

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TUĞLA VE KİREMİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARCIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Merve AÇIKGENÇ

Tez Yöneticisi:
Doç. Dr. Zülfü Çınar ULUCAN

Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

ELAZIĞ, 2009

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TUĞLA VE KİREMİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
HARCIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Merve AÇIKGENÇ

Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Tez, Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Başarılı/Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

Danışman:

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

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

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin hazırlanmasında gerekli yardımı esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Zülfü Çınar Ulucan'a ve malzeme temini, tez programı ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımları için sayın hocam Uzm. Dr. Mehmet Karataş'a teşekkürü bir borç bilirim.

En başından beri bana olan güveninden ötürü Prof. Ali Sayıl Erdoğan'a, desteğinden ve yardımlarından ötürü Doç. Dr. Ragıp İnce'ye ve bana bildiğim her şeyi öğreten Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümündeki diğer hocalarıma teşekkür ederim.

Son olarak her zaman desteklerini arkamda hissettiğim annem Nilüfer Açıkgenç ve babam Mustafa Açıkgenç 'e sabırları, inançları ve fevkalade rehberliklerinden ötürü duyduğum minneti kelimelerle ifade edemem. Ayrıca ihtiyacım olan her an yanımda olan anneannem ve büyükbabam Güler ve Ekrem Yağdıran' a sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	VI
SİMGELER LİSTESİ.....	VII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton.....	1
1.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları.....	2
1.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanımının Avantajları Ve Dezavantajları.....	7
1.3.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları.....	7
1.3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları.....	11
2.KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON BİLEŞENLERİNİN SEÇİMİ.....	13
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun/Harcın Reolojisi.....	13
2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme Bileşenlerinin Seçimi.....	18
2.2.1. Çimento Seçimi.....	19
2.2.2. Agrega Seçimi.....	20
2.2.3. Toz Madde (Filler) Seçimi.....	21
2.2.4. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Seçimi.....	21
2.2.5. Viskozite Arttırıcı Kimyasal Katkı (VAK) Seçimi.....	23
2.2.6. Karışım Suyu.....	23
3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN DİZAYNI VE KALİTE	
KONTROLÜNDE KULLANILAN DENEY METOTLARI.....	25
3.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tasarımı.....	25
3.1.1. Toz Tipi Metodu.....	28
3.1.2. Stabilizör Tipi Metodu.....	28
3.1.3. Kombinasyon metodu.....	28
3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Deney Yöntemleri.....	28
3.2.1. Çökme-Yayımla ve T_{500} Zamanı Deneyi.....	30
3.2.2. V-Hunisi Deneyi.....	32

3.2.3. L-Kutusu Deneyi.....	33
3.2.4. J-Halkası Deneyi.....	34
3.2.5. Elek Ayırışma Direnci Testi.....	35
4.KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONDA VEYA HARÇTA MİNERAL KATKILARIN KULLANIMI VE ETKİLERİ.....	37
4.1. Uçucu Kül.....	38
4.1.1. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Yapısı.....	39
4.1.2. Uçucu Külün Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri.....	40
4.2. Silis Dumanı.....	41
4.2.1. Silis Dumanının Kimyasal ve Fiziksel Yapısı.....	42
4.2.2. Silis Dumanının Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri.....	44
4.3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu.....	46
4.3.1. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Ve Kimyasal Yapısı.....	47
4.3.2. Yüksek fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri.....	47
4.4. Taş Tozları (Mineral Filler).....	48
4.5. Tuğla Tozu.....	50
4.6. Cam Filler Tozu.....	51
4.7. Pirinç Kabuğu ve Buğday Sapı Külü.....	51
5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	53
5.1. Deney Programı.....	53
5.2. Malzeme Özellikleri.....	53
5.2.1. Portland Çimentosu.....	53
5.2.2. Agregası.....	54
5.2.3. Kimyasal Katkı.....	55
5.2.4. Tuğla Tozu.....	55
5.3. Deney Metotları.....	56
5.3.1. Mini Çökme-Yayıma deneyi.....	56
5.3.2. Mini V-Hunisi Deneyi.....	57
5.3.3. Viskozitenin Saptanması.....	58
5.3.4. Üç Noktalı Eğilme Ve Basınç Deneyleri.....	59
5.3.5. UPV (Ultrasonik Titreşim Hızı) Ölçümü.....	60
5.3.6. Kapiler Su Emme Deneyi.....	60
5.4. Deneysel Veriler.....	61

5.4.1. Karışım Hesapları.....	61
5.4.2. İşlenebilirlik Özellikleri.....	62
5.4.3. Mekanik Özellikler.....	63
5.4.4. Kapiler Su Emme Deneyi.....	64
6.SONUÇLARIN TARTIŞILMASI.....	67
6.1. İşlenebilirlik ve Kıvam.....	67
6.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı.....	70
6.3. UPV-Rölatif Ses Hızı.....	72
6.4. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme Kapasitesi ve Porozite.....	73
7.SONUÇLAR.....	76
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulaması.....	3
Şekil 1.2 İsveç Stockholm'de KYB Kaplanmış Bir Tünel.....	4
Şekil 1.3 Kontrollü Düşük Dayanımlı KYB Uygulamaları.....	5
Şekil 1.4 Betonarme Elemanlarda Boşluksuz Kalıp Yüzeyi Elde Edilen KYB Elemanlar.....	6
Şekil 1.5 Prefabrik Elemanda KYB'nin Kalıba Boşluksuz Yerleşmesi Ve Bitiş Yüzeyi Detayları....	6
Şekil 1. 6 Prefabrike Beton Üretiminde KYB Uygulanması.....	7
Şekil 1.7 Dar Donatılı Kesitlerde KYB Uygulaması.....	9
Şekil 1.8 KYB' nin Perdahlanması.....	10
Şekil 2.1 Taze Beton (Bingham Modeli).....	14
Şekil 2.2 Newtonyen Sıvı Modeli.....	15
Şekil 2. 3 KYB'nin Psödoplastik (yalancı Plastik) Davranışı.....	16
Şekil 2. 4 KYB'nin Tikotropik Davranışı.....	17
Şekil 2.5 a: hareketsiz taze beton b: Kayma gerilmesi altında teze beton.....	18
Şekil 2.6 Japonya Hiroşima Üniversitesi Beton Teknolojisi Laboratuvarlarında Çimentonun C_3A Bileşeni Ayrıştırılıp, Sulu Çözelti İçinde Hidratasyonu 2 Saatlik Periyot İçerisinde Gözlemlenmiştir. a, başlangıç anı. b ve c'de 1. Ve 2. Saat Sonlarında Etrenjit Oluşumunun İşlenebilirlik Üzerindeki Olumsuz Etkisi Açıkça Görülmektedir.....	19
Şekil 2.7 a: akışkanlaştırıcı katkısız çimento b: akışkanlaştırıcı katkılı çimento (siyah kısımlar sıkışmış hava boşluklarıdır).....	22
Şekil 2.8 Kimyasal katkı tipinin akışkanlık artırıcı etkisi.....	23
Şekil 3.1 Yayılma Deneyi Hunisi.....	31
Şekil 3.2 Yayılma Tablasının Boyutları.....	31
Şekil 3.3 V-Hunisi.....	32
Şekil 3.4 L-Kutusu Genel Görünüm.....	33
Şekil 3.5 Tipik Bir L-Kutusunun Boyutları.....	34
Şekil 3.6 J-Halkası Deneyi.....	35
Şekil 3.7 Elek Ayrışma Deneyi.....	35
Şekil 4. 1 Uçucu Külün Mikro Yapısı	39
Şekil 4.2 Ultra İnce Amorf Kolloidal Silis Dumanı Çözeltisi (5-50 nm)	43
Şekil 4.3 Kireç Taşı Tozunun Mikro Yapısı	50
Şekil 4.4 Tuğla Tozunun Mikro Yapısı	51

Şekil 5.1 Nehir Kumunun Granülometrisi.....	54
Şekil 5.2 KYH İçin Mini Çökme-Yayılma Deneyi.....	56
Şekil 5.3 Çökme-Yayılma Deneyi.....	57
Şekil 5.4 KYH İçin Mini V-Hunisi Boyutları.....	57
Şekil 5.5 KYH İçin Mini V-Hunisi Deneyi.....	58
Şekil 5.6 Brookfield DV-E model viskozimetre.....	58
Şekil 5.7 Eğilme ve Basınç Deneyleri.....	59
Şekil 5.8 UPV Cihazı.....	60
Şekil 5.9 Kapiler Su Emme Deneyi.....	61
Şekil 5.10 Standart Mini Mikser.....	62
Şekil 6.1 Bağlı V-Hunisi Hızı.....	68
Şekil 6.2 Bağlı Çökme-Yayılma.....	69
Şekil 6.3 Viskozite Değişimleri.....	70
Şekil 6.4 KYH'ların Eğilme Dayanımlarının Değişimleri.....	71
Şekil 6.5 KYH'ların Basınç Dayanımlarının Değişimleri.....	72
Şekil 6.6 UPV Değişimleri.....	73
Şekil 6.7 Kapiler Su Emme Katsayıları.....	74
Şekil 6.8 Boşluk Oranlarının Değişimi.....	74
Şekil 6.9 Toplam Su Emme Kapasite Değişimleri.....	75

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo1.1 Geleneksel Betonla KYB'nin Maliyet Açısından Karşılaştırılması	8
Tablo1.2 İsveç Prefabrike Beton Üreticileri Birliği'nin KYB Maliyet Analizi	8
Tablo 3.1 EFNARC (2002) 'a göre tavsiye edilen KYB deneyleri ve sınır değerleri.....	26
Tablo 3.2 KYB Dizaynı İçin Alınabilecek Önlemler.....	27
Tablo 3.3 EFNARC (2005)'a Göre KYB'nin Karakteristik Özellikleri Ve Bu Özellikleri Ölçen Deneyler.....	29
Tablo 3.4 KYB Deney Metotları ve Ölçtükleri Değerler.....	30
Tablo 4.1 Mineral Katkıların Sınıflandırılması	37
Tablo 4.2 Uçucu Külün Kazandırdığı Teknik Özellikler	41
Tablo 4.3 Silis Dumanlarının Kimyasal Bileşenleri, %.....	44
Tablo 4.4 Betonda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi	45
Tablo 4.5 Yüksek Fırın Cürufalarının Kimyasal Kompozisyonları.....	47
Tablo 4.6 Betonda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkisi	48
Tablo 5.1 CEM I 42,5 N Çimentonun Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri.....	54
Tablo 5.2 Kimyasal Katkının Özellikleri.....	55
Tablo 5.3 Tuğla Tozunun Kimyasal Ve Fiziksel Özellikleri.....	55
Tablo 5.4 Karışım Oranları.....	62
Tablo 5.5 Harçların İşlenebilirlik Özellikleri.....	63
Tablo 5.6 Farklı Açısal Hız Değerleri İçin Viskozite Ölçümleri.....	63
Tablo 5.7 Harçların Basınç ve Eğilme Dayanımları.....	64
Tablo 5.8 UPV Sonuçları.....	64
Tablo 5.9 Numunelerin Etüv Kuru, Doygun Kuru Yüzey ve Su İçindeki Ağırlıkları.....	65
Tablo 5.10 Toplam Su Emme Kapasitesi ve Porozite.....	65
Tablo 5.11 Numune Yoğunlukları.....	66

SİMGELER LİSTESİ

SR	: Elek ayrışma direnci (%)
τ_0	: Eşik kayma gerilmesi
a, b	: Malzeme ve aparat katsayıları
γ	: Deformasyon hızı
η	: Viskozite
R_1 ve R_2	: İç ve dış silindir çapları
h	: Kayma gerilmesi uygulanan hacmin yüksekliği
Γ	: Uygulanan moment
Ω	: Dönen diskin açısal hızı
Γ_0 ve $\partial\Gamma / \partial\Omega$	: Doğrusal fonksiyonun $\Gamma(\Omega)$ orijindeki ordinatı ve doğrunun eğimi
η'	: Plastik viskozite
$\gamma_{\max}$	: Deformasyon hızının ulaştığı en büyük değer
K	: Kapilarite katsayısı (cm^2/s)
A	: Su ile temas eden alan (cm^2)
t	: Geçen zaman (s)
Q	: Emilen su miktarı (cm^3)

KISALTMALAR LİSTESİ

KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
KSB	:Kendiliğinden Sıkışan Beton
KYH	: Kendiliğinden Yerleşen Harç
UPV	: Ultrasonik Titreşim Hızı / Rölatif Ses Hızı
TT	: Tuğla Tozu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
PÇ	: Portland Çimentosu
EFNARC	:European Federation of National Trade Associations

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUĞLA VE KİREMİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARCIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Merve AÇIKGENÇ

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa:80

Bu çalışmanın amacı, kendiliğinden yerleşen harçta mineral katkı kullanımının dayanım, dayanıklılık ve viskozite özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Böylece hem taze hem de sertleşmiş haldeki özelliklerin araştırılmasını mümkün kılan bir çalışma yürütülecektir. Çünkü betonda yüksek mukavemet, dayanıklılık ve uygun bir işlenebilirlik gibi özellikler iyi bir beton üretimini kaçınılmaz yapmaktadır. Bu özelliklerin sağlanmasında mineral katkı maddelerinin gerekliliği ve belirli bir ince malzeme miktarının sağlanması, özellikle KYB’ da işlenebilirlik ve kıvam açısından da şart olduğu yapılan birçok çalışmada ortaya koyulmuştur. Bunun yanında, bu mineral katkıların (Mermer tozu, Silis dumanı, Uçucu kül, Kireçtaşı tozu, Yüksek fırın cürufu gibi) çimento yerine karışıma bir veya birden fazla (ikili ve üçlü sistem halinde) katılmaları ve ideal oranlarının belirlenmesi KYB’ un taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisi bakımından büyük öneme sahip olduğu açıktır. Ayrıca düzensiz bir biçimde çevreye bırakılan atıkların çevre sağlığını tehdit etmesini önlemek ve KYB de kullanılacak toz maddelere yöresel anlamda yenilerini eklemek amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Beton, Kendiliğinden Yerleşen Harç, Mineral Katkı, Tuğla Tozu, İnce Malzeme.

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT OF ROOF TILE AND BRICK WASTE ON THE ENGINEERING PROPERTIES OF SELF COMPACTING MORTARS

Merve AÇIKGENÇ

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

2009, Page:80

The aim of this study is to research the using of mineral admixtures in self-compacting mortars to the effect of strength, endurance and viscosity properties. In this way it makes possible for both the fresh and the hardened state being able to be researched. Because some properties like high resistance, endurance and suitable workability, make it inevitable to produce fine concrete. Many studies show that it is essential to provide mineral admixtures and powder, especially workability and consistency in SCC (self-compacting concrete). Besides this, it is obvious to add these mineral admixtures (silica fume, fly ash, limestone powder etc.) into this mixture for one or more, and to define an ideal percentage, in that effect of fresh and hardened state of SCC is very important. Additionally it is aimed to prevent the out of balance dumping to the environment and to add new things to the powders in SCC locally.

Key Words: Self-Compacting Concrete, Self-Compacting Mortars, Mineral Addmixtures, Brick Powder, Fine Material.

1. GİRİŞ

Beton, suyun ardından dünyada en çok tüketilen malzemedir. Bu derece yoğun tüketilen bir malzemenin de teknolojiye paralel gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Mevcut teknolojide beton kalitesi, yoğun emek ve enerji kullanımı gerektiren mekanik vibrasyon işine bağlıdır.

Betonda aranan en önemli özelliklerden biri olan işlenebilirlik, önceleri sadece karışım suyunun arttırılmasıyla mümkün olabilmekteydi. Ancak gerek karışım suyunun artmasıyla dayanımdaki düşüş, gerekse dünyamızdaki su kaynaklarının giderek azalması betonda kullanılabilir su azaltıcı katkı arayışına sebep olmuştur. Teknolojinin bunu mümkün kılmasıyla “kendiliğinden yerleşen beton” kavramı ortaya çıkmıştır.

1.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton

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 kullanımıyla birlikte üretim ve uygulama safhasındaki pek çok sorun çözülebilmektedir. 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, beton bünyesine girecek su miktarını azaltırken aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Bu etki bilim adamlarını taze betonun yerleştirilmesi sırasında gereken sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmak için araştırma yapmaya yöneltmiştir. Son 20 yıldır dikkate değer bir şekilde yeni bir beton teknolojisi olarak gelişen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) teknolojisi, betonun işlenebilirliğini artırmanın yanında durabilitesini ve dolayısıyla beton kalitesini de arttırmayı amaçlayan Japon bilim adamları tarafından 1986’da keşfedilmiştir [1].

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç ve dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliğini sağlarken ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayarak kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür [2].

KYB özellikle deprem sonrası onarım-güçlendirme işleri ve prefabrike sektörü başta olmak üzere inşaatın değişik alanlarında giderek daha fazla uygulanma olanağı bulmaktadır. Kolay yerleşmesi, sıkıştırma aracı (vibratör) gerektirmemesi, ayrışma direncinin yüksek oluşu, yüksek durabilite özelliği gibi nedenlerle yüksek performanslı beton üretimine olanak veren KYB, ülkemizde de tanınmaya ve kullanılmaya başlanmıştır. KYB’ un bileşimi, etkin bir süper

akışkanlaştırıcı yanında toplam ince malzeme miktarı, viskozite artırıcı katkı kullanımı, su / bağlayıcı oranı, maksimum agregada boyutu, kum / toplam agregada oranı ve toplam iri agregada miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betondan farklılıklar gösterir.

Klasik beton tasarımından farklı olarak KYB’ da; kimyasal katkılar, akışkanlaştırıcılar ve puzolanik mineral katkıların tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton tasarımına uygun olarak kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir. Günümüzde var olan tek standart, EFNARC (European Federation of National Trade Associations)[3] tarafından yayınlanmaktadır. EFNARC kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğiyle ilgili olarak üç özellik gerektirir. Bunlar bulunduğu hacmi boşluksuz doldurma yeteneği, akma oranıyla belirlenen uygun viskozite, dar kesitlerden geçme kabiliyeti ve ayrışma direncidir. KYB’ da işlenebilirlik geleneksel betondaki deney metotlarıyla belirlenemez, bu yüzden KYB’ un işlenebilirliğini belirlemek için EFNARC tarafından bazı deney metotları önerilmiştir: Çökme-yayılma, J-halkası, V-hunisi, L-kutusu, U-kutusu ve Elek ayrışma deneyleri.

1.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları

Günümüzde KYB özel tip betonlar sınıfında sayılabilir. Genellikle büyük boyutlu inşaatlarda, sık donatılı dar kesit özelliklerinin bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, tamir, bakım ve yenileme işlerinde, tünel gibi özel kalıp gerektiren işlerde kullanılan KYB henüz normal beton kadar geniş kullanım alanına sahip değildir. Bunun en önemli nedeni maliyetinin yanı sıra, tasarım ve uygulama alanlarında yeni yöntemler gerektirmesidir.

Geleneksel betonun teknik olarak kullanımının mümkün olamayacağı durumlarda KYB kullanımı tercih edilebilir. Örneğin, bakım ve onarım işlerinde betonla doldurulacak bölgeye vibratör girmesi mümkün değilse geleneksel beton kullanılamaz (Şekil 1.1). Böyle bir durumda KYB kullanımı en akılcı çözüm olacaktır[2].



Şekil 1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulaması

Benzer bir uygulama Kanada Montreal’de bir parapet duvarı onarımında söz konusu olmuştur. 200 metre uzunluğundaki betonarme duvar 1959 yılında yapılmış olup, dış etkenlerden dolayı yüzeyden 15 cm derinliğe kadar olan beton tabaka ve donatı hasar görmüştür. Tamir işinin KYB kullanılarak planlanandan daha kısa sürede tamamlandığı rapor edilmiştir [2].

Bazı durumlarda geleneksel beton kullanımı, KYB’ nin malzeme maliyetinin daha yüksek olmasına karşın ekonomik olmayabilir. Bu sebeple KYB’ yi salt malzeme maliyeti ile geleneksel betonla kıyaslamak pek doğru olmaz. Örneğin, tünel inşaatlarında tünel taşıyıcı sistemi oluşturulduktan sonra kaplama betonu yapılmaktadır. Bu beton için hareketli bir kalıp sistemi hazırlanmakta ve bu kalıp sistemi vibratörlerle donatılmaktadır. Vibrasyon hem kalıp sisteminde hasara sebep olmakta hem de inşaat hızını yavaşlatarak maliyeti arttırmaktadır. Özellikle tünel ağızlarında donatı yoğunlaşmakta ve aşırı vibrasyona gereksinim duyulmaktadır (Şekil 1.2). Böyle durumlarda KYB kullanımının inşaat hızını artırıcı etkisini de göz önünde bulundurmak gerekir [2].



Şekil 1.2 İsveç Stockholm'de KYB Kaplanmış Bir Tünel

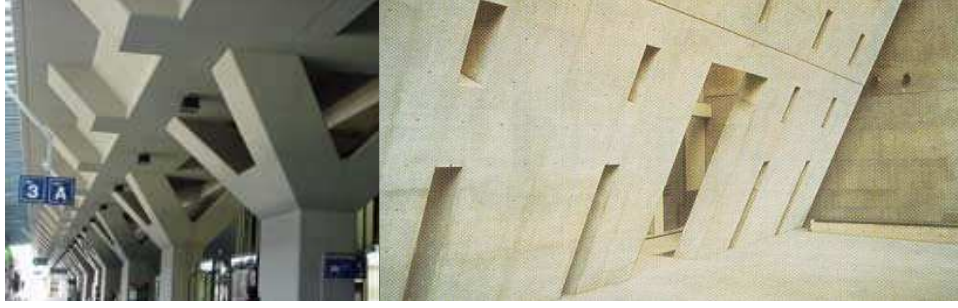
Hafif beton üretiminde KYB uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır. Hafif KYB üretiminde gerek hafif agrega kullanımı, gerekse yüksek oranda hava sürükleyici kimyasal katkı kullanımı ile hamur fazının hafifletilmesi yaygın kullanılan yöntemlerdir. Hafif KYB' de en önemli sorunlar yüksek oranda toz madde kullanılmasının tasarımda yapacağı ağırlaştırıcı etki ve hafif agregaların çok yüksek su tutma kapasitesinin tasarımda doğuracağı sıkıntılardır[2].

KYB' nin bir başka kullanım alanı kontrollü düşük dayanımlı beton uygulamalarıdır. Taşıyıcı sistemde kullanılan KYB' den farklı olarak yüksek su/çimento oranı, düşük çimento dozajı ve az miktarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımıyla kontrollü düşük dayanımlı KYB üretmek mümkündür. Kontrollü Düşük Dayanımlı KYB reolojik açıdan yapısal KYB' ye kıyasla oldukça düşük kohezyona sahiptir. Kontrollü Düşük Dayanımlı KYB, özellikle altyapı inşaatlarında inşaat hızını arttırmak ve şehir içi altyapının tamirini kolaylaştırmak amaçları ile tercih edilebilir (Şekil 1.3)[2].



Şekil 1.3 Kontrollü Düşük Dayanımlı KYB Uygulamaları

KYB ile betonarme yapılarda geleneksel betona kıyasla mimari ve estetik açıdan çok daha kaliteli dış görünüş elde edilebilmektedir (Şekil 1.4 ve Şekil 1.5). Aynı zamanda boşluksuz yüzey betonarme elemanlar için geçirimsiz ve dolayısıyla durabil bir yapı anlamına gelir. Kimyasal katkıların gelişimiyle birlikte erken dayanımı buhar kürüne ihtiyaç kalmadan çok yüksek ve vibrasyonsuz yerleşme yeteneğine sahip beton üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu sebeple yakın gelecekte KYB' nin prefabrike beton üretiminde yaygınlaşması pek çok araştırmacı tarafından beklenmektedir [2].



Şekil 1.4 Betonarme Elemanlarda Boşluksuz Kalıp Yüzeyi Elde Edilen KYB Elemanlar



Şekil 1.5 Prefabrik Elemanda KYB' nin Kalıba Boşluksuz Yerleşmesi Ve Bitiş Yüzeyi Detayları

Yol üst yapısında geleneksel beton kullanılması halinde aşağıdaki sorunlarla karşılaşmaktadır:

- Yetersiz veya aşırı sıkıştırma
- Taşıma sırasında ayrışma
- Yerleştirme süresi ve dayanım kazanma hızı (trafiğe açılma süresi)

Yukarıda sözü geçen sorunların çözümü için Amerika'da otoyol üstyapısında KYB kullanımı henüz deneme aşamasındadır. Öte yandan köprü tasarımında ekonomik ömrün 100 yıla çıkartılması ve köprü girişleri için daha geniş açıklıklar geçmeyi sağlayan daha estetik kesit

kullanımının sağlanması için KYB çok avantajlıdır. Geleneksel beton ile yol üst kaplaması inşaatında yüzeysel vibratörler kullanılmaktadır. Amerika’da özellikle donma-çözülme riski olan bölgelerde, hava sürükleyici katkı kullanılarak hava içeriği yüksek beton tasarımları hazırlanmaktadır. Fakat vibrasyon işlemi taze betonda hava kabarcığı kaybına yol açabilmektedir. Örneğin, Iowa eyaletinde servis ömründen çok daha önce donma-çözülme hasarına uğrayan yol kaplamaları tespit edilmiştir. Bu kaplamaların taze haldeki hava içerikleri şantiyede ölçüldüğünde yüksek seviyelerde olduğu raporlarda görülmüştür. Fakat yerleştirme sırasında yapılan vibrasyonun beton içindeki hava yapısını özellikle yüzey bölgesinde bozduğu ve taze betonun hava içeriğini azalttığı belirlenmiştir. Bu örnekte de görüldüğü gibi, vibrasyon işleminin yararın yanında zarar da getirdiği durumlar söz konusudur[2].

1.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanımının Avantajları Ve Dezavantajları

KYB kullanımının avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1.3.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları

1. Taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacak, böylece vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybı ortadan kalkacaktır. Vibratör kullanımının çevreye yaydığı gürültü kirliliği (özellikle prefabrike beton sektörü için) önlenecektir. Prefabrike beton sektöründe vibratör kullanımının kalıplara verdiği zarar ortadan kalkacağından kalıpların ekonomik ömürleri artacaktır (Şekil 1.6) [2].
2. İşçilik açısından yapılan değerlendirmelerde % 32’ lik bir maliyet azalması elde edildiği rapor edilmiştir[2].



Şekil 1. 6 Prefabrike Beton Üretiminde KYB Uygulanması

3. Brite-EuRam projesi (1999) ile KYB' nin malzeme açısından normal betona kıyasla % 10 daha pahalı olduğunu belirlenmiştir. Tablo 1.1' de yurtdışında bir prefabrike beton üreticisinin metreküp başına çıkarttığı toplam maliyet analizi verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, sırf malzeme açısından bakıldığında KYB daha pahalı olmakta ama fabrika içindeki diğer işlemlerin maliyetlerinin ilave edilmesi durumunda, KYB' nin çok daha ekonomik olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Fakat Türkiye şartlarında işçiliğin çok daha ucuz olması, KYB' nin ekonomikliğini etkileyebilir. Konunun fizibilitesi yerel maliyetlerle analizler yapılarak değerlendirilmelidir. Ayrıca sağlık, çevre sorunları ve kalıp maliyeti gibi unsurlar da değerlendirme dışında tutulmamalıdır[2].

Tablo 1.1 Geleneksel Betonla KYB' nin Maliyet Açısından Karşılaştırılması [2]

Maliyet Unsurları	Geleneksel Beton (£/m³)	KYB (£/m³)
Beton (çimento, agrega)	36,90	38,53
Kimyasal Katkı	3,53	8,38
Kalıp Montaj İşçiliği	5,04	5,04
Kalıba Yerleştirme, sıkıştırma ve perdahlama	26,88	3,03
Kalıp Sökümü	7,56	5,04
Vibrasyon Hasarı ve Bakımı	1,00	0
Toplam Maliyet	80,91	60,02

Tablo 1.2' de İsveç Prefabrike Beton Üreticileri Birliğinin verdiği KYB maliyet analizi verilmiştir [2].

Tablo1. 2 İsveç Prefabrike Beton Üreticileri Birliği'nin KYB Maliyet Analizi [2]

Maliyet (%)	İşçilik	Malzeme	Toplam
Kalıp	20	12	32
Donatı	8	12	20
Beton	4	27	31
Diğer	15	2	17
Toplam	47	53	100

4. Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını arttıracaktır (Şekil 1.7). Özellikle, deprem riski olan bölgelerde perde tipi kolon kullanımının yoğun olması ve bu elemanların sık donatılı olmaları vibratör kullanımını zorlaştırmaktadır. Betonarme yapılarda önemli problemlerden biri de donatı yoğunlaşmasının meydana geldiği düğüm noktalarında ve perde tipi elemanlarda betonun iyi sıkıştırılamamasıdır. Bu sorunlar KYB kullanımıyla çözülebilir. Betonun yoğunluğu maksimum sıkışmanın sağlandığının kabul edildiği teorik yoğunluğa yaklaştıkça elde edilebilecek maksimum dayanıma yaklaşılmaktadır.



Şekil 1.7 Dar Donatılı Kesitlerde KYB Uygulaması

5. Yeni nesil kimyasal katkıların kullanımıyla çok akıcı, fakat düşük su/çimento oranına sahip, yüksek dayanımlı beton üretilerek beton kalitesi hem dayanım hem de dayanıklılık açısından arttırılmaktadır.
6. Efektif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla, prefabrike sektöründe erken kalıp alma için, özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabilir. Bu tür KYB' lerin erken dayanımı yüksek olacağından, kalıp alma hızları artmakta dolayısı ile inşaat hızında artışlar meydana gelmektedir. Prefabrike beton sektöründe erken kalıp alma sırasında meydana gelen üretim kayıpları (kalıp alma sırasında yeterli dayanıma sahip olmadığından çatlama, kırılma ile elden çıkma) geleneksel üretim yöntemlerinde % 15 - 20'lere ulaşırken, KYB kullanımıyla bu kayıpların % 5'e kadar düşürülebildiği rapor edilmiştir[2].
7. KYB karışım oranları ve bileşenleri değiştirilerek farklı reolojik karakteristiklerde üretilebilir Prefabrike beton üretiminde sıkıştırma işleminde genellikle dış vibrasyon uygulandığı için kalıp et kalınlıkları dinamik etkilere göre boyutlandırılmaktadır. Bu sebeple kalıplar oldukça ağırdır. KYB kullanılması halinde dinamik etki ortadan

kalkacağından daha ince et kalınlıklı kalıp kullanılabilir. Kalıplar hafifleyeceğinden taşıma ve bakım işleri kolaylaşır [2].

8. KYB' nin perdahlanabilirliği geleneksel betona kıyasla daha rahattır. Beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 KYB' nin Perdahlanması

9. KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Fakat bu durum aynı zamanda bir dezavantaja dönüşebilir; sıva yapılması gerekiyorsa pürüzsüz yüzeyi sebebiyle KYB sıva tutmayabilir. Öte yandan durabilite, özellikle donatı korozyonu açısından hayati önem taşıyan paspayı tabakası kalitesi de KYB kullanılarak artırılabilir. KYB tasarımında genellikle yüksek oranda toz madde kullanılması, kısıtlanmış iri agrega maksimum tane boyutu ve miktarı, kalıp yüzeylerinde sıkışık hava boşluğu kalma riskini azaltmaktadır. Düşük su/bağlayıcı oranı sebebiyle kapiler boşluklarda da azalma beklenebilir.
10. Prefabrike beton sektöründe karşılaşılan önemli sorunlardan biri de sık donatılı narin elemanların kalıptan alınırken ince kesitlerinde yetersiz vibrasyondan kaynaklanan boşlukların ortaya çıkmasıdır. Bu durumda yama ile boşluklar kapatılmaktadır. KYB kullanımı ile rötuş işleminin % 25 ile % 75 oranında azaldığı belirlenmiştir [2].
11. KYB pompalanabilirlik açısından geleneksel betona göre daha avantajlıdır. Pompa içi basıncın geleneksel betona kıyasla ortalama % 20 azaldığı rapor edilmiştir. Bu durum

taze KYB' nin tiksotropik yapısından kaynaklanmaktadır. Tiksotropik davranış, sabit bir deformasyon hızında, taze betonun kayma direncinde zamanla meydana gelen azalma olarak açıklanabilir. Deformasyon hızı sıfıra indirilirse yani karıştırma işlemi durdurulursa, hareketsiz halde iç sürtünme ve kohezyonla taze beton kayma direncini yeniden kazanır[2].

1.3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları:

1. KYB malzeme maliyeti açısından betona kıyasla daha pahalıdır. Maliyeti arttırıcı unsurlar kimyasal katkıların maliyeti olup, gelecekte bu maliyetlerin düşmesi beklenmektedir.
2. KYB' nin performansı malzeme tip ve oran değişikliklerine çok hassastır. Klasik betona göre daha sıkı tedbirler gerektirir, bu durum üreticinin ilave tedbirler almasını gerektirir. Üretim sırasında müdahale zorluğu vardır. Örneğin agrega nem oranına göre karışıma su ilavesi yapılması gerekebilir[2].
3. Kesinleşmiş tasarım yöntemi ve standart deneylerinin yokluğu kalite kontrol işlerinde genelleme yapılmasını engellemekte ve standartlaştırmada sıkıntılara yol açmaktadır. Özel şartnameler oluşturularak başarılı uygulamalar gerçekleştirilmesine karşın uluslararası genelleme yapmak pratikte mümkün değildir. Çünkü yerel malzemelerdeki değişkenlikler KYB' nin taze haldeki reolojisini etkilemektedir.
4. Geleneksel betona göre yüksek oranda toz malzeme içerdiği için, boyutsal stabilitesi hakkında toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar elde eden araştırmacılar çoğunluktadır. Tasarım yöntemi ve kullanılan malzemelere göre değişmesine rağmen, genellikle kuruma büzülmesinin KYB' de geleneksel betona kıyasla daha yüksek olduğu kabul edilmektedir. Bu durum öngörilmeli prefabrike eleman üretiminde dikkate alınmalıdır [2].
5. KYB' nin erken dönemde küre hassas olduğu çeşitli araştırmacılarca ortaya konulmuştur. Küre hassasiyet puzolanik aktivite gösteren toz maddelerin kullanılması halinde daha baskındır. KYB' nin en azından 7 güne kadar kür edilmesi tavsiye edilmektedir. Kür edilmemesi halinde sıcak havalarda plastik büzülme çatlakları meydana gelebilir [2].
6. Özellikle prefabrike beton üretiminde taze betonun taşınması için geleneksel betonda kullanılan bazı sistemlerin değiştirilmesi veya modifiye edilmesi gerekmektedir. Klasik prefabrike beton üretiminde kuru kıvamlı taze beton (2 – 5 cm çökme değeri) yerleştirileceği alana ya hareketli bantlarla ya da kovalar yardımıyla taşınmaktadır. KYB kullanılması halinde taşıyıcı bantların kullanımı mümkün değildir. Taşıma kovalarının da kapak kısımları sızdırmaz hale getirilmelidir. KYB' nin pompalanması halinde daha iyi

kalıp yüzeyi elde edildiği, kovayla taşınması halinde ise hem döküm süresinin uzadığı hem de soğuk derz oluştuğu gözlenmiştir [2].

7. Prefabrike beton üretiminde mevcut kalıp sistemlerinin bir kısmı KYB kullanımına uygun değildir. Çatı makası gibi eğimli elemanların kalıp sistemlerinin KYB kullanımına göre modifiye edilmesi gereklidir. %2'den fazla eğimli elemanlar KYB ile dökülemez[2].
8. Geleneksel beton üretiminde ahşap kalıp sıklıkla kullanılmaktadır. Ahşap kalıpların çakılması sırasında iki lata arasında boşluk bırakılması halinde KYB kullanıldığında harç sızması olabileceği için kalıp işçiliğine özen gösterilmelidir. Ayrıca merdivenlerde kalıp sistemi nedeniyle KYB kullanılamamaktadır.
9. KYB tiksotropik yapısı gereği, belli bir süre karıştırılırsa akıcılığı artar başka bir deyişle viskozitesi düşer. Viskozitesinin kararlı bir konuma gelmesi için gereken karıştırma süresi normal betona kıyasla daha fazladır. Bu özellik zaman ve enerji kaybına yol açacaktır. Fakat bu kayıp yerleştirme işlemindeki kolaylıklar dikkate alındığında ihmal edilebilecek kadar azdır.
10. KYB' nin yerleştirilmesinde sürekli döküm yöntemleri tercih edilmelidir. Yerleştirmenin kesikli yapılması halinde, iki karışım arasında derz oluşma riski vardır. İki farklı karışımın yerleştirme süreleri arasında 5 ila 30 dakikalık fark olması halinde, iki betonun birbirine kaynaşması için ara bölgede kısa süreli vibrasyona ihtiyaç duyulduğu rapor edilmiştir [2].

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN REOLOJİSİ VE BİLEŞENLERİNİN SEÇİMİ

Kendiliğinden yerleşen beton için karışım bileşenlerinin seçiminde özellikle taze beton reolojisi önemli rol oynamaktadır. Taze betonun kalıba yerleştirilebilme kolaylığı, beton bileşenlerinin çökelme potansiyeli, durabilite ve nihai dayanım gibi özellikler taze betonun reolojik özellikleriyle yakından ilgilidir. Ne yazık ki beton bileşenlerinin oluşturduğu karmaşık yapının reolojik özelliklerini doğrudan belirlemek pratik deneylerle olanaklı değildir. Bunun nedeni her bileşenin yapısının değişkenliği ve kompozit malzeme olarak betonun heterojenliğidir. Bir diğer neden de reolojik parametrelerin çok geniş bir parçacık boyut dağılımına sahip olan betonda kolay kolay elde edilememesidir. 1 mikrometreden 10 mm' ye kadar hatta kütle betonlarında 100 mm' ye kadar değişen parçacıkların boyut dağılımı nedeniyle beton reolojisi dolaylı test metotlarıyla ölçülmektedir[2].

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun/Harcın Reolojisi

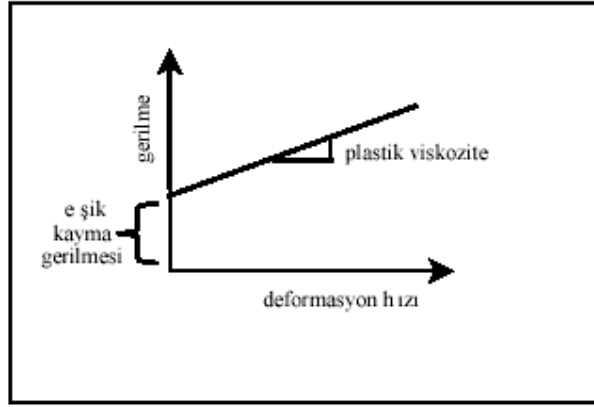
Reoloji, bir maddenin akma ve deformasyonunun basınç ve zaman içerisinde incelenmesidir. KYB' nin reolojisi; malzeme parametreleri dışında, karıştırıcı tipi (ne kadar hava sürükleneceğiyle ilgili), malzemelerin karışıma ilave edilme sırası (karışım prosedürü), karıştırma süresi ve sıcaklık gibi değişkenliklerden de etkilenir [4].

Beton aslında viskoz bir sıvı içindeki (çimento hamuru), katı parçacıkların (agregalar) oluşturduğu heterojen bir süspansiyondur. Çimento hamuru da homojen bir yapıda değildir. Hamur, sıvı faz (su) içindeki çimento taneciklerinin oluşturduğu süspansiyondur [5].

Bir taze beton karışımının kendiliğinden yerleşen özellikte olabilmesi için düşük eşik kayma gerilmesi değerine ve optimum viskoziteye sahip olması gereklidir. Eşik kayma gerilmesi bir malzemenin akışa geçebilmesi (hareket edebilmesi) için gerekli minimum gerilmedir. Bir süspansiyon için bu değer kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğindeki doğrunun gerilme eksenini kestiği noktaya eşittir. Plastik viskozite ise bu doğrunun eğimine eşittir. Genel olarak bu doğru denkleminde (2.1) uyan sıvıya **Bingham Sıvısı** denir [2]. Aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$F/A = \tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Taze betonun reolojisini incelemeye Bingham modeli esas alınır. Bu modelde, taze betonun akmaya başlaması için bir sınır gerilmesine değeri ihtiyacı vardır (Şekil 2.1). KYB, çok düşük eşik kayma değeriyle sahip olduğundan Bingham modeli uygulandığında çoğu zaman ekstrapolasyon yoluyla elde edilen değerler negatif çıkmaktadır. Bu sonuçların da fiziksel olarak bir anlamı yoktur.



Şekil 2.1 Taze Beton (Bingham Modeli)

Kendiliğinden yerleşen beton için Herschel-Bulkley denkleminin, deneysel verilere daha yakın sonuç verdiği birçok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir. Denklem (2.1)'de verilen Herschel-Bulkley denklemi üç parametre içermektedir. Bunlardan biri eşik kayma gerilmesi ve diğer ikisi ise fiziksel karşılıkları olmayan malzeme ve cihaz özelliklerini içeren katsayılardır. Fakat Herschel-Bulkley denklemi (2.2) ile plastik viskoziteyi belirlemek oldukça güçtür. Deformasyon hızı değiştikçe plastik viskozite değeri değişmektedir.

$$\tau_0 = \frac{3\Gamma_0}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{2h(\partial\Gamma / \partial\Omega)}{\pi(R_2^4 - R_1^4)} \quad (2.3)$$

Herschel-Bulkley denklemi ile plastik viskoziteyi belirlemede denklem (2.3)' de yaşanan sıkıntı bu denklemi Bingham Modeline benzetme yoluna gidilerek çözülmüştür. Modifiye Bingham Modeli olarak adlandırılan bu modelde moment-deformasyon hızı ilişkisi, en küçük

kareler yöntemi kullanılarak eğrisel yapıdan doğrusal yapıya çevrilmiştir. Modifiye Bingham Modeli için plastik viskozite denklemi (2.4)' de verilmiştir. Eşik kayma gerilmesi hesabında Hershel-Bulkley Modeli ile Modifiye Bingham Modeli arasında bir fark yoktur. Sadece plastik viskozite hesabının kolaylaşması için denklem doğrusallaştırılmıştır [6].

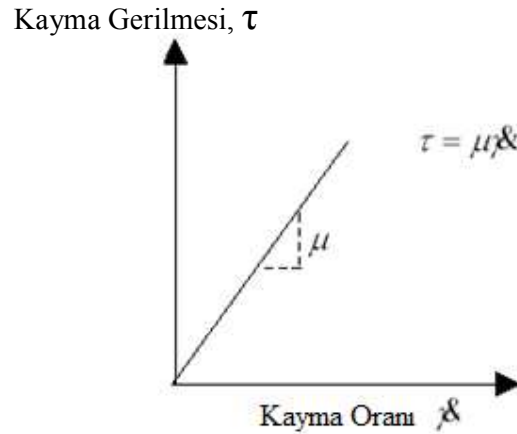
$$\eta' = 3a(b + 2)^{-1} \dot{\gamma}_{\max}^{b-1} \quad (2.4)$$

η' : Plastik viskozite

a, b : Malzeme ve aparat katsayıları

$\dot{\gamma}_{\max}$: Deformasyon hızının ulaştığı en büyük değer

Newtonyen sıvılarda eşik kayma gerilmesi sıfırdır. Kendiliğinden yerleşebilirlik için eşik kayma gerilmesinin mümkün olduğunca sıfıra yakın olması amaçlandığından newtoniyen sıvı modeli KYB için daha uygundur (Şekil 2.2).



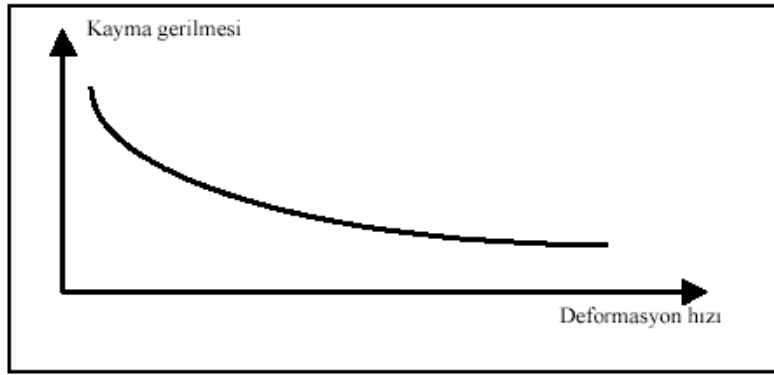
Şekil 2.2 Newtonyen Sıvı Modeli

Optimum viskozitenin belirlenmesi, malzeme parametreleri ve karışım oranlarıyla yakından ilişkilidir. Optimum viskozitenin altına inilirse betonun stabilitesi bozulacak ve ayrışma başlayacağından beton homojenliğini yitirecektir. Bu durumda iri agregalar hamurdan ayrılarak kümelenir ve pompalama sırasında tıkanma meydana gelir. Optimum viskozitenin üstüne çıkılırsa betonun kıvamı aşırı artacağından yerleştirmede sıkıntılar yaşanır. Sıkışık hava boşluğu riski artar. Pompa betonlarında kohezif yapıdan dolayı aşırı zorlanma ve tıkanma

oluşabilir. Her iki durum da tehlikeli sonuçlar yaratmaktadır. Çözüm eşik kayma gerilmesini, karışım suyunu fazla arttırmadan akışkanlaştırıcı kullanarak azaltmaktır. Aynı zamanda ister istemez viskozitede de düşüş meydana gelir. Viskoziteyi optimum değere çekebilmek için viskozite arttırıcı malzemelerin kullanılması gerekir[2].

Kendiliğinden yerleşen betonun eşik kayma gerilmesi 20 - 40 Pa ve plastik viskozitesi 2.4-2.6 Pa.sn aralığında değişir. Geleneksel betonun eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitesi ise kıvamına göre sırasıyla 60 - 7570 Pa ile 5 - 800 Pa.sn arasında değişmektedir [7].

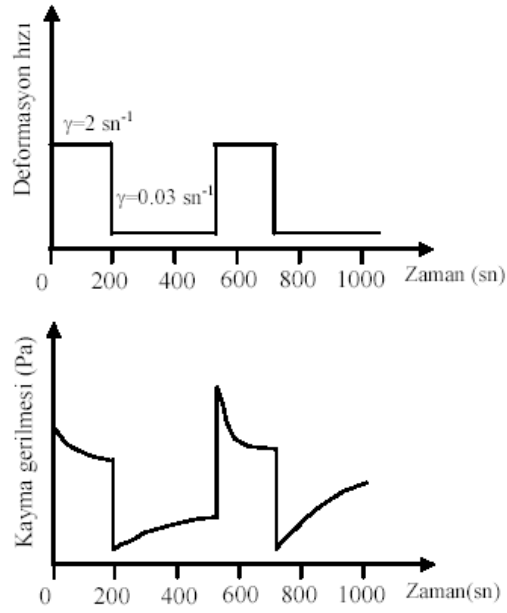
KYB taze halde aynı zamanda psödoplastik davranış gösterir. Psödoplastik (yalancı plastik) sıvılar düşük deformasyon hızlarında yüksek, yüksek deformasyon hızlarında ise düşük viskoziteye sahiptir (Şekil 2.3). KYB'nin tiksotropik ve psödoplastik davranışı durgun halde ayrışmasını engeller. Bu davranışlardan dolayı, geleneksel betona kıyasla daha kolay pompalanır[2].



Şekil 2.3 KYB'nin Psödoplastik (Yalancı Plastik) Davranışı

Çimento hamurunun viskozitesi daha önce maruz kaldığı kayma gerilmesinden etkilenir. Karıştırma süresi arttıkça plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi azalır.

KYB'nin tiksotropik davranışı sebebiyle yüksek deformasyon hızlarında zamanla kayma gerilmesi azalmakta, düşük deformasyon hızlarında, yani hemen hemen durgun konumda iken kayma gerilmesi tekrar artmaktadır (Şekil 2.4). Bu olaya **toparlanma** denilmektedir. Yüksek deformasyon hızlarında moleküller birbirinden ayrılarak yağlama etkisi yaratmakta, düşük deformasyon hızlarında ise tekrar kümelenerek akışa karşı direnç kazanmaktadır[2].



Şekil 2 .4 KYB'nin Tiksotropik Davranışı

EFNARC Komitesi (2005), KYB' nin yerleştirilmesi ile ilgili şu özellikleri vermiştir: Üç metre yükseklikten bırakılsa bile ayrışma yaratmaksızın yerleştirilebilir. Yatayda beş metre, düşeyde on metre mesafeye kadar akışına izin verilebilir.[4]

KYB' nin karıştırma süresi normal betona kıyasla iki - üç kat arttırılmalıdır. Bunun sebebi akışkanlaştırıcının performansına ve KYB' nin reolojisine bağlanmaktadır. Kimyasal katkının ilave zamanlaması da önem taşımaktadır. Punkki vd. (1996), akışkanlaştırıcı ve karışım suyu ilavesinin geciktirilmesinin, yüksek çökme değerine (20 cm civarı) sahip akıcı kıvamlı betonlarda işlenebilirlik kaybına etkisini incelemişlerdir. Katkı ve karışım suyu ilavesi geciktirildikçe işlenebilirlik kaybının azaldığını gözlemlemişlerdir. Katkı ilavesinin geciktirilmesi, hidrasyonla çimento taneleri üzerinde oluşan yeni yüzeylerin katkı ihtiyacının karşılanması açısından olumlu bir yöntemdir[2].

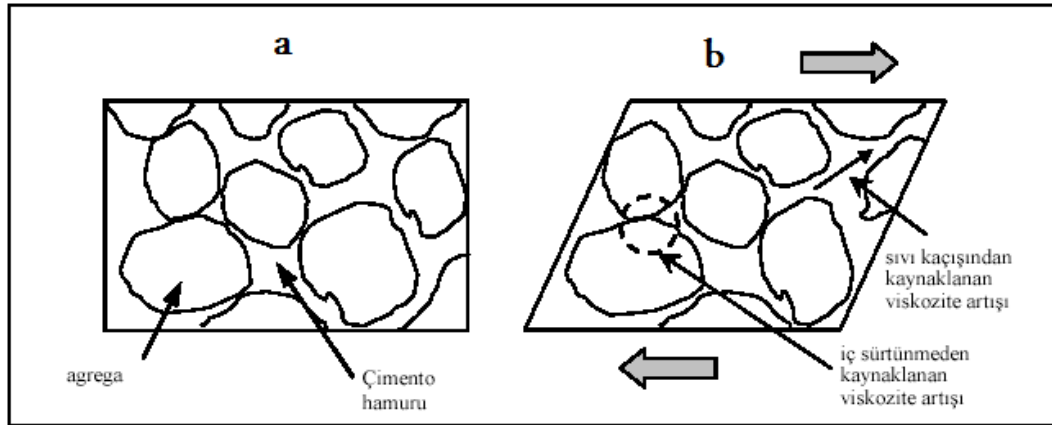
Ortam sıcaklığının da KYB reolojisi üzerinde etkileri vardır.

Kendiliğinden yerleşen betonun özel reolojik gereksinimlerinden dolayı hem hidrasyon ısısından dolayı çimento miktarını düzenlemek hem de viskoziteyi düzenleyerek ve akışkanlığı sağlayarak işlenebilirliği düzenlemek için ince (dolgu) malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle kırmataş tozu, uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş cam tozu gibi malzemelerdir. Günümüzde KYB üzerine yapılan çalışmalarda bu malzemelerden başka özellikle atık durumdaki malzemelerin ince malzeme olarak KYB içerisinde kullanımları araştırılmaktadır. Bu malzemelerden bazıları da öğütülmüş tuğla tozu ve

mermer tozudur. KYB’ da kullanılacak olan ince malzemelerde aranan en önemli özelliklerden biri en büyük tane çapı olup genellikle 0.125 mm’ nin altında olması istenir. Bu durumda KYB üretiminde kullanılan kum ve agrega içerisinde bulunabilecek 0.125 mm altındaki ince maddeler de ince malzeme içerisine dahil edilmelidir. İnce malzemelerin optimum kullanım miktarları bu maddelerin mineralojik kökenine ve mekanik performansına bağlıdır [8]. KYB üretiminde bu gibi mineral katkıların kullanımından 4. bölümde ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Malzeme Bileşenlerinin Seçimi

KYB’ nin bileşenlerinin seçimi, geleneksel betona göre KYB’ den beklenen performanstan ötürü daha fazla tecrübe ve bilgi gerektirir. Örneğin, akıcı özelliğe sahip kendiliğinden yerleşen beton, göreceli olarak düşük eşik kayma değerine sahip olmalı, fakat aynı zamanda sertleşme başlayıncaya kadar terlemeye ve ayrılmaya yeterince dirençli olmalıdır. İri agrega, kum ve ince malzeme tanecikleri arasındaki sürtünme, akışa karşı direnci arttırdığı için taze betonun akış hızı ve şekil değiştirme yeteneği KYB’ ye göre düşüktür (Şekil 2.5).



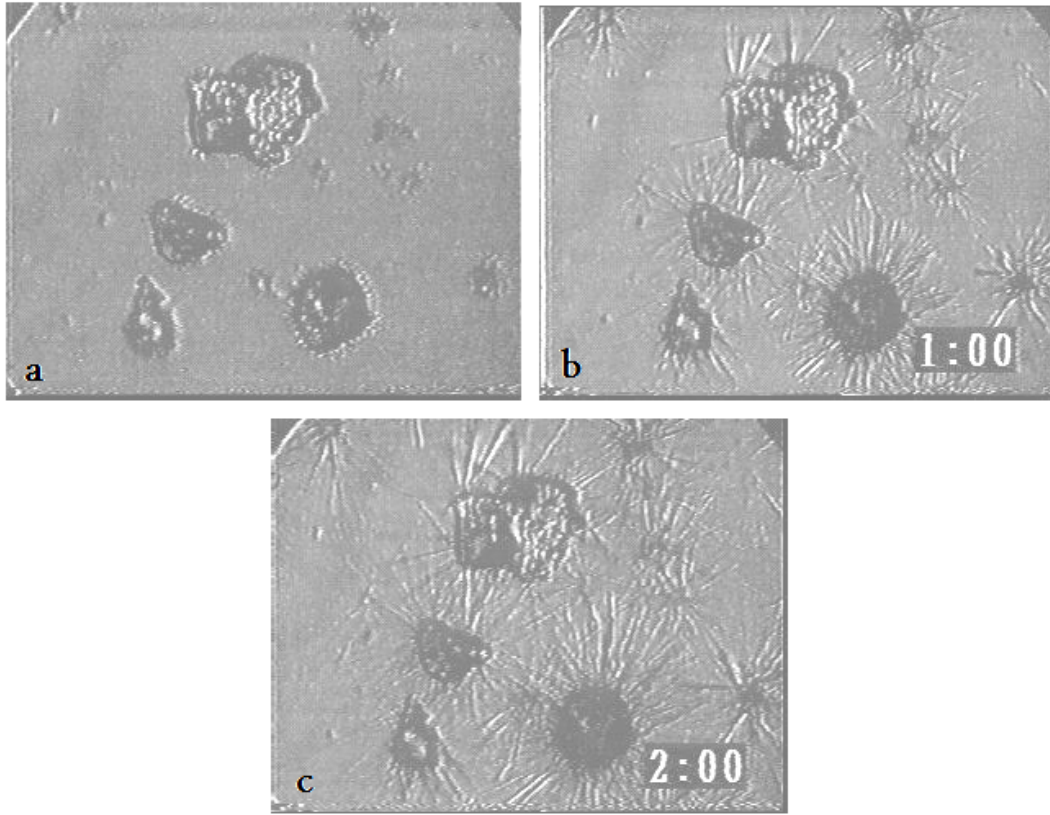
Şekil 2.5 a: hareketsiz taze beton b: Kayma gerilmesi altında teze beton

Kendiliğinden yerleşen betonlarda akıcılık, betonun su miktarını attırmaksızın akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak sağlanır. Betonun yeterli ayrışma direncine sahip olması ise viskozite artırıcı katkı kullanılması veya karışımda kullanılan çimento veya mineral katkı miktarının artırılması, böylelikle su/çimento oranının azaltılması yolu ile sağlanabilir. Ayrışma direncinin artırılması için bazen, her iki yöntem de kullanılabilir [9].

Aşağıda KYB üretiminde kullanılan malzemelerin seçimi ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

2.2.1. Çimento Seçimi

Çimento tipi açısından dayanım ve dayanıklılık kriterleri dikkate alınarak seçim yapılmalıdır. Özellikle çimentonun C_3A oranı % 10'un üzerindeyse, kullanılmaması EFNARC Komitesi (2002), tarafından tavsiye edilmektedir. Yüksek C_3A oranı, hızlı etrenjit oluşumu ve hidratasyon ısısı artışından kaynaklanan su buharlaşması nedenleriyle işlenebilirlik kaybına sebep olacağından, taşıma ve yerleştirme sırasında betonun kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini hızla kaybetmesine sebep olur (Şekil 2.6). Kimyasal etkiler, özellikle sülfat saldırısı açısından da C_3A 'sı fazla çimento kullanmak sakıncalıdır[3].



Şekil 2.6 Japonya Hiroşima Üniversitesi Beton Teknolojisi Laboratuvarlarında Çimentonun C_3A Bileşeni Ayrıştırılıp, Sulu Çözelti İçinde Hidratasyonu 2 Saatlik Periyot İçerisinde Gözlemlenmiştir. a, başlangıç anı. b ve c'de 1. Ve 2. Saat Sonlarında Etrenjit Oluşumunun İşlenebilirlik Üzerindeki Olumsuz Etkisi Açıkça Görülmektedir[2].

C_3A 'sı düşük çimentolar kullanarak akışkanlaştırıcıdan alınacak verim artırılabilir. Ancak diğer yandan C_3A oranı yüksek çimento kullanımının az da olsa erken dayanımı artırıcı etki gösterdiği de unutulmamalıdır. Çimento miktarı arttıkça plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi artacağından yüksek çimento dozajlarında akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı artar[2].

Kendiliğinden yerleşen betonda çimento dozajının belirlenmesinde temel kriter dayanım sınıfıdır. Pozolanik filler kullanılması halinde, göreceli olarak daha düşük çimento dozajları yeterli olacaktır. Dayanım ve dayanıklılık açısından çimento dozajının 350 - 450 kg/m³ arasında seçilmesi tavsiye edilmektedir. 500 kg/m³'ün üstünde kullanımı rötreyi arttıracığından tavsiye edilmez (Ancak önerilmeli yüksek dayanımlı perfabrike beton sektöründe kullanılması tavsiye edilebilir.). 350 kg/m³'ün altında kullanımı ise, ilave fillerle veya viskozite arttırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması halinde uygundur. Eğer viskozite ayarlayıcı kimyasal katkı kullanılmıyorsa, kendiliğinden yerleşen betonda toplam toz madde miktarı hiçbir zaman 500 kg/m³'ün altına inmemelidir. Çimento dozajının bu miktarın altında olması durumunda, ilave toz katkıları kullanılabilir [4].

Ayrıca çevreyi korumak ve endüstri atıklarını değerlendirmek açısından da mümkün olan en düşük çimento dozajı yanında en fazla miktarda taş tozu, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb. toz malzemeyi kullanmak gerekmektedir.

2.2.2 Agregası Seçimi

Agregaların özel ve genel kullanımı için tanımlanan maksimum boyut 20mm ile sınırlandırılmıştır[4]. Ancak kütle betonu gibi özel durumlarda bu sınır 40mm'ye kadar çıkmıştır. Pudra içeriğinde ise kullanılan tanelerin büyüklüğü 0,125mm'den küçük olmalıdır[4]. Genel olarak kübik veya küre şekilli agregalar tercih edilmelidir. Uzun silindirik ve yassı şekilli agregalar işlenebilirliği olumsuz etkileyebilir[2].

Sabit kalitede KYB üretebilmek için, kullanılan agreganın nem oranının iyi belirlenmesi gereklidir. KYB, geleneksel betona göre agreganın gradasyon ve nem oranı değişiklikleri karşısında daha hassastır. Kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri, agrega nem içeriği değişiminden etkileneceğinden agreganın nem içeriği mutlaka belirlenmeli ve tasarıma yansıtılmalıdır. Agregası yüzey neminden kaynaklanan su fazlalığının olumsuz etkisi geleneksel betonda emniyet paylarıyla engellenebilir. Örneğin, çimento dozajını bir miktar yükseltmek tasarımda güvenlik sağlamak için yeterli olacaktır. Fakat kendiliğinden yerleşen betonda su fazlalığı karışımın reolojik özelliklerini kaybetmesine sebep olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton bu açıdan bakıldığında agrega nemine çok hassastır. Özellikle su emmesi yüksek olan; uçucu kül agregası, pomza kumu, vb. malzemeler kullanılması halinde tasarımda ek önlemler alınmalıdır. Bu durum hafif KYB üretiminde de en önemli sorundur. Agregası nemi laboratuvar ortamında tespit edilerek deneysel çalışmalarda kolaylıkla dikkate alınabilmektedir. Kendiliğinden yerleşen beton üreten santrallerde de bu işlemin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir[2].

Mineralojik köken açısından agregalar, geleneksel betonda olduğu gibi kullanılabilir.

Agrega açısından taze betonun kendiliğinden yerleşebilirliğini etkileyen en önemli parametre iri agreg/kum oranıdır. İçsel sürtünme katsayısını azaltmak için bu oran mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır. Geleneksel betona göre daha çok kum ve daha az iri agreg kullanımı donatılar arasında geçiş yeteneğini de artırır. Ancak iri agreg oranının azalması basınç dayanımını da bir miktar azaltır[2].

Kendiliğinden yerleşen betonda kullanılacak agreg gradasyonu mümkün olduğunca ince seçilmelidir. EFNARC Komitesi' ne göre, kesikli gradasyon iç sürtünmeyi azaltıp, akışı kolaylaştırdığından sürekli gradasyona tercih edilmelidir[4].

2.2.3. Toz Madde (Filler) Seçimi

Toz maddeler KYB' nin pudra kısmını oluşturup boyutları 0,125mm'nin altında olan taneciklerdir. KYB' de viskoziteyi artırma amacıyla kullanılırlar. Parçacık boyutu küçüldükçe taneler arasındaki etkileşim de artar ve bu da viskozitenin (yapışkanlığın) artmasına sebep olur.

Filler kullanımı harcın agregaları daha iyi sarmasını sağlar.

Toz malzemeler için gerek mineralojik ve kimyasal köken, gerekse reaktivlik açısından bir sınıflandırma EFNARC Komitesi (2005) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre ince öğütülmüş mineral katkıları reaktivliklerine göre ikiye [4] ayrılır:

1. İnert filler (Taş tozu ve renk verici pigmentler)
2. Pozolanik ve gecikmeli hidrolik bağlayıcılık özelliklerine sahip mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vs.)

Bu tür malzemelerin kullanımından 4. bölümde ayrıntılı bir şekilde bahsedilecektir.

2.2.4. Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Seçimi

Akışkanlaştırıcı katkıları eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltırlar. Akışkanlaştırıcılar düşük S/Ç oranlarında viskoziteyi çok azaltmadan eşik kayma gerilmesini azaltmakta etkilidir [10].

Gürol (1999), polikarboksilat bazlı katkıların çimentoya etkisini şöyle açıklamaktadır. Katkı, dispersiyon etkisi ile topaklaşmayı önler, hidratasyona giren çimento miktarı artar, topaklar arasına hapsolme potansiyeli olan su molekülleri serbest kalarak işlenebilirliği artırır ve hidratasyona katılır[11].

KYB üretiminde yüksek işlenebilirlik ve ayrışma direnci gibi iki zıt koşulu birlikte sağlamak ancak akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla mümkündür. Kimyasal katkıları;

akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, hava uzaklaştırıcı, priz kontrol edici ve viskozite arttırıcı olmak üzere beş ana grupta toplanabilir.

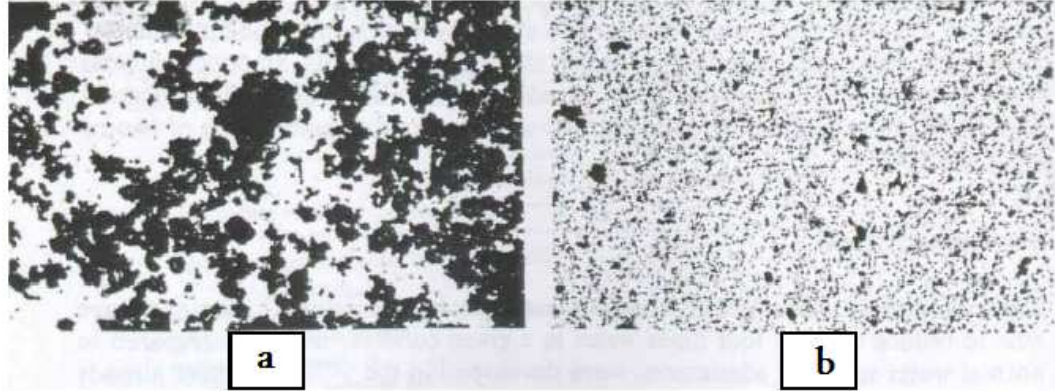
Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde yüksek oranda su azaltma yeteneği olan yeni nesil katkılar tercih edilmelidir. % 20'den fazla su azaltan katkıların kullanılması EFNARC Komitesi (2002) tarafından tavsiye edilmektedir[3].

KYB tasarımında akışkanlaştırıcılardan beklenenler üç grupta toplanabilir[12]:

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

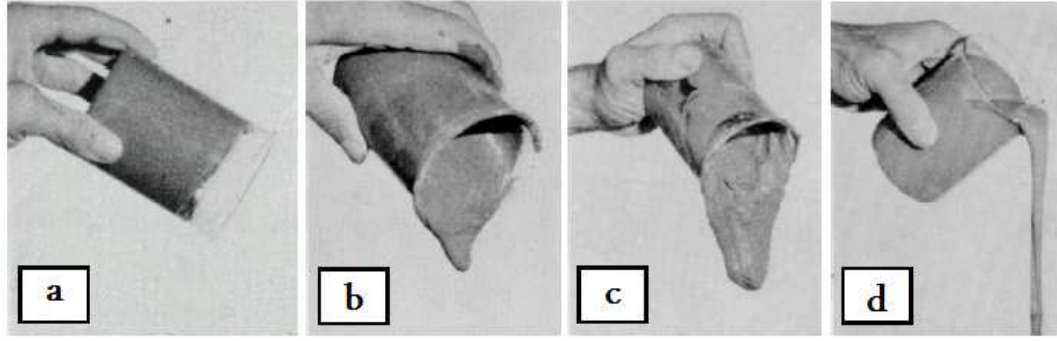
Son 30 yılda akışkanlık sağlama ve su kesme amaçlı en yaygın kullanılan kimyasal katkılar; melamin, naftalin formaldehit kondensatları, modifiye lignosulfonatlar ve suda çözülebilen sentetik polimerlerdir.

Şekil 2.7' de akışkanlaştırıcı katkısız çimento ve akışkanlaştırıcı katkılı çimento arasındaki yapısal fark görülmektedir. Siyah kısımlar çimento içindeki sıkışmış hava boşluklarıdır.



Şekil 2.7 a: akışkanlaştırıcı katkısız çimento, b: akışkanlaştırıcı katkılı çimento

Jacek Golasweski ve Januz Swabowski (2002) tarafından yapılan araştırmada, polikarboksil ester (PE) ve polikarboksil asit (PA) tipi süperakışkanlaştırıcıların, naftalin sülfat asit (NSA) süperakışkanlaştırıcılardan daha etkili olabileceğini gözlemlenmiştir[1].



Şekil 2.8 Kimyasal katkı tipinin akışkanlık artırıcı etkisi.

Şekil 2.8’ de a, b, c ve d’ de görülen tüm karışımların S/Ç oranı eşittir. a’ da hiç akışkanlaştırıcı kullanılmamış çimento hamuru görülürken, b’ de hamura % 0.4 Lignosülfonat ilavesi, c’ de % 0.8 Melamin formaldehit bazlı katkı ilavesi ve d’ de ise % 0.8 Polikarboksilat bazlı katkı ilavesiyle görülen akışkanlık fotoğraflanmıştır[2].

Akışkanlaştırıcı katkı için uygun bir çalışma dozajı aralığı mevcut olup bu aralık dışında kullanımda priz süresinde aşırı gecikme veya kısılma, erken dayanımda düşüş, kalıp alma süresinde uzama, ayrışma gibi bazı yan etkilerle karşılaşılabilir. Bu yüzden katkılar optimum dozajlarında kullanılmalıdır. Akışkanlaştırıcı katkıların su kesme oranının artırılması dayanımın artışı bir dereceye kadar sağlar, daha yüksek su kesme girişimlerinde karışım suyundaki aşırı azalma katkının etkinlik derecesine göre farklı şiddette olmak üzere taze beton reolojisini olumsuz etkileyerek sıkıştırma enerjisi ihtiyacını arttırabilir[13].

2.2.5. Viskozite Arttırıcı Kimyasal Katkı (VAK) Seçimi

Durgun halde taze beton içerisinde KYB ’yi oluşturan malzemelerden, yoğunluğu büyük olanlar çökmeye, küçük olanlar da karışım içerisinde yükselmeye başlar. Yani taze betonda su ve iri agrega hareket halindedir. Hamur stabilitesinin korunması için viskozite arttırıcı katkı kullanılması gerekebilir.

Bu katkı homojenliği arttırmaya yardım ederken segregasyon eğilimini azaltır[4].

2.2.6. Karışım Suyu

EFNARC’ ın karışım suyu için önerdiği standart EN1008’dir. Betonda kullanılabilecek en iyi karışım suyu içme olup kullanılacak karışım suyunda klor, sülfat, alkali içeriği, toplam katı madde miktarı ve pH düzeyi sınırlandırılmıştır. Karışım suyunda [14]:

1. pH $\geq$ 7 olmalıdır.
2. Sülfatlar en fazla 200mg/lt (sülfat konsantrasyonu %2'yi geçmemeli) ve alkali-silika reaksiyonuna karşı önlem alınmadıkça alkali miktarı 1500mg/lt'yi geçmemelidir.
3. Şeker, fosfat, kurşun ve çinko miktarı 100, nitrat miktarı 500mg/lt ile sınırlandırılmıştır. Bunların varlığında priz süresine etkileri belirlenmelidir.
4. Klorür içeriği donatılı betonlarda 1000 ve donatısız betonlarda 4500mg/lt ile sınırlandırılmıştır.
5. Organik madde miktarı, NaOH eklendiğinde ortaya çıkan renk ile tayin edilir. Belirlenen renk sarıya dönük kahverengi veya daha açık olmalıdır.
6. Askıdaki madde miktarı (kil gibi) 4ml 'den az olmalıdır.

3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN DİZAYNI VE KALİTE KONTROLÜNDE KULLANILAN DENEY METOTLARI

Kendiliğinden Yerleşen Betonun tasarımı ve kalite kontrolü için EFNARC' ın belirlediği kriterler mevcuttur. KYB bu kriterlere uygun olarak üretilmeli ve denetlenmelidir.

Bu bölümde KYB' nin tasarım ve kalite kontrol deneylerine değinilecektir.

3.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tasarımı

Kendiliğinden yerleşen betondaki en önemli özellik yüksek akışkanlık özelliğidir. Akışkanlığın arttırılması yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımıyla sağlanmaktadır. Akışkanlaştırıcı dozajının yüksek olması taze betonun viskozitesini düşürür. Dolayısıyla taze betonun karışım suyundaki ve agrega gradasyonundaki değişkenliklere hassasiyeti artmaktadır[2].

EFNARC (2005)'a göre KYB tasarım oranlarının ve miktarlarının belirlenmesinde hacimsel oranlar daha önemlidir. EFNARC (2005)' ın önerdiği baslıca tasarım esasları ve deney sınır değerleri ile çözüm yolları [4] aşağıda belirtilmiştir.

- Su/pudra oranı hacimce 0, 85 - 1, 10 Lt/m³ aralığında olmalıdır.
- Toplam pudra (toz) miktarı m³ 'de 380 ile 600 kg arasında olmalıdır.
- iri agrega miktarı 750-1000 kg/m³ veya hacim olarak 270-360 lt/m³ olmalıdır.
- Su/çimento oranı EN 206'nın gereksinimlerine göre belirlenmeli ve toplam su içeriği 150-210 kg/m³ (lt/m³)'ü aşmamalıdır.
- Kum miktarı diğer malzeme hacimlerine göre ayarlanmalıdır. Genelde ise toplam agrega miktarının ağırlıkça %48-55'i kadar olmalıdır.
- Çimento hamuru 300-380 lt/m³ olmalıdır.

Kendiliğinden yerleşen betonda viskoziteyi düzenlemek için kimyasal katkılar yanında ilave edilen mineral katkılar yüzey alanlarının çok geniş olmasından dolayı su miktarını oldukça etkilemektedirler. Bu nedenle EFRNARC komitesi, kendiliğinden yerleşen beton üretimine başlamadan önce kullanılan ince malzeme ile çimentonun birlikte kullanıldığında yüzey alanlarını kaplayacak olan su miktarının belirlenmesi önerilmektedir. Bunun için de belirli oranda çimento ve ince malzeme alınır. Farklı β_p veya su/ toz oranlarında ve farklı kimyasal katkı oranları kullanılarak üretilen harçlar üzerinde mini çökme-yayılma ve mini V- kutusu testleri gerçekleştirilir. Buna göre çökmede-yayılma değerinin 24 – 26 cm arasında; V-kutusu

deney sonuçlarının da 7 ile 11 sn arasında kalması gereklidir. Bu sınır değerler arasında kalan harçların oranları esas alınarak beton üretimine geçilebilir [8].

Tablo 3.1’ de KYB’ de kullanılan deneylerin sınır değerleri verilmiştir [3].

Tablo 3.1 EFNARC (2002) 'a göre tavsiye edilen KYB deneyleri ve sınır değerleri.

	Deney	Birim	Değişim Aralığı	
			Min.	Max.
1	Çökme-Yayılma (Abrams Konisi)	mm	650	800
2	T500 Çökme-Yayılma	s	2	5
3	J-Halkası	mm	0	10
4	V-Hunisi	s	6	12
5	Zaman Artış, V-Hunisi	s	0	+3
6	L-Kutusu	h2/h1	0,8	1,0
7	U-Kutusu	mm	0	30
8	Kolona Yerleştirme	%	90	100
9	GMT	%	0	15
10	Orimet	s	0	5

Kendiliğinden yerleşen beton tasarım yöntemleri, genellikle hamur ve harç üzerinde ön çalışma gerektirmektedir.

Damone ve Jin (1999)’e göre KYB’ de harç deneylerinin şu avantajları vardır [15];

- KYB, geleneksel betona göre daha az iri agregâ içerdiğinden (hacimce % 30) harç karakteristikleri baskındır.
- KYB karışım tasarımının bir kısmını oluşturur.
- Harçta deney yapmak daha kolaydır.

Uygun bir KYB ve KYH karışım oranı ayarlamak için aşağıdaki hususlara dikkat etmek gerekir:

- Çimento ve mineral katkı oranı iyi ayarlanmalı, su/toz oranı sınırlanmalı, uygun tip bir süper akışkanlaştırıcı ve gerekiyorsa viskozite ayarlayan bir katkı kullanılmalıdır. Böylece çimento ve mineral katkı hamurunun akıcılığı ve viskozitesi ayarlanmış ve dengelenmiş olur ki, bu da KYB’ da aranan doldurma yeteneği, engellerin arasından geçme yeteneği ve ayrılmaya karşı direnç gibi şartları sağlamaktadır [16].

- Dayanım gibi sıcaklık artışını ve termal büzülme çatlaklarını kontrol etmek için toz muhtevası, çimentoyla birlikte kabul edilebilir bir düzeyde ve büyük bir oranda mineral (tip1-2) katkılarından oluşabilir [16].
- Çimento ve mineral katkı hamuru agregaları destekleyen önemli bir araçtır; bu yüzden tüm agrega yüzeylerini yeterince kaplamaları için, hacmi agregadaki boşluk hacminden çok daha fazla olmalıdır. Bu da KYB’ un akma yeteneğini artırır ve agregaların birbirine sürtünmesini azaltır [16].
- Kaba agregaların tüm yüzeylerinin harç tarafından tamamen sarılması amacıyla, karışımdaki kaba agrega/ince agrega oranı azaltılmalıdır. Bu, betonun dar açıklıklar veya sık donatılar boyunca akması sırasında agregaların birbirine kenetlenmesini ve topaklaşmasını azaltır ve böylece KYB’ un, engellerin arasından geçme yeteneğini artırır [16].

Aşağıda iyi bir KYB tasarımı için alınabilecek önlemler tablo halinde verilmiştir [2].

Tablo 3.2 KYB Tasarımı İçin Alınabilecek Önlemler

Şekil Değiştirme Yeteneği	İyi Stabilité	Düşük Bloke Olma Riski
1. Hamurun şekil değiştirme yeteneği arttırılmalı: * Akışkanlaştırıcı kullan. * Su/Toz oranını arttır. 2. İç sürtünme azaltılmalı: * İri agrega hacmini azalt (hamur hacmini arttır) * Sürekli gradasyonlu toz kullan	1. Katıların ayrışmasını engellenmeli: * Agrega miktarını sınırla * Dmaks’ı azalt * kohezyonu arttır: - Su/Toz oranını azalt - VAK kullan 2. Terleme azaltılmalı: * Karışım suyunu azalt * Su/Toz oranını azalt * Yüksek yüzey alanlı toz kullan * VAK kullan	1. Akış sırasında ayrışmayı engellenmeli: * Düşük Su/Toz oranı * VAK kullan 2. Donatılar arası serbest açıklık: * düşük iri agrega hacmi * düşük Dmaks

Japon İnşaat Mühendisleri Birliği tasarım yöntemlerini üç ana grupta toplamıştır:

1. Toz tipi metodu
2. Stabilizatör metodu
3. Kombinasyon metodu.

3.1.1. Toz Tipi Metodu

Bu yöntem viskoziteyi inert veya puzolanik filler ile arttırma ilkesine dayanır. Temel kural olarak toz hacmi, toplam hacmin % 36'sından az olmamalıdır. Çimento hamurunun hacmi, eklenen toz malzemeler ile arttırılarak taze betonun stabilitesinin korunması amaçlanmıştır. Toz tipi metodunun en önemli dezavantajı, kullanılacak filler tipinin ve gradasyonunun değişkenliği ile bu durumun yaratacağı kalite dalgalanmalarıdır. Toz maddenin çimento ile homojen karışması için iyi bir karıştırıcı ve uzun süreli karıştırma gerekebilir[2].

3.1.2. Stabilizör Tipi Metodu

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde viskozite arttırmak amacıyla toz madde dışında kimyasal katkıları da kullanılabilir. Bu katılara viskozite düzenleyici veya stabilizatör denilmektedir. Faydalarının yanında dozajının iyi ayarlanamaması halinde, pek çok yan etkisi bulunduğundan bu katkıların kullanımları henüz sınırlıdır. Hamur hacminin az olması pompalama sırasında tıkanmaya sebep olabilir. Öte yandan kalıp yüzeylerinde hamurun yetersizliği nedeniyle sıkışık hava boşluğu kalma ihtimali yüksektir [2].

3.1.3. Kombinasyon metodu

Toz ve stabilizatör tipi yöntemlerin olumsuz yönlerinin düzeltilmesine yönelik olarak, her iki yöntemin bir arada kullanıldığı metoda Kombinasyon Metodu adı verilir. Tasarımda kendiliğinden yerleşebilme şartı olarak optimum viskozite ve düşük eşik kayma gerilmesi aranır[2].

3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Deney Yöntemleri

Taze halde iken KYB' nin doldurma yeteneği ve stabilitesi, dört karakteristik unsurla tanımlanabilir. Her karakteristik unsur da bir veya daha fazla test metoduyla belirlenebilir (Tablo 3.3)[4].

Tablo 3.3 EFNARC (2005)’a Göre KYB’nin Karakteristik Özellikleri Ve Bu Özellikleri Ölçen Deneyler

Karakteristik özellik	Tercih edilen deney metodu
Yayılma / doldurma yeteneği	Çökme-yayılma testi
Viskozite	T ₅₀₀ çökme-yayılma veya V-funnel testi
Geçiş yeteneği	L-kutusu testi
Ayrışma	Ayrışma direnci testi

- Doldurma yeteneği: Betonun kendi ağırlığı ile kalıptaki bütün boşluklara akabilme yeteneğidir[17].
- Ayrışma direnci: Karıştırma, taşıma ve döküm işlemleri sırasında betonun homojenliğini koruyarak ince taneli askıda madde (süspansiyon) olarak kalabilme yeteneğidir. L-kutusu bu özelliği ölçmek için de kullanılabilir [17].
- Engellerin arasından geçme yeteneği: Betonun, kalıpta sık donatılar vb. dar kesitlerin oluşturduğu engeller arasından, agrega tanelerinin tıkanma yapmaksızın geçebilme yeteneğidir. Bu özellik, V hunisi, U ve L şekilli deney aletleri kullanılarak ölçülebilir[17].
- Viskozite ve kayma eşiği: bu gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda viskozimetre aleti ile ölçülebilir. Bu yöntemde farklı dönme hızlarında (γ) oluşan kayma dirençleri (τ) dönme momentleriyle ölçülmekte ve kayma direnci ile dönme hızı arasında elde edilen doğrusal ilişkiden kayma eşiği (τ_0) ve viskozite (η) parametreleri hesaplanmaktadır (Denklem 3.1)[17].

$$\tau = \tau_0 + \eta^* \gamma \quad (3.1)$$

EFNARC (2005)’de, KYB’ nin taze özelliklerini ölçmek amacıyla önerilen bütün deney yöntemlerinin listesi aşağıda verilmiştir (Tablo 3.4)[4].

Tablo 3.4 KYB Deney Metotları ve Ölçtükleri Değerler

Karakteristik	Test Metodu	Ölçülen Değer
Doldurma yeteneği	Çökme-yayılma	Toplam yayılım
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite/yayılma	T ₅₀₀	Akma zamanı
	V-hunisi	Akma zamanı
	O-funnel	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Geçiş yeteneği	L-kutusu	Geçiş oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Yükseklik adımı, toplam akma
	Kajima kutusu	Görsel geçiş yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek Ayrışma	Ayrışma Oranı
	Kolona Yerleştirme	Ayrışma oranı

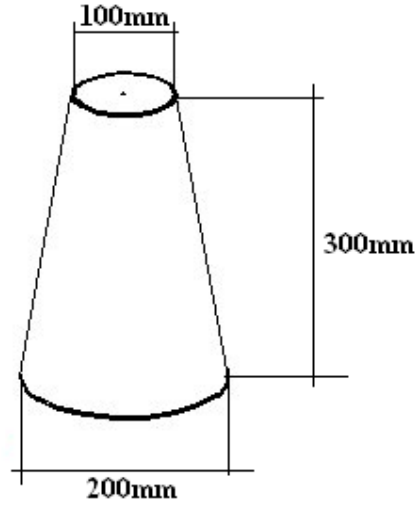
Aşağıda bu deneylerden en çok kullanılanlar açıklanacaktır.

3.2.1. Çökme-Yayılma ve T₅₀₀ Zamanı Deneyi

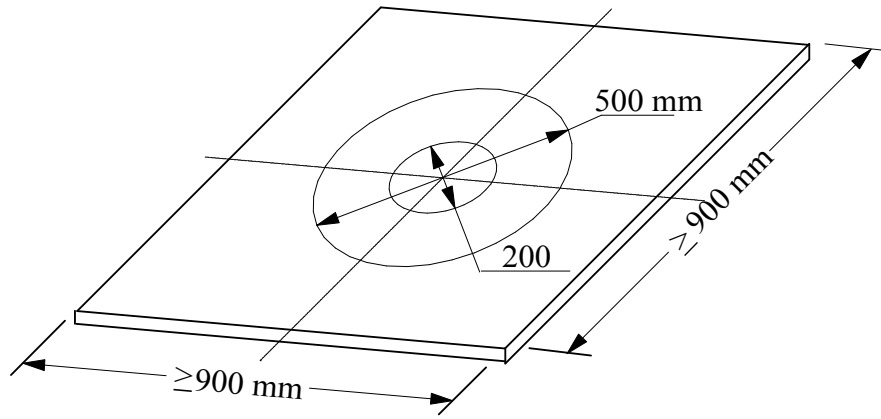
Çökme-yayılma deneyi, taze haldeki kendiliğinden yerleşen betonun, yayılma yeteneğini ve yayılım oranını belirler. Sonuçlar kendiliğinden yerleşen betonun doldurma yeteneğiyle ilgili bilgi verir. T₅₀₀ deneyi ise akma hızını ölçer ve taze harcın viskozitesiyle ilgili bilgi verir. Bu testlerin kullanımı maksimum agrega çapı 40mm'yi geçtiğinde uygun değildir [4].

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 'de çökme-yayılma deneyinde kullanılan aparatlar görülmektedir.

Kendiliğinden yerleşen harçlar için ise mini çökme-yayılma hunisi kullanılır. Bu deneyin yapılışına “Deneysel Çalışmalar” bölümünde değinilecektir.



Şekil 3.1 Yayılma Deneyi Hunisi



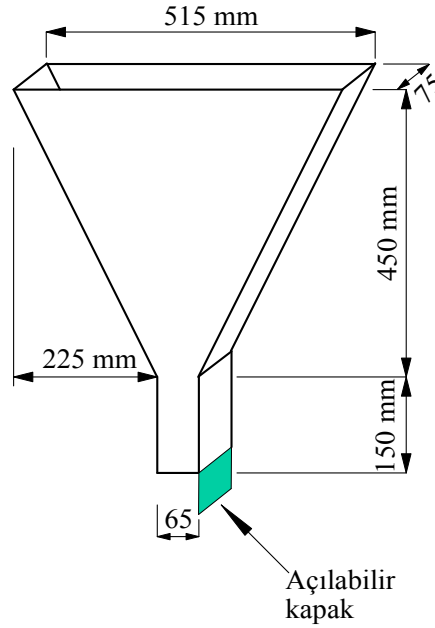
Şekil 3.2 Yayılma Tablasının Boyutları

Çökme-yayılma deneyinin yapılışı şöyle özetlenebilir: Kesik koni şeklindeki standart çökme hunisi (EN 12350-2) yatay yüzeydeki yayılma tablasının merkezine yerleştirilir ve betonla doldurulur. KYB’ de sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadığı için, standart şişleme yapılmaz ve huni bir kap vasıtasıyla, beton serbest düşürülerek doldurulur. Huninin hidrostatik basınç etkisiyle yukarı kalkmasını ve betonun sızmasını engellemek için doldurma sırasında huniyi iyice bastırmak gerekir. Huni, doldurulduktan sonra (30 s’ den daha fazla beklemeden) yukarı kaldırılarak betonun akmasını tamamlaması beklenir. Viskozitesi yüksek karışımlarda akmanın tamamlanması için birkaç dakika beklemek gerekebilir. Yayılma durunca birbirine dik iki çap ölçülerek deney tamamlanır. Bu çaplar arasındaki fark 5 cm’ den fazla ise deney

tekrarlanmalıdır. Yayılma deneyinde, betonun çökerek akma hareketini devam ettirmesi, eşik kayma gerilmesi değerini aşmasına bağlıdır. Betonun eşik kayma gerilmesi ne kadar düşükse, beton kendi ağırlığı ile o kadar çok çöküp yayılacaktır ve eşik kayma gerilmesiyle kendi ağırlığının yarattığı ve akma süresince giderek düşen gerilme eşitlenince yayılma duracaktır[18].

Yayılma çapının 500mm' ye ulaştığı an T_{500} anıdır.

3.2.2. V-Hunisi Deneyi



Şekil 3.3 V-Hunisi KYB için

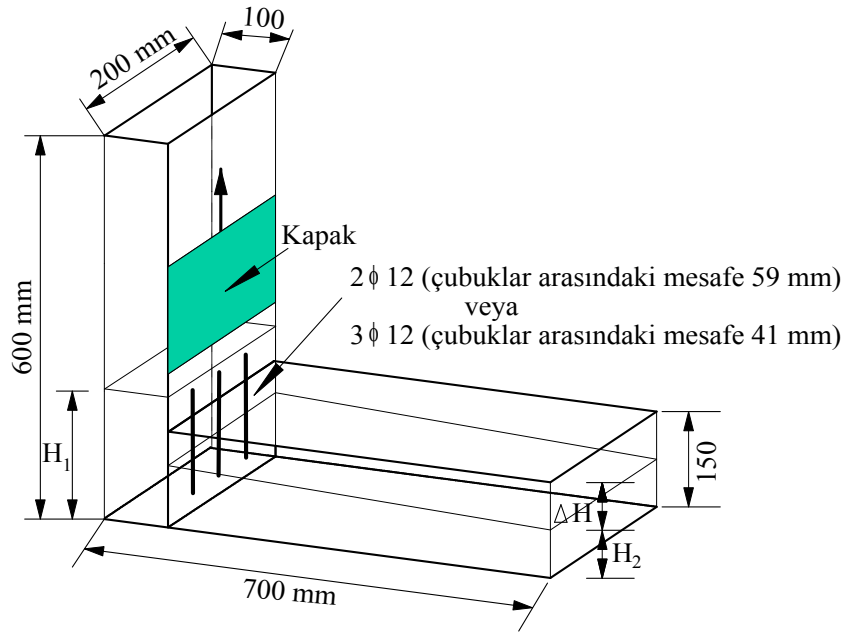
Viskoziteyi ve doldurma yeteneğini ölçmek için kullanılır. Bu deney, betonun huni içerisinde aktığı sürenin belirlenmesi ile yapılır (Şekil 3.3). Deneyin yapılış sırasında beton akıyorsa yani tıkanma varsa, bunun iki nedeni olabilir; eşik kayma gerilmesi betonun ağırlığının yarattığı gerilmeden büyüktür. Bir başka tıkanma sebebi de betonun yeterli stabiliteye sahip olmaması durumunda ortaya çıkan ayrışma ile agrega tanelerinin çıkış ağzında birikerek kenetlenme yarattığı tıkanmadır. Bu yüzden V kutusu deneyi ayrışma ile ilgili gözlemsel sonuçlar elde edilebilecek bir deneydir [18].

Kendiliğinden yerleşen harçlar için bu deney mini V-hunisi ile yapılır. Bu deneyin yapılışına daha sonra değinilecektir.

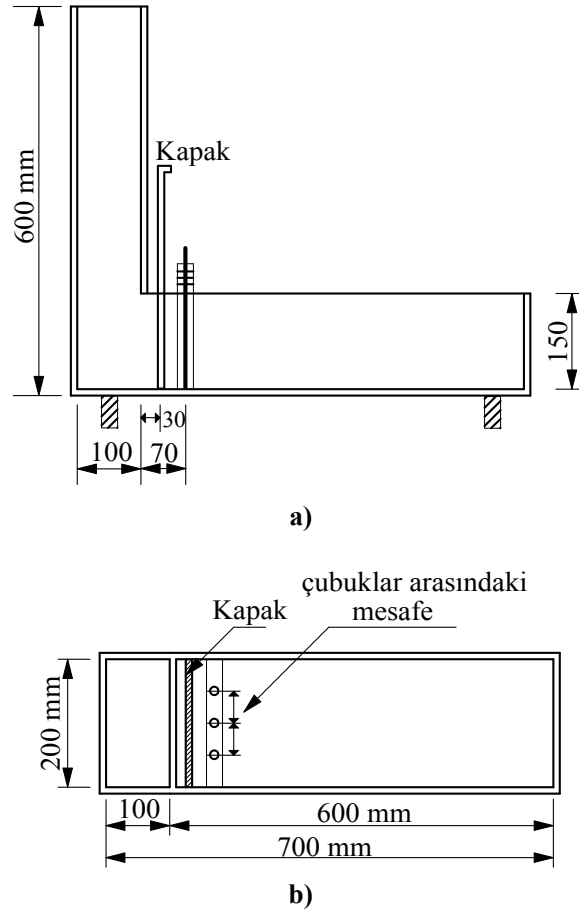
3.2.3. L-Kutusu Deneyi

Betonun kalıpta donatılar arasından veya dar kesitlerden geçmede etkili olup olmayacağını belirleyen, bir başka deyişle betonun geçiş yeteneğini ölçen deneydir(Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).

Yatay ve düşey prizmalar arasındaki geçiş kesitinde belirli aralıklarda düşey çelik çubuklar mevcuttur. Düşey kısım hareketli bir ayırıcı yardımıyla kapatılmışken taze betonla doldurulur. Ayırıcı kaldırılır ve beton, donatılar arasından geçerek yatay prizmayı doldurmaya baslar. Hareket durduğunda donatıların basında ve yatay kalıp ucundaki beton yükseklikleri ölçülür. Bu yükseklikler arası oran ($PA=H_2/H_1$) hesaplanır. Bu değer L-kutusu oranı (bloklanma oranı) olarak adlandırılır. L-kutusu oranı su gibi çok akışkan bir malzemede 1'e eşit olur[2].



Şekil 3.4 L-Kutusu Genel Görünüm



Şekil 3.5 Tipik Bir L-Kutusunun Boyutları. a) yandan görünüş,
b) üstten görünüş

3.2.4. J-Halkası Deneyi

Aparat 30 cm çaplı halkaya sabit aralıkta dikey çelik çubuklar bağlanmasıyla yapılmıştır. Bu çubuklar donatıları temsil etmektedir. Çubuklar arası açıklık, kullanılacak betonun maksimum agregâ çapının 3 katından az olmamalıdır. Yayılma deneyi yapılırken J-halkası da şekil 3.6’ da görüldüğü gibi yerleştirilir. Akma sonrası merkez ve halkanın hemen dışındaki beton yükseklikleri ölçülür ve bu yükseklik farkına göre geçiş yeteneği belirlenir[18].



Şekil 3.6 J-Halkası Deneyi

3.2.5. Elek Ayırma Direnci Testi



Şekil 3.7 Elek Ayırma Deneyi

KYB' nin ayrışmaya karşı direncini belirlemek amacıyla yapılır. Elek ayırma direnci deneyi, KSB' un ayrışmaya karşı direncini belirlemek için yapılır. Numune haznesine ($10 \pm 0,5$) litre beton yerleştirilir ve kapağı kapatılır (Şekil 3.7). Düz bir pozisyonda ($15 \pm 0,5$) dakika sarsılmadan kalması sağlanır. Terazı sıfırlanır ve ibrenin hareket etmediği görülür. Eleğin üzerine yerleştirileceği kova teraziye yerleştirilir ve kütlesi (W_p) gram olarak kaydedilir. Sonra elek bu kova üzerine yerleştirilir ve tekrar kütle kaydedilir. Elek 5 mm kare delikli, 300 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde standarda uygun bir elek olmalıdır. 15 dakikalık periyodun sonunda numune haznesinin kapağı açılır ve betonun yüzeyi üzerinde su sızıntısı olup olmadığı

kontrol edilir. Elek ve yerleştirildiği kova terazinin üstünde olduğu halde, elekten numune haznesinin arasında (500 ± 50) mm mesafe kalacak şekilde $(4,8 \pm 0,2)$ kg'lık beton -herhangi sızan su da içerecek şekilde- aniden eleğin ortasına dökülür. Betonun elekte (120 ± 5) s kalması sağlanır ve bu sürenin sonunda elek sarsılmadan kaldırılır. Eleğin üzerinde kalan mevcut beton kütlesi (W_c) gram olarak kaydedilir. Eleğin altındaki kova, içindeki betonla birlikte tartılır ve (W_{ps}) gram olarak kaydedilir. Terazî, elek ve üstüne oturduğu kovayı alabilen, düz bir platforma sahip ve 20 gram hassasiyetli, en az 10 kg kapasiteli bir terazî olmalıdır. Bundan sonra ayrışma oranı (SR), elekten geçen numune oranı olarak aşağıdaki denklemden hesaplanır ve %1 hassasiyetle kaydedilir [16].

$$SR = \frac{W_{ps} - W_p}{W_c} 100 \% \quad (3.2)$$

4. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONDA VEYA HARÇTA MİNERAL KATKILARIN KULLANIMI VE ETKİLERİ

Bu tür mineral katkıları EFNARC (2005) tarafından şu şekilde sınıflandırılmıştır (Tablo 4.1) [4]:

Tablo 4.1 Mineral Katkıların Sınıflandırılması

Tip 1	İnert filler	• Mineral filler (kireçtaşı, dolomit vs. taş tozları) • Pigmentler
Tip2	Puzolanik	• Uçucu kül (TS EN 450) • Silis dumanı (TS EN 13263)
	Hidrolik	• Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Mineral katkı maddesi kullanılarak aşağıda sıralanan amaçlardan [19] birisine veya birden fazlasına ulaşmak mümkündür.

1. Taze betonun işlenebilirliğini arttırmak.
2. Betonun belirli bir özelliğini (veya belirli birkaç özelliğini) geliştirmek. Örneğin;
 - Terlemeyi ve segregasyonu azaltmak,
 - Hidratasyon ısını azaltmak,
 - Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genleşmeyi azaltmak,
 - Su geçirgenliğini azaltmak,
 - Nihai dayanımı arttırmak,
 - Sülfatlara karşı dayanıklılığı arttırmak.
3. Daha Ekonomik bir beton elde etmek.

İnce taneli durumdaki doğal puzolan katkıların beton özelliklerine;

1. Olumlu etkileri :

- Taze betondaki işlenebilirliği artırır [19].
- Taze betondaki terlemeyi azaltır [19].
- Katkılı betonda, hidratasyon ısı ve bu ısının çıkış hızı düşüktür. Kütle beton üretimi ve sıcak havalarda beton dökümü için uygundur [20].
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır [19].

- Betonun, kirecin, asitli ve CO₂ 'li suların etkisiyle erimesini önler, sülfata karşı dayanıklılık kazandırır ve kimyasal dayanımı artırır. Su içinde döküme müsaittir.
- Dona dayanımı artırır [20].
- Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonunu azaltır [19].
- Satış fiyatlarının aynı olmasına karşın üretimleri daha ucuza mal olur [20].

2. Potansiyel zararlı etkileri :

- Özellikle soğuk havada taze betonun prizini geciktirmektedirler. Hidratasyon ısılarının düşük olmasından dolayı soğuk havalarda döküm için uygun değildir.
- Betonun dayanımını kazanmasını yavaşlatır.
- Betonun daha dikkatli ve daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmektedir [19].
- Çok ince öğütülmüş olduklarından havanın nemiyle bozulma ihtimalleri vardır.
- Katkılı beton, portlant çimentosuna göre daha çok su gerektirir ve bu ise büzülme (rötre) riskini artırır [20].
- Hava sürüklenmiş betonların içerisine dahil edilecek sürüklenmiş hava miktarını azaltmaktadır; belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir [19].

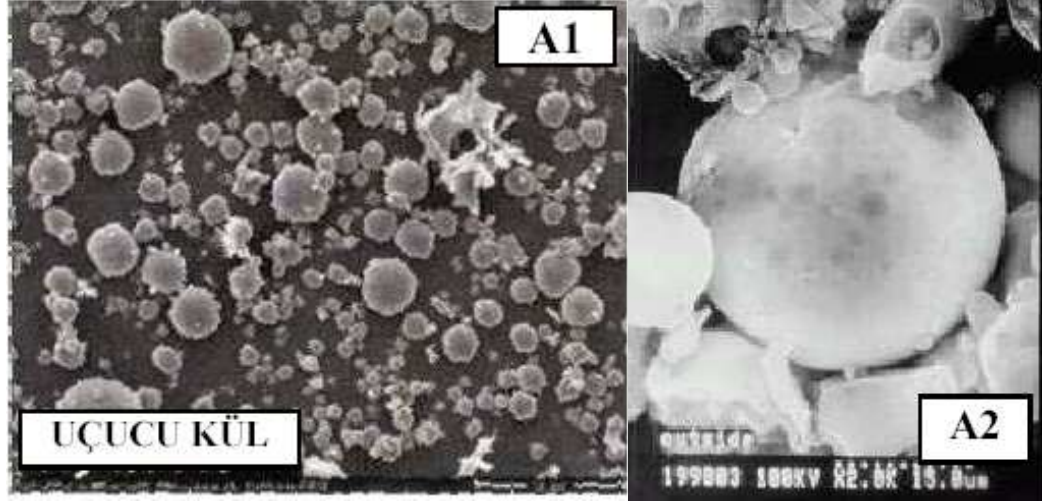
4.1. Uçucu Kül

Termik santrallerin en önemli atık maddesi, toz linyit kömürünün yanması ile meydana gelen ve baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-80 'i çok ince taneli uçucu küllerdir. Genellikle uçucu küller küresel yapıda olmakta ve çapları 1-150 mikron (μm) arasında değişmektedir (Şekil 4.1) [19].

Gazlarla birlikte dışarı çıkan ve çevreye büyük miktarda zarar vermesi kaçınılmaz olan bu uçucu küller, elektrostatik veya elektromekanik yöntemlerle tutularak silolarda atık olarak depolanmaktadır.

Santrallerden atık madde olarak elde edilen uçucu külün toplanmasıyla sağlanacak yararlar üç ana grupta toplanır [20] ;

- I. Çimento üretiminde kullanılmasıyla üreticiye ve kullanıcıya sağladığı yararlar,
- II. Çevreye sağladığı yararlar,
- III. Ekonomiye sağladığı yararlar.



Şekil 4. 1 Uçucu Külün Mikro Yapısı

Uçucu külün parçacık boyut dağılımı ve kalitesi termik santralde tutulduğu filtrasyon sistemine göre değişkenlik gösterir. Genellikle gradasyon eğrisi 1 ile 100 mikrometre arasında değişmekte ve çimento gradasyonuna benzerlik göstermektedir [2].

Boyutsal dağılımı KYB’ nin işlenebilirliğini oldukça etkilemektedir. Uçucu kül, kireçtaşı tozuna kıyasla düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar. Kendiliğinden yerleşen beton viskozitesini arttırmada etkilidir. Atık bir malzeme olması özellikle termik santrallere yakın bölgelerde kullanımını avantajlı hale getirmektedir.

Uçucu küller beton karışımında üç ayrı yöntemle kullanılırlar;

- I. İkame: Çimentonun belli oranda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması.
- II. İnce Agregaya İle İkame: İnce agregaya belirli oranda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması.
- III. Hem ince agregaya hem de çimentonun belirli oranda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması.

4.1.1. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Yapısı

Uçucu küllerde çok yüksek miktarlarda yer alan oksitler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ‘dür. Bunların yanı sıra, bir miktar CaO , MgO , C (çok ince taneli durumda olan yanmış kömür) ve Na_2O ‘da bulunabilmektedir. Uçucu küllerin yapısının büyük (%60-90) bir bölümü amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, milit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde

edildikleri için, uçucu küller de aynen ince taneli doğal puzzolanlar gibi, puzzolanik özellik gösterirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır [19].

Uçucu küllerin 1000 °C 'ye kadar ısıtılması ve hemen soğutulması puzzolanik aktiviteyi artırırken, yavaş yavaş soğutulması durumunda ise puzzolanik aktivite azalmaktadır [20].

Genellikle küresel şekilli parçacıklar içerir. Ağırlığının yaklaşık %5 'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya CO₂ ile dolu) parçacıklardan oluşmaktadır. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150 µm arasında değişir. Normal olarak 2.1-2.7 g/cm³ (ortalama 2.4) yoğunluğuna sahiptir. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir [19].

ASTM C 618 nolu standart uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir.

F sınıfı: SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ >= %70; antrasit veya bitümlü kömürden elde edilmekte; puzzolanik özelliğe sahip.

C sınıfı: SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ >=%50; linyit veya düşük bitümlü kömürden elde edilmekte; puzzolanik özelliğin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip.

4.1.2. Uçucu Külün Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri

Uçucu küllü betonun su geçirgenliği kül yüzdesi ile ters orantılıdır. Yeterli kür ile uçucu küllü betonun permeabilitesinde meydana gelen azalmanın nedeni; istenilen işlenebilirliğin daha az su ile sağlanması ve boşlukların jel oluşturması nedeniyle kapanmasından ileri geldiği belirtilmektedir [20].

Hidratasyon ürünlerini artırır ve betonun porozitesini azaltır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artar. Hidratasyon hızını ve ısınısı düşürür. Sıcaklık yükselmesinden doğan su kaybını ve çatlakları azaltır. Fakat priz alma süresini geciktirmesi erken dayanımı olumsuz etkiler. KYB' un viskozitesini artırarak ayrışmaya karşı direnç sağlar [16].

Normal betona kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli çimento miktarını azaltarak ekonomik fayda sağlar. Aynı zamanda atık bir ürün değerlendirildiği için ilave ekonomik ve çevresel yararları hesaba katılmalıdır [16].

Uçucu külün çimento yerine ikamesi, betonun yayılma çapını ve basınç dayanımını azaltmaktadır [8].

Uçucu kül, rötrenin artmasına yol açar, ancak uçucu külle üretilen betonun rötreye eğiliminin, silis dumanı ile üretilen betonlara göre daha az olduğu yapılan araştırmalarla

belirlenmiştir. Genel olarak uçucu küller işlenebilmeyi arttırır, su salma ve çözölmeyi önler. Tablo 4.2’ de [20] uçucu külün kazandırdığı özellikler verilmiştir.

Tablo 4.2 Uçucu Külün Kazandırdığı Teknik Özellikler [20]

Özellik	Etki
Su ihtiyacı	Azalı
Ayrışma	Azalı
İşlenebilirlik	Artar
Priz süresi	Uzar
Su kuma veya terleme	Azalı
Hidratasyon ısı	Azalı
Sertleşmiş betonun erken dayanımı	Azalı
Betonun 90 gün veya sonraki dayanımı	Artar
Su geçirgenliği	Azalı
Donma-çözölme direnci	Azalı
Alkali-agrega rxn	Azalı
Sülfat direnci	Artar
Sıcak havada beton dökümü	Kolaylaşır

4.2. Silis Dumanı

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO’ dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO’ nun, fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle ve çok çabuk yoğunlaştırılmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucu elde edilen %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı adı verilmektedir.

Türkiye’de silis dumanı Antalya Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesinden elde edilmektedir.

Bu malzeme, “mikrosilis” , “silis tozu” veya “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Silis dumanı, amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO_2 içerdiğinden mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir.

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO_2 içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır [19].

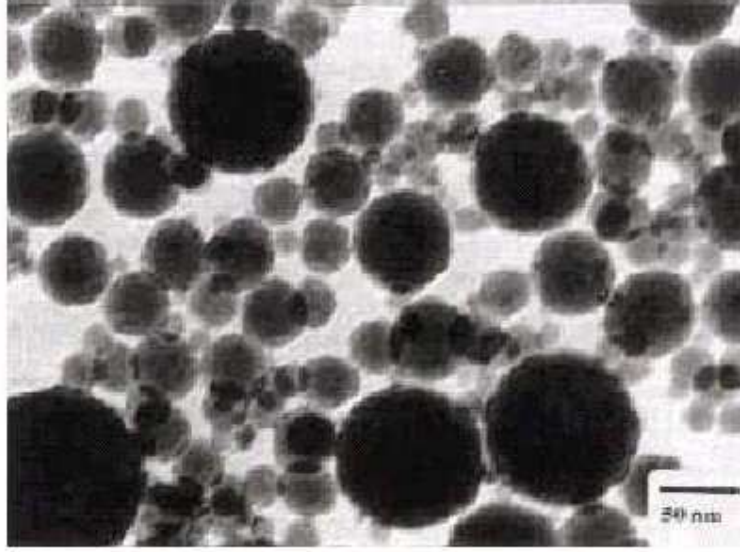
4.2.1. Silis Dumanının Kimyasal ve Fiziksel Yapısı

Silis dumanının rengi, açık griden koyu griye kadar değişiklik göstermektedir. Karbon içeriği arttıkça renk daha koyu olmaktadır. Su ile birleşmiş durumda siyaha yakın bir renk sergilemektedir.

Silis dumanının inceliği çimentonun ve diğer puzolanların inceliğini ölçmek için kullanılan Blaine yöntemiyle tayin edilemez. Özgül yüzey tayini için nitrojen emme yöntemi kullanılmaktadır. Silis dumanının özgül yüzeyi $130\ 000 - 280\ 000\ \text{cm}^2/\text{g}$ arasındadır. Beton katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanının özgül yüzeyi $200\ 000\ \text{cm}^2/\text{g}$ civarındadır.

Silis dumanının ne kadar ince taneli olduğunu açıklamak amacıyla aşağıda bazı karşılaştırmalar verilmiştir [19].

Silis dumanı	: $\sim 200,000\ \text{cm}^2/\text{gr}$
Sigara dumanı	: $\sim 100,000\ \text{cm}^2/\text{gr}$
Uçucu kül	: $\sim 4,000-7,000\ \text{cm}^2/\text{gr}$
Portland çimentosu	: $\sim 3,000\ \text{cm}^2/\text{gr}$
Yüksek fırın cürufu	: $\sim 350,000 - 600,000\ \text{cm}^2/\text{g}$



Şekil 4.2 Ultra İnce Amorf Kolloidal Silis Dumanı Çözeltisi (5-50 nm)

Silis dumanının yoğunluğu $2,2 - 2,55 \text{ kg/dm}^3$ olup tane şeklinin tam küre şeklinde olduğu yapılan çalışmalarla gözlenmiştir. Silis dumanının taneleri bir araya gelmiş küre yığınları şeklinde görülürler (Şekil 4.2). Yüksek oranda amorf silikon dioksit içeren silis dumanı partikülleri, $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ (mikron) civarında ölçülen ortalama çaplarıyla çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler [20].

Silis dumanının birim ağırlığı, üretildiği haliyle, $240 - 300 \text{ kg/m}^3$ civarındadır. Sıkıştırılmamış durumdaki portland çimentosunun birim ağırlığı 1200 kg/m^3 kadardır. Yani, 50 kg portland çimentosu alan torbaya ancak 10-12kg kadar gevşek durumdaki silis dumanı yerleştirilebilir [19].

Silis dumanı çok ince taneli olduğundan su ihtiyacı fazladır. Ayrıca çok kuvvetli bir puzolanik bağlayıcılık göstermektedir.

Diğer puzolanik toz maddeler gibi, amorf yapısı nedeniyle kalsiyum silika hidrat (CSH) oluşturuca çekirdekler meydana getirir. Çekirdeklerde ilave kristal yapısı oluşumuna katkıda bulunarak prizi hızlandırır ve erken dayanımı dolaylı yoldan artırır. Puzolanik reaksiyon hızı da diğer puzolanlara göre yüksektir. Aynı uçucu kül ve diğer puzolanlar gibi C_3S ve C_2S hidratasyonundan gelen serbest kireci ($\text{CA}(\text{OH})_2$) bağlar ve ilave CSH oluşumuna neden olur. Buradaki CSH yapısı normal çimento hidratasyonundan oluşan CSH yapısından farklıdır [16]. Bu oluşan jelin yoğunluğu daha az ancak geçirimsizliği daha fazla olmaktadır. Ayrıca silis dumanı beton dayanımını azaltmadan, çimento miktarını azaltarak C_3A 'nın azalmasını önler [20].

Bu durum silis dumanı tanelerinin büyük kristaller yerine çok sayıda küçük ve daha sağlam $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaları şeklinde düşünülebilir. Küçük kürecikler halindeki silis dumanı taneleri, uygun ölçüde akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde, çimento taneleri arasındaki boşluklardaki suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedirler. Silis dumanı katılmış çimento hamurlarının akma sınırı ve viskozitelerinde artış görülmektedir [20].



Tablo 4.3’ de silis dumanının kimyasal bileşeni verilmiştir.

Tablo 4.3 Silis Dumanlarının Kimyasal Bileşenleri, % [20]

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO_2	90.0–93.0	90.0–96.0	93.0–95.0
C	1.3–2.6	0.5–1.4	0.8–1.0
Fe_2O_3	0.4–0.7	0.2–0.8	0.4–1.0
Al_2O_3	0.5–1.6	0.5–3.0	0.4–1.4
MgO	0.3–0.5	0.5–1.5	1.0–1.5
CaO	0.5–0.8	0.1–0.5	0.6–1.0
Na_2O	0.1–0.3	0.2–0.7	0.1–0.4
K_2O	1.0–1.2	0.4–1.0	0.5–1.0
S	0.1–0.2	0.1–0.4	0.1–0.3
(kızdırma kaybı)	1.4–2.8	0.7–2.5	0.5–1.0

4.2.2. Silis Dumanının Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri

Silis dumanı genellikle beton katkı malzemesi olarak kullanılır. Çok ince taneli olduğundan ve yüksek oranda SiO_2 içerdiğinden, ilk ve nihai dayanımı yüksek betonların üretiminde kullanılmaktadır [16].

Küçük kürecikler halindeki silis dumanı taneleri daha büyük çimento tanelerinin arasındaki su ile yer değiştirerek granülometriyi iyileştirirler. Tanelerinin ıslanması gereken çok büyük yüzey alanı nedeniyle de su gereksinimini arttırırlar [20].

Silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanı taze beton içindeki serbest suyun büyük bir kısmını bağlar ve son derece ince olan silis dumanı partikülleri çimento tanelerinin aralarına girerek yüzeye sızıntı olabilecek kanalları azaltırlar. Dolayısıyla çok az suyun serbest kalması,

terlemenin de azalmasını sağlar. Silis dumanı taze betonda iç kohezyonu artırır [20]. Terleme yapmayan ve ayrışmayan akıcı betonu (yani KYB' yi) elde etmek silis dumanıyla mümkündür. Ayrıca bu sayede su geçirimsizliği azalır.

Çimento ağırlığının %10'undan daha fazla olmayan silis dumanı katılarak yapılan betonda priz süresi, katkısız betonunkinden fazla fark yaratmaz.

Çimento yerine belirli oranında katılan silis dumanının ilk iki günde toplam hidratasyon ısını azalttığı görülmüştür [20].

Silis dumanı, diğer puzzolanlar gibi beton hamuru içinde yeni kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri çimento hamurunu ve iri agrega-hamur ara yüzey geçiş bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Silis dumanının beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisi uçucu kül ve cüruf gibi katkılara oranla daha fazladır. Normal koşullarda silis dumanının beton dayanımına olumlu etkisi 3-28 gün arasında görülebilir [20]. Tablo 4.4' de silis dumanının betonda olumlu ve olumsuz etkileri verilmiştir [19].

Tablo 4.4 Betonda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkisi

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
– Betonda yüksek basınç dayanımının elde edilmesini sağlar. – Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltır. – Betonun hidratasyon ısını azaltır. – Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltır. – Sertleşmiş betondaki alkali silika reaksiyonunu azaltır. – Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırır.	– Silis dumanı kullanılarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacı vardır. Bunu telafi edebilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir. – Çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından, betonun yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir. – Silis dumanı kullanılması durumunda, daha çok miktarda plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir. – Silis dumanı, nispeten daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

Silis dumanı kullanımı yüzey alanı artışıyla kimyasal katkı absorpsiyonunu arttırdığından katkının efektifliğini azaltır. Bu nedenle silis dumanı, diğer puzzolanlar gibi yüksek dozajlarda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en yüksek dozaj, çimento ağırlığının % 15'i, optimum dozaj ise % 10'u kadardır. Bu değerin geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı

ve yükselen hidratasyon ısısı sebebiyle uygulamada zorluklar yaşanabilir. Özellikle düşük çimento dozajına sahip betonlarda (300 - 350 kg/m³) silis dumanı ve kimyasal katkıların ortak kullanımı ile KYB tasarımı yapılabilir. Silis dumanı genel olarak düşük çimento dozajlarında etkili bir viskozite arttırıcıdır [2].

A. R. Sağlam ve M. H. Özkul (2006) yaptıkları bir çalışmada uçucu kül ve silis dumanı ile hazırlanan çimento hamurlarının kayma eşikleri karşılaştırıldığında, silis dumanı içeren karışımlarda kayma eşiğinin daha büyük değerler aldığını tespit etmişlerdir. Ancak harçlar söz konusu olduğunda viskozite özelliğinde farklı bir davranış elde edilmiş ve silis dumanlı karışımlarda kayma eşiğinin uçucu kül içerenlere göre daha düşük düzeyde kaldığı belirlenmiştir [17].

4.3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Hematit (Fe₂O₃) ve magnetit (Fe₃O₄) gibi demir cevherleri doğada demir oksit olarak bulunmaktadır. Demir cevherlerinde çok az miktarda silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi bazı yabancı maddeler de bulunabilmektedir.

Demir elde edebilmek için demir cevherlerinin, yüksek fırınlarda 1600°C' ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda ısıtılmaları, böylece oksijenden ve yabancı maddelerden arındırılmaları gerekir. Kok kömürünün (Karbon) yakıt olarak kullanıldığı bu fırınlarda, arıtma işlemine yardımcı olabilmesi amacıyla kalker taşı da demir cevheriyle birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kok kömüründeki karbon ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazlarını oluşturmakta ve bu gazlar da fırını terk etmektedir. Fırının içinde eriyik durumda kalan demir, yoğunluğu diğerlerinden fazla olduğu için fırının en alt bölümünde; eriyik durumda olan CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi yabancı maddeler de demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve diğer yabancı maddeler ayrı ayrı çıkışlardan dışarı alınmaktadır. Bu yabancı maddeler topluluğu, yüksek fırın cürufu olarak isimlendirilmektedir.

Yüksek fırınlardan atık malzeme olarak elde edilen ve eriyik durumda bulunan cüruf, su içerisine dökülerek veya basınçlı su püskürtülerek hızlı olarak soğutulursa irili ufaklı kum taneleri boyutunda granüle bir hal alarak büyük oranda amorf bir yapı kazanmaktadır. Bu amorf yapıya sahip olan ve yüksek miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içeren granüle yüksek fırın cürufu, çok ince öğütülerek doğal puzzolan olarak kullanılmaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu uçucu küllerin puzzolanik özelliklerine benzer bir özellik gösterirler. Ayrıca yüksek oranda CaO içermesi sebebiyle, kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, KSB’ da viskozite arttırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Cüruf kullanımı demir-çelik fabrikasına yakın bölgelerde ekonomik olmaktadır [19].

4.3.1. Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Ve Kimyasal Yapısı

Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısı tablo 4.5’ de verilmiştir.

Tablo 4.5 Yüksek Fırın Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonları[19]

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye
CaO	29-50	30-40	39-44	34-41
SiO₂	30-40	30-36	33-37	34-36
Al₂O₃	7-18	9-16	15-18	13-19
Fe₂O₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5
s	0-0.2	1-1.6	0.6-0.8	1-2

Yaklaşık %30-40 oranlarında yer alan CaO, İnce öğütülmüş durumdaki granüle yüksek fırın cürufuna kendiliğinden bir miktar bağlayıcılık özelliği kazandırır.

4.3.2. Yüksek fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Beton/Harç Üzerindeki Etkileri

Yüksek fırın cürufunun KYB ve KYH üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri tablo 4.6’ da verilmiştir.

Tablo 4.6 Betonda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılan Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkisi

Olumlu Etkileri	Olumsuz Etkileri
– Taze betondaki işlenebilirliği artırır. – Taze betonun priz süresini uzatır. – Betondaki terlemeyi azaltır. – Betonun hidrasyon ısısını azaltır. – Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltır. – Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırır.	– Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açar. – Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı malzemesinin kullanılmasını gerektirir. – Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltır.

Yapılan bir çalışmada, çimento yerine karışıma farklı oranlarda yüksek fırın cürufu katılarak elde edilen kendiliğinden yerleşen betonlar (su/Çimento ≈ 0.38) üzerinde yürütülen deney sonuçları esas alındığında, çimento yerine %35 oranında yüksek fırın cürufu ihtiva eden karışıma ait numunelerin basınç dayanımı diğer KYB' lere göre daha yüksektir. KYB' de %35 oranında yüksek fırın cürufu kullanılmasının 28 günlük basınç dayanımı açısından daha iyi olacağı görülmüştür [21].

4.4. Taş Tozları (Mineral Filler)

KSB tasarımında ince öğütülmüş (Blaine değeri $> 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$) kireçtaşı tozu, granit, kuvarz kumu kullanılabilir. Bu tozların etkinliği incelendiğinde artar. Dolomit kökenli kireçtaşı tozu ince öğütülmesi halinde, reaktifliği arttığından alkali karbonat reaksiyonuna yol açabilir. Bu nedenle kullanımı riskli olabilir.

Kireç taşı tozunun yüzeyi oldukça pürüzlüdür. Öğütücü tipine de bağlı olmakla birlikte genel olarak granit tozu, mikro yapısı incelendiğinde kireç taşı tozuna kıyasla daha çok kusurlu mikro tane içerir. Bu açıdan kireç taşı tozu tercih edilmelidir. Taş ocaklarında üretimin %1'lik kısmını oluşturan kireç taşı tozu kayaktan öğütülerek elde edilen atık bir malzemedir. Geleneksel betonda taş tozu kullanımı, agrega yüzeylerine yapışarak aderansı azaltıcı etki yaratması nedeniyle standartlarca sınırlandırılmıştır. Bu olumsuz etkisi KYB' de viskozite arttırıcı olarak kullanılmasıyla olumlu etkiye dönüşebilir [2]. Yinede uçucu kül, kireç taşı tozuna kıyasla düşük kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar [8].

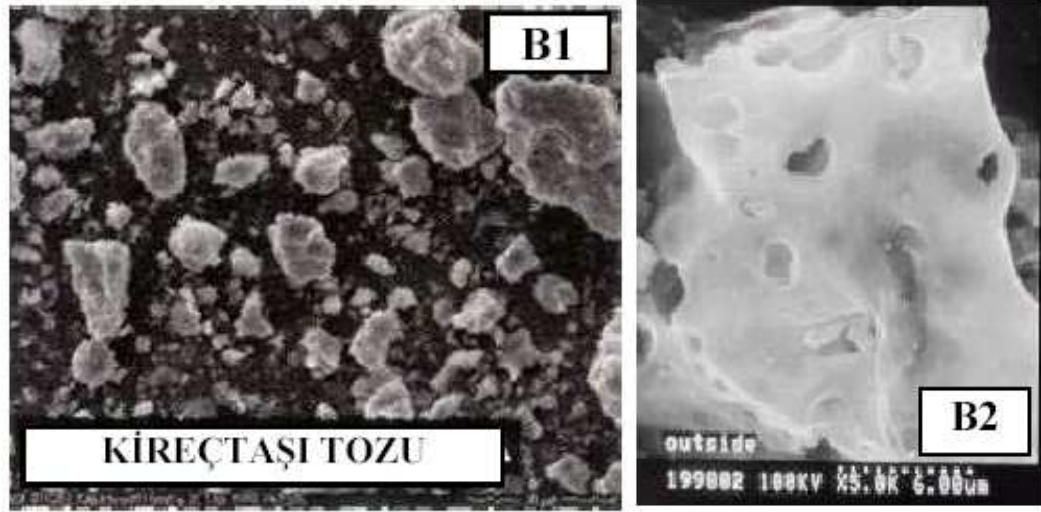
Kireç taşı tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler oluşturabilir. Kireç taşı tozu elektrostatik olarak negatif, kum ve iri agrega pozitif yüklü olduğundan agrega yüzeyine yapışır. Bu yapışmayı engellemek için, malzemelerin karıştırma sırasına ve yöntemine dikkat etmek gerekir. Mikro yapı incelemesi ile yapılan çalışmalarda en iyi ince kesit görüntüsü, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, sonra agreganın ilave edildiği durumda elde edilmiştir [16].

Kireç taşı tozu ile üretilen KSB, diğer puzolanik maddelerin kullanıldığı KSB' lara kıyasla, kür işlemine daha az hassastır. Pürüzlü mikro yüzeyi nedeniyle, yüksek oranda karışım suyu absorbe etmesi ve erken dayanımı hızlandırıcı etkisi sebepleriyle küre hassasiyetinin azaldığı, kabul edilebilir [16].

Taş tozunun betonun dayanım kazanma hızına etkisi üç mekanizma ile açıklanmaktadır [22]:

- 1- CSH oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırır.
- 2- Özellikle C_3A ' sı yüksek çimentolarla reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturur.
- 3- İnceliği arttıkça hidrasyonu hızlandırır ve erken dayanımı arttırır, fakat nihai dayanımda değişiklik meydana gelmez.

Taş tozunun mikro yüzey yapısı, işlenebilirliği büyük ölçüde etkiler. Şekil 4.1'de pürüzsüz yüzey yapısına sahip küre şekilli uçucu kül ve Şekil 4.3'de ise çok daha pürüzlü yüzeye sahip kireçtaşı tozunun elektron mikroskobu altında çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Aynı miktarda uçucu kül ve taş tozu ilave edilen karışımlar karşılaştırıldığında, uçucu külün kireçtaşı tozuna kıyasla eşik kayma gerilmesini fazla yükseltmeden viskoziteyi arttırdığı görülmüştür [2].

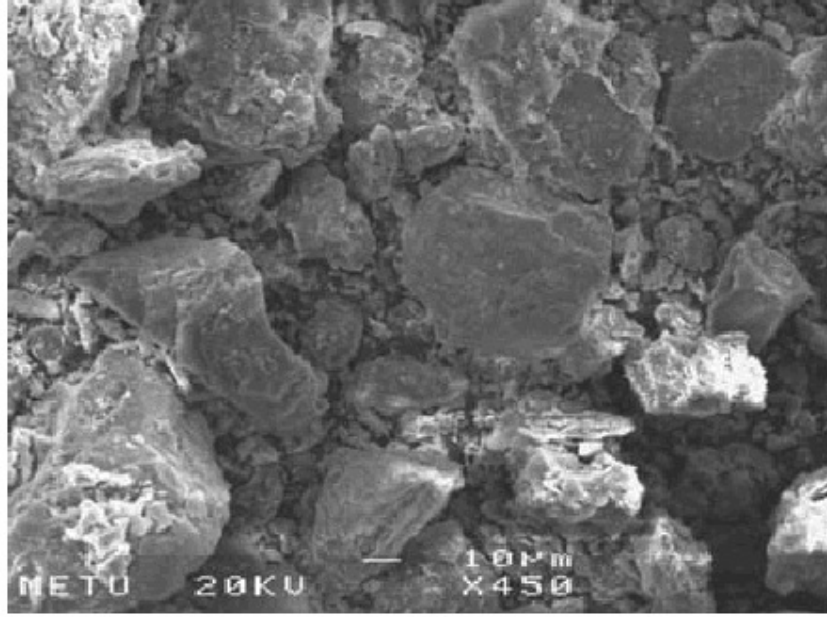


Şekil 4.3 Kireç Taşı Tozunun Mikro Yapısı

7.4. Tuğla Tozu

Tuğla tozu, tuğla fabrikalarında pişmiş olan tuğlaların nakliye veya taşıma sırasında veya inşaatlarda kırılması sonucu kullanılamaz hale gelen atık tuğlaların öğütülmeleri ile elde edilen ve KYB’ de değerlendirilmesi araştırılan silis esaslı mineral bir katkıdır. Tuğla tozunun mikro yapısı incelendiğinde yüzeyinin kireçtaşı tozuna benzer şekilde köşeli ve pürüzlü bir yapıda olduğu görülür (Şekil 4.4). Bu da tuğla tozunun su gereksinimini artırır. Tuğla tozunun bu özelliğinden faydalanmak için KYB’ de viskozite düzenleyici olarak kullanılabilir [8].

Tuğla tozu, yüksek silis içeriği sayesinde kalsiyum silika hidrat (CSH) oluşumunu sağlayarak hidrasyon reaksiyonunu hızlandırır. Erken dayanımın artmasına özellikle katkı sağlar. KYB’ nin viskozitesini artırarak ayrışmaya karşı direnç sağlar. Bunların yanında tuğla tozu, pişmiş kil içeren bir malzemedir ve su emme değeri yüksektir.



Şekil 4.4 Tuğla Tozunun Mikro Yapısı

Yukarıda tanımlanan mineral katkı malzemelerinin yanında mermer işleme fabrikalarında açığa çıkan atık malzemelerin öğütülmesiyle elde edilen mermer tozunun da KYB 'de viskozite düzenleyici veya arttırıcı olarak kullanılması araştırılmaktadır.

7.4. Cam Filler Tozu

Camın yeniden kullanımı amacıyla öğütülmesinden elde edilen bu malzemenin kullanılması, alkali-silika reaksiyonu tehlikesi nedeniyle sakıncalı olabilir [2].

4.7. Pirinç Kabuğu ve Buğday Sapı Külü

Tarımsal ürün atığı alan pirinç kabuğu ve buğday sapı yüksek oranda amorf silisyum dioksit (SiO_2) içerir. Bunların külü içerisinde büyük oranda (%81-95) silis vardır. Kabuğun ve sapın esas yapısı selüloz, liginin ve küldür. Kabuk ve sap yakmadan önce 1-5mm boyutuna getirilmesi gerekir. Daha sonra bu hammadde üzerinde yanma işlemi uygulanır. Pirinç kabuğu ve buğday sapı, yaklaşık 550 – 600°C (ortalama 575°C) elektrik kül fırınlarında yakılması ile külü elde edilir. Elde edilen küller, bilyeli öğütme değirmenlerinde öğütülür ki puzolanik aktivitesi böylece artar. Kül içindeki silis oranı yakma sıcaklığı, yakma süresi ve yakma hızına bağlı olarak değişiklik gösterdiği gibi yetiştirme ortamına ve iklim şartlarına bağlı olarak değişmektedir [20].

Puzzolan olarak çimento ve betonda kullanılırlar. KYB 'de de kullanımı araştırılmaktadır. Külün betona kazandırdığı özellikler silis dumanınıninkine benzer ve denk olduğu gözlenmiştir. Kül, çok ince oluşu nedeniyle çimento hamuru ve agrega yüzeyindeki kılcal boşlukları doldurur, böylece boşlukların küçülmesine ve kılcal boşlukların kesintiye uğramasına neden olur. Bundan dolayı külle elde edilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlar [20].

Mikroskopla incelendiğinde bunların tane şekli, köşeli iskelet ağına benzedikleri görülmüştür. Külün puzzolanik özelliğe sahip olabilmesi için silisin amorf halde bulunması gerekir. Bu da özel yakma fırınlarında sağlanabilmektedir.

Külün yoğunlukları $2.1 - 2.2 \text{ kg/dm}^3$ ve özgül yüzey alanları $50000 - 60000 \text{ m}^2/\text{kg}$ dır. Bu değer yoğun silis dumanı özgül yüzeyinden 2 kat fazladır. Bu küller çok ince taneli olmasından dolayı çimento ve betonun kohezyonunu arttırmaktadır. Bunun yanı sıra istenilen işlenebilirliğin sağlanabilmesi için daha fazla suya ihtiyaç duyacaktır.

5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, kendiliğinden yerleşen harç üzerinde yapılmış olup, tuğla tozu içeren harcın hem kontrol harcı ile hem de diğer tuğla tozlu karışımlarla arasındaki viskozite ve mühendislik özelliklerindeki değişimleri gözlemlemek amacıyla yapılmıştır.

5.1. Deney Programı

Kendiliğinden yerleşen beton ve harçların en önemli dezavantajlarından biri maliyettir. Bu durum kimyasal katkı ve yüksek miktarda çimento kullanımından kaynaklanmaktadır. Çimento miktarının artması hem maliyetin artmasına hem de betona termal gerilmeler ve rötre gibi olumsuz etkiler kattığından, beton karışımlarına çimento azaltılarak puzzolanik veya mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu ve serbest fırın cürufu gibi) ilave edilerek ince toz malzemeyi artırma yoluna gidilmiştir. Ayrıca bu sayede atık tuğlaların da değerlendirilerek doğadan uzaklaştırılması ve doğaya zarar vermemesi sağlanmıştır.

Mineral katkı olarak kullanılan tuğla tozunun, taze ve sertleşmiş haldeki harç üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla, biri kontrol karışımı olmak üzere toplam yedi karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlar yüzde olarak içerdikleri tuğla tozu miktarına göre sınıflandırılmışlardır. Kendiliğinden yerleşen harçların taze haldeki özellikleri, mini V-hunisi, mini çökme-yayıma ve viskozite ölçümleri ile belirlenmiştir. Sertleşmiş haldeki numunelerin mekanik özellikleri, üç noktalı eğilme deneyi, basınç deneyi ve UPV (ultrasonic pulse velocity) ölçümleriyle 3, 7, 28 ve 91 gün için belirlenmiştir, ayrıca numuneler üzerinde kapiler su emme deneyi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin poroziteleri (%) ve % toplam su emme kapasiteleri ve yoğunlukları saptanmıştır.

5.2. Malzeme Özellikleri

Aşağıda çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

5.2.1. Portland Çimentosu

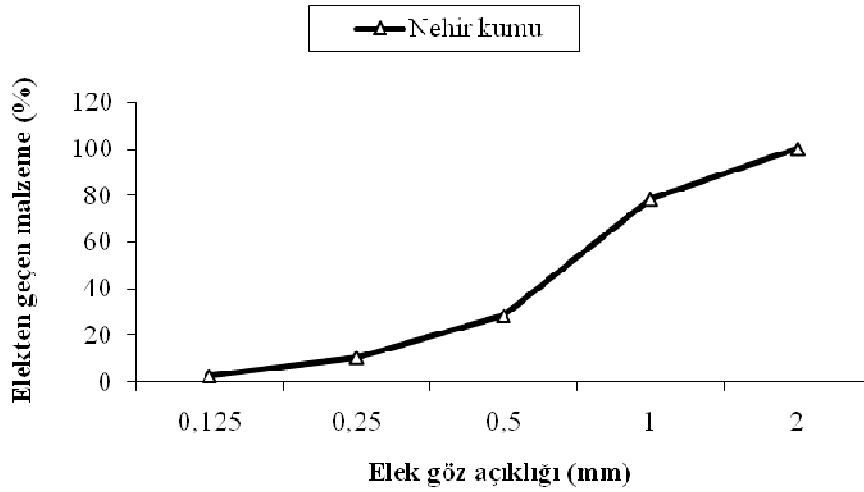
Çalışmada, Elazığ Altınova Çimento Sanayi Tic. A.Ş.'den temin edilen CEM I 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1. CEM I 42,5 N Çimentonun Kimyasal Bileşimi ve Fiziksel Özellikleri

Özellik	CEM I 42.5 N
SiO ₂ (%)	21.12
Al ₂ O ₃ (%)	5.62
Fe ₂ O ₃ (%)	3.24
CaO (%)	62.94
MgO (%)	-
SO ₃ (%)	2.66
Klorür (Cl ⁻) (%)	0.0044
Kızdırma kaybı (%)	3.52
Özgöl ağırlık (g/cm ³)	3.1
Özgöl yüzey alanı (cm ² /g)	3490

5.2.2. Agregalar

Agregalar Elazığ Murat nehrinden temin edilmiştir. Kendiliğinden yerleşen harç için kullanılan agregaların maksimum tane çapı 2 mm olarak seçilmiştir. Karışım hesaplarında agreganın doymun kuru yüzey özgöl ağırlığı 2.63 gr/cm³ olarak bulunmuştur. Murat nehri kumunun su emmesi %1,96 olarak hesaplanmıştır. Elek analizi ile belirlenen agreganın granülometrisi Şekil 5.1 'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Nehir Kumunun Granülometrisi

5.2.3. Kimyasal Katkı

Kimyasal katkı olarak, 1,06 gr/cm³ yoğunluğa sahip modifiye polikarboksilat esaslı polimer bir süper akışkanlaştırıcı (SA) olan ViscoCrete Hi-Tech 36 yedi karışımda da 6 kg/m³ oranında kullanılmıştır (Tablo 5.2).

Tablo 5.2 Kimyasal Katkının Özellikleri [23]

Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1,06 gr/cm ³
pH Değeri	3 – 7
Donma Noktası	-4 ⁰ C
Suda Çözünebilir Klorür (%)	En fazla %0,1 (TS EN 934-2)
Alkali Miktarı (%Na₂O Eşdeğeri Olarak)	En fazla %3 (TS EN 934-2)

5.2.4. Tuğla Tozu

Çalışmada, Elazığ yöresinde özel bir tuğla fabrikasından temin edilen kırık tuğla atıkları öğütülerek toz haline getirilmiştir. Elde edilen tuğla tozu, çimento yerine ikameyle %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında kullanılmıştır. Kullanılan tuğla tozunun %92'si 0,125 mm² gözlü elekten geçmiştir. Tuğla tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri tablo 5.3' de verilmiştir. Kiremit ile tuğlanın hammaddesi aynı olduğundan kiremit atıklarının kullanılmasına gerek görülmemiştir.

Tablo 5.3 Tuğla Tozunun Kimyasal Ve Fiziksel Özellikleri

Özellik	Tuğla Tozu
SiO₂ (%)	41,61
Al₂O₃ (%)	14,76
Fe₂O₃ (%)	11,47
CaO (%)	14,34
MgO (%)	6,04
LOI (%)	16,10
Özgül ağırlık (g/cm³)	2,64
Kızdırma Kaybı (%)	2,33

5.3. Deney Metotları

Kendiliğinden yerleşen harçlar üzerinde uygulanan deneyler, işlenebilirlik ve mekanik özellikleri saptayabilmek amacıyla laboratuvar şartlarında taze ve sertleşmiş harçlar için ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu deneyler aşağıda açıklanacaktır.

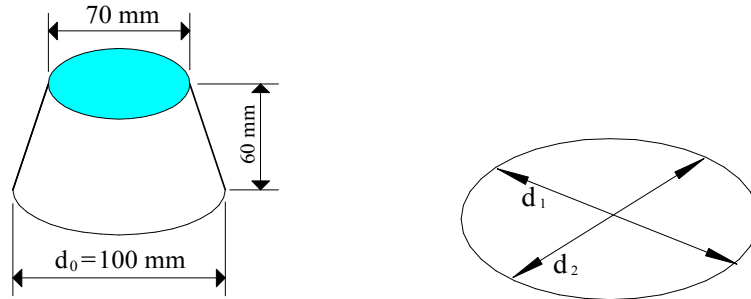
5.3.1. Mini Çökme-Yayılma deneyi

Kendiliğinden yerleşen harçlarda EFNARC (2002) [3] tarafından tavsiye edilen iki adet işlenebilirlik deneyi mevcuttur. Bunlar mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi deneyleridir. Buna göre çökme-yayılma değerinin 24-26 cm arasında; V-hunisi akma zamanının da 7-11 sn arasında kalması gereklidir [3].

Mini çökme-yayılma deneyinde Şekil 5.2’ deki gibi tepesi kesik koni kalıp harçla doldurulduktan sonra yukarı kaldırılır. Harcın yayıldığı çap karşılıklı iki yönde ölçülür ve ortalaması yayılma çapı olarak kaydedilir. Bağlı çökme-yayılma değeri aşağıdaki formülden hesaplanır (Denklem 5.1).

$$\Gamma_m = (d / d_0)^2 - 1 \quad (5.1)$$

Burada $d = (d_1 + d_2) / 2$ ‘dir.



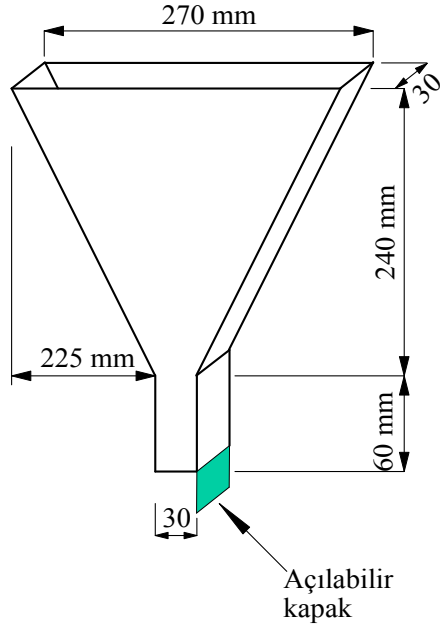
Şekil 5.2. KYH İçin Mini Çökme-Yayılma Deneyi



Şekil 5.3. Çökme-Yayılma Deneyi

Şekil 5.3’ de cam yayılma tablası üzerinde yapılan çökme-yayılma deneyi görülüyor.

5.3.2. Mini V-Hunisi Deneyi



Şekil 5.4. KYH İçin Mini V-Hunisi Boyutları

Mini V-hunisi deneyinde; Şekil 5.4’ deki gibi bir V-hunisi harçla tamamen doldurulduktan sonra altındaki kapak açılır ve harcın akması sağlanır. Kapağın açıldığı andan üstten bakıldığında ışığın görüldüğü ana kadar geçen süre t süresi olarak kaydedilir (Şekil 5.5). Bağlı huni hızı aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$R_m = 10 / t \quad (5.2)$$



Şekil 5.5 KYH İçin Mini V-Hunisi Deneyi

5.3.3. Viskozitenin Saptanması

Viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). Harçların viskozitesi 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra ölçülmüştür. Böylece, her bir KYH karışımı için farklı açısal hızlardaki viskozite değerleri (cP) elde edilmiş ve viskozite-açısal hız grafikleri çizilmiştir.



Şekil 5.6 Brookfield DV-E model viskozimetre

Bu deneyde, harç beher içinde bulunur. Daire şeklindeki dönel ucun çapı numuneye göre belirlenir. Karıştırıcı uç dönmeye başladığında uca karşı harcın oluşturduğu burulma momenti (tork) ölçülür. Ucun hızı arttıkça okunan değerlerler doğrultusunda viskozite değişimleri elde edilir.

5.3.4. Üç Noktalı Eğilme Ve Basınç Deneyleri

Hazırlanan karışımların her birinden 12 adet 40×40×160 mm boyutlarında hazırlanan numuneler bir gün kalıpta bekletildikten sonra 23 °C ±1.7 °C su içinde 3, 7, 28 ve 91 gün süre ile küre maruz bırakılmıştır. Her bir kür periyodu sonunda küreden çıkarılan numunelerin 25 ton kapasiteli ADR-Auto 250 Basınç Makinesi'nde üç noktalı eğilme deneyi ile eğilmede çekme dayanımı tespit edildikten sonra 40×40 mm boyutundaki basınç aparatında basınç dayanımı elde edilmiştir (Şekil 5.7).



(a) Üç noktalı eğilme deneyi



(b) Eğilme deneyinde numunenin kırılması



(c) Basınç deneyi



(d) Basınç kırılması

Şekil 5.7 Eğilme ve Basınç Deneyleri

5.3.5. UPV (Rölatif Ses Hızı) Ölçümü

Çalışmada UPV (ultrasonic pulse velocity) ölçümleri, ASTM C 597-83’de tanımlandığı şekilde yapılmıştır. Test sistemi, alıcı ünitesi ile veri kaydetme cihazı ve bir çift yanal 150 kHz titreşim verici banttan oluşur (Şekil 5.8). UPV, vericiler, bir numunenin karşılıklı yüzeylerine bağlama jeli sürülerek sıkıca tutturulması yoluyla, iki karşılıklı verici arası mesafenin titreşimlerin bir vericiden diğer vericiye ulaşım zamanına bölünmesiyle bulunur. Dolayısıyla bu deneyde harcın iyi yerleşmiş olması ve boşluksuzluğu önemlidir. Titreşim hızları numunenin diğer karşılıklı yüzlerine de uygulanarak ortalama bir hız bulunur. UPV ölçümleri bu çalışma için 3, 7, 28 ve 91 günlük periyotlarda yapılmıştır.



Şekil 5.8 UPV Cihazı

5.3.6. Kapiler Su Emme Deneyi

Betonların kapiler su emme katsayıları 28 gün suda kür edilen 50x50x50 mm’lik numuneler üzerinde belirlenmiştir. Numuneler sabit ağırlığa gelinceye kadar $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ ’de hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Yan yüzeyleri izole edilen numuneler, saf su içerisine 5 mm batacak şekilde düzeneğe yerleştirilmiş (Şekil 5.9) ve 5, 10, 20, 30, 60 dakikalık ve 3, 6, 24 saatlik sürelerde, numunelerin yüzeylerindeki serbest su, nemli bir bez ile silinerek, 0.01 g hassasiyetli bir tartı ile kütle artışları belirlenmiştir. Numunelerin başlangıçtaki ağırlıklarına göre, ağırlık farkları hesaplanarak kapiler su emme değerleri bulunmuştur. Kapiler su emme deneyi, TS 4045 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [24].

Kapilarite katsayılarının hesaplanmasında;

$$K = \frac{Q^2}{A^2 \cdot t} (cm^2 / s) \quad (5.3)$$

eşitliği kullanılmıştır. Burada;

- K : Kapilarite katsayısı (cm²/s),
A : Su ile temas eden alan (cm²),
t : Geçen zaman (s),
Q : Emilen su miktarı (cm³)'dır.



Şekil 5.9 Kapiler Su Emme Deneyi

5.4. Deneysel Veriler

Aşağıda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ve kullanılan karışım oranları verilmiştir.

5.4.1. Karışım Hesapları

Bu çalışmada; CEM I 42.5 N tipi çimento yerine mineral katkı olarak %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında tuğla tozu kullanılarak toplam 6 tip harç ve karşılaştırma amacıyla sadece CEM I 42.5 N tipi çimento içeren kontrol harcı oluşturulmuştur. Kontrol harcının benzerliğinde su/toz oranının ağırlıkça 0.40-0.44 civarında olması hedeflenmiştir. Elde edilen harçlara ait karışım oranları Tablo 5.4' de verilmiştir.

Tablo 5.4 Karışım Oranları

Karışım Kodu	Muhteva (kg/m ³)						
	CEM I 42.5 N	TT	Kum	Su	Viscocrete Hi-Tech 36	Su/Toz (Hacimce)	Su/Toz (Ağırlıkça)
Kontrol	640	-	1273	294	6.00	1,23	0,40
TT5	608	32	1268	294	6.00	1,23	0,40
TT10	576	64	1270	291	6.00	1,21	0,40
TT15	544	96	1257	294	6.00	1,22	0,41
TT20	512	128	1246	296	6.00	1,22	0,41
TT25	480	160	1236	298	6.00	1,23	0,42
TT30	448	192	1223	301	6.00	1,24	0,42

Tablodan da görüldüğü üzere %15 tuğla tozu içeren karışıma kadar su/toz oranı (ağırlıkça) sabit kalmış; tuğla tozunun %15’den sonraki kullanımları için artmaya başlamıştır.

Kullanılan harçlar, ASTM C109/C 109M-01’e uygun bir mikser kullanılarak hazırlanmıştır. (Şekil 5.10). Harçların üretiminde maksimum tane çapı 2 mm olan nehir kumu kullanılmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde EFNARC (2002) [3]’de önerilen mini çökme-yayılma deneyinden faydalanılmıştır (Şekil 5.3). Mini V-hunisi deneyinde ise; Şekil 5.5’ deki gibi bir V-hunisinden faydalanarak V-hunisi akma zamanı elde edilmiştir.

**Şekil 5.10** Standart Mini Mikser

5.4.2. İşlenebilirlik Özellikleri

Kontrol ve tuğla tozu içeren harçların çökme-yayılma değerleri ve V-hunisi akma zamanı tespit edilmiştir (Tablo 5.5). Bilindiği gibi tane boyutu küçüldükçe yüzey alanlarının genişlemesinden dolayı yüzeylerin kaplanması için gereken su miktarı artmaktadır. KYH’ da kullanılan tuğla tozunun yüzey alanının çok geniş olmasından ötürü su miktarı oldukça

etkilenmiştir. Buna göre çökme-yayılma değerinin 24-26 cm arasında; V-hunisi akma zamanının da 7-11 sn arasında kalması sağlanmıştır.

Tablo 5.5 Harçların İşlenebilirlik Özellikleri

Karışım Kodu	Çökme-Yayılma (mm)	V-Hunisi Akma Zamanı (s)
Kontrol	244	10.2
TT5	247	10.1
TT10	242	10.1
TT15	242	10.5
TT20	242	11.0
TT25	244	10.9
TT30	241	10.9

Ayrıca bütün harçlar için viskozite ölçümleri 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dk açısal hızlarda ve karıştırma işleminden hemen sonra gerçekleştirilmiştir (Tablo 5.6).

Tablo 5.6 Farklı Açısal Hız Değerleri İçin Viskozite Ölçümleri

Karışım Kodu	Açısal Hız (Rpm)						
	1	2,5	5	10	20	50	100
Kontrol	21300	9440	5500	4070	3305	2952	2759
TT05	30000	10120	6140	4780	3695	3070	2830
TT10	30200	13070	8400	4320	2770	2028	1787
TT15	29900	12840	7780	5020	3965	3209	2900
TT20	28900	12520	7915	5210	3950	3104	2882
TT25	27400	12360	8120	5750	4265	3240	3027
TT30	26200	12400	7460	5070	3740	2858	2712

5.4.3. Mekanik Özellikler

Harçların her birinin UPV ve dayanım değerleri 3, 7, 28 ve 91 gün için saptanmıştır. Tablo 5.7’ de numunelerin basınç ve eğilme dayanımları, tablo 5.8’de de UPV sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.7 Harçların Basınç ve Eğilme Dayanımları

Karışım	Eğilmede Çekme Dayanımı (N/mm ²)				Basınç Dayanımı (N/mm ²)			
	3 gün	7 gün	28 gün	91 gün	3 gün	7 gün	28 gün	91 gün
Kontrol	6,03	6,49	8,93	11,90	32,4	45,7	59,8	69,2
TT05	6,34	6,69	9,05	12,30	37,3	49,7	58,9	66,5
TT10	6,95	7,20	8,53	11,75	34,2	45,4	54,8	63,3
TT15	6,83	7,06	8,27	11,60	29,5	42,6	53,4	59,7
TT20	6,79	6,99	8,02	11,30	28,1	39,1	48,9	54,8
TT25	5,82	6,13	7,77	11,25	21,8	34,4	42,8	45,3
TT30	5,79	6,07	7,52	10,50	19,6	32,3	41,5	43,7

Tablo 5.8 UPV Sonuçları

Karışım	UPV (m/s)			
	3 gün	7gün	28 gün	91 gün
Kontrol	3729	4040	4417	4780
TT05	3756	4060	4412	4728
TT10	3738	4039	4298	4569
TT15	3662	3982	4253	4538
TT20	3607	3952	4070	4445
TT25	3589	3922	4063	4439
TT30	3478	3825	4069	4437

5.4.4. Kapiler Su Emme Deneyi

28 gün suda kür edilen numuneler üzerinde kapiler su emme deneyi yapılmıştır. Bu deneyin sonuçları grafik olarak 6. Bölümde verilmiştir. Ayrıca ek olarak numunelerin etüv kuru, doymun kuru yüzey ve su içindeki ağırlıkları bulunarak (Tablo 5.9) yoğunlukları, toplam % su emme ve poroziteleri de saptanmıştır. Bu sonuçlar tablo 5.10 ve tablo 5.11’ da verilmiştir.

Tablo 5.9 Numunelerin Etüv Kuru, Doygun Kuru Yüzey ve Su İçindeki Ağırlıkları

Karışım	Etüv Kuru Ağırlık (W ₁)	Doygun Kuru Yüzey Ağırlık (W ₃)	Su İçindeki Ağırlık (W ₂)
Kontrol	266,70	285,81	161,55
TT05	269,86	288,68	163,27
TT10	261,18	280,76	156,12
TT15	264,55	283,25	158,62
TT20	256,50	280,74	155,44
TT25	253,10	277,17	152,51
TT30	252,75	276,33	151,34

Numunelerin yoğunlukları, toplam su emme kapasiteleri ve poroziteleri aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır.

$$\text{Porozite (\%)} = (W_3 - W_1) * 100 / (W_3 - W_2) \quad (5.4)$$

$$\text{Toplam Su Emme Kapasitesi (\%)} = (W_3 - W_1) * 100 / W_1 \quad (5.5)$$

$$\text{Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk, } \delta_{dyk} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = W_3 / (W_3 - W_2) \quad (5.6)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk, } \delta_g \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) = W_1 / (W_1 - W_2) \quad (5.7)$$

Tablo 5.10 Toplam Su Emme kapasitesi ve Porozite

	Toplam Su Emme Kapasitesi (%)	Porozite (%)
Kontrol	7,17	15,39
TT05	6,97	15,01
TT10	7,50	15,70
TT15	7,07	15,00
TT20	9,45	19,35
TT25	9,52	19,32
TT30	9,33	18,87

Tablo 5.10 incelenirse tuğla tozu oranı %15’ den sonra arttıkça boşlukların da arttığı görülür. Yalnızca TT5 numunesi kontrolden daha düşük porozite yüzdesine ve dolayısıyla düşük toplam su emme kapasitesine sahiptir.

Tablo 5.11 Numune Yoğunlukları

	Doygun Kuru Yüzey Yoğunluk (gr/cm³)	Görünür Yoğunluk (gr/cm³)
Kontrol	2,30	2,54
TT05	2,30	2,53
TT10	2,25	2,49
TT15	2,27	2,50
TT20	2,24	2,54
TT25	2,22	2,52
TT30	2,21	2,49

6. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Bu bölümde, deneylerden elde edilen sonuçlar harçların taze ve sertleşmiş özellikleri açısından tartışılmaktadır.

6.1. İşlenebilirlik ve Kıvam

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklık, taze betonun taşınabilirliği, pompalanabilirliği, yerleştirilebilirliği, segregasyonu, sıkıştırılabilirliği ve yüzeyinin düzeltilebilirliği gibi kavramların tümü, betonun işlenebilme özelliği içerisinde yer alan kavramlardır [19].

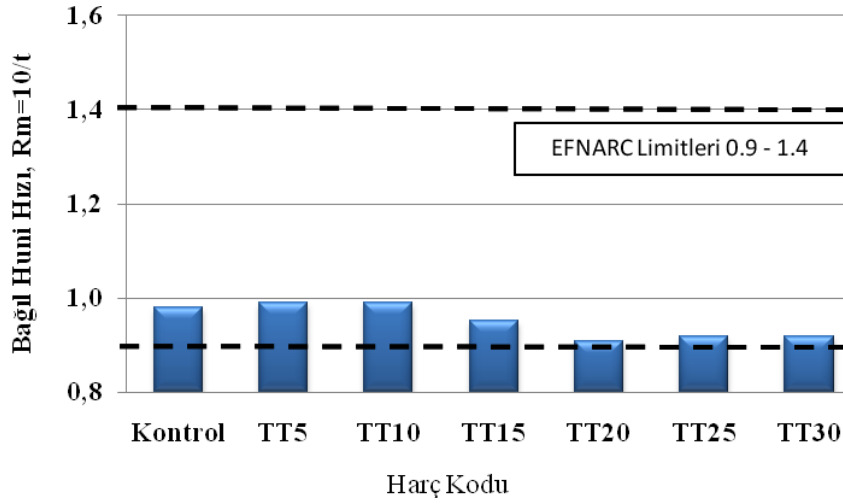
İşlenebilme özelliği, harcın yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir [19].

- Taze betonun kütlesinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı)
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık)
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olmaları, böylece, segregasyona karşı göstereceği direnç (kohezyon)
- Yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık (viskozite).

Kıvam ise taze beton karışımının ıslaklık derecesi anlamına gelmektedir [19].

Kendiliğinden yerleşen harcın akıcılığı ve kohezyonu, kıvam kavramı içerisinde yer almaktadır.

Bu çalışmada harçlar üzerinde yapılan deneylerle elde edilen mini çökme-yayılma ve mini V-hunisi hızı sonuçları alınmış, daha sonra bağıl huni hızı ve bağıl çökme-yayılma formüllerinden yola çıkılarak aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Her iki grafikte de bütün KYH karışımları için bulunan sonuçlar, referans değerleri arasında kalmıştır.

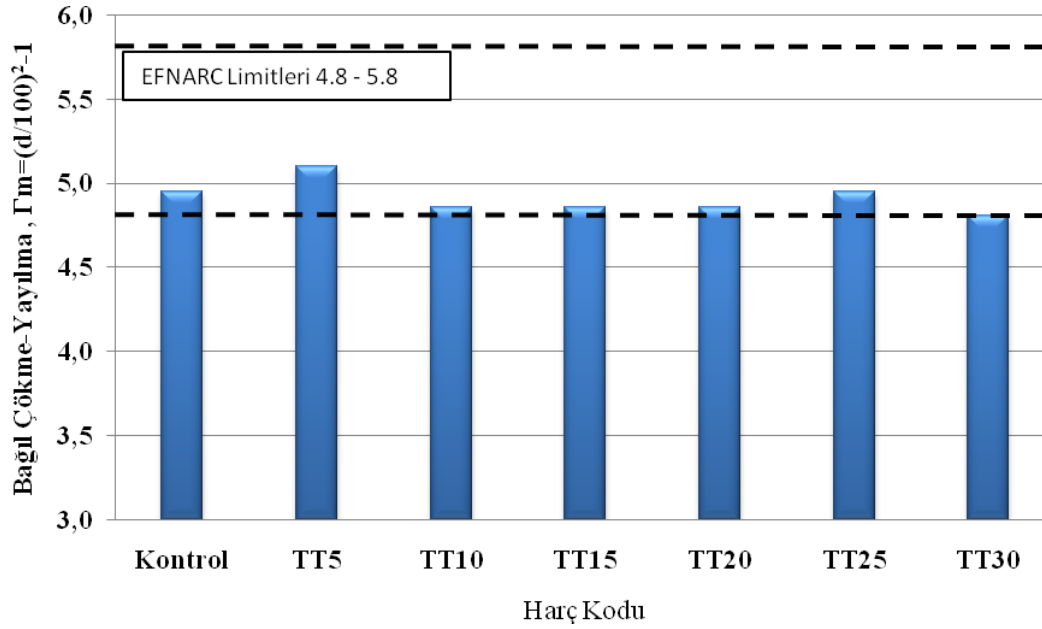


Şekil 6.1 Bağıl V-Hunisi Hızı

Bağıl huni hızı değerleri incelendiğinde en yavaş akma değerlerinin, TT20, TT25 ve TT30 harçlarına ait olduğu görülmektedir (Şekil 6.1). TT5 ve TT10 kodlu harçlarda ise akma hızı kontrol harcıyla yaklaşık olarak aynı değerdedir. TT10’ dan sonra bağıl huni hızı değerleri azalmaya başlamıştır. Burada akış hızının harçlar arasında önce artıp sonra azalmasının sebebi, tuğla tozu tanelerinin çimento tanelerine göre nispeten büyük olmasıdır. Kontrol, TT5 ve TT10 harçları aynı su/toz oranına sahiptir. Yüzey alanı çimentoya göre daha küçük olan tuğla tozu, TT5 ve TT10 harçlarında su ihtiyacını arttırmamıştır.

Bağıl çökme-yayılma grafiğindeyse en düşük çökme değerinin TT30’a ait olduğu görülür (Şekil 6.2). En büyük çökme-yayılma değerinin TT5 harcına ait olmasının sebebi, yukarıda da açıklandığı üzere, kontrol harcıyla aynı su/toz oranına sahip TT5 harcının içeriğindeki tuğla tozunun yüzey alanının küçük olmasıdır. Diğer harçların ise bazılarının çökmeleri kontrol harcıninkine göre düşmüştür.

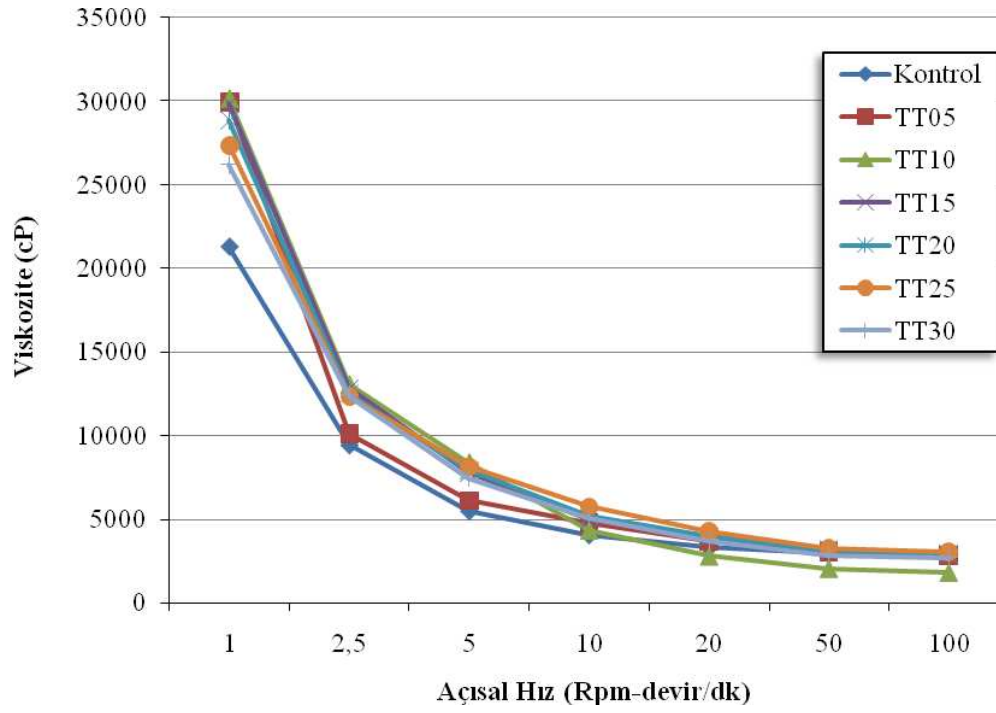
Bütün bu durumlara (bağıl huni hızının TT10’ dan sonra düşmesi ve bağıl çökme-yayılmanın TT5’ den sonra düşmesine), hammaddesi kil olan tuğla tozunun artmasıyla harçların viskozitelerinin artması ve tuğla tozunun karışım suyunu çok fazla bünyesinde toplaması, böylece akışkanlığın artması için gerekli olan suyun azalması sebep olmuştur. Yine de tuğla tozu bazı harçların işlenebilirliğini kontrole göre düşürmüş olsa da hiçbir harç karışımı EFNARC’ ın belirlediği referans değerlerinin dışına çıkmamıştır.



Şekil 6.2 Bağıl Çökme-Yayılma

Yapılan çalışmalar incelendiğinde ince malzemeler içinde en çok su ihtiyacını arttıran malzemenin tuğla tozu olduğu söylenebilir. Şahmaran v.d. [25] yaptıkları çalışmada uçucu kül, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve kaolen tozunu ince malzeme olarak kullanmışlar ve bu malzemelerle farklı kökenli kimyasal katkıları denemişlerdir. Tuğla tozunun ince malzeme olarak kullanıldığı durumda, KYH' ın akışkanlığının önemli derecede azaldığı görülmüştür. Ayrıca Topçu v.d. [8] çalışmalarında uçucu kül, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve mermer tozunun ince malzeme olarak kullanımı durumunda katkı gereksinimini incelemişler ve su/toz oranı en yüksek olan ince malzemenin tuğla tozu olduğunu böylece işlenebilirliği büyük ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca pişmiş kil içeren bir malzeme olarak tuğla tozunun su emme değerinin yüksek olduğunu ve bu nedenle ince malzemeler içerisinde en çok su gereksinimine sahip olan malzeme olduğunu belirtmişlerdir.

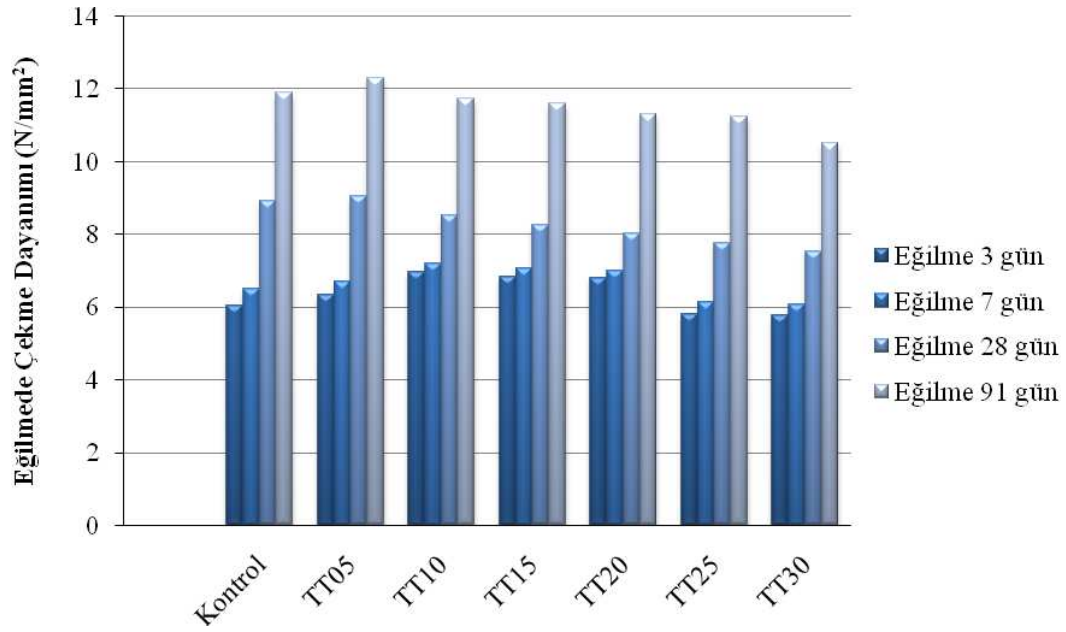
İşlenebilirlik ve kıvam hakkında bilgi vermesi amacıyla harçların viskoziteleri ölçülmüş ve şekil 6.3' deki grafik çizilmiştir. Bütün harçlarda dönel ucun açılma hızının artmasıyla viskozite azalmış ve viskozite eğrileri X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım göstermiştir. Eğrilere genel olarak bakıldığında, tuğla tozu içeren bütün harç karışımlarının viskoziteleri, kontrol harcından daha yüksektir. Bu özelliği ile tuğla tozu, genelde akışkanlığı düşürse de yapışkanlığı artırarak kohezyonun artmasına katkı sağlar.



Şekil 6.3 Viskozite Değişimleri

6.2. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı

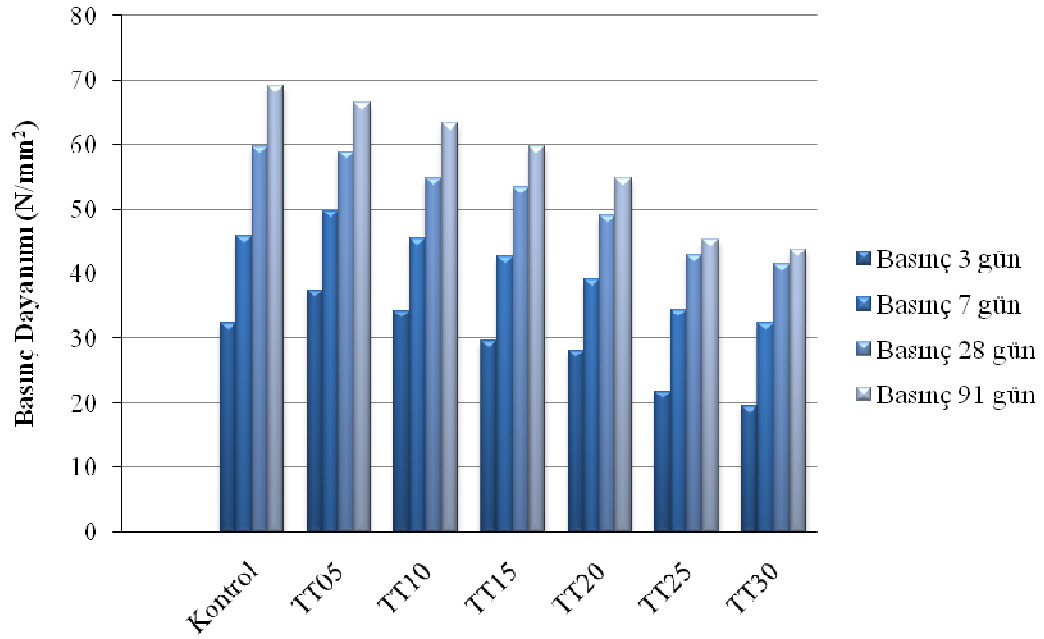
Numunelerin 3, 7, 28 ve 91 günlük üç noktalı eğilmede çekme ve basınç deney sonuçları alınmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Her iki grafiğe de bakılarak harçların, dayanımlarının büyük kısmını ilk yedi günde aldığı görülür.



Şekil 6.4 KYH'ların Eğilme Dayanımlarının Değişimleri

Eğilmede çekme dayanımı (Şekil 6.4) 'ne bakıldığında TT5 harcının bütün periyotlarda kontrol harcını bir miktar geçtiğini görülür. %10, 15 ve 20 tuğla tozlu numunelerde eğilme dayanımı ilk yedi gün için kontrolünkini aşmış olsa da sonraki günlerde eğilmede çekme dayanımında etkili olmamışlardır. %25 ve 30'luk karışımlarsa yüksek derecede yerleştirme boşluklarına sahip olduklarından, kontrol harcının eğilme ve basınç dayanımlarına ulaşamamışlardır.

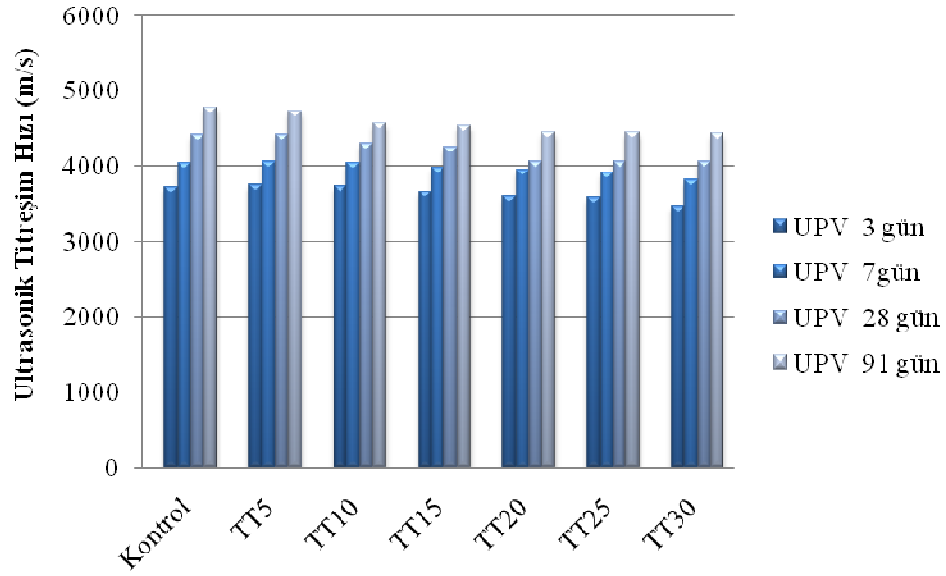
Basınç dayanımlarına bakılacak olursa (Şekil 6.5), üç günlük basınç numunelerinde TT5 ve TT10'un kontrolü geçtiği, yedi günlük numunelerde yalnızca TT5'in kontrolü geçtiği, TT10' un ise kontrolle neredeyse aynı basınç dayanımına ulaştığı, daha sonrasında ise tuğla tozunun etkili olmadığı görülür. 28 ve 91 günlük numunelerde %5 tuğla tozu içerenler kontrolün basınç dayanımına yakın değerlere ulaşmışlardır. Basınç dayanımının %5 oranından sonra bu şekile düşmesine tuğla tozunun içeriğindeki silisin azlığı sebep olmuştur. Özellikle %20, 25 ve 30 TT içeren numunelerde oluşan gerek dışa açık gerekse kapalı yerleştirme boşlukları bu numunelerin basınç dayanımını düşürmüştür. Ayrıca bu durum dolayısıyla plastik ve erken rötre çatlaklarında artış gözlemlenmiştir. Öte yandan kullanılan tuğla tozunun MgO oranının da yüksek olması çatlamalara yol açmış olabilir.



Şekil 6.5 KYH'ların Basınç Dayanımlarının Değişimleri

6.3. UPV-Rölatif Ses Hızı

Numunelerin 3, 7, 28 ve 91. Günlerdeki UPV değişimleri Şekil 6.6' daki gibidir. Üç ve yedi günlük UPV sonuçlarına bakıldığında yalnızca TT5 ve TT10 numunelerinin kontrole yaklaştığı görülür. Daha sonraki günlerde ise TT5, basınç dayanımındaki gibi kontrole yaklaşık değerlere ulaşmıştır fakat kontrolün UPV' sini geçememiştir. Bilindiği gibi UPV, ses hızı ölçümü olduğundan, ses hızı boşluksuz yapılarda büyük, boşluklu yapılarda küçük sayısal değer alır. Burada TT15'den sonraki karışımlarda yerleştirme boşluklarının artması sebebiyle numunelerin UPV' leri düşmüştür.

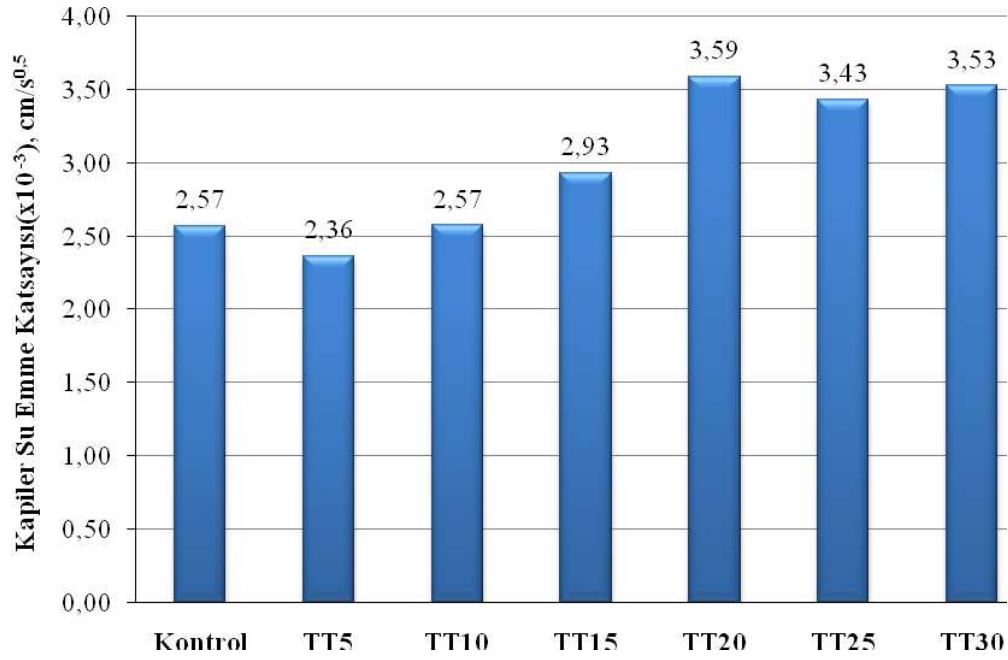


Şekil 6.6 UPV Değişimleri

6.4. Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme Kapasitesi ve Porozite

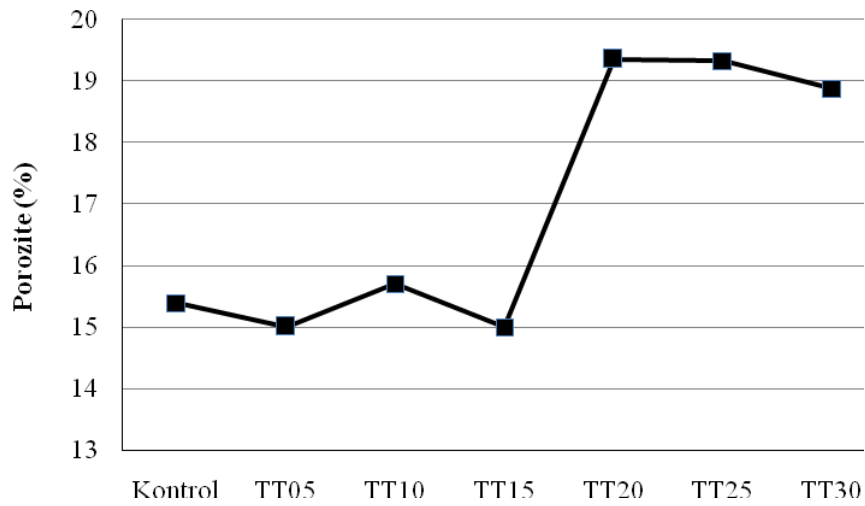
Yapılan kapiler su emme deneyi sonucunda şekil 6.7'deki grafik elde edilmiştir. Bu grafiğe göre en geçirimsiz numune TT5 numunesidir. Bunun sebebi TT5' in işlenebilirliğinin kontrole ve diğerlerine göre daha fazla olmasıdır. TT5 bu sayede daha iyi yerleşmiş ve geçirimsizliği artmıştır.

TT10 ve Kontrol numuneleri aynı kapiler su emme katsayısına sahiptir. TT15 ve sonrasında numunelerin kapiler boşluklarının artmasından ötürü su emme oranları da artmıştır. Şekil 6.7'deki grafik genel olarak incelendiğinde, özellikle de grafiğin 10^{-3} mertebesinde çizildiği göz önünde bulundurulursa numuneler arasında çok önemli bir fark olmadığı görülür.

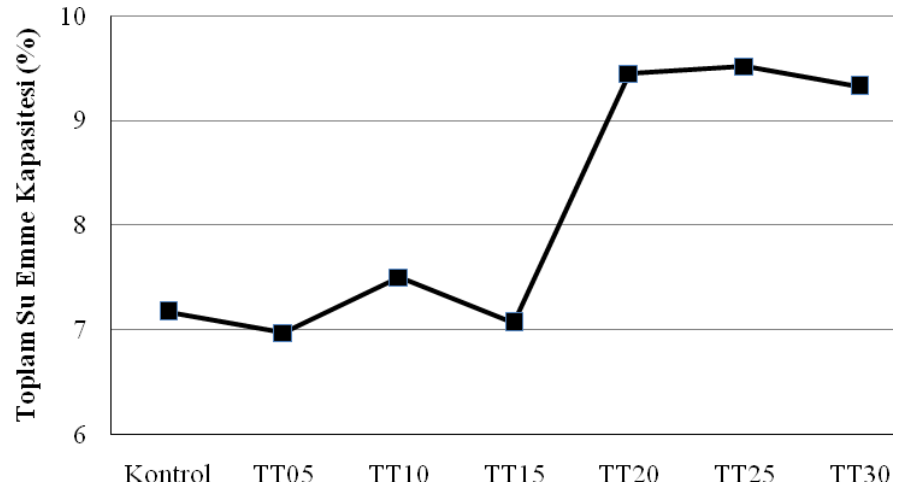


Şekil 6.7 Kapiler Su Emme Katsayıları

Şekil 6.8'e bakıldığında tuğla tozunun, %20 ve daha sonraki oranlarında poroziteyi ve dolayısıyla toplam su emme kapasitesini arttırdığını görüyoruz (Şekil6.9). Buradan yola çıkılarak tuğla tozunun %15 oranından daha fazla kullanımında yerleşme boşluklarını arttırdığını söyleyebiliriz. Bu boşluklar, hem dayanıma hem de durabilite özelliklerine olumsuz etkiler yapabilir.



Şekil 6.8 Boşluk Oranlarının Değişimi



Şekil 6.9 Toplam Su Emme Kapasite Değişimleri

7.SONUÇLAR

Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen harç içerisine çimento yerine ikame yoluyla katılan tuğla tozunun KYH' ın mühendislik özelliklerine etkileri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Harçların içerdiği ince malzemenin yüzeyinin su filmiyle kaplanması için gerekli su/toz oranı, hacimce 0,40 ile 0,42 arasındadır. Bu farklılık ile birlikte sabit katkı oranı da düşünülürse harçlar, işlenebilirlik özelliklerini kaybetmemişlerdir. Tuğla tozu harçların kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini değiştirmemiştir.
- Tuğla tozu harçların viskozitelerini arttırmıştır. Bu da kohezyonu artırıcı bir etki olarak görülebilir.
- Sabit katkı oranında su ihtiyacı, tuğla tozu %15 oranına kadar sabit kalmış daha sonra artmıştır.
- Tuğla tozu erken dayanımı arttırmış, fakat nihai dayanımda etkili olamamıştır.
- Tuğla tozunun %20 ve daha büyük oranlarda kullanımı yerleşme boşluklarının artmasına sebep olmuştur. Bu boşluklar sebebiyle numuneler hem daha dayanıksız hem de daha geçirimli olmuşlardır.
- Kapiler su emme deneyi sonucunda bulunan katsayılar, Kontrol numunesi ile TT10 numunesi için aynı olup, %10 'dan fazla tuğla tozu içeren numuneler için bu katsayı yükselmiştir. Buna göre en geçirimsiz numune, TT5 numunesidir.

KAYNAKLAR

1. CHRISTIANTO H. A., August 2004, “Effect Of Chemical And Mineral Admixtures On The Fresh Properties Of Self Compacting Mortars” The Graduate School Of Natural And Applied Scinces Of Middle east Technical University, 77 p.
2. FELEKOĞLU B., Ağustos 2003, “Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 267 s.
3. EFNARC, (2002). “Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete”, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org, ISBN 0 953973344, 32p.
4. EFNARC, May 2005, “European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use”, Association House, UK, (www.efnarc.org), 68 p.
5. FERRARİS, C.F., (1999). “Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report”, Journal of the National Institute of Standards and Technology, Volume 104.
6. FERRARİS C.F., (1995). “Testing of selected Self-Leveling Compounds for Floors”, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5633, January, 27 p.
7. TANG C.W., YEN T., CHEN K.H., (2000). “The rheological behavior of medium trength high performance concrete”, Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. In the 2000s, Volume II, Istanbul, Turkey.
8. TOPÇU, İ. Bekir, ÜNAL, Osman, UYGUNOĞLU, Tayfun, “Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması”, 2. Yapılarda Kimyasal Katkıları Sempozyumu, 13 s.
9. SAĞLAM, A.R., (2000), “Süperakışkanlaştırıcı Ve Viskozite Arttırıcı Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi”, Sika Teknik Bülten, 2000/4, s. 9-16.
10. YAMADA, K., TAKAHASHİ, T., HANEHARA, S., MATSUHİSA, M., (2000). “Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer”, Cem. Concr. Res., Vol: 30.

11. GÜROL, G., (1999). “Ekonomik beton için beton bileşenleri çimento/su/ince ve kaba agrega/kimyasal ve mineral katkılar”, Dizayn ve Konstrüksiyon Dergisi, 1999/164 Haziran, s. 66-74.
12. DANZİNGER, M.W., SAİTOH, K., JOST, P., (2002). “Self-Consolidating Concrete: Key Learning and Their Effects on Current Applications”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 417-422.
13. FELEKOĞLU, Burak, BARADAN, Bülent,(2006) “Akışkanlaştırıcı Katkıların Harçta Su Kesme Performansı-Mukavemet İlişkisine Etkileri”, İMO Teknik Dergi.
14. İNCE, Ragıp,(2005) ”Yapı Malzemesi Ders Notları”, Fırat Üniversitesi, 46 s.
15. JİN, J., DOMONE, P.L., (2002). “Relationships Between the Fresh Properties of SCC and Its Mortar Component”, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
16. KARATAŞ, M. ,(2007), “Mineral Katkı Dozajının Ve Türünün Kendiliğinden Sıkışan Betondaki Donatı Aderansına Etkisi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 90 s.
17. SAĞLAM, Ali R., ÖZKUL, M. Hulusi, Şubat 2006, “Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Özelliklerine Bileşim Parametrelerinin Etkisi”, İTÜ dergisi.
18. KANDEMİR, Ali, Eylül 2005, “Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 188 s.
19. ERDOĞAN, Turhan Y. (2003), “Beton” ,METU Pres , Ankara, 741 s.
20. ŞİMŞEK, Osman, (2007), “Beton ve Beton Teknolojisi”, Seçkin, Ankara, 230 s.
21. SÜMER, M., SÖNMEZ, H.T. , UYSAL, M. , “Yüksek Fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Betona Etkileri”, Sakarya Üniversitesi.
22. PETERSON Ö. , (2002), “Limestone Powder As Filler In Self-Compacting Concrete-Frost Resistance, Compressive Strength And Chloride Diffusivity” , First North American Conference On The Design And Use Of Self-Consolidating Concrete, pp. 391-396.
23. Sika® ViscoCrete® Hi-Tech 36, Yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı, Ürün Bilgi Föyü. www.sika.com.tr . 15/07/2009.
24. TS 4045, 1984, Yapı malzemelerinde kapiler su emme tayini, TSE, Ankara.

25. ŞAHMARAN, M., CHRISTIANTO, H.A., YAMAN, İ.Ö., (2006), “The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars”, *Cement & Concrete Composites* (28) 432-440.

ÖZGEÇMİŞ

Merve AÇIKGENÇ, 1985 yılında Ankara’ da doğdu. 2002 yılında Elazığ Balakgazi Lisesinden mezun oldu. 2003-2007 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimi aldı ve bu bölümden 74,76/100 not ortalamasıyla bölüm ikincisi olarak mezun oldu. 2007-2009 yılları arasında aynı bölümde yapı alanında yüksek lisans eğitimini tamamladı.