

**FARKLI TÜRDE MİNERAL KATKI KULLANIMININ
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN
TAZE FAZ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Adil Orçun KAYA
(501091084)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Ekim 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Kasım 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)
Yrd.Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN (İTÜ)**

KASIM 2010

En değerli meslektaşım babam Vehbi KAYA'ya,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşarak yardımcı olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a;

Başta, hayatım boyunca bir an olsun desteklerini esirgemeyen, her kararında arkamda duran, eğitim hayatım boyunca çektiğim bütün sıkıntıları paylaşan ve bir gün onlar gibi olabilmeyi dilediğim annem Sultan KAYA ve babam Vehbi KAYA olmak üzere bütün aileme;

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca her an yanımda olan, iyi kötü her şeyi paylaşarak kendimi hiç yalnız hissettirmeyen ve başarılarımda büyük pay sahibi olan kız arkadaşım Sema GÖÇMEN'e ve;

Deneyisel çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı Yapı Malzemesi Laboratuvar'ı Teknisyenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2010

İnş. Müh.
Adil Orçun KAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	5
2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri	7
2.1.1. Çimento	8
2.1.2. Agregası	8
2.1.2.1. İri agregası	8
2.1.2.2. İnce agregası	9
2.1.3. Beton karma suyu.....	9
2.1.4. Katkıları.....	9
2.1.4.1. Kimyasal katkıları	10
Süper akışkanlaştırıcı katkıları	11
Viskozite düzenleyici katkıları.....	12
Diğer kimyasal katkıları	13
2.1.4.2. Mineral katkıları	14
Puzolanik mineral katkıları	14
Uçucu kül	14
Silis dumanı.....	16
Filler mineral katkıları	18
2.1.5. Lifler.....	19
2.2. Taze Beton.....	19
2.2.1. Taze Betonun Özellikleri.....	20
2.2.1.1. Doldurma Yeteneği	20
2.2.1.2. Geçme Yeteneği	20
2.2.1.3. Ayırışma Direnci	21
2.2.1.4. Akma Oranı	22
2.2.1.5. Pompalanabilirlik	22
2.2.2. Reoloji	23
2.2.2.1. Newton'a uyan akış	24
2.2.2.2. Newton'a uymayan akış	26
2.2.2.3. Taze betonun reolojisi ve kıvamı (işlenebilirliği)	28
2.3. Taze Beton Deneyleri.....	28
2.3.1. Çökme-akma deneyi.....	29
2.3.2. V-hunisi deneyi	31

2.3.3. L-kutusu deneyi	32
2.3.4. U-kutusu deneyi.....	33
2.3.5. Elek ayrışması direnci deneyi.....	34
2.4. Karışım Tasarımı	35
2.4.1. Beton gereksinimleri	36
2.4.2. Karışım tasarım prensipleri	39
2.4.3. Temel karışım prosedürleri.....	40
2.5. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mühendislik Özellikleri	44
2.5.1. Basınç dayanımı ve statik elastisite modülü.....	44
2.5.2. Çekme ve kayma dayanımı	44
2.5.3. Sünme	45
2.5.4. Büzülme (Rötre)	45
2.5.5. Donatı ile beton arası aderans.....	46
2.5.6. Dayanıklılık	46
2.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri	47
2.6.1. Ultrases deneyi	48
2.6.2. Basınç dayanımı deneyi.....	48
2.6.3. Üç noktalı eğilme deneyi.....	49
2.7. KYB’de Oluşabilecek Bazı Sorunlar ve Çözümleri	51
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	57
3.1.1 Çimento	57
3.1.2 Agrega	58
3.1.3 Mineral katkıları	59
3.1.4 Kimyasal katkıları	59
3.1.5 Karışım suyu	60
3.2 Karışımlar.....	60
3.3 Beton Üretimi	61
4. DENEY SONUÇLARI	63
4.1 Çökme-Akma Deneyi Sonuçları.....	63
4.2 V-Hunisi Deneyi Sonuçları	64
4.3 L-Kutusu Deneyi Sonuçları	64
4.4 U-Kutusu Deneyi Sonuçları	65
4.5 Ultrases Deneyi Sonuçları	65
4.6 Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları.....	66
4.7 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	66
4.8 Üç Noktalı Eğilme Deneyi Sonuçları	67
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	69
5.1 Yayılma Sürelerinin Değerlendirilmesi.....	69
5.2 t_{500} Sürelerinin Değerlendirilmesi	70
5.3 V-Hunisi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
5.4 L-Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	72
5.5 U-Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	72
5.6 Ultrases Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	73
5.7 Elastisite Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	74
5.8 Basınç Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	75
5.9 Üç Noktalı Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	75
6 GENEL SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
SCC	: Self-Compacting Concrete
SLC	: Self-Levelling Concrete
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı
VDK	: Viskozite Düzenleyici Katkı
F serisi	: Uçucu kül içeren karışımlar
L serisi	: Kireç taşı filler içeren karışımlar
S serisi	: Kum taşı filler içeren karışımlar
EFNARC	: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
JSCE	: Japan Society of Civil Engineers
ACI	: American Concrete Institute

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	: Uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi.	16
Çizelge 2.2	: Silis dumanı kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi.....	17
Çizelge 2.3	: KYB'nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın testler.	29
Çizelge 2.4	: KYB için en çok kullanılan taze faz testleri.....	29
Çizelge 2.5	: KYB karışımı tasarım adımları	35
Çizelge 2.6	: KYB özelliklerinin sınıflandırma değerleri.....	36
Çizelge 2.7	: Çeşitli uygulama tipleri için KYB özellikleri.....	39
Çizelge 2.8	: JSCE'nin belirlediği başlangıç karışım oranları.....	41
Çizelge 2.9	: ACI'nın belirlediği başlangıç karışım oranları.....	41
Çizelge 2.10	: Sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için uygulanan testler.....	47
Çizelge 2.11	: Betonda have delikleri oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları.	51
Çizelge 2.12	: Beton yüzeyinde görülen düşey çizgiler ya da su nedenli oyulmalarınsebepleri ve çözüm yolları ...	52
Çizelge 2.13	: Betonda renk değişikliklerinin sebepleri ve çözüm yolları.	52
Çizelge 2.14	: Kalitesiz, pürüzlü döküm yüzeyinin sebepleri ve çözüm yolları.	53
Çizelge 2.15	: Betonda oluşan peteğimsi deliklerin sebepleri ve çözüm yolları.	53
Çizelge 2.16	: Betonda pullanma oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları.	54
Çizelge 2.17	: derz oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları ...	54
Çizelge 2.18	: Plastik çatlama oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları.	55
Çizelge 3.1	: Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi.....	57
Çizelge 3.2	: Kullanılan çimentonun basınç dayanımı sonuçları.	57
Çizelge 3.3	: Kullanılan agregaların özellikleri ve elek analizleri.....	58
Çizelge 3.4	: Agreg ve ince malzemelerin özgül ağırlıkları ve su emme oranları.	59
Çizelge 3.5	: Glenium 51'in teknik özellikleri.	60
Çizelge 3.6	: Rheomatrix 100'ün teknik özellikleri.....	60
Çizelge 3.7	: Karışımların ince malzeme ve katkı bileşimleri.....	61
Çizelge 3.8	: Karışımların agrega bileşimleri.	61
Çizelge 4.1	: Yayılma miktarları ve t ₅₀₀ süreleri.....	63
Çizelge 4.2	: V-hunisi akma süreleri.	64
Çizelge 4.3	: L-kutusu geçme oranları.....	64
Çizelge 4.4	: U-kutusu dolma yükseklikleri	65
Çizelge 4.5	: Ultrases dalga hızları.	65
Çizelge 4.6	: Elastisite modülleri.....	66
Çizelge 4.7	: Basınç dayanım değerleri.	67
Çizelge 4.8	: Eğilme enerjileri ve eğilme dayanımları	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Newton'a uygun laminar viskoz akış.	25
Şekil 2.2 : Newton'a uyan akış için Kayma gerilmesi – Kayma oranı.	26
Şekil 2.3 : Newton'a uymayan akış için akma tipleri.	27
Şekil 2.4 : Çökme – akma testi taban levhası.	31
Şekil 2.5 : V-Hunisi.	32
Şekil 2.6 : L-Kutusu.	33
Şekil 2.7 : U-Kutusu ...	34
Şekil 2.8 : Küçük ölçekli çökme-akma testi hunisi ve yayılması.	42
Şekil 2.9 : Küçük ölçekli V-Hunisi.	43
Şekil 3.1 : Kullanılan agrega karışımının granülometre eğrisi.	59
Şekil 5.1 : Yayılma – Mineral katkı oranı.	69
Şekil 5.2 : t_{500} – Mineral katkı oranı.	70
Şekil 5.3 : V-hunisi akma süresi – Mineral katkı oranı.	71
Şekil 5.4 : L-kutusu geçme oranı – Mineral katkı oranı.	72
Şekil 5.5 : U-kutusu dolma yüksekliği - Mineral katkı oranı.	73
Şekil 5.6 : Ultrases dalga hızı - Mineral katkı oranı.	74
Şekil 5.7 : Elastisite modülü - Mineral katkı oranı ...	74
Şekil 5.8 : Basınç dayanımı - Mineral katkı oranı.	75
Şekil 5.9 : Eğilme enerjisi - Mineral katkı oranı.	76
Şekil 5.10 : Eğilme dayanımı - Mineral katkı oranı.	76

FARKLI TÜRDE MİNERAL KATKI KULLANIMININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Geleneksel betonun en önemli dez avantajlarından birisi olan sıkışma problemini ortadan kaldıran KYB ülkemizde henüz istenilen seviyede kullanım görmemektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri işçilik, enerji gibi alanlarda tasarruf sağlamasına rağmen kullanılan kimyasal genelde kullanılan kimyasal katkıların getirdiği ekstra maliyetin diğer tasarrufları aşmasıdır. Maliyeti yükselten bu katkılardan en önemlileri ve KYB'nin temel bileşenleri olan süper akışkanlaştırıcılar ve viskozite düzenleyici katkılardır.

Bu çalışmanın amacı toz malzeme olarak sadece çimento içeren bir referans karışımın çimento dozajını belli oranlarda azaltılıp yerine farklı mineral katkıları eklendiğinde KYB'nin taze faz ve bazı mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiğini incelemektir. Kullanılan mineral katkıların çimento ve kimyasal katkılara kıyasla düşük maliyetli olması nedeniyle çimento ve çimentoya bağlı olarak kimyasal katkı miktarlarının azalması KYB'nin maliyetini düşürür.

Bu amaçla 500 kg/m³ çimento dozajlı 1 referans karışım ve referans karışımın çimento dozajını kütlece %20,%30 ve % 40 oranlarında azaltıp uçucu kül, kireç taşı filler veya kum taşı filler eklenmiş üçer karışım üretilmiştir. Uçucu kül içeren karışımlardaki uçucu kül oranları referans karışımdaki çimento oranının %20, %30 ve %40'ı filler içerikli diğer karışımlarda ise hacim farkını dengelemek amaçlı %24, %36 ve %48'dir.

Üretilen karışımlara, karıştırma işleminin ardından kalıplara dökülmeden önce taze faz deneylerinden t_{500} süresinde ölçüldüğü çökme-akma, V-hunisi, L-kutusu ve U-kutusu deneyleri yapılmıştır. Ardından kalıplara dökülen betonlar 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra kalıplar sökülerek 28. günün sonuna kadar su, 35. günün sonuna kadar hava kürüne tabi tutulmuştur. 35. günün sonunda numunelerin basınç deneyi ile elastisite modülleri ve basınç dayanımları, ultrases deneyi ile mikro yapı yoğunlukları hakkında yorumlar ve üç noktalı eğilme deneyi ile eğilme dayanımları ve enerjileri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde belirtilen oranlarda çimento – mineral katkı değişiminin doldurma ve geçme yeteneğinde belirgin bir değişime sebep olmadığı, viskozitede ise düzensiz değişimlere neden olduğu görülmüştür. Ancak bu değişimler KYB'nin temel özelliklerini önemli ölçüde etkileyecek kadar büyük değildir.

Diğer mekanik özelliklerden eğilme dayanımı ve enerjisinde küçük ama düzensiz değişimler olmuştur. Ultrases ve elastisite değerlerinde ise belirgin değişimler olmamıştır.

Mekanik özelliklerde ise en belirgin ve düzgün değişiklik basınç dayanımlarında görülmüştür. Her üç mineral katkı türünde mineral katkı – çimento değişim oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü görülmüştür. Uçu kül ve kireçtaşı filler içeren karışımların basınç dayanımları benzerdir ancak kum taşı filler içeren karışımların basınç dayanımı diğer karışımlardan önemli oranda düşüktür. Ancak tüm karışımların basınç dayanımları yüksek dayanımlı beton olarak sınıfdandırılmaları için yeterlidir.

EFFECTS OF DIFFERENT ADDITIVE TYPES ON THE WORKABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

SUMMARY

SCC which solve the compaction problem, one of the most important problems of traditional concrete, has not extensive usage field concrete industry in Turkey. One of the most important reasons of this chemical admixtures' high costs. For SCC, most important of these high cost admixtures are superplasticizers and viscosity agent admixtures because these are base component of SCC.

The main purpose of this work is examining the effects of the reducing cement dosage of a reference mix which includes only Portland cement as powder material, and adding different additive types on fresh phase and mechanical properties. Used additives are cheaper than cement and used admixtures so cement and admixtures costs reduce.

For this purpose one reference mix which has 500 kg/m³ cement dosage and three each mixes which contain one of fly ash, limestone filler and sandstone filler. Cement dosages of these 9 mixes reduced 20%, 30% or 40% by mass. Fly ash rates are 20%, 30% and 40% by mass of cement dosage of reference mix. These rates are 24%, 36% and 48% for both filler types for reducing volume difference between fly ash content and filler contents which comes from unit mass difference of them.

After mixing process, slump-flow, V-funnel, L-box and U-box test was applied to all mixes. All specimens were kept in their molds for 24 h. After demolding, they were stored in a water tank, saturated with lime at 20 °C until 28 days old, and then laboratory air-cured until testing at 35 days.

At the 35th day specimens were subjected to ultrasound, compressive strength and three point flexural tests and ultrasound pulse velocity, modulus of elasticity, compressive strength, toughness and flexural strength values were obtained.

When obtained results analyzed, it's clear that cement – additive changings by specified rates do not change the filling and passing abilities significantly. As for viscosity, irregular variances are occur but these are not important and not effect the base properties of fresh SCC at big rates.

Additives not show distinct effect on ultras pulse velocity and modulus of elasticity and show small but irregular effects on flexural strength and thoughness. Most significantly and regular variation in mechanical properties were shown on the compressive strength. Results show that at all 3 additive types when cement – additive changing rates increase, compressive strength decrease. Compressive stengths of fly ash or limestone filler including mixes are similar but sandstone filler including mixes' strengths are smaller than other at same changing rates. All mixes compressive strengths are enough for calling as high strength concrete.

1. GİRİŞ

Beton, uzun yıllardan beri en önemli yapı malzemesi olma özelliğini korumuştur. Güncelliğini kaybetmeyen beton, bütün inşaatlarda az veya çok kullanılmaktadır. Betonun kullanılma sebebi; şekil verilebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılığı, ekonomik oluşu, kullanım ve üretimde pratikliğidir.

Betonun teknik özelliklerinin gelişmesi ile birlikte betonda, dayanım özelliği kadar estetik, ekonomiklik, permabilite, elastiklik, enerji tokluğu gibi niteliklerde aranılır olmuştur. Bu amaçla betonun performansı iyileştirilmekte, döküm ve yerleştirilme hızı yükseltilmekte, üretimi endüstrileşmekte ve daha ekonomik hale gelmektedir.

Geleneksel betonun temel sorunlarından biri, betonu sıkıştırmak için gerekli olan dış enerjidir. Sıkıştırma işlemi uygulama alanında vibratörlerle, beton fabrikalarında sarsma tablalarıyla ya da alternatif yöntemlerle yapılabilir. Betonla yapılan çalışmalar, yerinde üretimde, vibrasyonun her zaman tam olarak yapılamadığını göstermiştir. Vibrasyonun, üretilen betonun kalitesi için yararlı olduğu açıktır. Vibrasyon yapılmayan geleneksel betonun kalitesi, sıkıştırılmış halininkinden çok düşüktür. Güçteki kayıp bazı durumlarda belki kabul edilebilir ama donatının korozyonu, donma hasarı, sülfat atağı vb. bozunma işlemlerini hızlandırdığından durabilitedeki düşüş çok daha önemli olabilir.

Modern KYB'nin en iyi bilinen gelişim akımı Japonya'da başlamıştır. Savaş sonrası 1950 ve 1960'larda Japonya'nın yeniden inşası bir inşaat patlaması ortaya çıkarmış ve hızlı üretim çabası kalitenin önemini gölgelemiştir. 10-20 yıl içinde birçok betonarme yapı bozunmaya başlamıştır. Tokyo Üniversitesi'nin yürüttüğü betonun durabilitesinin geliştirilmesi projesi, bozunmanın en büyük nedeninin olduğunu belirttikleri yetersiz sıkışmayı önlemek için taze betonun işlenebilirliğini arttırarak sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Tam ölçekli denemeler yapılmış ve "kendiliğinden yerleşen" beton 1990'ların başında Japonya'da kullanılmaya başlanmıştır. Kullanımı gitgide yaygınlaşan kendiliğinden yerleşen beton aynı zamanda yüksek akışkanlıklı beton, yüksek işlenebilirlikli beton ve kendiliğinden sıkışan beton olarak da anılmaktadır.

Kendiliğinden yerleşen betonun en önemli özellikleri kendi ağırlığıyla akması, gerekli boşlukları ve kalıbı tamamen doldurması, herhangi bir sıkıştırma işlemi olmaksızın yoğun ve yeteri kadar homojen bir ürün oluşturmastır. KYB, akışkan betonun aksine sadece yüksek işlenebilirliğe sahip değildir, herhangi bir sıkıştırma işlemi gerektirmez, segregasyonu engelleyecek kadar koheziftir, taşıma ve yerleşme boyunca sabit bileşimini korur [1].

KYB, konvansiyonel betonla kıyaslandığında birçok avantaj sunar:

- İnşaat alanının çevresinde ve prekast beton fabrikalarında gürültü önemli ölçüde düşer. Böylece üretimde bulunan kişiler ve kasıtsız olarak çevrede olanlar için çevresel şartlar daha iyi olur. Bu özelliğiyle KYB, “sessiz beton” olarak ifade edilir.
- Mekanik vibrasyon, üretim ekibi için sağlıksız bir iştir. Vibrasyon, “beyaz parmak” a yol açan kan sirkülasyon problemlerine neden olabilir. KYB bunun için bir çözümdür ve bu özelliğiyle “sağlıklı beton” olarak ifade edilir.
- Kendiliğinden yerleşen karışımlar sertleşmiş fazda homojen betonlar verir çünkü kalite, mekanik vibrasyonun kalitesinden bağımsızdır. Bu sayede kötü işçiliğin etkileri oldukça azalır. KYB bu yönüyle de “toleranslı beton” olarak anılır.
- KYB ile özel şekilli beton elemanların üretimi, yoğun donatılı ya da erişilmesi güç noktaların doldurulması gibi özel problemleri çözmek mümkündür.
- Vibrasyon gerekmediğinden işçiler daha etkin kullanılabilir böylece maliyetten önemli ölçüde tasarruf edilir [2].

KYB üretirken, işlenebilirliği arttırmak ve ayrışmayı düşürmek için kimyasal katkı kullanmak şarttır. KYB’de iri agrega içeriği ve su/ince malzeme oranı geleneksel betondakinden daha düşüktür. Bu nedenle taze karışımda iri parçaların ağırlık farkı ayrışmasını önlemek için KYB yüksek miktarda uçucu kül, kireçtaşı, yüksek fırın cürufu gibi ince malzeme içerir. Ayrıca kimyasal katkıları pahalı olduğundan malzemenin fiyatını yükseltebilirler. İşçilik maliyetinden yapılan tasarruflar artan fiyatı telafi edebilir ancak kullanılan bu ince malzemeler maliyeti arttırmadan betonun özelliklerinde iyileşme sağlayabilir. Ayrıca bu alanda yapılan araştırmalar uçucu kül kullanımının reolojik özellikleri geliştirdiğini ve çimentonun hidratasyon ısısına bağlı oluşan çatlakları azalttığını göstermiştir [3,4].

Bu alışmada KYB'nin maliyetini dūřürmek veya bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan mineral katkılardan uçucu kül, kireçtaşı filler ve kumtaşı fillerin KYB'nin temel taze faz özelliklerine ve sertleşmiş fazdaki mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 10 karışım üretilmiştir. İlk karışım ince malzeme olarak sadece imento içeren referans betondur. Referans betonun imento dozajı %20, %30 ve %40 oranlarında azaltılıp uçucu kül, kireçtaşı filler veya kumtaşı filler eklenmiştir. Yeni karışımlarda mineral katkı oranı (referans betonun imento dozajına oranı) uçucu kül için azaltılan imento miktarı ile aynı olup %20, %30 ve %40'dır. Ancak filler katkıların birim hacmi uçucu küle göre dūřük olduğundan ağırlıkça yüzdesi biraz daha arttırılmış ve %24, %36 ve %48 oranlarında kullanılmıştır.

Üretilen karışımlara, kalıplara dökölmeden önce taze fazda çökme-akma, V-hunisi, L-kutusu ve U kutusu testleri uygulanmıştır. Kalıplara dökölen karışımlar 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve 28. günün sonuna kadar suda kürlenmiştir. 28. günde sudan çıkartılan numuneler testlerin yapılacağı 35. güne kadar hava küründe tutulmuştur. Her karışımından basınç dayanım deneyi için 10 cm çap, 20 cm yüksekliğe sahip 3 silindir numune ve üç noktalı eğilme deneyi için 10x10x28 cm boyutlu 3 prizma numune üretilmiştir.

2. LİTERATÜR

İlk çağlarda malzemeler doğada bulunduğu şekliyle kullanılmaktaydı. Daha sonraki süreçte, malzeme bilimine paralel olarak insanlardaki düşünce ve becerilerin gelişimi ile doğadaki malzemeler işlenip şekillenerek kullanılmaya başlandı [5].

Çok ilginç bir yapı malzemesi olan beton bir bakıma çok basittir: herhangi bir kişi su, çimento ve agregayı karıştırıp herhangi bir şekilde dökerek belli bir dayanıma sahip bir yapay taş elde edebilir. Diğer bakımdan son derece karışık bir malzemedir: hiç kimse betonun taze ve sertleşmiş haldeki kompleks davranışını tam anlamıyla anlayamaz. Bu belirsizlik en çok kullanılan yapı malzemesi olan betonu doğru olarak tasarlanmadığı veya yerleştirilmediği takdirde birçok problem yaratan bir malzeme yapar [1].

Beton, uzun yıllardan beri en önemli yapı malzemesi olma özelliğini korumuştur. Güncelliğini kaybetmeyen beton, bütün inşaatlarda az veya çok kullanılmaktadır. Betonun kullanılma sebebi; şekil verilebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılığı, ekonomik oluşu, kullanım ve üretimde pratikliğidir [5].

Betonlar genellikle yoğunluklarına, basınç dayanımlarına, üretim yerlerine göre gruplara ayrılırlar.

- Yoğunluklarına göre betonlar:

Hafif Beton: Etüv kuru yoğunluğu $0,8-2,0 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen betondur.

Normal Beton: Etüv kuru yoğunluğu $2,0-2,6 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen betondur.

Ağır Beton: Etüv kuru yoğunluğu $2,6 \text{ kg/dm}^3$ 'ün üzerinde olan betondur.

- Basınç dayanımlarına göre betonlar:

TS 500, C50'ye varan beton sınıflarını öngörmekle birlikte TS 11222, C100'e kadar beton sınıflarını hedeflemektedir. Buna karşın Eurocode 2 de normal beton sınıfları C80'e varmaktadır. Avrupa'da Almanya'nın öncülüğünde C60-C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım kodları geliştirilmektedir. Bu aralıktaki betonlar

yüksek dayanımlı olarak kabul edilirler. Bu sınıflandırmalar 28 günlük basınç dayanımına göre yapılır [6].

- Üretim yerlerine göre betonlar

Şantiye betonu: Şantiye alanında üretilen betonlardır

Santral betonu: Beton santrallerinde üretilip inşaat alanına getirilen betonlardır

- Üretim amacına göre betonlar:

Normal betonlar: Günümüzde yaygın olarak kullanılan geleneksel beton olarak da adlandırılan beton tipidir. Yüksek dayanımlı ve çok yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldıklarında çekme, eğilme ve basınç dayanımları açısından oldukça zayıf kalmaktadırlar.

Özel betonlar: Oluşan ihtiyaca göre normal betonlara kıyasla basınç, çekme, eğilme dayanımı, süneklik, kimyasal dayanıklılık gibi niteliklerinin geliştirilmesiyle özel bir amaca hizmet eden betonlardır. Genel olarak normal betonlardan farklı olarak silis unu, silis dumanı, uçucu kül gibi filler malzemelerin yanı sıra süper akışkanlaştırıcılar, hava sürükleyiciler, viskozite arttırıcılar gibi katkıları kullanılır [5].

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

Kendiliğinden yerleşen beton günümüz beton teknolojisinde uygulamaya geçiş dönemini yaşamaktadır. Gelişmiş ülkelerde KYB teknolojisine geçiş daha kolay ve hızlı; gelişmekte olan ülkelerde ise yavaş ve problemli olacaktır. Bu dönemin uzunluğu, yapılacak teorik ve pratik çalışmaların uygulanabilirliğinin sektör tarafından değerlendirilmesine bağlıdır.

Kendiliğinden yerleşen beton literatürde üç farklı isimde anılmaktadır. Literatürde en yaygın kullanılanı Kendiliğinden Sıkışan Beton (Self-Compacting Concrete - SCC) 'dur. Özellikle döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeysel alanlarda kullanılması halinde, Kendiliğinden Yüzeylenen Beton (Self-Levelling Concrete - SLC) adı kullanılmaktadır. Kendiliğinden Yüzeylenen Beton'dan kendi ağırlığı ile her 4

metrede 1 mm'den fazla kot farkı oluşturmaksızın, akarak yatay konum alması beklenmektedir.

Günümüzde özel tip betonlar sınıfında sayılabilen, 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, dizayn 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. Böyle bir durumda KYB kullanımı en akılcı çözüm olur.

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 ağzlarında donatı yoğunlaşmakta ve aşırı vibrasyona gereksinim duyulmaktadır. Böyle durumlarda KYB kullanımının inşaat hızını arttırıcı etkisini de göz önünde bulundurmak gerekir.

Hafif beton üretiminde KYB uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır. Hafif KYB üretiminde gerek hafif agreganın kullanımı, gerekse yüksek oranda hava sürükleyici kimyasal katkı kullanımı ile hamur fazının hafifletilmesi yaygın kullanılan yöntemlerdir [7].

2.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri

KYB, geleneksel betonun tüm bileşenlerinden üretilebilir. Buna karşın KYB malzemedeki değişimlere geleneksel betona göre daha az toleranslıdır. Genel bir kural olarak malzemeler standartlara uygun olmalıdır [1].

2.1.1. Çimento

Ana maddeleri kalker, kil, alçı taşı (%3-%6 oranında), silisli kum olan çimentolar hidrolik bağlayıcılar olup, gerek kendi başına gerekse yanı sıra katılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerle birlikte su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra hem havada hem de su içinde yavaş yavaş sertleşerek taş haline dönüşürler.

2.1.2. Agreg

Agrega, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemelerdir.

Agreganın beton yapımında ekonomik ve teknik yönden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Agreg

2.1.2.1. İri agreg

Yüksek akma özelliğine sahip KYB elde etmek için, köşeli kırmataş agregalar yerine çakıl gibi yuvarlak, öğütülmemiş iri agregalar tercih edilir. Buna karşın, çoğu bölgede bu tip agregalar kolayca bulunamaz ve genellikle kırmataş agregalar kullanılır. Şaşırtıcı bir şekilde karışımlarda öğütülmemiş agregalardan daha fazla toz bileşen bulunduğuna dair bir belirti yoktur.

Hafif agregalar, prekast yapı panellerinin büyük ölçekli üretimleri için 1900 kg/m^3 yoğunluğunda KYB üretmek için başarıyla kullanılmaktadır ve karıştırma işleminden sonra kıvam kaybını önlemek için önceden ıslatılan genleştirilmiş kil agregalar kullanılarak yoğunluğu 1400 kg/m^3 'e kadar olan karışımlar geliştirilmiştir.

KYB'nin çoğu uygulamalarında yerel kullanılabilirliğe ve uygulamaya göre maksimum agreg

kullanılmaktadır. Toz bileşiminin agrega boyutuyla değişim gösterdiğine dair hiçbir belirti yoktur [1].

2.1.2.2 İnce agrega

İri agrega gibi ince agrega da yerel standartlara uygundur ve KYB’de kullanımı elverişli bulunur. İlle de zarar verici olmamasına rağmen karışım tasarımının amaçlarına göre toz bileşen için bir limit belirlenebilir. Bu limit için görüşler farklıdır; limit Avrupa’da 125 μm iken Japonya’da 75 μm ’dir [1].

2.1.3 Beton karma suyu

Betonda karışım suyunun iki önemi vardır. Bunlardan biricisi, çimentonun kimyasal reaksiyonu sağlaması ve çimentonun hidratasyonunu tamamlayarak mukavemet kazandırmasıdır. İkincisi ise agrega ile çimento hamurunun birbirine yapışması (aderansı), betonun boşluksuz yerleştirilip sıkıştırılması için gerekli olan sudur. Bu suya işlenebilirlik suyu da denilmektedir. Beton özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek yabancı maddeleri içinde bulundurmayan bütün doğal kaynaklı sular beton üretiminde kullanılabilir [5].

2.1.4 Katkılar

Beton katkı maddeleri, harç ve betonların taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini değiştirmek amacıyla karıştırma işlemi sırasında veya hemen önce karışıma katılan agrega, su, hidrolik bağlayıcı gibi ana bileşenlerden farklı olan maddelerdir. Katkı maddelerinin temel üretim kurallarına aykırı hazırlanan bir betonun kötü niteliklerini iyileştirmesi beklenemez. Katkı maddelerinin seçimi ve kullanılmasında bilinçli davranılması gerekir. Çünkü betonun bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir katkı maddesi, betonun bazı özellikleri üzerinde olumsuz etki gösterebilir veya beklenen olumlu etkiyi göstermeyebilir [5].

2.1.4.1. Kimyasal katkılar

Kimyasal beton katkıları, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bazılarında değişiklik yapmak amacıyla beton karışım suyuna belli oranda katılan maddelerdir [5]. Kimyasal katkı maddeleri yerinde ve uygun miktarda kullanıldığı takdirde taze beton ve harcın özelliklerinde şu değişimleri sağlayabilir:

- Su bileşeni arttırılmadan işlenebilirliğin artması veya işlenebilirlik değişmeden su bileşeninin azalması
- Priz başlama süresinde gecikme veya hızlanma
- Oturmanın azalması ya da önlenmesi veya az miktarda kabarma oluşması
- Kuma özelliğinin düzenlenmesi
- Ayrışmada azalma
- Pompalanabilirliğin gelişmesi
- Çökme kaybının azalması
- Perdahlanabilirliğin geliştirilmesi

Taze haldeki bu yararları ek olarak kimyasal katkıları uygun kullanımla sertleşmiş beton ve harçta ise şu değişimleri sağlayabilir:

- Erken çimento hidrasyon süresince ısı çıkartım oranında düşme
- Erken yaşlarda mukavemet gelişim oranında artma
- Basınç, çekme veya eğilme dayanımlarında artma
- Donma-çözülme direncinde artma
- Eritici tuzun neden olduğu zararları azaltma
- Permabilitede düşme
- Alkali-agrega reaksiyonundan kaynaklanan şişmede azalma
- Beton ve donatı arasındaki aderansta artma
- Renklendirilmiş beton veya harç üretimi
- Kuruma rötresinde azalma [9].

Süper akışkanlaştırıcı katkıları

1970’lerde süper akışkanlaştırıcıların yaygın olarak kullanılabilirliğinin giderek artması çoğu üretimde önemli avantajlar sağlayan akışkan betonun kullanımının başlamasına neden olmuştur. KYB’nin gelişimi, süper akışkanlaştırıcı teknolojisinin ve linyosülfonat bazlı malzemelerin iyi değerlendirilmesinin bir sonucu olarak görülebilir [1].

Süper akışkanlaştırıcılar içeriğine bağlı olarak dört ana gruba ayrılır.

1-Melaminformaldehitsülfonat grubu

2-Naftalinformaldehitsülfonat grubu

3-Geliştirilmiş lignosülfonatlar grubu

4-Diğerleri (sülfonik asit esterleri veya karbonhidrat esterleri gibi)

Bunlardan ilk ikisi en çok kullanılanı olup kısaca Melamin tabanlı süper akışkanlaştırıcılar ve naftalin tabanlı süper akışkanlaştırıcılar olarak ifade edilir [9].

Çimento tanecik yüzeyleri, geleneksel melamin ve naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı polimerlerde, beton karıştırma işleminin en erken aşamasında kuşatılırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento tanecik yüzeylerinin negatif yükünü artırır ve elektrostatik kuvvet bu tanecikleri iter. Bu elektrostatik mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve buna bağlı olarak, beton işlenebilirliğinin daha az su karışımı ile elde edilmesi sağlanır. Bununla beraber hidratasyon işlemi, çimento taneciklerinin suya temas etmesi ile birlikte başlar. Hızla büyüyen hidratasyon kristalleri, taneciklerin yüzey mekaniğini değiştirir, böylece bunların serbestçe dağılımını önler [11].

Süper akışkanlaştırıcı içeren bir betonun davranışı klinkere eklenen sülfatın tipi ve miktarı ile de ilişkilendirilebilir. Süper akışkanlaştırıcılar ile çimento uyumluluğu genel olarak en iyi Portland çimentosu ile sağlanır [10].

Viskozite düzenleyici katkıları

KYB üç tipte sınıflandırılabilir: un tipi, viskozite düzenleyici tipi ve kombinasyon tipi:

- Toz tipi KYB, yüksek miktarda toz (genellikle 550-650 kg/m³ aralığında kullanılır ve bütün malzemeler 15mm'den küçüktür) ile karakterize edilir. Bu plastik viskozitenin dolayısıyla da ayrışma direncinin artmasını sağlar. Akma noktası süper akışkanlaştırıcı tarafından belirlenir.
- Viskozite düzenleyici tipi KYB'de toz bileşeni daha düşüktür (350-450 kg/m³). Ayrışma direnci büyük ölçüde viskozite düzenleyici katkı tarafından (VDK) ve akma noktası süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile kontrol edilir.
- Kombinasyon tipi KYB'de toz bileşeni 450-550 kg/m³ arasındadır ve reoloji VDK tarafından uygun dozajda süper akışkanlaştırıcı gibi kontrol edilir.

İyi oranlanmış bir KYB'de üretim boyunca oluşan esas değişim, kum ve iri agreganın nem içeriğindeki normal değişiminden oluşur. Agreganın için %1,5 nem içeriği değişimi normaldir. Bu miktarda değişim beton karışımında 10-15 lt/m³ serbest su değişimine ve bu da aynı gündeki farklı dökümlerde ya da farklı günlerde üretilen betonun akış ve kohezyon özelliklerinde belirgin bir değişime neden olur.

VDK, betonu karışımın su bileşimindeki değişimlere (özellikle agregadaki) daha toleranslı yapar böylece plastik viskozite yükseltilir ve ayrışma önlenir, betonun kararlılığı artar.

Viskozite düzenleyici katkıları kötü kalitede bileşenlerin ya da karışım dizaynının yerine geçmez. KYB'de her zaman iyi bir granülometre eğrisine sahip agreganın kullanılması ve yüksek işlenebilirlik için ince parçaları içermeyen agreganın kullanılması reolojiyi etkileyerek ayrışma ve oturmaya neden olabilir. Buna karşın uygun agreganın ekonomik yönden kullanılamazsa VDK kullanılarak karışım için gerekli reoloji sağlanabilir ve daha homojen, daha kohezif bir beton elde edilir.

KYB’de VDK kullanmanın başlıca yararları şöyle özetlenebilir:

- Agreganın nem içeriğindeki değişime daha az hassasiyet
- Malzemelerin özelliklerindeki küçük değişimlerin etkilerinin minimize edilmesi
- Düşük toz bileşeni
- Üretim kontrol seviyesinde düşüş
- Ayırışma riski olmadan daha akışkan karışımların kullanılabilmesi
- Yerleşme oranının gelişmesi
- Ayırışma ve kusma riskinde azalma
- Tikotropi etkisiyle oluşan kalıp basıncında azalma
- Daha düzgün yüzey görünümü

VDK’nın aşırı dozda kullanımı taze betonu aşırı kohezif ve yavaş yerleşme oranlı yapabilir. Bu etki süper akışkanlaştırıcı bileşimini artırarak önlenabilir [12].

Diğer kimyasal katkılar

Geleneksel betonda olduğu gibi KYB’de de çeşitli özellikleri geliştirmek amacıyla başka katkılar da kullanılabilir ama bu katkılar bazen taze KYB’nin özelliklerini etkileyebilir. Örneğin hava sürükleyici katkılar sertleşmiş betonun donma dayanımını düşürür ama ayrıca hamur hacminin artmasına ve reolojisinin modifiye değişmesine de neden olur. Bu nedenle eğer birden fazla katkı kullanılıyorsa bu katkıların uyumları mutlaka incelenmelidir. Süper akışkanlaştırıcı ve VDK’dan başka KYB’de kullanılabilecek başlıca katkılar ve kullanım amaçları şöyledir:

- Priz Geciktiriciler: Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdır.
- Priz Hızlandırıcılar: Priz geciktiricilerin aksine, bu katkılar betonun katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun katılaşmış olmasını sağlamak için kullanılırlar.
- Su Geçirimsizlik Katkıları: Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır. Bazı betonlarda birden fazla katkı türü birlikte kullanılabilir. Ancak bu katkıların birbirlerinin etkilerini bozmadıkları denenmelidir. Kimyasal

katkılar, yukarıda bahsedilen etkilerinden dolayı bütün inşaat sektöründe betonun ayrılmaz parçası olmuştur.

- Antifrizler: Suyun donmasını zorlaştırır ve don neticesi çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamaya engel olurlar. Bu katkıların betondaki miktarı hava sıcaklığına göre ayarlanabilir.
- Hava Sürükleyici Katkılar: Beton içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini ve dona karşı direncini ve işlenebilirliğini artırır.
- Su Geçirimsizlik Katkıları: Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır [13].

2.1.4.2. Mineral katkıları

KYB’larda yüksek akışkanlığın elde edilebilmesi için karışımda yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar kullanılır. Ancak, bu tür kimyasal katkıları KYB’larda uygun bir biçimde kullanılmaması durumunda ayrışma problemlerine sebep olabilmektedir. Yapılan araştırmalar bu tür problemleri ortadan kaldırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla puzolon veya filler özelliklerine sahip mineral katkı kullanımının işe yarayabileceğini göstermiştir [14].

Puzolanik mineral katkıları

Puzolanlar, tek başlarına çimento özelliğine sahip olmadıkları halde, çok ince taneli oldukları için nemli veya sulu bir ortamda uygun sıcaklıkta çimentonun serbest kireci ile reaksiyona girerek çimentomsu özellik kazanan silisli ve alüminli malzemelerdir. Puzolanik mineral katkı maddeleri su tutucu özellik gösterirler ve doğadan serbest olarak elde edildiği gibi bir sanayi kuruluşunun yan ürünü olarak da elde edilebilir. Bunlar arasında uçucu kül, kieselguhr, bentonit, yağlı kireç, cüruf unu, tuğla unu, tuğla-kiremit unu ve tras sayılabilir. En yaygın olarak kullanılanları, uçucu kül ve silis dumanıdır (mikro silis) [5].

Uçucu kül

Termik santrallerin en önemli atık maddesi, toz linyit kömürün yanması ile meydana gelen ve baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bunlar, elektrostatik yöntemle elektro filtrelerde ve silikonlarda yakalanmakta böylece baca gazlarıyla

atmosfere çıkmaları önlenmektedir. Uçucu küller genellikle küresel yapıda olmakta ve çapları 1-200 mikron (μm) arasında değişmektedir [5].

Dünya uçucu kül üretimi yaklaşık olarak 450 milyon ton/yıl'dır ama bunun ancak yaklaşık %6'sı harmanlanmış portland çimentoda ya da beton karışımlarında yapay puzolan olarak kullanılabilir. Türkiye'de kömür yakan 12 aktif termik santral vardır ve yıllık uçucu kül üretimi 15 milyon ton civarındadır. Ancak kullanımı beklenilenden azdır [15].

Uçucu külün toplanmasıyla sağlanacak yararlar üç ana grup altında toplanır. Bunlar (i)çimento üretiminde kullanılmasıyla üreticiye ve kullanıcıya sağladığı yararlar, (ii) çevreye sağladığı yararlar (çevre kirliliğinin engellenmesi) ve (iii) ekonomiye sağladığı yararlar.

Çimento üretiminde kullanılan enerjinin en az %40'ı öğütme ve pişirmede kullanılmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de çimento üretiminde daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Uçucu külün çimento üreticisi tarafından kullanılmasıyla öğütme, kurutma, klinkerizasyon enerjilerinden tasarruf, klinker üretiminden tasarruf ve üretimde çeşitliliğin sağlanması yararları sağlanabilir.

Beton, uçucu külün en yaygın kullanım alanıdır. Uçucu küller, beton karışımında üç ayrı yöntemle kullanılır. Bunlar;

- Çimentonun belli oranda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması (ikame),
- İnce agrega belirli oranlarda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması (ince agrega ile ikame),
- Hem ince agrega hem de çimentonun belirli oranlarda azaltılarak yerine uçucu kül kullanılmasıdır.

Geleneksel betonda yapılan araştırmalarda uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [5].

Çizelge 2.1 Uçucu kül kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi [5]

Betonun Özelliği	Etkisi
Taze betonun su ihtiyacını	Azaltır
Taze betonda tane ayrışmasını	Azaltır
Taze betonun işlenebilirliğini	Arttırır
Taze betonun priz süresini	Uzatır
Taze betonda kuma ve terlemeyi	Azaltır
Taze betonun hidrasyon ısını	Azaltır
Sertleşmiş betonun erken dayanımlarını	Azaltır
Betonun 90 gün ve daha sonraki dayanımını	Arttırır
Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini	Azaltır
Sertleşmiş betonun donma-çözülme direncini	Azaltır
Alkali agrega reaksiyonunu	Azaltır
Sülfat direncini	Arttırır
Sıcak havada beton dökümünü	Kolaylaştırır

Silis dumanı

Silis dumanı başta Norveç olmak üzere Avrupa ve ABD'de yaygın biçimde kullanılmakta olup iki işleve sahiptir; birincisi betondaki boşlukları doldurma (filler), diğeri ise puzolanik etkidir. Bu etkilerden hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır. Ancak silis dumanının bu iki etkisinden biri olan puzolanik etkinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu mikro yapısal incelemeler ve mekanik deneylerle kanıtlanmıştır [16].

Silis dumanı elektronik endüstrisinde yarı iletkenlerin üretiminde kullanılan saf silisyum veya onun alaşımlarının elektrik ark fırınlarında yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile elde edilir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile amorf SiO_2 'e dönüşen silis, baca külü olarak açığa çıkar.

Çok ince taneli ve puzolanik değeri yüksek olan bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı 1969 yılında denenmiştir. Bu konudaki uygulamalar ve silis dumanının beton özelliklerine etkisi ile ilgili araştırmalar 1980'li yılların başına kadar oldukça yavaş ilerlemiştir. Betonda süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılmasıyla silis dumanının beton özelliklerine olumlu etkileri ve endüstriyel atıkların çevre kirliliğine karşı daha sıkı kontrol gibi faktörler silis dumanı konusundaki çalışmaların hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bugün silis dumanı

artık bir endüstri artığı değil, parayla alınıp satılan kıymetli bir mineral (puzolan) katkı maddesi haline gelmiştir. Türkiye’de silis dumanı Antalya Eti Bank Elektrometalürji Sanayi İşletmesinden elde edilmektedir.

Çok düzgün küresel parti küllerden meydana gelen silis dumanı 0,1 µm civarında ölçülen ortalama çapı ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktür. Silis dumanı bu ince yapısı ve yüksek silika içeriğiyle oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli rolü; C_2S ve C_3S hidratasyonları sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ’yi bağlamak ve bir kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli meydana getirmektir. Bu jel çimento hamurunda normal olarak oluşan CSH jelinden biraz farklı olup yoğunluğu daha az ancak geçirimsizliği daha fazladır.

Bu durum silis dumanı tanelerinin büyük kristaller yerine çok sayıda küçük ve daha sağlam $Ca(OH)_2$ 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 dumanının beton üzerindeki etkileri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [5].

Çizelge 2.2 Silis dumanı kullanımının betonun teknik özelliklerine etkisi

Betonun Özelliği	Etkisi
Akma sınırı ve viskoziteyi	Arttırır
Terleme	Azaltır
Ayrışma	Azaltır
Plastik büzülme	Arttırır
Priz süresi	Arttırır
Hidratasyon ısısı	Azaltır
Basınç dayanımı	Arttırır
Aderans	Arttırır
Sünme	Azaltır
Geçirgenlik	Azaltır
Asit ve sülfat direnci	Arttırır
Alkali silika reaksiyonu	Azaltır
Donma dayanımı	Arttırır
Kılcal su emme	Azaltır

Filler mineral katkıları

Son 15 yılda betonda kalker filleri kullanımına yönelik bazı araştırmalar yapıldı. Bu mineral filler malzemelerin betonda kullanılmasının en önemli amacı çimento maliyetini bir miktar düşürmek ve taze betonun işlenebilirliğini ve stabilitesini iyileştirmektir. Son yıllarda yüksek mukavemetli betonlara duyulan önemli gereksinme, mikrofiller malzemelere ilgiyi daha da arttırdı. Bu çok ince toz malzemelerin süper akışkanlaştırıcılarla birlikte çimento bağlayıcılı sistemlerde kullanılması daha az boşluklu bir yapı elde edilmesi, taze betonun reolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ve sertleşmiş betonun mekanik davranışına olumlu katkısı nedeniyle yeni bir ilgi alanı haline geldi.

Mikrofiller malzemelerin en etkili olanı silis dumanıdır. Ancak, bu malzemenin fiyatı giderek artmakta ve temininde güçlük çekilmektedir. Bu durum yeni filler malzemeleri arama ihtiyacını doğurmaktadır.

Kalker fillerinin çimento özelliklerine etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Beton literatüründe mevcut çalışmalara göre, genelde kalker fillerinin %5-%6 oranında çimento klinkerinin öğütülmesi sırasında katılmasının negatif bir etki yapmadığı sonucu çıkmıştır. Ülkemiz önemli bir çimento üreticisi olup, Avrupa'da üçüncü, Dünya'da sekizinci sıradadır. Başta büyük şehirler olmak üzere beton üretimi için önemli miktarda agregaya gereksinim vardır. Bu agregalardan iri olanı genelde İstanbul yakınlarındaki kalker ocaklarından elde edilmektedir. Çimento fabrikalarına da yakın mesafede olan ve büyük potansiyeli bulunan bu ocaklardan kırmataş ile birlikte önemli miktarda kırmataş tozu da yan ürün olarak elde edilmektedir. Bu toz malzemenin ekonomiye kazandırılması oldukça önemlidir. Klinker ile birlikte öğütülerek veya ince toz haline dönüştürüldükten sonra çimentonun sınırlı bir bölümüyle yer değiştirilip kullanılması olanaklarının araştırılmasına gereksinim vardır. Böyle bir çaba daha az yakıt kullanılmasını sağlar ve çevrenin daha az kirlenmesine katkıda bulunur. Öte yandan, kalker tozu betonun ince agregasının bir bölümüyle yer değiştirilerek de kullanılabilir. Bu amaçla Uchikawa ve arkadaşları kalker filleri, yüksek fırın cürufu tozu ve silisli taş tozu kullanarak yaptıkları çalışmada, bu filler malzemeler kimyasal katkıyla birlikte kullanılırsa, taze betonun plastik viskozitesinin artacağı sonucu ortaya çıkmıştır [17].

2.1.5. Lifler

Hem metalik hem de polimer lifler KYB'nin üretiminde kullanılmaktadır. Fakat lifler betonun akışkanlık ve geçme kabiliyetlerini azaltır. İstenen taze ve sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini sağlamak için tipi, uzunluğu ve miktarı yapılan denemelerle belirlenir.

Polimer lifler betonun plastik büzülme nedeniyle oluşan çatlakları ve oturmaları önlerken, KYB'nin stabilitesini de geliştirebilir.

Çelik veya uzun polimer yapılı lifler sertleşmiş betonun sünekliğini modifiye etmek için kullanılır. Liflerin uzunlukları ve miktarı yapının ihtiyaçlarına ve maksimum agrega boyutuna bağlı olarak seçilir. Eğer normal donatının yerine kullanılırsa, betonun akışında bloklanma riski olmaz fakat normal donatıda önemli bir oranda fazla kullanılırsa KYB kullanımında bloklanma riski artar [18].

2.2. Taze Beton

Taze beton, çimento hamuru ile agrega ve diğer katı parçacıklardan oluşan plastik karışımdır. Çimento hamuru karışımın yaklaşık %80'ini oluşturan agregaları kaplar ve aralarındaki boşlukları doldurur. Taze halde hamur agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak işlenebilirliği artırır. Beton sertleştikten sonra ise hamur, agrega parçacıklarını bir arada tutar ve sertleşmiş betonun güç ve durabilitesinde en kritik rolü oynar.

Beton teknolojisindeki gelişmeler, özellikle çok çeşitli katkıların ve ilave bağlayıcılar veya puzolanik malzemelerin kullanılabilirliğinin ortaya çıkması taze karışımın özelliklerinin önemini arttırmıştır. Taze karışımın kısa vadeli özelliklerini yalnızca ikinci planda dikkate alan ve betonun güç ve durabilite gibi uzun vadeli özellikleriyle ilişkilendirmeyen geleneksel düşünce yavaşça değişmiştir.

Taze betonun taşınması gereken başlıca özellikler şunlardır:

- a) Beton kolay karışmalıdır. Katkılar da dâhil bütün bileşenler karışım içinde minimum enerji ile hızlı ve homojen bir şekilde dağılmalıdır. Aynı betonun birbirini izleyen tüm setlerinin homojenliği kabul edilebilir olmalıdır.

- b) Karışım, kalıbı vibrasyonla ya da vibrasyonsuz tam olarak doldurmaya yetecek kadar işlenebilir olmalıdır. Ayrıca homojenliğin de kabul edilemez bir düşüş olmadan ve/veya belirtilen başka bir özelliğinde değişme olmadan taşınabilir ve yerleşebilir olmalıdır.
- c) Karışım aşırı miktarda enerji gerektirmeden sıkıştırılabilmelidir.
- d) Karışım gerektiği gibi bitirilebilmelidir yani kalıp karmaşık şekline rağmen doldurulabilmeli ve taze iken yüzey düzeltme gerektirmemelidir [19].

2.2.1. Taze betonun özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonun taze halde taşınması gereken özellikler sıkıştırma gerektiren kıvamı modifiye edilmiş geleneksel betonunkinden çok farklıdır. KYB'nin taze haldeki üç temel özelliği

- Doldurma yeteneği
- Geçme yeteneği
- Ayırışma direncidir

Bir KYB bu özelliklerin üçünü de taşımalıdır ve taşıma ve yerleştirme boyunca bu özelliklerini korumalıdır.

2.2.1.1 Doldurma yeteneği

Doldurma yeteneği taze karışımın kendi ağırlığı altında akabilmesi ve kalıp içerisindeki tüm boşlukları tamamen doldurabilmesidir. Bu terim taze KYB'nin ne kadar uzağa akabileceğini ve kalıbı ve boşlukları ne kadar iyi doldurabileceğini gösterir. Doldurma yeteneği ayrıca kendiliğinden sıkışma özelliğini de etkiler. Karıştırma işlemi sırasında ya da yerleşme sırasında karışıma giren havanın azalması için akma yeteneği yani akışkanlık yeterince yüksek olmalıdır [1].

2.2.1.2 Geçme yeteneği

Geçme yeteneği, taze betonun çevrelenmiş boşluklardan, dar açıklıklardan ve donatıların aralarından ne kadar iyi akabildiğini tanımlar. Geçme yeteneğinin belirlenmesi akmanın durması, iri agreganın sıkışma ya da donatılar arasındaki dar aralıklar nedeniyle tıkanmaya yol açması riskini belirlemek için önemlidir.

Geçme yeteneği, akma yeteneğine bağlıdır. Betonun donatılar arasından kusursuzca akması için iri agreganın parçalarının karışım içerisindeki yerlerinin yeniden

ayarlanması, ayrışma direncinin sağlanması, boşlukların kapatılmaması şarttır. Ayrıca iri agregaların düşük doldurma yeteneğine neden olduğu gözlemlenmiştir. Bir taze karışım kendiliğinden yeterince yerleşebilmesi için yeterince akma ve doldurma yeteneğine sahip olmalıdır ve uygulamanın şartlarına uygun olmalıdır [1].

2.2.1.3. Ayrışma direnci

Taze betonda ayrışma direnci çimento hamurunun plastik viskozitesine ve yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca iki basit kabulle bağlantılıdır: bir katı sıvıdan daha yoğundur ve batmaya eğilimlidir ve viskoz sıvı bir katının etrafında zorlukla akar. Eğer agreganın yoğunluğu çimento hamurununkinden fazlaysa ve hamurun viskozitesi düşükse ayrışma oluşur.

Ayrışma direnci bir taze karışımın bileşenlerinin orijinal dağılımını taşıma, yerleştirme ve sıkışma boyunca koruyabilme yeteneğidir. Kararlılıkla aynı anlamı taşır.

Ayrışmanın değerlendirilmesindeki esas zorluk bir referans değer, beton bileşenlerinin dağılımlarının homojenliğinin kabul edilmiş bir minimum derecesinin bulunmamasıdır. İnşaatta tamamen homojen dağılım pratikte mümkün değildir. Bu ancak bir teorik modelde olabilir. Uygulamada, referans noktası olarak mikserden yeni çıkmış karışımın homojenliği alınır ancak bu mikserden çıkan her karışımın yeterli homojenlikte olduğu anlamına gelmektedir. Beton halen taze haldeyken bunu hatasız bir şekilde belirlemek zordur. Bunun yerine betonun diğer karakteristiklerindeki değişimler ölçülerek dolaylı yoldan değerlendirme yapılır. Numune alma prosedürünün ve numunelerin hacim ya da boyutunun maksimum parçacık boyutuyla kıyaslanmasının sonuçlar üzerinde büyük etkisi vardır.

Ayrışmayı önlemek geleneksel beton için olduğu gibi KYB için de önemlidir. Betonun tazeyken ayrışma hassasiyetini belirlemek için bazı çalışmalar yapılmaktadır ama bu çalışmaların hiç biri tam anlamıyla başarılı değildir.

Ayrışma çok kez geleneksel betonda kalıplar söküldükten sonra taneli beton yüzeyi ortaya çıkması olarak belirlenmiştir. Tanecikli yüzeye sahip beton iri agregalar arasında büyük, genellikle düzensiz boşluklar içeren bir yapıya sahiptir.

Ayrışmanın diğer formları kuma ve basınç ayrışmasıdır. Yerleşme sırasında su karışımdan ayrışıp ve yüzeye yükseldiğinde kuma oluşur ve üst yatay yüzeyde çok yüksek su/çimento oranına sahip ince bir hamur tabakası oluşur. Karışımın

kohezyonu orijinal, yeterli homojen agrega dağılımını sürdürmek için yeterli değilse betonun pompalanması sırasında basınç ayrışması oluşur; çok akışkan hamur ya da harç ayrılarak tek başına ilerler ve geride hamur içermeyen bir karışım kalır. Bu geride pompalanması, dökümü zor beton topakları oluşmasına neden olur [1].

2.2.1.4. Akma oranı

Taze KYB'nin doldurma ya da geçme yeteneğini belirlemek için kullanılan test metotları ve aparatlar çoğu kez test edilen betonun bu özellikleriyle birlikte akma oranını (akma hızı) belirlemeye de yarar. Bu özellik kimi zaman viskozite ile karıştırılır. Doldurma ve geçme yeteneğinin şantiye testleri sonuçları plastik viskozite ile bağlantılıdır. Plastik viskozite doğru bir şekilde sadece temel reolojik parametreleri (akma gerilmesi/akma oranı; plastik viskozite/akma gerilmesi) belirlemek için tasarlanan uygun bir beton reometresi ile ölçülebilir.

Akma oranı, işin tamamlanma süresinin etkisinin önemli olduğu çok büyük ya da karmaşık dökümlerin planlanması için önemlidir. Akma oranı ayrıca verimliliği üzerinde doğrudan etkisi olan prekast endüstrisi içinde önemlidir [1].

2.2.1.5. Pompalanabilirlik

Taze betonun pompalanması inşaat alanında betonun taşınması ve yerleştirilmesi için çok yaygın bir metottur. Kolay pompalanma için betonun boru hattından minimum basınçla ve tıkanma tehlikesi olmadan akması gerekir. Bu nedenle pompalanabilir bir karışım için yeterli kararlılıkla desteklenmiş iyi akışkanlık temel ihtiyaçtır. Ayrıca bu akışkanlık ve kararlılık, taze karışımı boru hattı boyunca hareket ettirmek için dış basınç uygulandığında da devam etmelidir. Bu nedenle pompalanabilirlik, basınç altında ve boru hattı içerisinde kararlılık ve akışkanlık olarak tanımlanabilir [19].

Pratikte KYB olarak tanımlanan bütün taze betonlar pompalanabilirdir. Ancak düşük maksimum agrega çapına sahip aşırı viskoz karışımlar ve çok yüksek miktarda ince malzeme ya da fiber içeren karışımlar söz konusu olduğunda pompalamada zorluk yaşanabilir. Bir taze karışımın pompalanabilirliğini belirlemek için kullanılan geçerli bir test yöntemi yoktur [1].

2.2.2. Reoloji

Reoloji, cismin deformasyonu ve akışı ile ilgilenen bilim dalıdır. Reolojinin çalışma alanı çok geniştir. Mühendislik uygulamasında genellikle, ideal (basit, elastik, Newton uyumlu) gaz, sıvı ve katılara uygulanan deformasyon ve akma kanunlarına uymayan malzemelerin davranışlarını açıklamak için kullanılır. Mühendislik malzemeleri reolojide bu ideal model davranışlarından çok daha kompleks reolojik performansa varan çeşitlilik gösterir.

Reoloji betona hem taze hem sertleşmiş hem de yaşlanma ve gelişiminin tüm ara fazlarına uygulanabilir. Reoloji sertleşmiş betonun kırılmaya yakın olan ya da sünme gibi uzun süreli yüklemekten kaynaklanan plastik deformasyonunun değerlendirilmesinde kullanılabilir. Diğer yandan KYB'nin reolojisi öncelikli olarak taze haldeki davranışlarıyla ilgilenir.

Reolojinin taze betona uygulanması taze betona hem teknik bakış açısıyla hem de temel yaklaşımların yapısına önemli ölçüde meydan okur. Aşamalı fiziko-kimyasal değişimlerin oluşması nedeniyle, reolojik karakteristikler lineer olmayan bir şekilde sürekli değişir. Değişimin oranı ve büyüklüğü sadece karışımın içeriğine değil aynı zamanda çevresel koşullara da bağlıdır.

Taze beton karışımının reolojik karakteristikleri ve parametreleriyle bağlantılı olan reolojik denklemler birkaç temel kabul üzerine dayanır. Buna göre taze beton:

- Uniform bir karışımın homojen bir malzemesidir
- İzotropik bir malzemedir, özellikleri bütün doğrultularda aynıdır.
- Sürekli, bünyesinde iki nokta veya bölge arasında süreksizlikler içermez.

Pratikte çoğu sıvı için reometri ile ölçülmüş davranışların temel reolojik karakteristik olarak kabul edilmesi gibi makul ölçüde kabuller vardır. Beton taze haldeyken, karışımın kompozisyonuna ve ölçeğine göre maddelenmiş olan bu kabulleri sağlama derecesi önemli ölçüde artar. Çözünme mikro ölçeğe vardığında malzeme bütünlükten uzaklaşır. Çözünmenin mikro ya da nano ölçeğe düştüğünde homojen bir bütünden bahsetmek zordur. Son zamanlarda nanoteknolojinin yapı malzemelerine uygulanmasındaki artış kullanılan reolojik yaklaşımların ve beton gibi çimento bazlı malzemelerin davranışlarını tanımlamak, ölçmek ve önlemek için kullanılan araçların gözden geçirilmesini gerektirecektir.

Taze betonun reolojik tepkileri akma ve deformasyon uygulanan kayma gerilmesinin büyüklüğüne bağlıdır. Genelde beton gibi çok fazlı, kompozit malzeme için çok küçük deformasyonlardaki ölçümlerin sonuçları büyük deformasyonlarla karşılanmak yerine farklı reolojik parametreler üretilir. Akma gerilmesi ve viskozite gibi temel reolojik karakteristikler verilen bir kayma gerilmesine bağlı olarak deformasyon ve akışın öngörülmesini sağlayabilir ve tam tersine deformasyon ve akış ölçümleri uygulanan gerilmeyi hesaplamak için kullanılabilir.

Reometreler yapılan ölçümlerde kesin değişmez bir kayma oranına ulaşmak için tasarlanmıştır. Yakın zamanda, değişik akma oranlarının önceden belirlenmiş değerlerde değiştiği test sistemlerini önceden ayarlamak ve programlamak mümkün olmuştur. Bu, test şartlarını gerçeğe daha yakın hale getirmiştir.

Taze betonun temel reolojik karakteristiklerini ölçmek için kullanılan metotlar gelişmeye devam etmektedir ama her test çeşidinin taze beton gibi kompleks ve değişken malzemelere uygulandığında limitlerini göz önünde bulundurmamak gereklidir.

Pratik reoloji taze betona uygulandığında kullanılan temel reolojik karakteristikler arasındaki ilişki iki davranışı yansıtır: Newton'a uyan ve Newton'a uymayan [1].

2.2.2.1. Newton'a uyan akış

Newton'a uyan akışkan davranışı, kayma gerilmesine maruz kalan ideal katıya benzer. τ kayma gerilmesi, kayma gerilmesinin büyüklüğüne oranlı bir γ kayma deformasyonu oluşturur. Orantılılık katsayısı, G kayma modülüdür; bu ilişki şu şekilde açıklanabilir (2.1):

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.1)$$

Newtona uyan bir akışkana uygulanan kayma gerilmesi akışkanın, gerilmenin büyüklüğüne orantılı olarak deforme olmasına neden olur ancak bir ideal katının aksine akışkanın deformasyonu gerilmenin uygulanması boyunca devam eder.

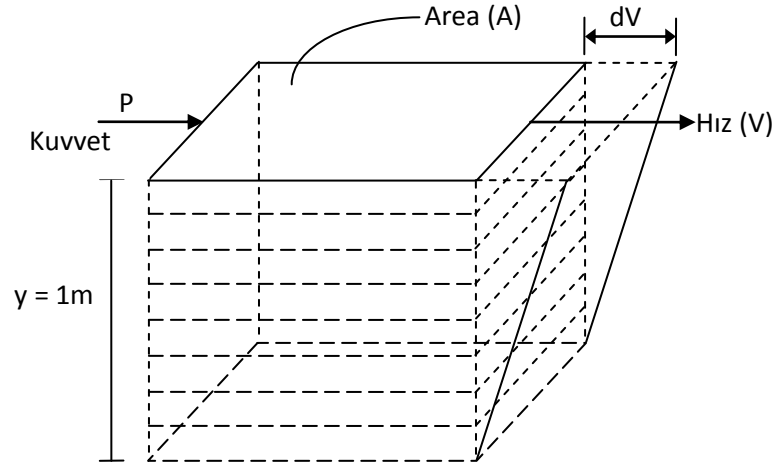
Deformasyon devam ettiğinde oran önemli hale gelir. Bu genellikle birim zamandaki deformasyon olarak tanımlanır. Daha genel olarak ve G kayma modülü yerine, μ viskozite katsayısının kullanılmasıyla bu ilişkiyi gösteren diferansiyel denklem şu şekilde yazılabilir (2.2):

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Akışkanlarda kayma, iki paralel düzlemin bağıl hareketi olarak tanımlanabilir ve düşük kayma oranları için bir laminar akış kabul edilir. Devamlı bir kayma gerilmesi bir v hızına sahip hareket üretir.

Kayma gerilmesinin, bir y birim uzunluğu boyunca hareket eden düzlemin hızının değişme oranı olan D hız eğimine orantılı olduğu Newtona uygun bir laminar viskoz akış oluşur (2.3). Bu akış Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot D \quad (2.3)$$



Şekil 2.1 : Newton’a uygun laminar viskoz akış

D hız eğimi, kayma deformasyonunun zamanla $\left(\frac{d\gamma}{dt} \text{ veya } \dot{\gamma}\right)$ değişme oranıdır ve şu şekilde açıklanabilir: (2.4), (2.5)

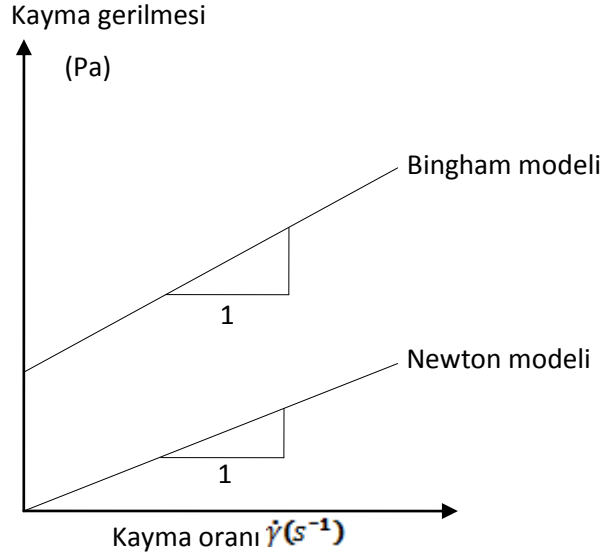
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ (kayma gerilmesi için)} \quad (2.4)$$

veya

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\text{kayma gerilmesi}}{\text{kayma oranı}} \quad (2.5)$$

Viskozite temel S.I. birimlerinde $N/m^2 \cdot s = \text{PAS}$ (Pascal saniye) olarak ölçülür. Newton’a uygun akışkanın viskozitesi, akışkanın verilen bir $\dot{\gamma}$ akma oranında kayması ile üretilen kayma gerilmesinin ölçümlerinden belirlenir.

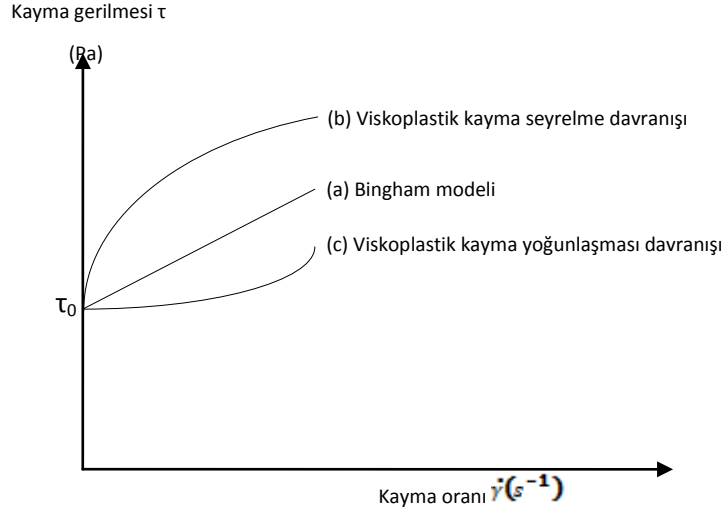
Kayma gerilmesi ve Newton'a uygun akışkanın kayma oranı arasındaki ilişki Şekil 2.2'de görüldüğü gibi lineerdir. Newton'a uygun bütün akışkanların akma eğrileri orijinden başlayan düz çizgilerdir. Bundan şu sonuç çıkar: Newton'a uygun bir akışkanın viskozitesi (eğrinin eğimi) kayma oranı ve kayma gerilmesinin değerlerini veren basit bir ölçümle belirlenebilir. Viskozite kayma gerilmesinden ve kayma oranından bağımsızdır [1].



Şekil 2.2 : Newton'a uyan akış için Kayma gerilmesi – Kayma oranı

2.2.2.2. Newton'a Uymayan Akış

Çoğu akışkan Newton'a uyan basit davranışlar göstermez. Bu akışkanların viskoziteleri uygulanan kayma ve kayma deformasyonu oranının şiddetinden bağımsız değildir. Ayrıca bu tür akışkanların davranışları kaymanın uygulandığı süre ile birlikte değişir ve değişimin oranıyla beraber devam eder (düşüş ve/veya artış). Newton'a uymayan bazı akışkanların kayma gerilmesi ve kayma oranı arasında lineer bir ilişki olabilir ama belirli bir minimum kayma gerilmesi seviyesine ulaşmadan başlamazlar. Bu gerekli minimum kayma gerilmesine τ_0 kayma gerilmesi denir.



Şekil 2.3 : Newton'a uymayan akış için akma tipleri

Akma gerilmesi sıfır olan Newton'a uymayan akışkanlar genellikle yapay plastik olarak adlandırılır. Şekil 2.3'deki (b) akma eğrisi kayma seyrelmesi davranışını belirten viskozitenin kayma deformasyonu ile birlikte düşmesini, (c) akma eğrisi ise kayma yoğunlaşmasını belirten viskozitenin kayma deformasyonu ile birlikte artışı göstermektedir.

Çoğu Newton'a uymayan akışkan sabit bir kayma oranına ulaşıldığında ve muhafaza edildiğinde viskozite değişimi gösterir. Viskozite düşüş oranı kayma ve düzeltme süresi ile azaltılabilir. Kayma oranı düştüğünde ve durduğunda akışkan iyileşme gösterir; aynı ya da farklı bir akma değerine dönülebilir ve tüm işlem tekrarlanabilir.

Taze betonun davranışı birçok Newton'a uymayan akışkana benzerdir. Daha düşük kıvamı sahip taze geleneksel betonlarda, (a) eğrisi ile gösterilen Bingham modeli önemli yere sahiptir. Kıvamın artmasıyla akma gerilmesi düşer: μ ile plastik viskozite gösterildiğinde bu ilişki şöyle ifade edilebilir: **(2.6)**

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

Akışkan, süper akışkanlaştırıcı, çökmesi 120 mm'den büyük KYB'ların kullanımı taze halde gözlenen reolojik davranışların önemini arttırmıştır. Düşük işlenebilirlikli geleneksel beton genellikle yüksek akma gerilmesine sahip bir Bingham akışkanı gibi davranırken, tipik bir KYB çok düşük ya da sıfır akma gerilmesine sahiptir ve genellikle Newton uyumlu akışkan gibi davranır [1].

2.2.2.3. Taze betonun reoloji ve kıvamı (işlenebilirliği)

Taze beton, farklı reolojik yaklaşımların uygulanabileceği bir kompleks kompozit malzemedir. Bir taze karışımın davranışı her biri farklı miktarda akışkan fazla (hamur veya su) yağlanmış çok farklı boyutta birbirini etkileyen tanecikler içeren tanecikli formdaki bir katı faz ile açıklanabilir. Böyle bir malzemenin deformasyonu parçacık yoğunluğuna ve parçacıkların etkileşimine bağlıdır ve akışkan fazın reolojik özelliklerinin rolü daha az fakat yine de önemlidir. Parçacıkların yoğunluğu önemli ölçüde parçacıkların şekil, boyut ve yüzey karakteristikleri ile karıştırma sırasında oluşan topaklanmaya bağlıdır. Bu yaklaşım geleneksel, düşük kıvamlı karışımların mühendislik toprağı gibi tanecikli malzemeler olarak düşünülmesine olanak sağlar.

Alternatif olarak, taze beton farklı boyuttaki katı parçacıkların belirli reolojik karakteristiklere sahip akışkan hamur içerisindeki süspansiyonu olarak düşünülebilir. Birkaç ara durum daha dikkate alınabilir; betonla kıyaslandığında çok daha fazla su (Newton'a uygun bir akışkan) içermesine rağmen hamur bir süspansiyon/kompozit olarak düşünülebilir. Süspanse edilen parçacıkların maksimum boyutunun küçük olması, hamurun reolojik karakterizasyonu gerçek, tam ölçekli betondan daha kolay olmasına olanak sağlar.

Eğer test sistemi hamurun beton içinde akmasını daha iyi temsil ederse hamurların test edilmesinden elde edilen sonuçların uyarlanması daha kolay olur. Gerçekte, hamur katı agrega parçaları arasında hapsedilmiştir. Hamurun hapsedilme geometrisi ve sınır koşulları değişkendir. Kayma oranını betonun akışına bağlı olarak tahmin etmek zordur çünkü agrega parçalarının bağlı konumu/mesafesi betonun deformasyonu veya akması süresince değişir [1].

2.3. Taze Beton Deneyleri

KYB'nin taze özelliklerini ölçmek için pek çok test metodu geliştirilmiştir. Çizelge 2.3'te KYB'nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan testler listelenmiştir. Çizelge 2.4'te ise bu testlerin en çok kullanılanları gösterilmiştir [19].

Çizelge 2.3 : KYB’nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın testler

Özellik	Test metodu	Ölçülen değer
Doldurma yeteneği	Çökme-akma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite	t ₅₀₀	Akma zamanı
	V-hunisi	Akma zamanı
	O-hunisi	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Geçme yeteneği	L-kutusu	Geçme oranı
	U-kutusu	Yükseklik farkı
	J-halkası	Kademeli yükseklik, toplam akma
	Kajima kutusu	Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışması	Terleme yüzdesi
	Oturma kolonu	Ayrışma oranı

Çizelge 2.4 : KYB için en çok kullanılan taze faz testleri

Özellik	Tercih Edilen Test Metotları
Doldurma yeteneği	Çökme-akma testi
Viskozite	t ₅₀₀ ölçümü veya V- hunisi testi
Geçme oranı	L-kutusu testi
Ayrışma direnci	Elek ayrışması testi

2.3.1. Çökme-akma deneyi

Çökme-akma deneyi geleneksel beton için çok yaygın olarak kullanılan çökme testinden geliştirilmiştir. İlk başta geleneksel çökme testinde göçme gösteren yüksek işlenebilirlikli, kendiliğinden yerleşen su altı betonları için sonra da bütün KYBler için kullanılmıştır. Kesik koni kaldırıldıktan sonra betonun dikey oturduğu geleneksel çökme testinin aksine bu teste her doğrultuda akma oluşur. Bu nedenle bu testte numunenin serbest yatay yayılması ölçülür.

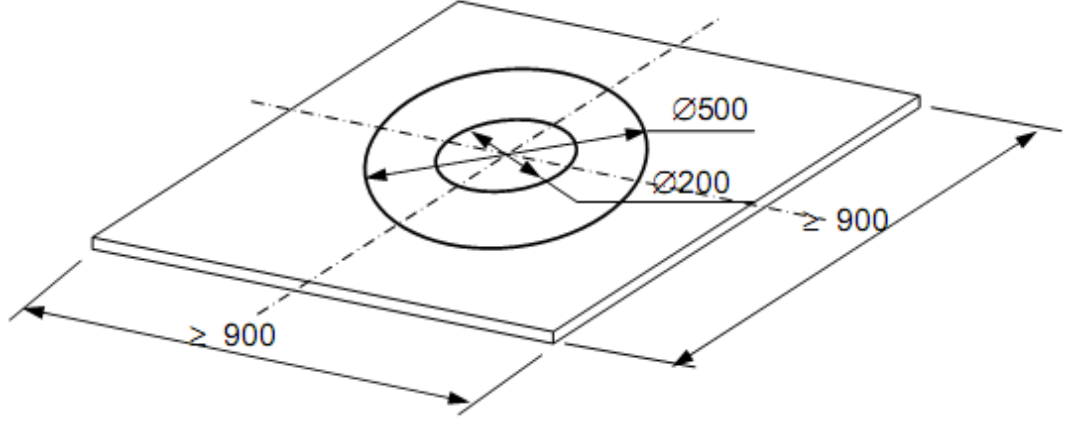
Bu testte standart çökme konisi küçük açık yüzey alta gelecek şekilde ters çevrilerek kullanılır. Ters çevrilmiş koni betonla doldurulduğunda sıkıştırma ya da kademeli yerleştirme gerektirmez. Herhangi bir operatör çökme-akma testini kolayca yapabilir.

Çökme-akma değeri sargı kullanılmayan şartlarda taze karışımın akıcılığını tanımlar. Normalde tüm KYB'ler için taze beton kıvamının şartnameye uygunluğunu gösteren en önemli kontrol olarak istenen hassas bir testtir. Test sırasındaki görsel incelemeler her bir dökümün ayrışma direnci ve dökümü hakkında bilgi verebilir.

Çökme-akma testi şu şekilde yapılır:

- Taban levhası düz bir zemine yerleştirilir ve yatay pozisyonda olduğu kontrol edilir.
- Yüzey ıslatılır ve bir bezle silinerek nemden silinir.
- Koni merkezdeki 200 mm çaplı daireye yerleştirilir ve herhangi bir sıkıştırma ya da şişleme işlemi olmaksızın beton koniye dökülür.
- Koninin ağzındaki fazla beton sıyrılır ve tabandan sızan beton varsa temizlenir.
- Dolu koninin 30 saniyeden fazla beklemesine izin vermeden, koni betonun akmasına müdahale etmeden düz bir şekilde kaldırılır.
- Koni tabandan ayrıldığı anda kronometre başlatılır ve betonun 500 mm çaplı daireyi doldurmasına kadar geçen süre 0.1 saniye hassasiyetle ölçülür. Bu süre t_{500} olarak kaydedilir ve viskozite hakkında yorum yapmak için kullanılır.
- Beton yayılmasını tamamladıktan sonra betonu ve taban levhasını oynatmadan yayılan betonun en büyük çapı ölçülerek en yakın 10 mm katına yuvarlanır ve d_m olarak kaydedilir. Ardından d_m ' ye dik yöndeki çap ölçülerek en yakın 10 mm katına yuvarlanır ve d_r olarak kaydedilir.
- Akarak yayılan betonda ayrışma olup olmadığı kontrol edilir. Çimento harcı kaba agregadan ayrılarak kaba agreganın milimetrelerce ötesine kadar yayılan bir halka oluşturabilir. Ayrılan agreganın orta bölgelerde görülebilir.
- Eğer d_m ve d_r çapları arasındaki fark 50 mm'yi aşarsa test tekrarlanır.

Test tamamlandıktan sonra d_m ve d_r çaplarının aritmetik ortalaması alınır ve en yakın 10 mm' ye yuvarlanır ve çökme-akma değeri elde edilir. Şekil 2.4'de çökme-akma testinin taban levhası gösterilmiştir [1, 20].

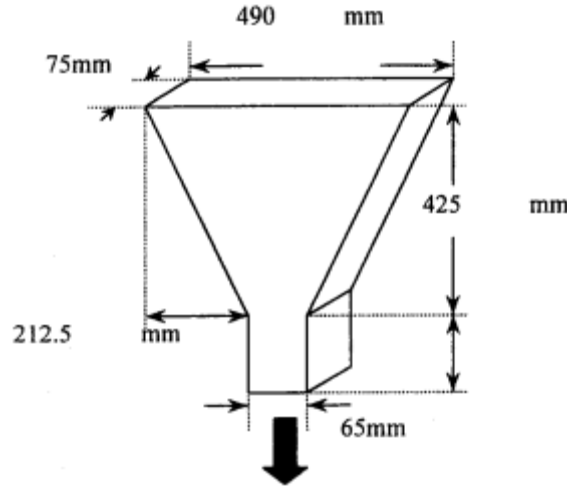


Şekil 2.4 : Çökme – akma testi taban levhası [21]

2.3.2. V-Hunisi Deneyi

V hunisi deneyi KYB’ nin viskozite ve doldurma becerisini belirlemek üzere kullanılır. Yapımı oldukça pratik olan bu deney için Şekil 2.5’teki gibi bir çelik V-hunisi, en az 12 lt hacimli bir kap, 0,1 saniye hassasiyetli bir kronometre ve hunideki beton numunesinin üst yüzeyini düzeltmek için düz bir çubuk yeterlidir. Deneyin yapılışı şöyledir:

- Huni ve tabanındaki kapak temizlendikten sonra hafifçe nemlendirilir.
- Kapak kapatılarak beton huniye sallamadan ve sıkıştırmadan dökülür.
- Huninin üst yüzeyi düz çubuk ile düzeltilerek huninin üst yüzeyi ile beton numunesinin üst yüzeyinin aynı seviyede olması sağlanır.
- Kap, huninin altına yerleştirilir.
- Beton, huniye doldurulduktan 10 ± 2 saniye sonra kapak açılarak zaman başlatılır.
- Kapak açıldıktan sonra huninin üstünden bakılır ve alttaki kap görüldüğünde kronometre durdurularak ölçülen zaman V-hunisi akma süresi, t_v , olarak 0,1 saniye hassasiyetle kaydedilir [1,20,21].



Şekil 2.5 : V-hunisi [21]

2.3.3. L-kutusu deneyi

İlk olarak taze su altı betonu karışımının kendi ağırlığı altında herhangi bir donatı aralığından geçmeden akabildiği mesafe ölçülerek su altı betonunun akışkanlığını belirlemek için geliştirilmiştir. Sonradan KYB'nin geçme yeteneğini belirlemek için geliştirilmiştir ve geçme yeteneği için en geçerli uygulama haline gelmiştir. İstenirse deney süresini ölçerek akış hızını ölçmekte mümkündür.

L şeklindeki aparat her ikisi de dikdörtgen kesitli yatay oluk ve içi boş dikey kolondan oluşur. Şekil 2.6'da L-kutusunun boyutları gösterilmiştir.

Dikey yöndeki sürgülü bir kapak iki kısmı birbirinden ayırır. Kapağın önünde dikey yönde yerleştirilmiş bir çubuk donatı seti vardır. İki ve üç çubuklu yapılabilir. Üç çubuklu deney daha sık donatılı durumları simgeler. Deneyin yapılışı şöyledir:

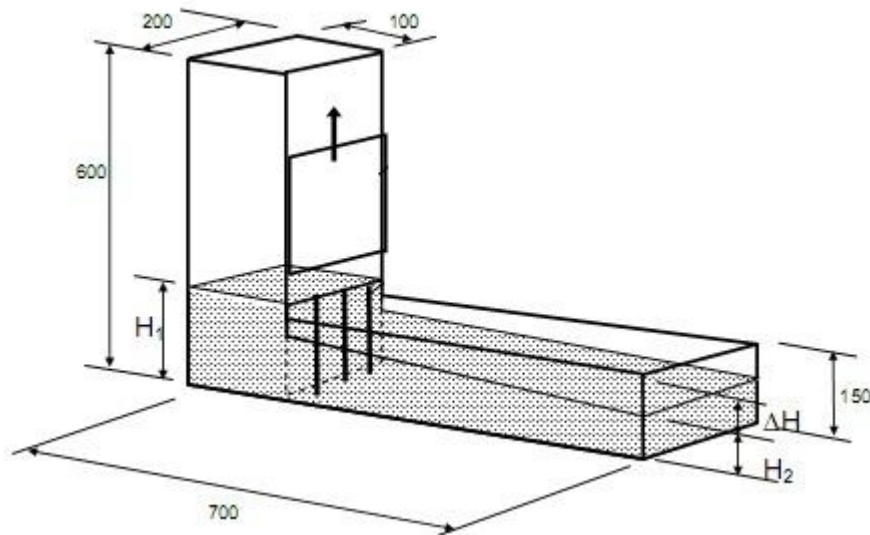
- L-kutusu düz ve yatay bir zemin üzerine oturtulduktan sonra hafif ıslatılır ve dikey ve yatay kısımlar arasındaki kapak kapatılır.
- Beton numune dikey kısma dökülür ve 60 ± 10 saniye beklenir ve ayrışma olup olmadığı gözlenir.
- Kapak kaldırılarak beton numunenin yatay kısma geçişi sağlanır.
- Betonun akması durduğunda yatay kısmın en sonunda kutunun genişliği boyunca eşit aralıklarla üç noktada betonun üst yüzeyi ile oluk üst yüzeyi arasındaki mesafeler ölçülür ve en yakın mm'ye yuvarlanır. Ardından bu değerler oluk yüksekliğinden çıkarılarak beton derinlikleri belirlenir ve H_{2a} , H_{2b} , H_{2c} olarak kaydedilir.

- Aynı işlemler dikey kısımda kalan beton içinde uygulanır ve bu değerlerde H_{1a} , H_{1b} , H_{1c} olarak kaydedilir.

Deney tamamlandıktan sonra H_{1a} , H_{1b} , H_{1c} değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak H_1 , H_{2a} , H_{2b} , H_{2c} değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak H_2 değeri bulunur. L-kutusu deneyinin temel sonucu olan geçme oranı bu iki değer ortalamasıdır: (2.7)

$$GO = PA = \frac{H_2}{H_1} \quad (2.7)$$

L-kutusu deneyinden elde edilebilecek diğer bir sonuç ise akma hızıdır. Akma hızı bulunmak isteniyorsa yatay kısım üzerinde kapaktan sonraki 200. ve 400. mm'ler işaretlenir ve kapak kaldırıldıktan sonra betonun bu mesafelere akma süresi t_{L200} ve t_{L400} olarak kaydedilir [1,16,19].

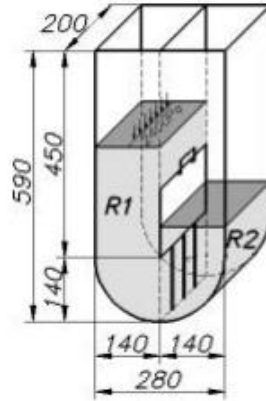


Şekil 2.6 : L-kutusu

2.3.4. U-kutusu deneyi

Bu deney taze KYB'un kendiliğinden yerleşme yeteneğinin ve numunenin özel bir kutu içerisinde kendi ağırlığı ile yükselmesinin gözlenmesini kapsar. Aparat olarak Şekil 2.7'deki gibi U şeklinde, alt ortasında sürgülü bir kapak olan ve aynı zamanda engel teşkil edecek demir çubuklar bulunan bir kutu kullanılır. KYB doldurulduktan sonra sürgülü kapak çekilerek betonun diğer kısma doğru dolarak yükselmesinin bitmesi beklenir. Beton hareketini tamamlayınca iki koldaki beton yüksekliklerinin ortalaması H_1 , kapak açıldıktan sonra dolan koldaki beton yüksekliği H_2 olarak

kaydedilir. H_1-H_2 farkı dolma yüksekliğini verir. Bu farkın ayrışma olmadan sıfıra mümkün olduğunca yakın olması istenir [18,22].



Şekil 2.7 : U-kutusu [18]

2.3.5. Elek Ayrışması Direnci Deneyi

1990ların sonlarında şantiye alanında taze KYB'nin ayrışma direncini ölçmek için geliştirilmiştir. İri agrega ve harç arasında ne kadar ayrışma olacağını belirleme temeline dayanır. Amaç bir KYB karışımında iri agreganın oturmasından kaynaklanan ayrışma riskini değerlendirmektir. Test için 5 mm² delikleri olan, 300mm çap, 40 mm yüksekliğe sahip bir elek, en az 10 kg kapasiteli ve en az 20 g hassasiyetli bir tartı ve iç çapı 300 ± 10 mm olan 11-12 lt kapasiteli bir kap gerekmektedir. Testin yapımı şu şekildedir:

- 10 ± 5 lt taze beton numune kabına koyulup kapağı kapatılır ve $15 \pm 0,5$ dakika dokunulmadan yatay konumda beklemesi sağlanır.
- Boş elek kabı tartılarak ağırlığı gr cinsinden W_{p1} olarak kaydedilir. Ardından elek, kabının üzerine koyularak tartılır ve kütle W_{p2} olarak kaydedilir.
- Bekleme süresinin sonunda ($15 \pm 0,5$ dakika) kapak numune kabının üzerinden ayrılır ve numunenin üzerinde terleme olup olmadığına bakılır.
- Elek ve elek kabı hala tartı üzerindeyken ve numune kabının üst yüzeyi elekten 500 ± 50 mm üstte iken ani olarak beton, eleğin ortasına dökülür.
- Betonun elek üstündeki kütlesi gr cinsinden W_c olarak kaydedilir.
- Beton numune elek üzerinde 120 ± 5 saniye durduktan sonra elek dikey olarak sarsmadan çıkarılır. Elekten geçerek elek kabında kalan beton ve elek kabının birlikte ölçülen ağırlığı gram cinsinden W_{ps} olarak kaydedilir.

Ayrışma oranının hesaplanmasıyla statik ayrışma derecesi değerlendirilir. Ayrışma oranı elekten geçen beton kütlelerinin toplam beton kütlelerine yüzde cinsinden oranıdır (2.8) [1, 20].

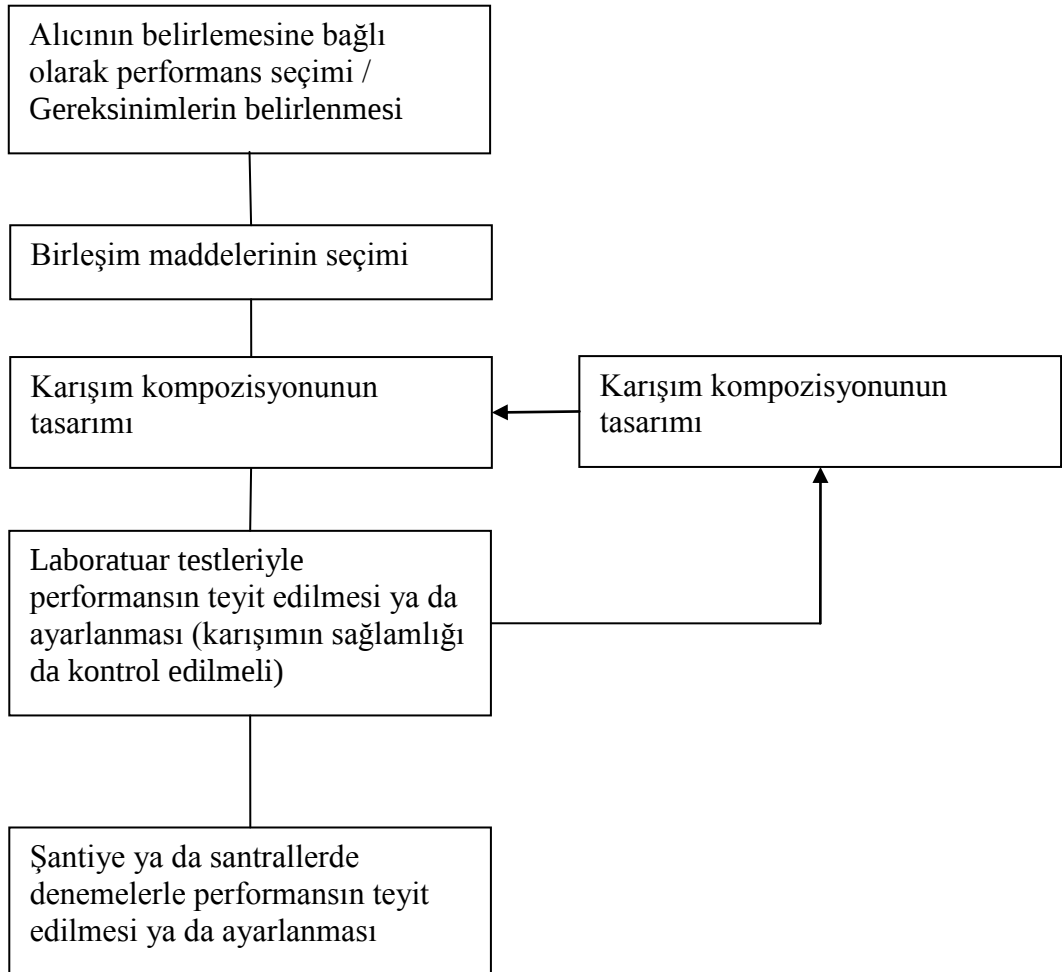
$$AO = \frac{W_{PS} - W_{P1}}{W_C - W_{P2}} \times 100$$

(2.8)

2.4. Karışım Tasarımı

Karışım kompozisyonu betonun taze ve sertleşmiş durumları için bütün performans kriterlerini sağlayacak şekilde seçilir. Hazır beton durumunda, bu kriterler alıcı tarafından bir şartname olarak sunulur [20]. KYB karışımının tasarımında Çizelge 2.5'deki adımlar izlenir.

Çizelge 2.5 : KYB karışımı tasarım adımları [20]



2.4.1 Beton gereksinimleri

Bir KYB'nin taşınması gereken dört temel özellik olan doldurma yeteneği, viskozite, geçme yeteneği ve ayrışma direncinin geçerli testlere göre sınıflandırılmaları Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 : KYB özelliklerinin sınıflandırma değerleri [20]

Doldurma yeteneği		Viskozite			Geçme yeteneği		Ayrışma direnci	
Sınıf	Çökme-akma (mm)	Sınıf	t ₅₀₀ (san)	V-hunisi (san)	Sınıf	L-kutusu H2/H1 oranı	Sınıf	Elek ayrışması (%)
SF	550-650	VS1 VF1	≤2	≤8	PA1	≥0.8 ve 2 çubuk donatı	SR1	≤20
SF2	660-750	VS2 VF2	>2	9-25	PA2	≥0.8 ve 3 çubuk donatı	SR2	≤15
SF3	760-850							

Bu sınıflandırmaların hangi durumlarda belirtilmeleri gerektiği ve en çok kullanıldığı uygulamalar şu şekildedir:

- Doldurma /serbest akma yeteneği: Bu özellik toplam akma kapasitesinin ve akma oranının kombinasyonudur. En geçerli test çökme-akma testidir. Çökme akma testinden elde edilen sonuçların sınıflandırılması ve çeşitli uygulama alanları şöyledir:
 - SF1 (550-650 mm) sınıfının uygun olduğu uygulamalar; konut döşemeleri gibi salınma noktasından serbest yer değiştirmeye üstten dökülen donatısız ya da çok az donatılı beton yapılar, tünel kaplaması gibi pompa enjeksiyon sistemi ile dökme, kazıklar ve bazı derin temeller gibi uzun yatay akışları engelleyecek kadar küçük kesitler
 - SF2 (660-750 mm) duvarlar ve kolonlar gibi pek çok normal uygulama için uygundur
 - SF3 (760-850 mm) tipik olarak maksimum agregat boyutu 16 mm' den küçük olan agregalarla üretilir ve çok yoğun donatılı yapılarda, karmaşık şekillere sahip binalarda düşey uygulamalar için ya da kalıp altından doldurmalarında kullanılır. SF3 genellikle normal düşey uygulamalarda SF2'den daha iyi

yüzey bitirmesi verecektir; fakat ayrışma direncini kontrol etmek daha zordur.

850 mm' den daha yüksek hedef değerleri bazı özel durumlarda belirtilebilir fakat ayrışmaya çok dikkat edilmeli ve maksimum agrega boyutu normalde 12 mm' den daha küçük olmalıdır

- Viskozite / akışkanlık: Çökme akma testi sırasında ölçülen T_{500} zamanı ile ya da V-hunisi akma zamanı ile değerlendirilir. Elde edilen zaman değeri KYB'nin viskozitesini ölçmez fakat akış hızını belirleme yoluyla KYB'nin viskozitesi ile ilgili fikir verir. Düşük viskoziteli beton çok hızlı ilk akışa sahip olur ve sonra durur, yüksek viskoziteli beton ise daha uzun süre sünmeye devam edebilir.

Viskozite aşağıda verilenler gibi sadece özel durumlarda belirtilmelidir. Karışım geliştirme sırasında faydalı olabilir ve çökme akma testini yaparken T_{500} zamanını ölçmek ve kaydetmek, bir harmandan diğer harmana KYB'nin uniformluğunu doğrulamak için yararlı olabilir.

VS1/VF1 çok yoğun donatıda bile iyi doldurma yeteneğine sahiptir. Genellikle en iyi yüzey bitirmeye sahip olup kendiliğinden tesfiyelenebilme yeteneğine sahiptir. Fakat ayrışma ve terleme problemi olması çok muhtemeldir.

VS2/VF2 üst sınıf limitine sahip değildir fakat artan akma zamanı ile kalıp basıncını sınıflandırmada ya da ayrışma direncini geliştirmede faydalı olabilen tiksotropik etkileri göstermesi çok muhtemeldir.

- Geçme / sınırlı akma yeteneği: Bu yeteneği tanımlarken, donatının geometrisi ve yoğunluğunu, doldurma yeteneğini ve maksimum agrega boyutunu dikkate almak gereklidir. Tanımlanan boyut KYB'nin kalıbı doldurmak için sürekli olarak akmak zorunda olduğu en küçük aralıktır (sargı aralığı). Bu aralık her zaman olmamakla birlikte genelde donatı aralığıyla ilgilidir.

PA1 konut ve düşey yapılar gibi 80 ile 100 mm arasında açıklığa sahip yapılarda kullanılır.

PA2 inşaat mühendisliği yapıları (büyük ve karışık) gibi 60 ile 80 mm arasında açıklığa sahip yapılarda kullanılır

Açıklığın 80 mm'den daha büyük olduğu ince döşemeler ve açıklığın 100 mm'den daha büyük olduğu diğer yapılar için belirtilmiş bir geçme

yeteneğine gerek yoktur. 60 mm'den daha az açıklığa sahip karmaşık yapılar için özel model denemeleri gerekli olabilir.

- Ayırışma direnci: KYB'nin yerinde homojenlik ve kalitesi için temeldir. Ayırışma direnci yüksek çökme-akma sınıflarıyla ve/veya daha düşük viskozite sınıfıyla, ya da eğer yerleştirme şartları ayırışmayı ilerletiyorsa önemli bir parametre olur. Eğer bunlardan hiçbirisi etkili değilse ayırışma direnci sınıfını belirtmek genellikle gerekli değildir.

SR1 genellikle ince döşemeler için ve akma mesafesi 5 m'den daha az olan ve sargı aralığı 80 mm'den daha büyük olan düşey uygulamalar için uygundur.

SR2 ayırışmaya dikkat etmek için düşey uygulamalarda akma mesafesi 5 m'den daha fazla ve sargı aralığı 80 mm'den daha büyükse tercih edilir.

Akma mesafesinin 5 m'den az olduğu durumlarda sargı aralığı 800 mm'den daha az olan uzun düşey uygulamalar için SR2 kullanılabilir. Fakat akış 5 m'den daha fazla ise %0 daha az hedef SR değeri tavsiye edilir. Eğer özellikle üst yüzeyin dayanım ve kalitesi kritik ise SR2 ya da bir hedef değer belirtilebilir.

Reolojik kurallara göre doldurma yeteneği ve ayırışma direncinin düşük akma gerilmesi ve orta dereceli plastik viskozitenin kombinasyonuna ihtiyaç duyar.

Üretim, uygulama ve kalite kontrol konuları incelenirken bir KYB'nin yerleştirme boyunca kendiliğinden yerleşme özelliğini koruma yeteneğini olan kıvam kalıcılığını ve büyük ölçekli bir üretimde kaçınılmaz olan malzeme ve prosedürdeki değişim ve varyasyonlara bir malzemenin tolerans kapasitesi olan sağlamlık özellikleri de eklenebilir.

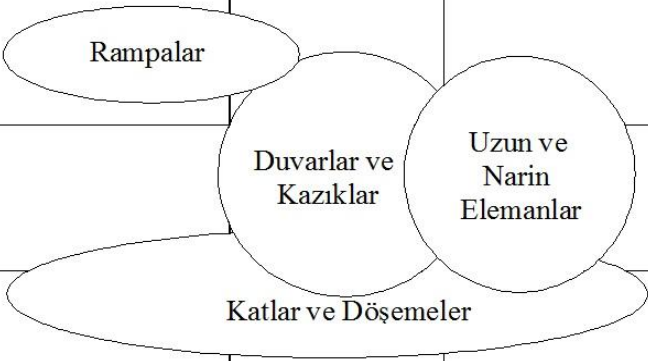
Bu özelliklerin farklı seviye ve kombinasyonlarına değişik uygulamalar için gerek duyulur, örneğin:

- Geçme yeteneği doldurulan elemanın donatı aralığına bağlıdır.
- Gerekli ayırışma direnci derecesi taşıma ve yerleştirme metotları ile doldurulan boşluğun boyutuna bağlıdır.

Özel uygulamalar için gerekli özelliklerin belirtilen test yöntemlerinin ölçüm değerleri cinsinden belirlenmesi karışım tasarımı önemli bir ilk adımdır [19].

Çizelge 2.7’de 2003’ü temel alan bazı uygulama tipleri için gerekli KYB özellikleri ve sınıflandırmaları gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 : Çeşitli uygulama tipleri için KYB özellikleri [20]

Viskozite				Ayrışma direnci/ geçme yeteneği
VS 2 VF 2				SF1&2 için geçme yeteneği belirtmek gereklidir
VS 1 veya 2 VF 1 veya 2 yada hedef değer				SF3 için SR belirtmek gereklidir
VS 1 VF 1				SF2&3 için SR belirtmek gereklidir
	SF 1	SF 2	SF 3	
	Çökme-akma			

2.4.2. Karışım tasarım prensipleri

Taze haldeki KYB karışımlarındaki özelliklerin gerekli kombinasyonunu elde etmek için:

- Hamurun akışkanlık ve viskozitesi çimento ve mineral katkıların dikkatli seçimi ve oranlanmasıyla, su/toz malzeme oranını sınırlandırmayla ve sonra süper akışkanlaştırıcı ve isteğe bağlı olarak viskozite düzenleyici katkı ilave ederek ayarlanır ve dengelenir. KYB’nin bu bileşenlerinin doğru bir şekilde kontrolü, uygunluk ve etkileşimleri; iyi doldurma yeteneği, geçme yeteneği ve ayrılmaya karşı direnç elde etmekte anahtardır.
- Sıcaklık yükselmesini, ısıl büzülme çatlamasını ve dayanımını kontrol etmek için çimento miktarını kabul edilebilir bir seviyede tutmak için mineral katkılar toz malzeme miktarının önemli bir miktarını oluşturabilir.
- Hamur agreganın taşınması için bir araçtır; bu yüzden bütün agrega taneciklerinin bir hamur tabakası tarafından tamamen kaplanması için hamur hacmi agregadaki boşluk hacminden büyük olmalıdır. Bu, akışkanlığını artırır ve agrega sürtünmesini azaltır.

- Karışımındaki iri agreganın ince agregaya oranı, tekil iri agrega taneciklerinin bir harç tabakası tarafından tamamen çevrelenmesi için azaltılır. Bu, beton donatılar arasındaki dar açıklıklardan veya boşluklardan geçerken, agrega kenetlenmesini ve köprülenmeyi azaltır ve KYB'nin geçme yeteneğini artırır [20].

2.4.3. Temel karışım prosedürleri

KYB'ler için karışım metotları geleneksel betonunkilerden iki önemli farklılığa sahiptir:

- Üretimde en baskın önem kendiliğinden yerleşme özelliklerinin sağlanmasıdır, sertleşmiş fazın özellikleri ikinci planda gelir. Özellikle kendiliğinden yerleşme kriteri normal olarak iri agrega bileşenini, hamur bileşenini, su/toz oranını ve katkı dozajını etkiler. Mukavemet ve diğer erken dönem ve uzun dönem özellikleri farklı toz bileşenlerin (çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireçtaşı, kumtaşı vb.) uygun kombinasyonları tarafından kontrol edilir.
- KYB için olası bileşim malzemelerinin kombinasyon sayısı, çok sayıda değişkenin (tozlar, süper akışkanlaştırıcılar, viskozite düzenleyici katkılar vb.) uyumunun sağlanması demektir. Bunların etkileşimini kesin ve kapsamlı olarak önceden belirlemek zor olduğu için potansiyel kombinasyonlara bazı testlerinin yapılması gereklidir. Bu çoğu zaman harç tarafından karşılanır. KYB'de yüksek miktarda harç bileşeni harç ve betonun özellikleri arasında iyi ilişkiyi sağlar ve gerekli harç özellikleri iyi tanımlanırsa, beton için gerekli testler minimize edilir.

KYB karışım tasarımı için standart bir metot yoktur ve pek çok akademik enstitü, katkı firmaları kendi karışım oranlama metotlarını geliştirmiştir. Hem JSCE hem de ACI bir karışım oranıyla başladıktan sonra istenilen karışım elde edilene kadar bu oranı sistematik olarak veya bir test programıyla rastgele değiştirme yaklaşımını önerir. JSCE kılavuzu üç KYB tipinin başlangıç karışım oranlarını Çizelge 2.8'deki gibi özetlemiştir.

Çizelge 2.8 : JSCE'nin belirlediği başlangıç karışım oranları [20]

	Toz karışımlar	Viskozite düzenleyici tipi karışımlar	Kombinasyon tipi karışımlar
İri agrega	Aşama 1: 28-30 Aşama 1: 30-33 Aşama 1: 32-35	Aşama 1: 28-31 Aşama 1: 30-33 Aşama 1: 30-36	Aşama 1: 28-30 Aşama 1: 30-33 Aşama 1: 30-35
(hacimce %)	155-175	Taze faz özellikleri için gerekli minimum miktar	Belirtilmiş şekil değiştirebilme ve ayrışma direnci için yeterli miktarda
Su/toz oranı	0.28-0.37 (ağırlıkça) 0.85-1.15 (hacimce)	Sertleşmiş faz özellikleri için gerekli maksimum miktar	
Toz bileşeni (hacimce yüzde)	16-19	Kendiliğinden yerleşebilme için yeterli miktarda	>13

ACI ise başlangıç oranlarını Çizelge 2.9'daki gibi önermiştir.

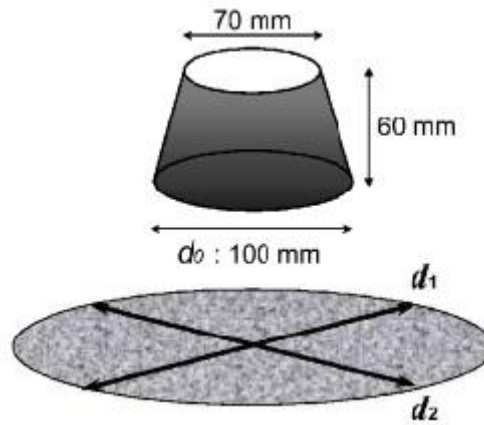
Çizelge 2.9 : ACI'nın belirlediği başlangıç karışım oranları [20]

	Çökme-Akma Değeri (mm)		
	< 550	550-650	> 650
Toz bileşeni (kg/m ³)	355-385	385-445	445+
İri agrega (hacimce %)	28-32		
Hamur (hacimce %)	34-40		
Harç (hacimce %)	68-72		
Su/toz oranı	0.32-0.45		

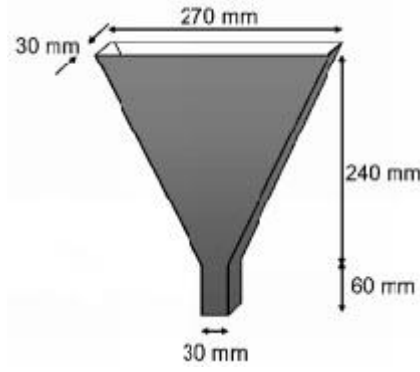
Tokyo Üniversitesinde KYB üzerine yapılan kapsamlı bir çalışmadan geliştirilen oldukça basit bir metot KYB tasarımı için genel metot haline gelmiştir. Bu metot limitli malzeme aralığı ile toz tipi KYB için geliştirilmiştir. Malzeme sınırlamaları şu şekildedir: iri agrega boyut aralığı 5-20 mm, maksimum ince agrega boyutu 5 mm, düşük ısılı, yüksek dikalsiyum silikat içerikli Portland çimento. Donma-çözünme direncini sağlamak için hava tutunumu genellikle %4-7 seviyesindedir. Ayrıca bu su

ve çimento oranını düşürme avantajını da sağlar. Bu metodun temel özellikleri şöyledir:

- Hava bileşeni, açıkta kalma şartları için gereklidir.
- İri agreg a bileşeni, beton hacminin %50'si kadardır. Agreganın daha az hava içeren sıkıştırılmış hacmi göz önüne alınır.
- İnce agreg a bileşeni, toplam harç hacminin %40'ı kadardır. Boyutu 0.09 mm'den büyük olan bütün parçacıklar agreg a olarak kabul edilirken bu boyuttan küçük olan parçacıklar toz olarak nitelendirilir. Bu bileşenin kritik olarak nitelendirilir: eğer bileşen çok fazla ise akma süresince ince agreg a parçacıkları birbirini engelleyerek tıkanmaya neden olur, eğer çok düşükse yüksek çimento ve su bileşimine neden olurlar ve bu da sertleşmiş betonun özelliklerine zarar verebilir.
- Su/toz oranı ve süper akışkanlaştırıcı dozajı önce su-toz hamuru sonrada harç üzerinde yapılan testlerle belirlenir. Hem hamur hem de harç için bir cam tabaka üzerinde yapılan yayılma testi kullanılabilir ayrıca harç için v-hunisi testide uygulanabilir. Bu testler çökme-akma ve v-hunisi testlerinin daha küçük ölçekli olanlarıdır fakat ölçüm yöntemleri aynıdır. Şekil 2.8'de çökme-akma testinin ve Şekil 2.9'da ise V-hunisi testinin aparatlarının ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : Küçük ölçekli çökme-akma testi hunisi ve yayılması



Şekil 2.9 : Küçük ölçekli V-hunisi

- Hamur, yayılma üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için su/toz oranı arttırılarak test edilir. Alandaki değişimin ilk alana oranı (bağıl akma alanı R_a) kullanılarak su/toz oranıyla lineer bir ilişki elde edilir. Elde edilen sonuçlar su/toz oranı (y eksenini) – R_a grafiğine işlenir ve notların eğim çizgisi y eksenine kadar uzatılır. Bu çizginin y eksenini kesti değer ilk akış için yeterli olan su/toz oranıdır ve tozun tutulan su oranı, β_p , olarak tanımlanır.
- Ardından $0.85\beta_p$ ’ lik başlangıç su/toz oranı ve değişken süper akışkanlaştırıcı dozajları ile hamurun yayılma ve V-hunisi testleri yapılır. 9-11 saniye akma süresi ve 5 bağıl akma alanı elde edilene kadar su/toz oranı ve süper akışkanlaştırıcı dozajı ayarlanır. Elde edilen değerler beton üzerindeki testler için başlangıç oranları olarak kullanılır. Ayrıca harç testleri zamana bağlı davranışları belirlemede de kullanılabilir.

- Sonuçta oluşan beton için 650 mm çökme-akma değeri yeterli olarak tanımlanmıştır. Gerekli ise bu değer elde edilene kadar süper akışkanlaştırıcı dozajı ayarlanabilir. Eğer V-hunisi akma süresi 10-20 saniye aralığında ise kendiliğinden sıkışabilirlik sağlanır. Geçme yeteneğini belirlemek için U-borusu testi kullanılabilir ve en az 300 mm son yükseklik gereklidir.

İri ve ince agreganın son miktarının KYB için güvenli tarafta kaldığı belirtilmiştir bu nedenle bu metot genel kullanım için uygun bulunmuştur [1, 17, 20].

2.5. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mühendislik Özellikleri

Dayanıklılık, beton bir yapının tasarım ömrü boyunca çevresel etkilere karşı gerekli performansında bir azalma olmadan dayanma yeteneğidir ve genellikle çevresel etki sınıflarının belirlenmesiyle göz önüne alınır. Bu durum beton birleşimi değerlerine ve minimum pas payına dair sınır değerlerin uygulanmasını gerektirir.

Beton yapıların tasarımında mühendisler, zaman zaman beton şartnamelerinde doğrudan yer almayan beton özelliklerine değinmek zorunda kalabilirler. Bu özelliklerin başlıcaları şunlardır:

- Basınç dayanımı ve elastisite modülü
- Çekme dayanımı
- Sünme
- Büzülme
- Donatı ile beton arası aderans
- Dayanıklılık [17].

2.5.1. Basınç dayanımı ve statik elastisite modülü

Su/çimento oranı ile basınç dayanımı gibi betonun kompozisyonu ile özellikleri arasındaki ilişki KYB içinde geleneksel betonunkiyle aynıdır. KYB'ların düşükten yükseğe her basınç dayanımıyla üretilebileceğinin bilinmesi önemlidir. Kendiliğinden yerleşme kavramı, betonun otomatik yüksek performanslı olduğu, sertleştiğinde yüksek basınç dayanımına sahip olacağı anlamına gelmez.

Tipik bir KYB yüksek oranda ince dane/katkı içerir. Bu daneler betonun sertleşmiş fazda mikro yapısını yoğunlaştırır. Kimyasal olabilen bu yoğunlaştırma basınç dayanımını artırma eğilimi gösterir. Karakteristik basınç dayanımındaki artış geleneksel betonda görülenin yaklaşık %10 üzerindedir ve 28 günde vibrasyonlu betonun su/çimento oranıyla ilişkisi olağanüstü değildir. Bu nedenle KYB'yi düşük dayanımlı üretmek bazen yüksek dayanımlı üretmekten daha zordur [1].

2.5.2. Çekme ve kayma dayanımı

Basınç dayanımındaki bilgi birikimlerinin aksine, KYB kompozisyonundaki değişimin çekme ve kayma dayanımı üzerindeki etkileri hakkında daha az bilgi vardır.

KYB'nin çekme dayanımına dair kullanılabilen bütün veriler dolaylı çekme dayanımı olarak ifade edilir. Bu veriler genelde yarma ya da eğilme deneyinden elde edilir. KYB ve geleneksel beton arasındaki karşılaştırmalar dolaylı çekme

dayanımının basınç dayanımına oranı üzerinedir. KYB'nin basınç dayanımı geleneksel betonunkiyle aynı veya daha üstündür.

Tipik bir KYB'de azaltılan iri agrega bileşeni kayma dayanımının agrega kenetlenmesi payını düşürebilir ama bunu kesin olarak söyleyebilmek için kullanılabilecek herhangi bir ispat yoktur. Tam ölçekli yapı elemanlarının (kirişler kolonlar) yıkımının yükleme testlerinden dolayı olarak elde edilen sonuçlar çekme ve kayma dayanımının aynı basınç dayanımındaki geleneksel betonunkinden daha düşük olduğuna dair bir belirti göstermemiştir.

Benzer bir yaklaşımla, kayma kırılması düzlemi boyunca oluşan iri agrega kenetlenmesindeki azalma, daha yoğun ve güçlü sertleşmiş harç ve bağlayıcıdan gelen dayanım ile telafi edilebilir veya daha iyi hale bile gelebilir [1].

2.5.3. Sünme

Sünme sabit gerilme altında zaman içinde oluşan deformasyon olarak tanımlanabilir. Sünme belirlenirken uygulanan gerilmeyle bağlantılı olmayan büzülme, şişme ve termal deformasyonlar gibi diğer zamana bağlı deformasyonlar da göz önüne alınır.

Sünme çimento hamurunda olur ve su çimento oranıyla direkt olarak ilgili olan çimento hamurunun boşluklarına bağlıdır. Hidratasyon sırasında çimento hamurunun boşluğu azalır ve belli bir beton için dayanım artarken sünme azalır. Eğer yükleme yaşı sabitlenirse çimento tipi önem kazanır. Hidratasyonun daha hızlı gerçekleştiği çimentolar yükleme devrinde daha düşük sünmeye sebep olur. Agregalar çimento hamurunun sünmesini kısıtladığı için agreganın hacmi ve elastisite modülü arttıkça daha az sünme olur.

Daha yüksek çimento hamuru hacmi nedeniyle KYB için sünme katsayısı aynı dayanımdaki normal betonun sünme katsayısından daha yüksek olabilir. Fakat bu farklılıklar küçüktür ve Eurocode'da verilen formül ve tablolardaki güvenli varsayımlarla telafi edilir [20].

2.5.4 Büzülme (Rötre)

Büzülme, otojen ve kuruma rötrelerinin toplamıdır. Otojen büzülme priz sırasında, hidratasyon sırasında suyun iç tüketimi nedeniyle olur. Hidratasyon ürünlerinin hacmi hidratasyon olmamış çimento ve suyun orijinal hacminden daha azdır. Hacimdeki bu azalma çekme gerilmeleri oluşturur ve buda otojen büzülme sebeptir.

Kuruma rötresine betondan atmosfere doğru gerçekleşen su kaybı neden olur. Genellikle bu su kaybı çimento hamurundadır fakat çok az agrega tipi için temel su

kaybı agregadan olur. Kuruma r tresi göreceli olarak yavaş olmakla birlikte sebep olduğu gerilmeler kısmen çekme s nmesi azalması ile dengelenir.

Agrega  imento hamurunun büzülmesini engeller ve sonuçta agreg a hacmi ve agreganın elastisite modülü arttı  a kuruma r tresi azalır. Daha yüksek hamur hacmine sebep olan maksimum agreg a boyutundaki azalma kuruma r tresini arttırır.

Geleneksel beton için Eurocode'da verilen değer ve formüller KYB için de geçerlidir. Beton basınç dayanımı su/ imento oranıyla ilgili olduğu için düşük su/ imento oranına sahip KYB'de kuruma r tresi azalır ve otojen büzülme kuruma r tresini aşabilir.

Farklı tiplerdeki KYB'nin ve referans betonun büzülme ve s nmesi üzerine gerçekleştirilen testler şu sonuçları göstermiştir:

- R trenin sebep olduğu deformasyon daha yüksek olabilir.
- S nmenin sebep olduğu deformasyon daha yüksek olabilir.
- Büzülme ve s nme nedeniyle oluşan deformasyonların toplam değer i hemen hemen benzerdir [20].

2.5.5. Donatı ile beton arası aderans

Donatı ve beton arasındaki aderans genellikle betonun basınç dayanımı ve tokluğuyla bağlantılıdır. KYB'nin yoğun mikro yapısı Yangına karşı dayanıklılık ve taze haldeki kohezyonu, donatıların çevresindeki betonun dayanımını azaltabilen kusmayı azaltır veya önler.

Çok sayıda standart çekme testi incelendiğinde ilk olarak normal bir şekil deforme olmuş olan donatı ile KYB arasında geleneksel betonunkinden daha yüksek aderans olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Buna karşın, yüksek dayanımlı KYB incelendiğinde aderansın eşit veya çok az miktarda yüksek olduğu g r lm ştir. Bu yüzden aynı dayanımdaki geleneksel beton için belirlenmiş aderans değer i KYB için güvenle kullanılabilir [1].

2.5.6. Dayanıklılık

Beton bir yapının dayanıklılığı yüzey tabakasının geçirgenliğiyle yakından ilişkilidir. Yüzey tabakası muhtemel zararlı hareketleri başlatan veya bu hareketlerin ilerlemesini sağlayan maddelerin girişini sınırlandırmalıdır (CO₂, klorür, sülfat, su, oksijen, alkaliler, asitler vb.) dayanıklılık, uygulamada malzeme seçimine, beton kompozisyonuna ve yerleştirme, sıkıştırma, bitirme ve k r sırasındaki denetim derecesine bağlıdır.

Kalıp ve donatılar veya beton içine yerleştirilen diğer elemanlar (örneğin artgerme kanalları) arasındaki dar boşluklarda vibrasyon zorlukları nedeniyle yüzey tabakasının sıkıştırma eksikliği, agresif çevre koşullarına maruz betonarme yapıların dayanıklılık performanslarının zayıf olmasında temel faktör olarak kabul edilmiştir. KYB'nin geliştirilmesinin temel sebeplerinden birisi bahsedilen bu problemlerin üstesinden gelmektir.

Geleneksel vibrasyonlu beton süreksiz bir işlem olan vibrasyonla sıkıştırmaya maruz kalmaktadır. İç vibrasyon durumunda, doğru bir şekilde uygulansa bile vibratörün etki alanındaki beton hacmi aynı sıkıştırma enerjisini almaz. Benzer şekilde, dış vibrasyon durumunda sonuç sıkıştırma, vibrasyon kaynağına olan mesafeye bağlı olarak heterojendir.

O halde vibrasyonun sonucu düzgün olmayan bir sıkıştırmaya ve çeşitli geçirimsizliklere sahip ve zararlı maddelerin girişini arttıran bir betondur. Doğal olarak yanlış vibrasyonun sonuçları (ayrışma, terleme, peteğimsi delikler vb.) geçirgenlik ve sonuçta dayanıklılık üzerinde daha olumsuz etkilere sahiptir.

Doğru özelliklere sahip KYB bahsedilen bu eksiklerden muaf olur ve tutarlı bir şekilde düşük ve üniform geçirgenliğe, zararlı çevresel etkilere karşı daha az zayıf noktaya ve daha iyi dayanıklılığa sahip bir malzeme ortaya çıkar. KYB ve geleneksel vibrasyonlu beton arasındaki geçirgenliğin karşılaştırılması malzemelerin seçimine ve etkin su/çimento veya su/bağlayıcı oranına bağlıdır [20].

2.6. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş betonun birçok özelliği ve bu özellikleri belirlemek için kullanılan birçok test vardır. Çizelge 2.10'da bu çalışma için incelenen özellikler ve uygulanan testler gösterilmiştir.

Çizelge 2.10 : Sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için uygulanan testler

Özellik	Tercih Edilen Test Metotları
Mikro yapının yoğunluğu	Ultrases testi
Elastisite modülü	Basınç Dayanımı Testi
Basınç dayanımı	Basınç Dayanımı Testi
Eğilme dayanımı ve tokluk	3 noktalı eğilme testi

2.6.1. Ultrases Deneyi

Sertleşmiş betonun mikro yapısının yoğunluğunu incelemek için uygulanan ultrases deneyinin temel prensibi betonun bir ucundan gönderilen ultrases dalgalarının diğer uca varma süresini ölçerek yoğunluğu hakkında fikir sahibi olmaktır. Ultrases hızının yüksek olması betonun boşluklu bir yapıya sahip olduğunu gösterir çünkü ses dalgaları boşlukta daha hızlı ilerleyerek diğer uca varır. Bu testin yapımı şöyledir:

- Ultrases cihazı kalibre edilir.
- Beton numune boyu ölçüldükten sonra yatay konuma getirilir ve uçları temizlenir.
- Ses dalgalarını gönderen ve alan problara gres yağı sürülür.
- İki prob betonun iki yüzüne karşılıklı olarak bastırılır ve problardan biri yavaş yavaş beton yüzeyinde gezdirilir ve okunan en düşük değer ultrases dalgalarının betonun diğer ucuna geçiş süresi olarak kaydedilir.
- Numune boyu deneyden elde edilen süreye bölünerek ultrases dalga hızı hesaplanır.

2.6.2. Basınç dayanımı deneyi

Bu testte numune düşey yönde sabit bir hızla yüklenerek deforme edilir. Numunenin basınç dayanımını bulmak için izlenmesi gereken yol şöyledir:

- Deney cihazında numunenin yerleştirileceği tabaka temizlenir ve numune düşey şekilde yerleştirilir.
- Deney cihazının yükleme hızı ayarlanır ve test başlatılır.
- Numunenin kırıldığı yük kaydedilir ve numunenin yükleme yüzeyinin alanına bölünerek basınç dayanımı elde edilir.

Betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin maksimum gerilmenin %33'üne kadar olan kısmı lineer kabul edilir ve bu doğrunun eğimi elastisite modülünü verir. Bu yüzden basınç dayanım testi ile E değerini hesaplamak için numuneyi (tahmini) maksimum yükün %33'üne kadar yüklemek yeterlidir. Basınç dayanım testi ile elastisite modülü şu şekilde ölçülür:

- Numune düz bir yere düşey konumda koyulduktan sonra üzerinde deformasyon ölçer bulunan çerçeve beton üzerine sabitlenir ve çerçevenin alt ve üst kısmını bir arada tutan demir çubuklar çıkarılır.
- Deney cihazı temizlendikten sonra numune düşey şekilde yerleştirilir ve çerçeve üzerindeki deformasyon göstergesi sıfırlanır.
- Deney cihazının yükleme hızı ayarlanır ve test başlatılır.
- Her 20 kN’da bir deformasyon değeri göstergeden okunur ve kaydedilir.
- Maksimum yükün %33üne ulaşıldığında deney durdurulur.
- Alt ve üst parçalar arasına demir çubuklar yerleştirildikten sonra çerçeve sökülür.
- Okuma yapılan yük değerleri numunenin yüzey alanına bölünerek gerilmeye çevrilir ve N/mm^2 cinsinden kaydedilir.
- Okunan deformasyon değerleri ise çerçevenin yüksekliğine (alt ve üst parçaların arasındaki mesafe) bölünerek birim şekil değiştirme bulunur.
- Bu gerilme ve şekil değiştirme değerleri gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine işlenir ve noktalar arasından lineer bir doğru geçirilir. Bu doğrunun eğimi hesaplanır ve en yakın 20 katına yuvarlanarak numunenin elastisite modülü olarak kaydedilir.

2.6.3. Üç noktalı eğilme deneyi

Bu testte numune, uçlarından eşit uzaklıktaki iki mesnet üzerine oturtulur ve üst yüzeyin tam ortasından yükleme yapılarak numunenin kırılana kadar eğilerek numunenin eğilme dayanımı ve tokluğu bulunur. Bu testin uygulanması ve sonuçların hesaplanması şu şekildedir:

- Döküm yüzeyin yan yüz olmasına dikkat edilerek numunenin alt ve üst yüzeyinde mesnetlerin oturacağı yerler ölçülerek işaretlenir.
- Numunenin yan yüzeyine sehim ölçmek için “L” şeklinde küçük bir demir profil yapıştırılır.
- Mesnetler test cihazına istenilen aralıkta yerleştirildikten sonra numune mesnetlerin üzerine oturtulur.

- Numunenin sallanıp sallanmadığı kontrol edilir. Eğer sallanma varsa gerekli yerler desteklenerek numunenin düzgün oturması sağlanır.
- Ardından test cihazının yükü doğrusal dağıtması için yarım silindir şeklindeki bir metal çubuk numunenin üst yüzeyindeki mesnetleme çizgisine koyulur.
- Yükleme başlığı bu çubuğa yaklaştırılır ve çubukla başlık arasında bakılarak çubuğun tam yatay konumda olup olmadığına bakılır. Eğer çubuk yamuk duruyorsa desteklenerek yatay konuma getirilir. Böylece yüklemenin çizgi üzerindeki her noktaya aynı anda ve aynı miktarda dağılması sağlanır.
- Deformasyon ölçme cihazı yan yüzeye sabitlenmiş demir profile değiştirilir ve kaymaması için sabitlenir.
- Yükleme hızı ayarladıktan sonra başlık indirilerek üst mesnete değiştirilir. Deformasyon ve yük değerleri sıfırlandıktan sonra test başlatılır.
- Cihaza bağlı bilgisayarda test boyunca oluşan grafik ve yükleme değeri izlenir. Numunenin taşıyabileceği maksimum yüke ulaşıldıktan sonra yük değeri düşmeye başlar. Yük sıfıra yakın bir değere geldiğinde test durdurulur.
- Numunenin kırılma çizgisindeki genişlik ve yüksekliği kumpas ile ölçülür.

Deney sonunda şu formül kullanılarak numunenin eğilme dayanımı hesaplanır: **(2.9)**

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P \cdot l}{2}}{\frac{b \cdot x \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot x \cdot h^2} \quad (2.9)$$

Bu formülde σ eğilme dayanımını, l mesnetler arası mesafeyi, b numune genişliğini ve h numune yüksekliğini temsil eder.

Bilgisayardan alınan yük-deformasyon grafiğinin altında kalan alan hesaplanıp kesit alanına bölünür ve ağırlığın yaptığı iş eklenerek numunenin tokluğu hesaplanır. Ağırlığın yaptığı iş ağırlıkla toplam deformasyonun çarpımıdır.

2.7 KYB’de oluşabilecek bazı sorunlar ve çözümleri

Çizelge 2.11 : Betonda have delikleri oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Hava delikleri	Hapsolmuş hava Hapsolmuş su Hapsolmuş kalıp	Aşırı inceler/ yüksek özgül yüzey alanı	İnceler azaltılır.
		Kalıp yağının kalın ya da eşit olmayan bir şekilde uygulanması	Mümkün olduğunca az ve eşit miktarda uygulama
		Kaba kalıp yüzeyi	Kalıp yüzeylerinin temiz olması sağlanır.
			Geo-teksit kalıp kaplaması kullanılabilir. Bu kaplama havayı emer
		Döküm hızının çok fazla olması	Kalıba kararlı bir boşaltım sağlanır.
		Akma boyunun çok uzun olması	Akma mesafesi 5 m ile sınırlanır.
		Akma boyunun çok kısa olması	Akma mesafesi 1 m'ye uzatılır.
		Geniş serbest düşme aralığı	Serbest düşüşü 1 m'nin altına indirilir.
			Derin dökümlerde yumuşak duvar tiremi borusu kullanılır.
			Alttan yukarıya doğru yapılan pompalama ile havanın çıkmasına yardım edilir.
		Beton sıcaklığının çok yüksek olması	Beton sıcaklığı 25 C'nin altına indirilir.
		Çok yavaş yerleştirme hızı	Dökme sürekliliğini sağlamak için şantiye kaynakları ve beton teslim hızı planlanır.
		Süper akışkanlaştırıcıdaki bileşenlerin çökmesi	Tarih sırasına göre stoklama yapılır.
		Çok yüksek viskozite	Viskozite düzenleyici katkı dozajı azaltılır.
			Karışım hesabı tekrar gözden geçirilir.
Uygun olmayan agrega gradasyonu	Viskozite düzenleyici katkıları ya da hava sürükleyicileri kullanılır.		
Çok uzun karıştırma zamanı havaya sebep olması	Karıştırma zamanı tekrar gözden geçirilir.		
Kimyasal katkı/ çimento etkileşimi	Üretim öncesi katkı/çimento uygunluğu ayarlanır.		
Fiziksel Sebepler:		Zayıf doldurma yeteneği Zayıf geçme yeteneği Yüksek viskozite ya da yüksek akma gerilmesi Düşük çökme-akma ve/veya uzun T500 zamanı Hızlı çökme-akma azalması	

Çizelge 2.12 : Beton yüzeyinde görülen düşey çizgiler ya da su nedenli oyulmaların sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Beton yüzeyde görülen düşey çizgiler ya da su nedenli oyulmalar	İncelerin ve suyun yüzeyin dışına çıkması	Çok yüksek su/ toz oranı Çok düşük viskozite	Viskozite düzenleyici katkı kullanımı yardım edebilir.
			İncelerin ek ilavesi yoluyla viskozite artırılır.
			Zayıf tane boyut dağılımının üstesinden gelmek için hava sürükleyici kullanılır.
Fiziksel Sebep:	Düşük stabilite		

Çizelge 2.13 : Betonda renk değişikliklerinin sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Renk değişiklikleri	Yüzey boyunca harmanlar arasındaki farklılıklar	Çok düşük sıcaklık	Kış şartlarında beton ve kalıp içi sıcaklık korunur.
		Çok yüksek çökme/ akma, çok düşük viskozite	İnceler artırılarak ya da viskozite düzenleyici katkı kullanarak viskozite artırılır.
		Kimyasal katkının ya da kalıp ayırıcının geciktirici etkisi	Çevre şartları için kimyasal katkılar dikkatli seçilmelidir.
			Su miktarı azaltılır ya da akışkanlaştırıcı ilave miktarı azaltılır.
			Makbul bir hızlandırıcı koymak düşünülür.
		Dökme hızındaki değişiklikler	Geo-tekstil kalıp kaplaması kullanılır.
		Plastik kür membranlarının beton yüzeyine düzensiz teması	Sürekli döküm yapma
		Yüzeyi kuru ahşap kalıplar	Düzenli temas sağlanır.
Fiziksel Sebepler:	Yağ, kimyasal katkı gibi nedenlerin sebep olduğu geciktirici ya da beneklenme etkisi, çok yüksek plastik viskozite ya da akma gerilmesi		Dökümden önce kalıp ıslatılır. Tercihen kaplanmış kalıp yüzeyi kullanılır.

Çizelge 2.14 : Kalitesiz, pürüzlü döküm yüzeyinin sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Kalitesiz, Pürüzlü döküm yüzeyi	Kalıbın deformasyonu Kalıptan beton yüzeye "parmak izleri"	Hızlı dökme oranı ya da zayıf kalıp dizaynı	Hidrostatik yükü azaltmak için dökme hızı azaltılır.
			Viskoziteyi arttırmak için viskozite düzenleyici katkı kullanılır.
			Kalıp tekrar dizayn edilir.
		Yıpranmış kalıp yüzü Arta kalan betonun yapışması	Kalıp yenilenir.
			Dökümden önce yüzey temizlenir.
		Uygun olmayan kalıp ayırıcı ya da uygulama metodu	En iyi kalıp ayırıcısı saptanmak için deney yapılır.
Fiziksel Sebepler:	Yüksek kalıp basıncı, Çok düşük plastik viskozite		Doğru basınç ve sprej püskürtücü kullanılarak uygun ekipmanlar ile doğru bir hızda uygulanılır.
		Çok yüksek su/tuz oranı	Süper akışkanlaştırıcı ilave oranı artırılır ya da viskozite düzenleyici katkı kullanılır.

Çizelge 2.15 : Betonda oluşan peteğimsi deliklerin sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Peteğimsi Delikler	Yetersiz hamur ya da inceler	Düşük hamur/inceler miktarı	İnceler artırılır, en azından 450 kg toz/m ³ kullanılır.
	Çok düşük plastik viskozite nedeniyle betonun ayrışması		Hava sürükleyici ilave edilir.
		Uygun olmayan gradasyon	Sürekli gradasyon
		Boş hacme kıyasla çok geniş agrega boyutu	Daha küçük maksimum agrega boyutu
	Betonun, kalıbın bir kısmını dolduramaması	Kalıbın sızıntı yapması	Kalıbın bütünlüğü, özellikle birleşim yerlerinde kontrol edilir.
Fiziksel Sebepler:	Eksik doldurma yeteneği Eksik geçme yeteneği Eksik stabilite Çok düşük çökme- akma ve/veya T500 zamanı İri agrega/hamur ayrışması		

Çizelge 2.16 : Betonda pullanma oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Pullanma	Yüzey tabakası sadece ince malzeme içerir ve çok hızlı priz alır.	Kürün olmaması ya da sınırlı kür olması	Çevre şartlarına göre uygun kür sağlanır.
		Çok az miktardaki incelerin sebep olduğu segragasyon ve/veya terleme	Toz miktarı artırılır.
			Viskozite düzenleyici katkı kullanılır.
			Hava sürükleyici ilave edilir.
Fiziksek Sebepler:	Eksik stabilite Segragasyon ve/veya terleme Çok hızlı kuruma		

Çizelge 2.17 : Soğuk derz oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Farklı harmanlar arasındaki görünen birleşim yerleri (genel olarak soğuk derz olarak adlandırılır)	Yüzey sertleşmesinin oluşumu takip eden betonun monolitik birleşimini engeller.	Betonun aralıklı teslimleri	Sürekli döküm: ara yok
		Betonun hızlı katılaşması	Ön test: Çok hızlı katılaşmamalıdır.
		Yüksek hava ya da beton sıcaklığı	Beton sıcaklığı 25C'nin altına indirilir.
		İri agreganın ayrışması	Karışımın hesabı tekrar gözden geçirilir.
		İncelerin çok yüksek özgül yüzeyleri	Akma mesafesi azaltılır.
Fiziksel Sebepler:	Eksik doldurma yeteneği Tiksotropik priz Çok hızlı çökme- akma kaybı Çok yüksek viskozite Katkı- çimento etkileşimi		

Çizelge 2.18 : Plastik çatlama oluşmasının sebepleri ve çözüm yolları [20]

Kusur Tipi	Temel Sebepler	Pratik Sebepler	Nasıl engellenir ya da düzeltilir
Plastik çatlama (erken büzülme ve kalıcı oturma)	Çok hızlı kuruma Sedimentasyon (çökme) Donatı pozisyonu	Zayıf erken yaş kür rejimi	Yerleştirme/yüzey bitirmeden hemen sonra küre başlanır.
		Ayrışma ve terleme	Çevre koşullarına göre uygun kür seçilir.
			Betonun prizinden önce plastik çatlaklar kapatılır.
			Toz miktarı artırılır.
			Viskozite düzenleyici katkı kullanılır.
		Aşırı çevre koşulları (sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr vs.)	Mevcut şartlara göre yüzey bitirmesi uygulanılır.
Fiziksek Sebepler:	Plastisitenin artması Kuruma büzülmesi Zayıf stabilite	Yüzeye yakın donatılı derin döküm yüksekliği	Donatı kafesinin yeniden dizayn edilir

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, malzemelerin özellikleri, beton karışımları ile üretimi ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri açıklanmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Çimento

Bu çalışma için üretilen numunelerin tümünde 3550 cm²/g özgül yüzey alanına sahip CEM I 42.5 normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de, basınç dayanımı değerleri ise Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi

	%
SiO ₂	20,63
Al ₂ O ₃ (%)	4,71
Fe ₂ O ₃ (%)	3,41
CaO (%)	63,64
MgO (%)	1,24
SO ₃ (%)	2,98
K ₂ O (%)	0,91
Na ₂ O (%)	0,23
Cl	0,0357
LOI	1,25
Serbest CaO	1,1

Çizelge 3.2: Kullanılan çimentonun basınç dayanımı sonuçları

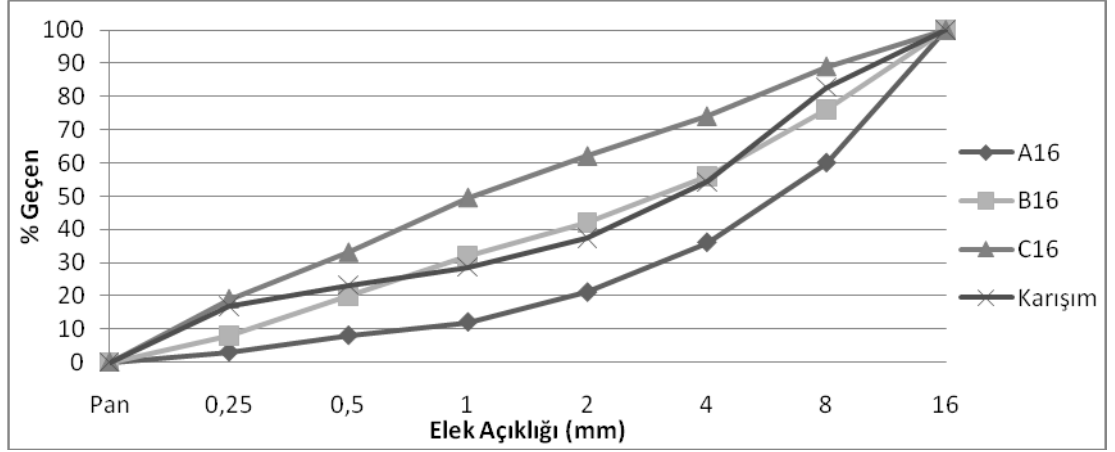
Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	TS EN 197-1 Standart
2	27	min. 20
7	40	-
28	51	min. 42.5
		max. 62.5

3.1.2. Agreg

Bu çalışmada kullanılan agrega tipleri doğal kum, kırma kum ve kırmataş 1'dir. Kullanılan bu agrega çeşitlerinin kaynakları, bazı fiziksel özellikleri ve elek analizleri Çizelge 3.3'te, granülometre eğrisi ise Şekil 3.1'de verilmiştir. Agreg granülometresi A16 ve C16 eğrileri arasında B16 eğrisine yakın olacak şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 3.3 : Kullanılan agregaların özellikleri ve elek analizleri

Malzeme		DOĞAL KUM	KIRMA KUM	KIRMATAŞ 1	KARIŞIM
Ocak bölgesi		AKPINAR	ÖMERLİ	DARICA	
Kuru Ağırlık		2000	2000	2000	
Yık. Kuru Ağırlık		1995	1900	1986	
% Geçen		%4,0	%5,0	%0,7	91,42
ELEK		%	%	%	82,83
Numarası	Açıklığı(mm)	GEÇEN	GEÇEN	GEÇEN	
	63	100	100	100	100
1 3/4"	31,5	100	100	100	100
5/8"	16	100	100	100	100
5/16"	8	100	100	57,08	82,83
No:5	4	89,22	89,25	1,73	54,23
No:10	2	79,95	43,96	0,7	37,45
No:18	1	69,92	25,63	-	28,66
No:35	0,5	59,90	17,58	-	23,24
No:60	0,25	49,87	6,50	-	16,91
No:230	0,063	19,80	5,00	-	7,44
İNCELİK MOD.		1,5	3,2		



Şekil 3.1 : Kullanılan agreganın granülometre eğrisi

3.1.3. Mineral Katkılar

Karışımlarda mineral katkı olarak uçucu kül (F Tipi) ile kireçtaşı ve kumtaşı filler çeşitleri kullanılmıştır. Kullanılan mineral katkıların ve agregaların bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Agreganın ve ince malzemelerin özgül ağırlıkları ve su emme oranları

Agrega çeşidi - boyutu	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Su Emme (%)
Uçucu Kül (0-100 µm)	2,12	-
Kireçtaşı filler (0-100 µm)	2.71	1.4
Kumtaşı filler (0-45 µm)	2.64	1.5
Doğal Kum (0-4 mm)	2.63	0.9
Kırma Kum (0-4 mm)	2.71	1.4
Kırma İri Agreganın (4-16 mm)	2.72	0.8

3.1.4. Kimyasal katkıları

Karışımların hepsinde aynı miktarda Polikarbosilik eter esaslı “Glenium 51” yeni nesil süper akışkanlaştırıcı ve “Rheomatrix 100” viskozite düzenleyici katkı kullanılmıştır. Bu kimyasal katkıların teknik özellikleri Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Glenium 51'in teknik özellikleri [10]

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilat Eter esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082 - 1,142 g/cm ³
Klor İçeriği % (EN480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3
pH değeri	6.6

Çizelge 3.6 : Rheomatrix 100'ün teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Yüksek moleküler ağırlıklı sentetik eşpolimerin sulu çözeltisi
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,0 - 1,02 g/cm ³
Klor İçeriği % (EN480-10)	< 0,1
pH değeri	6-9

3.1.5. Karışım Suyu

Beton numunelerin üretiminde ve kür'ünde pH değeri 7 (nötr) olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışımlar

Deneyisel çalışmalar için ilk olarak ince malzeme olarak sadece Portland çimento içeren referans KYB üretilmiştir. Filler kullanımının KYB'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için 6 karışım üretilmiştir. Bu karışımlar referans betonun çimento miktarı sırasıyla %20, %30 ve %40 oranında azaltılıp referans karışımın çimento miktarının %24, %36 ve %48 oranında kireçtaşı veya kumtaşı filler eklenerek üretilmiştir. Ayrıca uçucu külün de KYB üzerindeki etkilerini incelemek ve bu etkileri filler kullanımının etkileri ile kıyaslamak için %20, %30 ve %40 çimentonun uçucu külle değiştirildiği karışım üretilmiştir. Kullanılan filler oranının uçucu külden fazla olmasının nedeni uçucu külün birim ağırlığının fillere göre düşük olmasıdır. Filler oranı artırılarak kullanılan filler ve uçucu kül hacimlerinin arasındaki farkın azalması amaçlanmıştır. On karışımın hepsinde de su/toz oranı, süper akışkanlaştırıcı ve VDK dozajları sabit tutulmuştur ve hava oranı %1,8 kabul edilmiştir. Her karışımında kalan hacmin %30'u kadar doğal kum, %30'u

kadar kırma kum ve %40'ı kadar kırmataş I kullanılmıştır ve karışım 1 m³'e tamamlanmıştır. Karışımların içerikleri Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : Karışımların ince malzeme ve katkı bileşimleri

Karışım Kodu	Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Filler Çeşidi	Hava (%)	SA (%)	VDK (%)	Su/Toz
R	500	-	-		1,8	1,2	0,1	0,40
F20	400	100	-		1,8	1,2	0,1	0,40
F30	350	150	-		1,8	1,2	0,1	0,40
F40	300	200	-		1,8	1,2	0,1	0,40
L24	400	-	120	Kireçtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40
L36	350	-	180	Kireçtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40
L48	300	-	240	Kireçtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40
S24	400	-	120	Kumtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40
S36	350	-	180	Kumtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40
S48	300	-	240	Kumtaşı	1,8	1,2	0,1	0,40

Çizelge 3.8 : Karışımların agrega bileşimleri

Karışım Kodu	Doğal Kum (kg/m ³)	Kırma Kum (kg/m ³)	Kırmataş I (kg/m ³)
R	488	502	672
F20	476	491	657
F30	471	485	649
F40	465	479	641
L24	472	486	651
L36	464	478	640
L48	456	470	629
S24	472	486	651
S36	464	478	640
S48	456	470	629

3.3. Beton Üretimi

Beton üretiminde İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuar'ında bulunan düşey eksenli cebri karıştırıcılı betonyer kullanılmıştır. Üretim işlemi bütün karışımlar için şu sırayla gerçekleştirilmiştir.

- Malzemenin daha iyi karışması için çimento, agrega ve kullanılacaksa mineral katkı betonyere konulup kuru olarak karıştırılmıştır.
- Karma suyunun yarısı topaklanmayı önlemek ve homojen dağılımı sağlamak için yavaş yavaş kuru karışıma eklenmiş ve karıştırılmaya devam edilmiştir.

- Kalan suya süper akışkanlaştırıcı ve VDK ilave edildikten sonra yine yavaş yavaş karışıma eklenmiştir.
- Bütün karışımlar toplam 7 dakika karıştırılmıştır.
- Hazırlanan betonlar taze faz deneylerine tabi tutulduktan sonra uygun kalıplara yerleştirilmiştir.

Her karışımdan 100 mm X 200 mm boyutlu 3 adet silindir, 150 mm X 300 mm boyutlu 1 adet silindir, 70 mm X 70 mm X 280 mm boyutlu 3 adet prizma ve 100 mm X 100 mm X 510 mm boyutlu 1 adet prizma numune üretilmiştir.

Bütün numuneler 24 saat kalıplarda bekletildikten sonra 28. güne kadar 20 °C'deki su tankında muhafaza edilmiştir ve 35. Günde testler yapılana kadar laboratuvar hava kuru uygulanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Çökme-akma deneyi sonuçları

Üretilen karışımların çökme akma deneylerinden elde edilen yayılma miktarı test prosedüründe belirtildiği üzere hesaplanmıştır. Ayrıca t_{500} süresi de ölçülerek kaydedilmiştir ve deney sırasında ayrışma gözlemlenmemiştir. Çökme-akma deneyinin sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Yayılma miktarları ve t_{500} süreleri

Karışım Kodu	Yayılma (cm)	T_{500} süresi (san)
R	73	5,0
F20	70	3,5
F30	70	3,0
F40	73	4,0
L24	70	4,5
L36	78	3,0
L48	74	4,8
S24	74	3,5
S36	71	6,0
S48	71	4,5

4.2. V-hunisi deneyi sonuçları

Belirtilen prosedürde yapılan V-hunisi deneyinde ölçülen akma süreleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : V-hunisi akma süreleri

Karışım Kodu	V Kutusu (san)
R	10,0
F20	9,1
F30	7,5
F40	9,9
L24	9,8
L36	6,6
L48	12,0
S24	10,5
S36	12,0
S48	9,9

4.3. L-kutusu deneyi sonuçları

Belirtilen prosedürde yapılan L-kutusu deneyinden elde edilen “ H_2/H_1 ”geçme oranları Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : L-kutusu geçme oranları

Karışım Kodu	Geçme Oranı (H_2/H_1)
R	0,88
F20	0,88
F30	0,78
F40	0,88
L24	0,92
L36	0,88
L48	0,97
S24	0,93
S36	0,94
S48	0,96

4.4. U-kutusu deneyi sonuçları

Belirtilen prosedürde yapılan U-kutusu deneyinde ölçülen “H₁-H₂” geçme oranları Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : U-kutusu dolma yükseklikleri

Karışım Kodu	Dolma Yüksekliği (H₁-H₂)
R	30,5
F20	30,8
F30	27
F40	30,3
L24	31,3
L36	31,5
L48	30,8
S24	30,7
S36	30,9
S48	40,8

4.5. Ultrases deneyi sonuçları

Ultrases deneyleri basınç dayanım deneyi yapılacak olan 10 cm çaplı 20 cm yüksekliğindeki silindir numunelere uygulanmıştır. Karışımların ortalama ultrases dalga hızları Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : Ultrases Dalga Hızları

Karışım Kodu	Ultrases Dalga Hızı (km/san)
R	4,98
F20	4,96
F30	4,71
F40	4,97
L24	5,18
L36	4,71
L48	4,99
S24	5,05
S36	4,93
S48	4,71

4.6. Elastisite modülü değerleri

Tahmini maksimum yüke kadar her 20 kN’da bir deformasyon okuması yapılmış ve bu okumalar gerilme – birim şekil değiştirme grafiğine işlenmiştir. İşlenen noktalar arasından en uygun doğru geçirilmiştir. Bu doğrunun eğimi hesaplanarak numunenin elastisite modülü olarak kaydedilmiştir. Karışımların ortalama elastisite modülleri Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. Deney İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarındaki ELE Autotest 3000 cihazında 2 kN/san hızla yapılmıştır.

Çizelge 4.6 : Elastisite modülleri

Karışım Kodu	Elastisite Modülü (Mpa)
R	32000
F20	35680
F30	35120
F40	37980
L24	40340
L36	36860
L48	38500
S24	36800
S36	36740
S48	32000

4.7. Basınç deneyi sonuçları

Belirtilen şekilde kürlenmiş numuneler başları taşlanarak düzleştirildikten sonra 35. günde basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Karışımların ortalama basınç dayanımları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Betonlara başlık yapılmamasının nedeni KYB’nin bir özelliği olan düzgün yüzeydir. Numunelerin yüzeyleri geleneksel betona göre çok düzgün olduğundan sadece yükün tam anlamda homojen dağılmasını sağlamak için az miktarda taşlanarak düzleştirilmiş ve yeni boyları ölçülmüştür. Deney İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarındaki ELE Autotest 3000 cihazında 4 kN/san yükleme hızıyla yapılmıştır.

Çizelge 4.7 : Basınç dayanımları

Karışım Kodu	Baınç Dayanımı (Mpa)
R	89,69
F20	75,37
F30	73
F40	70,23
L24	77
L36	69,43
L48	68,07
S24	65,56
S36	58,17
S48	49,68

4.8. Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları

Eğilme deneyi 70x70x280 mm boyutlu prizma numunelerde yapılmış ve numuneler lifsiz ve küçük boyutlu olduğu için çentik açılmamıştır. Alt yüzeyde mesnetleme mesafesi olarak kenarlardan 40 mm boşluk bırakılmıştır. Deneyin yapıldığı İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuarındaki Instron 5500 cihazından elde edilen veriler uygun formatta dönüştürölüp işlendikten sonra hesaplanan eğilme dayanımları ve eğilme enerjileri Çizelge 4.8’deki gibidir.

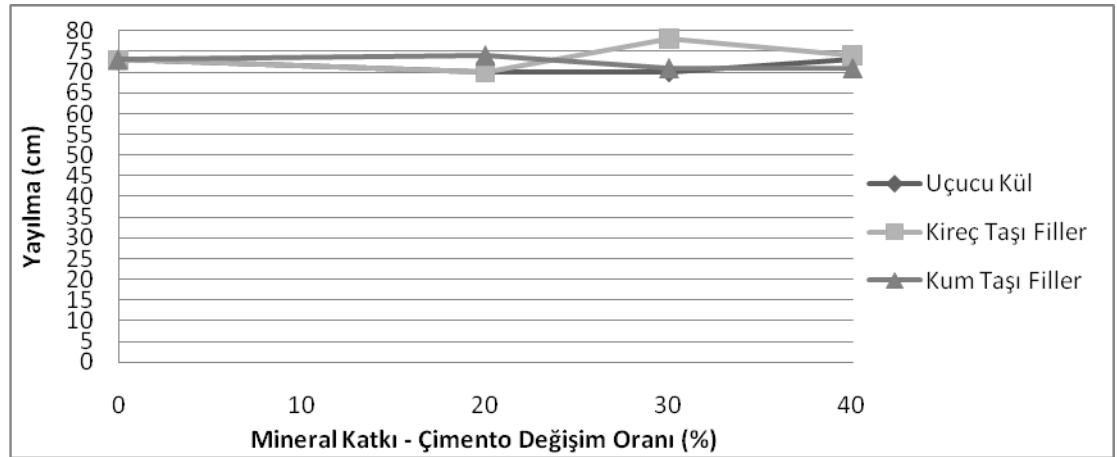
Çizelge 4.8 : Eğilme enerjileri ve eğilme dayanımları

Karışım Kodu	Eğilme Enerjisi (N/mm) (Joule)	Eğilme Dayanımı (N/mm2)
R	0,258	18,11
F20	0,278	12,4
F30	0,228	14,97
F40	0,199	10,91
L24	0,238	13,47
L36	0,315	15,55
L48	0,354	13,7
S24	0,136	11,12
S36	0,299	11,84
S48	0,4	14,74

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Yayılma Sürelerinin Değerlendirilmesi

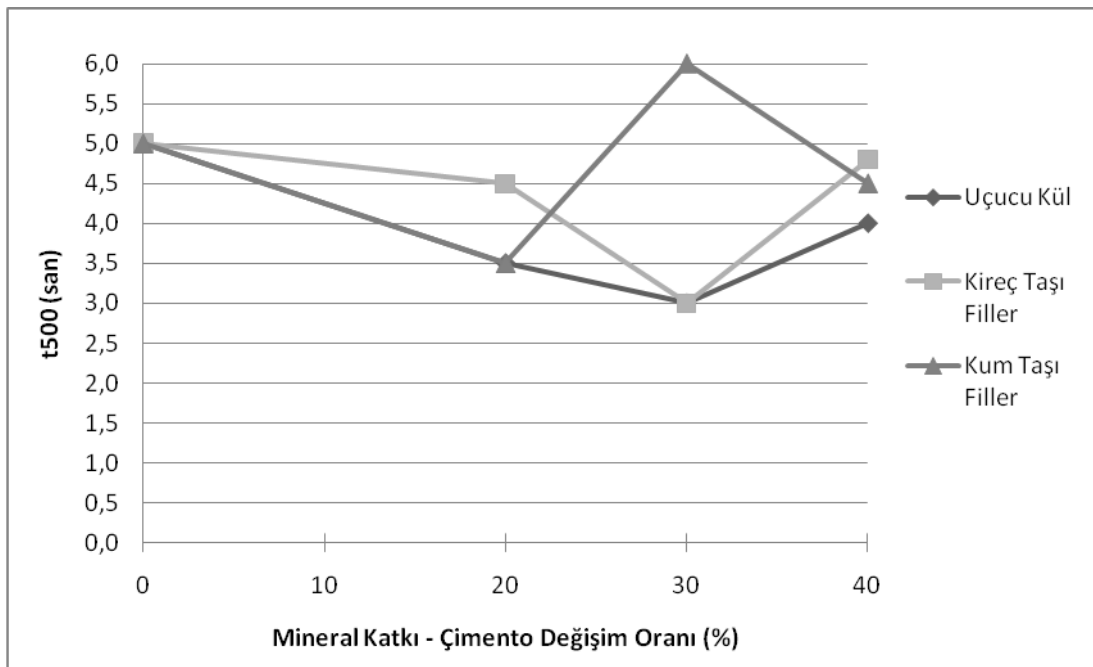
Mineral katkı oranına göre yayılma miktarlarını gösteren Şekil 5.2 incelendiğinde de her üç mineral katkı içinde katkı oranı ve yayılma miktarı arasında doğrusal bir ilişki saptanamamıştır. Maksimum yayılma uçucu kül için %30, kireçtaşı filler için %36 ve kumtaşı filler için %24 oranında elde edilmiştir. Mineral katkı olarak uçucu kül kullanıldığında, yayılma miktarı %24 ve %36 oranlarında düşmüş ancak katkı oranı %48'e çıktığında yükselerek referans betonla aynı seviyeye gelmiştir. Benzer şekilde %24 oranında kireçtaşı filler kullanımıyla yayılma miktarı düşmüştür ve %48 oranında referans betona yakın yayılma göstermiştir ancak %36 oranında yayılma miktarında ciddi bir oranda artış gözlemlenmiştir. Kumtaşı kullanımı diğer iki katkının aksine düşük oranda referans betona yakın yayılma sağlamış ancak oran arttığında yayılma miktarında azalma olmuştur. Değişimlerin düzensiz olmasına rağmen L36 karışımı hariç yayılma miktarı 70-74 cm aralığında değişmiştir. Bu aralık hem ayrışma riskinin yüksek olduğu 75 cm limitinden düşük hem de alt limit olan 65 cm'den yüksektir. 78 cm yayılma gösteren L36 karışımının da hiçbir taze faz deneyinde ayrışma gözlemlenmemiştir ve 80 cm'den küçük bir yayılmaya sahip olduğu için sınırlar içerisinde kalmıştır.



Şekil 5.1: Yayılma – Mineral katkı oranı

5.2. t_{500} Sürelerinin Değerlendirilmesi

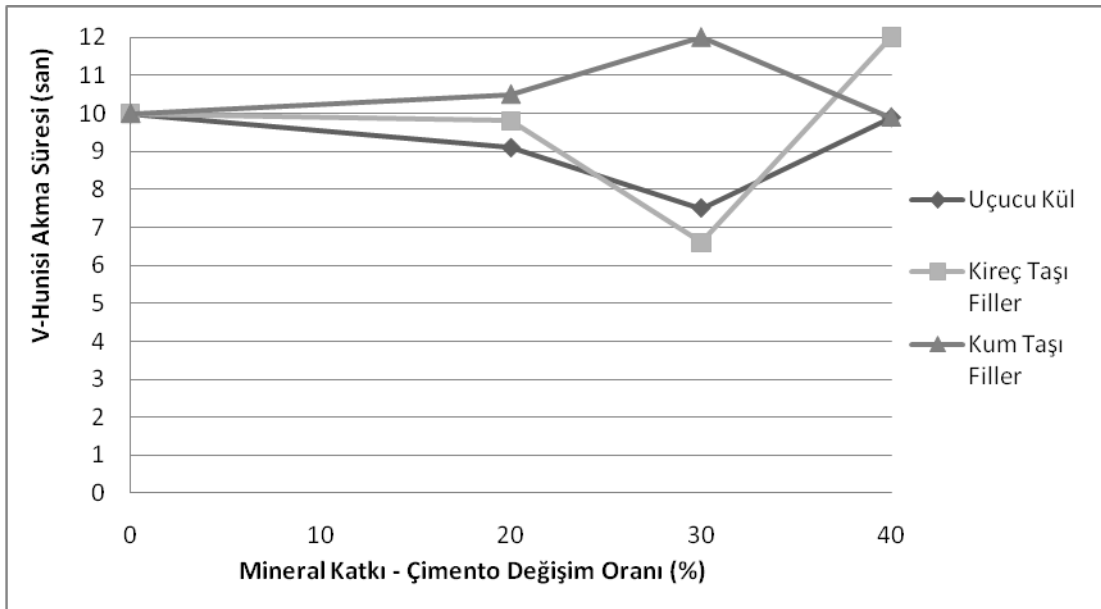
Çökme-akma testinde ölçülen t_{500} süresi test edilen karışımın viskozitesini belirtmese bile viskozite hakkında yorum yapabilmeyi sağlar. Mineral katkı oranını ile t_{500} sürelerinin işlendiği Şekil 5.2 incelendiğinde her üç mineral katkı için t_{500} süresinin referans karışıma göre düşük oranda katkı ilavesiyle düştüğü yani akışın hızlandığı görülmüştür. t_{500} süresindeki bu azalma kumtaşı filler kullanımında %36 katkı oranına kadar uçucu kül kullanımında ise %30'a kadar devam etmiştir ve bu oranlardan sonra tekrar artmıştır. Kireçtaşı filler kullanımında t_{500} süresi düzensiz bir değişim göstermiştir ve %48 oranında kullanıldığında kumtaşı filler içerikli karışım gibi referans karışıma yakın bir değer vermiştir. %36 oranında kireçtaşı filler kullanılan L36 karışımında viskoziteyi oldukça yükselmiş ve üst sınır olan 5 saniyeyi aşmıştır. Diğer tüm karışımların t_{500} akma süreleri 2-5 saniye aralığında kaldığından viskozitelerinin ayrışma riski oluşturmayacak kadar yüksek, KYB tanımına uygun şekilde yayılabilecek kadar düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2: t_{500} – Mineral katkı oranı

5.3. V-Hunisi Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

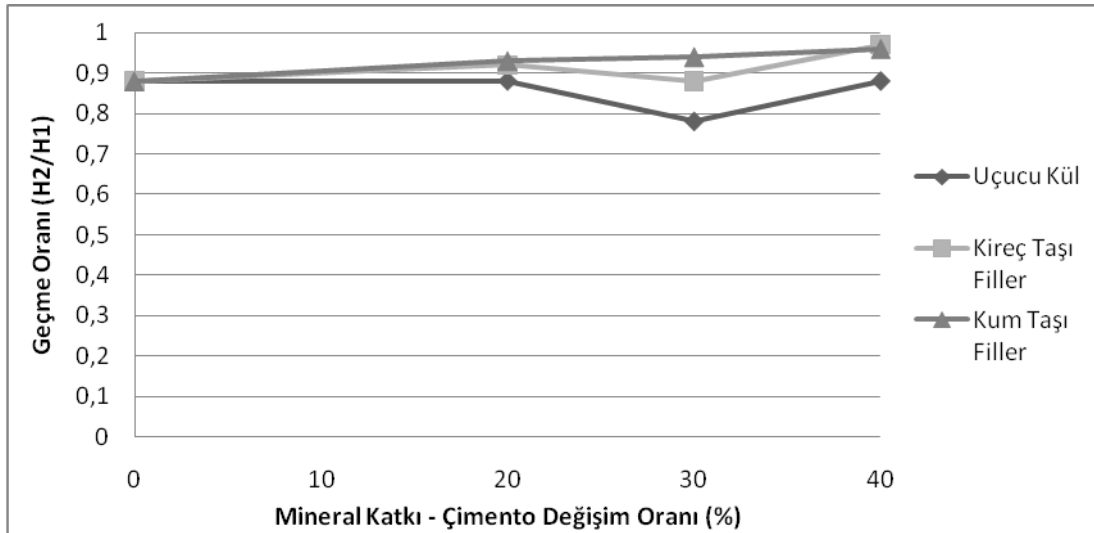
t_{500} süresi ölçümü gibi karışımın viskozitesi hakkında yorum yapmak için uygulanan V-hunisi deneyinin sonuçlarının işlendiği Şekil 5.3 incelendiğinde uçucu kül içeren karışımın akma süresi %30 kül oranına kadar azalıp %40 kül oranında tekrar artarak referans beton seviyesine gelmiş ve t_{500} ölçümüne benzer davranış göstermiştir. Ancak her iki testte de uçucu kül içeren karışımların minimum akma süresine ulaştığı %30 karışım oranında, t_{500} süresi minimum değere yakın fakat sınırlar içerisindeyken V-hunisi testinde 7,5 saniyelik akma süresiyle minimum değer olan 8 saniye sınırının altında kalmıştır. Kireçtaşı filler kullanımı da akma süresini t_{500} ölçümündeki gibi %24 katkı oranında az miktarda, %36 katkı oranında belirgin miktarda azaltmış, %48 katkı oranında ise ciddi miktarda yükseltmiştir. Ancak t_{500} ölçümünün aksine %36 katkı oranında elde edilen 6,5 saniyelik akma süresi 8 saniyelik minimum değerinin altında kalmıştır ve %48 katkı oranında referans betonun değerini aşarak üst limit olan 12 saniyeye varmıştır. Kireçtaşı filler içerikli karışımların akma süreleri ise uçucu kül kullanımının tersi davranış göstererek %24 katkı oranında az miktarda, %36 katkı oranında biraz daha belirgin miktarda artış göstermiştir ve %48 karışım oranında t_{500} ölçümünde olduğu gibi referans betona yakın bir değer vermiştir.



Şekil 5.3: V-hunisi akma süresi – Mineral katkı oranı

5.4. L-Kutusu Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

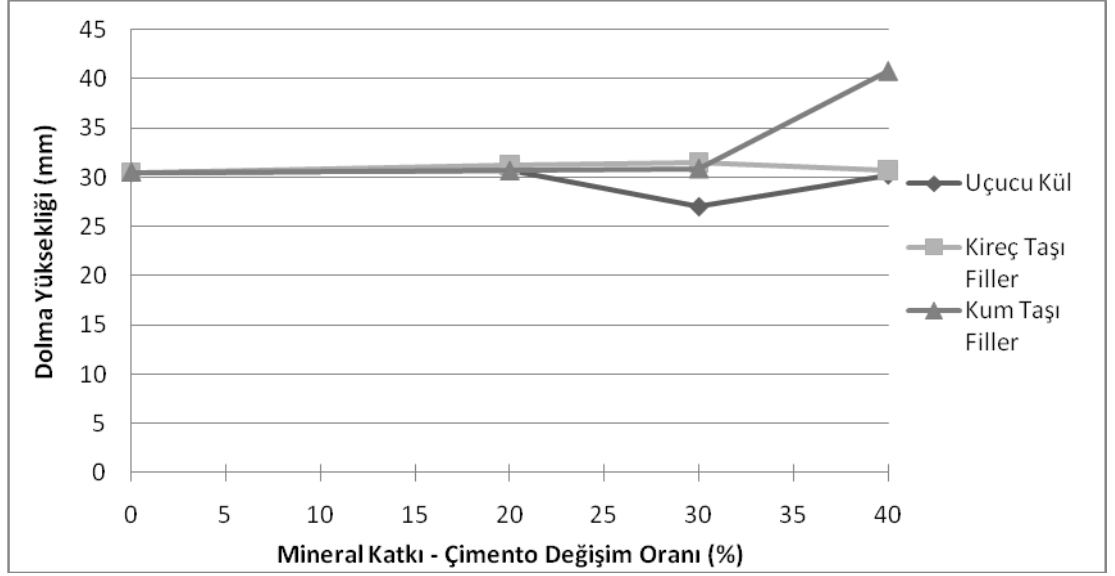
Geçme yeteneğini belirlemek için en geçerli deney olan L-kutusu deneyinden elde edilen, karışımların geçme oranlarının, katkı oranlarına göre gösterildiği Şekil 5.4 incelendiğinde kumtaşı filler kullanımının, katkı oranına bağlı olarak geçme oranını arttırdığı görülmüştür. %24 ve %48 oranında kireçtaşı kullanılan L24 ve L48 karışımlarının geçme oranı aynı oranda kireçtaşı filler içeren S24 ve S48 karışımlarının geçme oranına çok yakındır ancak %36 katkı oranına sahip L36 karışımı referans karışımın geçme oranına yakın bir değer vererek bu doğrusal değişimi bozmuştur. Uçucu kül içeren karışımlardan ise sadece F30'da geçme oranında alt limit olan 0,8 değerinin altına düşülmüş, F20 ve F40'ta referans karışımla aynı değerler elde edilmiştir. F30 haricindeki 9 karışımın hepsinde geçme oranı 0,8 minimum değerinin üzerinde kalmıştır.



Şekil 5.4: L-kutusu geçme oranı – Mineral katkı oranı

5.5. U-Kutusu Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

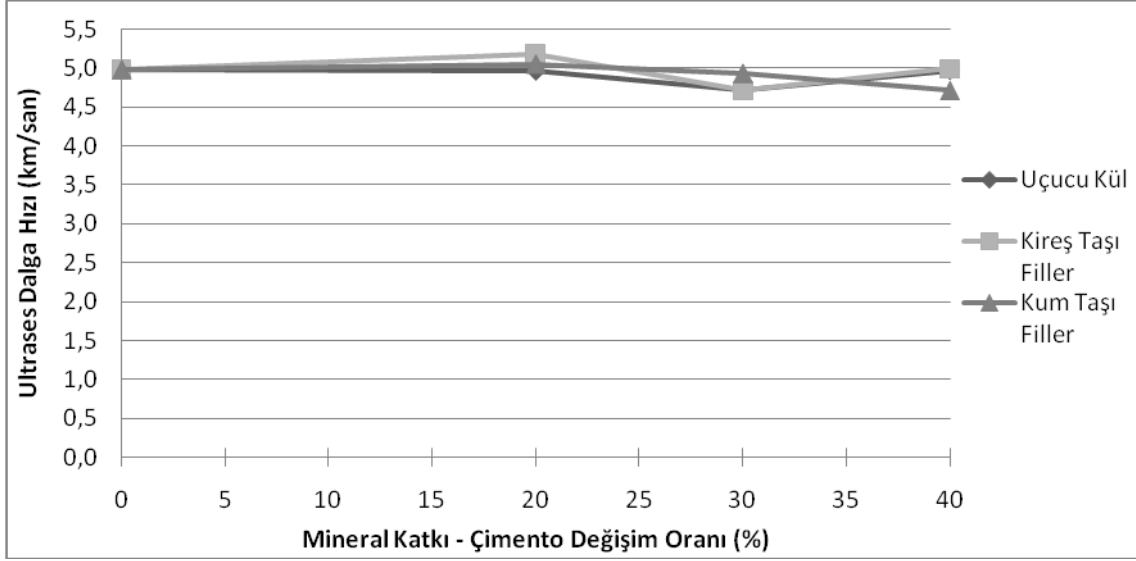
Karışımların dolma yüksekliğini gösteren Şekil 5.5 incelendiğinde S48 karışımı haricinde dolma yüksekliklerinde neredeyse hiç değişim oluşmamıştır. S48 karışımında oluşan değişim ise çok küçük miktarda olduğundan KYB'nin özelliklerini etkilemez.



Şekil 5.5: U-kutusu dolma yüksekliği - Mineral katkı oranı

5.6. Ultrases Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

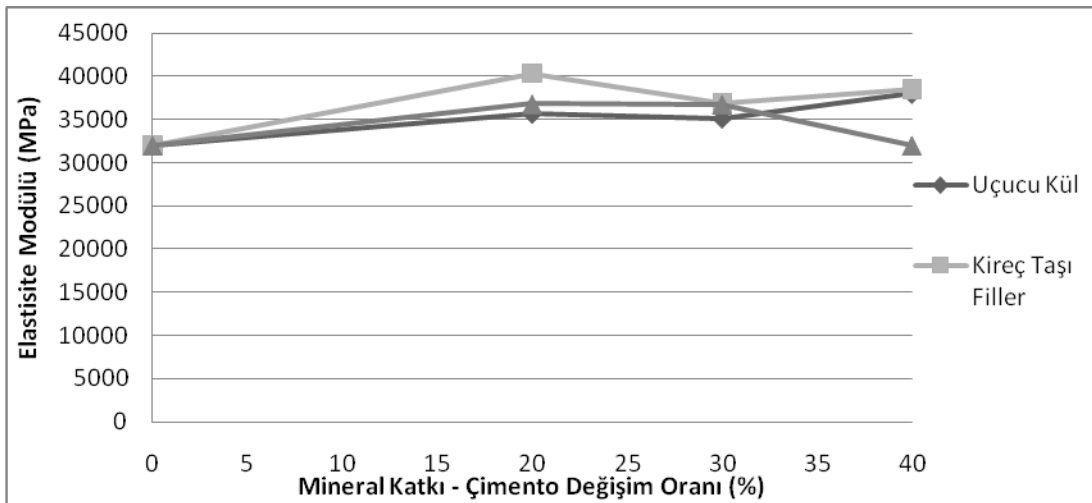
Ultrases deneyinden elde edilen ultrases dalga hızı betonun mikroyapısının yoğunluğu hakkında yorum yapabilmeyi sağlar. Yoğun bir yapı içerisinde boşluk az olacağından ultrases cihazının bir probundan çıkan ses dalgalarının diğer proba ulaşma süresi uzar yani dalga hızı azalır. Bu nedenle dalga hızındaki artışlar mikroyapının yoğunlaştığını gösterir. Karışımların ultrases dalga hızlarının gösterildiği Şekil 5.6 incelendiğinde %30 uçucu kül kullanımının ultrases dalga hızında düşüşe neden olduğu açıkça görülmektedir ancak %20 ve %40 mineral katkı oranında referans betona yakın hız değerleri elde edilmiştir. Kireçtaşı filler kullanıldığında ise tamamen düzensiz bir değişim oluşmuştur. Dalga hızı L24'te artmış, L36'da ciddi bir şekilde azalmış ve L48'de tekrar artarak referans betonla aynı seviyeye gelmiştir. Kumtaşı filler kullanımda doğrusal bir davranış göstermese de kireçtaşı filler'e göre daha düzenli bir değişim göstermiştir. Dalga hızı S28 karışımında maksimum değere varmış (S serisi için) ve ardından başlayan doğrusala yakın düşüşle S48'de F30 ve L36 ile aynı seviye gelmiştir.



Şekil 5.6: Ultrases dalga hızı - Mineral katkı oranı

5.7. Elastisite Modülü Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

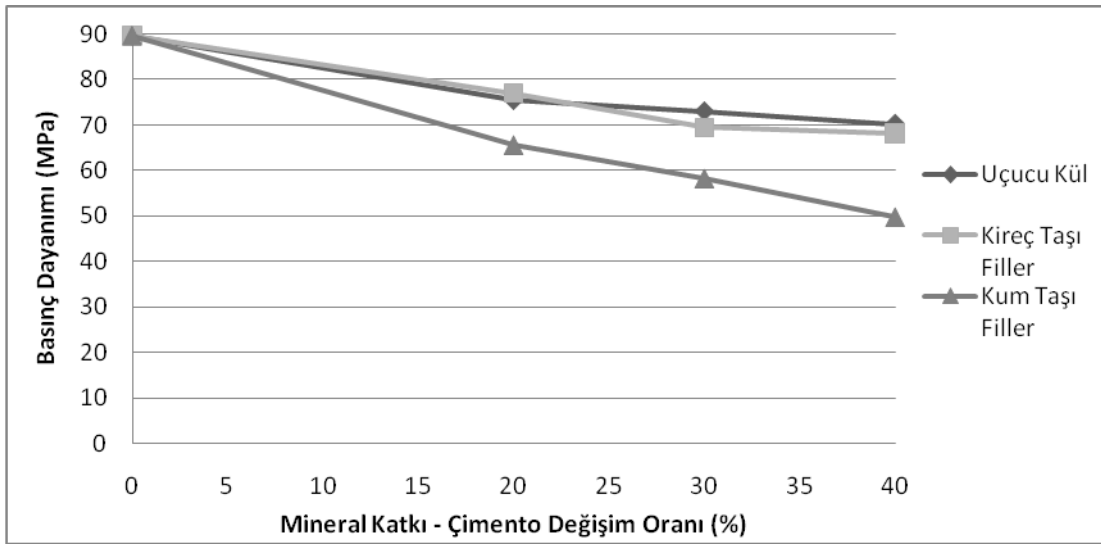
Karışımların elastisite modülü değerlerinin gösterildiği Şekil 5.7 incelendiğinden en düzenli değişim gösteren karışım türünün F serisi olduğu görülmüştür. %20 oranında uçucu kül kullanıldığında artan E değeri %30 değerinde belirgin bir değişim göstermemiş ve %40 katkı oranında tekrar artmıştır. %36 oranına kadar F serisi ile benzer değişim gösteren L serisinin E değeri bu noktadan sonra düşerek S48'de referans betonla aynı seviyeye gelmiştir. Kireçtaşı filler katkılı L serisi ise %24 katkı oranında diğer serilerden daha fazla artış göstermiştir ardından %36 değerinde S36'ya %48 oranında F40'a yakın değerler vermiştir.



Şekil 5.7: Elastisite modülü - Mineral katkı oranı

5.8. Basınç Dayanım Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler içerisindeki en düzenli değişimi göstereni basınç dayanım deneyidir. Karışımların basınç dayanımını gösteren Şekil 5.8'e bakıldığında basınç dayanımının çimento ile değiştirilen mineral katkı oranıyla doğrusala yakın bir şekilde azaldığı açıkça görülmektedir. Uçucu kül ve kireçtaşı kullanılan F ve L serisi birbirine yakın değerler vermiştir ancak kumtaşı filler içerikli S serisinin en yüksek değeri bile diğer serilerin en düşük değerlerinin altında kalmıştır. 10 karışım içerisinde en yüksek basınç dayanımını referans karışım verirken en düşük dayanımı ise S48 karışımında görülmüştür.

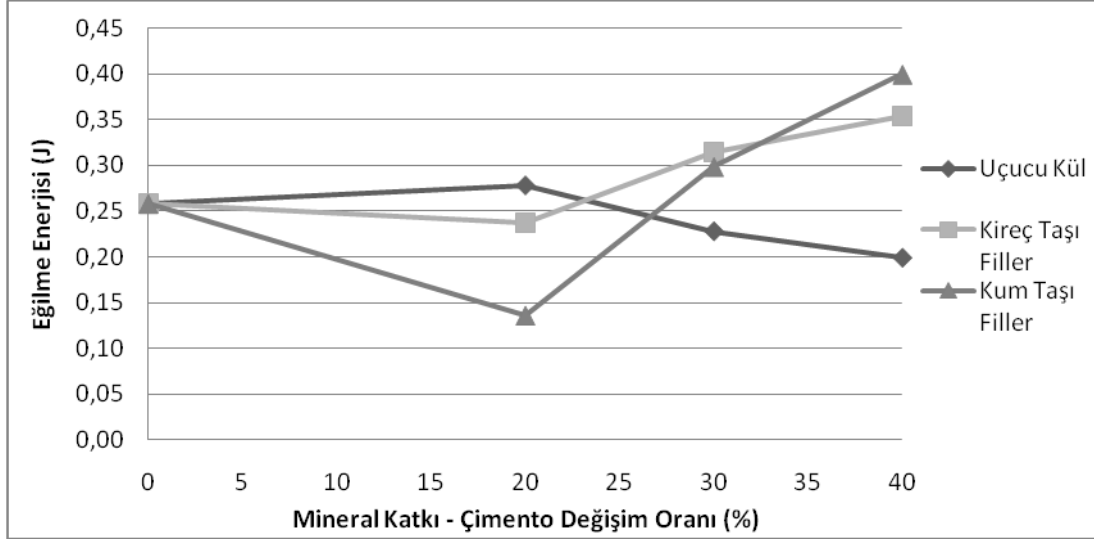


Şekil 5.8: Basınç dayanımı - Mineral katkı oranı

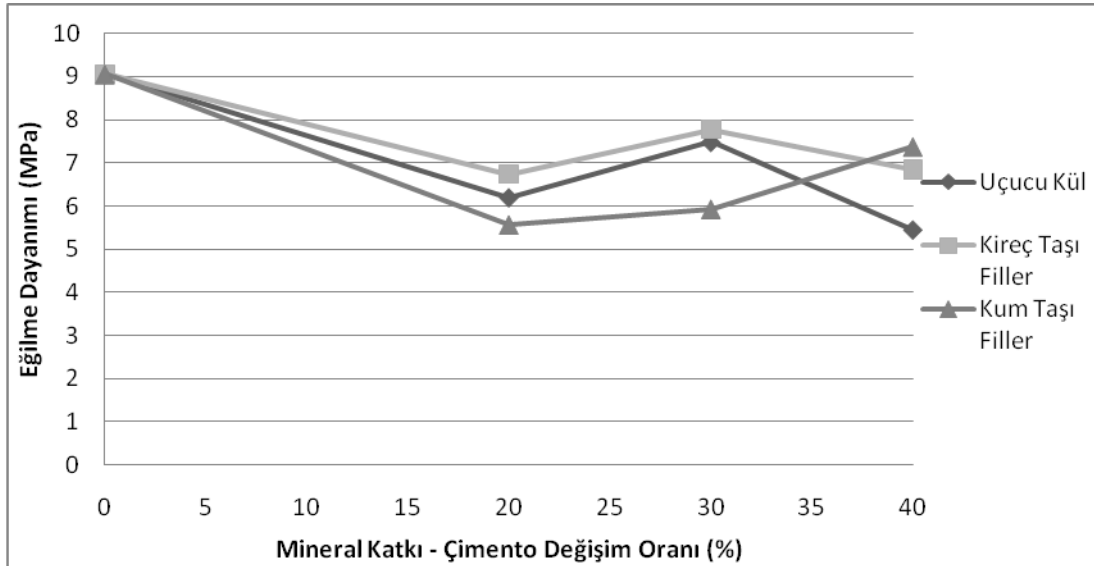
5.9. Üç Noktalı Eğilme Deneyinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyin yapıldığı INSTRON 5500 cihazından alınan veriler ve numunenin boyut ağırlık değerleri kullanılarak elde edilen eğilme enerjileri ve eğilme dayanımları Grafik 5.9 ve Grafik 5.10'da gösterilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde F serisinin eğilme enerjilerinde belirgin bir değişim görülmemiştir. L serisinin eğilme enerjisinde ise %24 oranına kadar belirgin bir değişim gözlemlenememiş ardından doğrusal bir artış başlamıştır. S serisinin eğilme değerleri ve değişimi %36 ve %48 oranlarında L serisine yakındır ancak %24 oranında belirgin L serisine kıyasla belirgin bir düşüş görülmüştür. Şekil 5.10'a bakıldığında ise eğilme dayanımındaki değişimlerin eğilme enerjisindekilere kıyasla daha düzensiz olduğu görülmektedir. Bu grafikten elde edilen en belirgin sonuç basınç dayanımlarında olduğu gibi mineral

katkılı bütün karışımların eğilme dayanımının referans betonunkinden düşük olduğudur. Bütün serilerin eğilme dayanımı ilk katkı oranına kadar düşmüş (F serisi için %20, L ve S serileri için %24) ardından yükselişe geçmiştir. Eğilme dayanımı düşük ivmeyle yükselen S serisi yükselişini %48 oranına kadar sürdürürken F serisi %30, L serisi %36 oranından sonra düşüşe geçmiştir. L ve S serilerinin eğilme dayanımı %24 ve %36 oranlarında farklı olmasına rağmen %48 oranında birbirine yakındır.



Şekil 5.9: Eğilme enerjisi - Mineral katkı oranı



Şekil 5.10: Eğilme dayanımı - Mineral katkı oranı

6. GENEL SONUÇLAR

- Tüm işlenebilirlik testleri birlikte değerlendirildiğinde %20 ve %40 değişim oralarında her üç mineral katkı tipinin de işlenebilirlik özelliğinin referans karışıma yakın olduğu, %30 değişim oranında ise uçucu kül ve kireçtaşı filler içeren karışımlarda işlenebilirliğin referans betona kıyasla geliştiği, kumtaşı filler içeren karışımın ise düzensiz değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak %36 oranında kireçtaşı filler içeren karışımın yayılma sınıfı haricinde bütün karışımların doldurma yeteneği, viskozite ve geçme yeteneği sınıfları aynı olduğundan işlenebilirlikteki bu değişimlerin önemli ölçüde olmadığı görülmüştür.
- Mineral katkı – çimento değişiminden en az etkilenen işlenebilirlik özelliği çökme-yayılma testi ile yorumlanan doldurma yeteneğidir.
- Ultrases dalga hızlarında düzensiz ama küçük değişimler gözlemlenmiştir bu da her üç mineral katkı türünün de mikro yapıda belirgin bir bozulma veya iyileşmeye neden olmadığını göstermektedir.
- Mineral katkı-çimento değişimi, değişim oranında bağlı olarak basınç dayanımında düzgün bir azalmaya sebep olmuştur. Uçucu kül ve kireçtaşı filler içerikli karışımların basınç dayanımları birbirine yakınken kumtaşı filler içeren karışımların basınç dayanımındaki düşüşler daha belirgindir. Basınç dayanımındaki azalmalara rağmen yüksek mukavemet sınırında basınç dayanımına sahip olan %48 oranında kumtaşı filler içerikli S48 karışımı haricinde tüm karışımlar yüksek mukavemetli beton sınıfında kalmıştır.
- Mineral katkı kullanımı elastisite modülü, eğilme dayanımı ve eğilme enerjisi üzerinde düzensiz azalmalara neden olduğu görülmüştür.

- Tüm sonuçlar göz önünde bulundurularak mineral katkı tipleri kıyaslandığında uçucu kül ve kireçtaşı filler içeren karışımların genel olarak benzer davranışlar gösterdiği ve yakın sonuçlar verdiği, kumtaşı filler içeren karışımların ise daha düzensiz davranışlar gösterdiği ve özellikle basınç dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerde daha belirgin kötüleşmelere görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Schutter, G. D., Bartos, P. J. M., Domone, P. ve Gibbs, J., 2008, Self-Compacting Concrete, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland
- [2] Walraven, J., Structural Aspects of Self Compacting, Self-Compacting Concrete Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium, 17-23 August 2009, Reykjavik, Iceland, RILEM Publications
- [3] Khatib, J. M., 2008: Performance of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash, ELSEVIER, Construction and Building Materials Vol. 22, p. 1963-1971
- [4] Bouzoubaâ, N., 2001: Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results, Pergamon, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol. 31, p. 413-420
- [5] Şimşek, O., 2007: Beton ve Beton Teknolojisi, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye
- [6] Atahan., H. N., Taşdemir, M. A. ve Oktar, O. N., Şubat 2003: Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Beton Özelliklerine Etkisi, İTÜ Dergisi, Cilt: 2, Sayı: 1, Sayfa: 23-34
- [7] Felekoğlu, B., Türkel, S. ve Baradan, B., 2004: Kendiliğinden Yerleşen Beton Bölüm I Genel Tanıtım, Kullanım Alanları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Haber Bülteni, 05 Haziran 2004, Yıl: 19, Sayı: 117
- [8] Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B. ve Kurşun, İ., 1999: Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş “İSTON”, 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu’99, İstanbul-1999

- [9] ACI 212 Committee 212, 2004: ACI 212.3R-04, Chemical Admixtures for Concrete, , American Concrete Institute
- [10] Ramachandran, V. S., 1995: Concrete Admixtures Handbook: properties, science and technology, 2nd ed. Noyes Publications, N.J., U.S.A.
- [11] Glenium 51 Bilgilendirme Kağıdı, 2008: BASF Yapı Kimyasalları
- [12] EFNARC, September 2006: Guidelines for Viscosity Modifying Admixtures for Concrete
- [13] Türkiye Hazır Beton Birliği, Teknik Bilgiler, Katkılar, <<http://www.thbb.org/Content.aspx?ID=27>>, alındığı tarih 05.09.2010
- [14] Şahmaran, M., Yaman, İ. Ö. ve Tokyay M., 2004: Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 10-12 Haziran 2004, İstanbul, Türkiye, s. 225-233
- [15] Şengül, Ö., Taşdemir, C. ve Taşdemir, M. A., Mechanical Properties and Rapid Chloride Permeability of Concretes with Ground Fly Ash, Technical paper, ACI Materials Journal, V. 102, No. 6, November-December 2005
- [16] Taşdemir, C. ve Atahan, H. N., Filler Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine ve Durabilitesine Etkisi, I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'96, İstanbul, Türkiye
- [17] EFNARC, February 2002, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete
- [18] Okamura, H. ve Masahiro, O., Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1-5, April 2003, Japan Concrete Institute
- [19] Bartos, P., Fresh Concrete: Properties and tests, 1992: Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands

[20] Türkiye Hazır Beton Birliği, Kendiliğinden Yerleşen Beton Klavuzu, Nisan 2007

[21] ERMCO, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, May 2005

[22] Gürdal, H. ve Yzeer, Z., Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, Beton 2004 Kongresi Bildirileri, 10-12 Haziran 2004, İstanbul, Türkiye, s. 244-254

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Adil Orçun KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi : Altındağ/ANKARA – 17/06/1987

Lisans Üniversite - Mezuniyet: Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık
Fakültesi İnşaat Mühendisliği - 2009

Lise - Mezuniyet : Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesi - 2005