

ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON DAVRANIŞININ
SAYISAL MODEL İLE BENZETİMİ**

**Ethem ÖZYAŞAR
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

BİLECİK, Yılı 2016

Ref.No: 10110380



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

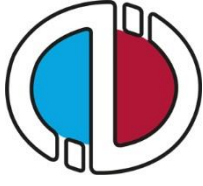
**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON DAVRANIŞININ
SAYISAL MODEL İLE BENZETİMİ**

**Ethem ÖZYAŞAR
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT**

BİLECİK, Yılı 2016

Ref. No:10110380



ANADOLU UNIVERSITY



**BILECIK SEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering**

**SIMULATING THE BEHAVIOUR OF SELF
COMPACTING CONCRETE WITH NUMERICAL
MODELING**

**Ethem ÖZYAŞAR
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Asist. Prof. Dr. Cenk KARAKURT**

BILECIK, Year 2016



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 06/01/2016..tarih ve 1/2... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/04/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ethem ÖZYAŞAR'ın "Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Sayısal Model İle Benzetimi" başlıklı tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT

ÜYE :

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK

ÜYE :

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI BAŞKANI: Prof. Dr. Yusuf Cengiz TOKLU

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın hayata geçebilmesi için beni yönlendiren, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT'a,

Çalışma süresi boyunca projede araştırmacı olarak bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK'e ve Doç. Dr. Ender DEMİREL'e

Laboratuvar ve modelleme çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Volkan KİRİ ve Enes OğUZ'a

3001 Başlangıç Ar-Ge Projesi Destekleme Programı ile 215M069 No'lu projeyi ve tezimi maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a,

Çalışma sürem boyunca bana bilgi ve deneyimlerini aktaran ayrıca malzeme temini konusunda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım SİNTA Hazır Beton İşletmeleri Müdürü Mecit GÜNDÜR'e ve ÇİMSA Bilecik Hazır Beton Tesisi laboratuvar yetkilisi Yasin PETEK'e,

Bu çalışmanın malzeme temininde desteklerini esirgemeyen BASF Yapı Kimyasallarına, SERYAPI Prefabrik ve SANİM imento Fabrikasına,

Tez çalışmamın her anında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi saygılarımı sunarım.

Ethem ÖZYAŞAR

Nisan, 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY	
TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	i
ŞEKİL DİZİNİ	iv
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	2
1.2. Kapsam	2
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	4
2.1. KYB'nin Tanımı ve Tarihçesi	4
2.2. KYB Kullanım Alanları	6
2.3. KYB'nin Olumlu ve Olumsuz Yönleri	6
2.3.1. KYB'nin olumlu yönleri	6
2.3.2. KYB'nin olumsuz yönleri	8
2.4. KYB'nin Tasarım İlkeleri	8
2.4.1. Artırılmış ince malzeme (Toz malzeme) yöntemi	9
2.4.2. Viskozite artırıcı katkı kullanımı yöntemi	9
2.4.3. Her iki yaklaşımın karışımı yöntemi	10
2.5. Kendiliğinden Yerleşen Taze Betonun Taşması Gereken Özellikler.....	11
2.5.1. Ayırılmaya karşı direnç	12
2.5.2. Viskozite katkıları	13
2.5.3. Doldurma etkisi	13

2.5.4.	Donatılar arasından geçme yeteneği	15
2.6.	KYB Karışımında Bulunan Malzemeler	18
2.7.	KYB'nin Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Deney Yöntemleri.....	18
2.8.	KYB' nin Mühendislik Özellikleri.....	20
2.8.1.	KYB'nin basınç dayanımı.....	21
2.8.2.	KYB'nin çekme dayanımı	21
2.8.3.	KYB'nin elastisite modülü.....	22
2.8.4.	KYB'de sünme.....	22
2.8.5.	KYB'de büzülme (Rötre).....	23
2.8.6.	KYB'nin ısı genleşme katsayısı	24
2.8.7.	KYB'nin donatı ile beton arası aderansı	24
2.8.8.	Kyb'de soğuk derzlerde kesme kuvveti kapasitesi	24
2.8.9.	KYB'nin yangına karşı dayanıklılığı	25
2.8.10.	KYB'de dayanıklılık	25
2.9.	KYB ve HAD (CFD) Modeli İle İlgili Yapılan Çalışmalar	26
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA	31
3.1.	Kullanılan Malzemeler	31
3.1.1.	Çimento.....	31
3.1.2.	Mineral katkıları	31
3.1.3.	Agregalar.....	31
3.1.4.	Kimyasal beton katkıları	32
3.2.	Yöntem	33
3.2.1.	Elek analizi deneyi	33
3.2.2.	J- Halkası deneyi.....	35
3.2.3.	V- Hunisi deneyi	36
3.2.4.	L- Kutusu deneyi.....	37
3.2.5.	Reometre deneyi.....	39
3.2.6.	Sertleşmiş beton deneyleri	39
3.2.7.	ANSYS CFX ile HAD (CFD) modellemesi.	40

4. DENEYSSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	41
4.1. KYB'nin İşlenebilirlik Deney Sonuçları	41
4.1.1. V-Hunisi, J-Halkası ve L-Kutusu deney sonuçları	41
4.1.2. Taze beton reometresi deney sonuçları	46
4.2. Sertleşmiş KYB Deney Sonuçları	51
4.2.1. Birim ağırlık deney sonuçları.....	52
4.2.2. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları	52
4.2.3. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	53
4.3. KYB HAD Modellemesi Sonuçları.....	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ.....

ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2. 1. KYB ile normal betonun karışım içeriği.	5
Şekil 2. 2. KYB’de bileşenlerin beton özelliklerine etkileri	9
Şekil 2. 3. Agregada kemerlenme mekanizması.	15
Şekil 2. 4. Taze beton için Bingham Modeli ve Newton Sıvısının davranışı	16
Şekil 3. 1. Kullanılan malzemeler.....	32
Şekil 3. 2. Granülometri için kullanılan elek takımları ve etüv.	33
Şekil 3. 3. Agregada granülometri eğrisi.	34
Şekil 3. 4. J- halkası deney düzeneği	36
Şekil 3. 5. Şeffaf V- Hunisi deney düzeneği ve boutları.	37
Şekil 3. 6. L – kutusunun genel yapısı	38
Şekil 3. 7. Şeffaf L-kutusu deney düzeneği	38
Şekil 3. 8. Taze beton reometresi	39
Şekil 3. 9. Sertleşmiş beton deney cihazları.	40
Şekil 4. 1. V-hunisi deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri	43
Şekil 4. 2. L-kutusu deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri.....	44
Şekil 4. 3. J-halkası deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri	45
Şekil 4. 4. K1 reometre sonucu.....	46
Şekil 4. 5. K2 reometre sonucu.....	47
Şekil 4. 6. K3 reometre sonucu.....	47
Şekil 4. 7. K4 reometre sonucu.....	48
Şekil 4. 8. K5 reometre sonucu.....	48
Şekil 4. 9. K6 reometre sonucu.....	49
Şekil 4. 10. K7 reometre sonucu.....	49
Şekil 4. 11. K8 reometre sonucu.....	50
Şekil 4. 12. K9 reometre sonucu.....	50
Şekil 4. 13. K10 reometre sonucu.....	51
Şekil 4. 14. KYB sertleşmiş beton deneyleri.	51

Sayfa No

Şekil 4. 15. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm)	56
Şekil 4. 16. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm)	57
Şekil 4. 17. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm)	58
Şekil 4. 18. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).....	59
Şekil 4. 19. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).....	60
Şekil 4. 20. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).....	61
Şekil 4. 21. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).....	62
Şekil 4. 22. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).....	63

ÇİZELGE DİZİNİ**Sayfa No**

Çizelge 2. 1. KYB’lerde önerilen iri agrega hacim aralıkları.....	11
Çizelge 2. 2. KYB karışım kompozisyonunun tipik aralıkları.....	11
Çizelge 2. 3. KYB’nin işlenebilme özellikleri için önerilen deneyler.....	19
Çizelge 2. 4. KYB’nin işlenebilme özelliklerine göre alternatif deneyler.....	19
Çizelge 2. 5. KYB için kabul kriterleri.....	20
Çizelge 3. 1. KYB karışım miktarları	35
Çizelge 4. 1. KYB yayılma, akış ve geçiş yeterliliği değerleri.....	41
Çizelge 4. 2. KYB birim hacim ağırlık deney sonuçları.....	52
Çizelge 4. 3. KYB ultrases geçiş hızı deney sonuçları.....	53
Çizelge 4. 4. KYB basınç dayanımı deney sonuçları.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

τ	:	Kayma Gerilmesi
τ_0	:	Eşik Kayma Gerilmesi
η	:	Viskozite Katsayısı
$^{\circ}\gamma$:	Şekil Değiştirme Hızı
m_p	:	Parçacığın Kütlesi
U_p	:	Parçacığın Hızı
F_D	:	Parçacığa Etkiyen Sürüklenme (Drag) Kuvveti
F_B	:	Parçacığa Etkiyen Kaldırma (Bouyancy) Kuvveti
F_R	:	Dönmeden (Rotation) Kaynaklanan Merkezkaç Ve Coriolis Kuvvetleri
F_{VM}	:	Virtüel Kütle (Virtual Mass) Kuvveti (Parçacığın Hareketi Sırasında Etrafında İvmelendirdiği Akışkana Ait Ek Atalet Kuvvetlerini Temsilen)
F_P	:	Basınç Farkı Kuvveti (Burada Basınç Parçacık Etrafındaki Akışkanın Basıncı Olup, Yoğunluğu Akışkan Yoğunluğundan Fazla Olan Parçacıklar İçin Eklenmesi Gerekir)
F_{BA}	:	Basset Kuvveti (Akışkanın Kararlılık Durumundan Ayrıldığı Anlardaki Durumlara Özgü Bir Kuvvet) Olarak Tanımlanır.

Kısaltmalar

ADF :	Agrega Doldurma Faktörü
HAD :	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
KYB :	Kendiliğinden Yerleşen Beton
RONs:	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes Denklemi
VAK :	Viskozite Arttırıcı Katkı

ÖZET

Günümüzde kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) beton teknolojisinde önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle katkı teknolojisindeki gelişim sayesinde elde edilen yüksek işlenebilirlik KYB'nin en önemli avantajıdır. Sertleşmiş beton özellikleri dikkate alındığında yüksek doluluk, düşük geçirimsizlik ve yüksek dayanımla birlikte elde edilen kalıcılık performansı KYB'nin diğer olumlu yönleridir. KYB'nin özel tasarım parametrelerine uygun akış özelliklerinin belirlenmesinde birçok farklı deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler taze KYB karışımının doldurma, akış, geçiş ve viskozite gibi özelliklerin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu konuda taze beton davranışının deneyler ile belirlenmesi dışında sayısal model ile incelemesi üzerine yapılan çalışmalar oldukça yeni bir alandır.

Bu tez çalışmasında deneysel verilerden elde edilen taze betonun akış davranışının sayısal olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Modellemede öncelikle homojen akışkan kabulü yapılarak KYB'nin sayısal benzetimi reometre, L-kutusu, V-hunisi ve J-halkası deneylerinde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelinin doğruluğu ve hassasiyeti test edilecektir. Daha sonra mevcut HAD modeline, agrega etkilerini içeren uygun bir “parçacık taşınım modeli” dahil edilerek KYB'nin daha gerçekçi sayısal benzetimleri yapılacaktır. Böylece laboratuvar deneyinin mümkün olmadığı geometri ve koşullardaki KYB uygulamalarında sayısal benzetim yolu ile elde edilen sonuçlara dayalı olarak KYB karışımı için uygun reolojik parametreleri belirlenebilecektir. Böylece elde edilmesi amaçlanan HAD yöntemi sayesinde standart laboratuvar deneylerinde önceden belirlenmesi mümkün olmayan ve KYB'nin uygulanacağı geometrinin boyut etkisine bağlı olarak değişen ayrışma ve blokaj risklerini azaltabilmek mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler

Kendiliğinden Yerleşen Beton, İşlenebilirlik, Bingham akışkanı, Akışkan modellenmesi, Parçacık taşınım modeli, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

ABSTRACT

Nowadays, self-compacting concrete (SCC) plays an important role in concrete technology. Especially the most important advantage of SCC is high workability due to the developments in additive technology. High compactness ratio, lower permeability and durability performance achieved by higher strength are the other advantages of SCC when hardened concrete properties are considered. Several different testing methods are developed for the determination of the appropriate flow properties of the SCC due to specific design parameters. These methods are used to determine the filling, flow, passing and viscosity properties of the fresh SCC. In this regard, determination of the behaviour of fresh SCC rather than testing methods by numerical modeling is a new field.

This thesis is intended to study the experimental data obtained from numerical modeling of flow behavior of fresh concrete. Modeling done primarily homogeneous fluid acceptance PUK numerical simulation rheometer, L-box, V-funnel and J-ring should be calculated by comparing with the results obtained in experimental fluid dynamics (CFD) the accuracy of the model and accuracy will be tested. Later existing CFD model, containing the appropriate aggregate effect of a "particle transport model" including the more realistic numerical simulations will be carried out by the SCC. Thus, in laboratory experiments in the geometry of the PUK and the conditions to be able to practice, based on results obtained by numerical simulation way to be able to determine the appropriate mix of rheological parameters for the PUK. Thus, the determination to achieve the intended advance in the CFD method through standard laboratory tests, depending on the size of the effect which can not be applied geometry and SCC will be possible to reduce the risk of changing segregation and blockage.

Keywords

Self compacting concrete, Workability, Bingham fluid, Fluid modeling, Particle Tracking Model, Computational Fluid Dynamics.

1. GİRİŞ

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), kendi ağırlığı ile döküldüğü kalıba yerleşebilen ve vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen özel bir beton türüdür. KYB'nin en önemli avantajı sık donatılı ve dar kesitli yapı elemanlarında, boşluksuz, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmadan homojenliğini ve kohezyonunu koruyabilen, yüksek işlenebilirliğe sahip bir yapı malzemesi olmasıdır. Geleneksel tasarıma sahip bir taze betonun kalıbına yerleştirilmesinde uygulanan vibrasyon, kullanılan ekipman ve hassas işçilik gibi inşaat hızını ve yapı maliyetini etkileyen ilave uygulamalara KYB'de genellikle gerek kalmaz. Bunun sonucunda enerji tüketimi, işçilik maliyetleri ve porozitesi düşük, yüksek dayanıklılığa sahip sağlıklı beton ve betonarme yapı elemanlarının üretimi kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı son yıllarda KYB uygulamalarına olan ilgi artmış ve fiziksel modele dayalı pek çok çalışma literatürde rapor edilmiştir.

KYB'nin en önemli özelliği tasarımında kullanılan ince agrega granülometrisi ve polimer esaslı yüksek oranda su azaltma yeteneğine sahip hiper akışkanlaştırıcı sayesinde kazandığı yüksek taze beton işlenebilirliğidir. KYB'nin ayrışma göstermeksizin dar ve sık donatılı kesitlerden geçebilme özelliklerinin belirlendiği standartlarca kabul edilmiş birçok deney yöntemi bulunmaktadır. Ancak özellikle büyük ölçekli, donatılı ve karmaşık geometrilere sahip inşaat elemanlarındaki KYB uygulamalarında karşılaşılabilecek riskleri laboratuvar deneyleri ile önceden tespit edebilmek bazen oldukça zordur.

Sayısal çözümlene yöntemlerinin gelişmesi ve hesaplama kapasitesinin artmasıyla birlikte mühendislik problemlerinin sayısal benzetim tekniklerine dayalı çözümü hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle analitik çözümün mümkün olmadığı karmaşık akışkanlar dinamiği problemlerinin bilgisayar ortamında sayısal benzetiminin yapıldığı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) önemli bir disiplin olarak gelişmektedir. KYB'nin sayısal benzetimi üzerine son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde rapor edilen KYB'nin akışkan davranışının bilgisayar ortamında sayısal benzetiminin

yapıldığı sayısal model uygulamaları homojen akışkan varsayımına dayanmakta ve agrega etkileri ihmal edilmektedir.

1.1. Amaç

Bu proje çalışmasında öncelikle homojen akışkan kabulü yapılarak KYB'nin sayısal benzetimi yapılacak ve sonuçları bu projede gerçekleştirilecek reometre, L-kutusu, V-hunisi, J-halkası ve yayılma deney sonuçları ile karşılaştırılarak HAD modelinin doğruluğu ve hassasiyeti test edilecektir. Daha sonra mevcut HAD modeline, agrega etkilerini içeren uygun bir "parçacık taşınım modeli" dahil edilerek KYB'nin daha gerçekçi sayısal benzetimleri yapılacaktır. Böylece laboratuvar deneyinin mümkün olmadığı geometri ve koşullardaki KYB uygulamalarında sayısal benzetim yolu ile elde edilen sonuçlara dayalı olarak KYB karışımı için uygun reolojik parametreleri belirlenebilecektir. Bu proje çalışması sonucunda elde edilmesi amaçlanan HAD yöntemi sayesinde standart laboratuvar deneylerinde önceden belirlenmesi mümkün olmayan ve KYB'nin uygulanacağı geometrinin boyut etkisine bağlı olarak değişen ayrışma ve blokaj risklerini azaltabilmek mümkün olabilecektir.

1.2. Kapsam

Yapılan bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş, çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmıştır.

İkinci bölümde ise KYB'nin tanımı ve tarihçesi, kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır. Ayrıca KYB karışım oranlarının hesaplanmasında kullanılan tasarım ilkeleri, KYB karışımında kullanılan malzemeler, bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde taze KYB üzerinde yapılan taze beton deneyleri hakkında bilgi verilmiştir. KYB numuneleri üzerinde yapılan deneylerin uygulanışları ve amaçları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde ise KYB numunelerine farklı oranlarda katılan uçucu kül, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, çimento ve agregaların KYB numuneleri üzerindeki sonuçları verilerek KYB'nin işlenebilirliği HAD modellemesi ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde KYB numunelerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, bulgular ifade edilmiş ve ileride bu alanda yapılabilecek çalışmalara uygun önerilerde bulunulmuştur.

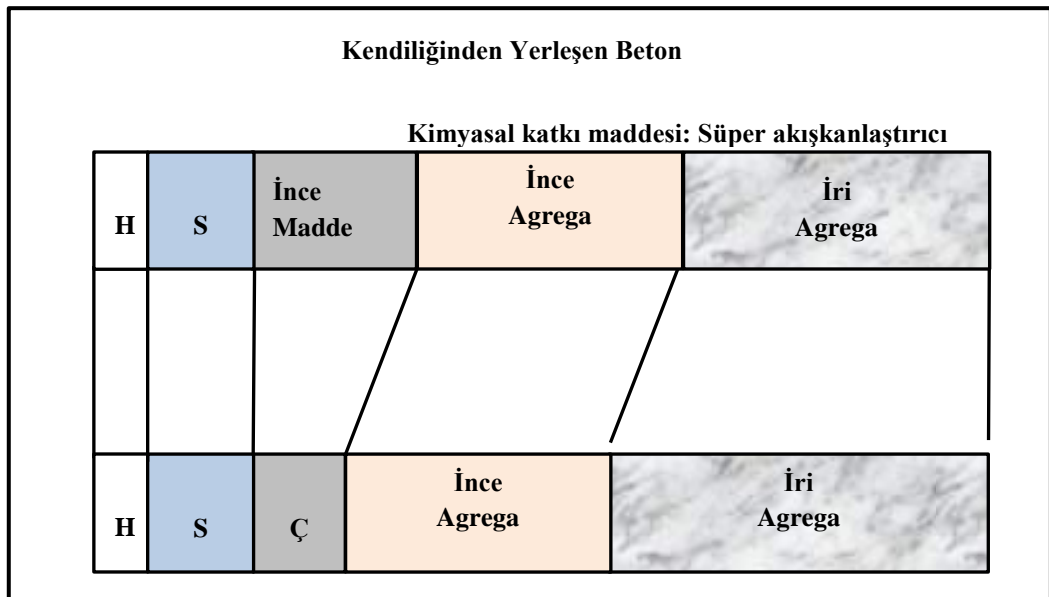
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

2.1. KYB'nin Tanımı ve Tarihçesi

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı ile döküldüğü kalıba yerleşebilen ve vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen en sık donatılı bölgelerde ve en dar kesitlerde bile hava boşluğunu dışarı atarak ve sıkışarak düzlenebilen, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayarak stabilitesini koruyabilen, kohezyonunu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür (Baradan ve Felekoğlu, 2004). Kendi ağırlığı ile segregasyona uğramadan döküldüğü kalıba, şantiyedeki iş gücünün azalması, özgün tasarımların yapılabilmesi, dar kesitlerde yerleşmesinin yanında, vibrasyona gerek kalmadan kalıbına yerleşebilmesi ve bunun sonucunda enerji ve para tasarrufu, üretimin hızlanması çalışılabilmesi, yüksek dayanıklılık sağlayabilmesi, yapı elemanlarında pürüzsüz bir yüzey sağlanabilmesi, şantiye ortamında betona su katılmasının önlenmesi, beton dökümü sırasında sıkıştırma yapılmadığından daha az gürültü meydana getirmesi gibi avantajlarından dolayı bu betonlara olan ilgi artmış ve gelişmiş ülkelerde önemli anlamda kullanımını sağlamıştır (Baradan ve Felekoğlu, 2004; Corradi vd., 2002). KYB ilk defa su altında beton tatbiki için suda ayrışmayan beton üretimi maksadı ile 1980'li yıllarda Japonya'da geliştirilmiştir. Okamura, betonda "kendiliğinden yerleşebilirlik" kavramını ilk ortaya atanlardandır (Okamura, 1997). Su altında beton dökümü tatbiklerinde, vibrasyon gerektirmeksizin beton dökümlerinden kazanılan tecrübe ile KYB üretilmesi hedeflenmiştir. KYB ile ilgili Okamura'nın başlattığı çalışmaları daha sonra Ozawa, Ouchi ve Maekawa devam ettirmişlerdir. Tokyo'da yüksek performanslı KYB prototipi 1988 yılında üretilerek mekanik özellikleri tetkik edilmiştir. KYB'nin geliştirilmesindeki öncelikli hedef, dayanıklılık açısından da yüksek performansı sağlamaktır (Ouchi, 1999). 1989 yılında yapılan Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı'nda (EASEC) Ozawa tarafından Kendiliğinden yerleşen beton konusunda ilk bildiri takdim edilmiştir (Sarıdemir, 2006).

1980'lerin başında İtalya'da bir deniz yapısı inşasında sualtı temel betonu olarak üretilen reoplastik özelliklerdeki bir beton dökümünde ilk KYB tatbiki yapılmıştır. Üretilen bu beton, oldukça yüksek viskoziteli (kohezif), sıkıştırmaya gerek duyulmadan su altında kalıbına kolayca yerleşebilen ve bu kohezyonuyla deniz ortamının yıkayıcı

etkisine karşı durabilen bir beton olmuştur.1996 yılında Kuzey Amerika olarak; ABD’de Ferguson, Kanada’da ise Aitcin ve arkadaşları KYB ile ilgili ilk çalışmaları yapmışlardır (Collepari, 2001). KYB, 1998 yılından itibaren Almanya’da da ilgi görmeye başlamıştır. Ancak KYB’nin kullanımının önündeki en büyük engel DIN 1045 ve DIN 4277’ye göre KYB tasarımının ve kıvamının standart dışı olması idi. Alman Betonarme Komitesi (DafStb) ve İnşaat Mühendisliği Enstitüsü (DIBt), gerekli çalışmaları yaparak standartlarda KYB için ilave bölümler ekletmişlerdir (Denh, 2002) Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), 2002 yılında kurduğu ACI236 B grubu ile KYB konusunda dokümantasyon çalışmalarına aynı zamanda Amerikan Prefabrike Beton Birliği de (PCI) Nisan 2002’de prefabrike beton endüstrisinde KYB kullanımı ile ilgili standart oluşturma çabalarına başlamışlardır (Vachon ve Daczko, 2002) Avrupa’daki kuruluşlar (BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA ve EFNARC) bu konu ile ilgili olarak son yıllarda birçok çalışmalar yapmışlardır. KYB karışımları hazırlanırken genel olarak EFNARC kriterleri dikkate alınmaktadır (Efnarc, 2002). Piyasada hâlihazırda bulunan malzemeler kullanılarak yapılan kendiliğinden yerleşen betonun modeli 1988 yılında tamamlanmıştır. Bu model Şeki 2.1.’de gösterilmektedir (Okamura ve Ouchi, 2003). KYB’nin Türkiye’de kullanımı ise 2000’li yıllara rastlamaktadır.



Şekil 2. 1. KYB ile normal betonun karışım içeriği (Okamura ve Ouchi, 2003).

2.2. KYB Kullanım Alanları

KYB'nin; prefabrik, hazır beton, döşemeler, duvarlar, kolonlar, kirişler, mimari paneller, cephe elemanları, geniş yapı elemanları, saha betonları, detaylı kalıplar, karmaşık şekilli kalıplar, sık donatılı ve dar kesitli betonarme yapılar da kullanım alanları vardır. KYB'nin prefabrike beton sektöründe kullanımı ile betonun kalitesini artırılmasının yanında betonun estetik görüntüsü de iyileştirilerek geleneksel üretim yöntemlerinden kaynaklanan dolaylı maliyetler azaltılmaktadır (Topçu, 2006).

Prefabrike beton sektöründe KYB kullanımı kalıba vibrasyon uygulanmasını ortadan kaldırarak kalıbın maruz kalacağı dinamik yükleri de tamamen ortadan kalkmaktadır. Kalıba uygulanan vibrasyon uygulamasının ortadan kalkmasıyla manyetik bağlayıcılarla daha ince et kalınlıklı kalıplar kullanılabilir. Kalıp et kalınlıklarının inceltmesiyle kalıplar hafifleyeceğinden taşıma ve bakım işleri kolaylaşarak kalıp söküm ve yeniden kurulum işlemlerinde zamandan % 50 tasarruf sağlanabilmektedir. Ayrıca vibrasyonun kalkması kalıp ömrünü de önemli oranda arttırmaktadır. KYB'nin prefabrike beton üretiminde kullanıldığı bir üretim tesisinde standart panel elemanının dökümü 3-4 dakika sürerken, aynı elemanın geleneksel yöntemler kullanılarak yerleştirme işlemi 10-14 dakika ve perdahlama ile beraber toplam döküm süresi 30 dakika sürmektedir. Üstelik bu işlemler iki veya üç işçi tarafından gerçekleştirilmektedir. Fakat üretim tesisinin bu hızı yakalayabilmesi için, KYB üretim ve yerleştirme yönteminin iyi bir şekilde kavranması, sistemli çalışması ve işçilerin deneyim kazanması gerekmektedir (Topçu, 2006).

2.3. KYB'nin Olumlu ve Olumsuz Yönleri

2.3.1. KYB'nin olumlu yönleri

KYB'nin en önemli avantajı yüksek işlenebilirlik ve ayrışmaya karşı gösterdiği dirençtir. Bu olumlu yönleri detaylandırarak olursak;

- Taze betondaki sıkıştırma işlemini ortadan kaldırılmasıyla vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybı ortadan kalkmaktadır. Vibratör kullanılmaması ile vibratörün çevreye yaydığı gürültü kirliliği de (özellikle prefabrike beton sektörü için) önlenmektedir.

- Betonun sık donatılı perde tipi dar, derin ve karmaşık kesitlerine kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi KYB kullanımı ile mümkün olmaktadır. Bu durum ise betonun mekanik performansını arttırmaktadır.
- KYB’de yeni nesil kimyasal katkıların kullanımıyla çok akıcı, fakat düşük su / çimento oranına sahip, yüksek mukavemetli beton üretilerek hem beton kalitesi hem de dayanım dayanıklılık açısından arttırılmaktadır.
- Etketif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla, prefabrike sektöründe erken kalıp alma için, özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabılır. Bu tür KYB’lerin erken dayanımı yüksek olacağından, kalıp alma hızları artmakta dolayısı ile inşaat hızında artışlar meydana gelmektedir.
- Prefabrike beton üretiminde sıkıştırma işleminde genellikle dış vibrasyon uygulandığı için kalıp et kalınlıkları dinamik etkilere göre boyutlandırılmaktadır. Bu sebeple kalıplar oldukça ağırdır. KYB kullanılması halinde dinamik etki ortadan kalkacağından daha ince et kalınlıklı kalıp kullanılabilir. Bu durum kalıpları hafifleterek taşıma ve bakım işleri kolaylaştırmaktadır.
- KYB’nin perdahlanabilirliği normal betona kıyasla daha rahattır. Bu durum beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırmaktadır.
- KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldırabilmektedir.
- KYB pompalanabilirlik açısından normal betona göre daha avantajlıdır. Yapılan incelemelerde pompa içi basıncın geleneksel betona kıyasla ortalama % 20 azaldığı rapor edilmiştir. Bu durum taze KYB’nin tiksotropik yapısından kaynaklanmaktadır (Felekoğlu, 2004).

2.3.2. KYB'nin olumsuz yönleri

KYB tasarımı oldukça üzerinde durulması gereken bir konudur. Eğer tasarım uygun malzemelerle yapılmaz ise bazı sorunlarla karşılaşılabilir. KYB'nin olumsuz yönlerini sıralayacak olursak;

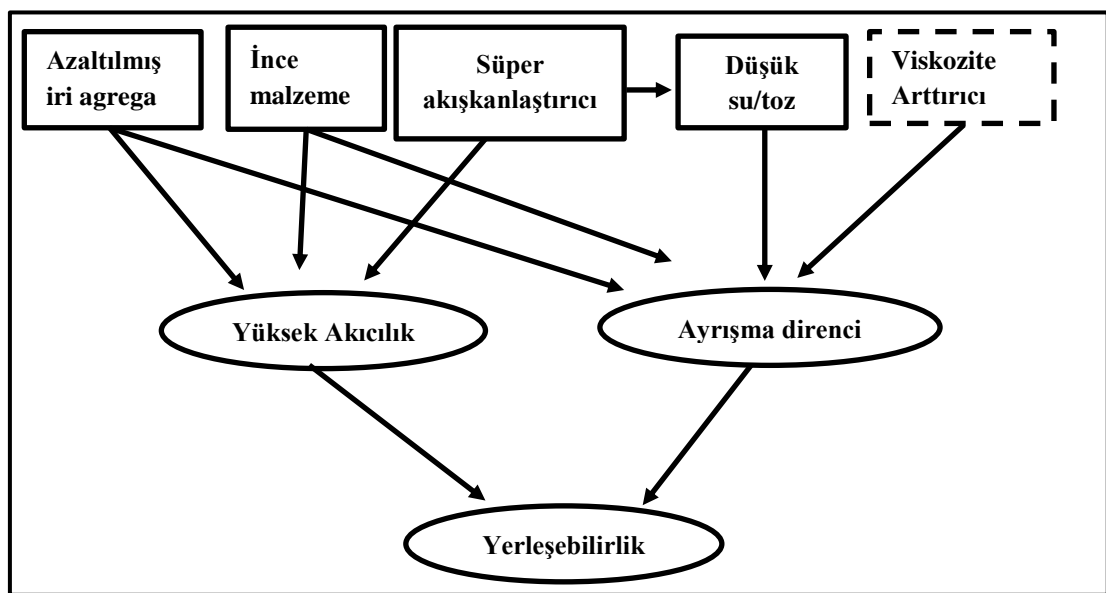
- KYB malzeme maliyeti açısından normal betona kıyasla daha pahalıdır.
- KYB'nin performansı malzeme tip ve oran değişkenliklerine hassastır (özellikle agrega nemi ve gradasyonu).
- KYB erken dönemde küre hassas olduğundan dolayı en azından 7 güne kadar kür edilmesi tavsiye edilmektedir. Kür edilmemesi halinde ise sıcak havalarda plastik büzülme çatlakları meydana gelebilmektedir.
- KYB taze haldeyken prefabrike beton üretiminde kullanıldığında, taze betonun taşınması sırasında taşıyıcı bantların kova kapakları sızdırmaz hale getirilmelidir.
- Prefabrike beton üretiminde mevcut kalıp sistemlerinin bir kısmı KYB kullanımına uygun değildir. Kalıp sistemlerinin KYB kullanımına göre modifiye edilmesi gereklidir. %2'den fazla eğimli elemanlar KYB ile dökülemez.
- Geleneksel beton üretiminde ahşap kalıp sıklıkla kullanılmaktadır. Ahşap kalıpların çakılması sırasında iki lata arasında boşluk bırakılması halinde KYB kullanıldığında hamur sızması olabilmektedir (Felekoğlu, 2004).

2.4. KYB'nin Tasarım İlkeleri

KYB tasarımı ile az sayıda iri agrega ve güçlü bir süper akışkanlaştırıcı kullanılarak taze betona yüksek akıcılık özelliği getirilebilmektedir. Ayrıca su / ince malzeme oranı azaltılarak, az sayıda iri agrega kullanarak, ince malzeme ve/veya viskozite arttırıcı katkı oranları arttırılarak da kendiliğinden yerleşen taze betonda yüksek ayrışma direnci sağlanmaktadır. En yaygın kullanılan süper akışkanlaştırıcı polimer karboksilat esaslıdır, ancak sülfonatmelamin formaldehid ve naftalin formaldehid benzeri polimerler

de kullanılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkı dağıtıcı (dispersiyon) etkisini, çimento tanelerini aynı işaretle elektriksel olarak yüklerken aynı zamanda doldurma (sterik) etkisi ile de ince tanelerin birbirlerini itmesine borçludur (Özkuş, 2013). KYB’de bileşenlerin beton özelliklerine etkileri Şekil 2.2’de görülmektedir. KYB’lerin tasarımlarında temel olarak 3 yöntem izlenmektedir:

- 1) Artırılmış ince malzeme (toz malzeme) yöntemi
- 2) Viskozite artırıcı katkı kullanımı yöntemi
- 3) Her iki yaklaşımın karışımı yöntemi



Şekil 2. 2. KYB’de bileşenlerin beton özelliklerine etkileri (Özkuş, 2013).

2.4.1. Artırılmış ince malzeme (Toz malzeme) yöntemi

Birinci yöntemde ayrışma direnci ve yayılma, çimento inceliğinde veya daha ince olan malzeme miktarları artırılarak sağlanmaktadır. Bu malzemelerin bir bölümünü çimentonun kendisi oluştururken bir bölümünü de uçucu kül, öğütülmüş kalker, öğütülmüş cüruf ve silis dumanı oluşturabilmektedir.

2.4.2. Viskozite artırıcı katkı kullanımı yöntemi

İkinci yöntemde ince malzemeyi artırmak yerine viskozite artırıcı katkıları (VAK) kullanılmaktadır.

Genel olarak viskozite arttırıcı katkıları aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir :

- Nişasta ve doğal sakız benzeri doğal polimerler.
- Ayrıştırılmış nişasta ve türevleri, selüloz eter türevleri, sodyum alginat ve benzeri elektrolitler.
- Polietilen oksit ve polivinilalkol gibi sentetik polimerler.

2.4.3. Her iki yaklaşımın karışımı yöntemi

Üçüncü yöntemde ise ince malzeme oranını çok fazla arttırmadan veya ince malzemeye ek olarak viskozite arttırıcı katkıları ilave edilmektedir. Viskozite arttırıcı katkıları bir doğal sakız (gum) olabildiği gibi (welan gum), nişasta eteri esaslı, ve yoğunlaştırılmış silis esaslı da olabilmektedir.

Çimento hamurunun agrega taneleri arasındaki boşlukları kolaylıkla doldurarak ve agrega tanelerinin etrafını belirli bir kalınlıkta sarabilmesi için KYB'deki agrega karışımının taneler arası boşluk oranının minimum düzeyde olması gerekmektedir. Bu amaçla agrega doldurma faktörü (ADF) tanımlanmış ve en büyük ADF'yi veren karışımlar araştırılmıştır. En büyük agrega çapı olarak genellikle 20 mm'nin altında kalınmaktadır. Okamura ve arkadaşlarınca geliştirilen yöntemde 5-20 mm boyutlarında iri ve 5 mm den küçük ince agrega kullanılmaktadır. İri agrega olarak, kuru halde sıkıştırılmış betona giren malzemelerin toplamının %50 si alınmaktadır. Japonya'da önerilen yaklaşımda betonarme elemanlardaki donatıların sıklığına göre KYB'nin alt sınıfları seçilmektedir .

Bu alt gruplar aşağıdaki derecelerden oluşmaktadır:

1. **Derece:** Karışık şekilli kalıplarda ve minimum 35-60 mm donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.
2. **Derece:** Minimum 60-200 mm donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.

3. Derece: Geniş kesitli ve 200 mm'den daha büyük donatı aralıklarındaki elemanlarda kullanılabilir.

Betonun bileşim şekline bağlı olarak her bir alt grupta önerilen iri agrega hacim oranları Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 1. KYB'lerde önerilen iri agrega hacim aralıkları (Özku, 2013).

KYB Sınıfı	Betonda iri agrega hacmi (m ³ / m ³)		
	Toz tipi	VAK tipi	Karışık tip
1. Derece	0,28 – 0,30	0,28 – 0,30	0,28 – 0,30
2. Derece	0,30 – 0,33	0,30 – 0,33	0,30 – 0,33
3. Derece	0,32 – 0,35	0,30 – 0,36	0,30 – 0,35

İnce malzeme ise (genellikle çimento dahil 100 mikrondan ince malzemeler) hem ayrışma direncini sağlamakta hem de yayılmaya yardımcı olmaktadır (Özku, 2013). KYB bileşenlerinin ağırlık ve hacimce tipik aralıkları ise Çizelge 2.2'de gösterilmektedir (Efnarc, 2005).

Çizelge 2. 2. KYB karışım kompozisyonunun tipik aralıkları (Efnarc, 2005).

Bileşen	Kütlece tipik aralık (kg/m ³)	Hacimce tipik aralık (litre/m ³)
Toz	380 – 600	-
Hamur	-	300 – 380
Su	150 – 210	150 – 210
İri agrega	750 – 1000	270 – 360
İnce agrega (kum)	Bu miktar diğer bileşenlerin hacmini dengeler, tipik olarak toplam agrega ağırlığının %48 – %55'dir.	
Hacimce su / tuz oranı	-	0,85 – 1,10

2.5. Kendiliğinden Yerleşen Taze Betonun Taşması Gereken Özellikler

KYB tasarımı özel bir tasarım olduğu için KYB'nin özellikle taze beton özelliklerinin taşması gereken bazı farklı özellikler vardır. Bunları sıralayacak olursak;

- 1) Ayrışmaya karşı direnç
- 2) Viskozite katkıları

3) Doldurma etkisi

- i. Tanelerin arasındaki sürtünmenin azaltılması
- ii. Üstün deformasyon kabiliyetine sahip çimento hamuru

4) Donatılar arasından geçme yeteneği

- i. Reoloji
- ii. İşlenebilirlik
- iii. Filler malzeme tane boyutu

KYB'nin gerekli kıvam koruma zamanı tasıma ve yerleştirme zamanına bağlı olacaktır. Bu süre belirlenerek bu zaman dilimi boyunca KYB'nin ayrışma direnci, daha yüksek akışkanlık ve daha düşük viskozite gibi belirtilen taze özelliklerini korumasını sağlamak üreticinin sorumluluğundadır. KYB sürekli ve tek bir dökmede yerleştirilmelidir. Ayrıca betonun şantiyeye ulaşmasından sonra yerleştirmedeki uzun gecikmeler ya da beton eksikliği nedeniyle yerleştirmedeki duraklamalardan kaçınmak için üreticiyle de anlaşılmalıdır (Skarendahl ve Petersson, 2000; Gürdal ve Yüceer, 2004).

2.5.1. Ayrışmaya karşı direnç

Taze betonda ayrışma, bileşen malzemelerin heterojen bir şekilde dağılarak yapıdaki özellikleri ayırması olayı olarak tanımlanabilir. Ayrışmaya karşı konulan direnç ise taze durumdaki KYB'nin, karıştırma, taşıma ve yerleştirme aşamalarında agrega ve çimento hamurunun birbirinden ayrışmaları olarak tanımlanabilir. Taze beton, normal koşullar altında hareket ettiğinde ayrışma göstermemesine karşın, donatıların sık olduğu kesitlerden geçerken ayrışabilmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000). KYB'de aşağıdaki ayrışma halleri görülmemelidir. Taze durumdaki KYB'nin ayrışmaya karşı uygun bir direnç gösterebilmesi için aşağıdaki özellikler dikkate alınmalıdır:

- a. Katı malzemelerin ayrışmasının önlenmesi
- b. Sınırlı iri agrega içeriği,

- c. En büyük agrega boyutunun azaltılması,
- d. Düşük su / (toz malzeme) oranı,
- e. Terlemenin (serbest su) azaltılması,
- f. Düşük su içeriği,
- g. Düşük su / (toz malzeme) oranı,
- h. Yüksek yüzey alanlı toz malzemeler,
- i. Viskoziteyi düzenleyen katkıları (Gürdal ve Yüceer, 2004).

2.5.2. Viskozite katkıları

Viskoziteyi düzenleyen katkıları kullanarak KYB'nin ayrışmaya karşı direnci geliştirilebilmektedir. Bu katkıları su-altı beton islerinde kullanılan katkıları benzerdir. Aynı zamanda viskoziteyi düzenleyen ve de süper akışkanlaştırıcılık sağlayan bileşik etkiye sahip olan katkıları da bulunmaktadır. KYB için sınırlı iri agrega, azaltılmış su / bağlayıcı oranı gerekmektedir. KYB karışımlarında genellikle süper akışkanlık sağlayan ve de viskoziteyi düzenleyen katkıları yüksek akışkanlık sağlayarak ayrışmaya karşı direnç elde edilmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000).

2.5.3. Doldurma etkisi

KYB, kendi ağırlığı ile kolayca sekil değiştirebilmeli ve bulunduğu kabın seklini alabilmelidir. Doldurma kabiliyetinden anlaşılması gereken hem deformasyon kapasitesi ve hem de akış hızıdır. Deformasyon kabiliyeti yayılma deneyi ile betonun sekil değişiminin sonlanmasından sonra çapın ölçülmesiyle bulunur. Deformasyon hızı ise, yine aynı deneyde betonun belirli bir deformasyona ulaşması için geçen sürenin ölçülmesiyle saptanabilir. İyi bir doldurma kabiliyeti elde etmek için, deformasyon kabiliyeti ile deformasyon hızı arasında denge olmalıdır (Gürdal ve Yüceer, 2004). Uygun bir doldurma kabiliyetine ulaşabilmek için, aşağıdaki özellikler dikkate alınmalıdır:

1. Çimento hamurunun deformasyon yeteneğinin arttırılması için;
 - a. Süper akışkanlaştırıcı katkıları,
 - b. Dengelenmiş su / (çimento) oranı,

2. Taneler arası sürtünmeyi azaltmak için;
 - a. Düşük iri agrega hacmi (yüksek çimento içeriği),
 - b. Kullanılan agrega ve çimentoya bağlı olarak optimum granülometriye, sahip toz malzeme (Gürdal ve Yüceer, 2004).

2.5.3.1. Çimento hamurunun deformasyon yeteneğinin artırılması

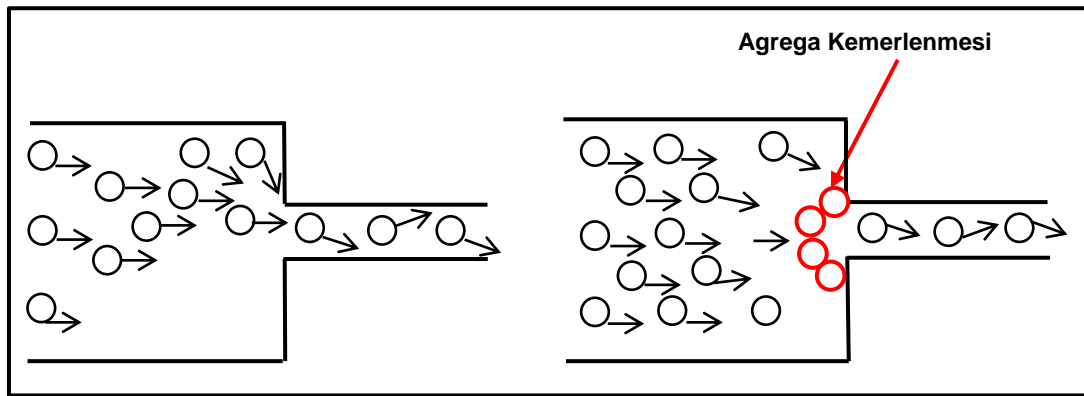
Katı taneler arasındaki sürtünmenin azaltılması ile birlikte çimento hamurunun da iyi bir şekilde deforme olmasıyla kendiliğinden yerleşmeyi sağlamak mümkün olmaktadır. Kolayca akan ve iyi doldurma kapasitesi olan bir KYB elde etmek için, iyi akıcılık (düşük kayma direnci) ve ayrışmaya karşı yüksek direnç (yeterli viskozite) özelliklerinin birlikte sağlanması gereklidir. Betonun şekil değiştirme yeteneği, çimento hamurunun deformasyon yeteneği ile yakından ilgilidir. Çimento hamurunun deformasyon yeteneğinin artırılabilmesi süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile mümkün olmaktadır (Skarendahl ve Petersson, 2000).

2.5.3.2. Taneler arası sürtünmenin azaltılması

Beton karışımı içerisinde bulunan; iri agrega, ince agrega ve toz malzemelerin bütün boyutlarını içeren malzemelerin arasındaki sürtünmenin azaltılmasıyla beton iyi deforme olabilmesini sağlayacaktır. Agregalar arasındaki sürtünmenin azaltılması için agrega içeriğinin azaltılıp çimento hamuru içeriğinin artırılması gerekmektedir. Toz malzemeler arasındaki sürtünmenin azaltılmasında, çimento hamurundaki su içeriğini arttırmak yerine süper akışkanlaştırıcılar gibi yüzey aktif katkıları kullanarak ince maddelerin dağıtılması ve mükemmel deformasyon yeteneğine sahip KYB üretimi mümkündür. Aşırı su kullanımı dayanım ve dayanıklılıkta istenmeyen performans düşmesine neden olabilir. Toz malzemelerin şekli, su ve süper akışkanlaştırıcı miktarının belirlenmesinde yön vermektedir. Uçucu kül gibi küre şekilli puzolanların kullanılmasının bu amaç için etkili olduğu düşünülmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000).

2.5.4. Donatılar arasından geçme yeteneği

Donatı sık olduğu zaman agregalar birbirine dayanarak “kemerlenme” oluşturur. KYB bünyesinde bulunan iri agregaların boyut ve içeriğinin kalıpla donatı arasındaki mesafe ile uyumlu olması gerekmektedir. Böyle bir kemerlenme mekanizmasının bulunduğu betonun bir delikten aktığı iki boyutlu bir modeli Şeki 2.3’de görülmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000).



Şekil 2. 3. Agregada kemerlenme mekanizması (Skarendahl ve Petersson, 2000).

Kemerlenme oluşumu, büyük agrega boyutu ve agrega içeriğinin de fazla olduğu durumlarda daha kolay gelişmektedir. Küçük agrega boyutu durumunda ise kemerlenme oluşumu agrega içeriğinin fazla olduğu durumlarda oluşabilmektedir. Eğer ki agrega tanelerinin boyutları geçtikleri boşluğun boyutundan küçük ise kemer oluşumu gerçekleşmeyebilmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000).

Yerleşme ve ayrışmaya direnç gösteren KYB’ lerde agregaların kemer oluşturmasını sağlayan nedenler aşağıdaki gibi özetlenebilir (Gürdal ve Yüceer, 2004).

- a. En büyük agrega boyutunun çok fazla olması,
- b. İri agrega içeriğinin aşırı fazla olması,

Geçme yeteneğinin sağlanması için aşağıdaki noktalar dikkate alınabilir:

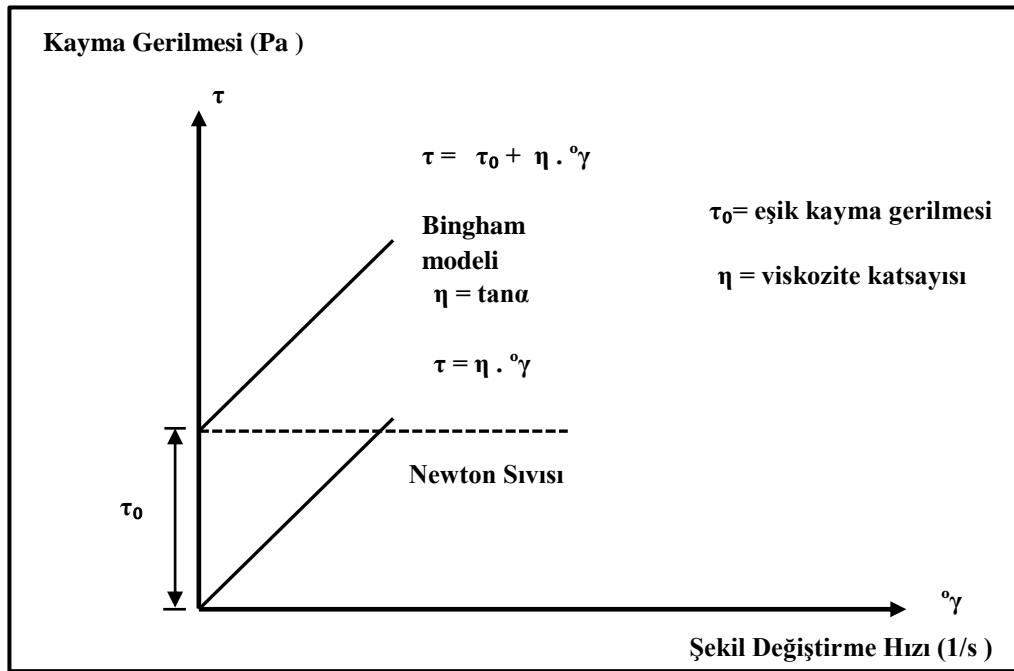
- a. Düşük Su / Toz oranı,
- b. Viskoziteyi düzenleyen katkıların kullanılması,

Uyumlu geçiş açıklığı ve iri agrega ezelikleri:

- a. Düşük iri agrega içeriği,
- b. En büyük agrega boyutunun azaltılması,

2.5.4.1. Reoloji

Döküm ve yerleştirilmesi sırasında kendiliğinden yerleşen taze betonun performansına etki eden en temel zellik KYB'nin reolojisidir. Böylelikle reoloji ile ilgili çalışmalar betonun kendi kendine sıkışmasının merkezini oluşturmuştur. Reolojik incelemeler kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki bağıntının elde edilmesine dayanmaktadır. Elde edilen bu ilişkiden de kayma eşiği ve plastik viskozite bulunmaktadır. Reolojik ölçümler için reometreler ve viskozimetreler kullanılmaktadır. Akışkan harç fazındaki iri agrega veya akışkan çimento hamuru fazındaki kum taneleri ayrışmadan homojen dağılımlarına devam etmelidirler. Şekil 2.4'de Taze beton için Bingham Modeli ve Newton Sıvısının davranışı gösterilmektedir (Skarendahl ve Petersson, 2000).



Şekil 2. 4. Taze beton için Bingham Modeli ve Newton Sıvısının davranışı

Bundan dolayı reolojik davranışın agrega tanelerinin boyutuna, türüne ve içeriğine bağlı olarak değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Taze betonun reolojik davranışı, kayma eşiği ve plastik viskozite katsayısını içeren Bingham Modeli ile belirlenir.

Viskozite ve stabilite taze betonun en önemli özelliklerindedir. Viskozite, betonun fazla enerji harcamadan yerine yerleştirilebilmesi olarak tanımlanırken, stabilite ise betonun karıştırılma ve yerleştirilme aşamalarında homojen olarak kalabilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Taze betonu Bingham cismi gibi düşünersek, kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite ise (η) ile ifade edilebilir. Bingham modelindeki kayma eşiğine (τ_0) ve plastik viskoziteye (η); yüzey gerilimine ve tanelerin dağılımına bağlı olarak taneler arasındaki sürtünme ve serbest su içeriğidir etki etmektedir.

KYB'nin özellikleri çimento, ince malzemelerin dengeli dizilişi ve süper akışkanlaştırıcı ile değiştirilebilmektedir. Plastik viskoziteyi değiştirmek için ise viskoziteyi düzenleyen katkıları kullanılmaktadır. KYB tasarımıdaki amaç reolojik özelliklerini Newton sıvısına yaklaştırarak düşük akma gerilmesi ve uygun plastik viskozite sağlamaktır (Okamura, Ouchi 2003 ; Skarendahl ve Petersson, 2000).

2.5.4.2. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, taze betonun pratikteki davranışına yönelik olarak akma ve deformasyon yeteneğini tanımlayan bir özelliktir. KYB'nin işlenebilirliği, pompanın ucundan çıkan betonun kendi ağırlığı ile boşluksuz biçimde kalıbın şeklini alarak üniform kaliteyi sağlaması olarak tanımlanabilir. En sık kullanılan işlenebilirlik deneylerinden olan slump (çökme) deneyi KYB'lerin işlenebilirliğini belirlemede tek başına yetersiz bir deney yöntemidir. Bu yüzden KYB'lerin işlenebilirliğini belirlemek için U-kutusu, V-kutusu ve L-kutusu gibi yeni deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerle KYB'lerin ayrışmaya karşı dirençleri, doldurma ve geçme yeteneklerinin belirlenebilmesi amaçlanmaktadır (Skarendahl ve Petersson, 2000).

2.5.4.3. Filler malzeme tane boyutu

Standarttaki eleklerin boyutlarındaki farklılıklardan dolayı filler malzemenin tanımı da ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Avrupa'da genel olarak kullanılan filler malzeme en büyük tane boyutları 0,075-0,125mm arasında iken Japonya'da genel

olarak kullanılan filler malzeme en büyük tane boyutları ise 0,090 mm'dir. KYB karışımlarında su / (filler malzeme) oranı da kullanılmaktadır.

2.6. KYB Karışımında Bulunan Malzemeler

Normal betonda kullanılan Portland Çimentoları KYB üretiminde de kullanılabilirken bazı tip çimentolar KYB üretiminde daha başarılı olabilmektedirler. Bu konuda yapılan bir çalışmada TÇ 32,5 ve PZÇ 32,5 çimentolarının kendiliğinden yerleşen beton katkılarının birinci nesil türleri ile uyumsuzluk gösterdiği görülmüştür. Ancak bu katkılar üzerinde çok hızlı gelişmeler gerçekleşmekte ve bu uyum sorunu azaltılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı olarak yüksek oranda su kesici özelliğe sahip ve molekül ağırlığı optimize edilmiş bir kimyasal katkı kullanılabilir. Bu amaçla polikarboksilat veya naftalin esaslı polimerler yaygın kullanılan katkılardır. İnce malzeme olarak 100 mikrondan ince tanelere sahip olan uçucu kül, taş unu, öğütülmüş cüruf ve silis dumanı kullanılabilir. KYB'lerin ayrışma dirençleri viskozite artırıcı katkılar (VAK) kullanılarak artırılabilir. Viskozite artırıcı katkılar taze betonun viskozitesini arttırarak ayrışmayı sağladığı gibi agreganın çimento hamuru içinde askıda kalmasını gerçekleştirerek betonun kararlılığının bozulmamasını sağlayan katkılardır. Viskozite artırıcı katkılar; doğal (nişasta, doğal zambak), yarı sentetik (ayrışmış nişasta, selüloz eter türevleri), sentetik (etilen kökenli, vinil kökenli) gibi polimerler olabilmektedirler (Sağlam vd., 2004).

2.7. KYB'nin Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Deney Yöntemleri

Kendiliğinden yerleşen taze betonun özelliklerini ölçmek ve değerlendirmek için pek çok farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deney yöntemleri Çizelge 2.3'de görülmektedir. Ancak herhangi bir deneyi tek başına kullanarak kendiliğinden yerleşen taze betonun ana parametrelerinin hepsini belirlemek mümkün olmamaktadır. KYB karışımını tam olarak karakterize edebilmek için deneylerin birleşimi gerekmektedir (Efnarc, 2005).

Çizelge 2. 3. KYB'nin işlenebilme özellikleri için önerilen deneyler (Efnarc, 2002).

	Yöntem	Özellik
1	Çökme-akma	Doldurma yeteneği
2	T ₅₀ cm çökme-akma	Doldurma yeteneği
3	J-halkası	Geçme yeteneği
4	V-hunisi	Doldurma yeteneği
5	V-hunisi T5dakika	Ayrışma direnci
6	L-kutusu	Geçme yeteneği
7	U-kutusu	Geçme yeteneği
8	Doldurma kutusu	Geçme yeteneği
9	GTM elek kararlılık deneyi	Ayrışma direnci
10	Orimet	Doldurma yeteneği

EFNARC tarafından önerilen deneyler KYB'nin farklı parametrelerini ölçmektedir. Bunları kendi içinde değerlendirecek olursak uygulanan deney yönteminin hangi özellikleri belirlediği Çizelge 2.4'te görülmektedir.

Çizelge 2. 4. KYB'nin işlenebilme özelliklerine göre alternatif deneyler (Efnarc, 2002).

Özellik	Deney Yöntemleri		
	Deney adı	İnşaat sahası	Deney modifikasyonuna göre maksimum agrega boyutu
Doldurma yeteneği	1.Çökme-akma 2.T50cm çökme-akma 4.V-hunisi 10.Orimet	1.Çökme-akma 2.T50cm çökme-akma 4.V-hunisi 10.Orimet	Hiçbiri Maksimum 20mm
Geçme yeteneği	6.L-kutusu 7.U-kutusu 8.Doldurma kutusu	3.J-halkası	L-kutusu, U-kutusu ve J-halkası içerisinde farklı açıklıklar
Ayrışma direnci	9.GTM deneyi 5.V-hunisi T5dakika	9-GTM deneyi 5-V-hunisi T5dakika	Hiçbiri

KYB tasarımlarında taze betonun deney yöntemine göre taşınması gereken farklı özellikler vardır. Bazı deney yöntemleri yayılma çapını dikkate alırken bazı deneyler ise akış süresini göz önünde bulundurmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak EFNARC tarafından önerilen sınır değerler Çizelge 2.5'te görülmektedir.

Çizelge 2. 5. KYB için kabul kriterleri (Efnarc, 2002).

Yöntem	Birim	Normal değer aralığı		
		Minimum	Maksimum	
1	Çökme-akma	mm	650	800
2	T50cm çökme-akma	saniye	2	5
3	J-halkası	mm	0	10
4	V-hunisi	saniye	6	12
5	V-hunisi t ₅ dakika	saniye	0	+3
6	L-kutusu	(h1 /h2)	0,8	1,0
7	U-kutusu	(h1 - h2) mm	0	30
8	Doldurma kutusu	%	90	100
9	GTM elek kararlılık deneyi	%	0	15
10	Orimet	saniye	0	5

2.8. KYB' nin Mühendislik Özellikleri

Eşit basınç dayanımında olan KYB'ler ve normal vibrasyonlu betonların birbirleri ile karşılaştırılabilir özellikleri bulunmaktadır. Farklılıklar bulunuyor ise, bu farklılıklar dizayn kodlarının esas alındığı emniyetli hipotezler dahilindedir. Ancak KYB'nin bileşimi normal vibrasyonlu betonunkinden farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklara aşağıdaki bölümlerde daha detaylı olarak değinilecektir. Bir beton yapının dizayn süresince çevresel etkilere karşı performansında herhangi bir azalma olmaması dayanma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Dayanma yeteneği ise genellikle çevresel etki sınıflarının belirlenmesiyle dikkate alınmaktadır. Bu durum ise beton bileşimi değerlerine ve minimum pas payı değerlerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Mühendisler, bazen beton yapıların dizaynında beton şartnamelerde doğrudan bulunmayan beton özelliklerine değinmek zorunda kalabilmektedirler (Efnarc, 2005). Bu özellikler;

1. Basınç dayanımı,
2. Çekme dayanımı,
3. Elastisite modülü,
4. Sünme,
5. Büzülme (Rötire),
6. Sıcaklıkla genleşme katsayısı,

7. Donatı ile beton arası aderans,
8. Soğuk derzlerde kesme kuvveti kapasitesi,
9. Yangına karşı dayanıklılık,
10. Dayanıklılıktır.

2.8.1. KYB'nin basınç dayanımı

Su/çimento veya çimento bağlayıcı oranı benzer olan KYB ile vibrasyonlu normal betonu karşılaştırsak, KYB genel olarak daha yüksek dayanıma sahip olmaktadır. KYB'nin vibrasyonlu normal betona göre daha yüksek dayanıma sahip olmasının nedeni, vibrasyon uygulaması yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Vibrasyon uygulaması yapılmaması ise agrega ile sertleşmiş haldeki çimento hamuru arasında daha iyi bir ara yüz oluşturmaya katkıda bulunarak beton dayanımını yükseltmektedir. Yapılacak olan olgunluk deneyleri KYB'nin dayanım kazanmasını kontrol etmede aktif bir rol oynamaktadır. KYB'nin dayanım kazanması ise normal betonun dayanım kazanması ile aynı olacaktır (Efnarc, 2005).

2.8.2. KYB'nin çekme dayanımı

Herhangi bir basınç dayanımı sınıfında KYB dizayn edilebilmektedir. Herhangi bir beton dayanım sınıfı ve olgunluk değeri için KYB'nin çekme dayanımının normal betonun çekme dayanımıyla aynı olduğu söylenebilir; çünkü çimento hamuru hacminin (çimento + ince malzeme + su) miktarı betonun çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Betonda eğilmede çekme dayanımı; Betonarme kesitlerin dizaynında, öngermeli elemanların çatlama momentlerinin değerlendirilmesinde, donatı dizaynında (kontrollü erken termal büzülmenin sebep olduğu çatlak genişliğini ve çatlak aralığını kontrol etmek için), moment-eğrilik diyagramlarının çiziminde, donatısız beton yolların dizaynında ve fiberli betonarme dizaynında betonun kullanılmaktadır. Öngermeli elemanlara; teller etrafındaki ayrılma çekme gerilmesi ve öngerme kuvveti uygulandığı zaman tellerin uçlarında oluşan kayma oranı, öngerme kuvvetinin uygulandığı anda ki basınç dayanımına bağlı olmaktadır. Ayrıca yarmada çekme gerilmesinden dolayı oluşan olan çatlaklardan ise kaçınılması gerekmektedir (Efnarc, 2005).

2.8.3. KYB'nin elastisite modülü

Öngermeli veya artgermeli elemanların deformasyonlarının elastik hesabında elastisite modülü kullanılmaktadır. Elastisite modülü ekseriyetle döşeme dizaynında denetleme değişkenidir. Betonda hacimce oranı en fazla agrega bulunduğundan, agreganın elastisite modülü değeri, tipi ve miktarı betonun elastisite modülü değerini etkilemektedir. Betonda elastisite modülü değeri yüksek agrega kullanmak betonun elastisite modülü değerini arttırırken, hamur hacmini arttırma elastisite modülü değerini azaltabilmektedir. Vibrasyonlu normal betona oranla KYB'de daha yüksek hamur içeriği bulunduğundan, KYB'nin elastisite modülü değeri vibrasyonlu normal betonunkine oranla daha düşük olabilmektedir. Ancak bu değer standartların altında olmadığından güvenli bölge içerisinde bulunmaktadır (Efnarc, 2005).

2.8.4. KYB'de sünme

Sünme, sabit gerilme altında birim zamanda oluşan şekil değiştirme olarak tanımlanabilmektedir. Tatbik edilen gerilme ile ilişkili olmayan; büzülme, şişme ve termal deformasyonlar gibi zamana bağlı diğer deformasyonlarda sünme belirlenirken dikkate alınır. Basınç altında sünme, öngerilmeli beton elemanlardaki öngerilme kuvvetlerini azaltarak betondan donatıya doğru yavaş bir yük aktarımına neden olmaktadır. Diğer kontrollü hareketler nedeni oluşan gerilmeler çekme altındaki sünme ile kısmen azaldığından bu sünme durumu faydalı olabilmektedir. Çimento hamurunda oluşan sünme olayı, su / çimento oranıyla doğrudan ilgili olan çimento hamurunda bulunan boşluklara bağlıdır. Hidratasyon olayı esnasında çimento hamurunda bulunan boşluklar azalacağından beton dayanımının da artış görülecek bununla birlikte betondaki sünme ise azalacaktır. Yükleme yaşı sabitlendiği takdirde kullanılan çimento tipi önemli olmaktadır. Hidratasyon hızı yüksek olan çimento tiplerinde yükleme devrinde; daha yüksek dayanıma, daha düşük gerilme / dayanım oranına ve sünmeye sahip olmaktadırlar. Çimento hamurundaki sünme olayını agregalar sınırladığından dolayı karışımda bulunan agrega hacmi ve elastisite modülü değeri arttırıldığı takdirde sünme olayı da azalacaktır. Daha yüksek çimento hamuru hacmi nedeniyle, KYB için sünme katsayısı aynı dayanımdaki normal betonun sünme katsayısından daha yüksek olabilmektedir (Efnarc, 2005).

2.8.5. KYB’de büzülme (Rötire)

Büzülmenin kuruma ve kendiliğinden olan büzülme olarak tanımlanan tipleri de bulunmaktadır. Bu iki tip büzülme dahil bütün büzülme tipleri büzülmenin her iki aşamasında görülmektedir. Kuruma ve kendiliğinden olan büzülmeye ek olarak beton termal değişimlere, karbonatlaşma reaksiyonlarına ve kısıtlanma sonucu da büzülmeye maruz kalmaktadır (Holt ve Levio, 2004). Hidratasyon sonucunda oluşan ürün hacmi, hidrate olmamış çimento ve suyun ilk hacminden daha azdır. Hacimde oluşan bu azalma çekme gerilmelerine neden olarak betonda kendiliğinden olan büzülme oluşumuna neden olmaktadır. Kuruma büzülmesinin nedeni betondan atmosfere doğru gerçekleşen su kaybıdır. Genel olarak gerçekleşen bu su kaybı olayı çimento hamurunda oluşsa da çok az agrega tipinde de bu şekilde su kaybı görülebilmektedir.

Kuruma büzülmesi rölatif olarak yavaş olmakla birlikte neden olduğu gerilmeler kısmen çekme sünmesi azalması ile dengelenmektedir. Agreganın hacimsel olarak atışı çimento hamurunda oluşan büzülmeleri engellerken, agreganın elastisite modülü değerindeki artış ise kuruma büzülmelerini azaltmaktadır. En büyük agrega tanesi boyutundaki azalma ise kuruma büzülmesini arttırmaktadır. Normal betonda kullanılan değerler ve formüller KYB’de de kullanılmaktadır. Beton basınç dayanımı su / çimento oranıyla alakalı olduğundan, düşük su / çimento oranına sahip KYB’de kuruma rötresi azalacak ve kendiliğinden olan büzülme, kuruma büzülmesini aşabilecektir (Efnarc, 2005). Farklı tiplerdeki KYB’lerin büzülme ve sünmesi üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve referans betonu aşağıda listelenen sonuçları göstermektedir.

- Rötrenin sebep olduğu deformasyon daha yüksek olabilir.
- Sünmenin sebep olduğu deformasyon daha düşük olabilir.
- Büzülme ve sünme nedeniyle oluşan deformasyonların toplam değeri hemen hemen benzerdir.

Bir kesitte donatıdan dolayı oluşan engellenme nedeniyle büzülme şekil değiştirmesi sonucunda betonda çekmeye, donatıda ise basınca sebep olmaktadır (Efnarc, 2005).

2.8.6. KYB'nin ısı genleşme katsayısı

Betonun ısı genleşme katsayısı, betonun donatı ile ya da donatı dışından engellendiği hallerde sıcaklıktaki birim değişiminden dolayı betonda oluşan birim deformasyon olarak tanımlanabilmektedir. Betonun ısı genleşme katsayısı; betonun bileşimine, yaşına ve nem miktarına göre değişmektedir. Beton hacminin büyük bir bölümünü agregalar oluşturmaktadır. Bu yüzden betonda daha düşük ısı genleşme katsayısına sahip agregalar kullanmak betonun ısı genleşme katsayısını da azaltmaktadır. Betondaki ısı genleşme katsayısındaki azalma ile çatlak kontrol donatısında da azalmaya yol açmaktadır (Efnarc, 2005).

2.8.7. KYB'nin donatı ile beton arası aderansı

Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi sağlayan çelik çubukla beton arasındaki kayma gerilmelerine "Aderans" denir (Topçu vd., 2008). Sıyrılmamanın olmaması için beton ile donatı arasında yeterli bir aderans dayanımının olması gerekmektedir. Aderans faaliyeti, dökülen beton kalitesine ve donatıların konumuna ve bağlı olmaktadır. Donatı ile beton arasındaki aderans gerilmelerini uygun bir şekilde aktarılması ancak yeterli bir paspayı ile mümkün olmaktadır. Betonun yerleştirilmesisırasında donatı çubuğunun etrafını tam sarmayarak ya da beton priz almadan önce ayrışarak ve terleyerek betonun alt yüzeyindeki kalite düşüşü zayıf aderans olarak tanımlanabilir. KYB akışkanlık ve kohezyon özellikleri sayesinde derin kesitlerdeki üst donatılar için bu negatif etkileri en aza indirmektedir (Efnarc, 2005).

2.8.8. Kyb'de soğuk derzlerde kesme kuvveti kapasitesi

Sertleşmiş halde olan KYB, döküm ve yerleştirme işlemlerinden sonra oldukça düz ve geçirimsiz bir yüzeye sahip olabilmektedir. İlk tabaka yerleştirme işlemi yapıldıktan sonra herhangi bir yüzey işlemi uygulanmadan, ilk ve ikinci tabakalar arasında oluşan kesme kuvveti kapasitesi vibrasyonlu normal betona göre daha düşük olabilmekte ve herhangi bir kesme kuvvetini taşımakta yetersiz kalabilmektedir. Bu sorunlar yüzey geciktiriciler, fırçalama veya yüzey pürüzlendirme gibi yüzey işlemleri ile aşılabilmektedir (Efnarc, 2005).

2.8.9. KYB'nin yangına karşı dayanıklılığı

Beton, yanmayan madde olduğundan belirli bir sürede önemli ölçüde zarar görmeyen, zehirli duman çıkarmayan yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000). Beton, bu yanmayan özelliği ile alevlerin yayılmasını engellemektedir. Beton; duman, toksit gazlar ya da başka tür gaz salınımları üretmeyerek yangın etkisini arttırmamaktadır. KYB'nin yangına karşı dayanıklılığı ise normal betonunki ile benzer özelliktedir. Az geçirimli betonlar yüzey atmalarına karşı daha eğilimlidir; Ancak bu eğilim beton kalitesine, agrega tipine ve nem oranına bağlı olmaktadır. KYB, yüksek dayanımlı düşük geçirimli beton şartlarını kolaylıkla sağlayabilmekle birlikte yangın şartları altında da herhangi bir yüksek dayanımlı normal betona benzer şekilde davranış gösterebilmektedir. Betonda polipropilen liflerin kullanımı ile yüzey atmalarına karşı dayanımı iyileştirilmenin etkin olduğu gösterilmiştir. Bu sistem çimento matrisindeki eriyen ve emilen lifler nedeniyle oluşmakta ve daha sonra ise lif boşlukları buhar için genişleme depoları sağlayarak betondaki yüzey atma risklerini azaltmaktadır. Polipropilen lifler KYB ile de başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Efnarc, 2005).

2.8.10. KYB'de dayanıklılık

Bir beton yapının dayanıklılığı yüzeyinin geçirgenliği ile yakından ilgilidir. Beton yüzeyinin geçirgen olması olası zararlı hareketler başlatmaktadır. Böyle bir durumda betonda bu hareketlerin ilerlemesini sağlayan maddelerin (CO₂, Klorür, Sülfat, Su, Oksijen, Alkaliler, Asitler vb.) girişleri sınırlanmalıdır. Betonda dayanıklılık: beton kompozisyonuna; beton uygulamalarındaki malzeme seçimine; betonun yerleştirilme, sıkıştırma işlemlerine; betonun bitirme ve kür uygulamaları esnasındaki derecelerine bağlı olmaktadır. Betonarme yapılarıdaki; kalıplar, donatılar veya beton içerisine yerleştirilen diğer elemanlar (artgerme kanalları) arasındaki dar boşluklar vibrasyon uygulamasını zorlaştırdığından betonun iyi sıkışmamasına yol açmaktadır. Bu durum ise betona zararlı maddelerin girişini kolaylaştırarak betonarme yapılarda dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

Vibrasyonlu normal beton; düzgün olmayan bir sıkıştırmaya ve çeşitli geçirimsizliklere sahip olduğundan zararlı maddelerin betona girişini arttırmaktadır. Ayrıca yanlış uygulanan vibrasyon sonucunda betonda; segregasyon (ayrışma), terleme, peteğimsi delikler oluşturarak betonda geçirgenlik ve dayanıklılık üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bütün bu problemlerin üstesinden gelmek için Japonya'da KYB üretimi geliştirilmiştir (Efnarc, 2005).

2.9. KYB ve HAD (CFD) Modeli İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Sağlam ve Özkul (2006), faktöriyel analiz yöntemi kullanılarak çimento hamuru, harç ve beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkilerini araştırmış ve su/bağlayıcı, mineral katkı/bağlayıcı, kimyasal katkı/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları değişken olarak seçilmiştir. Reolojik parametreler olarak, çökme-yayılma, viskozite ve kayma eşiği değerleri ölçülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanı, normal Portland çimentosu ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Faktöriyel analiz sonunda reolojik özellikleri anlamlı olarak etkileyen bileşim parametreleri belirlenerek süper akışkanlaştırıcı katkılı çimento hamuru ve harç karışımlarının Bingham cismi gibi davranmasına karşılık, beton karışımlarında kayma eşiğinin sıfıra yakın değerler aldığı ve bu nedenle yaklaşık olarak Newton cismi gibi davrandığı görülmüştür (Sağlam ve Özkul, 2006). Orta dayanımlı uçucu kül içeren KYB modellemede kullanılmak üzere deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Yeni hazırlanmış taze KYB'de etrafında engeller bulunan ve onun kendi ağırlığı ile kalıpları tamamen doldurması ve akıcılığıyla yerleşmesi incelenerek ve herhangi bir segregasyon ve blokajlaşma gözlemlenmiştir. Daha kaliteli beton ve çalışma durumlarını iyileştirme için sınıflandırmalar yapılmıştır. KYB karışımları ile genellikle daha yüksek içeriklerde ince dolgu malzemeler, çimento içeriği fazla ve aşırı derecede sıkıştırılmış güçlü beton üretilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı uygulama alanlarında dar yerlerden geçebilir. KYB'den elde edilebilen maksimum fayda pratik olarak genel beton ile ilgili yapılara adapte olabilmesidir (Sonebi 2004). Farklı sayılarda çimento ve çeşitleriyle deneyler gerçekleştirilerek yayılma KYB'nin hızını tespit eden çalışmalar da mevcuttur. Denenen betonların 1 günlük dayanımlarının hem çimento, hem de katkı cinsinden etkilendiği, ayrıca bazı çimento ve katkıların birlikte kullanılmaları durumunda büyük miktarda hava sürüklendiği ve bunun da dayanımları etkilediği belirlenmiştir. Taze beton özellikleri ve dayanımlar açısından çimento-katkı

etkileşmesinin önemli olduğu, bu nedenle uygulamaya geçmeden önce çimento-katkı uyum deneylerinin yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Sağlam vd., 2004).

KYB için yeni karışım tasarımları öneren deneysel çalışmalarda ise ilk olarak agregadaki gerekli oranların tanımlanması yapılmış ve agreganın boşluklarını dolduran bağlayıcıların birleştirme özellikleri ve betonun akıcılığının özellikleri incelenmiştir. KYB'nin istenen diğer özellikleri; serbest sıkışabilme yeteneği, agreganın miktarı, bağlayıcı ve karışım suyu ilaveten süper akışkanlaştırıcının türü, dozajı ve kullanılması ilgili özellikleri içeren önemli faktörlerdir. Çökme akısı, V hunisi, L-kutusu, U-kutusu ve basınç deneyleri KYB'nin performanslarını incelemek uygulanan deneyler olarak göze çarpmaktadır. Bu deneylerin sonucunda yüksek kaliteli KYB üretmek için en iyi yöntemler önerilmektedir. Japon Hazır – Beton Birliği (JRMCA) gerçekleştirdiği yöntem ile karşılaştırıldığında bu yöntem daha basittir (Nan vd., 2001). KYB akışını karakterize edebilmek için viskozite veya bir delik boyunca akış zamanı ya da doldurma kapasitesi gibi özelliklere ihtiyaç vardır. KYB akış özelliklerini test etmek için çeşitli beton reometreleri, birkaç standart deney ve yaygın olarak kullanılan V- akışı ve U-akışı deneyleri, reometreler arasındaki ilişkilerin belirlenerek çeşitli deneyler yapılması KYB'nin reolojik özelliklerini belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Buna dair yapılan bazı çalışmalarda, akış davranışı yüksek seviyede bir karışım elde edebilmek için değişen dozlarda su azaltıcı katkı ile viskozite modifiyesi için karışımlar hazırlanmıştır. Farklı iki reometre ile ölçülen plastik viskozitelerin % 84 ölçülebilir olduğu bulunmuş ve KYB karışımı ile tanımlanan çökmenin tek başına yayılmış bir çökme olmadığı kanaatine varılmıştır (Brower vd., 2000).

Slump deneyi kullanılarak çelik lifli ve çelik lifsiz, kendiliğinden yerleşen betonun üç boyutlu akışını karakterize edilebilmekte ve ayrıca sayısal olarak da bu yöntem modellenmektedir. Slump deneyinde çelik lif ve çelik lif olmadan betonun kendi kendine sıkışmasının akışını modellemek için üç boyutlu bir Lagrange düzgün parçacık hidrodinamik yöntemi kullanılabilir. Temel olarak Newton olmayan akışkan akışı Bingham tipi model ile açıklanmaktadır. Bu yöntemle, Deeb vd. (2014) lifsiz KYB akışı sırasında 3D benzetim oluşturmuş ve büyük agregaların (8 mm ve daha büyük) dağılımı üzerine odaklanmışlardır. Simülasyon ile kısa çelik lifler içeren yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun akışı sırasında elyafın yönü ve dağılımına

odaklanan çalışmalar da vardır. Bu tür benzetimlerin sonuçları, liflerin ve ağır agregaların çökmediği ancak akış boyunca karışımda homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Laboratuvarında yapılan L kutusu deneyi ile benzetim sonuçları karşılaştırılarak bu yöntemin yetenekleri çoğu zaman doğrulanabilir. Basit bir deney olan bu yöntem kendiliğinden yerleşen betonun akışı sırasındaki çelik liflerin davranışını yeniden yönlendirmek ve değerlendirmek için yapılmıştır. Akış sırasında liflerin asıl yönüne dik bir kesitte yönünü değiştirmek için lif yönlendirme faktörü (FOF) kullanılmıştır.

Bu tahmin yöntemi eğim tarafından kesilmiş ve kesme düzlemindeki lif sayısını içermektedir. FOF ile bu kesim bölümlerinde görüntü analizini belirlemek için yararlı olmaktadır (Deeb vd.,2014).

Kendiliğinden yerleşen beton mükemmel akışkanlık yeteneği nedeniyle çelik borulu beton dolgulu yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. KYB elemanlarının dayanıklılık ve taşıma kapasitesinde KYB' nin doluluğu etkilidir. Ancak, akış sürecinin beton dökümü ile çelik boru üzerindeki etkileri zahmetli bir gözlem ile anlaşılabilir. Buna örnek vermek gerekirse, bir sayısal ağırlıklı çalışmada da, taze beton homojen sıvı olarak kabul edilmiş ve 3D Bingham modeli ile akma gerilmesi ve viskozitesi betonun sıvı davranışını (doluluğunu) tarif etmek için kullanılmıştır. Beton dolgulu çelik boru için bir KYB dökümü sayısal olarak simüle edilerek sonuçlar hem laboratuvar hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu yöntem ile KYB ile oluşturulan kolonun akış süreci açık bir şekilde izlendiği görülmüştür (Qi vd.,2012). Çelik lif takviyeli KYB' nin düzgün bir formda doldurma işleminin benzetimi karmaşıktır. Bu tür benzetimler lif yönelimi ve döküm gövdesinin son mekanik özelliklerini etkiler, bu da dağılım yönelimi ile açıklanabilir. Lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonların akışını doğru olarak simüle edebilmek için kare bir levha, lif takviyeli kendiliğinden yerleşen beton ile doldurularak deneyler yapılmıştır. Hesaplamalı tansörler tomografi tarayıcı görüntü analizi, lif alanının yönünü elde etmek için kullanılmıştır. Bu tansörler benzetim ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonun gerçek davranış yeteneği tahmin edilmeye çalışılmıştır (Svec vd., 2012). Angelos vd. (2010) ise KYB laboratuvar deneyleri için sürekli bir benzetim yaklaşımı kullanmıştır. Daha ayrıntılı olarak, yaygın olarak kullanılan "L- kutusu" ve "V- hunisi" deneyleri CFD teknikleri kullanılarak simüle edilmiştir. Beton, Newton tipi sıvı olmayan homojen bir

madde olarak modellenmiştir. Böylece agrega etkileri bir Bingham Plastik modele uyarlanarak, engelleme ve ayrışma ihmal edilmiştir. Kapsamlı laboratuvar deneyleri (bilgisayar donanımlarının yanı sıra "LCPC BOX" deney kullanarak), KYB 'nin taze haldeki özelliklerini değerlendirmek ve bu tür plastik viskozite gibi reolojik parametreleri, tahmin ve gerilme değerleri elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İki ve üç boyutların benzetimleri 2D ve 3D etkilerini doğrulamak amacıyla incelenmiştir (Angelos vd., 2010).

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte kendiliğinden yerleşen taze betonun akışının sayısal benzetim uygulamaları son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Farklı ölçeklerdeki problemleri modellemek için yararlı üç farklı uygulama sunulmuştur: *i*) parçacıklar, betonda her biri bir agregayı temsil eder, *ii*) sıvı, betonu homojen bir sıvı olarak modelleme ve *iii*) sıvı parçacığı, akış ayrıntılarını incelemek. Sayısal benzetim ile istatistiksel yöntemleri karşılaştırarak değerlendirme yapan çalışmalar da mevcuttur (Gram ve Silfwerbrand, 2011). Beton akışının benzetimi hem ayrık hem de sürekli yöntemler kullanılarak incelenebilir. Burada agregalar ile ilgili davranışlar ayrı ayrı parçacıkları benzetmek için bir araç olarak sunulur ve ayrı nesnelere modellenir. Genelde benzetimlerde küresel parçacıklar, agregayı temsil etmek için kullanılır. Bununla birlikte, küresel olmayan parçacıklardan yararlanmak da mümkündür. Agrega yüzey pürüzlülüğü, boyutu ve boy oranı istenen parçacık şekli, parçacık halinde sürtünme, boyut ve topaklanma oluşturan birkaç küre ile model olabilmektedir. Beton simüle etmek için ise sürekli (continuous medium) bir yaklaşım kullanılmaktadır. Beton homojen bir malzeme gibi modellenip, agrega özel etkileri, engelleme ve ayrışma olarak açıklanamaz. Fakat, Bingham malzeme modeli ile simüle edilen beton laboratuvar deneyleri (örneğin; yığılma akışı, L-kutusu) kullanılarak iyi bir benzerlik elde edilebilir. Akış özelliğinin bir bölümü sıkışık çift levha beton olan çok katmanlı tam ölçekli duvar başarıyla simüle edilmiştir (Gram, 2009).

Bu çalışmada büyük ölçekli bir nicel analiz ile süreli bir yaklaşım oldukça düzgün bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrık parçacık yaklaşımı ile niteliksel olarak daha küçük ölçekli detaylar ve olaylar yakalanmıştır. Bilgisayar hız ve kapasitesinin artması, benzetim detay ve örnek hacmini arttırmasına olanak sağlamaktadır. Sıvı formu parçacık yaklaşımı ile homojen sıvının birleştirilmesi gelecekte fiziksel süspansiyon

olarak beton akış modeli olacaktır. İlk adım olarak bir Newton sıvısının içinde düşen tek elipsoid parçacık incelenmiştir. Lagrangian parçacık tabanlı yöntem (parçacığın hareketini takip eden hareket denklemi) ile pürüzsüz parçacık hidrodinamik (SPH), veya kısa çelik lifler olmadan kendiliğinden yerleşen betonların akış modeli için kullanılmıştır. İkinci aşamada agrega ince katı cisimlerin sert küreler ve kısa çelik lifler olarak tedavi edildiği gibi mikro-mekanik modelleri kullanarak macunun ölçülen viskozitesi tahmin edilebilmektedir.

SPH sıkıştırılmaz yapıları nedeniyle kütle korunması ve temel denklemleri (Navier-Stokes denklemleri) ile çözülmüştür. Oluşan zamansal hız alanı ve buna bağlı yaklaşık bir basınç projeksiyonu türetilmiş (Poisson denklemi), sonrasında da bu basınç alanı üzerinden sıkıştırılmazlığı karşılamak için bir ayrışma-boş alan yansıtılmıştır. Sayısal benzetim sonuçlarında laboratuvarda yürütülen gerçek çökme deneyleri kıstas alınmıştır. Detayları burada verilen çalışmaların ortak özelliği olarak, KYB akış yeteneği ve kalıp doldurma davranışını tahmin etmek için (uygun bir reolojik modeli içeren) sayısal sonuçlar ile laboratuvar deney sonuçlarının oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir (Kulasegaram vd., 2011). Burada derlenen literatür, HAD metodunun yaş beton davranışının incelenmesinde önemli bir araç haline geleceğine işaret etmekle birlikte özellikle agrega hareketinin modellenmesi konusundaki eksikliklere ve/veya alternatif yaklaşımlara dikkat çekmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Geleneksel vibrasyonlu beton için uygun olan tüm çimento tipleri KYB üretiminde de kullanılabilir. KYB için uygun çimento tipi, KYB'nin ve uygulamanın özel şartlarına göre üretici tarafından kullanılan çimento tipi ile belirlenir. Yapılan çalışmada Bilecik SANÇİM çimento fabrikası ürünü olan CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır.

3.1.2. Mineral katkılar

KYB' nin taze haldeki durumundan dolayı puzolanik olmayan ve puzolanik / hidrolük mineral katkıları ayrışma ve kohezyon direnci arttırmak amacıyla kullanılır. Yapılan çalışmalar uçucu külün, KYB' nin kohezyonunu arttıran özelliğe sahip bir katkı olduğu göstermiştir. Ancak yüksek miktardaki uçucu kül akışa karşı direnci yüksek olan bir hamur oranı oluşturabilmektedir. Buda KYB'nin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmada mineral katkı olarak Kütahya Tunçbilek Termik Santralinden temin edilen F tipi uçucu kül kullanılmıştır.

3.1.3. Agregalar

Sabit bir kalitede KYB üretimi için agreganın nem miktarı, su emmesi, gradasyonu ve ince malzeme çeşitliliği yakın gözlemlenlenerek sürekli izlenmelidir. KYB üretiminde yıkanmış agrega kullanmak daha iyi bir sonuç verir. Dolayısıyla KYB için kullanılacak olan agreganın temin edileceği kaynağın değişmesi KYB'nin özelliklerini değiştirmede önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmada, Eskişehir Seryapı Prefabrik Fabrikasından temin edilen kalker kökenli 0-4 mm ve 4-12 mm arası kırmataş malzeme agrega olarak KYB karışımlarında kullanılmıştır.

3.1.4. Kimyasal beton katkıları

KYB’de de geleneksel vibrasyonlu betonlarda kullanılan katkıları aynı şekilde kullanılabilirler, ancak katkı üreticisinden karışıma kullanılan katkılardan optimum performansı alabilmek için öneriler alınmalıdır. Optimum performans için katkı seçimi katkının fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilenebilir. Ayrıca kullanılan çimentonun inceliği, karbon içeriği, alkali miktarı ve C₃A oranı gibi faktörlerin de etkisi olabilir. Geleneksel betondan farklı olarak KYB’de hiperakışkanlaştırıcı (yüksek oranda su azaltıcı katkı) kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada akışkanlaştırıcı beton katkısı olarak polikarboksilik eter esaslı BASF Glenium C 303 ve BASF Glenium SKY 608 marka yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3. 1. Kullanılan malzemeler.

3.2. Yöntem

Çalışmada öncelikle kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinden sonra KYB tasarımına geçilerek farklı karışım oranlarında ve tane boyutlarında KYB tasarımları EFNARC yöntemine göre tasarlanmıştır. Daha sonra bu tasarıma göre hazırlanan taze betonlar üzerinde işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Taze betonun akış davranışı Panasonic Lumix DMC-GH4 marka ağır çekim (96 fps) kamerası ile eşzamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Sonrasında ise numune alınarak bu betonların mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen taze beton deney sonuçları ANSYS programı kullanılarak modellenmiştir.

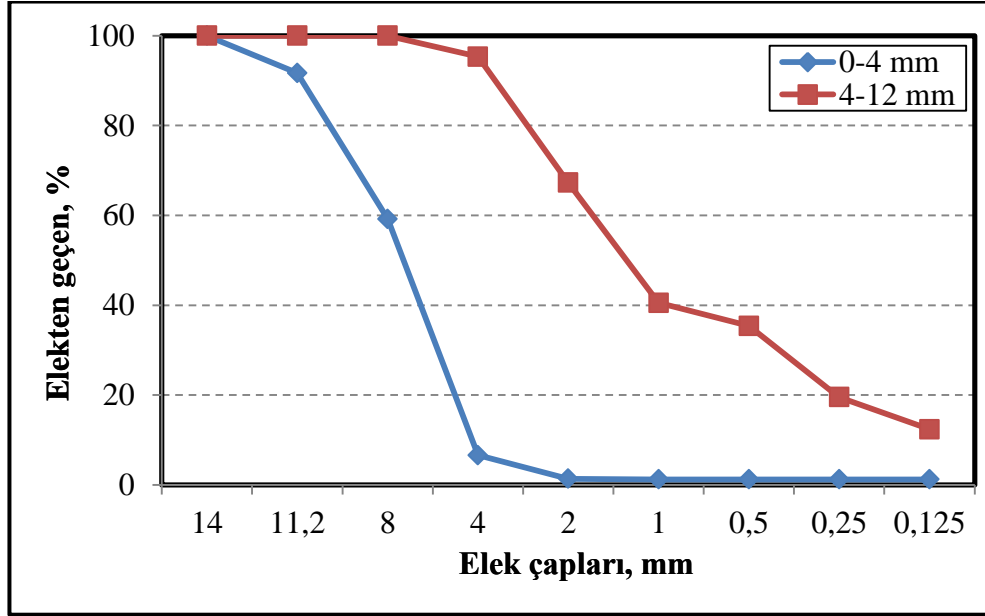
3.2.1. Elek analizi deneyi

KYB karışımlarında kullanılacak olan agreganın tane dağılımı elek analizi deneyi ile belirlenmiştir. KYB elek analizinde kullanılan elekler 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 11,2 mm boyutlarındadır. Agreganın numuneleri 105°C sıcaklıkta 24 saat süreyle etüvde kurularak tamamen kuru hale getirilmiştir. Sonrasında 5000 gr kuru agrega numunesi her tane sınıfı için ardışık dizilen elek setine konulmuş ardından elek sarsma cihazı ile sarsılarak eleme işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen elek üstü kalan numune değerleri granülometri hesabı için kullanılmıştır. Agreganın granülometrisi için kullanılan elek takımları ve etüv Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3. 2. Granülometri için kullanılan elek takımları ve etüv.

KYB'nin iyi bir akış, yayılma ve geçiş yeteneğine sahip olabilmesi için KYB karışımında kullanılacak olan en büyük agrega tane çapının 16 mm veya daha az olması tercih edilmektedir (Aggarwal vd., 2008; Tohumcu ve Bingöl, 2013). Deneysel karışımlarda kullanılan en büyük agrega tane çapı 12 mm olacak şekilde belirlenmiş ve KYB tasarımları buna göre yapılmıştır. Agregalar üzerinde yapılan elek analizi sonucunda elde edilen granülometri eğrisi Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3. 3. Agrega granülometri eğrisi.

KYB karışım oranlarının belirlenmesinde EFNARC tarafından önerilen ve Çizelge 2.2'de verilmiş olan KYB tasarım kriterleri dikkate alınmıştır. Kıvamın tutturulması için deneme yanılma yöntemi uygulanmış ve kullanılan agrega ve çimentoya uygun katkı oranları belirlenmiştir. Kullanılan malzemelere en uygun KYB karışımları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. KYB karışım miktarları (1m³ için).

Karışım	Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	İri Agregata (kg)	İnce Agra (kg)	Su (kg)	Katki (kg)
K1	310	110	510	1240	197	13
K2	310	110	510	1240	191	13
K3	310	110	510	1240	200	13*
K4	310	110	700	1050	202	11
K5	350	200	470	1097	160	8
K6	350	200	470	1097	220	11
K7	400	150	525	1225	221	11
K8	350	200	470	1097	220	11
K9	350	200	627	940	220	11
K10	350	200	470	1097	247	11

* BASFGlenium SKY 608

KYB tasarımında iki farklı bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Burada çimento ve kül miktarı sırasıyla 420 kg/m³ ve 550 kg/m³ olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Agregata kullanım oranları ise iri/ince oranı göz önüne alınarak yapılmıştır.

3.2.2. J- Halkası deneyi

J halkası deneyi kendiliğinden yerleşen betonun geçiş kabiliyetini ve yayılmasını ölçen bir deney yöntemidir. Bu deney sonucunda kendiliğinden yerleşen betonun boşluklara dolabilme ve yerleşebilme yeteneği ölçülmektedir. Kendiliğinden yerleşen betonun akış hızı ve akmaya karşı direnci (viskozite) t_{500j} süresi ile ölçülür. En büyük agregata tane boyutunun 40 mm' den fazla olduğu hallerde bu deney yöntemi uygun değildir (TS EN 12350-12, 2011) . Deney için kullanılan tabla ve J halkası deney seti Şekil 3.4'te görülmektedir. J-halkası deneyi sırasında yayılma davranışının zamana bağlı değişimini ağır çekim kamera ile kayıt altına alınmıştır. J halkası deneyinde geçiş yeterliliği PJ şu şekilde hesaplanmaktadır (3.1).

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (3.1)$$

Burada;

PJ : Engelleme perdesiyle ölçülen geçiş yeterliliği (mm),

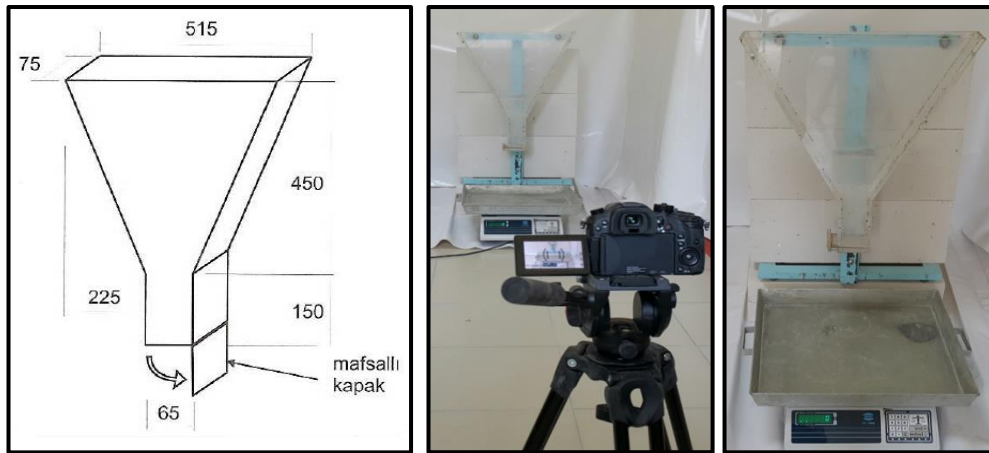
Δh :Ölçülen düşey mesafeler (mm) .dir



Şekil 3. 4. J- halkası deney düzeneği

3.2.3. V- Hunisi deneyi

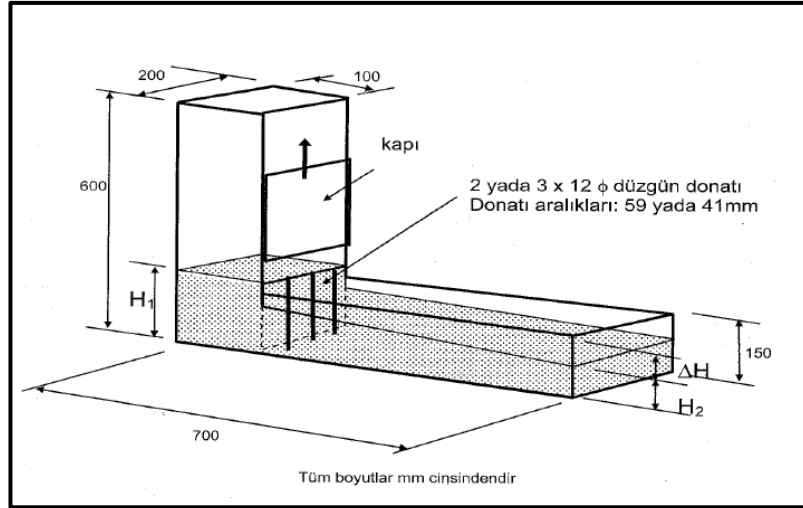
Bu deney yöntemi ile kendiliğinden yerleşen betonun akış ve doldurma yeteneği belirlenmektedir. En büyük agrega çapının 22.4 mm' nin üzerinde olduğu durumlarda bu deney yöntemi uygun değildir. Bu deneyi yapılabilmesi için V şeklindeki huni taze beton ile doldurulur, betonun huniden boşalma süresi ölçülür ve V – hunisi akma süresi olarak kaydedilir. İlk olarak huni ve kapak dahil tüm iç yüzeyi hafifçe nemlendirilir. Daha sonra huni KYB numunesi ile doldurulur ve numunenin üst yüzü düz bir çubuk ile düzeltilir. Huniyi doldurduktan 10 ± 2 saniye sonra kapak açılır. Kapak açıldıktan sonra huninin üstünden aşağıya bakıldığında ilk olarak alttaki kap görüne kadarki betonun huniden kaba geçiş zamanı kronometre ile 0.1 saniye hassasiyetinde ölçülür. Bu süre V – hunisi akma süresi olarak belirlenir (TS EN 12350-9, 2011). Deneylerde akışın ve beton seviyesindeki azalmanın gözlemlenebilmesi için özel olarak pleksiglastan üretilen şeffaf V-Hunisi kullanılmıştır (Şekil 3.5). Ayrıca beton akışının kütle ile arasındaki ilişkiyi belirlemek için V-Hunisinin altına 30 kg kapasiteli ve 1gr hassasiyetli dijital terazi konularak beton kütleindeki değişimde deney sırasında eşzamanlı olarak belirlenmiştir. V-Hunisi deneyinde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3. 5. Şeffaf V- Hunisi deney düzeneği ve boutları (EFNARC, 2005).

3.2.4. L- Kutusu deneyi

KYB' nin donatı aralarından ve dar boşluklardan, ayrılmaya uğramadan geçme yeteneği L – kutusu deneyi ile belirlenmiştir. İki ve üç çubuklu deney olmak üzere iki türlü L-kutusu deneyi vardır. Üç çubuklu deney daha sık donatı çubuklarının bulunduğu durumları simgeler. Hacmi bilinen belli bir miktarda taze haldeki kendiliğinden yerleşen betonun dikey konumdaki düzgün donatı çubukları arasında yatay olarak akması sağlanır ve donatının ilerisine geçen betonun yüksekliği ölçülür. L – kutusunu düz ve yatay bir taban üzerine oturtulur, dikey ve yatay kısımlar arasındaki kapak kapatılarak KYB numunesi kaptan L – kutusunun besleme gözüne dökülür ve 60 ± 10 saniye kadar bekletilir. KYB'nin akışı durduğunda L – kutusunun yatay kısmının en sonunda kutunun genişliği boyunca eşit aralıklarla üç noktada, KYB'nin üst tarafı ile kutunun yatay bölümünün üst tarafı arasındaki dikey mesafeyi ölçülür. Daha sonra kutunun yatay bölümünün yüksekliğini kullanarak bu üç ölçüm ile KYB'nin ortalama derinliğini hesaplanır. Aynı yöntem kullanılarak kapağın hemen arkasındaki betonun ortalama yüksekliğini de ölçülebilir (TS EN 12350-10, 2011). Yapılan deneyde akış ve seviye değişiminin zamana bağlı olarak değişiminin belirlenebilmesi için pleksiglas malzemeden özel olarak Şekil 3.6'da verilen boyutlara göre şeffaf L-kutusu deney düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 3. 6. L – kutusunun genel yapısı (EFNARC, 2005).

Deney sırasında zamana bağlı akış davranışı ağır çekim kamera ile belirlenmiştir. Bu amaçla L-kutusu üzerinde 100 mm arayla referans çizgileri çizilmiştir (Zeng, vd., 2015). Şeffaf L-kutusu deney düzeneği Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3. 7. Şeffaf L-kutusu deney düzeneği

L-kutusu deneyinde hesaplanan geçiş yeterlilik oranı (PL) (3.2) bağıntısıyla hesaplanmıştır.

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (3.2)$$

Burada;

PL : L kutusu deneyi ile ölçülen geçiş yeterlilik oranı,

H_1 : L kutusunun düşey bölümündeki beton tabakası ortalama kalınlığı (mm),

H_2 : L kutusunun yatay bölümü ucundaki beton tabakası ortalama kalınlığı (mm) dir.

3.2.5. Reometre deneyi

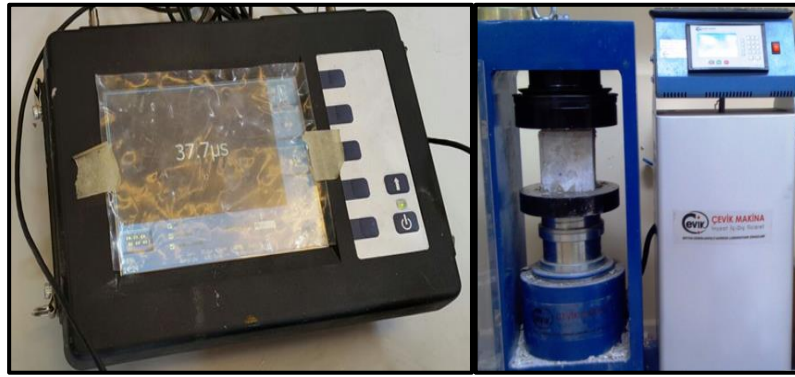
Taze betonun işlenebilirlik davranışını belirlemede kullanılan bir diğer yöntemde reometre deneyidir. Bu deneyin amacı taze betonun viskozite ve kayma direncinin belirlenmesidir. Çalışmada taze beton için özel olarak üretilmiş olan Alman malı Schleibinger BT-2 modeli reometre kullanılmıştır. Öncelikle hazırlanan yaklaşık 12 dm^3 beton reometrenin haznesine doldurulmalıdır. Sonrasında reometrenin ölçücü parçası beton haznesi üzerine takılmış ve cihazın kolu çevrilerek cihaza tam bir tur atırılmıştır. Tam tur sonunda cihaz otomatik olarak ucunda bulunan problardan okuduğu verileri hafızasına kaydederek viskozite ve kayma direncini belirlemiştir. Çalışmada kullanılan taze beton reometresi Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3. 8. Taze beton reometresi.

3.2.6. Sertleşmiş beton deneyleri

Üretilen KYB karışımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleriyle belirlenmiştir. Bu amaçla taze KYB karışımından elde edilen numuneler her karışımdan 3'er adet numune alınarak 150×150 mm boyutlarındaki küp kalıplara dökülmüştür (TS EN 12390-1, 2013). Bu numuneler kalıpta 24 saat bekletildikten sonra çıkartılarak deney yapılincaya kadar $20 \pm 2^\circ\text{C}$ su içerisinde 3,7 ve 28 gün kür edilmiştir. Kür süresi sonunda beton her bir numune üzereinde birim ağırlık, ultrases hızı ve 200 kN kapasiteli Çevik makine markalı basınç presinde eksenel basınç kuvveti altında basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (TS EN 12390-3, 2010). Çalışmada kullanılan ultrases hızı cihazı ve beton basınç dayanım presi Şekil 3.9'de görülmektedir.



Şekil 3. 9. Sertleşmiş beton deney cihazları.

3.2.7. ANSYS CFX ile HAD (CFD) modellemesi.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) (Computational Fluid Dynamics-CFD), ilgili alanda detaylı hesaplamaların yapılabildiği, akış alanı ve diğer fiziksel detayların gösterilebildiği, bilgisayar tabanlı bir hesaplama yöntemidir. HAD analizlerinin sonuçları, Simülasyon Tabanlı Ürün Tasarım sürecinde ürünün çalışmasını, varsa problemleri bilgisayar ortamında benzetiminin yapılması olanağı sağlar ve ürün performansını optimize etmekte önemli katkılarda bulunur. Bu kapsamda söz konusu akışkan problemi, endüstriyel bir ürünle ilgili olabileceği gibi, inşaat mühendisliğinde rastlanan su/hava kuvvetlerine ait bir sorun da olabilir. Çok fazlı akışlar, Newtonian veya Newtonian olmayan akışlar, katı-sıvı etkileşim analizleri, ileri türbülans modelleri, dönen parçaların analizleri gibi bir çok uygulamalarda HAD, doğru ve hızlı sonuç elde etmenizi sağlamaktadır (Bulut ve Ünveren, 2011).

ANSYS CFX yazılımı ile gelişmiş akış analizi yetenekleri, akış ve ısı sistemleri tasarlamak mevcut tasarımlarımızın üzerinde iyileştirmeler yapmak için oldukça kullanışlı bir yazılımdır. ANSYS genel olarak akışkanlar dinamiği çözümleyicisi olarak gözüktüğü de endüstriyel ürünlere yönelik özel çözümlerde sunmaktadır. Bu çalışmada ticari bir HAD yazılımı olan ANSYS CFX R 14.5 yazılımı kullanılmaktadır. ANSYS CFX modülü, akışkanlar dinamiği ve ilgili diğer fiziksel olayları modellemek için kullanılan kapsamlı bir yazılımdır

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

4.1. KYB'nin İşlenebilirlik Deney Sonuçları

KYB numuneleri üzerinde işlenebilirliği belirlemek için taze beton deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında tasarlanan farklı agrega gradasyonu, çimento dozajı ve akışkanlaştırıcı katkı oranlarına sahip KYB numuneleri üretilerek tane boyutları elek analizleriyle belirlenmiştir. Taze betonun reolojik özellikleri Şekil 4.1'de görülen taze beton reometresi kullanılarak belirlenmiştir.. Ayrıca taze beton numuneleri üzerinde pleksiglass malzemeden yapılan L-kutusu ve V-hunisi deney düzenekleri ile L-kutusu, V-hunisi deneyleri, J-halkası ile yayılma deneyleri yapılarak KYB tasarımlarının işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir.

4.1.1. V-Hunisi, J-Halkası ve L-Kutusu deney sonuçları

KYB işlenebilirliğinin belirlenmesinde en yaygın şekilde kullanılan deneyler V-hunisi, J halkası ve L-kutusu deneyleridir. Bu deneyler sırasında taze betonun akış davranışı yavaş çekim kamerası ile takip edilerek zamana bağlı akışkan hareketleri eşzamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Buradan elde edilen akış davranışları modelleme sisteminde kullanılmıştır. Ayrıca üretilen KYB numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimde çalışma içinde takip edilmiştir. KYB'nin yayılma, akış ve geçiş yeterliliği değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4. 1. KYB yayılma, akış ve geçiş yeterliliği değerleri.

Karışım	V- Hunisi (sn)	L- Kutusu Geçiş Yeterlilik (PL)	J- Halkası Yayılma Değeri (SF _j) (mm)	J-Halkası Geçiş Yeterliliği (PJ) (mm)
K1	20	-	-	-
K2	42	-	-	-
K3	32	-	-	-
K4	73	-	-	-
K5	120	-	-	-
K6	34	-	-	-
K7	11	1,10	625	6,25
K8	10	1,03	645	5,50
K9	112	1,07	615	31,25
K10	6	1,04	755	3,25

V-hunisi deney sonuçları incelendiğinde KYB karışımlarının huniden akış sürelerinin 6 sn ile 120 sn arasında değiştiği görülmüştür. EFNARC'a (2005) KYB tasarımında V-Hunisi geçiş süresi VS1/VF1 sınıfı için ≤ 8 sn ve VS2/VF2 sınıfı için 9-25 sn arasında olması gerekmektedir. Buna göre Çizelge 4.1 incelendiğinde K10 karışımının VS1/VF1 sınıfında olduğu görülmüştür. K1, K5, K7 ve K8 karışımlarının ise VS2/VF2 kıvam sınıfında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 3.1'de verilen karışım oranı çizelgesiyle birlikte değerlendirildiğinde toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m^3 (çimento + uçucu kül) olan KYB karışımlarının en uygun akış değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Ancak iri agrega miktarının artırıldığı K9 karışımında bu değer en yüksek süre olan 112 sn değerine ulaşmıştır. Burada kullanılan toplam agreganın ağırlıkça iri / ince agrega oranı % 40 / %60 olarak tasarlanmıştır. En düşük akış sürelerinin elde edildiği K7, K8 ve K10 numunelerinde su/bağlayıcı oranı 0.40-0.45 arasında değişmiştir.

L-kutusu deneyi, V-hunisi deneyinden elde en iyi akış davranışını gösteren K7, K8 ve K10 ile en kötü akış davranışına sahip numunelerden K9 numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde *PL* geçiş değerleri 1.03 ile 1.10 arasında değiştiği görülmüştür. Ayrıca L-kutusu deneyi sırasında ağır çekim görüntü alınarak akış davranışı eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir.

J-halkası deneyi sonuçları incelendiğinde yayılma değerlerinin 615 mm-755 mm arasında değiştiği görülmüştür. Geçiş yeterliliği değerleri incelendiğinde ise deney sonuçlarının 3,25-31,25 arasında değiştiği görülmüştür. J-halkası yayılma değerlerinin V-hunisi deney sonuçlarıyla benzer bir davranış gösterdiği ve KYB'nin akış kabiliyetinin taze betonun akış süresine benzer bir şekilde değiştiği görülmüştür.

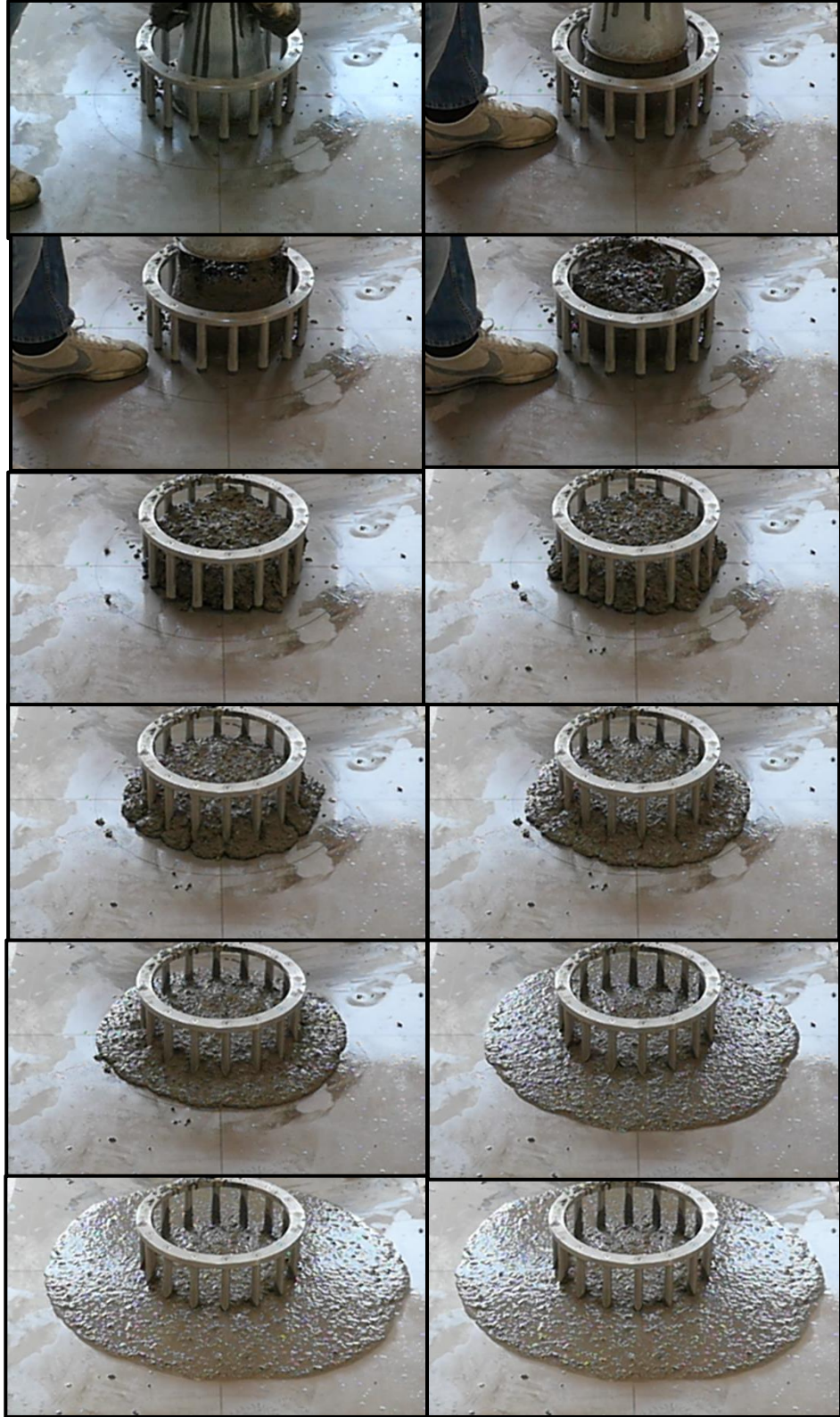
V-hunisi, L-kutusu ve J-halkası deneyleri şeffaf düzenekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı akış davranışının eşzamanlı olarak kamera ile kayıt altına alınmasıdır. Buaradan elde edilen görüntüler HAD modellemesindeki görüntülerle karşılaştırılacaktır. Böylece kurulan sayısal modelin KYB akış davranışıyla uyumu gerçek veriyle karşılaştırılabilecektir. Bu taze beton deneylerine ait yavaş çekim ekran görüntüleri Şekil 4.1-4.3 arasında görülmektedir.



Şekil 4. 1. V-hunisi deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri.



Şekil 4. 2. L-kutusu deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri.

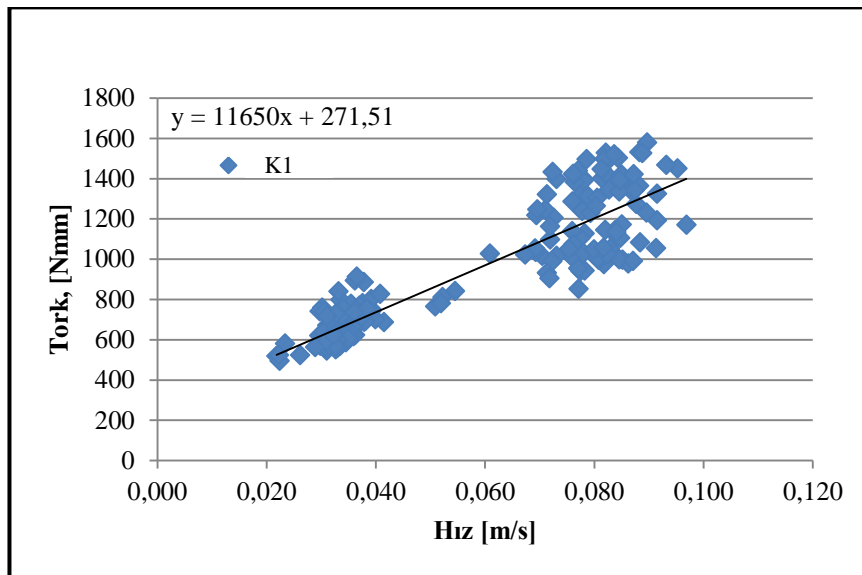


Şekil 4. 3. J-halkası deneyi yavaş çekim ekran görüntüleri.

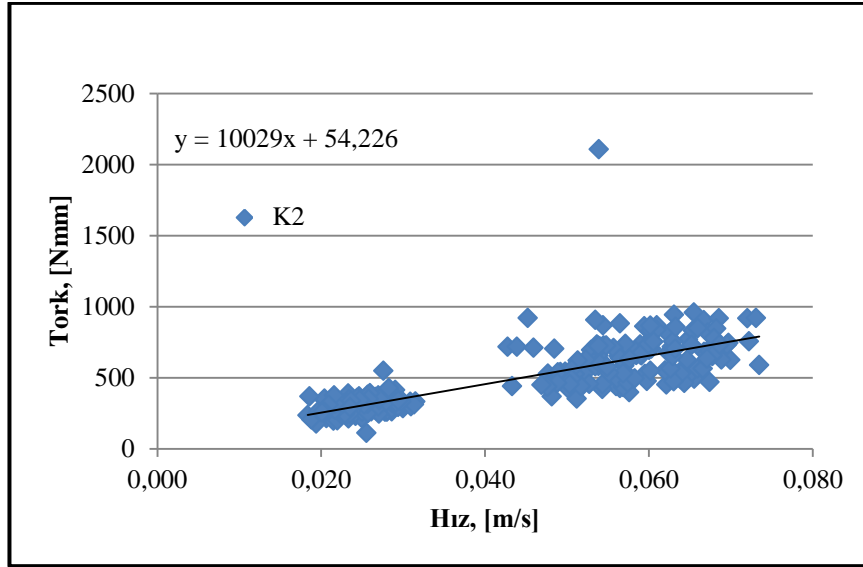
4.1.2. Taze beton reometresi deney sonuçları

KYB numunelerinin reolojik özellikleri taze beton reometresi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.1’de görülen beton reometresi 12 dm³ KYB karışımıyla doldurulduktan sonra dairesel kesitli hazne içinde cihaza bir tam tur attırılmış ve veri okuması cihazdan alınmıştır. Reometre deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.4-4.13 arasında görülmektedir. Buradan elde edilen grafiklerdeki değerler hız (m/s) ve Tork (Nmm) değerleri yer almaktadır. Reometre deney sonuçlarından elde edilen grafiklerde, doğrunun “y” eksenini kestiği nokta “kayma eşiği” değerini, doğrunun eğimi ise “plastik viskoziteyi” vermektedir.

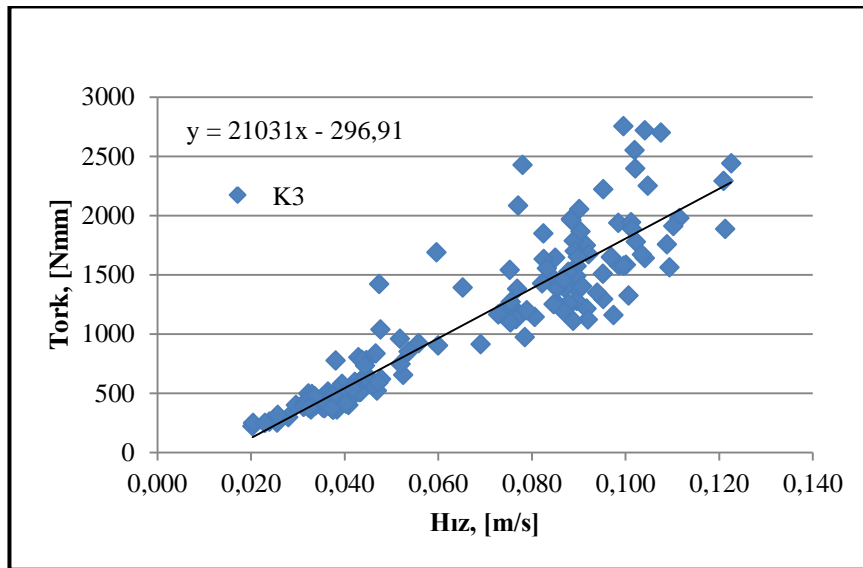
Deney sonuçlarına göre, viskozite değerlerinde en büyük değeri 31226 ile K5 karışımı almıştır. En küçük viskozite değerini ise 2522,6 değeri ile K10 karışımı almıştır. Kayma direnci değerlerine baktığımızda ise en yüksek değeri 296,91 ile K4 karışımı alırken, en düşük değeri ise 10,081 ile K9 karışımı almıştır. Buna göre plastik viskozitesi daha düşük olan bir KYB daha akıcı olduğundan dolayı daha kolay yerleşecektir. Bu verilere göre karışımların en akıcı işlenebilirliğinin en iyi sıralaması ise; K5, K3, K1, K6, K2, K8, K4, K9, K7, K10 şeklindedir.



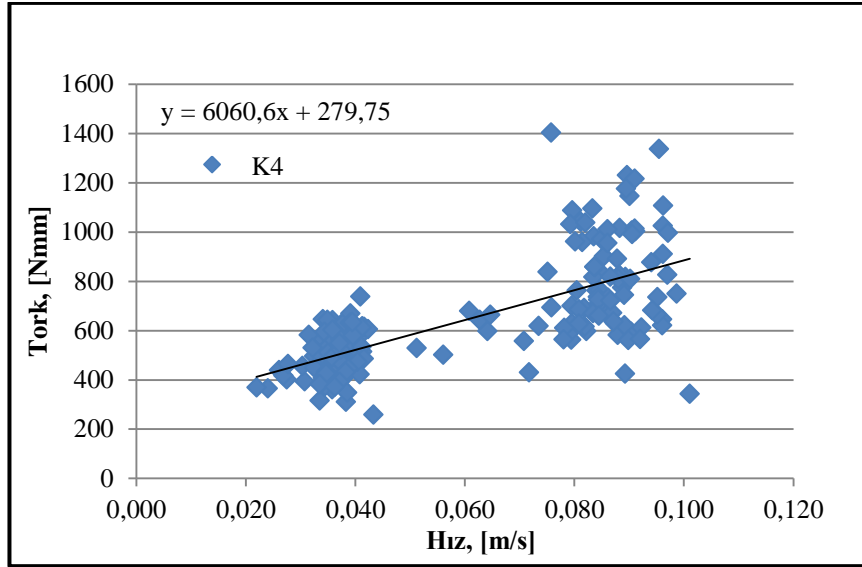
Şekil 4. 4. K1 reometre sonucu.



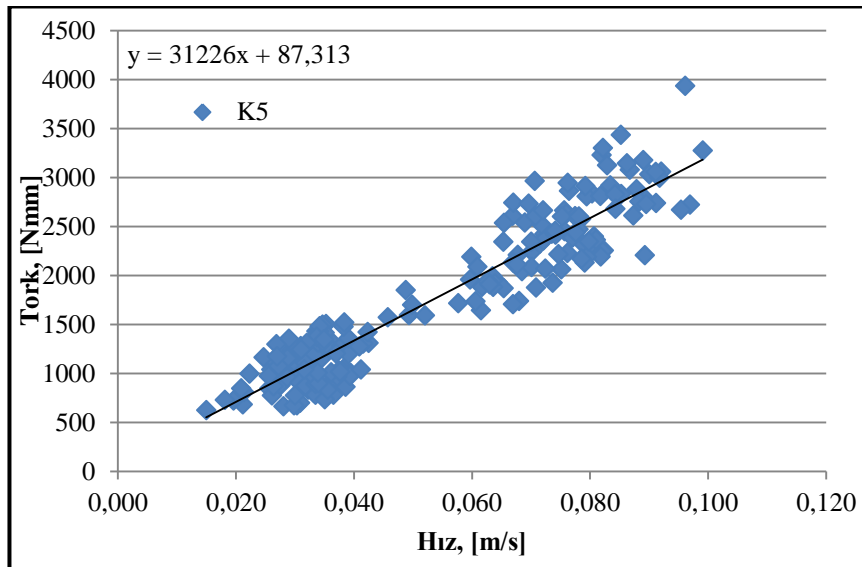
Şekil 4. 5. K2 reometre sonucu.



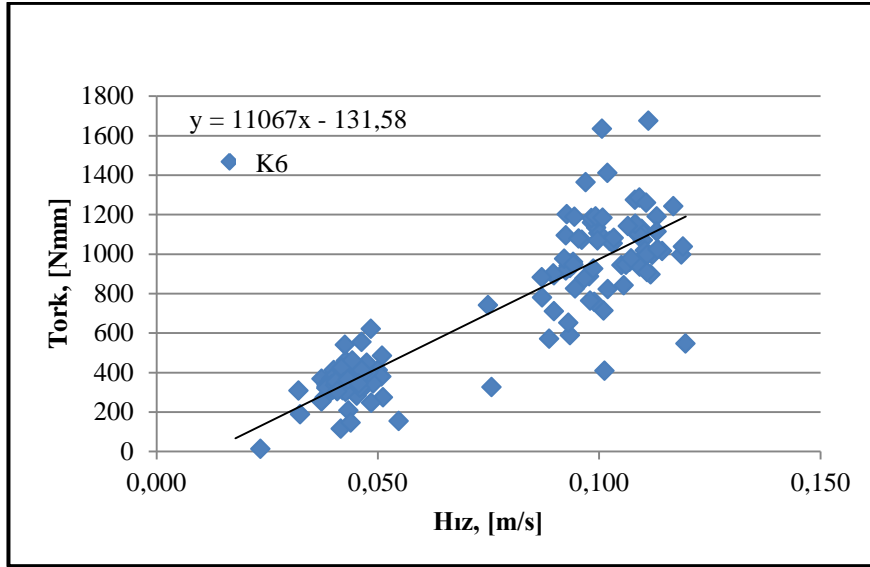
Şekil 4. 6. K3 reometre sonucu.



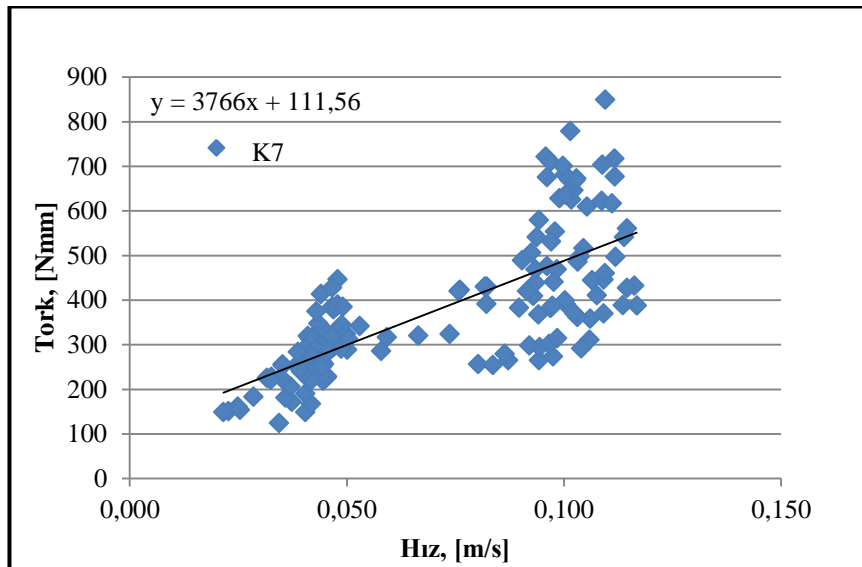
Şekil 4. 7. K4 reometre sonucu.



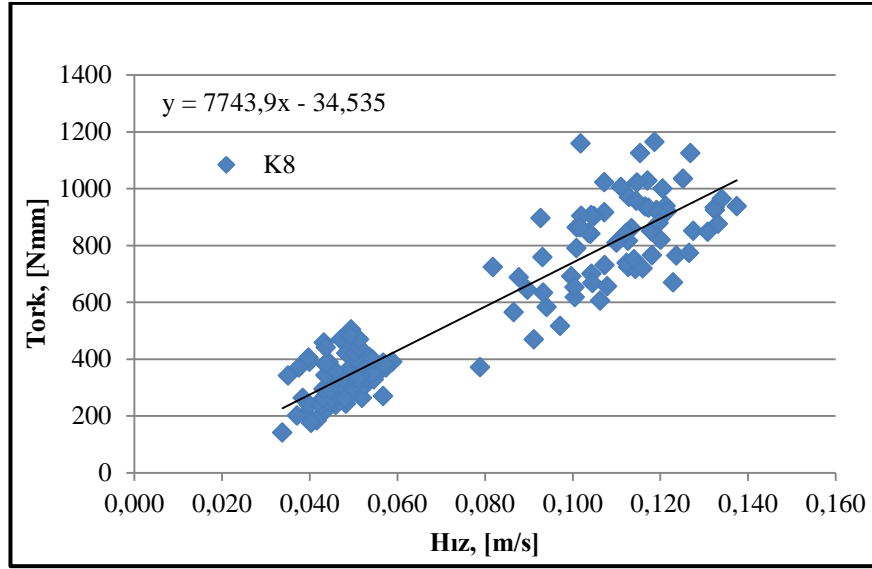
Şekil 4. 8. K5 reometre sonucu.



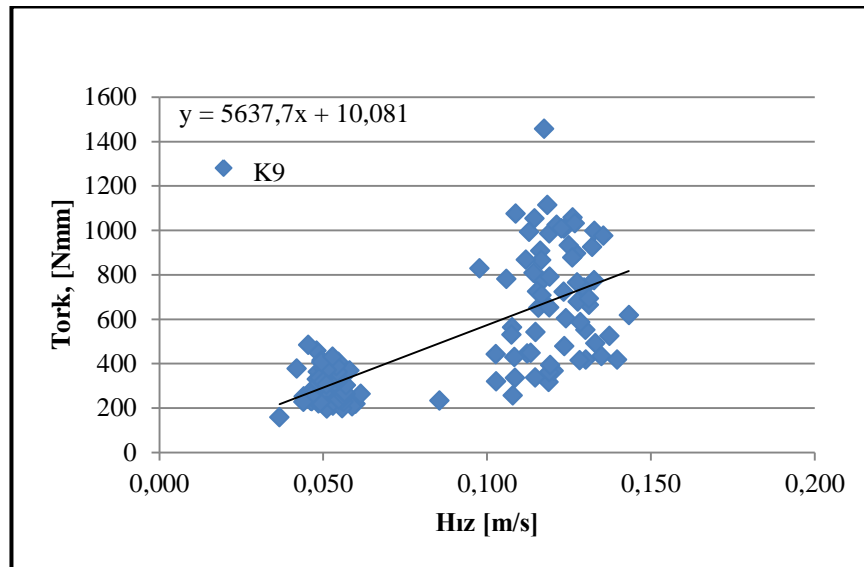
Şekil 4. 9. K6 reometre sonucu.



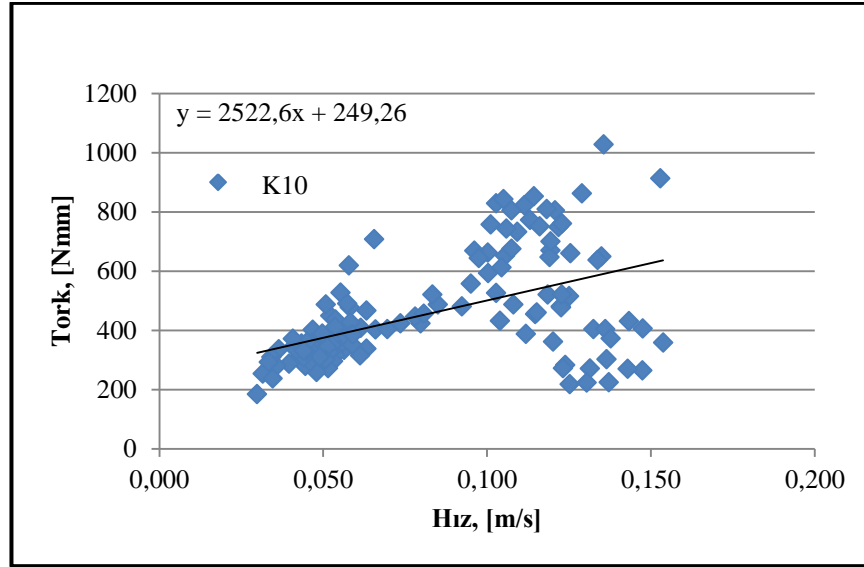
Şekil 4. 10. K7 reometre sonucu.



Şekil 4. 11. K8 reometre sonucu.



Şekil 4. 12. K9 reometre sonucu.



Şekil 4. 13. K10 reometre sonucu.

4.2. Sertleşmiş KYB Deney Sonuçları

KYB karışımlarından elde edilen numunelerin herbirinden 3' er adet 150×150 mm boyutlarındaki küp numunelerin 3,7 ve 28 günlük sertleşmiş KYB deneyi sonuçları Çizelge 4.2 - 4.4 arasında görülmektedir. KYB sertleşmiş beton deney görüntüleri Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4. 14. KYB sertleşmiş beton deneyleri.

4.2.1. Birim ağırlık deney sonuçları

Sertleşmiş KYB numuneleri üzerinde yapılan birim ağırlık deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde birim ağırlıkların numune yaşına ve karışım tipine bağlı olarak 2,28-2,42 t/m³ arasında değiştiği görülmektedir. Dayanım sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde birim ağırlığı düşük olan KYB numunelerinin dayanım değerlerinin de düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 2. KYB birim hacim ağırlık deney sonuçları.

Karışım	Birim Hacim Ağırlık, t/m ³		
	3 gün	7 gün	28 gün
K1	2,32	2,31	2,29
K2	2,34	2,34	2,37
K3	2,31	2,37	2,34
K4	2,38	2,38	2,42
K5	2,35	2,30	2,41
K6	2,31	2,32	2,36
K7	2,36	2,41	2,38
K8	2,35	2,33	2,31
K9	2,30	2,36	2,35
K10	2,29	2,28	2,29

4.2.2. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları

Sertleşmiş KYB numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ultrases geçiş hızı numune yaşına ve karışım tipine bağlı olarak 1987-2333 m/sn arasında değiştiği görülmektedir. Geçiş hızı sonuçlarına göre kür yaşı arttıkça ultrases geçiş hızlarında arttığı görülmüştür. En yüksek ultrases geçiş hızı 28 günlük K2 serisi karışımdan elde edilmiş olup en düşük değer ise 3 günlük K5 numunesinde görülmüştür.

Çizelge 4. 3. KYB ultrasnes geçiş hızı deney sonuçları.

Karışım	Ultrasnes geçiş hızı, m/sn		
	3 gün	7 gün	28 gün
K1	2060	2160	2233
K2	2013	2107	2333
K3	2067	2147	2180
K4	2027	2080	2220
K5	1987	2053	2133
K6	2013	2113	2207
K7	1993	2047	2153
K8	2040	2073	2240
K9	2013	2053	2137
K10	2107	2233	2200

4.2.3. Basınç dayanımı deney sonuçları

Sertleşmiş KYB numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde basınç dayanımlarının 3 günlük numunelerde 26,89-43,23 MPa arasında değişmiştir. Kür yaşı 7 gün olan numunelerde basınç dayanımları 35,71-56,90 MPa arasında değişmiştir. Nihai dayanım olan 28 günlük numunelerde ise dayanımlar 50,54-77,75 MPa arasında değişmiştir. Bu sonuçlardan KYB karışımlarında C50-C60 sınıfında beton elde edildiği görülmektedir. Bunda iyi yerleşme sayesinde elde edilen yüksek doluluk oranı etkili olmuştur. En büyük agrega tane boyutunun küçük olmasına rağmen bu değerlerin elde edilebilmiş olması KYB'nin üstünlüklerinden birisidir.

Çizelge 4. 4. KYB basınç dayanımı deney sonuçları.

Karışım	Basınç dayanımı, MPa		
	3 gün	7 gün	28 gün
K1	26,89	42,60	53,32
K2	33,52	47,99	62,78
K3	29,78	35,71	50,54
K4	29,08	43,25	57,24
K5	43,23	56,90	77,75
K6	40,25	55,29	69,59
K7	42,52	49,77	71,86
K8	38,36	52,64	67,27
K9	38,00	53,46	72,00
K10	38,33	43,48	56,87

4.3. KYB HAD Modellemesi Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında homojen akışkan kabulü yapılarak KYB'nin HAD modeli oluşturulmuştur. HAD uygulamalarında bir mühendislik probleminin çözümü Önileme (Pre-processing), Çözücü (Solver) ve Son işleme (Post-Processing) aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalar, bir V-hunisinin Newtonian akışkan modeli üzerinden örneklenerek anlatılmıştır. Önileme aşamasında problemin geometrisi tanımlanır, hesaplama ağı oluşturulur, akışkana ait fiziksel özellikler belirlenir, probleme ait başlangıç ve sınır koşulları tanımlanır. Çalışmanın bu aşamasında birinci bölümünde gerçekleştirilen deneylerin üç boyutlu geometrileri ANSYS programında tanımlanarak geometriye uygun hesaplama ağı (grid) oluşturulmuştur. Akışkan modeli için ANSYS programında tanımlı Newtonyen olmayan akışkan modelleri kullanılarak KYB için en uygun akışkan modeli belirlenmiştir.

HAD çalışmasında sonraki aşama ise Çözücü (Solver) aşamasıdır. Bu aşamada hesaplamaların yapılacak ortam ayarları, hesaplamada kullanılacak bilgisayar hassasiyeti (single ya da double precision) olarak belirlenmekte, hesaplayıcı kaynağının büyüklüğüne göre hesaplama süresi ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada program aşağıdaki Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemleri olarak isimlendirilen akıma ait denklem takımını çözmektedir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial z} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial v}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial v}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{v'w'})}{\partial z} \quad (4.3)$$

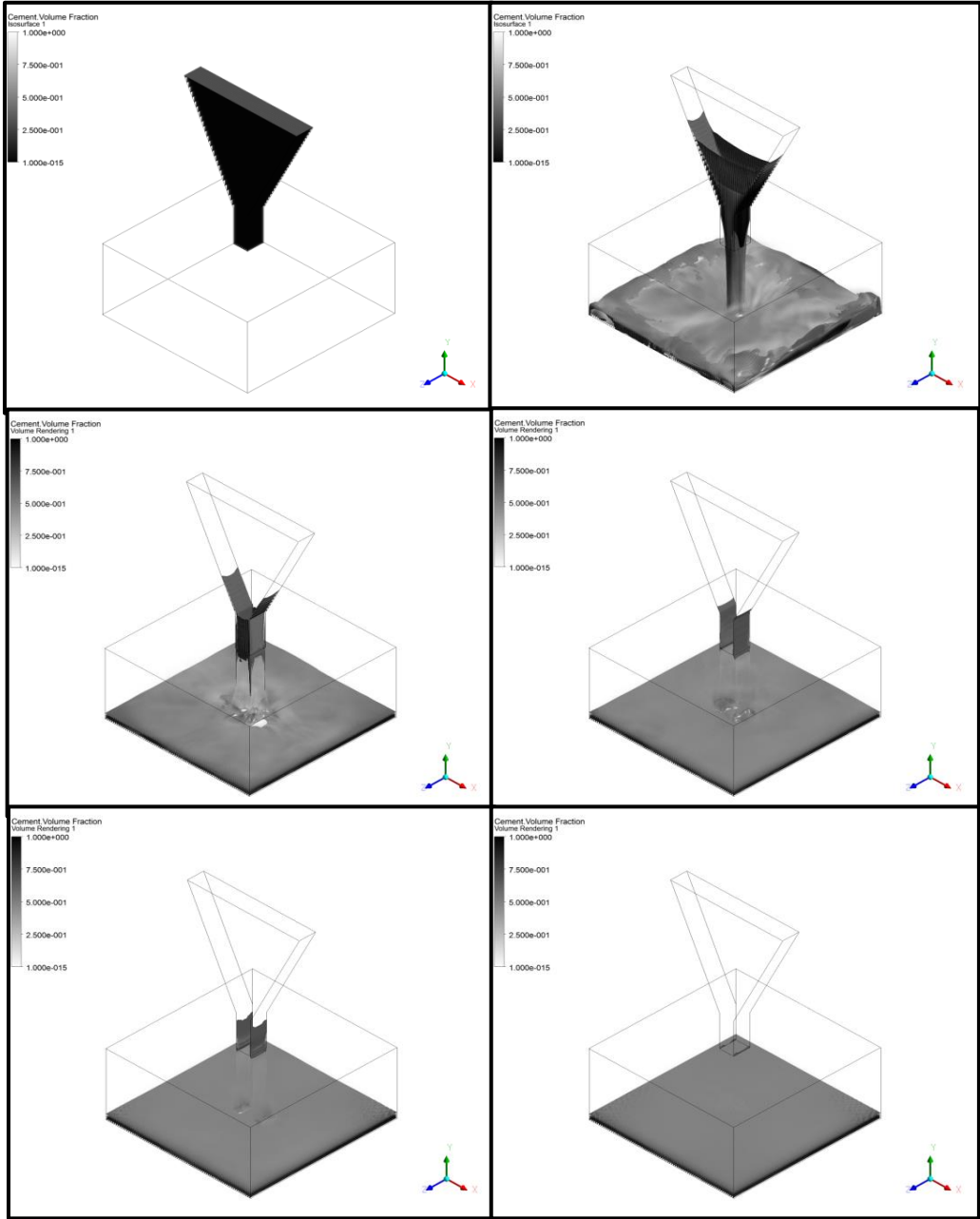
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial w}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial w}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial w}{\partial z} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial(-\overline{u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{w'^2})}{\partial z} \quad (4.4)$$

Burada (4.1) denklemi süreklilik (kütle korunumu) denklemdir. Diğer (4.2-4.4) denklemleri ise, doğrultuda (x, y, z) momentumun korunumu denklemleridir.

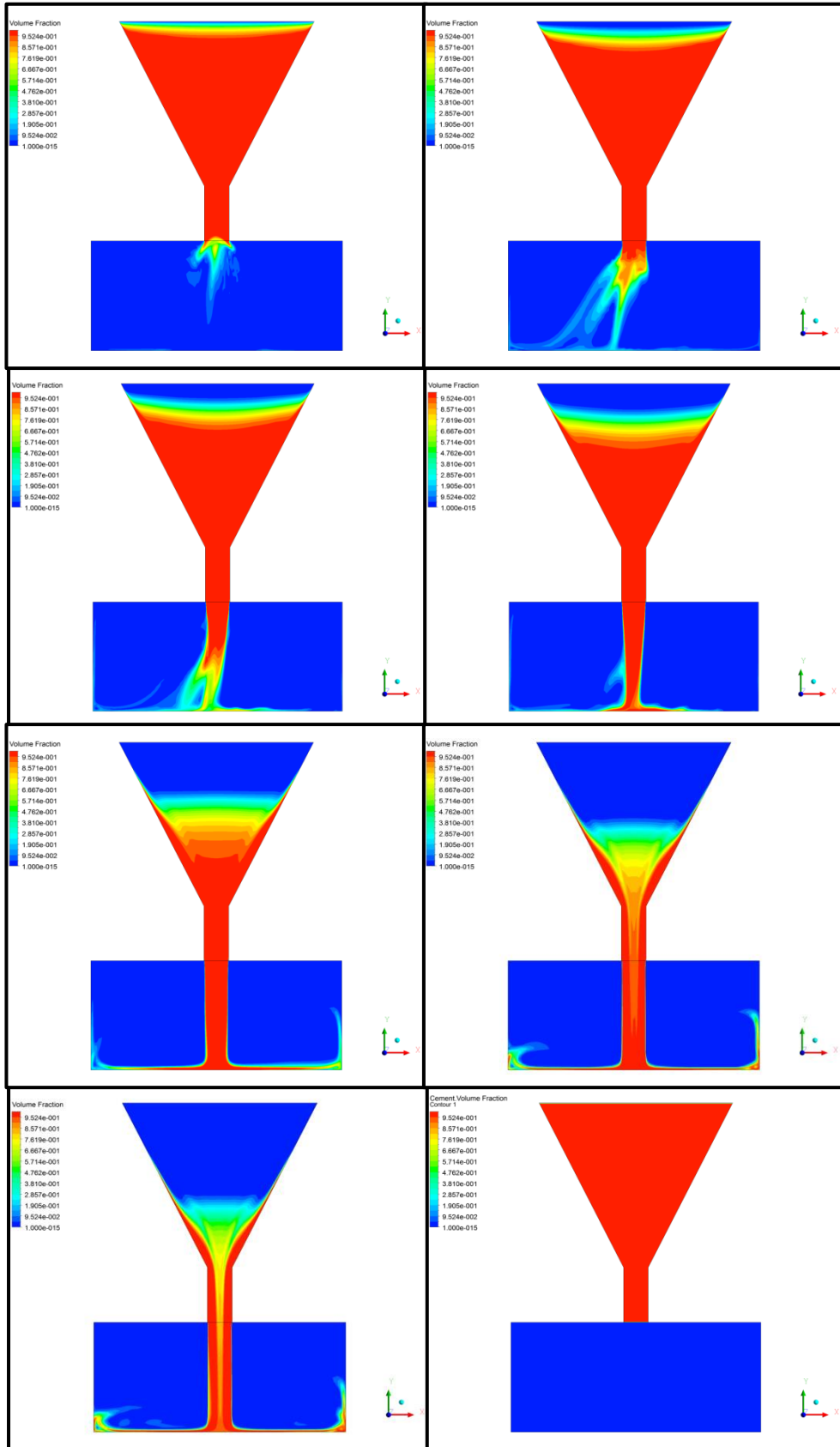
Yukarıda verilen RONS denklemlerinin (4.2-4.4) analitik ve gerçek çözümü günümüze kadar yapılamamıştır. Bu nedenle denklem sisteminin çözümü için sonlu farklar, sonlu elemanlar ya da sonlu hacimler gibi sayısal yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Sonlu farklar, sonlu elemanlar ya da sonlu hacimler gibi yöntemler lineer olmayan kısmi türevli diferansiyel denklemleri, günümüz hesaplayıcılarının hesaplayabileceği forma yani cebrik denklem formuna indirgemektedir. İndirgeme aşamasında hesaplama hassasiyetinin düşmemesi için zamanda ve uzayda ikinci mertebeden yakınsak sayısal yöntemler tercih edilmelidir. Özellikle serbest yüzey ve türbülans büyüklüklerinin ikinci mertebeden yakınsak çözümlerinin elde edilmesi için hesaplama ağının mümkün olduğunca sık seçilmesi gerekmekte, bu da hesaplama süresini arttırmaktadır.

HAD analizinin son aşamasında ise (post-processing) hesaplama sonuçları grafik, çizelge ya da animasyon olarak hazırlanmakta, hesaplama bölgesi içindeki fiziksel büyüklüklerin değişimi görselleştirilmektedir. Doğru ve yakınsak bir çözüm elde edebilmek için, tüm bu aşamaların herbir adımında HAD mühendisi tüm detayları dikkatlice irdelemelidir. Özellikle büyük ölçekli problemlerin çözümünde zamanda ve uzayda yakınsak çözümler edebilmek için HAD mühendisi hesaplama ağını ve sınır koşullarını çok dikkatli bir şekilde tanımlamalıdır.

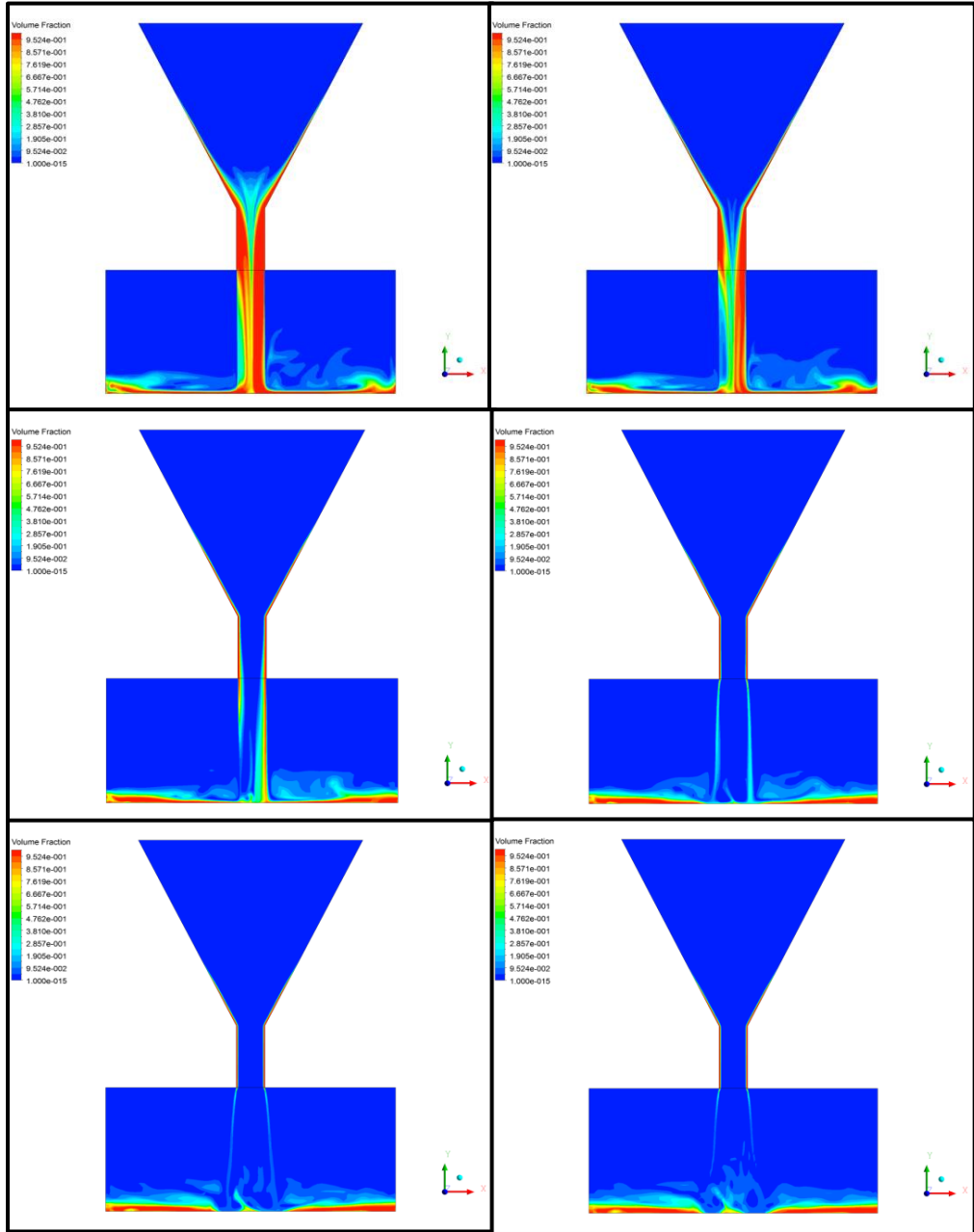
ANSYS programı kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar çalışmanın birinci aşamasında elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılarak akışkan modelinin ve sayısal çözümün doğruluğu ve hassasiyeti test edilmiştir. Böylece homojen akışkan kabulü ile KYB'ye ait HAD modeli oluşturulmuştur. Şekil (4.15-4.17)'de V-hunisi HAD modeli ve Şekil (4.18-4.22)'de L-kutusu HAD modeli görülmektedir.



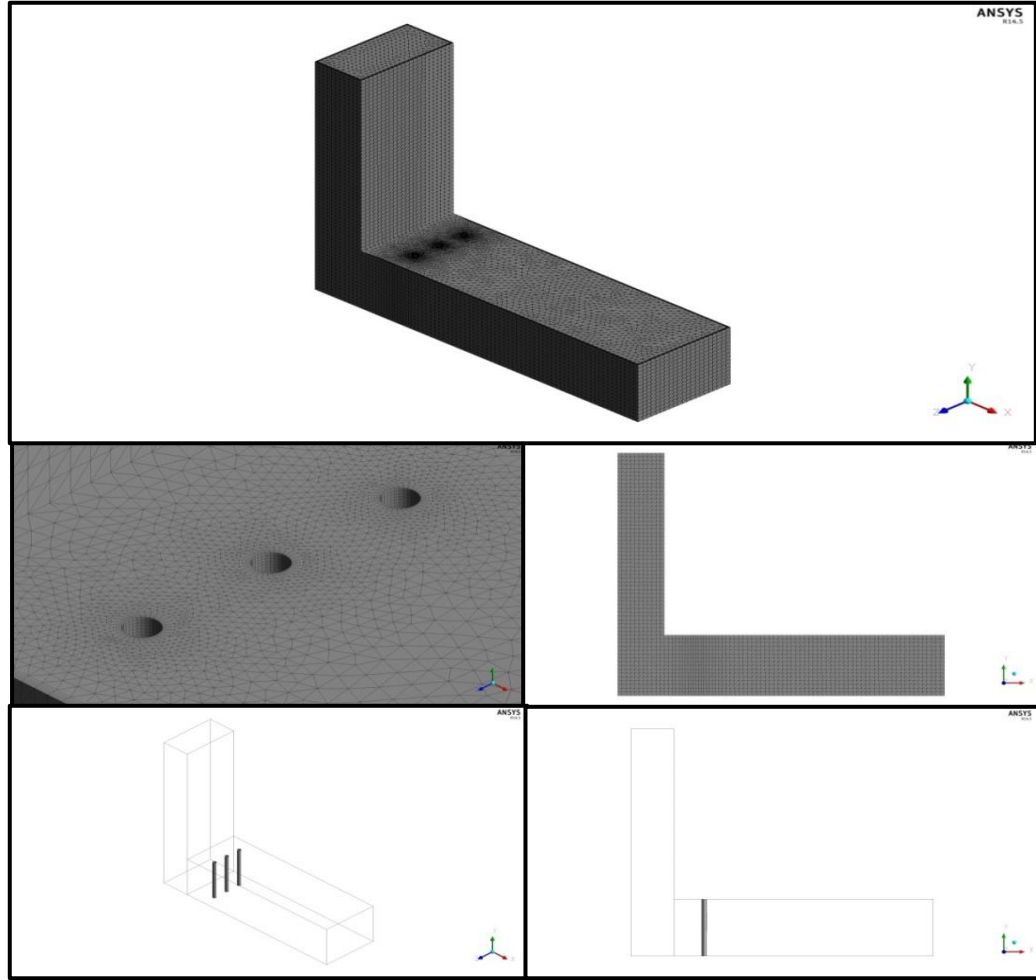
Şekil 4. 15. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



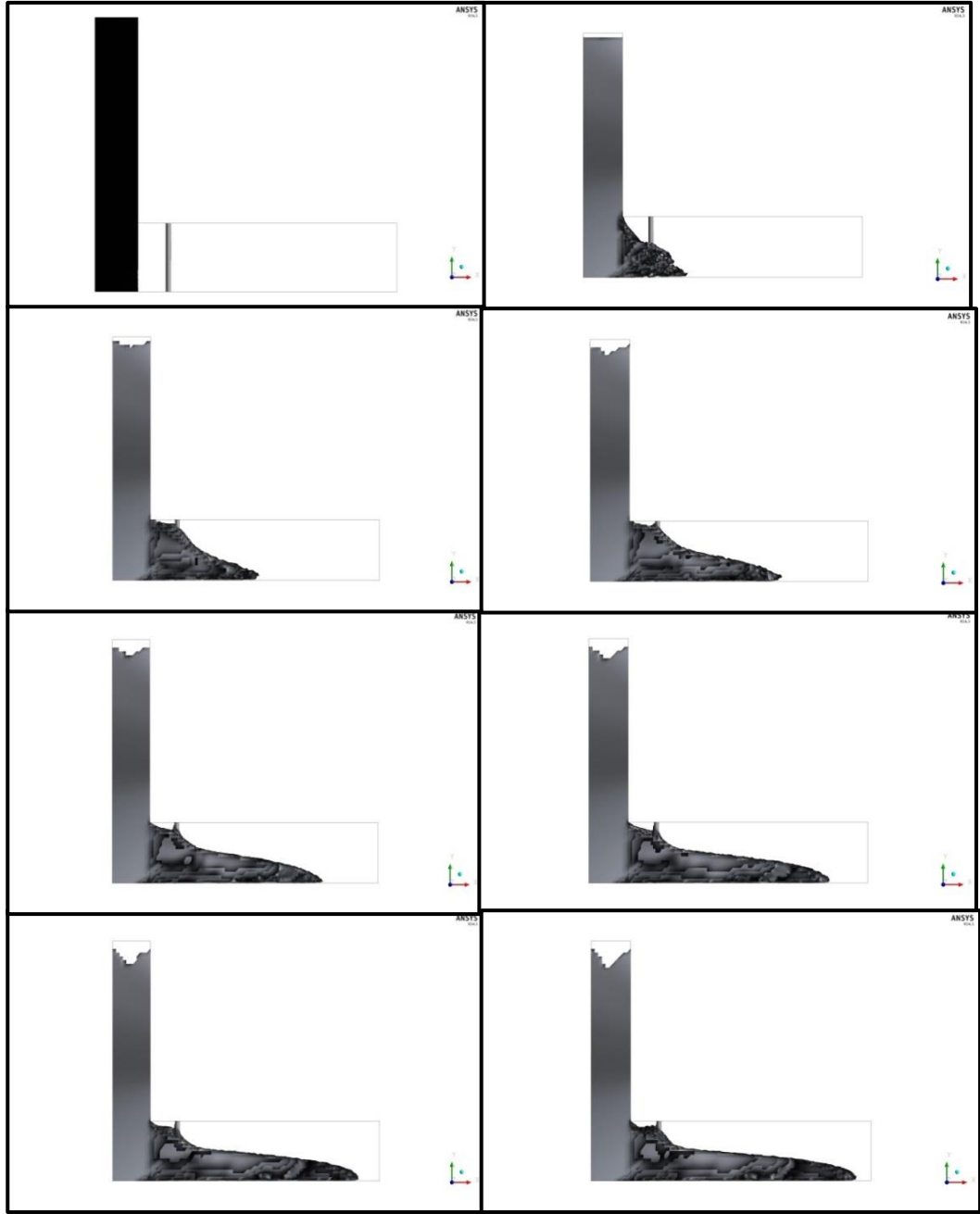
Şekil 4. 16. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



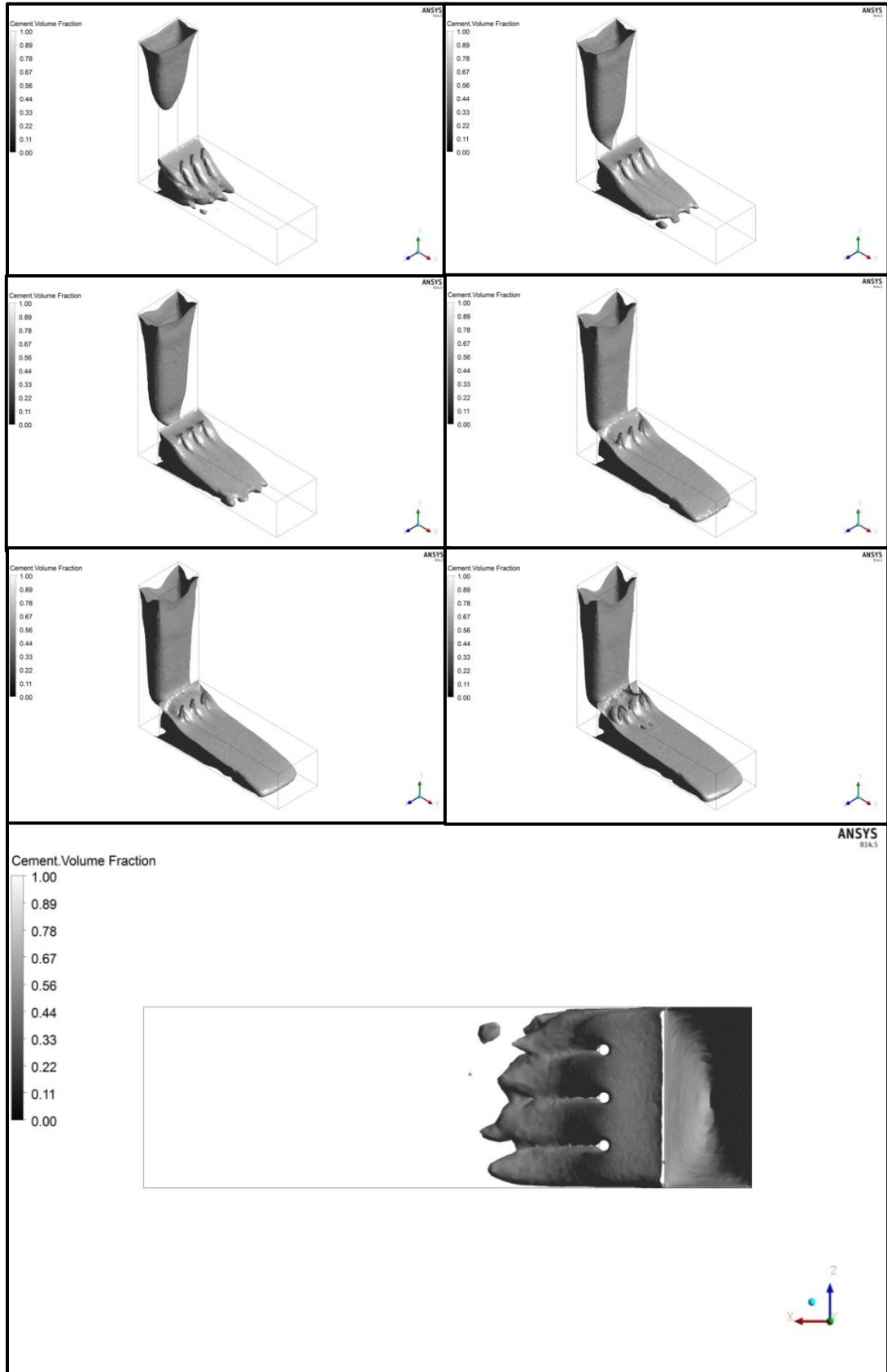
Şekil 4. 17. V-hunisi HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



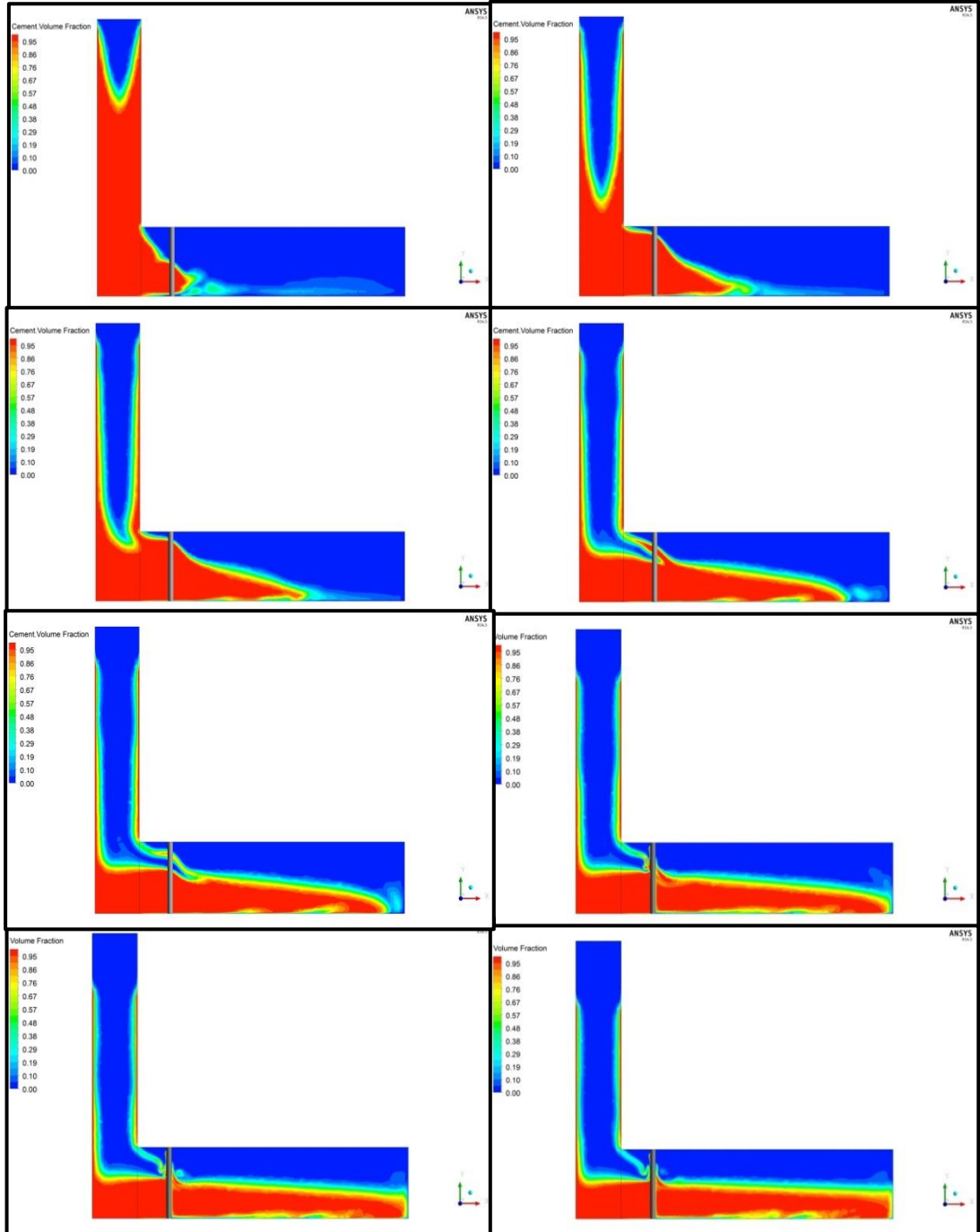
Şekil 4. 18. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



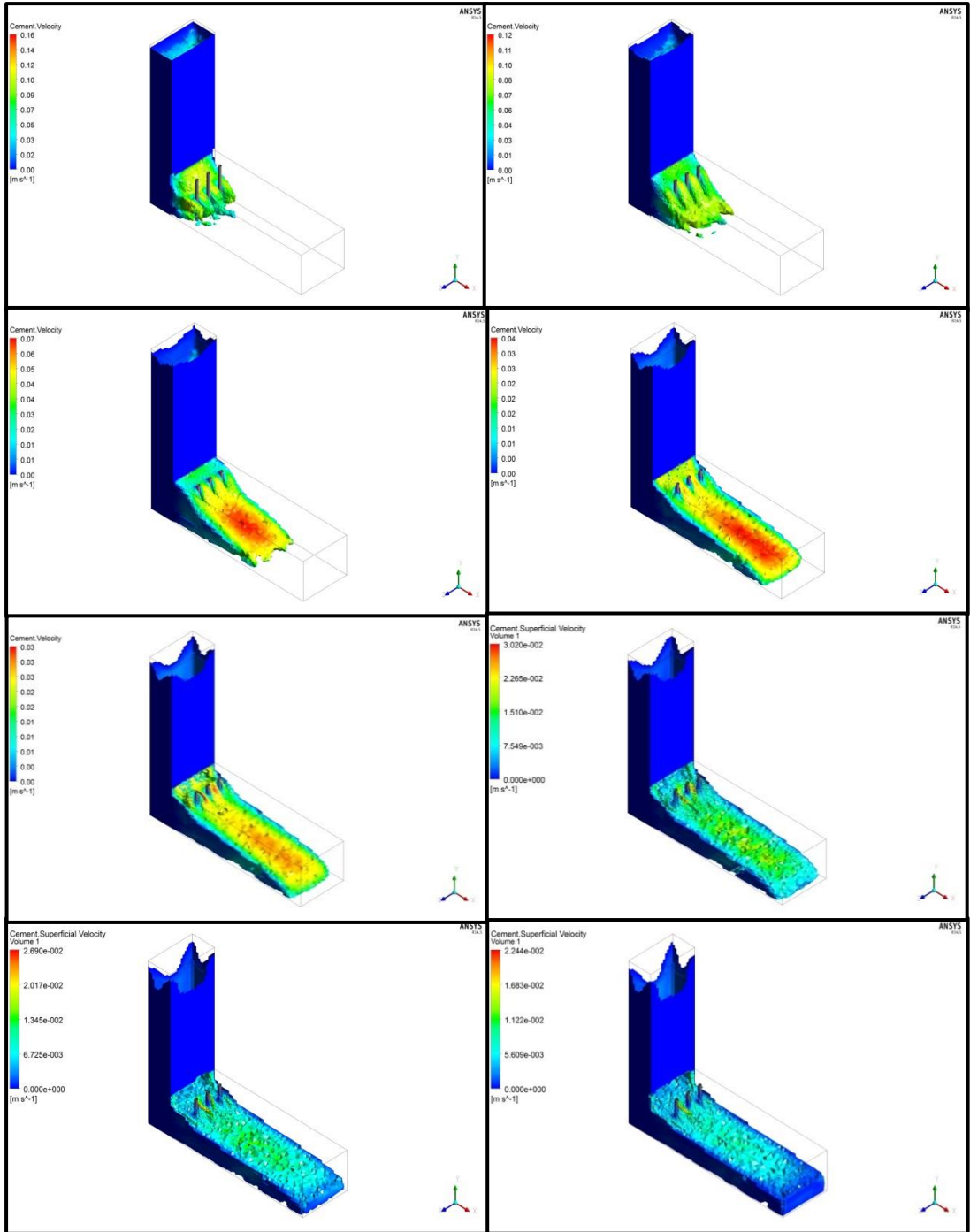
Şekil 4. 19. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



Şekil 4. 20. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



Şekil 4. 21. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).



Şekil 4. 22. L-Kutusu HAD modeli (Newtonian akışkan, zamana bağlı çözüm).

Oluşturulan modelde agrega etkilerinin daha etkin bir şekilde modele yansıtılabilmesi için parçacık taşınım modelinin bu amaçla kullanılabileceği düşünülmektedir. ANSYS programı parçacık taşınım modelinde, homojen akışkan içinde tanımlanan katı madde parçacıklarını (bu çalışmada agrega) Lagrange yaklaşımlarını kullanarak takip etmekte ve zamana bağlı olarak akıma ait büyüklükleri akışkan-katı madde etkileşimini dikkate alarak hesaplayabilmektedir. Böylece KYB akımının daha gerçekçi bir sayısal benzetimi sağlanabilecektir. Lagrange tipi parçacık modelleri, düşük katı yoğunluğu (%10) bulunan akışkan akımı problemleri için idealdir. Katının (agrega) daha yoğun olduğu problemlerde, katı-katı çarpışma etkileri de dahil olmak üzere problemin fiziğini yansıtan tüm faktörlerin modele dahil edilmesi mümkün olmakla birlikte, ortaya çıkacak olan hesaplama gücü ihtiyacı da aynı zamanda optimize edilebilir. Yani, yeterli hassasiyet, hesaplama gücünü dengelemek için göz önünde bulunacak ve çok daha hassas sonuca ihtiyaç olmayacak nokta, grid sıklığı ve modüller açısından belirlenerek gerçekçi çözümleme zamanları ile çalışabilir. Burada çözümleyicinin kullandığı algoritma, en genel hali ile bir ayrık katı parçacığın akışkan içinde hareketi ile ilgili olarak:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_P + F_{BA} \quad (4.5)$$

olarak ifade edilir. Burada:

m_p : parçacığın kütlesi

U_p : parçacığın hızı

F_D : parçacığa etkiyen sürüklenme (drag) kuvveti

F_B : parçacığa etkiyen kaldırma (bouyancy) kuvveti

F_R : dönmeden (rotation) kaynaklanan merkezkaç ve Coriolis kuvvetleri

F_{VM} : virtüel kütle (virtual mass) kuvveti (parçacığın hareketi sırasında etrafında ivmelendirdiği akışkana ait ek atalet kuvvetlerini temsilen)

F_P : basınç farkı kuvveti (burada basınç parçacık etrafındaki akışkanın basıncı olup, yoğunluğu akışkan yoğunluğundan fazla olan parçacıklar için eklenmesi gerekir)

F_{BA} : Basset kuvveti (akışkanın kararlılık durumundan ayrıldığı anlardaki durumlara özgü bir kuvvet) olarak tanımlanır.

Burada denklemin sağ tarafındaki herbir terim, parçacık hızına (UP) göre doğrusallaştırılarak ayrıklaştırılabilir. Önerilen çalışmada, denklem 5'in sağ tarafındaki terimlerden dominant olan etkiler öncelikli olarak, hesaplama süresi de optimize edilerek olayın fiziği mümkün olduğunca zm içine dahil edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin incelendiği bu tez çalışmasında yapılan deneysel ve modelleme çalışmaları sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Deneysel numunelerinin hazırlanmasında farklı tipte agrega kullanılmış ancak kil-silt oranının yüksek olduğu kırmataş agregalarıyla yapılan ön deneme karışımlarında istenen işlenebilirliğin elde edilmesi için s/b oranı ve katkı miktarının artırılmasına rağmen hedeflenen işlenebilirliklerin elde edilemediği görülmüştür.
- KYB karışımında kullanılan hiperakışkanlaştırıcının oranının artması ise KYB'nin maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle KYB karışımında kullanılacak agregaların (özellikle ince agregaların) temiz yani içerisinde bulunan kil-silt oranının az olması gerekmektedir.
- KYB'nin akış ve ayrışma direncinde kullanılan ince malzemenin beton kohezyonu üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Hazırlanan KYB karışımlarında çimento ve uçucu külden oluşan toz malzemenin 550 kg/m^3 olduğu karışımlarda en uygun KYB davranışının elde edildiği görülmüştür.
- Aynı bağlayıcı ve agrega oranına sahip olan K5 ve K8 karışımlarında s/b oranının 0,29'dan 0,40'a çıkmasıyla basınç dayanımının %13,5 azalırken, V-hunisi akış süresi artan su ve katkı oranına bağlı olarak 12 kat daha düşük sürede gerçekleştiği görülmüştür.
- KYB'nin geçiş yeteneğinin incelendiği L-kutusu ve J-halkası deney sonuçlarına göre K8 ve K10 karışımlarının V-hunisi deney sonuçlarına benzer şekilde en iyi akış davranışını gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonucun elde edilmesinde K8 ve K10 karışımlarında kullanılan iri agrega miktarının ağırlıkça %30 olarak seçilmesinin etkili olduğu düşünülmektedir.
- J-halkası yayılma deneyi sonucuna göre en akışkan KYB serisinin K10 karışımı olduğu belirlenmiştir. Bu deney sonucunda 755 mm'lik yayılma değeri veren K10 karışımı V-hunisi deneyinde de 6 sn'lik akış süresine sahiptir.
- Sertleşmiş KYB numuneleri üzerinde yapılan birim ağırlık deney sonuçlarının KYB'lerin birim ağırlık değerlerinin artmasıyla basınç dayanımı değerlerinin de yükseldiği belirlenmiştir. Bu durumda boşluksuz bir şekilde iyi yerleşen KYB'nin daha rijit bir iç yapı oluşturmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

- Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre KYB'nin basınç dayanımı üzerinde s/b oranı, kullanılan bağlayıcı miktarı ve karışımda kullanılan iri agrega miktarlarının etkili olduğu görülmüştür. Eşdeğer bağlayıcı ve agrega oranlarına sahip karışımlarda akış davranışının iyileşmesiyle basınç dayanımlarında bir miktar azalmanın olduğu görülmüştür. Bu konuda özellikle ayrışma riskinin ortaya çıkmasının etkili olduğu düşünülmektedir.
- Çalışmanın sonucunda doğruluğu ve hassasiyeti test edilen sayısal (HAD) model kullanılarak gerçek boyutlardaki geometrilerde KYB uygulamalarının sayısal benzetimi yapılmıştır. Bunun için şantiye ölçeğindeki giriş ve kolonları içindeki donatılar da dahil olmak üzere temsil eden L-kutusu deney düzeneği üç boyutlu olarak modellenmiştir. ANSYS CFX yazılımı ile geliştirilen HAD modeli kullanılarak bu geometriler için KYB benzetiminin yavaş çekim görüntülerinden elde edilen eş zamanlı akış davranışıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- Oluşturulan modelde agrega etkilerinin daha etkin bir şekilde modele yansıtılabilmesi için parçacık taşınım modelinin bu amaçla kullanılabileceği düşünülmektedir. Böylece KYB akımının daha gerçekçi bir sayısal benzetimi sağlanabilecektir. Sayısal benzetim yönteminde daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için daha ileride yapılacak çalışmalarda parçacık taşınım modelinin daha detaylı olarak oluşturulması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aggarwal, P., Siddique, R., Aggarwal, Y. and Gupta, S.M., “Self Compacting Concrete- Procedure for Mix Design”, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 12: 15-24 (2008).
- Baradan, B., Felekoğlu, B., “Kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özellikleri”, *THBB Dergisi*, (222), Haziran, İzmir (2004).
- Brower, L., Ozyildirim C. And Daczko J., “*Workability of Self-Compacting Concrete*”, *Reprinted from The Economical Solution for Durable Bridges and Transportation Structures, International Symposium on High Performance Concrete. Proceedings. PCI/FHWA/FIB.*, Orlando, Florida, 398-407(2000).
- Bulut, S. ve Ünveren, M., “Klima santrali test prosedürü”, *HSK Ar-Ge Teknik Bülten*, 6: (2011).
- Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R. And Torresan, I., “Zero energy system: An innovative approach for rationalized precast concrete production”, *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, Istanbul, Turkey, (2002).
- Colleparidi, M., “A very close precursor of self-compacting concrete (SCC)”, *Unpublished data*,(10): (2001).
- Denh, F., “High performance self compacting concretes for bridge construction”, *First North American Conference on The Design and Use of Self Consolidating Concrete*, Chicago, USA, (433-48): (2002).
- Deeb, R., Kulasegaram, S. and Karihaloo, B.L., “3D modelling of the flow of self-compacting concrete with or without steel fibres. Part I: slump flow test, Part II: L-box test and the assessment of fibre reorientation during the flow”, *Springer International Publishing* Switzerland, 1 (4): 391-408 (2014).
- EFNARC, “Specifications and guidelines for self compacting concrete”, (2005).
- EFNARC, “Specifications and guidelines for self compacting concrete”, (2002).
- Felekoğlu, B., “Kendiliğinden Yerleşen Beton Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları”, *İMO İzmir Şubesi Haber Bülteni*, İzmir, 120: 1-10(2004).
- Georgiadis, A.S., Fytanidis, D.K. and Anagnostopoulos, N.S., “Simulating Self-Compacting Concrete Fluidity Tests Using Computational Fluid Dynamics Techniques: Approaches and Challenges”, *In proceeding of: 4th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering (4th IC-SCCE)*, Athens, Greece, 1-8 (2010).

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Gram, A. and Silfwerbrand, J., “Numerical simulation of fresh SCC flow: applications”, *Materials and Structures*, Stockholm, Sweden, 44(4):805-813(2011).
- Gram, A., “Numerical Modelling of Self-Compacting Concrete Flow - Discrete and Continuous Approach”, “Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering Division of Structural Design and Bridges, TRITA-BKN. Bulletin 99, Stockholm, Sweden, (99):1103-4270(2009).
- Gürdal, H. ve Yüceer, Z., “Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamalar”, *Beton 2004 Kongre Bildiri*, İstanbul, 1-10(2004).
- Holt, E. and Levio, M., “Cracking risks associated with early age shrinkage”, *Cement and Concrete Composites*, 26 (5):521-530(2004).
- Kulasegaram, S., Karihaloo, B. L. and Ghanbari A., “Modelling the flow of self-compacting concrete”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 35:713-723(2011).
- Neville, A.M., “Properties of Concrete, Fourth Edition”, *Longman Scientific and Technical*, New York / USA, (2000).
- Okamura, H., Ouchi M., “Self-Compacting Concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, 1(1): 5-15, (2003).
- Okamura, H., “Self-compacting high-performance concrete”, *Concrete International*, Tokyo, Japan, 1(4): 378-383(1997).
- Ouchi, M., “Self-compacting concrete – Development, applications and investigations”, *Nordic Concrete Research Committee Publications*, Kochi University, Japan (5):1-5(1999).
- Özkul, M.H., “ Kendiliğinden Yerleşen Betonlar ”, *THBB Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul*, 1-20(2013).
- Qi, B.H., Fu, Z.J., Yan, S. and Liu, F.X., “Numerical Simulation on Concrete Pouring Process of Self-Compacting Concrete-Filled Steel Tube”, *15 WCEE*, Lisboa, 1-8(2012).
- Sağlam, A.R. ve Özkul, M.H., “Kendiliğinden yerleşen betonların reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi”, *İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İTÜ dergisi / d mühendislik*, 5(1b): 239-250(2006).

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, Ü. A. Ve Özkul, M.H., “Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu”, *Hazır Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 1-12(2004).
- Sarıdemir, H., “Mineral ve süper akışkanlaştırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik ve basınç dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2006).
- Skarendahl, A., PETERSSON, O., “Self compacting concrete”, *State-of-the-art Report of RILEM Technical Committee 174 – SCC, RILEM Publications*, Chachan, Cedex, France, 17-22 (2000).
- Sonebi, M., “Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modeling using factorial experimental plans”, *Cement and Concrete Research*, Scotland, UK, 34:1199-1208(2004).
- SU, N., HSU, K.C. and CHAI, H.W., “A simple mix design method for self compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, Taiwan, 31:1799-1800 (2001).
- Svec, O., Skocek J., Stang H., Olesen, J. F. and Thrane L. N., “Application of the fluid Dynamics model to the field of fibre reinforced self-compacting concrete”, *Numerical Modeling SSCS, Aix en Provence*, France, 1-9(2012).
- Tohumcu, İ. ve Bingöl, A.F., “Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2): 31-44 (2013).
- Topçu, İ.B. ve Boğa, A.R., “Betonarmede Donatı ve Beton Arasındaki Aderansa Korozyonun Etkisi” *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi* XXI(1):1-16(2008).
- TOPÇU, İ.B., “Beton Teknolojisi”, Eskişehir, 366-370(2006).
- TS EN 12350-9 “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 9: Kendiliğinden Yerleşen Beton-Çökme-V Hunisi Deneyi” Türk Standartları Enstitüsü, (2011).
- TS EN 12350-10 “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 10: Kendiliğinden Yerleşen Beton-L Kutusu Deneyi” Türk Standartları Enstitüsü, (2011).
- TS EN 12350-12 “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 12: Kendiliğinden Yerleşen Beton-J Halkası Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, (2011).
- TS EN 12390-1 “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm1:Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri”, Türk Standartları Enstitüsü, (2013).

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- TS EN 12390-3 “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleleri-Bölüm3:Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, (2010).
- Vachon, M. and Daczko, J., “U.S. Regulatory work on SCC”, *First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete*, Chicago, Illinois,423-428(2002).
- Zeng, S., Shi, J., and Guo, W., “Back Analysis of Self-Compacting Concrete Rheological Parameters Based on H-B Model”, *International Conference on Architectural, Civil Engineering*, Guangzhou, China, 183-188 (2015).