler yapılarda kullanılan normal betonlarla karşılaştırılmıştır. Hafif betonla ilgili olarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Erciyes dağı volkanik agregası kullanılarak; 450 kg/m^3 dozajla 14.97 kN/m^3 birim hacim ağırlığında ve dayanımı 22.1 N/mm^2, 400 kg/m^3 dozajla 15.05 kN/m^3 birim hacim ağırlığında ve dayanımı 21.5 N/mm^2, 350 kg/m^3 dozajla 14.45 kN/m^3 birim hacim ağırlığında ve dayanımı 14.5 N/mm^2 beton elde edilebileceği görülmüştür. Normal betonda ise, 300 kg/m^3 dozajla 23.80 kN/m^3 birim hacim ağırlığında ve dayanımı 22.5 N/mm^2 olan beton elde edilmiştir. Böylece yöresel hafif agrega ile üretilen hafif betondan dayanım olarak C16 sınıfına giren taşıyıcı hafif beton üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Malhotra (1990) yapmış olduğu çalışmada uçucu kül, silis dumanı, hava sürükleyici ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanarak hafif beton üretmiştir. Üretilen hafif betonların yoğunlukları 2000 kg/m^3'den daha az olmakla beraber, basınç dayanımları 700 kg/m^2 olan hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir.

Beton kalitesi, belli bir süreç içerisinde farklı aşamalardan meydana gelen işlemlerin sonucunda şekillenmektedir. Kaliteyi etkileyen bu faktörlerin en önemlilerinden biri de üretilen taze betonun kalıbına yoğun ve homojen olarak yerleştirilmesi aşamasıdır. Yerleştirmede en etkili yöntemlerden biri vibrasyon uygulamasıdır. Etkin vibrasyonun bilinen önemine vurgu yapmak amacıyla **Yılmaz ve Canpolat (2002)**

laboratuarda deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, C20 ve C35 sınıfında iki farklı çökmede üretilen betonların A grubu hariç diğerlerine (B) ilk vibrasyon uygulandıktan sonra yine C grubu hariç diğerlerine 30, 60, 90 dakika sonunda ikinci bir (tekrarlı) vibrasyon yapılmıştır. Standart koşullarda saklanan betonların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları bulunduktan sonra tek vibrasyon uygulanan her serideki betonun 28 günlük basınç dayanımı referans alınarak o serideki diğer sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir. Vibrasyon yapılmamış, ya da kurallara uygun yapılmamış betonların dayanımlarında ciddi oranda azalma olduğu, özellikle çökmesi düşük betonlarda kendi ağırlığı ile yerleşme zorluğundan dolayı bu azalmanın daha yüksek olduğu (%35'e yakın) görülmektedir. İkinci vibrasyon (revibrasyon) dayanımda anlamlı artışlar sağlamaktadır. Çökmesi yüksek, çok akıcı kıvamlı betonlarda bu artış %20 düzeyine çıkabilmektedir. Bu durum, taze betonda fazla suyun neden olduğu artan terlemeyle paralel oluşan boşlukların artması ve ikinci bir vibrasyonla bunların azaltılması sonucu ile açıklanabilir. Bu nedenle çökmesi fazla betonlarda ikinci vibrasyonun etkisi daha belirgin olarak görülmektedir. İlk vibrasyonla ikinci vibrasyon arasındaki süre arttıkça ikinci vibrasyonun etkisi artmaktadır. Şüphesiz bu sürenin priz süresini geçmemesi gerekmektedir. Gerçekte betonun kullanıldığı yapıda donatı yoğunluğu ve kalıp darlığı gibi zor koşulların yanı sıra kalıp yüzeyinin pürüzlülüğü ve sıkıştırılacak beton kütlesinin büyüklüğü de göz önünde bulundurulursa ikinci vibrasyonun deney numunelerine göre yapıda çok daha etkili olacağı söylenebilir.

Karışım tasarımı yöntemleri ve kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri araştırmaları, KYB'yi standart beton haline getirmiştir. Bu araştırmaları sonucunda KYB'nin test edilebilmesi için bazı deneysel metotlar ve tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. **EFNARC 2002** yılında KYB ile ilgili gerekli tüm bilgileri içeren "Specification and Guidelines for SCC" isimli dokümanı yayınlamıştır. Yapılan KYB ile ilgili çalışmalarda EFNARC'ın bu yayını referans alınmıştır.

3. METERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu bölümde, çalışmada kullanılan hafif agrega, ince kum, karma suyu, çimento, akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve uçucu küle ait bilgilere yer verilmiştir.

Agrega, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin tayini deneyleri Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuarında yapılmıştır.

3.1.1. Hafif agreganın özellikleri

Bu çalışmada kullanılan Nevşehir bims agregası, Nevşehir ili Kavak bölgesinden temin edilmektedir ve Konya'da kurulu bir fabrikada imal edilen briket için kullanılmaktadır.

KYHB elde etmek için kullanılan Nevşehir bims agregası, Konya'da hafif beton briket imalatı yapan Termobims Isı Yalıtımlı Hafif Yapı Elemanları ve Madencilik İnşaat Sanayi ve Tic. Aş. agrega deposundan alınmıştır.

Tuvenan hafif agreganın sıkışık birim ağırlığı 729 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 684 kg/m^3'dür.

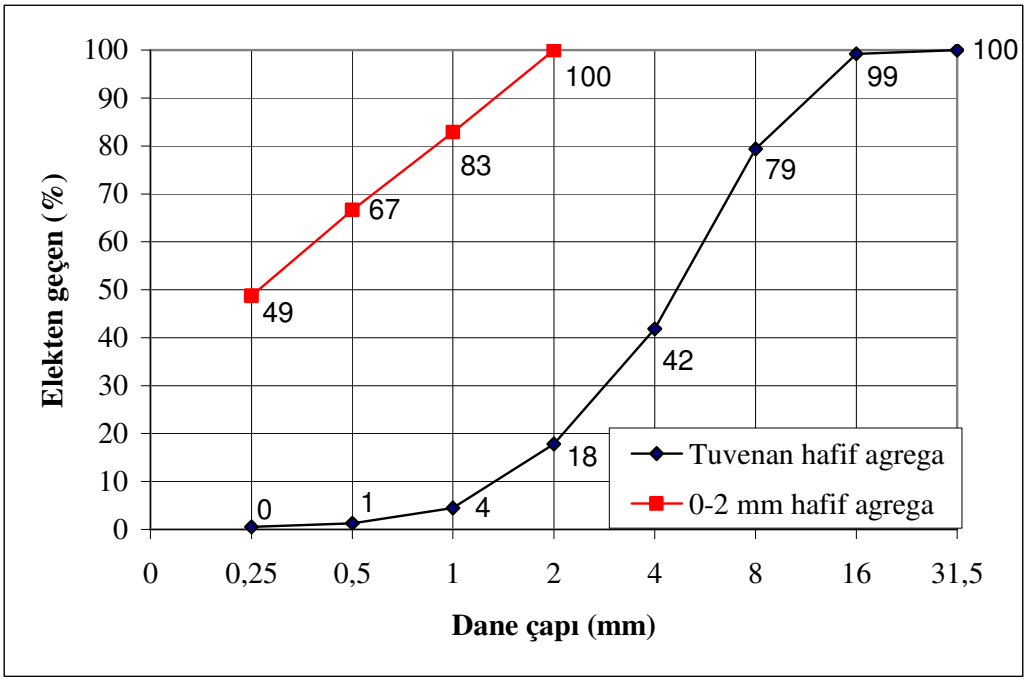
4-16 mm dane çaplı iri hafif agreganın sıkışık birim ağırlığı 703 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 654 kg/m^3, kuru özgül ağırlığı 1.04 t/m^3, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 1.24 t/m^3, görünen özgül ağırlığı 1.29 t/m^3 ve su emme oranı %18.5'dir.

0-4 mm dane çaplı ince hafif agreganın sıkışık birim ağırlığı 759 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 714 kg/m^3, kuru özgül ağırlığı 1.28 t/m^3, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 1.44 t/m^3, görünen özgül ağırlığı 1.52 t/m^3 ve su emme oranı %12.4'dür.

Tuvenan hafif agregada miktarı yetersiz olan 0-2 mm malzeme için aynı bölgeden çıkartılan ve sıva işlerinde kullanılan hafif agrega kullanılmıştır.

0-2 mm dane çaplı hafif agreganın sıkışık birim ağırlığı 1228 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 1039 kg/m^3, kuru özgül ağırlığı 1.85 t/m^3, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 1.96 t/m^3, görünen özgül ağırlığı 2.08 t/m^3 ve su emme oranı %6'dır.

Tuvenan hafif agreganın ve 0-2 mm dane çaplı hafif agreganın granülometri eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir.

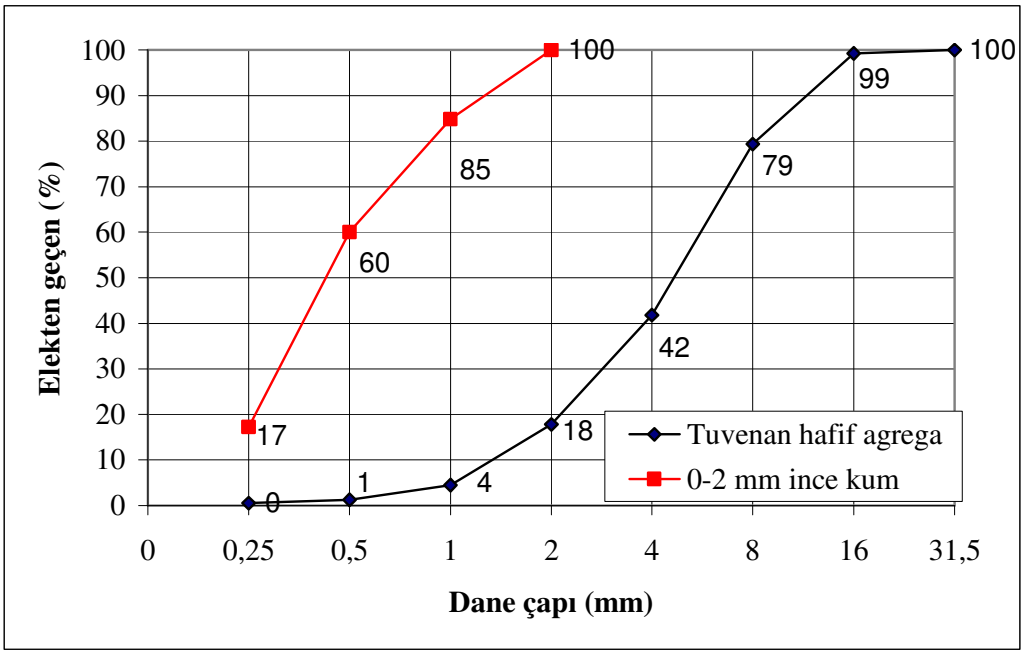


Şekil 3.1. Tuvenan hafif agreganın ve ince hafif agreganın granülometri eğrileri

Yapılan çalışmada ayrıca tuvenan hafif agregada miktarı yetersiz olan 0-2 mm malzeme için Konya'nın Karapınar ilçesi Merdivenli yöresinden çıkartılan ve sıva işlerinde kullanılan ince kum kullanılmıştır.

0-2 mm dane çaplı ince kumun sıkışık birim ağırlığı1654 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 1472 kg/m^3, kuru özgül ağırlığı 2.27 t/m^3, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2.33 t/m^3, görünen özgül ağırlığı 2.41 t/m^3 ve su emme oranı %2.5'dur.

Tuvenan hafif agreganın ve 0-2 mm ince kumun granülometri eğrileri Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Tuvenan hafif agreganın ve ince kumun granülometri eğrileri

3.1.2. Beton karma suyu ve çimentonun özellikleri

KYHB üretiminde kullanılan beton karma suyu olarak Yükselen havzasından temin edilen ve içilebilir özellikteki Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü şebeke suyu kullanılmıştır.

KYHB üretiminde, özgül ağırlığı 3.06 kg/dm^3 olan CEM I 42.5 N çimentosu kullanılmıştır. Konya Çimento A.Ş. tarafından üretilen çimentonun TS EN 197-1'e uygunluğu, fabrika laboratuarında test edilmiştir. Bulunan değerler ve TS EN 197-1'e uygunluğu Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çimentoya ait Konya Çimento A.Ş. laboratuarlarında bulunan değerler ve TS EN 197-1'de istenen değerler

Kimyasal özellikler	**Elde edilen değerler**	**TS EN 197-1'de (TS 19) istenen değerler**	
		En az	**En çok**
Kızdırma kaybı (%)	4.33		5.00
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.26		5.00
Kükürt trioksit (SO_3) (%)	2.85		3.50
Klorür (Cl) (%)	0.0120		0.10
Fiziksel özellikler			
2 günlük basınç dayanım (Nt/mm^2)	22.7	10.0	
7 günlük basınç dayanım (Nt/mm^2)	35.0		
28 günlük basınç dayanım (Nt/mm^2)	45.3	42.5	62.5
Priz başlangıcı (min)	145	70	
Hacim genleşmesi (mm)	1		10

3.1.3. Uçucu külün özellikleri

KYHB üretiminde kullanılan mineral katkı maddesi, Tunçbilek Termik Santrali uçucu külü olup, kimyasal analizi sonuçları Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Uçucu kül, TS EN 450'de; püloverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3'den meydana gelen, ENV 197-1'de belirtildiği gibi tarif ve tayin edilen reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozu olarak tanımlanmaktadır. Uçucu külün özgül ağırlığı 1.77 kg/dm^3'dür. Tunçbilek uçucu külü için Baştaş Çimento Aş. laboratuarında deney sonucunda bulumuş değerler ve TS EN 450'ye uygunluğu Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Baştaş Çimento Aş. laboratuarlarında bulunan değerler ve TS EN 450'de istenen değerler

Kimyasal Özellik	Elde edilen değerler	TS EN 450'de istenen değerler
SiO_2 (%)	53.66	> 25
Al_2O_3 (%)	18.93	
Fe_2O_3 (%)	11.2	
CaO (%)	2.32	
MgO (%)	6.95	
SO_3 (%)	1.41	< 3
Cl (%)	-	< 0.10
Na_2O (%)	0.16	
K_2O (%)	1.27	< 1
P_2O_5 (%)	0.14	
TiO_2 (%)	-	
Mn_2O_3 (%)	0.18	
Kızdırma Kaybı (%)	0.4	< 5
Toplam (%)	96.2	

3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri

KYHB üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, modifiye polikarboksilat esaslı, açık kahverengi renginde, 1,07 kg/l yoğunluğunda, sıvı, 3.nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı olan Sika ViscoCrete-3075'dir.

Sika ViscoCrete-3075, yeni teknoloji ürünü olup; hazır beton sektörü, KYB üretimi ve çok yüksek dayanımlı beton (C 50-C 100) üretimi amacıyla %30-40 su kesme ihtiyacı için uygundur. Sika ViscoCrete-3075, çift etkili bir katkı olup, çimento tanecikleri üzerinde elektriksel etkileşim ve saçaklanma yöntemleri ile hidratasyon prosesine paralel olarak aşağıdaki avantajları sağlar:

1. Mükemmel bir kendiliğinden sıkışma özelliği sağlar
2. Oldukça yüksek bir su azaltma olanağı sağlar
3. Uzun süre kıvamını koruma özelliği ile yaz şartlarına ve pompalanabilmeye uygundur
4. Su geçirimsizlik özelliği ve karbonatlaşmada azalma imkânı sağlar
5. Klorür içermediği için her türlü betonarme betonlarda donatıya zarar vermez
6. Vibrasyon gerektirmediğinden gürültü kirliliğine sebep olmaz
7. Büzülmeyi en aza indirir

Betondan istenilen performansa bağlı olarak; plastik beton için çimentonun %0.4-1.0'i (100 kg çimento için 400-1000 g) oranında, kendiliğinden sıkışan beton için çimento ağırlığının %1,0-2,0'si oranında (100 kg çimento için 1000-2000 g) kullanılır (Sika Yapı Kimyasalları A.ş. Teknik Bilgi Föyü).

3.2. Metot

Bu bölümde KYHB üretiminde kullanılan bims agregasının ve ince kumun özelliklerinin belirlenmesi, kullanılan agregaların oranları, çimentonun dozajı, su miktarının seçimi, süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi ve uçucu kül miktarının belirlenmesi ve beton karışım hesapları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca KYB'lerin deney yöntemleri, KYHB numunelerinin bileşimleri, hazırlanması, karıştırılması, kalıba yerleştirilmesi, kürü, numune boyutları ve sayıları, beton numuneler üzerinde yapılan deneyler ile ilgili uygulanan metotlar anlatılmıştır.

3.2.1. Agrega deneylerinde uygulanan metotlar

KYHB üretiminde kullanılan agregaların özelliklerinin belirlenmesi için, TS 3529'a göre ince, iri ve tuvenan agregada sıkışık birim ağırlık ile gevşek birim ağırlık tayini deneyleri, TS EN 1097-6'ya göre iri ve ince agregada özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyleri, TS 130'a göre ise granülometri deneyleri yapılmıştır.

3.2.2. Beton numunelerinin hazırlanmasında uygulanan metotlar

3.2.2.1. Agrega oranları

1. ve 2. Seri KYHB karışımında kullanılacak olan agrega granülometrisi, TS 3234'de bims agregaları için verilen elverişli granülometrik bölgelerle karşılaştırılmıştır.

1. Seri KYHB karışımı için 0-2 mm ince hafif agrega %30, 0-4 mm ince hafif agrega %40 ve 4-16 mm iri hafif agreganın %30 oranında kullanılması uygun bulunmuştur.

2. Seri KYHB karışımı için ise 0-2 mm ince kum %30, 0-4 mm ince hafif agrega %40 ve 4-16 mm iri hafif agreganın %30 oranında kullanılması uygun bulunmuştur.

Agregaların ve karışımların elekten geçen malzeme yüzdeleri Tablo 3.3 ve Tablo 3.4'de verilmiştir. Ayrıca karışımların granülometri eğrisi ile bims agregası için elverişli granülometrik bölgeler Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir.

3.2.2.2. Çimento dozajı ve su miktarı

KYHB karışımlarında çimento dozajı 350, 400, 450 ve 500 kg /m^3 alınmıştır. Her bir karışım için defalarca ön deneyler yapılarak su miktarları tayin edilmiş ve gerçek karışım miktarları elde edilerek bunlara göre beton üretilmiştir.

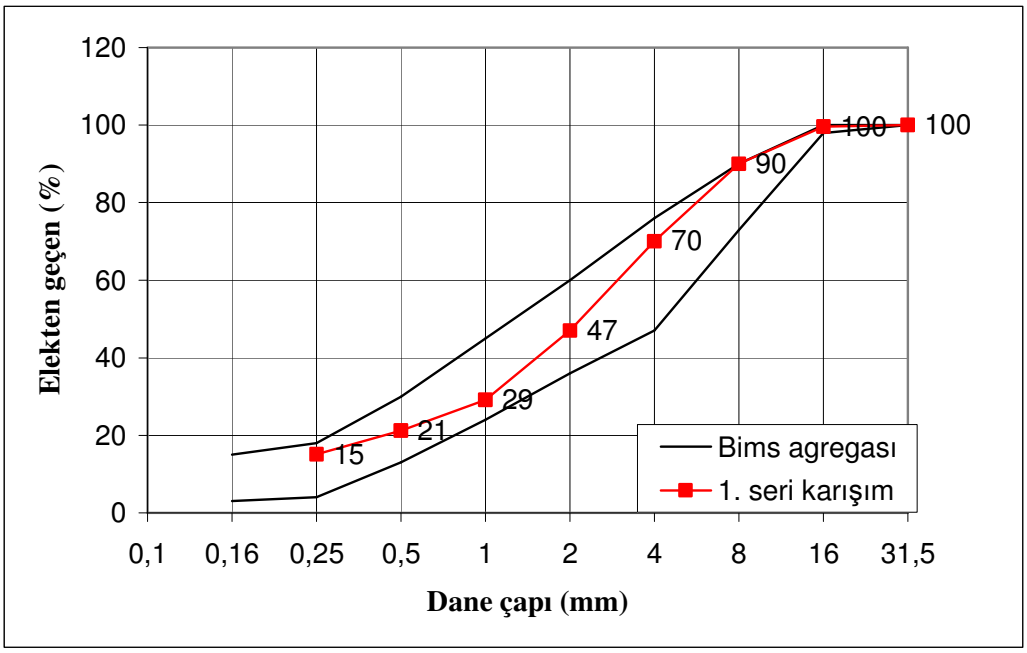
3.2.2.3. Uçucu kül ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri oranları

Her bir karışıma ilgili literatürlerdeki öneriler dikkate alınarak çimentonun ağırlıkça %47'si oranında uçucu kül ilave edilmiştir.

Sika 3075 süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi, malzeme katoloğunda belirtilen maksimum ve minimum değerler göz önünde tutulup ön deneyler yapılarak, toplam bağlayıcı miktarının %1.2-1.8'i oranlarında karışım suyuna ilave edilmiştir.

Tablo 3.3. 1. Seri KYHB için kullanılan agrega ve karışımların elekten geçen malzeme yüzdeleri

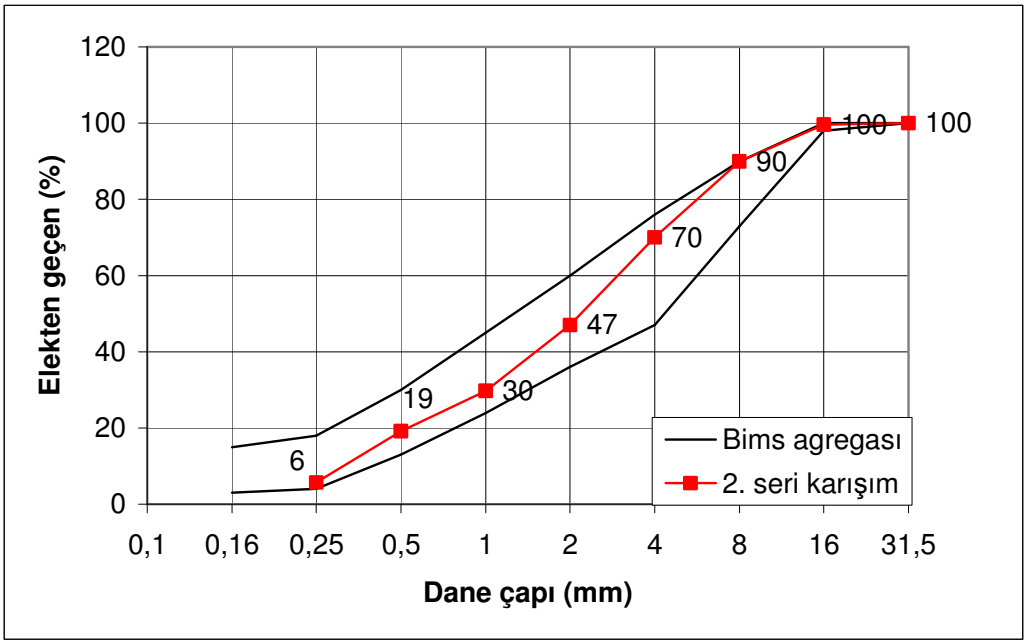
Malzeme	Elek çapı (mm)							
	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
0-2 mm ince hafif agrega	49	67	83	100	100	100	100	100
0-4 mm ince hafif agrega	1	3	11	43	100	100	100	100
4-16 mm iri hafif agrega	0	0	0	0	0	65	99	100
Karışım	15	21	29	47	70	90	100	100



Şekil 3.3. 1. Seri karışımın granülometrisi ve TS 3234'de bims agregaları için verilen elverişli granülometrik bölge

Tablo 3.4. 2. Seri KYHB için kullanılan agrega ve karışımların elekten geçen malzeme yüzdeleri

Malzeme	Elek çapı (mm)							
	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
0-2 mm ince kum	17	60	85	100	100	100	100	100
0-4 mm ince hafif agrega	1	3	11	43	100	100	100	100
4-16 mm iri hafif agrega	0	0	0	0	0	65	99	100
Karışım	6	19	30	47	70	90	100	100



Şekil 3.4. 2. Seri karışımın granülometrisi ve TS 3234'de bims agregaları için verilen elverişli granülometrik bölge

3.2.2.4. Beton karışım hesapları

KYB üretiminde yüksek akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılarak yüksek çökme değerlerine sahip olmasından dolayı, taşıma ve yerleştirme esnasında ayrışma ve terleme problemleri ortaya çıkabilmektedir. Taşıma ve yerleştirme işlemlerinde ayrışma ve terleme tehlikesini ortadan kaldırmak, bu betonların yeterli kohezyona sahip olması ile mümkündür. Bu nedenle KYB'lerin karışım hesabı özel dikkat gerektirmektedir.

Yüksek akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla ortaya çıkabilecek ayrışma problemini önlemek amacıyla iri agrega miktarını azaltarak, ince agrega miktarını artırmak bugüne kadar yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmuştur. Öte yandan ince agrega miktarının artırılması ve en büyük agrega boyutunun azaltılması ile yeterli kohezyon sağlanırken, çimento miktarının artmasına, dolayısıyla hem maliyetin hem de beton sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır.

Gerekli kohezyonu sağlayabilmenin bir başka yöntemi de viskozite düzenleyici kimyasal katkıların kullanılmasıdır. Ancak bu tür katkılarda maliyeti önemli ölçüde artırmaktadır. Yakın geçmişte yapılan birkaç araştırma sonucunda uçucu küllerin KYB'lerin kohezyonunu sağlamak, kullanılan çimento miktarını azaltmak ve dolayısıyla, bir yandan daha ekonomik KYB elde ederken diğer yandan da beton sıcaklığını düşürmek maksadıyla kullanılabileceği görüşü öne sürülmektedir. Öte yandan, konvansiyonel betonlarda yüksek miktarda uçucu kül kullanımı 1980'lerden buyana iyi araştırılmış, oldukça bilinen bir konudur. Yüksek hacimde uçucu kül içeren konvansiyonel betonlardan farklı olarak KYB'de su/çimento oranı ve toplam bağlayıcı miktarı biraz daha yüksek miktarda tutulmaktadır (Şahmaran ve ark. 2004).

Normal betonda da, taşıyıcı hafif betonda olduğu gibi basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör su/çimento oranıdır. Beton karışım hesabında, su/çimento oranı, agregaların türlerine bağlı olarak su emme kapasiteleri, su içerikleri ve çimento dozajı ile kimyasal ve mineral katkı içerikleri, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini

etkileyecek faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton karışım oranlarının belirlenmesinde genellikle basınç dayanımı ve işlenebilirlik özellikleri göz önünde bulundurulur. Çünkü hafif agrega ile yapılan hafif taşıyıcı betonlar daima dayanım düşüklüğü ve segregasyona eğilimlidirler. Bu nedenle tasarımdan yerleştirmeye kadar bütün aşamalarda, çalışmaların titizlikle gerçekleştirilmesi gerekir. Hafif agregaların yüksek derecede su emme yetenekleri nedeniyle, istenen işlenebilirliği ve kıvamı elde etmek için gerekli su miktarı da, kullanılan agrega çeşidi, tane büyüklüğü ve çimento dozajına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Kadiroğlu 2004).

Hafif betonların üretiminde bazı değişik yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Bunların en önemlisi üretimden önce hafif agregaya bir miktar su emdirilmesidir. Bu yapılmaz ise hafif agrega, konulan suyun bir kısmını emecek, bunun sonunda çimento hidratasyon için gerekli suyu bulamadığı için beton dayanımı beklenen dayanımın altında olacaktır. Burada şunu da belirtmek gerekir ki, bu betonlara ait su/çimento oranındaki su miktarı agregaya daha önceden emdirilmiş su miktarını içermez. Agregalara önceden emdirilecek su miktarı yapılacak deneylerle saptanmalıdır.

Harç fazındaki suyun emilmesi agregadan agregaya değişiklik gösterir. Bundan dolayı normal betondaki gibi hava hacminin bulunması güçtür. Taze hafif betonda agrega ve çimento hacminin dışındaki hacim "geri kalan (su+hava)" olarak verilir. Hava hacmi başka bir deneyle belirlenmemiş ise hesapla verilmesi tercih edilmez (Açıkel 1995).

Bu çalışmadaki beton bileşim hesabı, KYB'lerin üretimindeki tasarım kriterlerine göre değil de, mutlak hacim yöntemine göre yapılmıştır.

Mutlak hacim yöntemine göre 1 m^3 betonda bulunacak karışım elemanlarının miktarı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$V_a = 1000 - \left(\frac{C}{\gamma_C} + \frac{UK}{\gamma_{UK}} + E + h \right)$$

V_a: 1 m^3 betonda bulunacak agreganın hacmi (dm^3)

C: Karışıma girecek çimentonun ağırlığı (kg)

γ_c: Çimentonun özgül ağırlığı (kg/dm^3)

UK: Karışıma girecek uçucu külün ağırlığı (kg)

γ_{UK}: Uçucu külün özgül ağırlığı (kg/dm^3)

E: Karışıma girecek suyun hacmi (dm^3)

h: Betondaki havanın hacmi (dm^3)

1 m^3 betonda bulunacak agrega miktarları ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$G_i = V_a \times P_i \times \gamma_i$$

G_i: i agregasının ağırlığı (kg)

P_i: i agregasının karışım yüzdesi (%)

γ_i: i agregasının doygun kuru yüzey özgül ağırlığı (kg/dm^3)

1. Seri 350 dozlu KYHB karışım hesabı:

$C = 350kg$

$UK = 350 \times 0.47 = 165kg$ (Çimento ağırlığının %47'si oranında UK kullanılmıştır.)

$$\frac{E}{C + UK} = 0.49$$

$$\frac{E}{350 + 165} = 0.49$$

$E = 252kg$

$h = 50dm^3$ (Tahmini hava miktarı %5)

$$V_a = 1000 - \left(\frac{C}{\gamma_C} + \frac{UK}{\gamma_{UK}} + E + h \right)$$

$$V_a = 1000 - \left(\frac{350}{3.06} + \frac{165}{1.77} + 252 + 50 \right) = 490 dm^3$$

1 m^3 betonda bulunacak agrega miktarları

%30 (0-2) mm ince hafif agrega 0.30x490x1.96=288 kg

%40 (0-4) mm ince hafif agrega 0.40x490x1.44=282 kg

%30 (4-16) mm iri hafif agrega 0.30x490x1.24=182 kg

Islatma suyu 0.10x(288+282+182)=75 kg

2. Seri 350 dozlu KYHB karışım hesabı:

$C = 350 kg$

$UK = 350 \times 0.47 = 165 kg$ (Çimento ağırlığının %47'si oranında UK kullanılmıştır.)

$$\frac{E}{C + UK} = 0.44$$

$$\frac{E}{350 + 165} = 0.44$$

$E = 227 kg$

$h = 40 dm^3$ (Tahmini hava miktarı %4)

$$V_a = 1000 - \left(\frac{C}{\gamma_C} + \frac{UK}{\gamma_{UK}} + E + h \right)$$

$$V_a = 1000 - \left(\frac{350}{3.06} + \frac{165}{1.77} + 227 + 40 \right) = 525 dm^3$$

1 m^3 betonda bulunacak agrega miktarları

%30 (0-2) mm ince hafif agrega 0.30x525x2.33=367 kg

%40 (0-4) mm ince hafif agrega 0.40x525x1.44=302 kg

%30 (4-16) mm iri hafif agrega 0.30x525x1.24=195 kg

Islatma suyu 0.13x(302+195)=65 kg

3.2.2.5. Beton karışımlarının hazırlanması

Bu çalışmada 350, 400, 450 ve 500 kg/m^3 olmak üzere 4 farklı dozajda KYHB laboratuarda üretilmiştir.

1. Seri karışım için öncelikle hafif agrega mikserin içerisine konulmuş ve karıştırılmıştır. Hafif agreganın ağırlığının %10'u kadar su mikserin içerisine ilave edilerek agregaya 30 dakikalık bir ön emdirme uygulanmıştır. Daha sonra karışıma çimento ve çimento ağırlığının %47'si kadar uçucu kül ilave edilmiştir. Kuru karışımdan sonra karışım suyu ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilerek mikserde en az 4 dakikalık bir karışım uygulanmıştır.

2. Seri karışım içinde yine öncelikle hafif agrega mikserin içerisine konulmuş ve karıştırılmıştır. Hafif agreganın ağırlığının %13'ü kadar su mikserin içerisine ilave edilerek agregaya 30 dakikalık bir ön emdirme uygulanmıştır. Daha sonra karışıma ince kum, çimento ve çimento ağırlığının %47'si kadar uçucu kül ilave edilmiştir. Kuru karışımdan sonra karışım suyu ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilerek mikserde en az 4 dakikalık bir karışım uygulanmıştır.

Su ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarları, taze KYB özelliklerini sağlayacak şekilde defalarca deneyerek tespit edilmiş ve gerçek karışım miktarları elde edilerek bunlara göre beton üretilmiştir.

Her karışımda üretilen betonlar için EFNARC 2002'ye göre çökme yayılma deneyi, V hunisi akış deneyi ve L kutusu deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.6. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemleri

Taze betonun işlenebilirliği ve akışkanlığının tespiti için bütün karışımlara, akma gerilmesi ile ilintili olarak kendiliğinden yerleşme özelliği ve viskozite ile bağlantılı olarak yayılma süresi hakkında fikir elde etmek üzere yayılma testi yapılmıştır. Viskozite ile bağlantılı olarak huniden boşalma süresini belirlemek içinde V hunisi deneyleri ve kendiliğinden yerleşme yeteneğinin, doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışmaya karşı direncin L şeklindeki bir kutu içerisinde gözlenmesini kapsadığı L kutusu deneyleri yapılmıştır. Ayrıca bütün karışımlarda olası ayrışma ve kusma problemlerinin tespiti için gözle muayene yapılmıştır.

Karışım tasarımı yöntemleri ve kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri araştırmaları, KYB'yi standart beton haline getirmiştir. Bu araştırmaları sonucunda KYB'nin test edilebilmesi için bazı deneysel metotlar ve tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. EFNARC 2002 yılında KYB ile ilgili gerekli tüm bilgileri içeren "Specification and Guidelines for SCC" isimli dokümanı yayınlamıştır. Bu çalışmamızda da EFNARC'ın bu yayını referans alınmıştır

1. Çökme yayılma deneyi

Bu deney taze KYHB'nin deformasyon hızının gözlenmesini ve numunenin kendi ağırlığı ile yayılarak oluşturacağı çapın ölçülmesini kapsar.

Deney aparatı olarak çökme (slump) hunisi ve 80 cm x 80 cm boyutlarında bir tabla kullanılabilinir. Resim 3.1'de görüldüğü gibi çökme hunisi (düz ya da ters konumda) KYHB ile doldurup çekildikten sonra betonun kendi ağırlığı ile seviyelenmesi beklenir. Slump hunisi çekildiğinde dairesel olarak yayılan KYHB'nin son ortalama çapı ölçülür. Ölçülen çap 65-80 cm arasında olmalıdır. Ayrıca bir kronometre ile betonun 50 cm çapa ulaştığı yayılma değeri için geçen zaman tutulur. Çökme hunisi çekildiğinde, betonun 50 cm'ye yayılması için geçen sürenin 2-5 sn arasında olması gerekmektedir.

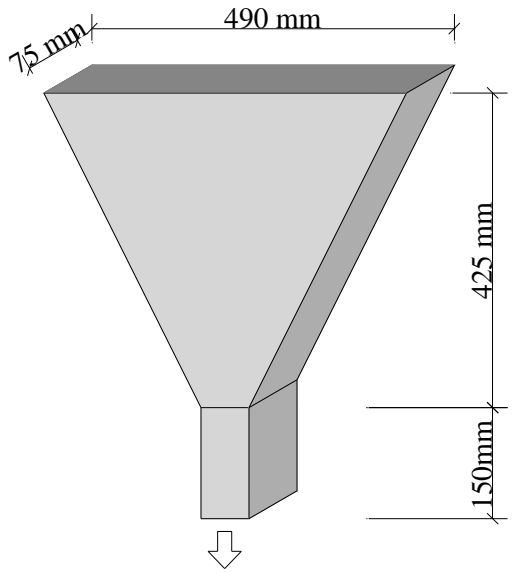


Resim 3.1. Çökme yayılma deneyi

2. V- hunisi akış deneyi

Bu deney taze KYHB'nin kendi ağırlığı ile özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Deney, KYHB'nin viskozitesi ve geçiş yeteneği hakkında fikir vermektedir.

Aparat olarak Şekil 3.5'de görüldüğü gibi özel bir huni kullanılır. Huniye KYHB doldurulduktan sonra Resim 3.2'de görüldüğü üzere en altta bulunan sürgülü kapak açılır ve huni içindeki tüm betonun boşalma süresi tutulur. Bu boşalma süresinin 6-12 sn arasında olması gerekmektedir.



Şekil 3.5. V hunisi akış deney aparatı

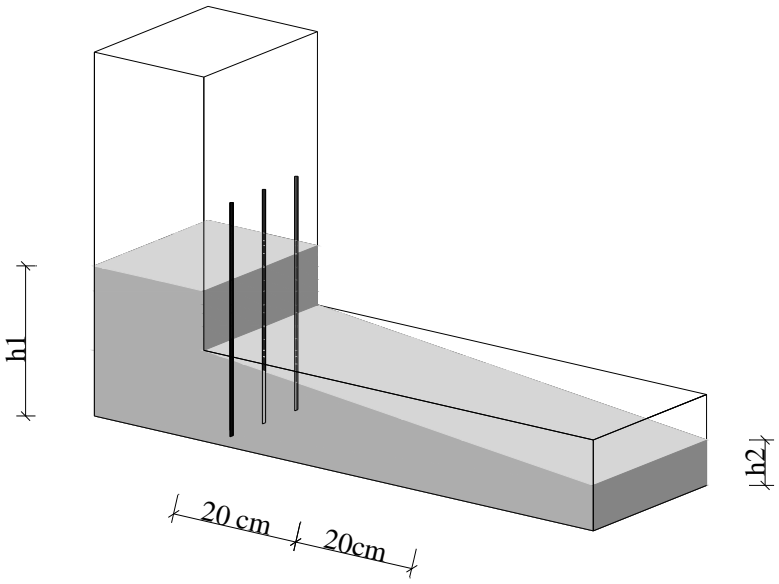
3. L kutusu deneyi

Bu deney, taze KYHB'nin kendiliğinden yerleşme yeteneğinin, doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışmaya karşı direncinin L şeklindeki bir kutu içerisinde gözlenmesini kapsar.

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel teşkil edecek demir çubuklar (12 mm çaplı ve 34 mm aralığa sahip 3 adet çelik çubuk) bulunmaktadır. Sürgülü kapak çekilerek betonun diğer bölüme 20 cm ve 40 cm ilerlemesinin süreleri ölçülür. Aynı zamanda Resim 3.3'de görüldüğü üzere kutunun her iki tarafındaki seviye farkı tespit edilir. Bu seviye farkı oranının 0.8'den büyük olması gerekmektedir (Gürdal ve Yüceer 2004).



Resim 3.2. V hunisi akış deneyi



Şekil 3.6. L kutusu deney aparatı







Resim 3.3. L kutusu deneyi

Tablo 3.5. KYB deney yöntemleri ve sağlanması gereken kriterler

Deney metodu	**Ölçülecek özellik**	**Birim**	**Limit değer**	
			Min ve max	
Yayılma genişliği	Doldurma kabiliyeti	mm	650	800
50 cm'ye yayılma için geçen süre	Doldurma kabiliyeti	sn	2	5
V- hunisi akış deneyi	Viskozitesi ve geçiş yeteneği	sn	6	12
L kutusu deneyi	Yerleşme yeteneğinin, doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışmaya karşı direncinin		$h_2/h_1>0.8$	

3.2.2.7. Beton karışımlarının kalıba konulması ve kürü

KYHB'lere hiçbir şekilde sıkıştırma işlemi uygulanmadan Resim 3.4'de görüldüğü gibi kalıplara yerleştirilmiştir. 1 gün sonra kalıptan çıkartılan KYHB'ler 5. veya 26. güne kadar oda sıcaklığındaki su içerisinde bekletilmiş, 7. veya 28. günlerde deneye tabi tutulmuştur. KYHB'lerin karışım oranları Tablo 3.6 ve 3.7'de verilmiştir. Ayrıca KYB deney yöntemlerini sağlamayan bazı karışımlar Tablo 3.8'de verilmiştir.

3.2.2.8. Numune boyutları ve sayıları

KYHB numuneler küp, silindir ve kiriş biçiminde olmak üzere üç farklı şekilde üretilmiştir. Küp biçimindeki numune boyutları 15x15x15 cm olup; 7 günlük basınç dayanımı deneyi için 3'er numune, 28 günlük basınç dayanımı deneyi için 3'er numune üretilmiştir. Sertleşmiş betonun etüv kurusu ağırlığının belirlenmesi için 3'er adet numune kullanılmıştır.

Silindir biçimindeki numune boyutları 15/30 cm olup; 28 günlük silindir yarma deneyi için 3'er numune kullanılmıştır.

Kiriş biçimindeki numune boyutları ise 10x10x50 cm olup 28 günlük eğilme dayanımı deneyi için 3'er numune kullanılmıştır.

3.2.4. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılan deneyler

TS 2941'e göre her karışım için üçer numunede taze beton birim hacim ağırlığı tayini deneyi yapılmıştır.

TS 3114'e göre basınç dayanımı tayini deneyi, TS EN 12390-5'e göre eğilme dayanımının tayini ve TS EN 12390-6'e göre yarmada çekme dayanımının tayini deneyleri ayrıca TS 3234'e göre kuru birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.4. KYHB'lerin mikserde üretilmesi, kalıplara konulması ve kür edilmesi

Tablo 3.6. 1. Seri KYHB karışımdaki beton bileşimleri

1. Seri karışımdaki beton bileşimleri	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**
Çimento (kg/m^3)	350	400	450	500
Uçucu kül (kg/m^3)	165	188	212	235
Uçucu kül/Çimento (%)	47	47	47	47
Uçucu kül/Toplam bağlayıcı (%)	32	32	32	32
Su (kg/m^3)	252	253	252	250
Su/Toplam bağlayıcı (%)	49	43	38	34
0-2 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	288	270	253	238
0-4 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	282	265	248	233
4-16 mm iri hafif agrega (kg/m^3)	182	171	160	150
Islatma suyu	75	71	66	62
Süperakışkanlaştırıcı (SA) (kg/m^3)	6.70	8.82	9.93	13.23
SA /Toplam bağlayıcı (%)	1.3	1.5	1.5	1.8

Tablo 3.7. 2. Seri KYHB karışımdaki beton bileşimleri

2. Seri karışımdaki beton bileşimleri	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**
Çimento (kg/m^3)	350	400	450	500
Uçucu kül (kg/m^3)	165	188	212	235
Uçucu kül/Çimento (%)	47	47	47	47
Uçucu kül/Toplam bağlayıcı (%)	32	32	32	32
Su (kg/m^3)	227	235	225	221
Su/Toplam bağlayıcı (%)	44	40	34	30
0-2 mm ince kum (kg/m^3)	367	341	327	310
0-4 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	302	281	270	255
4-16 mm iri hafif agrega (kg/m^3)	195	182	174	165
Islatma suyu (kg/m^3)	65	60	58	55
Süperakışkanlaştırıcı (SA) (kg/m^3)	6.18	8.82	7.94	9.56
SA /Toplam bağlayıcı (%)	1.2	1.5	1.2	1.3

Tablo 3.8. 1. Seri KYB deney yöntemlerini sağlamayan bazı karışımlar

1. Seri karışımdaki beton bileşimleri	**350 dozlu**	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**	**500 dozlu**
Çimento (kg/m^3)	350	350	400	450	500	500
Uçucu kül (kg/m^3)	165	165	188	212	235	235
Uçucu kül/Çimento (%)	47	47	47	47	47	47
Uçucu kül/Toplam bağlayıcı (%)	32	32	32	32	32	32
Su (kg/m^3)	273	252	235	265	265	250
Su/Toplam bağlayıcı (%)	53	49	40	40	36	34
0-2 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	276	288	281	246	229	238
0-4 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	271	282	275	241	224	233
4-16 mm iri hafif agrega (kg/m^3)	175	182	178	155	145	150
Islatma suyu	72	75	73	64	60	62
Süperakışkanlaştırıcı (SA) (kg/m^3)	6.70	9.27	8.82	9.93	13.23	9.56
SA /Toplam bağlayıcı (%)	1.3	1.8	1.5	1.5	1.8	1.3

Tablo 3.9. 2. Seri KYB deney yöntemlerini sağlamayan bazı karışımlar

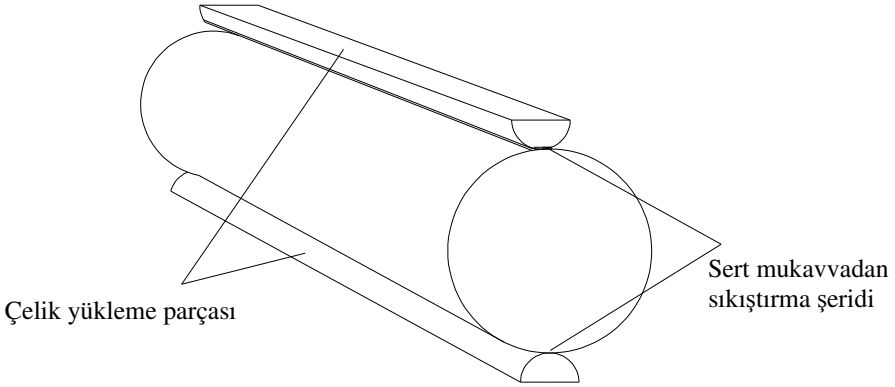
2. Seri karışımdaki beton bileşimleri	**350 dozlu**	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**	**500 dozlu**
Çimento (kg/m^3)	350	350	400	400	450	450	500	500
Uçucu kül (kg/m^3)	165	165	188	188	212	212	235	235
Uçucu kül/Çimento (%)	47	47	47	47	47	47	47	47
Uçucu kül/Toplam bağlayıcı (%)	32	32	32	32	32	32	32	32
Su (kg/m^3)	227	242	235	259	238	225	243	221
Su/Toplam bağlayıcı (%)	44	47	40	44	36	34	33	30
0-2 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	367	357	341	324	318	327	294	310
0-4 mm ince hafif agrega (kg/m^3)	302	294	281	267	262	270	242	255
4-16 mm iri hafif agrega (kg/m^3)	195	190	182	173	169	174	157	165
Islatma suyu	65	63	60	57	56	58	52	55
Süperakışkanlaştırıcı (SA) (kg/m^3)	9.27	6.18	7.06	8.82	7.94	11.9	9.56	13.23
SA /Toplam bağlayıcı (%)	1.8	1.2	1.2	1.5	1.2	1.8	1.3	1.8

3.2.4.1. Deney Düzeni

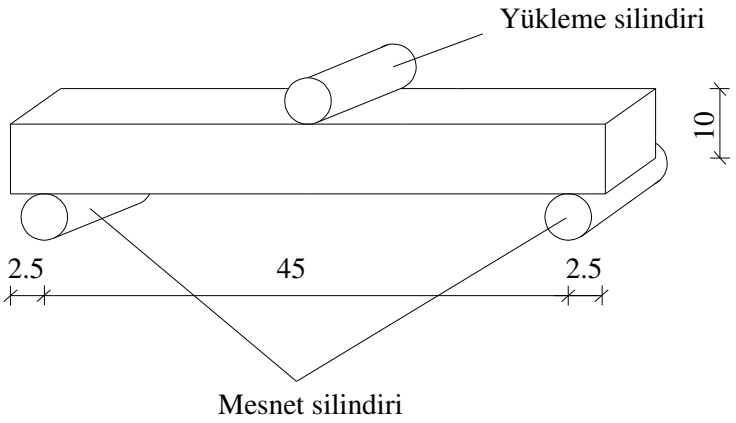
Hazırlanan küp numunelere laboratuardaki basınç presi ile basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Küp numune, presin yükleme tablasına yerleştirilmiştir. 450 kgf/sn yükleme hızı ile yüklenmiş, kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilmiş ve numunenin kırıldığı andaki maksimum yük belirlenmiştir.

Silindir numunelere basınç presi ile silindir yarma deneyi yapılmıştır. Silindir üzerinde yük uygulama yerlerini belirlemek üzere, numune boyunca iki çizgi çizilmiştir. Bu çizgiler, eksenel düzlemde, çapın her iki tarafına karşılıklı olarak, silindirin yan yüzlerine çizilmiş ve uçları, yükleme yerlerinin belirlenebilmesi için, alt ve üst tabanda birleştirilmiştir. Deney numunesi makinaya tam merkezlenmek suretiyle yerleştirilmiştir. Şekil 3.7'de görülen düzenekte olduğu gibi sert sıkıştırma mukavva şeritleri numunenin yükleme düzleminde üst ve alt kısmı boyunca dikkatle yerleştirilmiştir. Deney yükü sabit hızda arttırılarak, darbe etkisi oluşturulmadan, 360 kgf/sn olacak şekilde deney silindiri kırılıncaya kadar arttırılmış ve kırılma anında en büyük yük değeri okunarak kırılma yükü belirlenmiştir.

Kiriş numuneler üzerinde, orta noktasından yüklenmiş basit kiriş metodu ile eğilme dayanımı tayini deneyi yapılmıştır. Yükleme tablasındaki mesnet silindirleri, deney uygulanacak numunenin boyuna uygun gelecek şekilde sabitlenmiştir. Beton deney numunesi yükleme tablası üzerindeki mesnetlere Şekil 3.8'de verilen ölçülere uygun olarak yerleştirilmiştir. Numunenin kalıp içinde iken üstte gelen yüzü yüklemenin yönüne dik olarak konmuştur. Kiriş numuneler standarda göre hesaplanarak belirlenen, 7.5 kgf/sn yükleme hızıyla deneye tabi tutulmuştur. Bu işleme numune kırılıncaya kadar devam edilmiş ve kırılma anındaki maksimum yük tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. KYHB'de yarmada çekme dayanımı deney düzeni



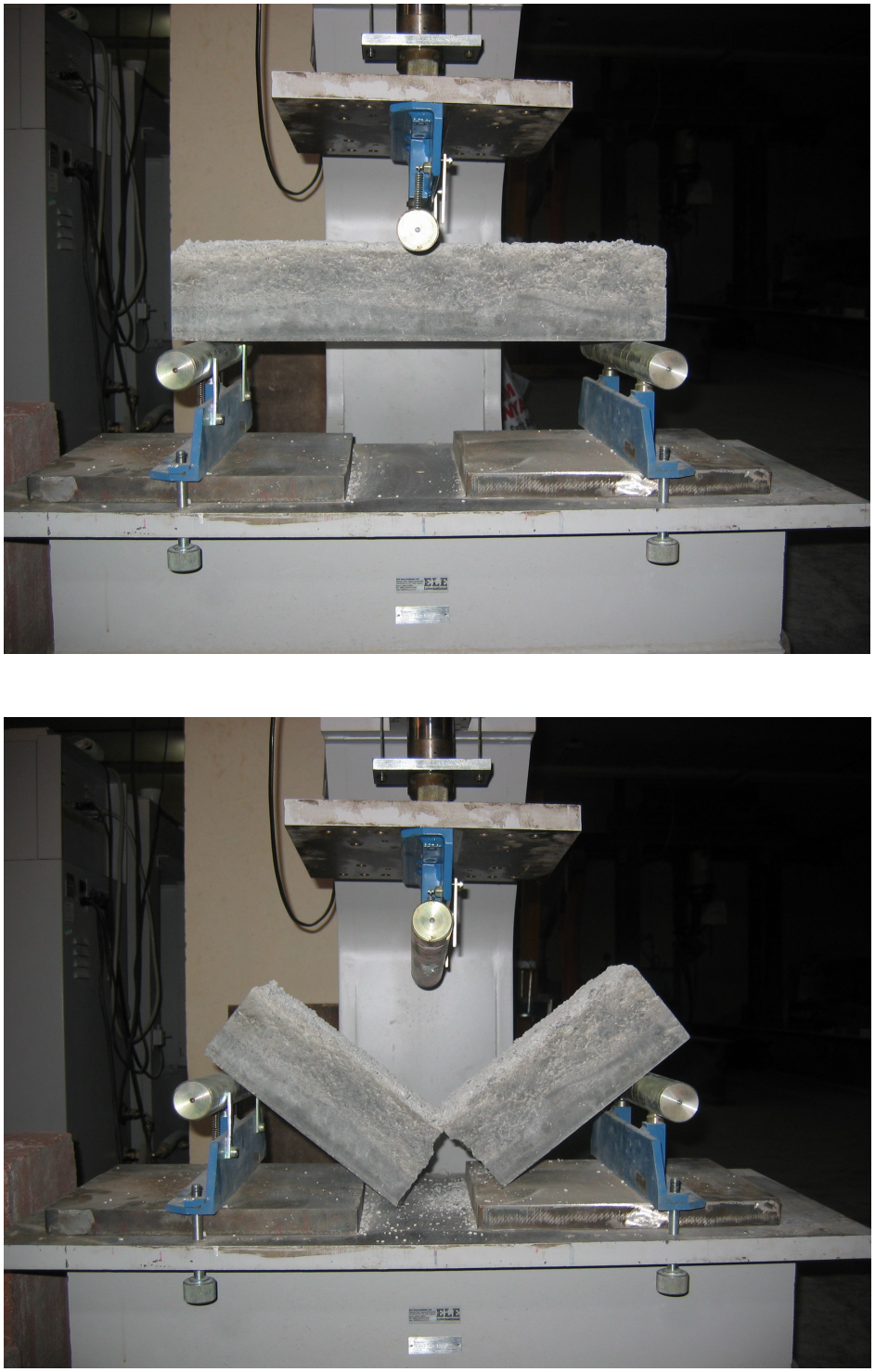
Şekil 3.8. KYHB'de eğilme dayanımı deney düzeni



Resim 3.5. Küp KYHB numunenin basınç deneyine tabi tutulması



Resim 3.6. Silindir KYHB numunenin yarma deneyine tabi tutulması



Resim 3.7. Kiriş KYHB numunenin eğilme deneyine tabi tutulması

4. DENEYLERDEN ELDE EDİLEN ÖLÇÜMLER ve DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Deneylerden Elde Edilen Ölçümler

4.1.1. Agrega deneyleri sonuçları

Tuvenan hafif agrega, 0-2 mm dane çaplı ince hafif agrega, 0-4 mm dane çaplı ince hafif agrega, 4-16 mm dane çaplı iri hafif agrega ve 0-2 mm dane çaplı ince kumun sıkışık birim ağırlık ile gevşek birim ağırlık tayini deney sonuçları Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Ayrıca tüm hafif agregaların ve ince kumun özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları Tablo 4.3 ve 4.4'de verilmiştir

4.1.2. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar

Çökme yayılma deneyi, V hunisi akış deneyi ve L kutusu deneyi sonuçları Tablo 4.5'de verilmiştir

4.1.3. Kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmasından elde edilen deney sonuçları

Taze beton birim hacim ağırlık ve betonların etüv kurusu yoğunluğu deney sonuçları Tablo 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Ayrıca sertleşmiş beton deneylerinden, basınç dayanımı tayini, silindir yarma deneyi ve kiriş eğilme deneyi sonuçları Tablo 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12ve 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Sıkışık birim ağırlık deney sonuçları

Agrega	En büyük dane büyük-lüğü (mm)	Ölçü kabı su dolu ağır-lığı (g)	Ölçü kabı boş ağırlı-ğı (W_1) (g)	Ölçü kabı hacmi (V) (dm^3)	Sıkışık agrega ile dolu ölçü kabı ağırlığı (W_2) (g)			Sıkışık agrega ağırlığı (W_2-W_1) (g)			Sıkışık birim ağırlık (g/dm^3)			
					Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Ort.
İnce kum (0-2 mm)	2	2760	699.2	2.061	4100	4115	4113	3400.8	3415.8	3413.8	1650	1657	1656	1654
İnce hafif agrega (0-2 mm)	2	2760	699.2	2.061	3225	3251	3213	2525.8	2551.8	2513.8	1226	1238	1220	1228
İnce hafif agrega (0-4 mm)	4	2760	699.2	2.061	2265	2261	-	1565.8	1561.8	-	760	758	-	759
İri hafif agrega (4-16 mm)	16	2760	699.2	2.061	2167	2129	2151	1467.8	1429.8	1451.8	712	694	704	703
Tuvenan hafif agrega	16	2760	699.2	2.061	2186	2208	2209	1486.8	1508.8	1509.8	721	732	733	729

Tablo 4.2. Gevşek birim ağırlık deney sonuçları

Agrega	En büyük dane büyük-lüğü (mm)	Ölçü kabı su dolu ağır-lığı (g)	Ölçü kabı boş ağırlı-ğı (W_1) (g)	Ölçü kabı hacmi (V) (dm^3)	Gevşek agrega ile dolu ölçü kabı ağırlığı (W_2) (g)			Gevşek agrega ağırlığı (W_2-W_1) (g)			Gevşek birim ağırlık (g/dm^3)			
					Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Ort.
İnce kum (0-2 mm)	2	2760	699.2	2.061	3720	3745	3730	3020.8	3045.8	3030.8	1466	1478	1471	1472
İnce hafif agrega (0-2 mm)	2	2760	699.2	2.061	2839	2822	2864	2139.8	2122.8	2164.8	1038	1030	1050	1039
İnce hafif agrega (0-4 mm)	4	2760	699.2	2.061	2170	2190	2150	1470.8	1490.8	1450.8	714	723	704	714
İri hafif agrega (4-16 mm)	16	2760	699.2	2.061	2076	2012	2053	1376.8	1312.8	1353.8	668	637	657	654
Tuvenan hafif agrega	16	2760	699.2	2.061	2085	2105	2140	1385.8	1405.8	1440.8	672	682	699	684

Tablo 4.3. İnce agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları

Agrega	Deney Numunesinin Doygun kuru yüzey ağır. (W_2) (g)		Deney Numunesinin Kuru ağırlığı (W_1) (g)		İşaret çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı (W_4) (g)		Ölçü kabı su ve deney numunesi toplam ağırlığı (W_3) (g)		Kuru özgül ağırlık			Doygun kuru yüzey özgül ağırlık			Görünen özgül ağırlık			Su emme oranı (%)		
	Den. 1	Den. 2	Den. 1	Den. 2	Den. 1	Den. 2	Den. 1	Den. 2	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.
İnce kum (0-2 mm)	859	804	837	785	890	890	1381	1348	2.27	2.27	2.27	2.33	2.32	2.33	2.42	2.40	2.41	2.6	2.4	2.5
İnce hafif (0-2 mm)	797	794	751	750	1155	1155	1546	1542	1.85	1.84	1.85	1.96	1.95	1.96	2.09	2.07	2.08	6.1	5.9	6.0
İnce hafif (0-4 mm)	875	878	779	781	1600	1600	1865	1868	1,28	1,28	1,28	1,43	1,44	1,44	1,52	1,52	1,52	12,3	12,4	12.4

Tablo 4.4. İri agreganın özgül ağırlık ve su emme oranı deneyi sonuçları

Deney Numunesinin						**Kuru özgül ağırlık**			**Doygun kuru yüzey özgül ağırlık**			**Görünen özgül ağırlık**			**Su emme oranı (%)**		
Doygun kuru yüzey ağır. (W_2) (g)		**Sudaki ağırlığı (W_3) (g)**		**Kuru ağırlığı (W_1) (g)**													
Deney 1	Deney 2	Deney 1	Deney 2	Deney 1	Deney 2	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.	Den. 1	Den. 2	Ort.
2254	2256	430	431	1900	1905	1.04	1.04	1.04	1.24	1.24	1.24	1.29	1.29	1.29	18.6	18.4	18.5

Tablo 4.5. 1. ve 2. Seri KYHB için kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar

1. Seri Taze KYHB Karışımı Deney Sonuçları				
Ölçülen Özellik	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**
Yayılma çapı (650-800 mm)	690	695	700	740
50 cm çapa ulaşması için geçen süre (2-5 sn)	2.60	2.67	3.49	4.07
V-Hunisinde akış süresi (6-12 sn)	9.93	8.60	10.45	10.86
L Kutusunda 20 cm'ye ulaşma süresi	0.55	0.58	0.60	0.62
L Kutusunda 40 cm'ye ulaşma süresi	1.15	1.18	1.20	1.23
L Kutusunda h_2/h_1 oranı (>0.8)	0.88	0.91	0.90	0.95
2. Seri taze KYHB karışımı için deney sonuçları				
Ölçülen Özellik	**350 dozlu**	**400 dozlu**	**450 dozlu**	**500 dozlu**
Yayılma çapı (650-800 mm)	720	730	750	780
50 cm çapa ulaşması için geçen süre (2-5 sn)	2.20	2.73	2.78	3.32
V-Hunisinde akış süresi (6-12 sn)	10.10	10.48	9.54	11.60
L Kutusunda 20 cm'ye ulaşma süresi	0.53	0.55	0.60	0.62
L Kutusunda 40 cm'ye ulaşma süresi	1.14	1.16	1.19	1.23
L Kutusunda h_2/h_1 oranı (>0.8)	0.89	0.91	0.92	0.96

Tablo 4.6. 1. Seri taze KYHB birim hacim ağırlık ve etüv kurusu birim hacim ağırlık deney sonuçları

1. Seri KYHB	Numune no	W_1 (kg) Kalıp	W_2 (kg) Kalıp+Beton	W_2-W_1 (kg)	Δ_{taze} (kg/m^3)	$\Delta_{taze, ort.}$ (kg/m^3)	W_{kuru} (kg/m^3)	Δ_{kuru} (kg/m^3)	$\Delta_{kuru, ort.}$ (kg/m^3)
350	1	15550	20750	5200	1541	1521	4750	1407	1393
	2	15800	20950	5150	1526		4650	1378	
	3	15950	21000	5050	1496		4700	1393	
400	1	15550	20900	5350	1585	1541	4900	1452	1408
	2	15800	20900	5100	1511		4650	1378	
	3	15950	21100	5150	1526		4700	1393	
450	1	15550	21000	5450	1615	1595	4900	1452	1437
	2	15800	21200	5400	1600		4900	1452	
	3	15950	21250	5300	1570		4750	1407	
500	1	15550	20900	5350	1585	1610	5100	1511	1531
	2	15800	21300	5500	1630		5250	1556	
	3	15950	21400	5450	1615		5150	1526	

Tablo 4.7. 2. Seri taze KYHB birim hacim ağırlık ve etüv kurusu birim hacim ağırlık deney sonuçları

2. Seri KYHB	Numune no	W_1 (kg) Kalıp	W_2 (kg) Kalıp+Beton	W_2-W_1 (kg)	Δ_{taze} (kg/m^3)	$\Delta_{taze, ort.}$ (kg/m^3)	W_{kuru} (kg/m^3)	Δ_{kuru} (kg/m^3)	$\Delta_{kuru, ort.}$ (kg/m^3)
350	1	15550	21500	5950	1763	1649	5700	1689	1541
	2	15800	21200	5400	1600		5000	1481	
	3	15950	21300	5350	1585		4900	1452	
400	1	15550	21300	5750	1704	1684	5300	1570	1546
	2	15800	21400	5600	1659		5150	1526	
	3	15950	21650	5700	1689		5200	1541	
450	1	15550	21250	5700	1689	1689	5250	1556	1551
	2	15800	21450	5650	1674		5200	1541	
	3	15950	21700	5750	1704		5250	1556	
500	1	15550	21550	6000	1778	1743	5700	1689	1664
	2	15800	21650	5850	1733		5550	1644	
	3	15950	21750	5800	1719		5600	1659	

Tablo 4.8. 1. Seri KYHB basınç dayanımı deney sonuçları

1. Seri KYHB	Numune no	7 günlük basınç dayanımları			28 günlük basınç dayanımları			$\frac{f_{ck,7}}{f_{ck,28}}$
		Kuvvet (kg)	$f_{ck,7}$ (kg/cm^2)	Ort. $f_{ck,7}$ (kg/cm^2)	Kuvvet (kg)	$f_{ck,28}$ (kg/cm^2)	Ort. $f_{ck,28}$ (kg/cm^2)	
350	1	46910	208	164	54270	241	210	0.78
	2	29370	131		44790	199		
	3	34280	152		42770	190		
400	1	31750	141	122	48510	216	211	0.58
	2	28410	126		45780	203		
	3	21980	98		48090	214		
450	1	37000	164	165	57230	254	243	0.68
	2	40820	181		56770	252		
	3	33780	150		50270	223		
500	1	49860	222	234	52260	232	248	0.94
	2	61670	274		59090	263		
	3	46530	207		56080	249		

Tablo 4.9. 2. Seri KYHB basınç dayanımı deney sonuçları

2. Seri KYHB	Numune no	7 günlük basınç dayanımları			28 günlük basınç dayanımları			$\frac{f_{ck,7}}{f_{ck,28}}$
		Kuvvet (kg)	$f_{ck,7}$ (kg/cm^2)	Ort. $f_{ck,7}$ (kg/cm^2)	Kuvvet (kg)	$f_{ck,28}$ (kg/cm^2)	Ort. $f_{ck,28}$ (kg/cm^2)	
350	1	39580	176	157	52110	232	217	0.72
	2	34930	155		47680	212		
	3	31460	140		46700	208		
400	1	40250	179	211	67620	301	276	0.76
	2	51390	228		56340	250		
	3	50620	225		62660	278		
450	1	42830	190	206	66350	295	292	0.71
	2	45250	201		62490	278		
	3	51270	228		67980	302		
500	1	65120	289	304	78200	348	332	0.92
	2	58960	262		74940	333		
	3	81320	361		70870	315		

Tablo 4.10. 1. Seri KYHB yarılma deneyi sonuçları

1. Seri KYHB	**Numune no**	**Kuvvet (kg)**	**Yarmada çekme dayanımı f_{ct},kg/cm^2 $f_{ct}=2F/\pi Ld$**	**Ortalama f_{ct},kg/cm^2**	**Karakteristik çekme dayanımı f_{ctk},kg/cm^2 f_{ct} /1.5**
350	1	6750	9.5	12.2	8.1
	2	11800	16.7		
	3	7390	10.5		
400	1	8340	11.8	15.9	10.6
	2	13660	19.3		
	3	11690	16.5		
450	1	10650	15.1	16.8	11.2
	2	12820	18.1		
	3	12100	17.1		
500	1	11100	15.7	16.6	11.1
	2	14520	20.5		
	3	9700	13.7		

Tablo 4.11. 2. Seri KYHB yarılma deneyi sonuçları

2. Seri KYHB	**Numune no**	**Kuvvet (kg)**	**Yarmada çekme dayanımı f_{ct},kg/cm^2 $f_{ct}=2F/\pi Ld$**	**Ortalama f_{ct},kg/cm^2**	**Karakteristik çekme dayanımı f_{ctk},kg/cm^2 f_{ct} /1.5**
350	1	11570	16.4	11.9	7.9
	2	8090	11.4		
	3	5650	8		
400	1	10390	14.7	13.3	8.9
	2	7380	10.4		
	3	10540	14.9		
450	1	14220	20.1	17.8	11.9
	2	10060	14.2		
	3	13440	19.0		
500	1	14530	20.6	20.8	13.9
	2	15070	21.3		
	3	14510	20.5		

Tablo 4.12. 1. Seri KYHB eğilme deneyi sonuçları

1.Seri KYHB	**Numune no**	**Kuvvet (kg)**	**Eğilme dayanımı kg/cm^2** $f_{cf}=3FL/2d_1d_2^2$	**Ortalama f_{cf}**	**$f_{ctk}= f_{cf}/2$**
350	1	412	27.8	32.5	16.3
	2	571	38.5		
	3	463	31.3		
400	1	412	27.8	33.9	17.0
	2	517	34.9		
	3	578	39.0		
450	1	544	36.7	37.2	18.6
	2	517	34.9		
	3	594	40.1		
500	1	700	47.3	45.1	22.6
	2	669	45.2		
	3	635	42.9		

Tablo 4.13. 2. Seri KYHB eğilme deneyi sonuçları

2. Seri KYHB	**Numune No**	**Kuvvet (kg)**	**Eğilme dayanımı kg/cm^2** $f_{cf}=3FL/2d_1d_2^2$	**Ortalama f_{cf}**	**$f_{ctk}= f_{cf}$ /2**
350	1	406	27.4	31.5	15.8
	2	528	35.6		
	3	467	31.5		
400	1	522	35.2	34.0	17.0
	2	484	32.7		
	3	506	34.2		
450	1	635	42.9	39.3	19.7
	2	522	35.2		
	3	590	39.8		
500	1	698	47.1	47.0	23.5
	2	668	45.1		
	3	722	48.7		

4.2. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.2.1. Agrega deneyleri

Tuvenan haldeki Nevşehir bims agregasının sıkışık birim ağırlığı 729 kg/m^3, gevşek birim ağırlığı 684 kg/m^3'dür. Gevşek birim ağırlığının en büyük değeri, 684 kg/m^3 olduğundan TS 1114'e göre hafif agregadır.

Hafif agreganın su emme değeri ince agregada %12.4, iri agregada %18.5 değerine ulaşmıştır. Yüksek su emme değeri hafif agregaların bilinen özelliğidir. Hafif agregalar su ile temas ettiklerinde, hemen su emmeye başlarlar. Ancak doyma haline tam ulaşamadıklarından, hafif agregalar donmaz ve çözülmeden etkilenmezler.

İnce kumun su emme değeri %2.5 olarak tespit edilmiştir. Su emme değeri oldukça düşük olduğundan, beton prizi için gerekli olan suyu emmezler.

4.2.2. Kendiliğinden yerleşen beton deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesi

EFNARC'ın KYB'ler için belirlemiş olduğu ölçütlere göre, KYB'lerde yayılma çapının 650 ile 800 mm arasında, yayılma çapının 50 cm genişliğe ulaşma süresi 2 ile 5 sn arasında ve V hunisinden akma süresi 6 ile 12 sn arasında olması gerekmektedir. Ayrıca L kutusu deneyinde kutunun her iki tarafındaki seviye oranının 0.8'den büyük olması istenmektedir.

Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de görüldüğü gibi yayılma testi değerlerine göre karışımların yayılma genişlikleri 690 ile 780 mm, 50 cm genişliğe ulaşma süresi 2 ile 5 sn arasında değişmektedir.

Aynı dozajdaki 1. Seri KYHB'lerde yayılma çapı değerlerinin 2. Seri KYHB'lere göre daha az olması 1. Seri KYHB'lerin yoğunluğunun daha az olmasıyla açıklanabilir. Yayılma deneyi sonuçlarına göre karışımlar KYB özelliği göstermektedir.

V hunisinden akma süresi şekil 4.5 ve 4.6'da görüldüğü gibi karışımlarda 8 ile 12 sn arasında değişmektedir. Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'da betonun L kutusunda 20 ve 40 cm'ye ilerleme süreleri görülmektedir.

L kutusunda h_2/h_1 oranı şekil 4.11 ve 4.12'de görüldüğü gibi 0.8 ile 1.0 arasında bulunmaktadır. V hunisi ve L kutusu deneyleri sonuçlarına göre de karışımlar KYB özelliği göstermektedir.

KYB'nin yayılma ve yerleşme özelliğinin ağırlığınca sağlandığı bilindiğinden, yoğunluğun azalmasıyla yayılma ve yerleşme özelliklerinin de azalması, beklenen sonuç olmuştur. 1. ve 2. Seri KYHB'lerde yoğunluk arttıkça yayılma çapı da artmıştır. Yayılma çapının artmasıyla birlikte 50 cm genişliğe ulaşma süresinin de arttığı görülmüştür. Yoğunluğun artması genel olarak V hunisinden akış süresinin artmasına sebep olmuştur. KYHB'de yoğunluk ile yayılma çapı, 50 cm genişliğe yayılma süresi ve V hunisinden akış süresi arasındaki ilişkiler sekil 4.13, 4.14 ve 4.15'de verilmiştir. Ayrıca yine 1. ve 2. Seri KYHB'lerde yoğunluğun artmasıyla birlikte L kutusu deneyinde betonun 20 cm ve 40 cm'ye ulaşma süreleri artmış, h_2/h_1 oranının yükseldiği görülmüştür.

4.2.3. Kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmasından elde edilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi

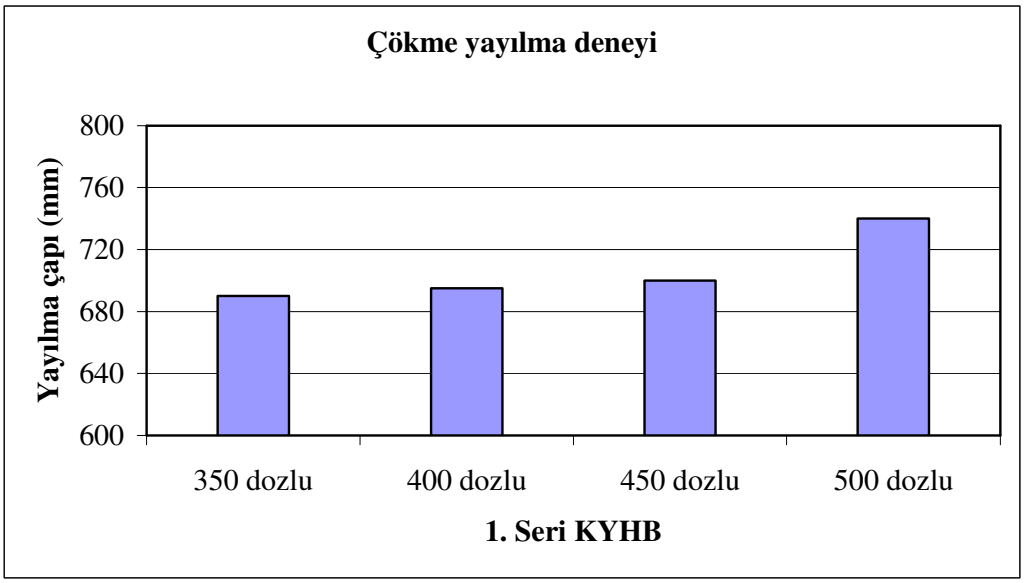
TS EN 206-1'e göre hafif beton etüv kurusu durumdaki yoğunluğu 800 kg/m^3 veya daha büyük olup, 2000 kg/m^3'ü geçmeyen beton olarak tanımlanmaktadır. Buna göre tüm üretilen betonlar hafif beton sınıfına girmektedir.

KYHB numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı deneylerinin sonuçları toplu halde Tablo 4.14'de verilmiştir. 1. ve 2. Seri KYHB'de şekil 4.16 ve 4.17'de görüldüğü gibi toplam bağlayıcı miktarının artması basınç dayanımını beraberinde artırmıştır. Literatürdeki katkı maddesiz hafif beton ile ilgili çalışmalar ile kıyaslama yapıldığında, bu çalışmada tüm karışımlara ilave edilen uçucu külün basınç dayanımlarını artırdığı söylenebilir. Ayrıca 1. ve 2. Seri KYHB'ler birbirleriyle kıyaslandığında 2. Serideki karışımlara ilave edilen normal ağırlıklı ince kumun betonun basınç dayanımını artırdığı gözükmektedir.

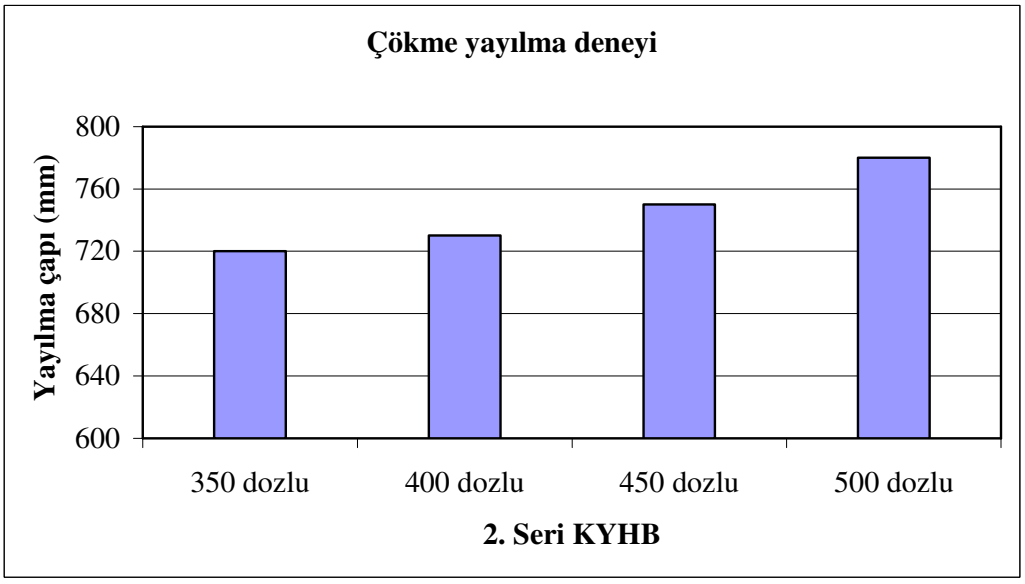
Şekil 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21'de verilen silindir numunelerdeki yarmada çekme ve orta noktadan yüklenen kirişteki eğilme dayanımları incelendiğinde, beklenildiği gibi, 1. ve 2. Seri KYHB'lerde basınç dayanımı ve yoğunluk arttıkça çekme dayanımları da yükselmiştir.

Tablo 4.14. 1. ve 2. Seri KYHB için basınç, silindir yarma ve eğilme deneyi sonuçları

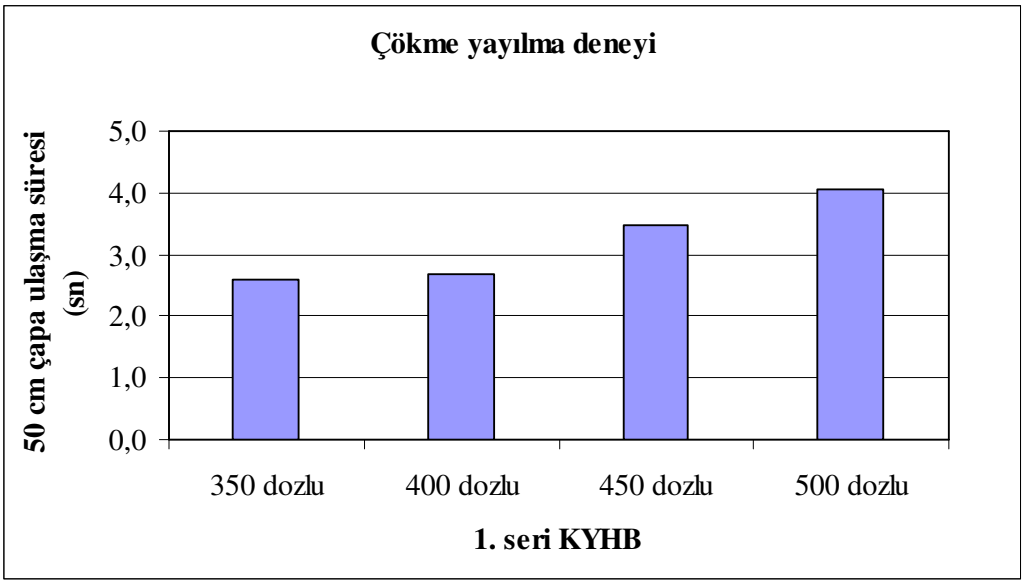
Karışım	**Çimento dozajı**	**Basınç dayanımı $f_{ck,28}$ (kg/cm^2)**	**Yarmada çekme dayanımı f_{ct} (kg/cm^2)**	**Eğilme dayanımı f_{cf} (kg/cm^2)**
1. Seri KYHB	350	210	12.2	32.5
	400	211	15.9	33.9
	450	243	16.8	37.2
	500	248	16.6	45.1
2. Seri KYHB	350	217	11.9	31.5
	400	276	13.3	34.0
	450	292	17.8	39.3
	500	332	20.8	47.0



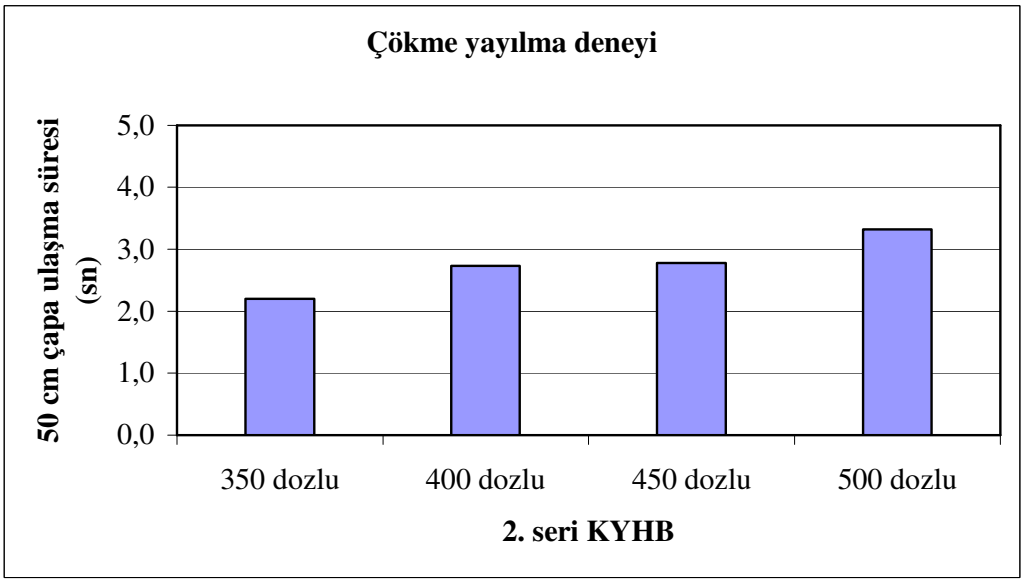
Şekil 4.1. 1. Seri KYHB için yayılma çapı değerleri



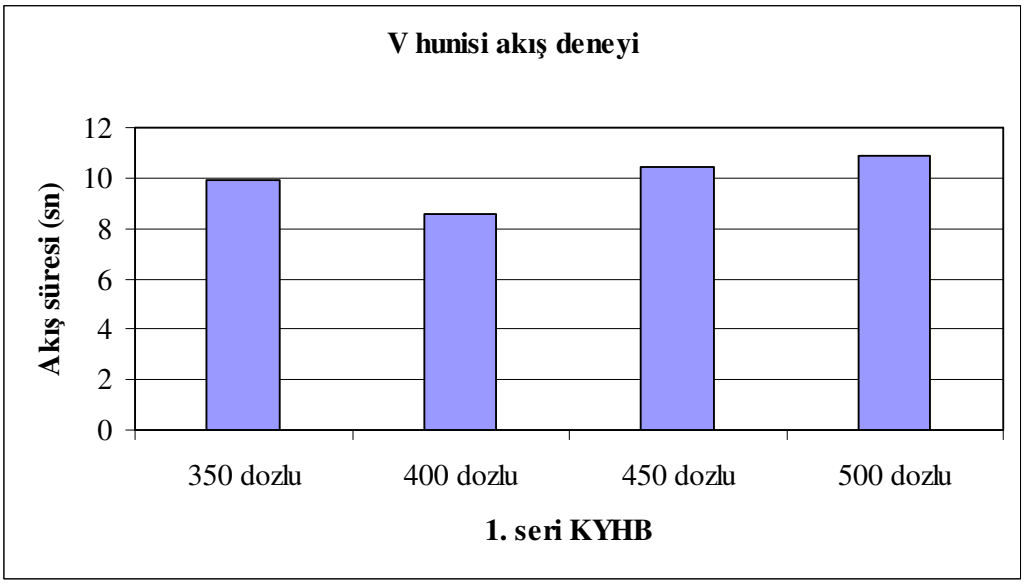
Şekil 4.2. 2. Seri KYHB için yayılma çapı değerleri



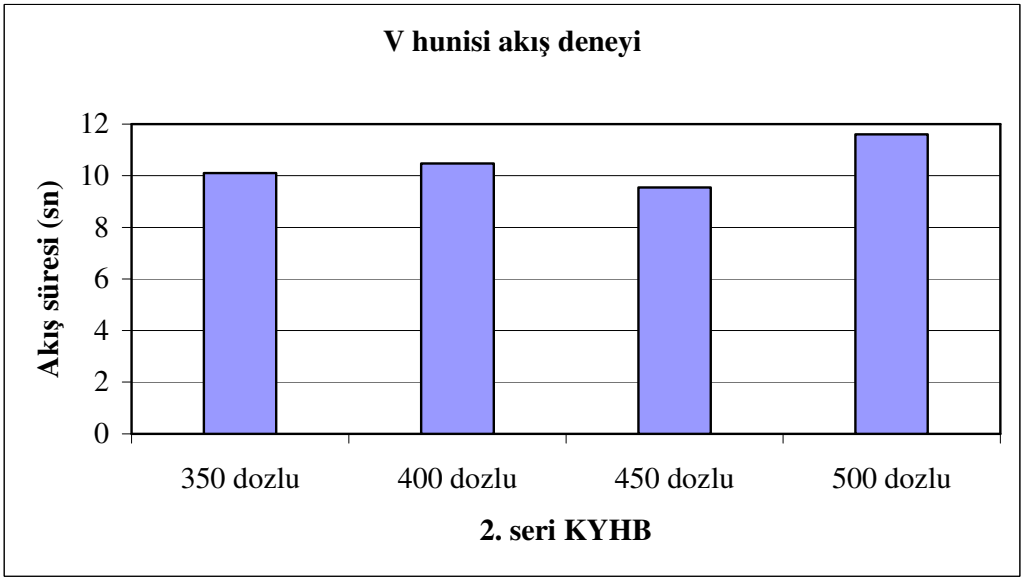
Şekil 4.3. 1. Seri KYHB için yayılma deneyinde 50 cm çapa ulaşma süresi



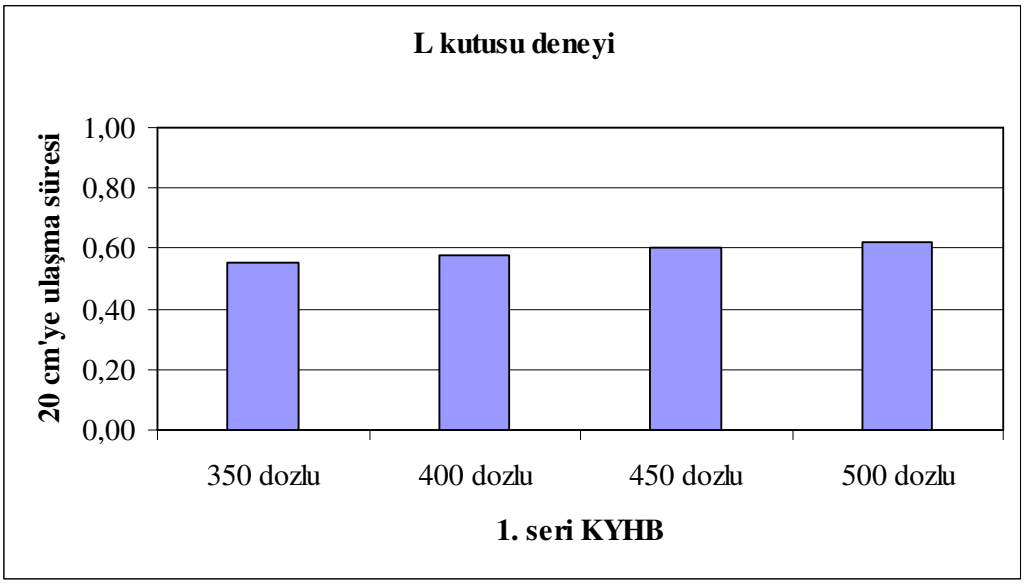
Şekil 4.4 2. Seri KYHB için yayılma deneyinde 50 cm çapa ulaşma süresi



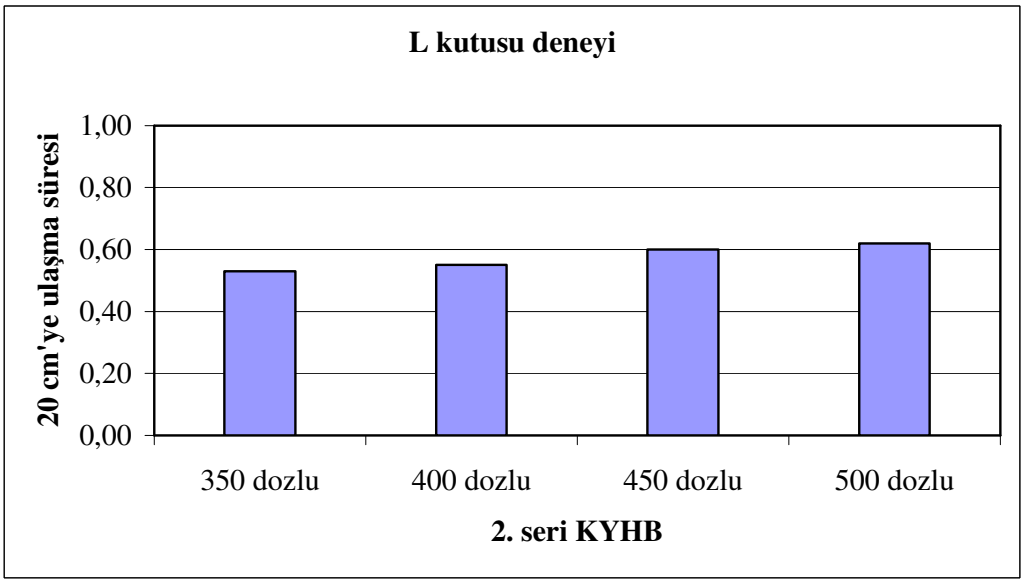
Şekil 4.5. 1. Seri KYHB için V hunisinden akış süresi



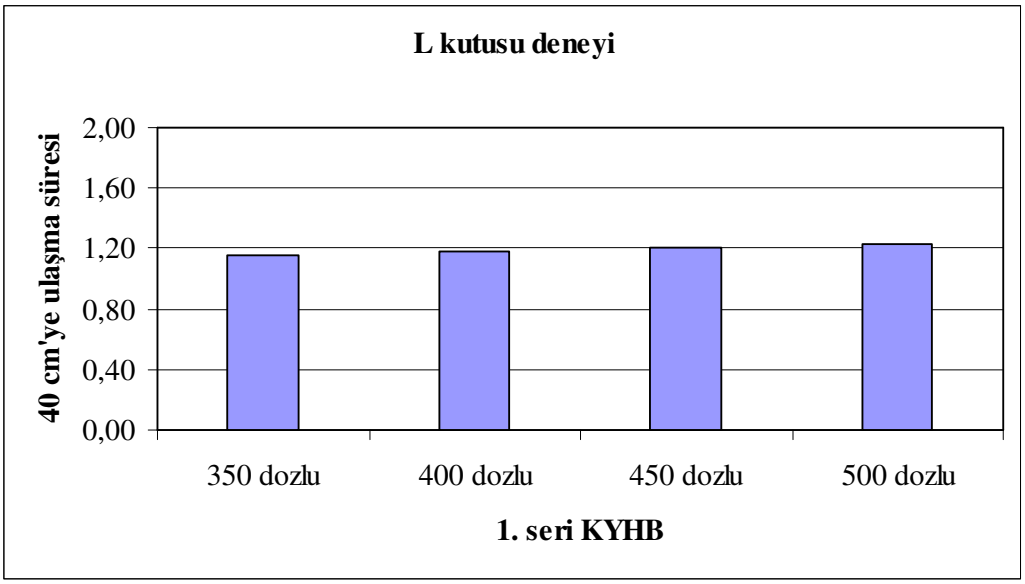
Şekil 4.6. 2. Seri KYHB için V hunisinden akış süresi



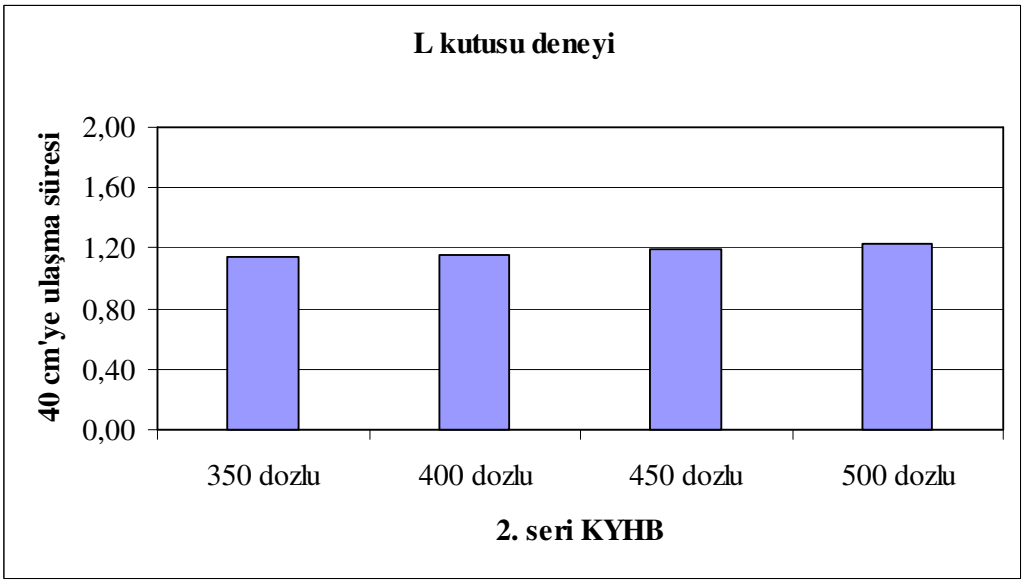
Şekil 4.7. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 20 cm'ye ulaşma süresi



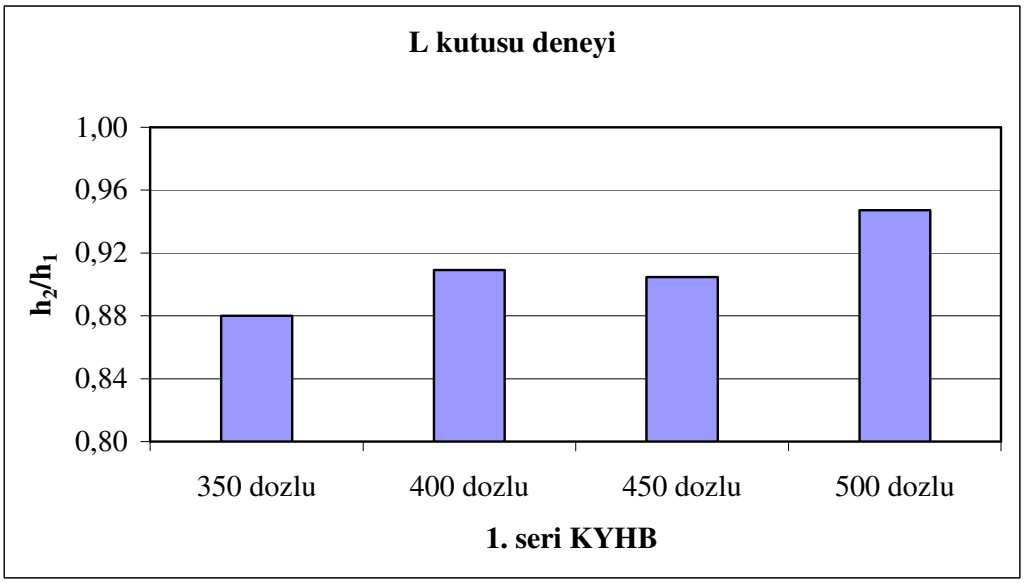
Şekil 4.8. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 20 cm'ye ulaşma süresi



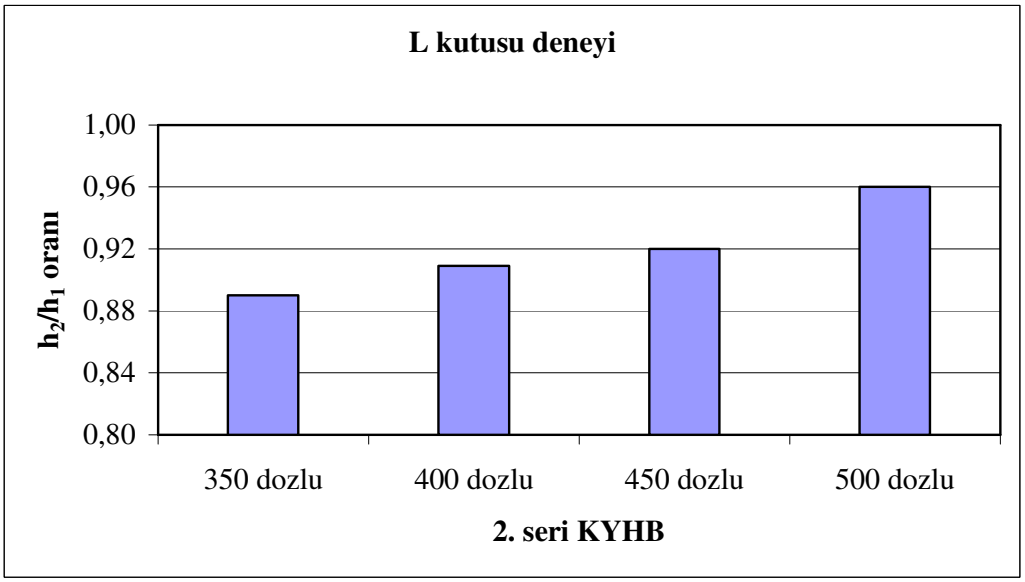
Şekil 4.9. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 40 cm'ye ulaşma süresi



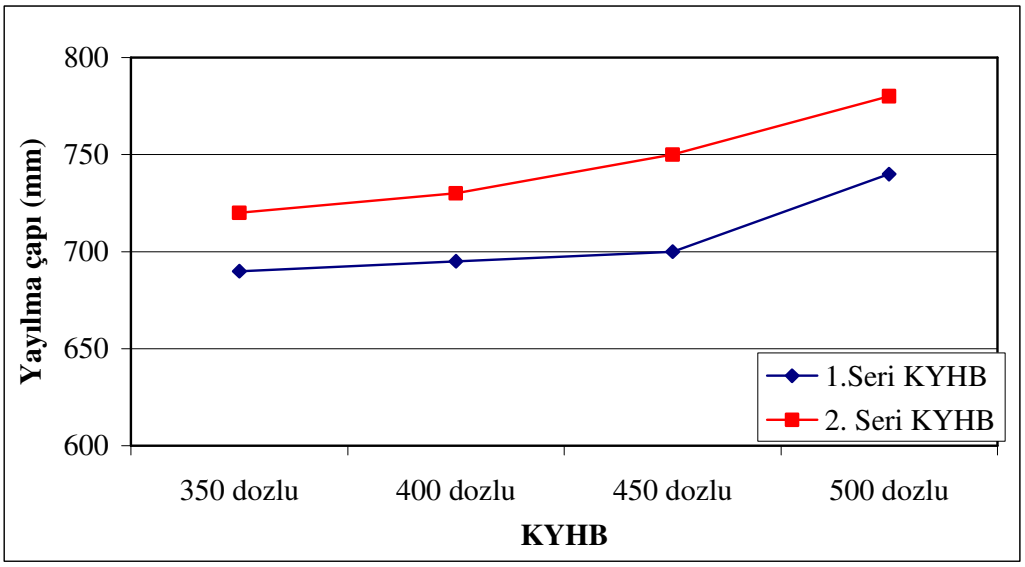
Şekil 4.10. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde 40 cm'ye ulaşma süresi



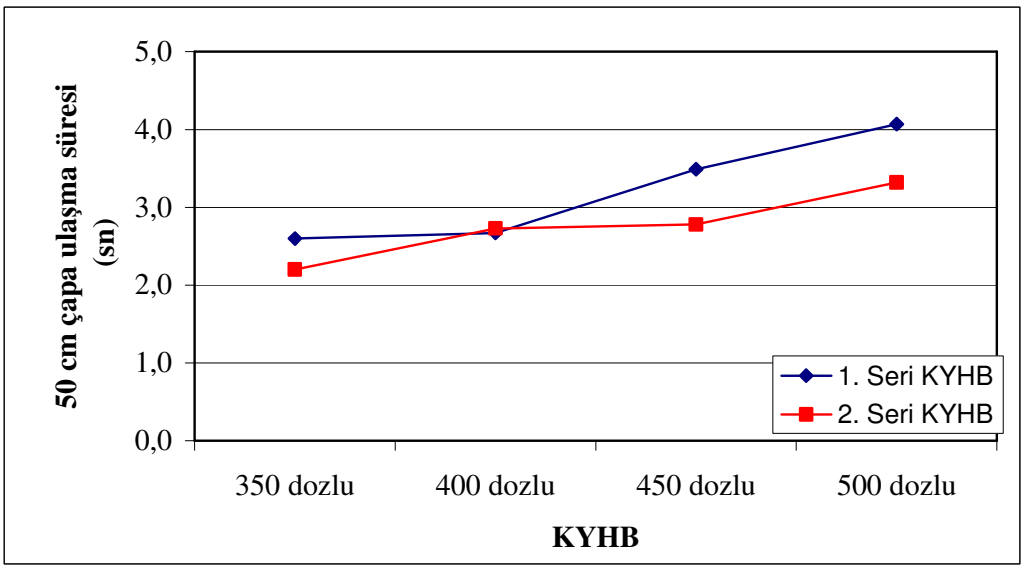
Şekil 4.11. 1. Seri KYHB için L kutusu deneyinde h_2/h_1 oranı



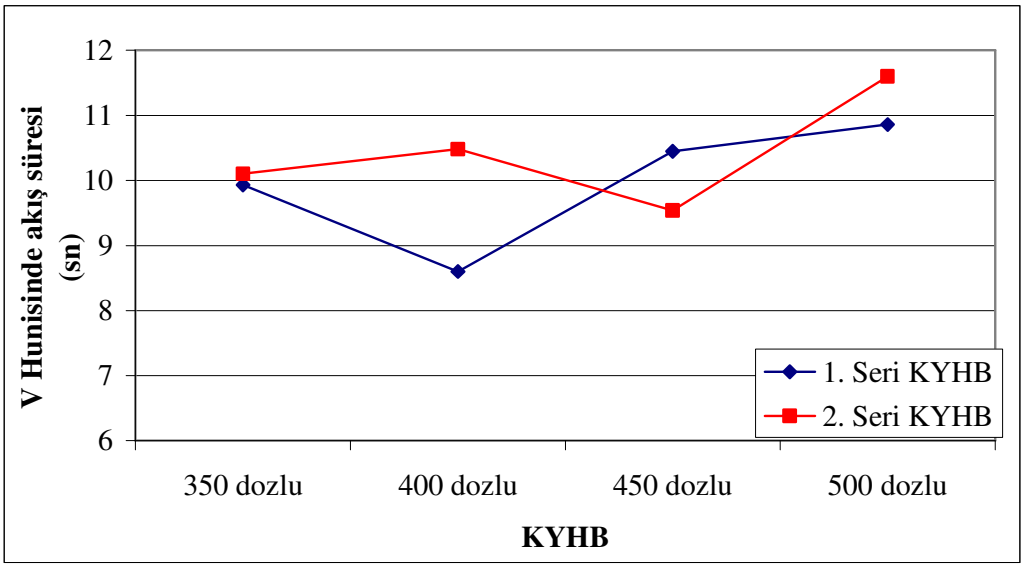
Şekil 4.12. 2. Seri KYHB için L kutusu deneyinde h_2/h_1 oranı



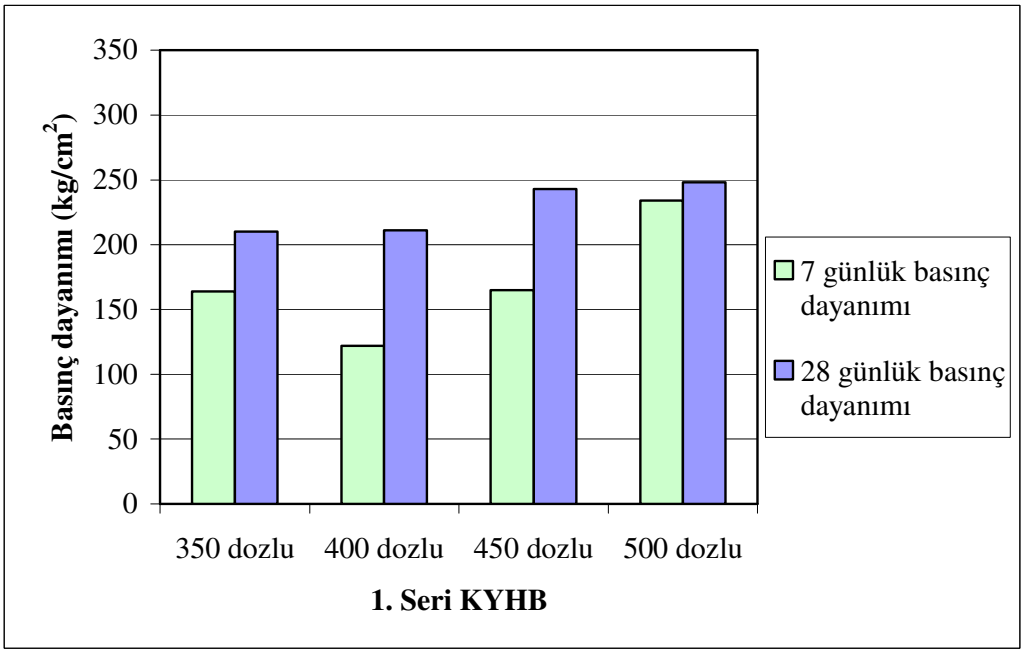
Şekil 4.13. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile yayılma çapı arasındaki ilişki



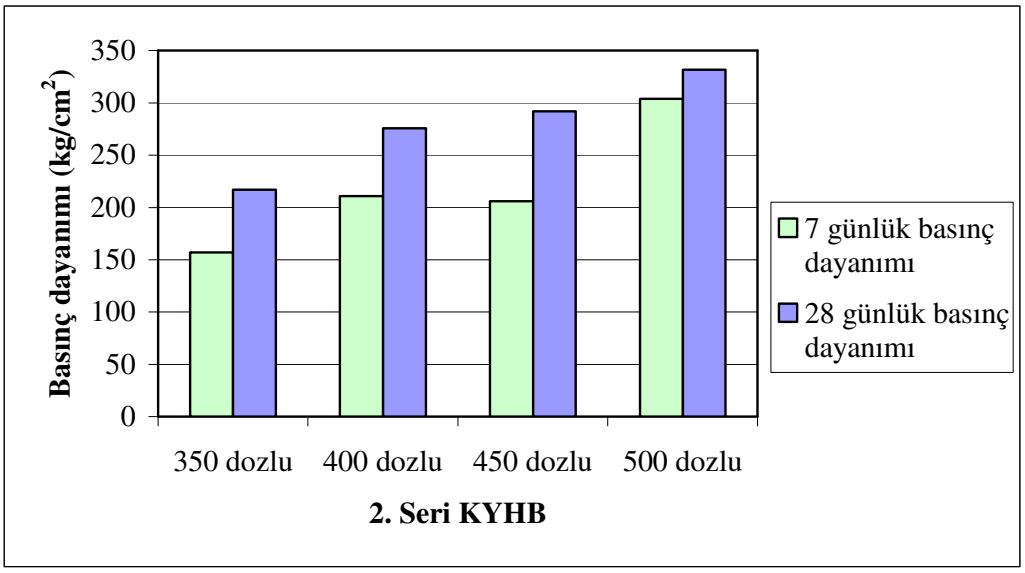
Şekil 4.14. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile 50 cm çapa ulaşma süresi arasındaki ilişki



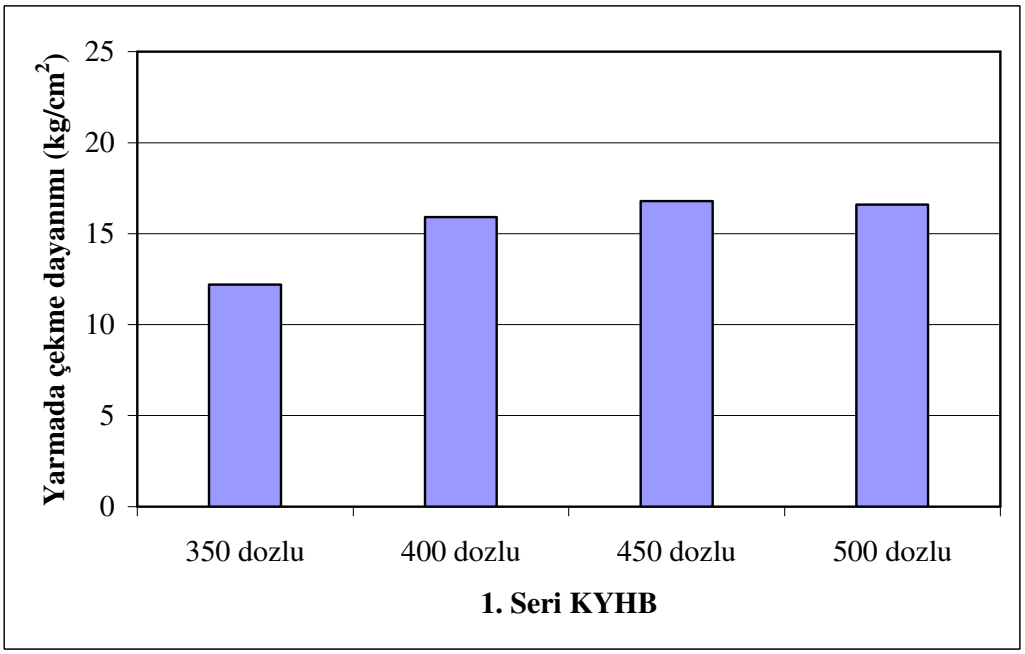
Şekil 4.15. 1. ve 2. Seri KYHB'ler ile V Hunisinde akış süresi arasındaki ilişki



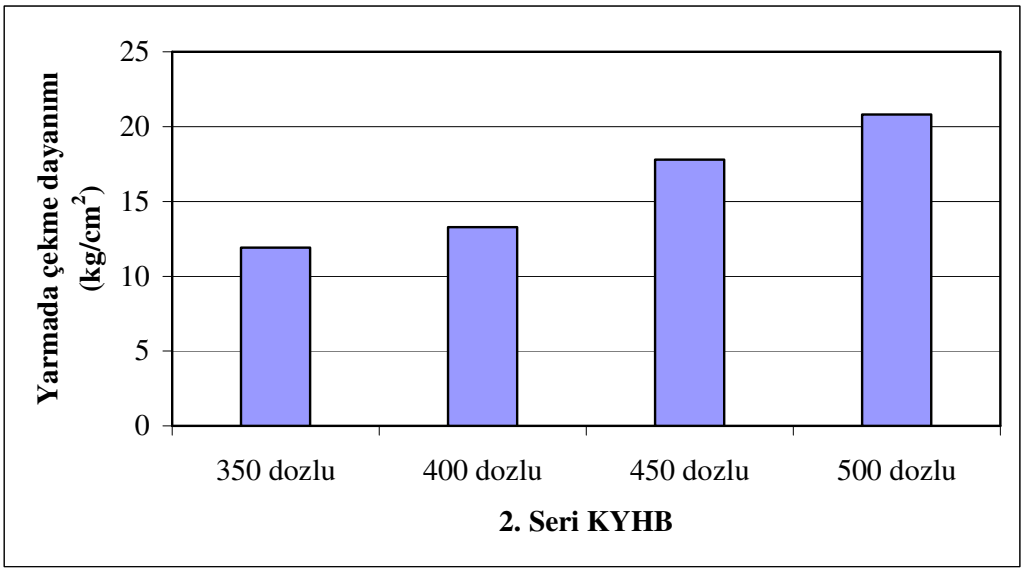
Şekil 4.16. 1. Seri KYHB için dozaj-basınç dayanımı ilişkisi



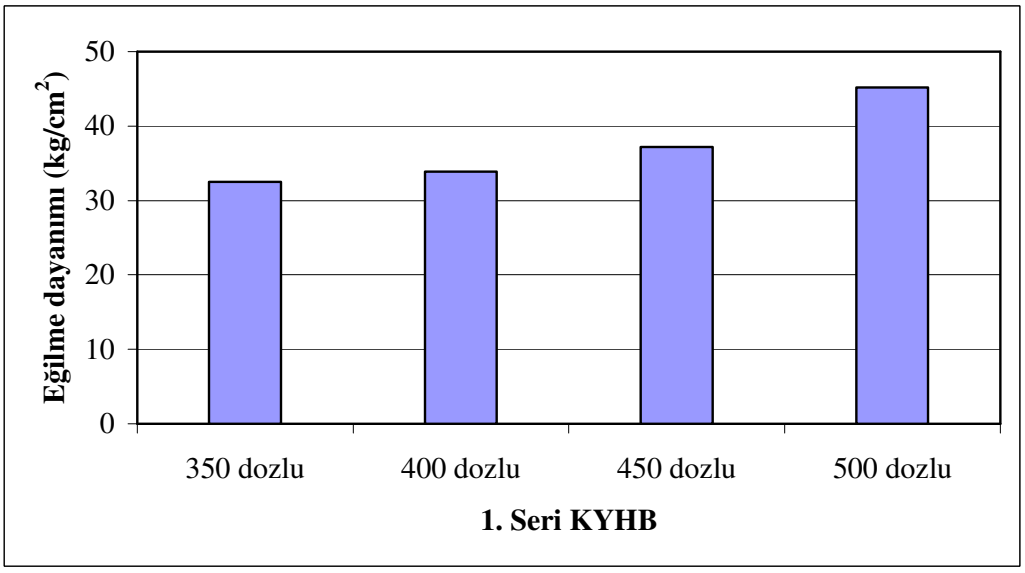
Şekil 4.17. 2. Seri KYHB için dozaj-basınç dayanımı ilişkisi



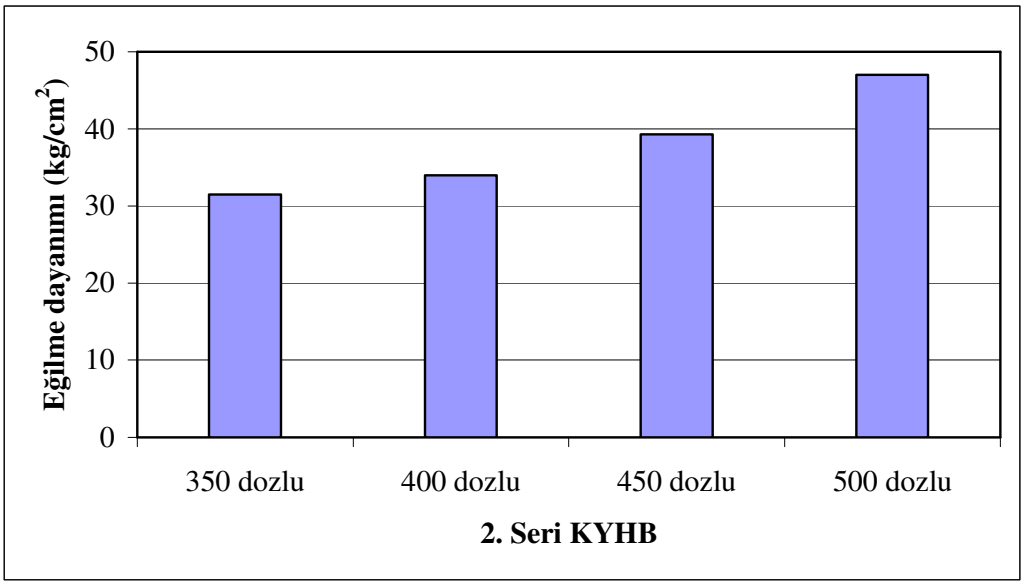
Şekil 4.18. 1. Seri KYHB için dozaj-yarmada çekme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.19. 2. Seri KYHB için dozaj-yarmada çekme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.20. 1. Seri KYHB için dozaj-eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.21. 2. Seri KYHB için dozaj-eğilme dayanımı ilişkisi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, doğal hafif agrega kullanımının beton maliyetini önemli ölçüde azaltabileceği düşünülerek, normal ağırlıklı olarak üretilen ve gittikçe kullanımı yaygınlaşan kendiliğinden yerleşen betonun, Nevşehir Bims agregası kullanarak, kendiliğinden yerleşen hafif beton olarak üretilmesi amaçlanmıştır.

KYB'nin en yaygın kullanım alanı, vibratörlerin ulaşamadığı ve donatıların çok yoğun olduğu elemanların üretimidir. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirme işlemlerinde ve yüksek perdelerin üretiminde KYB kullanılması avantajlıdır. Vibratör ihtiyacını ortadan kaldırıp gürültünün zararlı etkilerini önlemesi, yerleşim bölgelerinde gece üretim yapılmasına imkân sağlar. KYB'nin diğer bir yararı işçiliği azaltırken yapım hızını artırmasıdır. Ancak tüm bu olumlu etkenlere rağmen KYB'nin tüm inşaatlarda yaygın olarak kullanılmasına geçilememiştir. Bu durumun en önemli nedeni olarak söz konusu betonların maliyetlerinin henüz istenilen düzeylere indirilememiş olması sayılabilir. Hafif betonun ısı yalıtkanlığının iyi olması, donmaya ve ateşe karşı dayanıklı olması ve bu betondan yapılan yapıların zati ağırlığından dolayı depremden doğacak yatay tesirlerin azalması, beton maliyetinin önemli ölçüde azalmasına sebep olmaktadır. Bunun yanında KYHB kullanımının yapının ömrüne getireceği katkılar, bakım ve onarım harcamalarındaki azalmalar, yapım süresinin kısalması ve işçiliğin azalması, gürültü faktörünün düşürülmesi gibi avantajlar da göz önüne alındığında normal ağırlıklı KYB'ye göre daha ekonomik olacağı düşünülmektedir.

EFNARC'ın KYB'ler için belirlemiş olduğu ölçütlere göre, tüm karışımlar KYB özelliği göstermektedir. 1. ve 2. Seri KYHB'lerde yoğunluğun artması yayılma çapını da artmıştır. Yayılma çapının büyük olduğu betonlarda 50 cm genişliğe ulaşma süresinin arttığı görülmüştür. Yine 1. ve 2. Seri KYHB'lerde yoğunluğun artması genel olarak V hunisinden akış süresinin de artmasına sebep olmuştur. Ayrıca L kutusu deneyinde betonun 20 cm ve 40 cm'ye ulaşma sürelerinin ve h_2/h_1 oranının yükseldiği görülmüştür.

Yapılan çalışmada KYHB'de yüksek akıcılığın, akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar yardımı ile sağlanırken betonun ayrışma direncinin, ince malzeme miktarını çok yüksek tutarak gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

KYHB'nin sadece doldurma özelliğinin yanında, donatılar arasından kolayca geçebilir özellikte olması da gerekmektedir. Bu özelliğin, su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun ayrışma direnci bozulmaktadır. Bu nedenle ayrışmanın göstergesi olan viskozite özelliği çok küçülmemelidir. KYHB'lerin bu özelliklerini düşük su/ince malzeme oranlarında sağladıkları gözlenmiştir. İnce maddenin yani uçucu külün bağlayıcı özellikte seçilmesi durumunda ise dayanımların arttığı görülmüştür.

KYHB'de toplam bağlayıcı miktarının artması basınç dayanımını beraberinde artırmıştır. Literatürde katkı maddesiz hafif beton ile ilgili çalışmalar ile kıyaslama yapıldığında, bu çalışmada tüm karışımlara ilave edilen uçucu külün basınç dayanımlarını artırdığı söylenebilir. Ayrıca 2. Seri KYHB'lerde kullanılan ince kumun karışımlarda dayanımı artırdığı gözlenmiştir.

Silindir numunelerdeki yarmada çekme ve orta noktadan yüklenen kirişteki eğilme dayanımları incelendiğinde, beklenildiği gibi, basınç dayanımı arttıkça çekme dayanımları da yükselmiştir.

KYHB'nin sağladığı faydaların net olarak görülebilmesi için uygun tasarım, uygun malzemeler, uygun beton kalıpları ve beton dökümünde eğitimli işçiler gerekmektedir. Aksi taktirde olumlu beklenen sonuçlara varılmayabilir.

KAYNAKLAR

Açıkel H., 1995, "Karapınar Volkanik Agregasından (TS 4047' ye uygun) Hazır Döşeme ve Çatı Plakları İmali", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Aktürk, M., 2005, "Kendiliğinden Yerleşen Beton", Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Altın, M., Sarıtaş, İ., Çelik, M.H., 2005, "Kendiliğinden Yerleşen Beton Numunelerinde Dayanım Özelliklerinin Deneysel Çalışma ve Tasarlanan Bulanık Uzman Sistem ile İncelenmesi ", 4. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Konya.

Altun, F., Haktanır, T., 1999, "Kayseri Yöresi Hafif Agregaları ile Üretilen Hafif Beton Özelliklerinin Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırılması", T.M.M.O.B İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye İnşaat Mühendisliği XV. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara.

Aruntaş, H.Y., 2006, "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 21 No1, Ankara.

Aykan, G., Gürol, G., Tezel, O.O., Yüceer, Z., 2004, "Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Bürge, T.A., 1999, "Multi Component Polymer Concrete" First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Rilem Publications S.A.R.L. pp.411-424

Çelik, Ö., 2004, "Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Atık Çamur Katkılarının Çimento Dayanımlarına Etkileri", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Duran, Ş., 2003, "Beton Katkı Maddelerinin Karapınar Volkanik Agregasından İmal Edilen Hafif Betonun Bazı Özelliklerine Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

EFNARC 2002 "Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete".

Eren, Ö., Yılmaz, Z., 2004, "Değişik Sıcaklıklarda Kür Edilen Salt Portland Çimentolu, Yüksek Fırın Cürufu veya Uçucu Kül Katkılı Betonlarda Dayanım Gelişimi", İMO Teknik Dergi.

Felekoğlu, B., Baradan, B., 2004, "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Gürdal, H., Yüceer, Z., 2004, "Türkiye ve Dünyada kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M. and Hwang, K., 2001, "Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash in Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 31-39.

Haque, M. N., Langan, B.W. and Ward, M.A., 1984, "High Fly Ash Concretes", ACI Journal, 81-8, pp. 54-60.

İnan, G., Köseoğlu, O.E., Ramyar, K., 2004, "Süper Akışkanlaştırıcı Katkının Betonun Su İhtiyacına ve Basınç Dayanımına Etkisi", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Kadiroğlu, İ., 2004, "Kendiliğinden Yerleşen Normal Dayanımlı Hafif Beton Üzerine Deneysel Bir Çalışma", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Khalaf, M.N., Yousif, M.H.A., 1985, "Effect of Revibration on the Stability and Compactibility of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 842-848.

Koral, S. ve Özkul, H., 1997, "Endüstriyel Atıklardan Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3, Bildiri Kitabı, ss. 197-208, Eskişehir.

Lane, R. O., Best, J. F. 1982, "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete", Concrete International, V. 4, No: 7, pp. 81-92.

Malhotra, V.M., 1990, "Properties of Hight Strength Lightweight Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume", ACI SP 121, November, Detroit.

Ramachandran, V.S., Malhotra, M., 1984, "Concrete Admixtures Handbook-Part 7: Superplasticizers", Noyes Publications, pp. 462-463.

Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, Ü.A., Özkul, M.H., 2004, "Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu" Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Sika Yapı Kimyasalları A.ş. Teknik Bilgi Föyü.

Sümer, M., 1994 "Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi", I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 179-185.

Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö., Tokyay, M., 2004, "Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri İle Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Tandırlı, A.E., 2004, "Farklı Uçucu Kül İkamelerinin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkileri ve k-eşdeğerlik Katsayıları", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Taşdemir, M.A., 1982, "Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, Doktora Tezi.

Taşdemir, M.A., 1984, "Taşıyıcı Hafif Betonların Mukavemet ve Deformasyon Yeteneğine Hafif Agrega Boyutunun Etkisi, Kuzeydoğu Anadolu I. Ulusal Deprem Sempozyumu, Erzurum.

Tokyay, M., 1989, "Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonlarının Hidratasyona ve Puzolanik Reaksiyonlara Etkileri", Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongresi, ss. 389-401, Ankara.

Topçu, B. İ., Canbaz, M., 2001, "Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 14 Sayı 2, İzmir.

TS 130/Nisan 1978, Agrega Karışımlarının Elek Analizi Deneyi İçin Metot.

TS 1114 EN 13055-1/Nisan 2004, Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton, Harç ve Şerbette Kullanım İçin.

TS 2511/Şubat 1977, Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları.

TS 2941/Ocak 1978, Taze Betonda Birim Ağırlık, Verim ve Hava Miktarının Ağırlık Yöntemi ile Tayini.

TS 3234/Eylül 1978, Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları.

TS 3529/Aralık 1980, Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini.

TS EN 197-1/Mart 2002, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.

TS EN 206-1/Nisan 2002, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk.

TS EN 450/Nisan 1998, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü.

TS EN 1097-6/Mart 2002, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini.

TS EN 12390-5/Nisan 2002, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini.

TS EN 12390-6/Nisan 2002, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini.

Turanlı, L., Erdoğan, T. ve Karaer, K., 1997, "Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Külü Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3, Bildiri Kitabı, ss. 283-293, Eskişehir.

Türkel, S., Felekoğlu, B., 2004, "Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 6 Sayı 1 Sh 77-89, İzmir.

Ünal, O., Uygunoğlu, T., 2004, "Uçucu Küllü Betonların Donma-Çözülmeye Karşı Dayanıklılığının Araştırılması", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Yaprak, H., Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., 2004, "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Beton Özelliklerine Etkisi", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.

Yardımcı, M.Y., Baradan, B., 2005, "Çelik Lif Donatılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özellikleri", Beton Prefabrikasyon Dergisi, Sayı 76, Ankara.

Yavuz, G., 1999, "Betonarme Kısa Konsolların Davranışlarının Deneysel Olarak ve Kafes Sistem/Strut and Tie Modellemesiyle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yazıcı, H., 2005, "Yapay Alçı-Uçucu Kül Esaslı Bağlayıcıların Mekanik Özellikleri", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 7 Sayı 1 Sh 65-72, İzmir.

Yazıcı, Ş., 2002, "Değişik Akışkanlaştırıcıların Betondaki Performansları", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 4 Sayı 2 Sh 41-52, İzmir.

Yazıcı, Ş., Baradan, B., 1995 "Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton", Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp., Bildiriler Kitabı, ss. 59 72, Ankara.

Yeniobalı, A., Erdoğdu, K., 1999, "Çimento ve Betonda Mineral Katkılar", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento ve Beton Araştırma Geliştirme Enstitüsü Seminer Notları, Ankara.

Yıldız, S., Kaya, A., Kelestemur, H., 2004, "Styropor Kullanılarak Elde Edilen Hafif Betonların Fiziksel Özelliklerinin Deneysel Olarak Araştırılması", F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2), 357-366.

Yılmaz, K., Canpolat, F., 2002, "Etkin Vibrasyonun Beton Kalitesindeki Önemi", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 15 Sayı 2, İzmir.

Yiğiter, H., Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B., 2004, "C Tipi Uçucu Kül Katkılı Betonların Bazı Fiziksel, Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.