

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATKILI BETONUN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE TERLEME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Tolga ZEYBEK

**Danışman
Doç. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Tolga ZEYBEK]

TEZ ONAYI

Tolga ZEYBEK tarafından hazırlanan "**Katkılı Betonun Relojik Özellikleri ve Terleme Davranışının İncelenmesi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Kemal T. YÜCEL
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Aynur KAZAZ
Akdeniz Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Zeki AY
Süleyman Demirel Üniversitesi

Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Tolga ZEYBEK



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Taze Betonun İşlenebilirlik Tanımları	3
2.2. Taze Betonun İşlenebilirlik Deneyleri	9
2.2.1. Deneylerin I. gruplandırılması.....	10
2.2.2. Deneylerin II. gruplandırılması	10
2.2.2.1. Akışı sınırlandıran deneyler.....	11
2.2.2.2. Serbest akışlı deneyler	11
2.2.2.3. Vibrasyon deneyleri.....	11
2.2.2.4. Dönel reometreler	12
2.2.2.5. Tek faktör deneyleri.....	12
2.2.3. İki faktör deneyleri	15
2.3. Taze Betonun Reolojisi	19
2.3.1. Taze betonun işlenebilirliğinde akışkan ve süspansiyon reolojisi.....	21
2.3.1.1. Bünye denklemleri	21
2.3.1.2. Viskozite	23
2.3.1.3. Akışkan ve süspansiyon.....	30
2.4. Taze Betonun İşlenebilirliğine Katkıların Etkileri	41
2.4.1. Kimyasal katkılar.....	43
2.4.2. Mineral katkı maddeleri	45
2.4.2.1. Uçucu küller.....	46
2.4.2.2. Silis dumanı	49
2.5. Önceki Çalışmalar	52
3. MATERYAL VE METOT	60
3.1. Materyal	60
3.1.1. Agregalar	60
3.1.1.1. Çakıl I ve II.....	60
3.1.1.2. Kırmataş.....	60
3.1.2. Çimento	61
3.1.3. Kimyasal katkı.....	61
3.1.4. Uçucu küller	62
3.1.5. Silis dumanı	63
3.1.6. Fiber katkı.....	64
3.2. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar.....	64
3.2.1. Tartılar	64
3.2.2. Sıcaklık, nem ve zaman ölçüm cihazları	64

3.2.3. Basınç altında terleme deney aleti	65
3.3. Metot	66
3.3.1. Beton karışımlarının saptanması	66
3.3.2. Yapılan deneyler	68
3.3.2.1. Çökme (slump) deneyi	68
3.3.2.2. Çökme yayılması deneyi	69
3.3.2.3. Birim ağırlık deneyi	69
3.3.2.4. J ring deneyi	69
3.3.2.5. Terleme deneyi	71
3.3.2.6. Basınç altında terleme deneyi	72
3.3.2.7. Basınç dayanımı deneyi	73
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME	74
4.1. Çökme, Yayılma, Birim Ağırlık ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	74
4.1.1. J ring deneyi sonuçları	75
4.2. Terleme Deneylerinin Sonuçları	76
4.3. Basınç Altında Terleme Deneyinin Sonuçları	80
4.4. Weka Analizleri	86
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	90
KAYNAKLAR	92
EKLER	99
EK A. Taze Beton Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	100
ÖZGEÇMİŞ	113

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATKILI BETONUN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE TERLEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tolga ZEYBEK

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

Betonun prizini tamamlamadan önceki işlenebilirliği, priz alma sürecini ve priz aldıktan sonrasında ki kazanacağı özellikleri doğrudan etkilemektedir. Betonun prizini almadan önceki özellikleri, karıştırma sürecine ve betonu oluşturan bileşenlere bağlı olduğu için, bunlar denetlenerek istenilen sertleşmiş beton özellikleri denetim altına alınabilir. İstenilen kalitede bir agregaların tamamının harçla kaplanmış olması gerekmektedir. Kaliteli bir betonda beklenen üç ana özellik; işlenebilme, dayanım ve dayanıklılıktır. Bu özelliklerden işlenebilme taze betonlar için, dayanım ve dayanıklılık sertleşmiş betonlar için geçerlidir. Taze harcın ve betonun reolojik sabitleri; kayma eşiği ve plastik viskozite akış bilimi olarak tanımlayabilen Reoloji bilimi ile açıklanır. Taze betonun yerine yerleştirilmesinden kısa bir süre sonra, birim hacim ağırlığı daha fazla olan parçacıkların yerçekimi etkisiyle dibe doğru ve suyun yukarı doğru çıkma eğilimi bulunmaktadır. Taze betonun üst yüzeyine kadar erişebilen bir miktar su, bazen çok sığ bir su birikintisi yaratıp buharlaşmakta, bazen de doğrudan doğruya buharlaşarak kaybolmaktadır. Beton üst yüzeyine erişemeyen bir miktar su da yüzeye yakın bir bölgede toplanmakta bu bölgenin su/çimento oranı yüksek, dolayısıyla zayıf bir beton olmasına yol açmaktadır. Betonlarda terleme olayının göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bu çalışmada taze betonun reolojik özellikleri ve normal ve basınç altındaki terleme davranışının belirlenmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Üretilen betonlara farklı doz betonlarda; silis dumanı, uçucu kül, kimyasal ve mineral katkıları kullanılarak beton özelliklerine etkileri incelenmiştir. Segregasyon basınçlarının belirlenmesi için de basınç altında terleme deney aleti geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Taze Beton, Mineral Katkı, Çökme, J Ring, K-Çökme, İşlenebilirlik, Reoloji, Segregasyon Basıncı, Terleme Davranışı

2019, Sayfa 113

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

REOLOGICAL PROPERTIES OF ADDITIVE CONCRETE AND INVESTIGATION OF PERSPIRATION BEHAVIOR

Tolga ZEYBEK

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

The workability of the concrete before completing the setting has a direct effect on the setting process and the properties that will be gained after setting. Since the properties of the concrete before setting out depend on the mixing process and the constituents of the concrete, they can be controlled and the desired hardened concrete properties can be controlled. All aggregates of the desired quality must be covered with mortar. Three main features expected in a quality concrete; machinability, strength and durability. These properties apply to fresh concrete, strength and durability for hardened concrete. Rheological constants of fresh mortar and concrete; shear threshold and plastic viscosity can be defined as flow science. Shortly after the replacement of the fresh concrete, the particles with a higher unit volume weight tend to rise to the bottom and water upwards by gravity. Some water, which reaches up to the surface of the fresh concrete, sometimes evaporates, creating a very shallow puddle, and sometimes evaporates directly. Some water that cannot reach the upper surface of the concrete is collected in a region close to the surface, which leads to a high water / cement ratio and thus a weak concrete. Perspiration in concrete should not be ignored. In this study, various experimental studies have been carried out to determine the rheological properties of fresh concrete and the perspiration behavior under normal and pressure conditions. Different doses of concrete produced; silica fume, fly ash, chemical and mineral admixtures were investigated. In order to determine the segregation pressures, a pressure perspiration test device was developed.

Keywords: Fresh Concrete, Mineral Additives, Slump, J Ring, K-Slump, Workability, Reology, Segregation Pressure, Perspiration Behavior

2019, Pages 113

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL'e teşekkürlerimi sunarım.

3232-YL2-12 Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin yazım ve tüm aşamalarında yanımda olan MAKÜ İİBF Dekan Yardımcısı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Uğur ÇİÇEK'e teşekkür ederim.

Tezimin üretim aşamasındaki desteklerinden dolayı firmam Metro Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.'ye teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tolga ZEYBEK
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Beton özelliklerini etkileyen faktörler.	4
Şekil 2.2. İşlenebilirliği oluşturan elemanlar	7
Şekil 2.3. Tek parametrelili taze beton deneyleri arasındaki ilişki	13
Şekil 2.4. Viskozimetrelerin çalışma prensibi	16
Şekil 2.5. Newtoniyen akışkan için açılal hız ile tork arasındaki lineer ilişki.....	17
Şekil 2.6. A alanı üzerine etkileyen F kayma kuvveti ve kayma deformasyonu	22
Şekil 2.7. İdeal Elastik Katılarda G Kayma Modülü	22
Şekil 2.8. İki düzlem arasındaki sürtünme kuvveti ve Newton'un viskoz akış denklemleri	24
Şekil 2.9. Newton sıvısı	25
Şekil 2.10. Newtoniyen akışkanda viskozitenin belirlenmesi.....	26
Şekil 2.11. Reolojik davranışın tipleri	27
Şekil 2.12. Viskozite (η) – kayma şekil değıştirme oranı ($\dot{\gamma}$) ilişkisi	27
Şekil 2.13. Zamana bağılı Non-Newtoniyen akışta tiksotropi için η -t ilişkisi.....	28
Şekil 2.14. Zamana bağılı Non-Newtoniyen akışta reopeksi için η -t ilişkisi.....	29
Şekil 2.15. Zamana bağılı Non-Newtoniyen malzemeler (a,b) için akış eğrileri.....	29
Şekil 2.16. Süspansiyonun mikroyapısı	31
Şekil 2.17. Beton reolojisi kavramı.....	35
Şekil 2.18. Taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham sıvısı.	36
Şekil 2.19. Beton bileşenleri ve bağlayıcı maddelerin g ve h üzerindeki etkileri.....	52
Şekil 3.1. Çalışmalarda kullanılan tartılar.....	64
Şekil 3.2. Ölçü aletleri.....	65
Şekil 3.3. Basınç Altında Terleme Deney Aleti.....	66
Şekil 3.4. Beton kodlaması	67
Şekil 3.5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı	68
Şekil 3.6. J Ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları (EFNARC, 2002).	71
Şekil 3.7. Terleme Deneyi.....	72
Şekil 3.8. Basınç Altında Terleme Deneyi.....	73
Şekil 3.9. Basınç Dayanımı Deneyi	73
Şekil 4.1. Jring Deney Sonuçları.....	75
Şekil 4.2 Jring Deney Sonuçları.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli toplulukların işlenebilirlik tanımlamaları	5
Çizelge 2.2. BS 1881'e göre betonun işlenebilirliğine göre uygulanan taze beton deney metotları	13
Çizelge 2.3. Tek noktalı deneyler ve geçerli oldukları kıvam aralıkları	14
Çizelge 2.4. Ritchie'nin bazı standart testlerden elde ettiği deney sonuçları.....	14
Çizelge 2.5. Süspansiyon konsantrasyonu için viskozite ile ilgili denklemler	33
Çizelge 2.6. Kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili denklemler	38
Çizelge 2.7. Akışkan yüksek performanslı beton elde etmenin iki yolu.....	50
Çizelge 2.8. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkileri	51
Çizelge 3.1. Agregaların bazı fiziksel özellikleri.....	60
Çizelge 3.2. ASTM'e göre agrega granülometrilere.....	61
Çizelge 3.3. TS'ye göre agrega granülometrilere.....	61
Çizelge 3.4. Çimentoların kimyasal özellikleri.....	61
Çizelge 3.5. Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri.....	61
Çizelge 3.6. Kimyasal katkının özellikleri.....	62
Çizelge 3.7. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve özgül ağırlıkları.....	62
Çizelge 3.8. Silis dumanının kimyasal özellikleri.....	64
Çizelge 3.9. 1000 dm ³ 'teki malzeme miktarı	67
Çizelge 4.1. Betonların çökme, çökme yayılması, birim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri	74
Çizelge 4.2. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	76
Çizelge 4.3. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği	76
Çizelge 4.4. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği	76
Çizelge 4.5. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	76
Çizelge 4.6. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM II iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği	77
Çizelge 4.7. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM II iri agregası çakıl kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	77
Çizelge 4.8. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM II iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği	77
Çizelge 4.9. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEM II iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği	77
Çizelge 4.10. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	78
Çizelge 4.11. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	78
Çizelge 4.12. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	78
Çizelge 4.13. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEM I iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	78

Çizelge 4.14. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	79
Çizelge 4.15. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği....	79
Çizelge 4.16. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	79
Çizelge 4.17. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği.....	79
Çizelge 4.18. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	80
Çizelge 4.19. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	80
Çizelge 4.20. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	81
Çizelge 4.21. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	81
Çizelge 4.22. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	81
Çizelge 4.23. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	82
Çizelge 4.24. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	82
Çizelge 4.25. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	82
Çizelge 4.26. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	83
Çizelge 4.27. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	83
Çizelge 4.28. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	83
Çizelge 4.29. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	84
Çizelge 4.30. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	84

Çizelge 4.31. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	84
Çizelge 4.32. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	85
Çizelge 4.33. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları.....	85
Çizelge 4.34. Weka Analizleri	86
Çizelge 4.35. Weka Analizleri	87
Çizelge 4.36. Weka Analizleri	88
Çizelge 4.37. Weka Analizleri	89



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BM	Bingham model
g	Akma eşiği ölçütü
h	Plastik viskozite ölçütü
h ₁	J Ring Deneyi Halka İç Yüksekliği
h ₂	J Ring Deneyi Halka Dış Yüksekliği
HB	Herschel-Bulkley Model
k	K Çökme Deneyi İlk Yükseklik
KE	Kayma Eşiği
KYB	Kendiliğinden yerleşen betonlar
PÇ	Portland Çimentosu
PV	Plastik Viskozite
S/B (veya SB)	Su/Bağlayıcı
S/Ç	Su/Çimento
SB	Segregasyon Basıncı
Sd	Silis Dumanı
SNF	Naftelen Sülfonat Formaldehit
SP (veya SA)	Süper Plastikleştirici (veya Süperakışkanlaştırıcı)
T	Terleme
UK	Uçucu Kül
VAK	Viskozite Azaltıcı Katkı
YPB	Yüksek Performanslı Beton
YOSA	Yüksek Oranda Su Azaltıcı
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
w	K Çökme Deneyi Son Yükseklik
η	Viskozite (sıvının dinamik viskozitesini)
η _{pl} (veya PV)	Plastik Viskozite
τ	Kayma Gerilmesi
τ ₀ (veya KE)	Kayma Eşiği
v	Kinematik Viskozite

1. GİRİŞ

Beton geri dönüşümsüz bir malzemedir. Bu nedenle beton taze haldeyken her türlü müdahale ve denetim sağlanmalıdır. Bu şekilde betonların statik projelerde ifade edilen mekanik dayanım özellikleri elde edilebilir. Bu nedenle betonların taze haldeki özellikleri ve işlenebilirlik değerleri belirlenmesi önemlidir.

Taze haldeki betonun minimum enerji kullanılarak, en uygun işlenebilirlik değerine ulaşması ve homojenliğini yitirmeden, kalıbını boşluksuz doldurabilmesi işlenebilir betonların üretilmesi ile mümkün olabilir. Günümüzde taze betonun kıvamı saha ve laboratuvarlarda kullanılan tek nokta deneyler(çökme, k-çökme, yayılma, ve-be) ile ölçülmektedir. Fakat bu standart deney yöntemleri taze betonun işlenebilirliğini ifade etmekte yetersiz kalmaktadırlar. Artık günümüzde ileri düzeyli taze beton özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, taze betonun işlenebilirlik ifadesi, taze betonun reolojik sabitlerinin incelenmesiyle ifade edilmektedir.

Ayrıca, işlenebilir betonlar farklı çevre koşullarında dökülebilmektedir ve bunun olumsuz etkileri olabilir. Örneğin aşırı sıcak, kuru ve rüzgarlı havalarda betonun sahaya iletilmesi ve yerleştirilmesi esnasında, betonda hızlı priz almasından kaynaklı buharlaşma olup istenilenden fazla su kaybı meydana gelebilir. Bu su kaybından dolayı priz hızlanması, hava boşlukları, çökme kaybı ve yüzeysel rötre çatlakları oluşabilir. Buda betonun kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle çevre koşulları dikkate alındığında taze betonlar üzerinde yapılan kıvam deneyleri (çökme, k çökme, yayılma, ve-be) işlenebilirliğin tanımlanmasında yeterli olamayacağı açıktır.

Yapılmış araştırmalarda taze betonun akış özellikleri için plastik viskozitenin ve akma gerilmesinin varlığı, tanımlamaların bu iki özelliği kapsamaması gerektiği ve betonların işlenebilirliğini ifade etmede reolojik malzeme sabitleri (τ : kayma eşiği ve η : plastik viskozite değerleri) ile açıklamanın daha doğru bir yaklaşım olduğu konusunda genel bir uzlaşma vardır.

Taze betonun reolojik özellikleri ve taze beton deneyleri hakkında pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların birbirleri ile mukayese edilip net bir sonuç çıkarılabilmesi kolay değildir. Çünkü araştırmalarda birçok farklı malzemeler ve metotlar kullanılmaktadır. Her çalışma, kendi içinde sınırlı parametreleri incelemiştir. Sahada beton çok farklı çevre koşullarında dökülmesine rağmen uygulanan taze beton deneylerinde sıcaklık etkisi dikkate alınmamaktadır.

Bu çalışmada, CEM I 42,5 R ve CEM II 42,5 A-M R tip çimento kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,35-0,45 değerleri arasında seçilerek, çimento dozajları 300-400 kg/m³ arasında kullanılmış ve akışkan betonlar üretilmiştir. Kimyasal katkı olarak yeni nesil akışkanlaştırıcı, mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Taze beton deneyleri (çökme, k çökme, yayılma, j ring, birim hacim ağırlık), reolojik parametreleri (τ : kayma eşiği ve η : plastik viskozite değerleri) belirleme ve terleme deneyleri saha koşullarına uygun şekilde yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda taze beton deneyleri sonuçları ile reolojik parametreler arasındaki ilişki araştırılmıştır.

İkinci bölümde, konu ile ilgili deneyler ve tanımlar açıklanmış ve daha önce yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, deneylerde kullanılan cihazlar ve bu cihazların deneylere hazırlanması, kullanılan malzemeler, bu malzemeler üzerine yapılan ön deneyler ile belirlenen deney yönteminin aşamaları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde araştırmadan elde edilen bulgular ve sonuçların analizi verilmiştir.

Beşinci bölümde ise, elde edilen verilere göre çıkarılan sonuçlar tartışılmış ve öneriler yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Taze Betonun İşlenebilirlik Tanımları

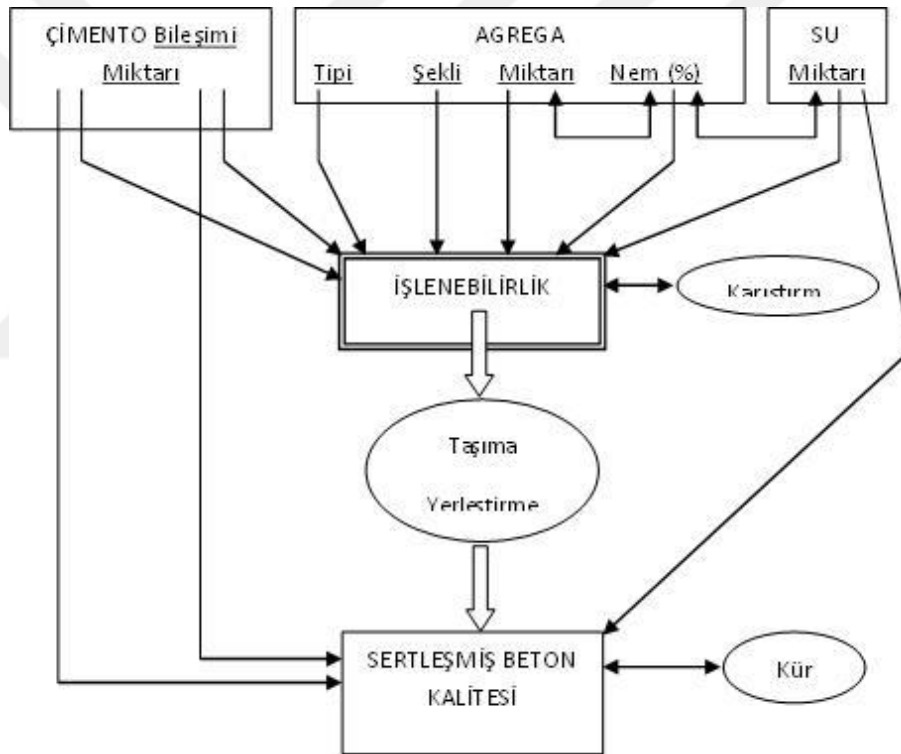
Beton, ana kimyasal olan çimento, agrega, su ve eğer gerek duyulursa katkı maddelerinin (kimyasal, mineral, fiber vb.) belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, ilk etapta istenilen şekilde işlenebilen, belirli süre geçtikten sonra çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonun gelişmesiyle (hidratasyon) sertleşip mukavemet kazanan, harç fazı ve agregadan oluşan bir taşıyıcı yapı malzemesidir. Betonun su ile karıştırıldığı andan itibaren plastikliğini koruduğu süreye (tamamen priz öncesi süre veya prize başladığı ana kadar geçen süre) “Taze Beton”, prizden sonra ise “Sertleşmiş Beton” olarak tanımlanır. Betonun taze haldeyken plastik bir kıvama sahip olması, betona istenilen herhangi bir şeklin verilmesini sağlar. Diğer bir deyişle, taze beton sertleştiğinde içine konulduğu kalıbın şeklini almış olur. (Erdoğan, 2003; Özkul vd., 1999).

İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Betonlardan, en genel anlamda beklenen üç ana nitelik; işlenebilme, dayanım ve dayanıklılıktır (durabilite). Bu özelliklerden dayanım ve dayanıklılık sertleşmiş beton için işlenebilme ise taze beton için geçerlidir (Akman, 1987; Özkul vd., 1999; Sağlam ve Mutlu, 2001).

Taze betonun özellikleri, başta dayanım ve dayanıklılık olmak üzere, sertleşmiş betonun tüm özelliklerini ve ekonomikliğini etkilemektedir. İşlenebilme taze betonun en önemli özeliğidir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan beton, yeterli dayanım ve dayanıklılık gösteremez. Kompositesi ve dayanımı yüksek olacak şekilde hazırlanmış taze beton, karıştırıldıktan sonra kalıba kadar taşınır. Kalıbın içine dökülen beton, vibratör ve benzeri aletler kullanılarak sıkıştırılır. Bu işlemler sırasında beton homojenliğini, kompositesini ve dolayısıyla dayanımını kaybetmemesi istenir. Ayrıca kalıplara, kolaylıkla yerleştirilerek en az boşluk bırakacak şekilde sıkıştırılması gerekir. Bu nedenle taze beton yeterli işlenebilmeye sahip olmalıdır, yani üniform, kolayca karıştırılabilir, taşınabilir (veya iletilebilir), yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltilebilir olmalıdır. Taze betonun segregasyon göstermeden sahip olduğu

bu özelliklerin tümü “işlenebilme” olarak adlandırılır. Ayrıca, yerine yerleştirilen taze betonda mümkün olabildiği kadar az terleme (su salma) olmalı ve priz (sertleşme) süresi kullanım amacına uygun olmalıdır. İşlenebilme özeliği betonun yapısından kaynaklanan; taze beton kütleğinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun gösterdiği direnç (kayma dayanımı, kohezyon) ile yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık özellikleri ile ilgilidir (Erdoğan, 2003; Baradan, 1998).

Şekil 2.1’de beton özelliklerini etkileyen faktörler gösterilmiştir. Burada işlenebilmenin beton bileşenlerinin özelliklerine ve miktarına bağlı olduğu ve beton kalitesini doğrudan etkilediği görülebilir.



Şekil 2.1. Beton özelliklerini etkileyen faktörler (Tattersall, 1991).

Bu etkenlerin dışında betonun yüzeyi, kökeni, agreganın tane boyutu ve granülometrik dağılımı, kullanılan katkı tür ve miktarı, beton içindeki hava miktarı, beton ve havanın sıcaklığı, betonun su ile karıştırılmaya başladığı andan itibaren kullanıldığı ana kadar geçen süre ve ortam şartları da beton kalitesini ve işlenebilirliğini etkilemektedir. Ayrıca işlenebilirlik verilerini deney sırasında uygulanan, kayma gerilmesi ve kayma hızı da etkilemektedir.

Tattersall'ın (1991) işlenebilirlik tanımı “Kalabalık donatıda, en az boşluk bırakacak şekilde sıkışabilen, özelliklerini kaybetmeden iletilebilen (taşıma) ve şekil verilebilen taze betonun akış yeteneğidir” olarak ifade etmiştir. İnşaat sektöründe, betonun akış altındaki davranışını tanımlamak için işlenebilirlik terimi gibi, akışkanlık ve kohezyonda kullanılır. Bu terimlerin tanımlanması çok sübjektiftir. Kosmatka vd. (1994) beton reolojisini işlenebilirlik, kıvam ve plastisite gibi aşağıda ifade edilen üç terime dayandırmaktadır.

İşlenebilirlik, betonun karıştırılmasının ve yerleştirmesinin kolay mı veya zor mu olduğunu ölçmektir.

Kıvam, karıştırılmış taze betonun akış yeteneğidir.

Plastisite (plastik hal), betonun kalıba yerleştirilme kolaylığının göstergesidir (Ferraris, 1999).

Çizelge 2.1’de işlenebilirliğin profesyonel topluluklarca yapılmış tanımlamalarından bazıları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli toplulukların işlenebilirlik tanımlamaları.

Topluluk İsmi	Tanım
Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 116R-00)	“Homojen durumda karıştırılması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve sonuçlandırılabilirliği kolay belirlenebilen yeni karıştırılmış harç veya betonun özelliğidir.” (Koehler ve Fowler, 2003)
İnşaat Mühendisleri Topluluğu, Japonya	Malzemenin ayrışmasına karşı koyabilen, granülometrisi ve homojenliği ile kıvamından dolayı karıştırılabilmesi, yerleştirilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi kolay saptanan yeni karıştırılmış beton veya harcın özelliği (Ferraris, 1996; 1999).
Yapı Mühendisleri Topluluğu, Japonya	Katılaşmamış beton veya harcın karıştırılabilme, yerleştirilme ve sıkıştırılabilme kolaylığı (Ferraris, 1996; 1999).
Standartlar Birliği, Japonya	Homojen betonun oluşumuna kadar malzemelerin ayrışmasına karşı koyan, granülometrisi ve kıvamından dolayı karıştırılabilmesi, yerleştirilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi tutarlı ve kolay saptanan yeni karıştırılmış beton veya harcın özelliği (Ferraris, 1996; 1999).
İngiliz Standartlar Enstitüsü	İşlenebilmesi ve tamamen sıkıştırılması kolaylıkla belirlenebilen taze beton, harç veya benzerinin özelliği (Ferraris, 1996; 1999).
Amerikan Malzeme Test Standartları (ASTM C125-00A)	Betonun homojenliğini kaybetmeden hareket etme yeteneği

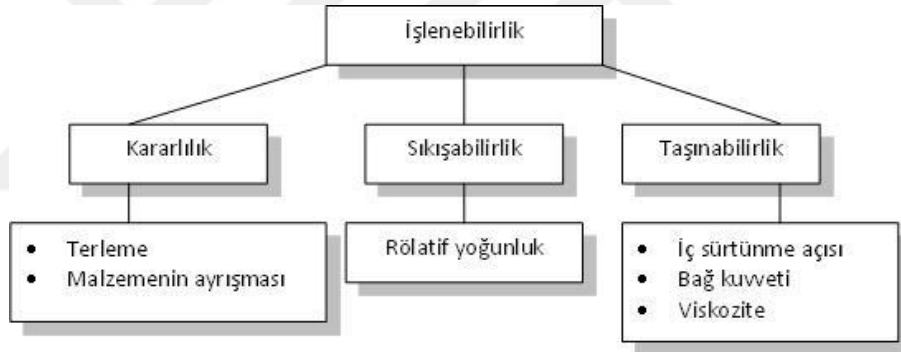
Bu tanımlar incelendiğinde tanımların hepsinde genel kabullerin ortak olduğu ancak tanımların fiziksel büyüklükleri kapsamadığı görülmektedir.

İşlenebilme konusunda amaç, taze betonun sürtünmesini yenerek daha kolay yerleşmesini sağlamaktır. İşlenebilir bir betonun niteliklerinin başında kohezyon gelir. Kohezyon, betonun içeriğinde olan tüm malzemelerin birbirine ne kadar bağlanmış olduklarını belirler. Böylece segregasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. İri agrega tanelerinin karıştırma, yerleştirme işlemleri sırasında dağılım düzenlerini kaybederek beton kütesinden ayrılıp saçılmasına veya ayrı ayrı bölgeler oluşturacak şekilde kümelenmesi (segregasyona) engel olan beton kohezyonlu betondur. Segregasyon yapan bir beton homojenlik göstermez; buna sebep olarak da betondaki mukavemet dağılımında çok farklılık gösterir. Kohezyonlu bir betonda agrega segregasyonu dışında su da ayrışmaz. Beton karışımındaki suyun taşıma ve yerleştirme esnasında (katı parçacıklar yer çekiminin etkisiyle dibe doğru hareket eder), küteden ayrılarak yüzeye çıkmasına “Terleme” (su salma veya betonun kanaması) denir. Terlemenin bir nedeni segregasyondur. Ancak terlemenin diğer bir sebebi çimentonun flokülleşmesidir. Çimento tanelerinin tamamının suyla temas etmesi yerine flokülleşerek tamamının suyla temas edememesinden ve hidrasyon için gerekenden fazla su tutarlar; daha sonra bu fazla suyu kusarlar. Flokülleşmenin terlemede bir ikinci neden olduğunun kanıtı, terlemenin sadece betonda değil salt çimento hamurunda da meydana gelmesidir. Terleme işlenmiş taze betonda önemli bir unsurdur. Beton dökülüp, üstü masterlandıktan hemen sonra terleme başlar ve belirli süreler içinde yüzeyde su kaybolur. Terleme davranışının erken priz alma ile ilişkilidir ve yüzeye yakın kısımda daha sulu olan ince taneli beton oluşması sonucu, mukavemet yönünden tabakalaşma meydana gelir; yüzeye yakın beton tabakası düşük mukavemetli olur. Taze betonda kohezyonu ve kararlılığı etkileyen birleşim parametreleri su/çimento, agrega/çimento oranı ve su miktarıdır (Akman 1987; Erdoğan, 2003).

Betonun tamamıyla doldurulduğu kabı boşluksuz doldurulmasıyla yani akma başladıktan sonraki hareketliliğe akıcılık (*flow*) denilmektedir. Pompa betonunun işlenebilirliğine “Pompalanabilirlik” adı verilir. İşlenebilirlik özelliklerine ilave olarak pompalanabilirlik; boru içinde betonun minimum enerjiyle, kesintisiz ve niteliklerini yitirmeden iletilebilmesi olarak tanımlanır (Yücel, 1997). Taze betonun kolay

pompalanabilmesi için minimum basınçla ve blokaj etkisi olmadan boru içinde kütleli bir şekilde akması gerekir (Sağlam ve Mutlu, 2001).

Richit (1962) çökme (sedimentasyon), yoğunluk ve terleme gibi farklı etkilere bağlantılı olarak betonun akışını tanımlamaya çalışmıştır. Richit, işlenebilirlik için üç temel özellik olduğunu belirtmiştir. Bunlar; kararlılık (stability), sıkıştırılabilirlik (compactibility) ve hareket kabiliyeti'dir (mobility) (Şekil 2.2). Kararlılık, terleme ve segregasyona bağlıdır. Hareket kabiliyeti iç sürtünme açısına, bağ kuvvetine ve viskoziteye bağlıdır. Sıkıştırılabilirlik yoğunluğa eşdeğerdir. En azından bu açıklamalarda kullanılan kelimeler, ölçülebilen fiziksel faktörlerle bağlantılıdır. Bununla beraber bu terimler yeterli değildir. Bu terimlerin tümü fiziksel olarak ölçülebilen parametrelerce desteklenemez. Örneğin, beton işlenebilirliğinin azalmasının yerine yüksek viskoziteye sahip olduğu söylenebilir (Ferraris, 1999).



Şekil 2.2. İşlenebilirliği oluşturan elemanlar (Ferraris, 1996)

Tattersall (1976) beton terminolojisini üç sınıfta toplayarak özetlemiştir; kalitatif (qualitative), deneysel kantitatif (quantitative empirical) ve temel kantitatif'dir (quantitative fundamental). Bu üç sınıflandırma aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

I. Sınıf: Kalitatif (Sınıflandırma amaçlı (kişiden kişiye değişebilen))

İşlenebilirlik, akabilirlik, sıkışabilirlik, kararlılık, bitirilebilme, pompalanabilme, tutarlılık vs. ölçmek, sadece genel tanımlayıcı yol olarak kullanılabilir.

II. Sınıf: Deneysel Kantitatif (Ampirik nicel)

Çökme, sıkıştırma faktörü, Ve-be vs. özel batış durumunda davranışın basit kantitatif ifadesi olarak kullanılabilir.

III. Sınıf: Temel Kantitatif (Temel nicel)

Viskozite, akma gerilimi vs. (Tattersall, 1991, Ferraris, 1999).

İşlenebilme özelliğinin betonun kıvamı ile karıştırılmaması gerekir. Kıvam taze betonun sahip olduğu ıslaklık derecesi yani betonun su oranına bağlı akıcılığıdır. İşlenebilme özelliği ise, beton agregasının granülometrisine, boyutuna, biçimine ve çimento miktarı gibi diğer faktörlere bağlıdır. Ancak bu iki kavram uygulamada birbirine karıştırılır ve betonun işlenebilme özelliği kıvam deneyleri ile saptanmaya çalışılmıştır. Beton kıvamı sadece taze beton kütleindeki kayma tarafından etkilenmektedir. Taze beton kütleinin akıcılığı ve kohezyonu, kıvam kavramı içinde yer almamaktadır (Baradan, 1998, Erdoğan, 2003).

YPB’larda amaç betonun dayanım, dayanıklılık ve işlenebilme olan üç temel özelliği öncelikle iyileştirilmesidir. Bununla beraber, YPB’nun ana hedefinin kısaca su/çimento oranı veya su/bağlayıcı oranını üretim sırasında olabildiğince düşük tutmaya çalışmak olarak özetleyebiliriz. İkinci önemli hedef ise, betonu ayrışma ve boşluk olmadan kolayca yerine yerleştirmektir. Bu iki istek klasik beton teknolojisindeki en önemli çelişkidir (Akman, 1999).

Betonların kolay iletilmesi, yerine yerleştirilebilmesi açısından kıvamlarının akıcı olması istenir. Akıcı bir betonun kayma eşiği ve viskozitesi düşük değerler alır. Öte yandan işlenebilir bir betondan beklenen sadece akıcılık değildir, taze beton aynı zamanda kararlı olmalıdır. Kararlılık kohezyonla eş anlamlıdır; kohezyonlu bir beton segregasyona uğramadan, homojenliği bozulmadan yerleşir. Akıcılık ve kohezyon çelişen iki özelliktir. Problem bu iki özelliğin optimumunu bulmaktır. Akışkanlık kayma eşiği ve plastik viskozitenin etkisinde olmakla beraber kohezyonu belirleyen daha ziyade plastik viskozite’dir. Bu iki reolojik sabitin incelenmesi ve uygun

değerlerinin bulunması taze betonun işlenebilme problemini daha köklü bir biçimde çözümleyebilir (Yücel, 1997).

Malier (1992)'e göre, daha fazla işlenebilir yüksek performanslı beton iki yolla; çimento tanelerinin topaklanmasını azaltarak veya tane büyüklüğü dağılımının düzenlenmesiyle elde edilebilir. Malier metodunda, ilk yaklaşım çimento pastasını anlatmakta iken ikinci yaklaşım agrega büyüklüğünün dağılımı kadar fillerin (dolgunun) etkili olduğunu belirtmektedir. Genellikle betonun akış veya reolojik özellikleri, özellikle yüksek dayanımlı betonda, yerleştirme kolaylığı, konsolidasyon, durabilite ve mukavemete bağlı olan akış özellikleri gibi bir çok faktörler için çok önemlidir. Yani beton tam anlamıyla konsolide olamayan, peteklenme, hava boşlukları ve agrega segregasyonu gibi kusurlara sahiptir. Bunun gibi önemli dayanım özellikleri bir çok test metotlarının tasarımını tetiklemiştir. Ancak mevcut deneyler bu konuda yetersiz kalmakta yüksek performanslı betonun için özel tasarlanmış yeni deneyler gerekmektedir (Ferraris, 1999).

2.2. Taze Betonun İşlenebilirlik Deneyleri

Taze betonun işlenebilmesini ölçmek ve sayıyla ifade etmek üzere geliştirilmiş çok sayıda araç ve yöntem vardır. Buna karşılık uygulandıkları tür ve kıvamlar sınırlıdır. Örneğin yayılma akıcı kıvamlı betonlarda, çökme plastiklerde, Vebe kuru vibrasyon betonlarda fikir sağlamaya yararlı olabilirler. Bunlar standart deneyler olarak yönetmeliklere de girmiştir. Taze betonlar üzerinde beton ve kıvam kontrolleri standart deneyler kullanılarak yapılmaktadır. Ne yazık ki standart deneylerin sonuçları böyle bir optimumu bulmaya yetecek düzeyde bilgi veremezler. Bu deneylerin kolay oluşu ayrıca belirgin kıvam test aralıklarına sahip olmaları tercih sebeplerindedir. Yalnız elde edilen ölçüm değerlerinin tek nokta test değerleri olduğu ve deney aleti tipiyle, kullanan operatörün becerisine bağlı geliştiği hatırdan çıkarılmamalıdır (Akman, 1987; Yücel, 1997).

Genel kabul olarak, işlenebilirliği gösteren (ASTM C143) betonun çökmesi deneyi yapılır. Standart çökme deneyi “statik” deneydir ve betonun işlenebilirliğini ölçemez. Aslında çökme işlenebilirliğin bileşenlerinden biri olan “betonun akma gerilmesi” ile

ilişkilidir. Betonun işlenebilirliği için bir de “plastik viskozite” gereklidir. Ancak plastik viskozite çökme ile belirlenemez. Bununla beraber işlenebilirliğin gerekli bileşenlerini belirlemek için bazı dinamik testler ile uzun zamandır çalışılmaktadır (Wong vd., 2001).

İşlenebilirlik deneyleri birkaç farklı grupta incelenebilir. Temel olarak kohezyon ve kararlılık gibi nitelikleri ölçen deneyler, akışı sınırlandıran veya serbest akışta özellikleri inceleyen deneyler ya da tek nokta veya iki nokta ölçümü veren deneyler olarak gruplandırılır.

2.2.1. Deneylerin I. gruplandırılması

Kohezyon, kararlılık gibi nitelikleri ölçmeye yönelik deneyler ve işlenebilirlik için gerekli enerjiyi ön planda tutan deneylerdir.

- Birinci grup deneyler; çökme, sarsma deneyi, Kelly topu ve penetrasyon deneyleri.
- İkinci grup deneylerde taze betonun şekil değiştirmesi (örneğin koni formundan silindirik formuna geçmesi) ve sıkışması için gerekli enerjinin ölçülmesine çalışılır. Ölçülen enerjinin doğrudan kendisi değildir. Belirli bir sıkışma için gerekli zaman veya sıkışma oranıdır. Bu değerler enerji ile orantılı büyüklüklerdir. Bu grup deneyler VeBe deneyi, Walz deneyi vb.'dir (Akman, 1987).

2.2.2. Deneylerin II. gruplandırılması

Deneyleri, deneyi yapılacak betonun hareket veya akış davranışına göre sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; akışı sınırlandırılmış (confined flow), sınırlandırılmamış (unconfined flow, free flow) ve titreşim (vibration) deney metodları ile dönel reometreler (rotational rheometer) deney metodlarıdır. Aşağıda belirtilmiş olan ilk üç grup deneyler genellikle yerleştirmedeki akışı simüle ederken, dördüncü grup deneyler betona geleneksel reometre kavramını uygular. Bunlarla birlikte betonun akış özellikleri doğrudan ölçemeyen (örneğin, çok düşük çökmeli betonların

bir çoğu) deney metotlarının da var olduğu bilinmektedir. Bu tür deneyler bu kategorilerin hiç birinin içine dahil edilmemiştir.

2.2.2.1. Akışı sınırlandıran deneyler

Dar delikler içinden uygulanan basınç veya kendi ağırlığı altında çelik donatı çubukları arasındaki açıklıktan akabilme (geçebilme) özelliğini ölçen, akması sınırlandırılmış deneylerdir. (Sıkışma faktörü, K-çökme deneyi vb.). Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) için geliştirilmiş olan deneyler de bu grup altında toplanabilir. Bunlar geçme yeteneği deneyleri; V-Huni, Çökme yayılması, J-Ring, L-Kutu Test, U-Kutu ve kutuya dolma yeteneğini deneyleri; Dolma yeteneği, Kajima deneyi, GTM elek tutarlılık ve segregasyon için penetrasyon vb. deneyleridir.

2.2.2.2. Serbest akışlı deneyler

Hem yerçekimi tarafından betona giren nesnelere hem de kendi ağırlığı altında, kalıp içindeki tüm yüzeylere betonun yayılmasını ölçen akması sınırlandırılmamış deneylerdir. (Çökme (slump), V huni, Orimet deneyi, Geliştirilmiş çökme, Slump hız makinesi (SLRM), Kelly topu, Halka penetrasyon, Koni penetrasyon, Hareketli küre viskozimetresi, Akış oluğu, İletme oluğu tork ölçer, İletme oluğu derinlik ölçer ve Yüzey yerleştirme deneyi vb.)

Taşıma ve yerleştirme işlemleri süresince, bileşimin sahip olduğu uniform özellikleri ve yukarıdaki iki maddede belirtilen özelliklerin korunmasını (stabiliteyi) belirleyen deneyler; Segregasyon direnci, V hunide T_5 zamanı ve GTM Elek tutarlılık deneyi vb.'dir (Bartos, 2000; EFNARC, 2002).

2.2.2.3. Vibrasyon deneyleri

İçerden veya dışardan yapılan titreşimlerle, malzemede düşmeyi ölçer. Vibrasyon (titreşim), vibrasyon tablası kullanılarak uygulanır ve uygulanan titreşim altında akan malzeme ölçülür. (Sıkıştırma deneyi, Walz deneyi, Sıkıştırma indeks deneyi, Sıkışmanın derecesi deneyi, Vebe, Powers tekrar kalıplama deneyi, Thaulow cihazı, Akış tablası (DIN), Açılı akış kutusu, LCL Akış deneyi, Wigmore cihazı, Ters çökme

konisi, Düşey boru deneyi, Eğimli vibratörlü cihaz (VSA), Kolon yerleştirmemede segregasyon ölçüm deneyi ve vibratörlü akış ölçme deneyi)

2.2.2.4. Dönel reometreler

Birbirine paralel olan biri veya ikisi de dönen yada beton içine giren karıştırıcı uçlara malzemenin gösterdiği direnci ölçen cihazlardır (Powers ve Wiler Plastometer, Tattersall iki nokta işlenebilirlik cihazı, BML viskozimetresi, IBB Reometresi, BTRHEOM Reometresi, Bertta cihazı, FHPCM, CEMAGREF-IMG, ve Taze beton deney cihazı 101 (FCT 101)). Bu deneylerin sonuçları, beton işlenebilirliği hakkında anlamlı bilgi verir.

Çok düşük çökmeli betonlar için deneyler; Proctor deneyi, Kango Hammer deneyi, Şiddetli sıkıştırma deneyidir. Diğer deney metotları ise; Trowel deneyi, Çoklu tek nokta deneyi, Üçekslenli toprak deneyi'dir (Koehler ve Fowler, 2003).

2.2.2.5. Tek faktör deneyleri

Tek noktalı deneyler genellikle basit ve hızlıdır. Bu testler sadece bir reolojik değeri veya faktörü ölçer. Ölçülmüş faktörler ile iki temel reolojik parametrelerin herhangi biri arasındaki ilişki açık değildir. Birçok durumda, temel parametreler, ölçülmüş faktörler için hesaplanabilir değildir ancak sadece ilişkili olduğu varsayılabilir (Ferraris, 1999; Ferraris vd., 2001).

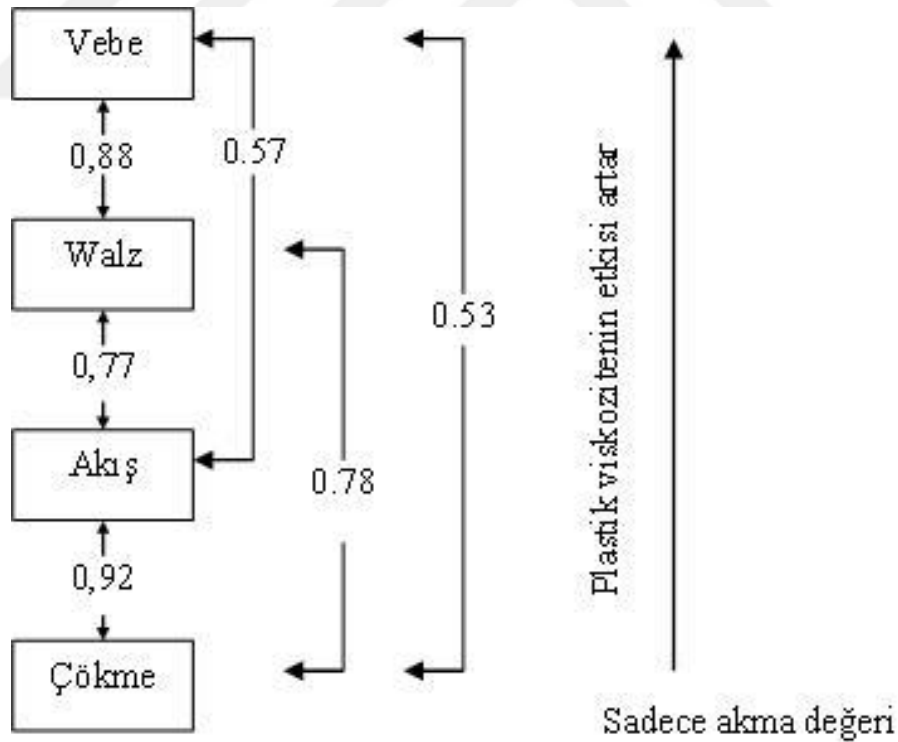
- Penetrasyon deneyleri; Kelly topu deneyi, wigmore kıvam ölçeri, halka penetrasyon deneyi
- Tekrar kalıplanma (remolding) testleri; çökme deneyi, sarsma tablası, deneyi, Vebe deneyi, powers'ın tekrar kalıplama deneyi, powers ve wiler cihazı, thaulow deney cihazı,
- Akış deneyleri; LCL cihazı, akış konisi, açılı akış kutusu, dolma yeteneği, orimet cihazı, iletme oluğu tork ölçer ve iletme oluğu kanadı, serbest-ağızlı reometre
- Sıkışma deneyleri; sıkışma faktörü deneyi, walz deneyi, vibrasyonlu test cihazı veya yerleşme eğrisi, fritsch testi

- Diğer deneyler; döner borulu viskozimetre, hareketli - top viskozimetresi, hidrolik hazır beton mikseri deney aleti (Ferraris vd., 2001)

BS 1881’de betonun kıvamlarına göre tavsiye edilen deney metotları Çizelge 2.2’de görüldüğü gibidir. Bu tip deneyler arasında korelasyon kurmaya yönelik bir çok çalışma yapılmıştır. Ancak elde edilen verilerin tek parametre olması bu işlemi zorlaştırmaktadır. Genel özelliklerine göre deneyler arasındaki ilişki Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 2.2. BS 1881’e göre betonun işlenebilirliğine göre uygulanan taze beton deney metotları (Tattersall ve Banfill, 1983)

İşlenebilirlik	Metot
Çok düşük	Vebe zamanı
Düşük	Vebe zamanı, sıkışma faktörü
Orta	Sıkışma faktörü, çökme
Yüksek	Sıkışma faktörü, çökme, akış
Çok yüksek	Akış



Şekil 2.3. Tek parametrelili taze beton deneyleri arasındaki ilişki (Tattersall ve Banfill, 1983).

Çizelge 2.3'te bazı standart deneylerin geçerli olduğu beton tipleri ve kullanıldıkları aralıklar verilmiştir.

Çizelge 2.3. Tek noktalı deneyler ve geçerli oldukları kıvam aralıkları (Akman,1987)

		Çökme (cm)	Yayılma (cm)	Vebe (sn)	Sarsma tablası (cm)	Sıkışma faktörü	Walz
Kıvam	Kuru	2 - 6	-	6-12	-	<0,80	1,16-1,45
	Plastik	7-12	28-40	2,5-5	28-40	0,80-0,90	1,11-1,15
	Akıcı	>13	41-50	0-2	41-50	0,90-0,95	1,00-1,10
Geçerli olduğu beton tipi		Akıcıya yakın plastik	Akıcı	Plastik Kuru	Akıcı Plastik	Plastik Kuru	Plastik Kuru
Kullanıldığı aralık		5-17,5	> 28	>2,5	>28	<0,90	>1,11

Aynı betonlar üzerinde bazı standart deneyler kullanılarak yapılmış olan Ritchie'nin deney sonuçları Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Ritchie'nin bazı standart testlerden elde ettiği deney sonuçları (Akman,1987).

Karışım	Su/Çimento	Su (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	Çökme (mm)	Sıkışma faktörü	Vebe (sn)
A	0,45	234	520	80	0,85	3,5
B	0,55	212	385	50	0,92	6,5
C	0,69	186	270	55	0,95	2,5

Standart deney sonuçlarına göre betonun kıvamındaki artış:

Çökme: $B < C < A$, Sıkışma faktörü: $A < B < C$, Vebe: $B < A < C$

olarak değişmektedir. Burada deney sonuçlarının seçilen deney tipine bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Akman,1987).

Nitekim standart işlenebilme testleri ile reolojik testler arasında korelasyon kurmaya çalışan araştırmalarda standart testlerin yetersizliği ortaya çıkmıştır. Örneğin daha küçük kayma şekil değiştirmelerinin etkisinde olan çökme deneyi büyük ölçüde yalnız kayma eşiği ile ilgilidir. Böylece büyük çökme veren bir betonda kohezyonu yeterli olmama olasılığı mevcuttur. Bütün bu gerçeklere rağmen betonun reolojik sabitlerine

dayanarak şantiyelerde kalite kontrolünü sağlamak ekonomik ve pratik yönden mümkün olmamaktadır. Günümüzde hala çökme deneyi taze beton kalite kontrolündeki önemini ve yaygınlığını yitirmiş değildir, zira bu deneyle üretimde kullanılan su miktarının değişip değişmediği çabuk ve güvenilir bir şekilde denetlenebilmektedir. Beton reolojisinin viskozimetre deneyleri ile incelenmesi, üretim öncesi bileşiminin ve katkı türünün saptanması açısından yararlı bir laboratuvar yöntemidir. (Yücel, 1997; Ferraris, 1999).

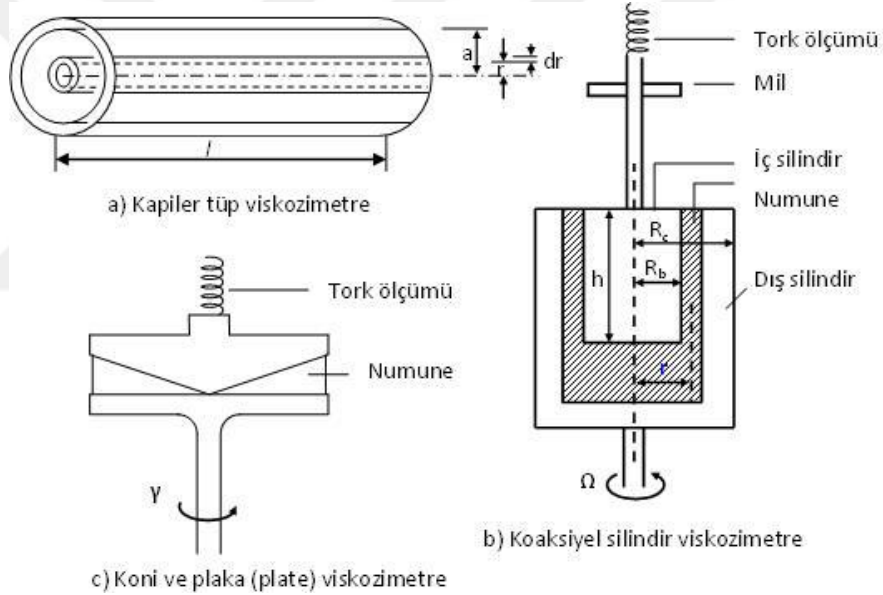
Yaygın olarak kullanılan testlerin çoğu yalnızca ya plastik viskozite ya da akma gerilimi ile ilgilidir. Elde edilen ölçüm değerleri, deney aleti tipi ve operatörün becerisine bağlı olarak değişebilmektedir. Şu halde standart deneyler, betonun tür ve kıvamı hakkında fikir verebilirler fakat taze betonun işlenebilirliğini tam olarak açıklayamazlar. Amaç betonun işlenebilirliğini kantitatif olarak ifade etmek olacaksa, pratikteki yararlar göz önüne alınarak işlenebilirlik, betonun akış özelliklerine bağlı kalınarak Bingham modeline uygun olan iki reolojik parametre; kayma eşiği ve plastik viskozite değerlerinin aynı anda ölçülmesiyle ifade edilmesi daha doğru olacaktır (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992).

2.2.3. İki faktör deneyleri

Tek noktalı deneylere karşı çok noktalı deneyler, kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili akış eğrisine dayanır. Çok noktalı deneyler, beton reolojisini daha doğru tanımlamak için, kayma oranının değişmesiyle, akış eğrisinde ilave noktalar ölçer. Çok noktalı deneyler akma gerilmesini ve plastik viskoziteyi ya da yakın ilişkili değerleri ölçer (Koehler ve Fowler, 2003).

Betonların işlenebilirliğini ifade etmede reolojik malzeme sabitleri (plastik viskozite ve kayma eşiği) ile açıklamak daha doğru bir yaklaşımdır. Viskozite katsayısının belirlenmesi için kullanılan cihaza “viskozimetre” denilir. Viskozitenin belirlenmesinde iki pratik metot; basınç farkında akış oranını ölçen kapiler tüp viskozimetreler (Şekil 2.4 a) ve koaksiyel viskozimetreler vardır. Koaksiyel viskozimetreler; konsantrik, eş eksenli veya eş merkezli silindirler şeklinde olup Coutte viskozimetre veya döneel viskozimetre olarak da bilinir. Koaksiyel

viskozimetrelerde (Şekil 2.4 b), eş merkezli iki silindir arasına numune koyulur, silindirin biri bilinen hızda dönerken (genellikle dıştaki) diğeri akışkan tarafından gösterilen viskoz sürüklenme ile dönmeye çalışır. Kanatlı reometrelerde, aksel veya gezici hareket yapan kanatlar, çeşitli hızlarda dönen beton içine koyulur. Koni ve plaka viskozimetrelerde (Şekil 2.4 c) ise; koaksiyel viskozimetrelerin iki silindiri, düz bir plaka ve geniş açılı koni ile yer değiştirmiştir. İncelenen malzeme kama şeklindeki iki aralığa yerleştirilir. Bunlardan biri diğere göre rölative dönerse, herhangi bir noktadaki hız çapla orantılıdır. Newtoniyen akışkanda az numune gereksinimi duyulması, gerekli olan sıcaklığın kolay sabit tutulması ve kullanımdan sonra kolay temizlenmesi bu tür viskozimetrelerin en büyük avantajlarıdır (Tattersall ve Banfill, 1983; Ferraris, 1999).



Şekil 2.4. Viskozimetrelerin çalışma prensibi (Tattersall ve Banfill, 1983).

Kullanılan diğere viskozizetreler ise;

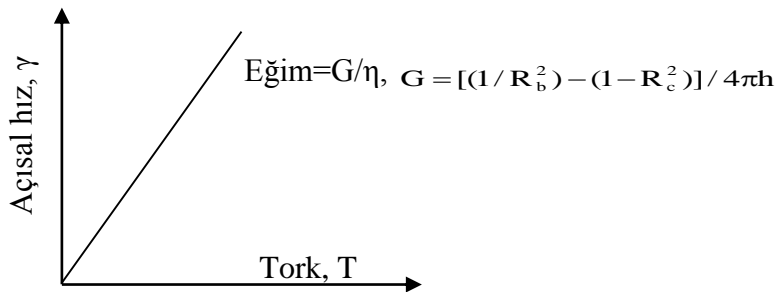
- Kılcal borulu viskozizetre; $\eta=1$ poise'den küçük sıvılarda % 0,1 duyarlılıkta,
- Düşen küreli viskozizetre'dir.

Reolojik sabitler olan; plastik viskozite ve kayma eşliğinin beton ve harçlarda ölçülmesinde, klasik reoloji deneylerindeki benzer olan silindir veya paralel plaka

geometrisinde koaksiyal viskozimetreler kullanılır. Betonlarda süspansiyon içindeki tanelerin iriliği nedeniyle daha güçlü, silindirler arası daha açık koaksiyal veya dış silindir içinde konsantrik yada kanatlı olarak dönen bir karıştırıcısı olan viskozimetreler gerekir. Tek bir dönme hızına karşı gelen kayma gerilmelerini verebilen dalıcı viskozimetreler sadece viskozite katsayısının bulunmasına olanak verirler ve bu katsayının plastik viskozite olması da tartışmalıdır. Kayma eşiğini de ölçmek için muhtelif dönme hızlarına karşı gelen kayma gerilmelerinin ölçülmesi ve $(d\gamma/dt) \leftrightarrow \tau$ grafiğinin çizilmesi şarttır. $(d\gamma/dt) \leftrightarrow \tau$ doğrusunu çizebilmek için en az iki noktaya ihtiyaç olduğundan bu tür araçlara, iki nokta işlenebilme “Two-point workability apparatus” adı verilmektedir (Tattersall ve Banfill, 1983, Tattersall, 1991, Yücel, 1997).

Akış başladığında ölçülen ve akma gerilmesini gösteren kayma gerilmesi, gerilme kontrollü reometrelerden elde edilebilir; malzemenin içine giren iğnenin girmesi için gerekli kuvvet ölçülen penetrometreden, malzemedeki harekete neden olup kayma gerilmesini ölçen kanatlardan ve kayma dalgasının yayılma hızından belirlenebilen kayma modülünü ölçen darbeli (pulse) kayma ölçerden ölçülür. Sonuç olarak salınımlı dönme ve çevirmeli kayma, elastikliği sağlar ve malzemenin viskoz bileşenlerinin ayrışmaya karşı direncini gösterir. Gerilme gevşemesi metodu ise boyutu sınırlandırma da kullanılır (Banfill, 2003).

Konsantrik (eş merkezli) viskozimetrelerde Newtoniyen akışkan için açısal hız değişimi ile tork arasındaki ilişki Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Newtoniyen akışkan için açısal hız ile tork arasındaki lineer ilişki (Tattersall ve Banfill, 1983).

Literatürde yaygın olarak kullanılan deney ve deney cihazları;

1. Tattersall Cihazı (silindir içinde kesilmiş dönen helezon),
2. IBB Reometresi,
3. BML Viskozimetresi (koaksiyel silindirler),
4. Bertta Cihazı
5. BTRHEOM Reometresi (paralel plaka)
6. Geliştirilmiş Çökme Konisi Testi
7. Hareketli Nesne Reometresi
8. Eğimli-Vibrasyonlu Viskozimetre Deney Cihazı
9. Colebrand Test Cihazı
10. Camegraf-IMG'dır (koaksiyel silindirler) (Ferraris vd., 2001).

Viskozimetrelerden sağlanan büyüklüklerin kesin değerler olduğunu kabul etmek güçtür. Viskozimetrenin türü, kullanılan deney malzemelerinin cinsleri ve bileşimleri ve sıcaklık sonuçları etkiler. Örneğin iç silindiri dönen bir viskozimetrede dış çeperle çimento hamuru arasındaki kayma, iri tanelerin segregasyonu veya kütleli dönme (tıkaç, 'plug' akımı) oluşması ile bozulur, yanlış değerlendirmeye yol açar. Bu bakımdan aynı aygıtla yapılan deneylerin mukayesesi ile doğru değerlendirme sağlanabilir (Yücel, 1997).

Bu testlerle ölçülen değerler, akma gerilimi ve viskozite her zaman doğrudan hesaplanamayabilir. Genellikle dolaylı ölçülen faktörler bu iki temel parametreyle ilgilidir. Segregasyon oluşumu, zaman ve agrega boyutunun değişiminden dolayı bu temel parametrelerin doğrudan ölçülmesine izin veren reolojik deney cihazlarının tasarımı oldukça zordur. En yaygın akışkan reometresinin geometrisi, eşeksenli silindirdir. 10 mm veya daha büyük agregalar ve kesme yüzeylerinin arasındaki lineer akış eğiminin elde edilmesi cihazın geometrisi ve boyutlarını etkilemektedir. Eşeksenli silindirlerde dış ve iç yarıçap arasındaki fark en büyük agrega çapının en az beş katıysa ve yarıçaplar arasındaki oran 1 ile 1,10 arasında tutulursa en uygun lineer

akış eğimi elde edilebilir. 10 mm en büyük agrega çapı için; dış silindirin yarıçapı en az 0,55 m iken iç silindirin yarıçapı 0,5 m'dir. Bu büyüklükler, agrega boyutu ve silindir çapına göre rölatif olarak değişmektedir (Ferraris, 1999).

Bileşenlerindeki boyutlar nedeniyle taze betonun reolojisini belirlemede, bilinen koaksiyel silindir viskozimetrelerin kullanılamaz. Reolojik ölçümleri sağlayan cihazın aralığı en büyük parçacık boyutunun on katı olmalı ve dış silindir çapın iç silindir çapına oranı 1,2 den az olmalıdır. Banfill (2003)'e göre, beton gibi büyük granül malzemelerin deneyinde kullanılan koaksiyel silindir viskozimetrelerde en büyük parça boyutuna bağlı olarak 2,5 m³ örnek hacmi gereklidir. Ancak bu ölçülerin beton için pratikte uygulanamayacağını, harç için tasarlanan cihazlarda uygulanabileceğini belirtmiştir. Çimento pastası gibi küçük taneli malzemeler için geliştirilen laboratuvar cihazları reolojik ölçümlerde daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle Tattersall tarafından geliştirilen silindirik kap içinde dönen sarmal çark (kesilmiş helezonik/sarmal çark) taze betonun davranışını pratik ve başarılı bir şekilde belirlemektedir (Banfill, 2003).

Taze betonların reolojik özelliklerinin belirlenmesi, arzu edilen özellikte beton imali ve betonun hedeflenen özelliklerinin kontrolü açısından oldukça önemlidir. Mevcut deney metotları özellikle yüksek mukavemetli betonların reolojik özelliklerini belirleyici değildir. Bunun için yeni teorik modeller ve deney metotları geliştirilmelidir (Wong vd., 2001).

2.3. Taze Betonun Reolojisi

Reo, eski yunanca da akma anlamına gelmektedir. İdeal olmayan cisimlerin (katı ile sıvı arasındaki) deformasyonunu ve kuvvet etkisiyle akmasını inceleyen bilim dalıdır. Reoloji, sıvı veya katı cisimlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini zaman değişkenini de dikkate alarak, yani gerilme ve deformasyonun zamana göre türevlerini de hesaplayarak inceleyen bilim dalıdır (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992). Kayma oranı üzerinden viskozitenin bağımlılığı tanımlanır. Reolojide akış,

gerilmenin¹ kayma parametreleri ve kayma kullanılarak ölçülmesi ile akış oranı ve tork'un ölçülmesinden hesaplanan kayma oranı² ($\dot{\gamma}$) dır. Yani akış, gerilme, kayma, kayma oranı ve zaman arasındaki ilişkiye bağlıdır (Özkul ve Sağlam, 2002; Leslie ve Xihuang, 2000; Banfill, 2003).

Taze harcın ve betonun reolojik sabitleri; kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (η_{pl}) akış bilimi olarak tanımlayabileceğimiz reoloji bilimi ile açıklanır. Bu incelemeyi kolaylaştıran yapısal modeller mevcuttur. Plastik viskozite (η_{pl}), akıcılığın tersidir, yani plastik viskozite (η_{pl}) değeri küçük olan bir beton akıcı olacak ve daha kolay yerleştirilebilecektir. (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992).

Betonun akışını ölçmeden başka, bileşenlerin (çimento pastası, harç gibi) akış özelliklerini tahmin etmek veya karışım oranları (W/C oranı, agrega içeriği, çimento tipi ve karıştırma dozajı gibi) reoloji biliminin kapsamındadır. Betonun akış özelliklerinin etki faktörleri, parçaların (çimento pastası ve agregalar) reolojisini etkileyen faktörlerden daha fazladır. Çimento pastasının reolojik parametreleri ile betonunkiler arasında lineer bir ilişki yoktur. Temel neden, betondaki çimento pastasının hacim içeriği ile agregalar arasındaki boşluğun değişken olmasıdır. Ferraris ve Gaidis (1992) çimento pastasında, agregalar arasındaki uzaklığa benzetilen reometrenin levhaları arasındaki boşluğa bağlı reolojik farklılıkların olduğunu göstermiştir. Agregaların arasındaki mesafe çimento pastasının hacim içeriğine bağlıdır. Aynı zamanda malzemelerin reolojik davranışları, kayma oranı, sıcaklık, karıştırma enerjisi gibi deneylerin durumuna bağlıdır. Bu yüzden betonda yapılacak deneylerde aynı durumlarda çimento pastasının ölçülebilmesi önemlidir (Ferraris, 1999).

Reolojinin kompleks (karmaşık) ilişkiler nedeniyle çoğu kez matematiksel ifadesini vermek zordur. Akış, sıvıdaki yakın elemanların rölatif yer değiştirmesi; kayan akışkan sıvı elemanlarının birbirlerinden uzaklaşmasına veya akışta birbirleri

¹ Birimi N/m² (ML⁻¹T⁻²) dir

² Birimi s⁻¹ (T⁻¹) dir. Viskozitenin boyutu (ML⁻¹T⁻¹ veya Pa.s) dir.

üzerinden geçmesi ile ilgilidir. Kayma akışı, sıvı hareketindeki (kayma oranı olarak adlandırılan), hız gardyeninde (değişiminde) oluşan kayma gerilmesine karşılık olarak, kayma gerilmelerindeki artış oranına, paralel olarak çizilen çizgilere eşittir (Banfill, 2003).

Beton parçacıklar şeklidir ve gömülü parçacık kuvvetleri doğrudan hesaba katılamaz, bu bilinmeyen verilen metodolojiler veya modeller de akılda tutulmalıdır. Birbirini etkileyen parçalar olarak, sadece çimentonun hidrasyonu ve flokülasyonun devamlı meydana gelmesi gibi olayları içeren, zamana bağımlı özellikler kabul edilmiştir. (Ferraris, 1996; 1999)

2.3.1. Taze betonun işlenebilirliğinde akışkan ve süspansiyon reolojisi

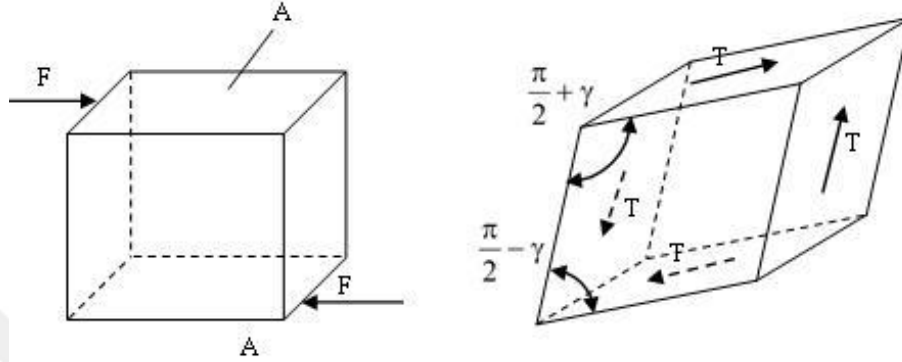
2.3.1.1. Bünye denklemleri

Uygulamada taşıyıcı sistemlerin güvenliği yönünden, dış kuvvetlere maruz sistemlerde oluşacak gerilmelerin bilinmesine gerek vardır. Bu gerilmelerin mukavemet sınırları altında kalması istenir. Gerilme analizlerinde denge denklemleriyle kinematik bağıntılar yanında ayrıca bünye denklemlerine ihtiyaç vardır. Bünye denklemleri bir cismin dış etkilere karşı gösterdiği tepkiyi veren bağıntılardır. Malzemelerin gerilme şekil değiştirme bağıntılarını veren bu denklemler, mekanik davranışın türüne göre değişir. Bunlar; elastik, plastik ve viskoelastik davranış durumlarıdır (Yücel, 1993).

İdeal elastik bir katıya yük uygulandığında, deformasyon oluşacaktır. Bu tür bir katı cisim Hooke kanununa uyar. Yük tarafından oluşturulan gerilme, gerilme miktarı ile doğru orantılı, malzemenin rijitliği, elastisite modülü ile ters orantılı olarak şekil değiştirme oluşturur. Bu durumda, yükün uygulanması zamanla değişmeyecek ani bir deformasyon oluşturur. Yük kaldırıldığında, deformasyon geri dönecek ve cisim ilk biçimini alacaktır (Özkul ve Sağlam, 2002). Basit çekme halinde homojen izotrop cisimlerde;

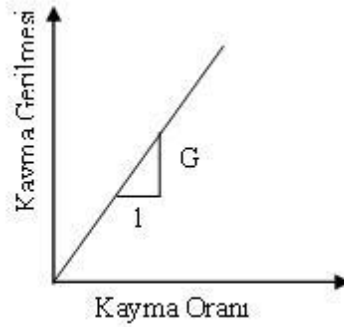
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Hooke kanunu geçerlidir. Normal gerilmeler yalnız uzunluk değişimi yaparlar fakat açıları değiştirmezler. Kayma gerilmeleri ise açı değiştirirler dolayısıyla basit kayma biçim değiştirmesine neden olurlar (Şekil 2.6). Bu ilişki, bir kayma gerilmesi (τ), ideal elastik bir katıya etkidiğinde de geçerlidir. Kayma şekil değiştirmesi (açısal şekil değiştirme, γ), kayma gerilmesi ile (Şekil 2.7) orantılıdır (Yücel, 1993).



Şekil 2.6. A alanı üzerine etkiyen F kayma kuvveti ve kayma deformasyonu (Bartos, 1992)

Orantı katsayısına ise kayma modülü (G) denilir (Şekil 2.7). Bu ilişki basit kayma halinde Hooke yasası ile anlatılır.



Şekil 2.7. İdeal Elastik Katılarda G Kayma Modülü (Bartos, 1992).

$$\tau = G \gamma \quad (2.2)$$

Basit kayma halinde Newton yasası ise;

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.3)$$

olarak yazılır. Viskoz bir sıvı için ise birim zamandaki şekil değiştirme $\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t}$ veya şekil değiştirme hızı, τ kayma gerilmesi ile orantılıdır.

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right) = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Bu durumda kayma modülü G , viskozite katsayısı η ile yer değiştirilmiştir. Sıvılarda kayma genellikle, biri diğerine göre hareket eden birbirine paralel iki düzlemlerle temsil edilir (Özkul ve Sağlam, 2002).

Farklı metotlarla tanımlanabilen malzeme davranışları akış eğrisi, kayma gerilmesi ve kayma oranının ilişkisinin nasıl olduğunu çok genel olarak gösterir ancak daha doğru ve kesin tanımlamalar için viskozitenin (kayma gerilmesinin kayma oranına oranı), kayma oranı veya zamanla değişimi incelenmelidir (Banfill, 2003).

2.3.1.2. Viskozite

Viskozite, bir sıvının laminer akım yani paralel tabakaların birbiri üzerinden kayması şeklinde hareketleri sırasında, komşu tabakaların moleküllerinin birbirini çekmesinden kaynaklanan iç sürtünme özelliğidir. Birimi puaz yada poise'dir (bir kenarı 1 cm olan alt yüzü tespit edilmiş küp elemanın üst yüzeyine 1 din'lik kuvvet uygulanması halinde, yüzeydeki moleküller 1 cm/sn hızla hareket ediyorsa bu sıvının viskozitesi 1 poise'dir (1 poise= 1 din/cm².saniye, 1/100 poise= 1 centipoise (cp)³ dir). şekilsiz (amorf) malzemelerin ve akışkanların (sıvı malzemeler; su asphalt, v.b.) moleköl yapıları, birbirinden yavaş ve değişmeyen hızla ayrılır. Buna viskoz akma olayı denir. Viskozite katsayısı ne kadar büyükse o sıvının akma kabiliyeti veya hareket etme kabiliyeti o kadar azdır. (Özkul ve Sağlam, 2002; Yücel, 1993)

Viskoz sıvılar, uygulanan kayma gerilmeleri etkisiyle açısız deformasyonlar yaparlar. şayet kesme kuvveti şekil 2.8'deki gibi sıvıya uygulanırsa, sıvıdaki hız değişimine neden olur. şekil 2.8'de görüldüğü gibi hızlı ve yavaş hareket eden düzlemlerin

³ 20°C deki suyun viskozitesi 1 cp'dir.

birbirlerini frenlemesinden iki düzlem arasında F sürtünme kuvveti oluşur. F sürtünme kuvvetinin değeri düzlemlerin alanı (A) ve hız gradyeni (dv/dx) ile orantılıdır. Kayma gerilmesi, sürtünme kuvvetinin düzlemin alanına bölünmesiyle bulunur.

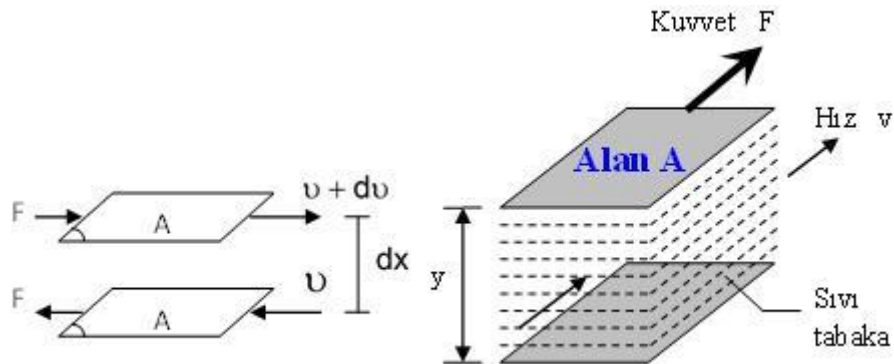
$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.5)$$

Bir akımdaki iki nokta arasında dt zamandan sonra aralarındaki düzlemde dy kadar açılı bozulması olacaktır.

$$d\gamma = \frac{dv}{dx} dt \Rightarrow \tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{Newton Yasası}) \quad (2.6)$$

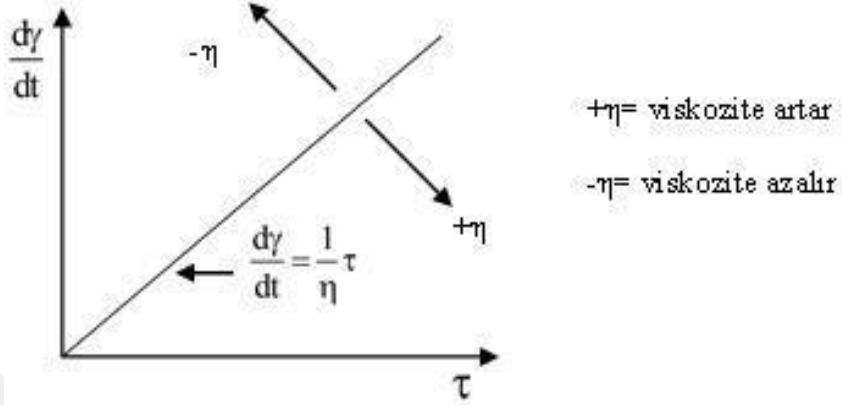
Açısal şekil değiştirme hız değişimi kayma oranına $\left(\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}\right)$ eşittir. Kuvvet ve değişim arasındaki orantı faktörü (kayma gerilmesi (τ) ile açısal şekil değiştirme hızı) viskozite olarak adlandırılır (η). Reolojide en basit viskoz sıvı modeli Newton sıvısı (Newtoniyen) olarak adlandırılan denklem 2.7'ye uyar (Ferraris, 1999; Yücel, 1997).

$$F/A = \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.7)$$



Şekil 2.8. İki düzlem arasındaki sürtünme kuvveti ve Newton'un viskoz akış denklemi (Tattersall ve Banfill, 1983; Ferraris, 1999)

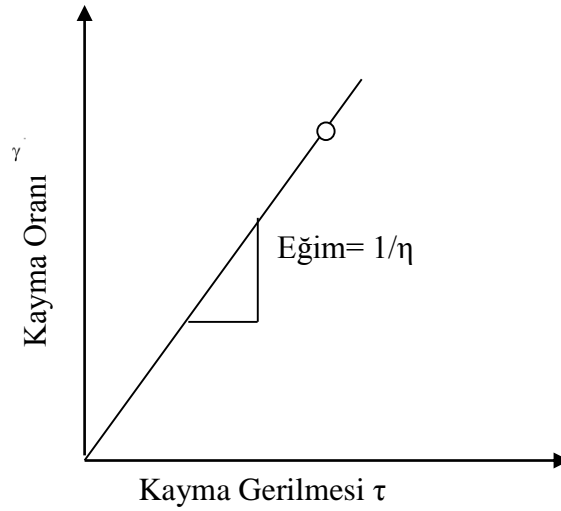
2.7 denkleminin Newton sıvısının bünye denklemidir. Newton yasasına uyan cisimlere Newtoniyen cisimler denir. Newton yasası, viskoz şekil değiştirme hızının kayma gerilmesi ile orantılı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.9.'da Newton sıvısının diyagramı gösterilmiştir (Yücel, 1993).



Şekil 2.9. Newton sıvısı (Tattersall ve Banfill, 1983; Basics of Rheology, 1991).

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi sabit sıcaklıktaki Newtoniyen akışkanda, akışın özelliklerini tanımlayan viskozite değerinin hesaplanabilmesi için bir deneysel değer belirlenmiş olması yeterlidir (Yücel, 1993). Çünkü bütün Newtoniyen sıvılar orijinden geçen bir doğru ile temsil edilirler. Doğrunun eğimi viskoziteyi verir. Düzgün (üniform) akan Newton sıvısının temel reolojik özelliği viskozitedir (Özkul ve Sağlam, 2002).

Viskozitenin, plastik viskozite (plastik malzemeler için gerinim oranına karşı gerilmenin eğimi) ve diferansiyel viskozite (gerinim oranı ve gerilme ile ilişkili eğrinin eğimi) gibi birkaç tipi vardır. Bundan dolayı elde edilen değerlerin, hangi viskozite değeri olduğunu tanımlamak önemlidir (Leslie ve Xihuang, 2000).

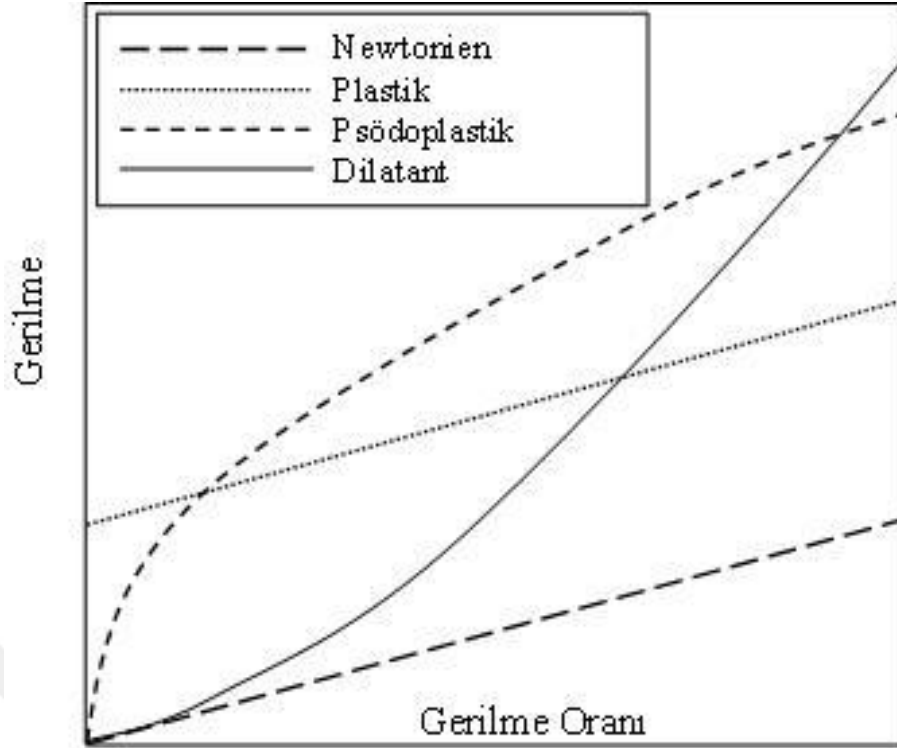


Şekil 2.10. Newtoniyen akışkanda viskozitenin belirlenmesi (Tattersall ve Banfill, 1983)

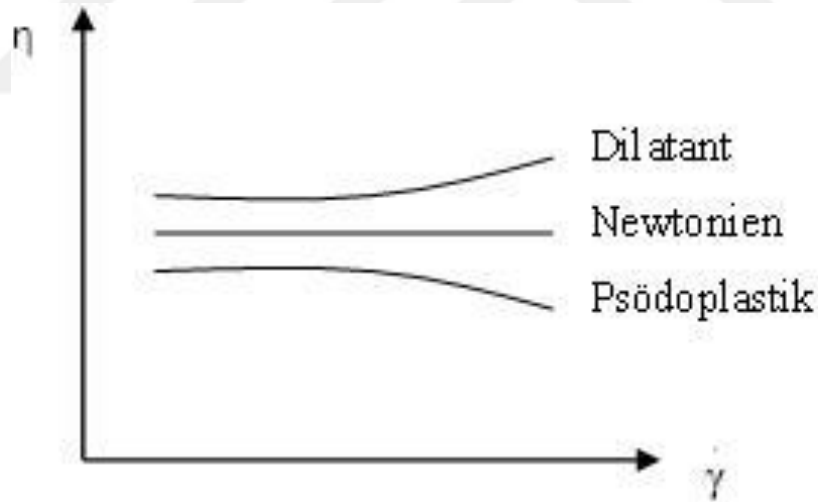
Akış davranışının bir kaç tipi bulunmaktadır (Şekil 2.11 ve 2.12). Bu davranışlardan en basiti gerilme oranı sıfır iken gerilmesi sıfır olan ve gerilme oranı ile gerilme arasında lineer ilişki bulunan Newtoniyen davranıştır. Viskozitenin kayma oranı ile değişimi sabitse reoloji, Newtoniyen olarak ifade edilir. Şayet viskozite kayma oranı ile değiştiği zaman reoloji Non-Newtoniyen'dir. Newtoniyen davranış ideal akış davranıştır ve katılardaki Hooke davranışına benzerdir. Non-Newtoniyen malzemelerde viskozite sabit değildir. Kayma gerilmesinin veya kayma oranının ve zamanın fonksiyonudur. Non-Newtoniyen malzemeler zamandan bağımsız ise viskozite, $\eta = F(\dot{\gamma}$ veya $\tau)$ olacaktır. Bu tür malzemeler; pseudoplastik, dilatant ve plastik olarak adlandırılır. Akış ilk başladığında kayma oranı sıfır iken akışın başlayabilmesi için belirli bir gerilme değeri bulunan (akma gerilmesi) ve bundan sonra lineer bir davranış gösteren bir çok akışkanın bu davranışına plastik davranış denir (Bingham olarak da adlandırılır). Diğer genel davranış, kayma oranı artarken azalan viskoziteli pseudoplastik⁴ davranıştır. Bazen malzemeler dilatant⁵ davranışı da gösterebilir, ancak bu süspansiyon için genel değildir (Yücel, 1993; Leslie ve Xihuang, 2000).

⁴ Psödoplastik (psedoplastic veya Shear Thinning) ; yalancı plastik veya kayma incelmesi.

⁵ Shear Thickening (Dilatant); kayma kalınlaşması veya kalınlaşma



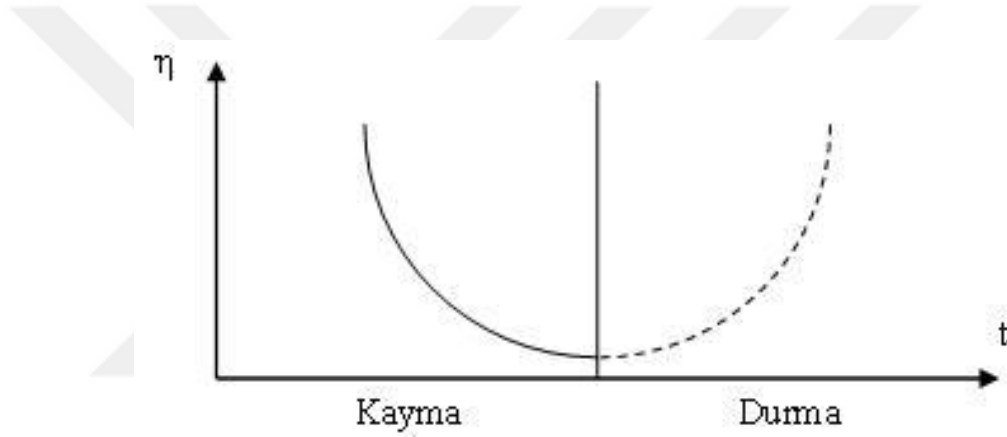
Şekil 2.11. Reolojik davranışın tipleri (Leslie ve Xihuang, 2000)



Şekil 2.12. Viskozite (η) – kayma şekil değiştirme oranı ($\dot{\gamma}$) ilişkisi (Yücel, 1993).

Ancak birçok Non-Newtoniyen akışkan zamana bağlı davranış gösterir. Zamana bağlı ise viskozite, $\eta = F(\gamma \text{ veya } \tau \text{ ve } t)$ olacaktır. Bu tür malzemeler Tiksotropik ve Reopektik malzeme olarak belirlenir (Yücel, 1993).

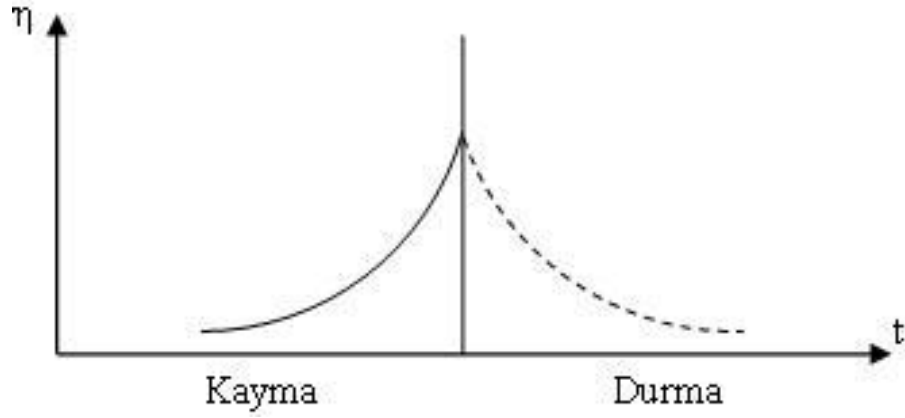
- Tiksotropi = Sabit kayma oranında tiksotropik sıvıların viskozitesinde azalma olur. Benzer olara, aynı etki ölçülen kayma gerilmesinin azalması olarak görülür. Kayma gerilmesi, aynı kayma hızında zamanla küçülür. Kayma deformasyon hızı sıfıra geldiğinde malzeme toparlanmaya başlar. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları çakışır. Belirli bir süre sonra aynı sonuçlar tekrar edilebilirdir (Bartos, 1992). Tiksotropik malzemenin akış davranışı zamana bağlıdır; kayma süresince (sabit kayma oranında) viskozite azalır, kayma durdurulduğunda yavaş yavaş toparlanır (Şekil 2.13) (Basics of Rheology, 1991).



Şekil 2.13. Zamana bağlı Non-Newtoniyen akışta tiksotropi için η -t ilişkisi (Basics of Rheology, 1991).

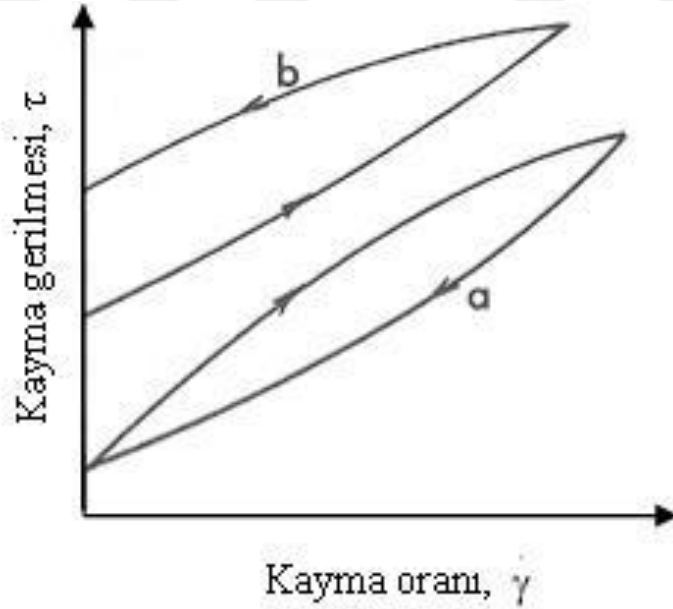
Reopektik ⁶ (Tiksotropik olmayan) = Kayma deformasyon hızının artması veya azalması çoğu kez farklı kayma gerilmelerine neden olur ve diyagramda histeresis çevrimi olarak gösterilir. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları tam olarak çakışmıyorsa yani kayma deformasyon hızı sıfır olduğunda malzeme toparlanamıyorsa malzeme reopektiktir (Bartos, 1992). Kayma oranı kaldırıldığı zaman yavaş yavaş toparlanmayı takip eden sabit kayma oranı altında viskozite artar (Şekil 2.14) (Basics of Rheology, 1991). Çimento hamuru ve harcı reopektik davranış gösterir (Özkul ve Sağlam, 2002).

⁶ Anti-Tiksotopı



Şekil 2.14. Zamana bağlı Non-Newtoniyen akışta reoeksi için η -t ilişkisi (Basics of Rheology, 1991).

Zamana bağlı Non-Newtoniyen akışın reolojisinde, bir süspansiyon kaydırıldığı zaman onun bünyesindeki yapısal uzama ve değişiminin ifadesi zamana bağlı tiksotropik bir bozulma veya reopektik bir yapılanmanın ölçüsüdür. Viskozite, tiksotropik ifade de $\dot{\gamma}$ ve t ile azalır, reopektide artar. Şekil 2.15’de tiksotropik ve reopektik bir akışın histeresis döngüsü verilmiştir (Bartos, 1992).



Şekil 2.15. Zamana bağlı Non-Newtoniyen malzemeler (a,b) için akış eğrileri (Bartos, 1992).

2.3.1.3. Akışkan ve süspansiyon

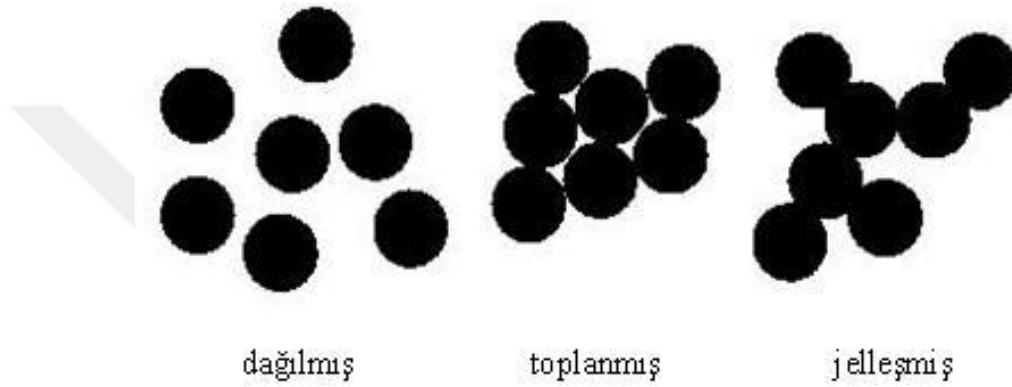
Gerçek sıvıların çoğu normal şartlar altında Newtoniyen akış davranışı gösterirler. Askıdaki katı madde konsantrasyonunun düşük veya çok ince ve üniform olarak dağılmış süspansiyonlar için benzer bir kabul yapıldığında, katı maddenin temel etkisi süspansiyonun viskozitesini artırmaktır (Özkul ve Sağlam, 2002). Katı parçacıkların süspansiyonundan oluşan akışkanda, süspansiyonun özelliklerini belirlemek, sıvının reolojik davranışını tanımlamada fayda sağlamaktadır. Süspansiyondaki katı parçaların hacim oranı ve flokülleşmiş veya aglomeralanmış (bir araya toplanmış, yığılmış) parçacıkların boyutu, süspansiyonun davranışını etkileyen iki önemli faktördür. Süspansiyondaki katıların hacim oranındaki artışı, viskozitede önemli artışa sebep olur (Leslie ve Xihuang, 2000).

Newtoniyen ve Newtoniyen olmayan süspansiyonların reolojik davranışı hakkında literatürde, bir çok teorik modeller önerilmiştir. Bu modeller, katı maddenin tanecik dağılımını, boyutunu ve şeklini hesaba katarlar ve çoğu modeller belirli testlerden elde edilen eğrilere modellerin uydurulması sonucu elde edilen parametrelere dayanırlar. Sıvının yapısı ile reolojik davranış arasında korelasyon kurmak çok zordur. Örnek olarak kayma eşiğinin varlığının, katı taneciklerin mekanik olarak kilitlemesi veya tanecikler arası çekim nedeni ile olup olmadığının belirlenmesi verilebilir (Özkul ve Sağlam, 2002).

Test sırasındaki kayma gerilmesi ve deformasyon oranı, askıdaki katı madde taneciklerinin dağılımını etkileyebileceğinden, yoğun süspansiyonların reolojik parametrelerini ölçmek zordur.

Akışkan davranışının etkilendiği diğer faktör, dağılı veya flokülleşen parçacıkların boyutudur. Anında flokülleşebilen kolloideal parçacıklar için (1 μm den daha düşük çapta) flokülasyon özellikle önemlidir. Şekil 2.16'da ya farklı toplanmalardan (kümeleşmeden) ya da jelden (sürekli oluşan üç boyutlu ağ) flokülleşen parçacıklar gösterilmiştir. Çoğunlukla kuvvetler oldukça zayıftır ve kayma tarafından kolayca koparılır. Böylece süspansiyonda ki akış başladığında flokülleşmiş ağın bozulmasına sebep olan yeterli gerilme uygulanabilir. Çoğu kez bu bozulma akma gerilmesinde

tamamlanamaz, bu yüzden süspansiyon akışkan olmasına rağmen hala biraz flokülleşir ve bu kalan flokülasyon gerinme oranı daha fazla arttıkça aşamalı olarak bozular. Genellikle tiksotropi ile beraber pseudoplastik davranış bu durumda üretilir, sabit gerilme seviyesinin uygulandığı viskozitedeki azalma ilerler ve tersinirdir. Genellikle akma gerilmesine ifade eden pseudoplastik davranış ile aynı seviyedir. Bu durumda yüksek kayma oranları, yüksek veya düşük lineer eğriden sıfıra geri dönen ekstrapolasyonla belirlenir (Leslie ve Xihuang, 2000)



Şekil 2.16. Süspansiyonun mikroyapısı (Leslie ve Xihuang, 2000).

Yeterli yüksek yoğunluğa rağmen az bir miktar akma gerilmesi ile pseudoplastik davranışı oluşturan, dağılmış süspansiyon genellikle Newtoniyen davranış gösterir. Böylece akma gerilmesi ve viskozite hem flokülasyonun derecesine hem de yoğunluğa bağlıdır. Dağılmış süspansiyonlarda akma gerilmesi yoğunlukla artar; akışta parçacıkların toplanmasını sınırladığı için dağılmış süspansiyon yüksek yoğunlukta plastik davranış gösterir. Hem yüksek yoğunluk hem de flokülasyon, dağılmış süspansiyon ile flokülleşmiş süspansiyon arasında zor ayırt edilebilen pseudoplastik veya plastik davranışa sebep olur.

Akış davranışını etkileyen bir tek faktör yoktur. Akışkan sıcaklığa duyarlıdır. Su, polimerik akışkanlığa tamamen duyarlı olabilmesine rağmen sıcaklığa duyarlı olmaz. Bu yüzden suyun dışındaki sıvıların viskozitesi küçük atmosferik basınçlarda, genellikle basınç artışı ile viskozite artar (Leslie ve Xihuang, 2000). Sıcaklık arttıkça viskozite katsayısı düşer, süspansiyon konsantrasyonu arttıkça viskozite artar. Newton sıvılarının viskozitesi büyük oranda sıcaklığa, daha az oranda da basınca bağlıdır. Bu

nedenle sonuçlar değerlendirilirken bu özellikler dikkate alınmalıdır (Özkul ve Sağlam, 2002).

Reolojik araştırmalarda kurucu davranış olarak kayma oranı ile gerilme arasındaki ilişki tanımlanır. Birkaç reolojik parametre ile kimyasal bileşim, mikro yapı ve moleküler yapı gibi malzeme bakış açılarıyla akış davranışı arasındaki genel ilişkileri daha kolay belirlenebilir. Bilhassa daha karışık Non-Newtoniyen davranışlarda örnek modeller ile akış davranışının anlaşılması mümkün olabilir. Ancak bu modellerin bir kaç çimento pastası için uygulanabilir (Leslie ve Xihuang, 2000). Çizelge 2.5'deki denklemler genellikle süspansiyonun akışını tanımlanmada kullanılır.

Çizelge 2.5'de verilen Einstein denkleminde viskozitedeki katı hacim oranının etkisini tanımlamaktadır. Einstein tarafından verilen eşitlik sadece düşük hacim oranında uygulanır ve sonradan gerçekleşir. Hacim oranını çok az yüzde de arttıktça, ön görülen viskozite de giderek artar. Einstein bağıntısına uymayan süspansiyonlar, likit fazları Newtoniyen olsa da olmasa da, Non-Newtoniyen sıvı gibi davranırlar. Davranış, akışın tipine bağlıdır. Newtoniyen davranış, düzensiz şekillerde olsalar da tanecikler arası tek yönlü kararlı akım olması ve taneciklerin yönlendirilmiş ve aralarındaki çekim azaltılmış olması durumunda yüksek konsantrasyonlara ulaşır. Yeterli konsantrasyonda katı fazı olan basit bir Newtoniyen sıvı, kayma eşiği ve değişik tiplerde Non Newtoniyen davranış gösterebilir (Leslie ve Xihuang, 2000).

Çizelge 2.5. Süspansiyon konsantrasyonu için viskozite ile ilgili denklemler (Ferraris, 1999).

Denklem ismi	Denklem	Hipotez
Einstein	$\eta = \eta_0 (1 + [\eta]\phi)$ $\eta = \eta_c (1 - 2.5\phi)$	Parça etkileşimi yok, süspansiyon sulandırılmış
Roscoe	$\eta = \eta_0 (1 - 1.35\phi)^{-K}$	Parça etkileşimi dikkate alınır
Krieger-Dougherty	$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right) - [\eta]\phi_{\max}$ $\eta = \eta_c \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$	Parça yığılması ve viskozite arasında ilişkili. Maksimum yığılma faktörü hesaba katılır
Money	$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - \phi / \phi_{\max}}\right)$	Maksimum yığılma faktörü hesaba katılır
Power kanunu	$\tau_{ys} = \phi^x$	Akma gerilmesi ile yoğunluk hesaba katılır. x , 2 ile 4 arasındadır.
Değişken tanımlamaları ϕ = Hacim oranı ϕ_{\max} = Maksimum yığılma faktörü ϕ_m parçacıkların bir araya toplanması için mümkün olan en büyük hacim oranıdır.		η = Süspansiyonun viskozitesi K = Sabit η_0 = Likit ortamın viskozitesi η_c akışkan fazın viskozitesi $[\eta]$ = Süspansiyonun iç viskozitesi(küreler için 2.5)

Einstein bağıntısı, oldukça seyreltik konsantrasyonlardaki küresel rijit taneciklerin süspansiyonunun viskozitesini tahmin eder. Asılı taneciklerin arasında etkileşim olduğunda bu bağıntı kullanılamaz. Etkileşim değişik biçimler alabilir. Tanecikler arasında itme ve çekme oluşabilir veya taneciklerin şekilleri akış sırasında birbirine bağlanmasına (kilitlenmesine) yol açabilir. Asılı taneciklerin (örneğin lifler) şekli ve yönü değişebilir ve lifler gibi anizometrik tanecikler muhtemelen asal gerilmeler doğrultusunda yönlendirilir. Gerilme ve deformasyon oranının gradyanları askıdaki madde dağılımını etkileyebilir. Taneciklerin konsantrasyonu çok yüksek olduğunda, sıvı çoğunlukla kompozit bir malzeme olarak düşünülür ve viskozite yerine kayma modülü hesaplanır (Özkul ve Sağlam, 2002).

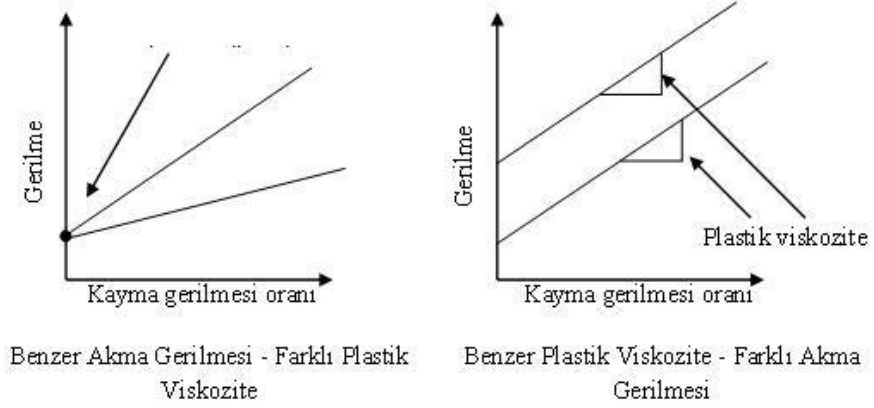
Hacim oranı ve viskozite arasındaki ilişkiyi daha iyi tanımlayan denklem Krieger ve Dougherty tarafından verilmiştir. Bu eşitlik genellikle kolloideal süspansiyonda kullanılır. Maksimum hacim fraksiyonu gelişigüzel doldurulmuş kapalı küreler için

%65'tir. İçsel viskozite $[\eta] = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\eta/\eta_c - 1}{\phi}$ küresel parçacıklar için 2,5, küre olmayan parçacıklar için ise daha yüksektir. $\phi \rightarrow \phi_m$ olarak gözlenen viskozitedeki önemli artışı Krieger-Dougherty daha doğru ön görmektedir. Krieger-Dougherty'ye göre yoğunluk ile viskozite artar. Akma gerilmesi yoğunluk artarken de artar. Bu ilişki genellikle power kanunu kullanılarak tanımlanabilir. Akma gerilmesi, flokülasyona neden olan iç kuvvetlerin (parçacıklar arası) uzaklığına da bağlıdır. Zayıf flokülleşmiş süspansiyon için, yoğunluğun etkisi ve parçacıklar arası kuvvetler birleştirilebilir (Leslie ve Xihuang, 2000).

Katı parçacıkların hacim oranı artarsa süspansiyondan çok hamur, macun, harç gibi elde edilen karışımlarda viskoz davranış Bingham ifadesi ile tanımlanmaya çalışılır (Yücel, 1993).

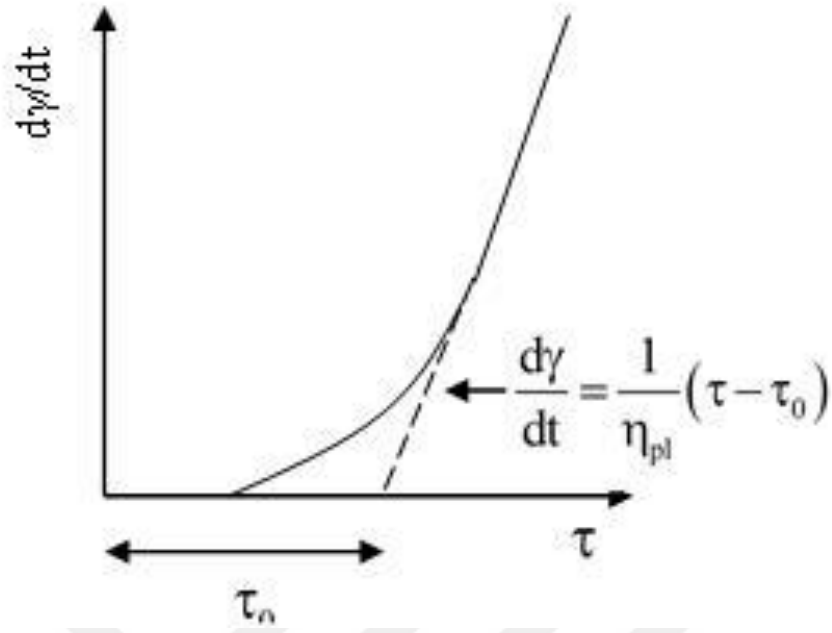
Taze beton akışkan malzemedir. Beton, gerçekte viskoz sıvısı (çimento pastası) içinde katı parçacıkların (agregaların) süspansiyonunun yoğunlaştırılmışıdır. Bileşenleri reolojik davranışı ve dolayısıyla betonun sertleştikten sonraki dayanımını etkiler. Çimento pastasında, sıvı (su) içindeki çimento tanelerinden oluşan akışkan homojen değildir. Taze beton, viskoz bir sıvı varsayılarak incelenir. Bu simülasyon çok kuru betonlar için doğal olarak anlam taşımaz. Bu nedenle reolojik parametrelerin kontrolü ve ölçülmesi kaliteli betonun üretilmesinde çok önemlidir (Leslie ve Xihuang, 2000; Ferraris, 1999; Yücel, 1997).

Betonun reolojik davranışı Newton sıvısından farklıdır, çimento pastasının plastisitesi ve viskoelastisitesi gibi reolojik davranışları ile ilişkilidir. Taze betonu, çimento pastası ile temsil edilen likit ortamdaki agrega dispersiyonu olarak varsaymak uygulamada yaygındır. Çimento pastasının kendisi, sıvı ortamdaki (su), katı taneciklerin (çimento) süspansiyonu olduğundan, taze betonu çok fazlı bir malzeme olarak varsaymak daha uygundur (Özkul ve Sağlam, 2002). Şekil 2.17'de aynı betonun iki ayrı parametrede değişimi gösterilmiştir. Bu betonların akış davranışları çok farklı olabilir. Bu yüzden kullanılan test, en az bu iki faktörün ölçülmesiyle betonun akışını tanımlayacağı için önemlidir (Ferraris, 1996; 1999).



Şekil 2.17. Beton reolojisi kavramı (Ferraris, 1999).

Ortamda ilk dönme hareketinin başlaması için uygulanan kayma gerilmesinin belirli bir değere varması gerekir, bu sınır değere “kayma eşiği” veya “akma gerilmesi” (τ_0) adı verilmektedir. Şekil 2.18’de gösterildiği gibi kil, çimento hamuru ve beton gibi malzemelerde kayma hareketinin başlayabilmesi için belirli τ_0 (kayma eşiği) değerinin aşılması gerekmektedir (Özkul ve Sağlam, 2002). Ayrıca $\frac{d\gamma}{dt}$ ve τ arasındaki bağıntı başlangıçta doğrusal değildir, artan şekil değiştirme hızı ile azalan bir kayma direnci gösteren (tikotropik) bir eğri formundadır. Akma değerinin üzerinde Bingham eğrisi lineerdir. Eğri basitleştirilerek doğrusal bölümü uzatılırsa bağıntı, tümüyle doğrusal hale getirilebilir. Bu durumda viskozitede tek bir değere indirgenmekte ve plastik viskozite adını almaktadır. Bu davranışa uyan cisimlere reoloji biliminin kurucusu olan Bingham’ın adı verilmiştir. Şekil 2.18.’de Bingham sıvısının diyagramı gösterilmiştir (Yücel, 1997).



Şekil 2.18. Taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham sıvısı (Yücel, 1997).

Çimento içeren akışkanların akış eğrisinin özelliklerini tanımlamak için literatürde bir çok farklı kalitatif (nitel) ve kantitatif (nicel) matematiksel yaklaşım vardır. Genel olarak bu formülasyonlarda bir uzlaşma olmamasına rağmen ortak ilişki akma gerilmesinin varlığıdır (Banfill, 2003). Beton gibi süspansiyon yoğunlaşması için birçok denklem kullanılır, kayma oranı için kayma gerilmesi veya viskozite için süspansiyon yoğunluğu bağıntısı anlatılmaya çalışılır, böylece bütün sistemin viskozitesi için tek bir değer olduğu varsayılır (Ferraris, 1999). Çizelge 2.6'da en çok kullanılan denklemler verilmiştir.

Çizelge 2.6'da verilen Casson modeli, danelerin uzunluğuna bağlı, daneler arası iç kuvvetler ve kayma gerilmelerinin olduğu belirsiz zincirlere ayrılmış olan dane kümelerinden alınmıştır. Zincirler arasındaki iç kuvvetlerin hesaplanmasından ötürü çok yoğun süspansiyonlarda geçersizdir.

Robertson-Stiff ifadesinde $C=1$ için denklem Bingham ifadesine dönüşmekte ($\tau_0 = A \cdot B, \eta = A$), diğer yandan $B=0$ için Power yasasına uymakta, $B=0$ ve $C=1$ içinse Newtoniyen sıvılar için geçerli ifadeyi vermekte, incelendiğinde bu ifadeler arasında kullanılan parametreler arasında büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Ancak

Bingham modeli dışında bu teorik formülasyonların beton teknolojisinde uygulanmasının kolay olmadığı ve pratik bir yarar sağlamayacağı açıktır (Yücel, 1997).

Atzeni vd. (1985) çeşitli denklemleri karşılaştırmışlar ve çimento pastası gibi yoğunlaştırılmış süspansiyon için en uygun denklem olan Eyring denkleminde değişiklik önermişlerdir. Ancak Eyring denkleminin parametreleri fiziksel değer değildir ama uygun değişkendir. Böylece, bu parametreler bağımsız olarak ölçülemez veya modellenemez ama alışagelmış en uygun hesaplamaadır. Bununla birlikte bu model akma değeri terimini kapsamadığından dolayı hareketli iletim kavramını açıklamak için kullanılabilir.

Çizelge 2.6. Kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili denklemler (Ferraris, 1999, Yücel, 1997; Yahia ve Khayat, 2001).

Denklem ismi	Denklem
Newtoniyen	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$ düşük kayma oranlarında çimento süspansiyonunun davranışını tanımlar.
Herschel ve Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$ koni ve plaka viskozimetrelerde uygun sonuç vermiştir. $\tau_0 = 0$ ve $n=1$ için Newton, $n=1$ için Bingham, $\tau_0 = 0$ için Power
Power denklemi	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$ Newtoniyen akışı $n > 1$ Kayma kalınlaşması $n < 1$ Kayma incelmeleri
Vom Berg, Ostwald-de Waele	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} \left(\dot{\gamma} / C \right)$
Eyring	$\tau = a \cdot \sinh^{-1} (b \cdot \dot{\gamma})$ a, b; sabit. akma değeri içermez, büyük kayma oranlarında lineer bağımlılık verir.
Robertson-Stiff	$\tau = a \left(\dot{\gamma} + B \right)^C$ B: kıvama değeri, A, C: Power yasası değerleri C=1 için $\tau = A (\dot{\gamma} + B)$ (Bingham) B=0 için $\tau = A \dot{\gamma}^C$ (Power) B=0, C=1 için $\tau = A \dot{\gamma}$ (Newton)
Atzeni vd.	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$
Sisko	$\tau = a \cdot \dot{\gamma} + b \cdot \dot{\gamma}^c$ $c < 1$ a= sonsuz kayma oranı için uygun b, c= değişken
Geliştirilmiş Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^n$
Casson	$\tau = \tau_0 + \eta_{\infty} \cdot \dot{\gamma} + 2(\tau_0 \cdot \eta_{\infty})^{1/2} \cdot \dot{\gamma}^{1/2}$
De Kee	$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} e^{-\alpha \dot{\gamma}}$
A. Yahia, K.H. Khayat	$\tau = \tau_0 + 2\sqrt{\tau_0 \eta_{pl}} \sqrt{\dot{\gamma} e^{-\alpha \dot{\gamma}}}$ α = zamana bağlı parametre, c= sabit
Değişken tanımlamaları	η = Viskozite $\dot{\gamma}$ = Kayma oranı A, a, B, b, C, K, α , β , δ = Sabit
n; Newtoniyen davranıştan sapmayı gösteren power indisi'dir. N, kayma pseudoplastik sistemler için 1 den küçüktür.	

Yukarıdaki denklemlerin tümünde (Newton'un akış kanunundan hariç tutulması ile) kullanılan ve akışta tanımlanan en az iki parametrenin olduğu temel sonuçtur. Beton gibi yoğunlaştırılmış süspansiyonlarda akma gerilimi vardır. Fiziksel ana prensip, akma gerilimi ile var olan en az iki parametre, Herschel-Bulkley ve Bingham denklemleridir. Herschel-Bulkley denklemleri üç parametre içermektedir. Bunlardan biri olan n fiziksel varlığı simgelememektedir. KYB'lar gibi belirli betonlarda davranış en iyi tanımlayan denklemdir. Bununla birlikte çoğunlukla bu gün kullanılan denklem Bingham denklemidir. Kullanılan parametreler bağımsız ölçülebilen faktör olduğu için ve takibinde görülen gerçek betonun akışı olduğundan birçok durumda bu denklem yeterlidir (Ferraris, 1999).

Cross modelinde η_0 ve η_∞ çok düşük ve çok yüksek gerinme oranlarında viskozitenin asimptotik değeridir. Çoğunlukla pseudoplastik akışkan tanımını kullanan power kanunu denklemindeki azalma ($\eta > \eta_0$ ve $\eta < \eta_\infty$) gerinme oranının ortadaki değeridir. Şayet $m=1$ ve yalnızca viskozitenin daha aşağıdaki oranı ($\eta > \eta_0$) dikkate alınırsa, denklem Bingham modeline dönüşür.

Bingham modeli plastik davranışı tanımlarken power kanunu ve cross modellerinin her ikisi de pseudoplastik davranışı tanımlar. Pseudoplastik davranış için genel model power kanunu denklemi'dir. Pseudoplastik malzeme için daha genel modeli Cross denklemi sağlar. Herschel-Bulkley modeli, Bingham modeli ile power kanunu denkleminin bileşimidir (Leslie ve Xihuang, 2000).

Bunlara ilave olarak reolojik parametreler için malzemeye göre değişen bir çok sayısal değerler verilmiştir. Bunun nedeni farklı deneysel teknik ve cihazlardan kaynaklanmaktadır. Deney anındaki kayma farklılıkları, viskozimetrelerin düzgün yüzeylerindeki fark edilemeyen tıkaç akış ve kayış mesafeleri, elde edilen verilerdeki farklılıklara neden olabilir. Çimento pastasının etkileyen deneysel parametrelerin çok olması reolojik verilerin elde edilmesini zorlaştırır. Pastanın içerdiği (su/çimento oranı veya % katı), çimento türü (yada bileşimi) ve inceliği, kullanılan katkı türü (mineral, kimyasal ve fiber) ile sıcaklık ve zamanın etkisi araştırmalarda göz önünde bulundurulmalıdır. Çimento tabanlı malzemelerin akışında birçok önemli etken vardır.

Mukavemetlerinin gelişmesi ve sertleşmeleri sürecinde kendi ağırlığı altında akmaksızın durabilirler. Ölçüm tamamlanmadan sertleşme olacağından çimento tabanlı sistemler için uzun zaman diliminde yapılan ölçümler uygun değildir. Katıya benzer davranış gösteren malzemeleri açıklayan en kolay analiz Bingham modelidir (Banfill, 2003).

Taze betonun temel reolojik parametrelerinin ve özelliklerin hesaplanmasında kullanılan reolojik eşitlikler, bir takım kabullere dayanmaktadırlar.

- Süreklilik: malzemenin herhangi iki noktası arasında hiçbir kesikliği olmamalıdır.
- Homojen Karışım: Malzeme tümüyle homojen bileşimdedir.
- İzotropik Malzeme: Malzemelerin bütün doğrultularındaki özellikleri aynıdır.

Uygulamada taze betonun bahsedilen bu üç kabulü aynı anda sağlaması muhtemel değildir. Bahsedilen kabullere uyma derecesi bir beton karışımından diğerine değişmektedir. Ayrıca betonun mikro ölçekte sürekli olması muhtemel değildir.

Reolojik ölçümlerin yapıldığı malzemenin durumu da önemlidir. En yaygın olan basit kayma durumudur. Uygulamada ise bu durumla nadiren karşılaşılır. Taze beton karışımı pompalandığında, yerleştirilirken veya taşınırken, kayma dinamik ve değişkendir.

Taze beton gibi çok fazlı bir malzemenin reolojik karakteristikleri belirlenirken, uygulanan kayma şekil değiştirmesinin şiddeti de önemlidir. Çok küçük şekil değiştirmeler, büyük şekil değiştirmelerden farklı temel parametreler üretecektir. Her iki şekil değiştirme arasında oldukça geniş bir değişim alanı vardır.

Reolojik parametreler, bir gerilme verildiği veya uygulandığı zaman oluşacak olan akış veya deformasyonun miktarını veya tersine olarak belirli bir deformasyon miktarına neden olan gerilmeyi tahmin etmemizi olanaklı kılar (Özkul ve Sağlam, 2002).

Malzemede, kayma oranı akma gerilmesinden küçük ise ($\tau < \tau_0$) ise elastik katıdır, ancak daha yüksek gerilimlerde akabilir. Akma gerilmesi parçacıklar arası kuvvetlerden oluşur, ancak bu bağlar çoğu kez kayma tarafından ters çevrilemez şekilde kırılır. Ölçülen kayma gerilmesi, kayma oranı kadar önceki kayma geçmişi ve zamana bağlı bulunur.

Çimento sistemleri gibi akışkandaki katıların ayrışması, parçacıkların arası mesafenin sebep olduğu kuvvetten dolayı yoğunluğa bağlıdır. Bu kuvvetler, parçaların boyut dağılımına, şekline, yoğunluğuna, yüzey özelliklerine ve akışkanın bileşimine bağlı olarak değişir. Genellikle, bu kuvvetler parçaların yaklaşıp rasgele taşınması sonucunda flokülasyona sebep olan çekim kuvvetidir. Flokülasyonun boyutu ayrışmanın reolojisinde önemli rol oynar, akışa direncin azalması ile beraber parçacıkların flokülasyonu kuvvetli kaymayı azaltır, dispersiyonda direnç olduğu zaman çoğunlukla kayma kalınlaşması ve tekrar flokülasyon ile takip edilir. Şayet tamamen geri dönüşüm tiksotropi olarak adlandırılırsa, bu kayma zamanla oluşan mikro yapıdaki değişimle azalır. Ancak çimento sistemlerinde yapısal bozulma ve oluşturma olan iki süreç daha iyi tanımlanır.

Maksimum parça boyutu arttıkça akma gerilmesi ve plastik viskozite artar. Betondaki agrega miktarı artışı ile akma gerilmesi yüksektir. Benzer akma gerilmesindeki yuvarlak ve köşeli iri agrega içeren iki farklı betondaki plastik viskozitedeki artış, birbirine kenetlenen yüzeyler ve parçacıklar arası temas artışından dolayı kısmidir. Köşeli iri agregadan oluşan betonun plastik viskozitesi daha yüksektir. Plastik viskozitedeki artış için hesaplanan pastadaki akış direnci ve yüksek gerilme sonucunda kayma oranı da artar. Parçaların etkisi ise, kaba taneli betonlarda basit hacim etkisi ve ince taneli pastada yüzey alanı etkisidir (Banfill, 2003).

2.4. Taze Betonun İşlenebilirliğine Katkıların Etkileri

Beton karışımını oluşturmak üzere kullanılan temel malzemelerin (çimento, agrega ve suyun), betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansı arttırabilmek ve/veya betonun daha ekonomik olmasını sağlayabilmek için, karılma işleminden hemen önce

veya karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine katılan malzemeye Beton Katkı Maddesi” denilmektedir (Erdoğan, 2003; TS EN 934-2).

Beton katkı maddeleri sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılığı arttırmak amacıyla kullanılırken, taze betonda ise işlenebilme, kıvam, su ihtiyacı ve priz süreleri gibi özelliklerini istenilen yönde değiştirmek, terlemesini azaltmak, için kullanılmaktadır.

Katkı maddelerinin sağlamış oldukları bazı özellikler (Ramachandran, 1995) :

- Su/çimento oranında değişiklik yapmaksızın işlenebilirliği arttırmak
- Priz süresini ve işlenebilirliği değiştirmeksizin su ihtiyacını azaltmak
- Genleşmeleri sınırlandırmak
- Terleme, segregasyon ve pompalanabilme özelliklerini iyileştirmek
- Dayanım gelişme oranını arttırmak
- Dayanıklılığı (durabiliteyi) arttırmak
- Permeabiliteyi azaltmak
- Yeni veya eski (yaşlı) betonun donatıyla arasındaki kenetlenmeyi arttırmak
- Beton içerisindeki çeliği korumaktır.

Katkı maddeleri, kimyasal katkılar, mineral katkılar ve fiber katkılar olarak üç temel kategoriye ayrılabilir.

- Kimyasal katkılar; su içerisinde erime özelliği olan (çözünme özelliği gösteren) katkı maddelerine denir. Büyük oranda betonun su/çimento oranında düzenleme yapmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Betonun karışım suyunu azaltan katkılar,

taze betonun priz almasını geciktiren ve priz almasını hızlandıran katkıları bu grubun içerisinde yer alır.

- Mineral katkıları; betonun terlemesinin azaltılması, betonun işlenebilmesini ve akışkanlığının artırılması, bu sayede sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığını bunlara ilave olarak da ekonomikliğini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Beton yapımında genellikle kullanılan mineral katkı maddeleri; uçucu kül, silis dumanı, tras, granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikli katkı maddeleridir.
- Fiber katkıları; fiberin özelliğine göre, betondaki rötrenin azaltılması, betonda oluşan mikro-makro çatlakların oluşmasının ve ilerlemesinin önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.
- Diğer katkıları; hava sürükleyici, korozyon önleyici, nem önleyici, su geçirgenliğini azaltan, renklendirici gibi katkıları bu grup içerisinde yer alan bazı katkı maddeleridir. (Türker ve Erdoğan, 2003; Ünal vd., 2005; Yan vd., 2002).

2.4.1. Kimyasal katkıları

Genellikle sıvı halde olan bu katkıları, organik ya da inorganik esaslı olup beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir (Erdoğan, 1997).

Betonu oluşturan karışım malzemelerinin miktarı ve türüne ilave olarak su azaltıcı katkıların kullanılmasıyla katkılı betonun kıvamı katkısız betona göre çok daha fazla olabilmektedir. Bu nedenle su azaltıcı katkıları "plastikleştirici" veya "akışkanlaştırıcı" katkı maddesi de denilmektedir. Karışım suyunda azalttıkları su miktarı % 12'den az olduğu takdirde bu tür katkı maddelerine akışkanlaştırıcı katkı maddeleri, karışım suyunda azalttıkları su miktarı en az % 12 olduğu takdirde bu tür

katkı maddelerine, yüksek oranda su azaltıcı (YOSA) veya süperakışkanlaştırıcı katkı (SA) maddeleri denilmektedir (Erdoğan, 2003; Akman, 1999).

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları uygulamada en çok kullanılan ve en çok bilinen katkılarıdır. Son yıllarda yüksek performanslı betonlar genelde süperakışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak üretilmektedirler. Akışkanlaştırıcıları hava sürükleyerek, çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek ve taneleri beton içine dağıtarak etkili olurlar (Akman ve Yücel, 1996; Uyan vd., 1996; Erdoğan, 1997). Böylece çimento tanelerinin bütünüyle hidrate olmasına sebep olurlar ve suyun yüzey gerilimi azaltır, ıslatma gücünü artırır. Betoniyerde çeperlere yapışma olmaz, betonda agrega tanelerinin ayrışması minimum düzeye iner. Çimento hamuru ve agrega bağlantısı düzelir (Akman, 1996). Bu katkıları, taze betonda çimento taneleri-su ara yüzeyinde var olan fiziksel ve kimyasal kuvvetlerin etkisinin değişmesine yol açarlar. Bunun nedeni, çimento tanelerini kaplayan yüzey-aktif maddelerin, çimento tanelerinin negatif elektrikle yüklenmesini ve birbirlerini iterek taze beton içinde kolayca yayılmalarını sağlamalarıdır. Çimento taneleri arasındaki bu negatif elektrik yükü çimento tanelerinin bir su tabakasıyla kaplanmasını sağlar ve böylece bu oluşum beton karışımında çimento tanelerinin homojen dağılmasına neden olur. Çimento tanelerinin bu şekildeki hareketi, taze betonun işlenebilirliğinde önemli bir iyileşmeyle sonuçlanır (Uchikawa vd., 1997; Erdoğan ve Kurbetci, 2003).

SA'lar organik polielektrolit ve polimerik dispersantlar (dağıtıcılar) olup, kimyasal birleşimlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler;

1. Sülfone edilmiş sentetik polimerler
2. Karboksile edilmiş sentetik polimerler
3. Karma işlevli edilmiş sentetik polimerler

Birinci grubun en önemli ve tanınan örnekleri sülfone naftalen formaldehit kondansesi (SNF) ve sülfone melamin formaldehit kondansesi'dir (SMF). İkinci grup akışkanlaştırıcıları polikarbonatlar olarak adlandırılmaktadır. Bunlar polikarboksilat

polimerler ve özellikle poliakrilat'lardan meydana gelmiştir. Üçüncü grup SA'lar, kimyasal yapılarında farklı anodik ve polar fonksiyonlara sahiptirler. Aminosülfat ve modifiye linyosülfonatlar bu gruba örnek gösterilebilir.

YOSA'ların betona katılması ile betonun reolojik özelliklerinden kayma eşiğinde azalma etkisi görülmektedir. Bu katma sırasında betonun plastik viskozitesi de azalabilir veya bazı durumlarda artabilir. Halbuki karışıma işlenebilmeyi artırmak üzere sadece su katılması durumunda bu reolojik sabitlerin her ikisi birden düşecektir. Bu gözlemler, taze betonun stabilitesi açısından çok önemlidir. Örneğin pompa betonunu ele alırsak, kayma eşiğinin azaltılması ile betonun pompalanmaya başlaması için gerekli ilk basınç azalacaktır. Ancak öte yandan plastik viskozitenin azaltılması sayesinde boru çeperlerindeki sürtünmeler azalacak ve beton daha düşük bir güçle pompalanacaktır; fakat plastik viskozitenin aşırı azalması sonucu borularda ayrışma nedeniyle blokaj tehlikesi doğacaktır.

Betonun akıcılığı için su yerine YOSA kullanılması durumunda plastik viskozitede avantaj elde edildiği kesin olmamakla beraber, pek çok araştırmacı YOSA'ların plastik viskoziteyi düşürdüğünü öne sürmektedir. Bundan dolayı, YOSA kullanımında ayrışmayı önlemeye yönelik bazı yöntemler geliştirilmektedir (Akman, 1999).

2.4.2. Mineral katkı maddeleri

Beton teknolojisinde mineral katkı maddeleri, doğal veya yapay yollarla elde edilen ince taneli ve puzolanik özelliği olan katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. En çok bilinen doğal puzolanlar; volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıtılmış çamur ve şeyler ile diatomitli topraklar, yapay puzolanlar ise; uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu vb. katkı maddeleridir (Erdoğan, 2003).

Bu maddeler çimentonun bir kısmı ile yer değiştirildiğinde ekonomik faydalar sağlamaktadır. Ekonomik yararları yanında taze betonun işlenebilmesini arttırmak, terleme ve segregasyonu azaltmak, hidrasyon ısısını azaltmak, su geçirgenliğini azaltmak, nihai dayanımını arttırmak, sülfata karşı dayanıklılığı arttırmak gibi betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de iyileştirmektedirler. Artık günümüz

standartlarında bunlar için mineral katkı terimi terk edilerek “bağlayıcı maddeler” (cementitious materials) adı kullanılmaktadır. Bu mineral katkıların beton üretiminde değerlendirildiklerinde, işlenebilirlik sorunlarının aşılması için kimyasal katkılarla beraber kullanılmaları kaçınılmaz olmaktadır.

Artık vibrasyonsuz ve herhangi bir sıkıştırma işlemi istemeyen kendiliğinden yerleşebilen akıcı beton üretme çabaları gündeme getirilmekte, fakat bunlarla beraber çökme kaybı ve segregasyon sorunları yani işlenebilirlik problemi çözüm beklemektedir. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak üretilen betonların segregasyon olasılığı düşünüldüğünde ilk akla gelen önlem, beton karışımında ince tane miktarını artırarak kohezyonu geliştirmektir. İnce taneli malzeme eylemsiz taşınu olabileceği gibi sertleşmiş halde betona ek nitelikler kazandıracak ince taneli puzolanik maddeler olabilir ve bu çözüm daha doğru ve yararlıdır. Bu şekilde mineral katkıların süperakışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılmaları neticesinde yüksek performanslı betonlar üretilebilmektedir. Sertleşmiş beton aşamasındaki yararlarına karşılık taze beton aşamasında mineral katkıların SA ile uyumları açısından sorunları bulunabilmektedir.

Puzolanik maddeler C_3A ve C_4AF gibi su moleküllerini hızlı adsorbe ederlerse, SA'nın etkinliğini azaltabilir ve özellikle çökme kaybını hızlandırabilirler. Yalnız bu varsayım tartışmalıdır, zira puzolanik etki uzun süre sonunda ortaya çıkar ve mineral katkıların taze haldeki etkisi, YFC dışında, incelikleri ve geometrik şekillerinin fonksiyonudur (Yücel, 1997).

2.4.2.1. Uçucu küller

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75 - %80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli (0,5-150 mikron) küllerdir. Bu kül taneciklerinin baca gazları ile

sürüklenmeleri nedeniyle “uçucu kül” olarak adlandırılmaktadır. Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 no.lu standard, uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir. Ayrıca, % 10'dan daha az CaO içeren uçucu küller, “düşük kireçli uçucu küller”, %10'dan daha çok CaO içerenler ise, “yüksek kireçli uçucu küller” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan, 1997; Al-Harthy vd., 2004).

Bu gün Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup, bu santrallerden yılda toplam 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir. Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur: İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik yani bağlayıcılık özelliği gösterirler. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO, S_3 alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır (Türker ve Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60 - %90’ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde, mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir. Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5’i (hacminin %20’si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan

oluşmaktadır. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları, ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadırlar. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 - %50'si civarında değişebilmektedir.

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Çimento ağırlığının % 20 – 30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacına yaklaşık % 7'si kadar daha az su kullanılmaktadır. Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır. Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır. Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır yani uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır;

1. Uçucu külün yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacime sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.
2. Uçucu kül taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır.

Bazen, betondaki çimentonun azaltılan bölümü yerine kullanılan uçucu küle ek olarak, ince agreganın bir bölümünün yerine de uçucu kül kullanılmaktadır. Bu tür betonların pompalanabilirliği daha da artmaktadır (Erdoğan, 1997; 2003).

2.4.2.2. Silis dumanı

Son yıllarda beton üretiminde yaygın bir biçimde kullanılan başka bir mineral katkı maddesi de silis dumanıdır. Ferrosilikon veya metalik silikon alaşımının yapımında yan ürün olarak elektrik ark ocakları tarafından, çok ince kristalize olmamış silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Bu malzeme “mikrosilis” veya “silis tozu” ya da “silica fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan SiO gazı fırının üst bölümlerinde okside olup hızla soğuyarak amorf silis haline gelir ve Sd bileşiminin büyük bölümünü oluşturur. Baca tozu olarak özel filtrelerde tutulup toplanan Sd'nın çoğunlukla küresel olan tanelerinin ortalama çapları 0,1 mikron'dur. Silis dumanının boyutu, çapı 0,1 µm ve 0,2 µm arasındaki parça boyutu olan Portland Çimentosundan 100 kez daha düşüktür. % 85 ile 98 oranında SiO₂ içermesi ve çimento ile uçucu küllerden çok daha ince oluşu sebebiyle Sd çok aktif puzolaniktir ve volkanik küller gibi reaktiftir. Betonda granülometriyi bir miktar iyileştirmesine rağmen, katkı miktarına bağlı olarak artan toplam tane yüzey alanı belirli bir kıvam için gerekli su miktarını da arttırır. Bu nedenle Sd'nın beton teknolojisinde kullanımı ancak süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddelerinin geliştirilmesinden sonra yaygınlaşmıştır (Deborah, 2001; Ekinci ve Yeğınobalı, 1996).

Silis dumanı, amorf yapıya sahip olduğundan, çok ince taneli malzeme olduğundan ve yüksek miktarda SiO₂ içerdiğinden, mükemmel bir puzolanik malzemedir. Diğer puzolanik malzemeler gibi kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirildiği takdirde, hidrolik bağlayıcılık göstermektedir. Silis dumanındaki “SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃” miktarının yüksek olması, puzolanik aktivitenin daha iyi olmasına yol açmaktadır.

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık ağırlıkça %7 - %10 azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO₂ içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması (0,1 - 0,2 µm,

özgül yüzeyi 130.000 – 280.000 cm²/g), taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını arttırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında, ayrıca su azaltıcı kimyasal katkı maddesi de kullanılmaktadır (Erdoğan, 1997; 2003).

Silis dumanı, gerek çok ince taneli olmasıyla beton içerisindeki boşlukları azaltması (dolgu etkisi yaratması) ve gerekse puzolanik aktivitesinin çok yüksek olması nedeniyle betonlarda yüksek dayanımlar elde edilebilmesine yol açmaktadır. Ayrıca silis dumanı ihtiyaç duyulan mukavemet, modül ve düktülideyi artırır. Kuruma rötresini, su ve klorür iyonlarının geçirgenliğini azaltır; donma-çözülme sıcaklık döngüsünde durabiliteyi artırır (Erdoğan, 1997; Deborah, 2001).

Beton teknolojisindeki gelişmeler mineral ve kimyasal katkıların bulunması beton özelliklerinin, özellikle işlenebilmenin ölçülmesini gerekli kılmaktadır. Mineral ve kimyasal katkıların betona kazandırdığı özelliklerin doğru tespit edilmesi, beton özelliklerine etkisinde uygun kriteri sağlayacaktır. Böylece taze haldeki özellikleri belirlenen beton, prizini aldıktan sonra bu katkıların kullanılmasıyla amaçlanan yüksek performanslı beton özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır. Mineral ve kimyasal kökenli katkıların beton kullanım ömrünü arttıracak ve dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı durabil beton üretimini sağlayacaktır. Bu nedenle işlenebilmenin taze beton parametreleri ile açıklanması ekonomik ve durabil yüksek mukavemetli beton elde edilmesinde temel parametre olacaktır. Çizelge 2.7’de akışkan ve yüksek performanslı beton elde etme yöntemi özetlenmiştir.

Çizelge 2.7. Akışkan yüksek performanslı beton elde etmenin iki yolu (Ferraris, 1999; Akman, 1999).

Çimento tanelerinin flokülasyonunun azaltılması	Gradasyonun iyileştirilmesi
Plastikleştirici vb. 1. Sülfone edilmiş sentetik polimerler <ul style="list-style-type: none">• Melamin formaldehit sülfonat• Naftalin formaldehit sülfonat 2. Karboksile edilmiş sentetik polimerler (polikarbonatlar) <ul style="list-style-type: none">• Polikarboksilat polimerler• Özellikli poliakrilat’lar	Bağlayıcı ve dolgu katkıları: <ul style="list-style-type: none">• Silis dumanı• Uçucu kül• Yüksek fırın cürufu• Kalker kökenli katkıları• Agreganın granülometrisinin iyileştirilmesi

3. Karma işlevli edilmiş sentetik polimerler (kimyasal yapılarında farklı anodik ve polar fonksiyonlara sahip katkılar) <ul style="list-style-type: none"> • Aminosülfat • Modifiye linyosülfonatlar 	
--	--

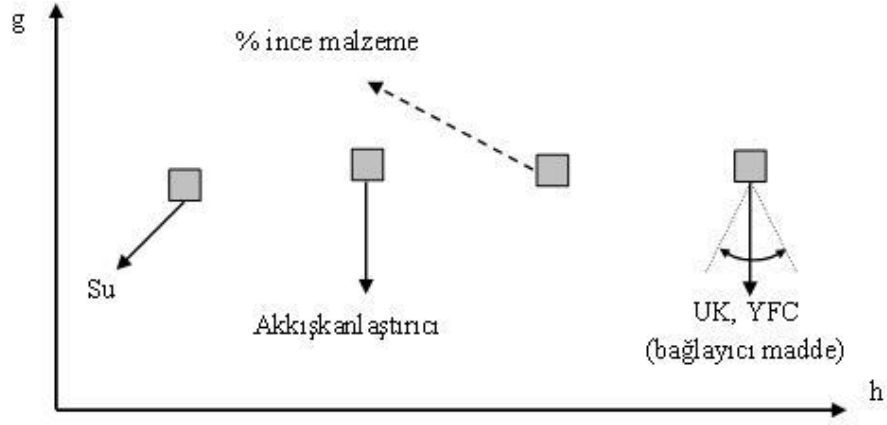
Yücel (1997), UK, Sd ve YFC içeren süperplastifiye betonların işlenebilmeleri ve işlenebilme kayıpları üzerine yapılan araştırma sonuçları Çizelge 2.8’de görüldüğü gibi özetlenmiştir.

Çizelge 2.8. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkileri (Yücel, 1997).

UK	işlenebilmeyi azaltır (-)	işlenebilme kaybını azaltır (+)
Sd	işlenebilmeyi artırır (+)	işlenebilme kaybını azaltır (+)
YFC	işlenebilmeyi artırır (+)	işlenebilme kaybını artırır (-)
(+:pozitif etki, -:negatif etki sağlar)		

Yalnız bu çizelge ihtiyatla kabul edilmelidir. Mineral katkı kalitesi ve miktarı, SA ve çimento ile uyumları bu etkileri farklı kılar. Tattersall’ın taze beton için önerdiği denklemden alınan g (kayma eşiği) ve h (plastik viskozite) reolojik sabitleri üzerinde betonun bileşenleri ve kullanılan kimyasal katkıların etkileri Şekil 2.19’da verilmiştir. Buradan şu değerlendirmeler yapılabilir.

- Suyun artırılması ve diğer bileşenlerinin sabit tutulması g ve h değerlerini azaltır.
- Akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı ilavesinde g azalır. SA’ların akma değeri üzerindeki etkisi oldukça çarpıcıdır. Plastik viskozite ve karışımın kohezyonu değişmezken akış özellikleri artar.
- İnce/kaba agrega oranının artışı g’nin artışına, h’ın düşmesine neden olur. Bazı karışımlarda zıt etki gözlemlenebilir.
- Çimento ile uçucu kül veya yüksek fırın cürufunun yer değiştirmesi genelde g’yi azaltabilir fakat h’ı artırır veya azaltır, bu karışım oranlarına bağlı değişecektir (Yücel, 1997).



Şekil 2.19. Beton bileşenleri ve bağlayıcı maddelerin g ve h üzerindeki etkileri (Yücel, 1997)

2.5. Önceki Çalışmalar

Cullen ve West (2004), betonun işlenebilirliğini akma gerilmesi ve plastik viskoziteye göre tanımlamanın laboratuvarlarda yapılabildiğini, beton üretim yerinde ise pratikliği, ucuzluğu ve kolaylığı açısından yaygın olarak kullanılan çökme deneyi ile akma gerilmesinin korelasyonunun olmasına karşılık plastik viskozite ile ilgili ilişkinin bulunmadığını belirtmişlerdir. Yazarlar, Tattersall'ın iki nokta işlenebilirlik cihazı prensiplerine göre çalışan, elde taşınabilen ve uygulaması pratik olan TCD iki nokta işlenebilirlik reometresinin tasarım ve teknik özelliklerini tanımlamışlardır. Geliştirdikleri cihazın çökme yayılması deneyi ile de ilişkili sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Banfill vd. (2000), BML, Btrheom, Camegraf-Img, IBB ve İki Nokta reometrelerinin analitik ve deneysel değerlendirmelerini yapıp ürettikleri aynı tür (belirli çökme değerindeki 90-235 mm) betonlar üzerinde çökme yayılması, geliştirilmiş çökme değerleri ile kayma eşiği ve plastik viskozite ölçümlerini karşılaştırmışlardır. Bu reometrelerin akma gerilmesi değerlerinde en yüksek korelasyonu Camegraf-Img ile İki Nokta (0,99), en düşük korelasyonu BML-IBB (0,81) göstermesine karşılık plastik viskozite değerlerinde en iyi korelasyonu Camegraf-Img ile hem IBB hem de BML (0,98), en düşük korelasyonu ise İki Nokta-BML (0,45) ve İki Nokta-IBB (0,52) göstermiştir. Kullanılan reometrelerin farklı geometri ve aralıktan olduğundan,

Bingham değerlerini farklı verildiği belirtilmiştir. Tüm reometrelerin çökme ile kayma eşiği değerleri ilişkisi iyi olduğunu, geliştirilmiş çökme ile viskozite arasında ilişki olmadığı belirlenmiştir. Viskoziteyi en yüksek değerde IBB, en düşük değerde ise iki nokta işlenebilirlik cihazı ile belirlemiştir. Yazarın kullandığı tüm reometreler eksenel dönen reometreler olmasına karşılık, BML ve CEMAGRAF-IMG koaksiyel (eşeksenli), BTRHEOM paralel plakalı, IBB ve İki nokta işlenebilirlik cihazı kanatlarla karıştırma hareketlidir. Yazar, KYB'leri de kapsayan karışımlar kullanarak, farklı viskozite değerinde, farklı agrega boyut ve şeklinde (köşeli ve yuvarlatılmış), reolojik ve reometreler için standart kalibrasyon sıvısının geliştirilmesi için deneylerin yapılması gerektiğini önermiştir.

Baoju vd. (2000), farklı oranlarda uçucu kül ve % 1,5 oranında naftalen sülfonat formaldehit içeren SP betonların çökme kayıplarını ve basınç mukavemeti değişimini incelemiştir. Uçucu kül içeren betonlarda, yüksek çökme ve basınç mukavemeti, düşük çökme kaybı ve kuruma rötresi oranı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca uçucu küllü betona katılan SP'nin tipi ve katkı ilave metodunun, çökme kaybının azaltılmasında önemli derecede etkili olduğunu vurgulamışlardır. Uçucu kül içeriği arttıkça priz süresi de uzamaktadır. Yazarlar, yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemeti düşük ve kuruma rötresi büyük olduğunu, ancak 14 günlük kuruma rötresi standart betona göre düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Beaupré vd. (2003), BML, Btrheom, IBB, Taşınabilir IBB, ve İki nokta reometrelerin kullanarak aynı tür (belirli çökme değerindeki 121-248 mm) harç ve betonlar üzerinde çökme yayılması (yayılma çapı ve T50 zamanı), V Huni ile kayma eşiği ve plastik viskozite ölçümlerini analitik ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Plastik viskozitenin, çökme ve çökme yayılması değerleri arasında korelasyonun düşük, T50 zamanı ve V Huni ile ise iyi olarak gözlemlenmiştir. Kullanılan reometreler içinde akma gerilmesi değerlerinde en yüksek korelasyonu, Taşınabilir IBB ile BML (0,98) ve IBB arasında (0,97), en düşük korelasyonu ise IBB-BTRHEOM (0,84) ve BTRHEOM-İki Nokta (0,86) göstermesine karşılık, plastik viskozite değerlerinde en iyi korelasyonu İki Nokta-Taşınabilir IBB ile IBB-İki Nokta (0,90), en düşük korelasyonu ise İki Nokta-BTRHEOM (0,30) ve BTRHEOM hem Taşınabilir IBB hem de IBB ile (0,45) göstermiştir. Çökme ile akma gerilmesi arasındaki ilişkinin tüm

reometrelerde yapılan ölçümlerde görüldüğünü ve tüm reometrelerin Bingham parametrelerine göre akışı belirlemede kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Reolojik ölçümlerde reometrede meydana gelen segregasyon ve tiksotropinin daha iyi anlaşılması gerektiğini bildirmişlerdir. Çeşitli reometrelerle elde edilen deneysel sonuçların nümerik çözümlerle karşılaştırılmasının önemi üzerinde durmuşlar, agrega ve polimer içeren karışımlar için yeni modeller geliştirilebileceğini önermişlerdir.

Bouzoubaâ ve Lachemi (2001), 400 kg/m³ sabit dozlu, farklı S/B oranında (0,35-0,50), yüksek oranda çimento ile yer değiştirilen F sınıfı UK (% 40-50-60) ve kimyasal katkı (sülfonat naftalen formaldehit ve sentetik reçine tipi hava sürükleyici katkı) kullanarak elde ettiği KYB'lar üzerinde çökme, çökme yayılması (viskozite için), hava içeriği, terleme ve yerleşme zamanı, akış zamanı (V huni), segregasyon, basınç ve rötre değişimlerini incelemişlerdir. 0,45 S/Ç oranında % 50 UK yer değiştirilmesi ile elde edilen betonun kontrol betonuyla benzer mukavemet (35 MPa) göstermesine karşılık bu karışımın en küçük çökme değeri gösterdiğini, en düşük çökme yayılmasının 0,45 S/Ç oranında % 60 UK yer değiştirilmesinde, en yüksek çökme yayılmasının da 0,35 S/Ç oranında % 40 ve 60 UK yer değiştirilmesinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Deneysel olarak, 26-48 MPa arasında değişen basınç mukavemeti değişimi olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar UK gibi ince malzemelerin kullanılmasıyla istenilen özelliklerde beton üretilebileceğini, KYB'larda hem akış özellikleri hem de ekonomik açıdan yüksek oranda F sınıfı UK'lerin kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Ferraris vd. (2000), aynı çökme ve çökme yayılmasındaki KYB örnekler üzerinde iki beton reometresi (IBB ve BTRHEOM), çökme, çökme yayılması, V huni ve U kutu deneyleri yaparak reolojik parametreleri incelemiştir. Farklı akış oranları elde edebilmek için farklı dozajlarda kimyasal katkı (geliştirilmiş selüloz VGK ve karboksilat kopolimer bazlı SP) kullanmışlardır. Çökme ve çökme yayılması deneylerinin KYB'ları tanımlamada yetersiz olduğunu, kullanılan reometreler arasında plastik viskozite değerlerinin korelasyonunun iyi (%84), akma gerilmesi değerlerinin korelasyonunun olmadığını, V huni ve U kutusu deneylerinin ise her iki reolojik parametre ile uygun korelasyonlu olmadığını, KYB'ların farklı tiplerinin, Beaupre'nin tanımladığı "İşlenebilirlik Kutusu" (workability box) ile grafiksel olarak belirlenen akma gerilmesi ve plastik viskozite ile belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

Geiker vd. (2002), S/Ç 0,45 oranlı, CEM I 52.5 (350 kg/m³), % 3 Sd, % 27 UK ve üçüncü nesil SP (SikaAer 15b ve ViscoCrete 34) ile ürettikleri betonda, iki nokta işlenebilirlik cihazı ile (BML Viscometer 3) Tork-Zaman ilişkisini incelemişlerdir. Kullandıkları cihazda, segregasyonun ve dönüş hızının etkisini küçültmek için 0,05-0,57 rev/s aralığında her dönüş hızında 10 s için ölçüm yapılması gerektiğini ve tıkaç akışın meydana geldiği en yüksek dönüş hızının ve bu hıza ulaşmak için belirlenen 8-10 s aralığındaki en düşük tork değerinin hesaplanması gerektiğini önermişlerdir. Taze beton hareketli iken akma gerilmesi çok düşük, plastik viskozitenin yüksek değerler gösterebildiğini, ilk kayma hareketinin reolojik özellikleri belirlemede etkili olduğunu ve başlangıç zamanının dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar taze KYB'ların dilatant akış (kayma kalınlaşması) davranışı gösterdiğini belirlemişlerdir.

Larrard vd. (1998), harç ve normal (0,50-0,60 S/Ç), YPB (0,36-0,38 S/Ç) ve KYB (0,26-0,27 S/Ç) örnekleri üzerinde, sabit kaba/ince agrega oranında, katkısız ve SP (Naftelen sülfonat) ile Sd katkısı kullanarak, çökme ve reolojik parametreleri (BTRHEOM Reometresi ile) ölçüp, Bingham ve Herschel-Bulkley modelleri ile analitik değerlendirmeler yapmışlardır. Reolojik parametrelere lineer regresyon uygulandığında, yüksek korelasyon olsa bile Bingham denklemi ile negatif akma gerilmesi bulunabileceğini (özellikle KYB'larda), HB modelinde a ile b arasında bir ilişki bulunmasına karşılık b'nin nadiren 1'e eşit olduğunu belirtmişlerdir. En uygun karışım dizaynı belirlenmek istendiğinde, HB modelinin 3 değişken parametre ile uygulanmasının zor olduğunu belirtmişlerdir.

Özkul ve Sağlam (2002), iki farklı çimento (PÇ 42.5) ve üç farklı mineral katkı (ikame) (uçucu kül ve mikrosilika) ile iki farklı kimyasal katkı kullanarak elde edilen çimento pastası, harç ve betonların reolojik özelliklerini incelemişlerdir. Reolojik özelliklerin belirlenmesinde farklı kesitli koniler ile yayılma deneyleri; çimento pastası ve harçlarda eşeksenli vizkozimetre (Metter Rheomat 180), betonlarda ise Tattersall cihazına benzer yeni yaptıkları viskozimetre kullanmışlardır. S/B, kimyasal katkı/B, mineral katkı/B oranlarına göre kayma eşiği ve viskozitelerini belirlemişlerdir. Beton deneylerinde viskozimetre kullanarak tek noktalı deneylerden farklı olarak betonların taze beton özelliklerinden olan plastik viskozite ve kayma eşiği değerlerinin her ikisini birden temel olabilecek verilerin elde edilebilmesinin mümkün olduğunu

belirtmişlerdir. Yazarlar, yaptıkları çalışmada MK/B ve SP/B oranının viskozite katsayısını etkilemediğini, kayma eşiği üzerinde ise Mikrosilika'lı karışımlarda sadece MK/B oranının etkisinin olduğunu, Kum/B oranı ve S/B oranı tüm karışımlarda yayılma hızını etkilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca betonun reolojik özellikleri üzerinde çimentonun C₃A içeriğinin, inceliğinin, CASO₄ tipi ve miktarının etkili olduğunu, düşük YAO'da Bingham davranışı sergileyen betonların, yüksek YAO'larında Newtoniyen davranış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Roshavelov (2005), tüp viskozimetre (RCVC) ile yaptığı deneylerden elde ettiği reolojik parametrelerle analitik yolla hesapladığı (Mooney denklemi) reolojik parametrelerin karşılaştırmasını yapmıştır. Karışımlarda, katı malzemenin hacim oranının fonksiyonu olarak, plastik viskoziteleri ölçmüş ve modelle hesapladığı görünür viskozite değerlerini karşılaştırmıştır. Kayma oranı-kayma gerilmesinin veya viskozitenin süspansiyonun yoğunluğu ile ilişkili olduğunu, bu nedenle de karışım için tek bir değer olarak kabul edilebileceğini belirtmiştir. Yüksek akışkanlıkta görünür viskozitenin, plastiklik ve kaymaya bağlı olduğunu ancak betonun akışını doğru ve tam tanımlayabilmek için, katı fazın hacim oranıyla beraber Bingham denkleminde olduğu gibi akma gerilmesi ve plastik viskoziteyi de kapsayan modellerin geliştirilmesi gerektiğini önermiştir.

Shi vd. (2002), Sd'yla bileşik oluşturan, kireçtaşı (LS) veya fosfor cürufu (PS) toz halindeki mineral katkıların işlenebilirlik ve reolojik parametreler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sabit miktarda Naftelen bazlı SP'yi, kimyasal katkı olarak kullanmışlardır. Çimento ile yer değiştirilen Sd betonun işlenebilirliğini ve akışkanlığını arttırmaktadır. Sd içeriği % 12'nin üzerinde olduğunda, plastik viskozite ve akma gerilmesi çok yüksek, akışkanlık ise en düşük seviyede bulunmaktadır. Sd+PS'nin beraber kullanılmasında taze betonun akma gerilmesi ve plastik viskozitesi azalmış, bununla birlikte çökme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. PS ile çimento arasında oluşacak olan mekanik kilitleme Sd ile ortadan kaldırılır. Sd+LS'nin beraber kullanılmasında ise akma gerilmesi artmakta, ancak sadece LS'li betonla karşılaştırıldığında viskozitesinin değişmemesine karşılık çökme ve çökme yayılması değerleri azalmaktadır. Sd+LS bileşiği ile çimento taneleri arasında topaklanma olabilmektedir. Yazarlar, reolojik özelliklerin toz (ve/veya mineral katkının) yüzey

özellikleri ile ilişki olduğunu, özellikle optimum Sd içeriğinin belirlenmesinin gerekliliğini belirtmiştir.

UCL (2005), KYB'lar üzerinde çökme yayılması (yayılma mesafesi ve T50 zamanı), L kutu, J Ring (yayılma mesafesi ve T50 zamanı), elek tutarlılık deneyi, V huni, Orimet, penetrasyon, kolon yerleştirme deneylerini ve koaksiyel beton reometresi ile (ConTec viskozimetreleri III, IV ve V) reolojik parametrelerin ölçümünü yapıp deneyler arası ilişkiyi incelemiştir. Elde ettikleri karışımlarda çökme yayılması deneyi (yayılma mesafesi) akma gerilmesi ile en iyi korelasyonu vermesine karşılık plastik viskozite ile T50 çökme yayılması daha iyi korelasyon vermiştir. Çökme akışı için kayma oranının Orimet ve V huni deneylerine göre daha az önemli olduğunu, L kutu deneyinin yatay bölümündeki kayma oranının çökme akışına benzer değerlerde olduğunu belirtmişlerdir. Pasta hacminin azalmasıyla işlenebilirlik yeteneğinin önemli derecede azaldığını, referans karışımla benzer reolojik değerler göstermesine karşılık L kutu değerlerinin (H_2/H_1) çok daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Yazara göre, bu sonuçta yağlama görevi yapan pasta hacminin etkinliği kadar iri agrega boyut ve miktarının da etkisi oldukça fazladır. Aynı zamanda T50 değeri veya plastik viskozite olarak ifade edilen viskozitenin blokaj davranışında (blocking effect) etkisinin olmadığını, blokaj etkisinin J ring deneyinin L kutuya göre daha hassas ölçebildiğini belirtmişlerdir. Yayılma akışı ölçümlerinde J ring deneyinin (L kutu, çökme akışına göre), segregasyon direnci ölçümünde tutarlılık deneyinin (penetrasyon, kolon yerleştirme deneylerine göre), akış zamanı ölçümlerinde de hem Orimet hem de V huni'nin benzer hassaslıkta ölçümler yapıldığı için kullanılmasını önermişlerdir. Ayrıca deneyler sırasınca deneyi yapan operatör ve kullanılan deney ekipmanlarının yıpranmasıyla ölçümlerde büyük hatlara neden olabileceğine dikkat çekmişlerdir.

Xie vd. (2002), Sülfonat naftelen bazlı SP ile UK (çok ince) içeren KYB ve YPB'da taze ve sertleşmiş beton deneylerini uygulamıştır. UK'lü KYB'larda işlenebilirliğin çökme yayılması ve L kutu deneylerinin birleştirilmesiyle belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. UK'ün taze betonda viskoziteyi arttırdığını, viskozite geliştirici katkı ile aynı etkiyi gösterdiğini ancak akışkanlığın azalmadığını belirtmişlerdir. % 10-30 arasında kullanılan UK (500-600 m²/kg), toplam bağlayıcı miktarı en az 500 kg/m³, kum oranı en az % 40, SP ve su miktarı gerekli işlenebilirlik için optimum miktarda

olmak üzere yaptığı karışımlarda 60-80 MPa dayanımlı KYB karışımları üretilebileceğini belirtmişlerdir. Bu UK'le yapılan betonlarda düşük su geçirme özelliği ve rötre değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda donma çözülme direnci yüksek olan KYB'lar üretilebileceğini belirtmişlerdir.

Yazıcı (2002), 300 dozlu PÇ 42,5 ve 19 cm çökme hedefine sağlamak için altı farklı linyosülfat kökenli kimyasal katkıları kullanarak ürettiği sabit çökmeli betonlarda; basınç mukavemeti, çökme kaybı, birim ağırlık, hava oranı, priz başlangıcı ve bitiş değişimini incelemiştir. Kimyasal katkıların kullanılmasıyla karışım suyundaki azalma oranı % 4-13 arasında değişmektedir. Beton üretimden bir saat sonraki çökme kayıpları % 20,5–32,4 arasında değişmektedir. Bu akışkanlaştırıcıların betonda %1-3 oranında hava oluşturduğunu, priz başlangıç ve bitiş sürelerini ise geciktirdiğini belirlemiştir. Tüm katkılı betonlarda mukavemet artışı sağlanırken, 1 kg katkı kullanarak üretilen betonlarda, kontrol betonlarına göre ilave mukavemet artışı 2,8-3,5 MPa aralıktadır. Yazar, beton üretiminde suyun azaltılmasıyla dayanım kazandırma özelliğinin yanında işlenebilirlik problemlerinin de göz önünde bulundurulmasını, aksi takdirde üretilen betonların çok kısa bir sürede kalıplanması gerektiğini belirtmiştir.

Wallevik (2006), 0,125 mm'nin altındaki filler ve çimento hamurunu "Matris", 0,125 mm'den büyük katı tanelerini "asılı parçacıklar" olarak kabul ettikleri betonlarda hacim oranına bağlı, akma gerilmesi ve plastik viskozite (reolojik parametreler BML Viskozimetre C-200 ile ölçülmüş) ile çökme arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmalarında çimento tip (CEM I 42.5R) ve dozajını sabit tutarlarken, sekiz farklı SP (6 lignosülfonat kökenli, naftelen sülfonat kökenli, polikarboksilat kökenli) ile farklı S/Ç oranında betonlar üretmişlerdir. Yazar, çökme ile akma gerilmesi arasındaki ilişkinin matrisin hacim oranına bağlı olduğunu, yani hacim oranının azalmasıyla tanelerin tipine bağlı olarak akışın engellendiğini belirtmişlerdir. Matrisin agregalar arasında yağlanma etkisi yaptığını belirtmiştir. Çökme ve akma gerilmesi arasındaki ilişkiyi daha doğru belirlemek için hacim oranı etkisinin düşük olduğu betonlar üzerinde araştırmaların yapılması gerektiğini önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada, akma gerilmesinden çökme miktarını tahmin etmede kullanılan analitik yöntemlerin, bu iki faktörü (parçacık etkisini ve matrisin yağlama etkisini) kapsamı gerektiği

sonucuna varmıştır. Çökme ve plastik viskozite arasında ise korelasyonun düşük olduğunu, bu nedenle de analitik değerlendirmelerin yapılamadığını belirtmiştir.

Zain vd. (1999), YPB'nun özelliklerini V huni, çökme, çökme akışı, birim ağırlık, sıcaklık ve hava içeriği parametrelerine göre araştırmışlardır. 400 dozlu karışımda S/B oranını 0,50 ve 530 dozlu karışımda S/B oranını 0,35 kullanmışlardır. Sd ve UK'ü % 10 olarak kullanılırken, SP'yi bağlayıcının % 1-2.25 oranı arasında ve hava sürükleyici katkı miktarı ise % 0,04-0,09'ü arasında kalan betonlar üretmişlerdir. Tüm karışımlarda hava içeriği %1.5-2.3 arasında tutulmuştur. Araştırılan özelliklerin birbiriyle ilişkili olduğu, özelliklede akış özellikleri ile hava içeriği arasındaki ilişki belirtilmiştir. Sınırlı hava içeriğinin işlenebilirlik üzerindeki etkisi olumlu olmakla beraber, hava içeriğinin artmasının olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Gerekli işlenebilirlik ve akışkanlık için %1,5-2 oranında hava içeriği önerilmiştir. Akışkanlığın göstergesi olarak, V huni akışının, çökmeden daha belirgin değerler ifade ettiği ve geleneksel çökme deneyinin, yüksek performanslı betonun işlenebilirliği ve akışkanlığını belirlemede etkili olmadığını bildirmişlerdir. YPB'nun akışkanlığının kalitesinde sıcaklığın da etkili olduğunu, yüksek sıcaklığın, yüksek buharlaşma, yüksek su ve hava kaybına neden olduğu için işlenebilirliği azalttığını ifade etmişlerdir. Silis dumanı UK'e göre daha iyi işlenebilirlik ve akışkanlık sağlamıştır. YPB'nun sıcaklığının 15-25 °C içinde tutulduğunda en uygun hava içeriği ve akışkanlık değerinin sağlanacağı belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneyleerde kullanılacak beton numuneleri için temin edilen malzemeler ve karakteristik özellikleri aşağıdaki paragraflarda belirtilmiştir.

3.1.1. Agregalar

Üretimi yapılan beton numunelerinde 3 çeşit agrega kullanıldı. Bunlar; çakıl I (ÇI), çakıl II (ÇII) ve kırma taş (KT) olup maksimum dane çapı 25 mm'dir. Kullanılan agregaların diğer özellikleri aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

3.1.1.1. Çakıl I ve II

Üretilen betonlarda doğal iri agrega olarak Antalya Karaöz beldesinde bulunan çakıl ocağından sağlanan çakıl I ve çakıl II kullanıldı. Bu malzemeler üzerinde özgül ağırlık, su emme ve elek analizi deneyleri yapıldı. Sonuçlar Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmiştir.

3.1.1.2. Kırmataş

Üretilen betonların bir bölümünde GÖLTAŞ'ın Isparta'daki tesislerinden sağlanan kalker kırmataş II kullanıldı. Malzeme üzerinde yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Agregaların bazı fiziksel özellikleri

	ÇI	ÇII	KT
Özgül ağırlık (kg/dm ³)	2.67	2.68	2.69
Su emme (%)	0.6	0.4	0.3

Çizelge 3.2. ASTM'e göre agrega granülometrileri

Agrega türü Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)'leri								
	25.4	19.1	9.52	4.76	2.38	1.19	0.59	0.279	0.149
Kırmataş	100	98	0	0	0	0	0	0	0
Çakıl II	98	50	0	0	0	0	0	0	0
Çakıl I	100	100	46	2	0	0	0	0	0

Çizelge 3.3. TS'ye göre agrega granülometrileri

Agrega türü Elek açıklığı (mm)	Elekten Geçen Malzeme (%)'leri								
	31.5	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125
Kırmataş	100	49	0	0	0	0	0	0	0
Çakıl II	100	13	0	0	0	0	0	0	0
Çakıl I	100	99	34	0	0	0	0	0	0

3.1.2. Çimento

Üretilen betonlarda kullanılan çimento PÇ 42.5 niteliğindedir, CEM I ve CEMII sınıfıdır. Çimentolar, 50 kg'lık fabrikasyon torbalar halinde temin edilmiştir. Çimentolar, dış etkenlere maruz kalmayacak şekilde poşetlenerek stok yapılmıştır. Çimentoların kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te, fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çimentoların kimyasal özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K.K	Ç.K	S.CaO	Cl ⁻
19.24	3.92	3.40	64.98	1.93	2.82	2.47	0.32	1.66	0.006

Çizelge 3.5. Çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri

Blaine cm ² /gr	Özgül Ağ. gr/cm ³	Priz Baş.	Priz Son.	Genleşme	Basınç Dayanımları (MPa)		
					2 gün	7 gün	28 gün
3015	3.10	2s 50dk	3s 50dk	1	25.1	39.9	52.7

3.1.3. Kimyasal katkı

Çalışmada kullanılacak katkının belirlenmesi için; ASTM C 494 ve TS EN 934-2 standartlarına uygun, 3 ayrı ticari markadan; 7 Polikarboksilat esaslı hiperakışkanlaştırıcı beton katkılarının özellikleri belirlenmiştir. Kullanılacak katkılar,

çimento kimyasal katkı uyumu ve ön denemelerde üretilen betonun çökme kaybına etkilerine göre belirlenmiştir. Katkının özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kimyasal katkının özellikleri

Katkı cinsi	Özgül ağırlık (kg/dm ³)	Katı madde oranı
Hiper akışkanlaştırıcı	1.21	% 39

3.1.4. Uçucu küller

Üretilen betonlarda uçucu kül olarak Orhaneli, Seyitömer, Tunçbilek ve Çayırhan Termik Santralleri'nden sağlanan dört farklı kül kullanılmıştır. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ile özgül ağırlıkları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve özgül ağırlıkları

Oksit (%)	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618		Orhaneli (uK1)	Seyitömer (uK2)	Tunçbilek (uK3)	Çayırhan (uK4)
		V	W		F	C				
SiO ₂							58.63	54.38	57.98	50.18
Al ₂ O ₃							26.03	20.60	19.87	13.30
Fe ₂ O ₃							6.12	11.16	10.14	8.77
S+A+F				> 70.0	> 70.0	> 50.0	90.78	86.14	87.99	72.26
CaO							1.17	2.92	2.26	12.84
MgO				< 5.0			2.50	4.13	4.76	5.37
SO ₃	< 3.00			< 5.0	< 5.0	< 5.0	0.19	0.59	0.41	3.34
K ₂ O							4.75	3.15	1.78	2.16
Na ₂ O							0.47	0.79	0.32	2.99
KK	< 5.00	< 5.0	< 5.0	< 10.0	< 6.0	< 6.0	1.10	3.01	2.117	0.83
Cl ⁻	< 0.10						0.016	0.006	0.002	0.015
Serb. CaO	< 1.00						0.14	0.26	0.17	0.55
Reak. SiO ₂	> 25.0	> 25.0	> 25.0				34.16	39.08	40.11	40.83
Reak. CaO		< 10.0	> 10.0				0.63	2.47	1.03	8.77
Özgül ağırlık (gr/cm ³)							2.00	2.13	2.25	2.36

Çizelge 3.7'deki verilere bakılarak kullanılan uçucu küllerle ilgili şunlar söylenebilir:

1. TS EN 197-1 standardına göre, Tunçbilek, Orhaneli, Seyitömer, Çayırhan uçucu külleri reaktif kireç miktarının % 10'un altındadır ve bu nedenle V sınıfıdır. (silisli uçucu kül)
2. TS EN 197-1 standardında istenilen koşullar (reaktif silis, reaktif kireç ve kızdırma kaybı) dikkate alındığında, tüm küller reaktif silis için istenilen en az %25 olma gerekliliğini sağlamakta, sınıfları ile ilgili olarak TS EN 197-1'de istenilen koşullara uygundur.

3. TS 639 standardına göre, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (S+A+F) > %70 koşulunu sağlamaktadır. SO_3 miktarı için < %5 koşulunu, Tunçbilek, Orhaneli, Seyitömer sağlamakta; Çayırhan uçucu külü sınırın dışında kalmaktadır. Yine bu standartta getirilen MgO < %5 ve kızdırma kaybı < %10 koşuluna deneylerde kullanılan tüm küller uyum sağlamaktadır.
4. ASTM C 618 standardına göre, $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ > %70 koşulu ve analitik CaO < %10 koşulunu gerçekleştiren Tunçbilek, Orhaneli, Seyitömer uçucu külleri F sınıfına (düşük kireçli kül); S+A+F > %50 ve analitik CaO > %10 koşulunu sağlayan Çayırhan C sınıfına (yüksek kireçli uçucu kül) girmektedir. ASTM C 618 standardında, uçucu küller elde edildikleri kömürün niteliğine göre de sınıflandırma yapıldığı için Türkiye’de taşkömürünün yakılması ile üretim yapılan tek kömür Orhaneli olup; bu kül F sınıfındadır. Diğer santrallerde linyit ve benzeri kömür kullanıldığı için, diğer küller C sınıfına girmektedirler. Bu standartta SO_3 için getirilen sınırlama (%5), TS 639 ile aynıdır. Yine bu standartta verilen kızdırma kaybı < %6 olmalı koşuluna tüm küller uymaktadır.
5. TS EN 450 standardına göre Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli, külleri hem SO_3 (<3.00) hem de serbest kireç (<1.00) sınırlamalarına uygundur. Çayırhan uçucu külü, yüksek kireçli olduğundan serbest kireç yüzdesi %1’in üzerindedir. SO_3 sınırlamasına gelince, yüksek kireçli küllerden, Çayırhan SO_3 açısından standart dışında (% 3.34) kalmaktadır. Kızdırma kaybı ve klorür koşuluna tüm küller uyum sağlamaktadır.
6. Kimyasal bileşim açısından küller genel olarak karşılaştırma yapılırsa standartlarda $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı, reaktif silis, reaktif kireç SO_3 , MgO, serbest kireç, kızdırma kaybı ve Cl^- için istenilen sınırlamalara, Çayırhan, Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli, uçucu külleri tamamen uyum sağlamaktadır.

3.1.5. Silis dumanı

Silis dumanı Antalya Etibank Ferrokrom fabrikalarından temin edilmiştir. Silis dumanının kimyasal özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Silis dumanının özgül ağırlığı 2.30 gr/cm^3 ’tür.

Çizelge 3.8. Silis dumanının kimyasal özellikleri

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
77.06	0.84	1.28	79.17	0.73	5.70	0.21	5.16	0.32

3.1.6. Fiber katkı

Çalışmalarda fiber katkı olarak Sika Fibre tipi polipropilen fiber kullanıldı. Polipropilen lifin boyu 12 mm ve çapı ise 18 mikron'dur□

3.2. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar

3.2.1. Tartılar

Çalışmada kullanılan tartılar Şekil 3.1'de gösterilmiştir. 360 gr'a kadar olan ağırlıklarda Şekil 3.1 (A) ($\pm 0,001$ gr), 30 kg'a kadar ağırlıklarda Şekil 3.1 (b) ($\pm 0,1$ gr), 150 kg' a kadar olan ağırlıklarda ise Şekil 3.1 (c) (± 5 gr) kullanılmıştır.



(A)



(B)



(C)

Şekil 3.1. Çalışmalarda kullanılan tartılar

3.2.2. Sıcaklık, nem ve zaman ölçüm cihazları

- Ortamın Sıcaklığını Ölçmek İçin Kullanılan Termometre
- Zaman Sayacı

Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Termometre



Zaman Sayacı

Şekil 3.2. Ölçü aletleri

3.2.3. Basınç altında terleme deney aleti

Üretilen betonların, basınç altındaki terleme miktarlarının ve segregasyon basınçlarının belirlenmesi amacıyla basınç altında terleme deney aleti geliştirilmiştir. Terleme deney aleti, 11.5 cm iç çapında bir honlanmış boru ile çıkarılabilir üst ve alt başlığa sahiptir. Üst başlıkta, ucunda kestamid takozdan bir piston bulunan bir hidrolik silindir vidalıdır. Bu hidrolik silindir bir el pompasına bağlıdır. Yükveren piston silindirinin üstüne vidalıdır ve bu sayede üst başlıktan kuvvet alarak piston yük verebilmektedir. Pistonun hareket kabiliyeti, sıkışmış haldeki betonun testin ardından hızlı bir şekilde çıkarılabilmesini mümkün kılmaktadır. Alt başlığın hemen üstüne, terleme suyuyla birlikte betondaki ince malzemelerin de gelmesini önlemek için iki adet süzgeç konmuştur. Honlanmış boruya, test edilen taze betona uygulanan basıncın belirlenebilmesi için bir basınç ileticisi (transducer) monte edilmiştir. Basınç ileticisine, taze betona uygulanan basıncın okunabilmesi için dijital bir gösterge bağlanmıştır. Alt kısımda musluğu bulunan bir terleme deliği vardır. Terleme deliğinin içi deliğin tıkanmasını önlemek için 50 nolu elek telinden bir bez ile kaplıdır. Basınç altında terleme deney aleti Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Basınç Altında Terleme Deney Aleti

3.3. Metot

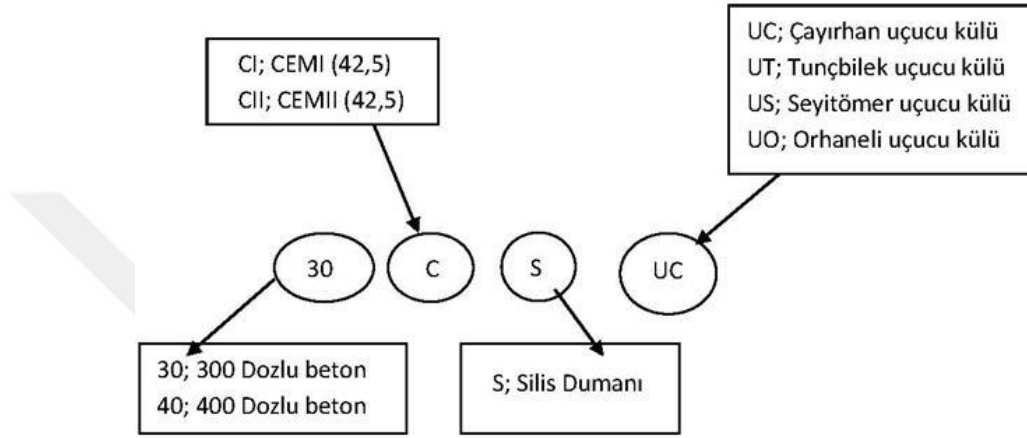
Taze betonunun pompalanabilir olmasında ve basınç altında betonun davranış özelliklerinin etkisini belirlemeyi amaçlayan araştırmada, izlenen yol ve gerçekleştirilen deneylerin detayları bu bölümde açıklanmıştır. İlk çalışma, literatürlerdeki önerilere uygun pompa betonu karışımlarını tespit etmek olmuştur.

3.3.1. Beton karışımlarının saptanması

Ön deneme karışımlarında 300, 350 ve 400 kg/m³ ve araştırma deneylerinde 300, ve 400 kg/m³ nominal çimento dozajlarında kullanıldı. S/Ç oranı 300 dozlu betonlar için 0,45 ve 400 dozlu betonlar için 0,35 olarak belirlendi.

Beton karışım hesaplamalarında çökme en az 160 mm, kimyasal katkı denemelerinde ise terleme olmaksızın en fazla çökme veren katkı tipi ve dozajı dikkate alınmıştır. Karışım suyu miktarında, kimyasal katkının katı ve sıvı oranına göre belirlenen sıvı miktarı azaltılmıştır. Bu nedenle çalışmanın bundan sonraki kısmında belirtilen kimyasal katkı oranı, kimyasal katkının katı oranıdır. Mineral katkıları ilave metodu ile karışıma katılmıştır.

Üretilen tüm betonlarda istenilen çökme miktarını sağlamak için hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Şahit betonlar hariç tüm betonlara çimento miktarının %10'u ve %20'si oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Bunun haricinde çimento miktarının %10'u oranında uçucu kül + %10'u oranında silis dumanı ve %10 UK + %10 SD + Polipropilen fiber ilave edilmiş karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışım oranları için şu kısaltmalar kullanılmıştır:



Şekil 3.4. Beton kodlaması

1000 dm³ karışımdaki kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.9. verilmiştir.

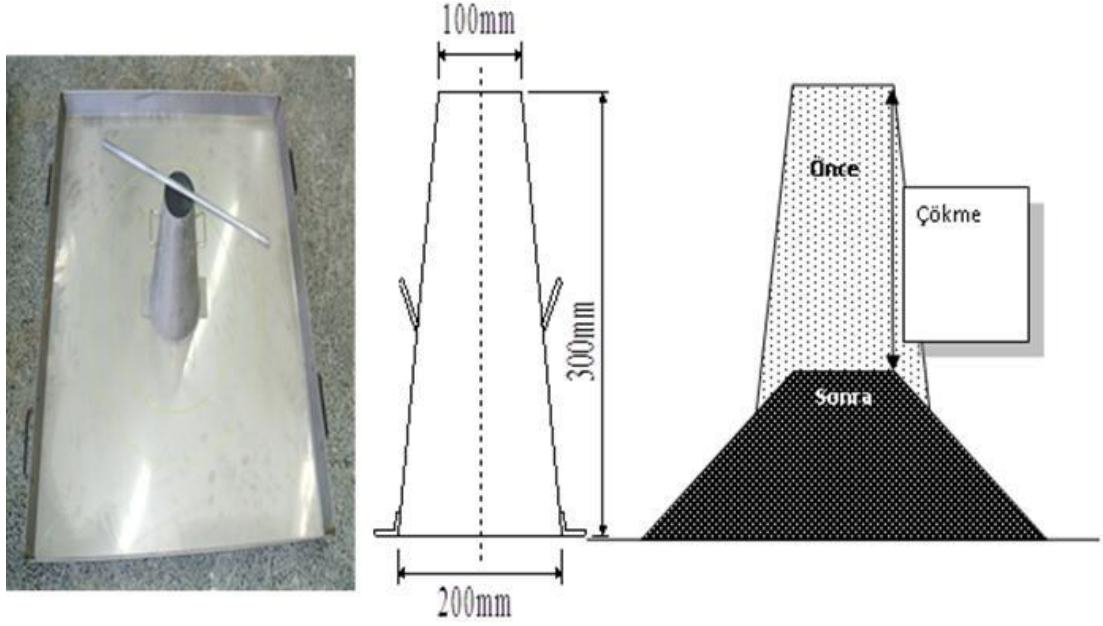
Çizelge 3.9. 1000 dm³'teki malzeme miktarı

Kullanılan Malzeme (1000 dm ³ için)	Kum 0-5 (kg)	Kum 0- 8 (kg)	Çakıl I (kg)	Çakıl II (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Uçucu kül (kg)	Silis dumanı (kg)	Kimyasal katkı (kg)
30CI-30CII	415,02	645,33	700,35	201,21	300,00	153,81	-	-	4,50
30CI-30CII S	407,20	633,17	687,16	197,42	300,00	153,46	-	30,00	4,95
30CIUC-30CIUC	404,59	629,10	682,74	196,14	300,00	153,34	45,00	-	5,18
30CISUC-30CISUC	396,77	616,94	669,55	192,35	300,00	152,98	45,00	30,00	5,63
30CIUS-30CIUS	403,46	627,34	680,84	195,60	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUS-30CISUS	395,64	615,19	667,64	191,81	300,00	152,93	45,00	30,00	5,63
30CIUT-30CIUT	404,07	628,30	681,88	195,90	300,00	153,32	45,00	-	5,18
30CISUT-30CISUT	396,25	616,15	668,68	192,10	300,00	152,97	45,00	30,00	5,63
30CIUO-30CIUO	403,73	627,76	681,29	195,73	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUO-30CISUO	395,91	615,59	668,09	191,94	300,00	152,94	45,00	30,00	5,63
40CIUO-40CIUO	394,53	613,62	665,94	191,32	400,00	157,89	-	-	6,00
40CISUO-40CISUO	384,21	697,41	648,35	186,26	400,00	157,41	-	40,00	6,60
40CI-40CII	380,71	591,98	642,45	184,57	400,00	157,26	60,00	-	6,90
40CIS-40CII S	370,29	575,76	624,86	179,52	400,00	156,78	60,00	40,00	7,50
40CIUC-40CIUC	379,21	589,64	639,92	183,85	400,00	157,18	60,00	-	6,90
40CISUC-40CISUC	368,79	573,43	622,32	178,79	400,00	156,72	60,00	40,00	7,50
40CIUS-40CIUS	380,03	590,92	641,31	184,24	400,00	157,23	60,00	-	6,90
40CISUS-40CISUS	369,61	574,71	623,72	179,19	400,00	156,74	60,00	40,00	7,50
40CIUT-40CIUT	379,57	590,19	640,51	184,02	400,00	157,20	60,00	-	6,90
40CISUT-40CISUT	369,14	573,98	622,92	178,96	400,00	156,73	60,00	40,00	7,50

3.3.2. Yapılan deneyler

3.3.2.1. Çökme (slump) deneyi

Çökme (slump) deneyi 1910 yıllarında Amerika’da geliştirilmiştir. Bu test ASTM C143, TS EN 12350-2 ve bir çok ülkede standard olarak da kabul edilmiştir. Abrams konisi olarak da isimlendirilen bu deneyde; Şekil 3.4’de de görülen üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve yüksekliği 300 mm olan tepesi kesik koni şeklindeki metal kalıp içine üç eşit tabaka halinde ve her tabakası 25 kez özel bir çubukla (çapı 16 mm, uzunluğu 600 mm) şişlenerek taze beton doldurulur. Daha sonra doldurulan beton sarsılmadan kesik koni kalıp yukarı çekilir. Beton kendi ağırlığı ile bir miktar çöker ve çökme miktarı ölçülür (Akman, 1987).



Şekil 3.5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı

Çalışmada üretilen her beton için çökme deneyi yapılmıştır. Taze beton, slump konisine üç tabaka halinde ve her tabaka koninin üçte birini dolduracak şekilde 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Beton yerleştirildikten sonra üst kısım mala ile düzeltilmiştir. Daha sonra doldurulan beton sarsılmadan koni yukarı doğru çekilerek alınmıştır. Beton kendi ağırlığıyla bir miktar çökünce çökme miktarı ölçülmüştür

3.3.2.2. Çökme yayılması deneyi

Çökme yayılması testi için klasik slump deneyinden sonra beton kütesinin yanıl yayılması ölçülmüştür. Bu yayılmanın betonun plastik viskozitesi ile ters orantılı olduğu kabul edilmektedir, özellikle yüksek çökmeli ve çimento yönünden zengin karışımlarda çökme-yayılması salt çökmeye oranla daha anlamlı ve duyarlı sonuç vermektedir; örneğin 20-25 cm arasında çökme veren betonlarda çökme yayılması 30-55 cm arasında değişmektedir.

3.3.2.3. Birim ağırlık deneyi

Deneyde, betoniyerde karılmış taze betonu iyi temsil edebilecek numune kullanılmasına dikkat edilmiştir. Deneyde kullanılan kaba, üç tabaka halinde beton doldurulmuştur. Her tabaka 25 kez şişlenmiş, her tabakanın şişlenmesinden sonra kabın kenarlarına 15 defa plastik çekiçle vurulmuştur. Sonrasında kabın üstü mala ile düzeltilmiş, kabın dışına taşan kısım temizlenmiştir. Numune tartıldıktan sonra, betonun net ağırlığının kabın hacmine bölünmesiyle taze betonun birim ağırlığı hesap edilmiştir.

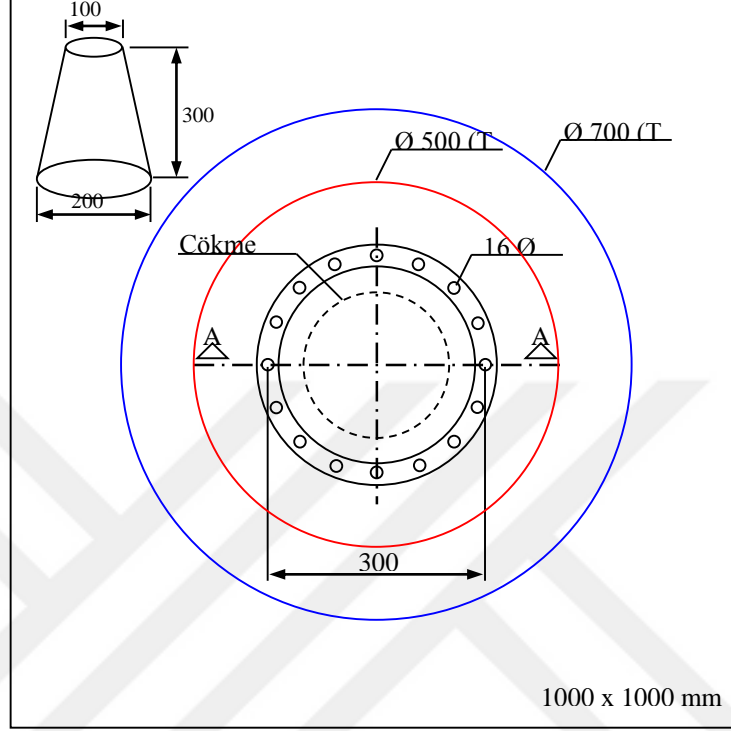
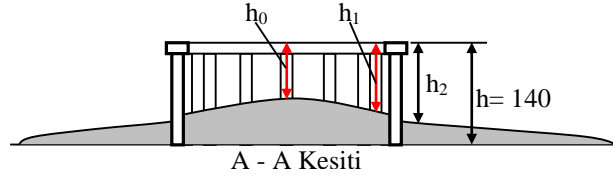
3.3.2.4. J ring deneyi

J Ring deneyinin prensibi Japonlara dayandığı belirtilmesine rağmen ancak bilinen kaynak yoktur. J Ring deneyi Paisley Üniversitesi'nde bugünkü kullanım formuna geliştirilmiştir. Deney cihazı, ayak parçası olmayan alt çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan kesik koni (çökme konisi) ve bir kenarı en az 700 mm olan, betonu emmeyen kare şeklindeki alt tabla ile 300 mm çapındaki çelik halka üzerine yerleştirilmiş çelik çubuklu (100 mm uzunluğunda, 10 mm çapında, adım 48 ± 2 mm) halkadan (ring) oluşur. Alt tabla üzerinde, çökme konisi için merkezi gösteren daire, 500 ve 700 mm çapında eş merkezli daireler çizilmiş olmalıdır. Merkeze yerleştirilen çökme konisi sıkıştırılmadan hafifçe koniye vurularak doldurulur. Koninin yukarı kaldırılmasıyla betonun 500 ve 700 mm'ye serbest akış zamanı ölçülür. Yayılma tamamlandıktan sonra yükseklikler; ring içi, dışı ve çökme yüksekliği olmak üzere Şekil 3.5'de gösterildiği gibi ölçülür. Hesaplamalarda karşılıklı kenarlardan

olmak üzere alınan dört farklı ring içi ve dışı yüksekliğin ortalaması kullanılır (EFNARC, 2002).

Deney betonun geçme yeteneğini belirlemede kullanılır. elik ubuklar halka üzerindeki boşluklara dikey olarak takılmıştır ve dikey çubuklar arasında oluşan açıklıktan beton geçer. Bu ubuklar farklı çap ve aralık mesafesinde olabilir. Ancak bu aralıklar en az, en büyük agrega çapının 3 katı olmalıdır. J Ring ubuk aralıkları fazla olursa betonun geçme yeteneği oldukça yüksek ölçülür. Dikey ubukların bağlandığı halka çapı 300 mm'dir.

J Ring; kme, orimet deneyi veya V huni ile birlikte kullanılabilir. Bu deney kombinasyonunun nedeni, betonun akma yeteneğinin ve (J Ring'in yardımıyla) betonun geçme yeteneğinin belirlenebilmesidir. Orimet zamanı ve/veya çökme yayılması akış karakteristikleri olarak ölçülür. Deneyden sonra, J Ring'in dışındaki ve içindeki beton yüksekliği ölçülür. Bu değerler, geçme yeteneğini veya betonun çubuklar içinden geçme sınırının (kısıtlanmasının) derecesini bildirir. Sonuçların nasıl değerlendirileceği ile ilgili bakış açısı yoktur. Çökme akışı deneyi gibi, sınırlandırılmamış olması ve iki operatör gerektirmesi dezavantajdır. Betonun yerleştirme ve taşımadaki durumunu yansıtmaz, ancak yerleştirmeyi yansıtabilir.



Şekil 3.6. J Ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları (EFNARC, 2002).

3.3.2.5. Terleme deneyi

ASTM C 232-71'e göre yapılan terleme deneyi için 25.4 cm çapında 29 cm yüksekliğinde 3 mm et kalınlığına sahip üst tarafı açık bir silindir yaptırıldı. Terleme ölçümü yapabilmek üzere standartta belirtildiği gibi üstten 1 cm boşluk kalacak şekilde beton dolduruldu. Terleme kabına beton yerleştirilirken 3 kademe halinde dolduruldu. Her bir kademe 75 defa şişlendi. Yerleşen betonun üzerinde biriken suyun buharlaşmaması için bir cam kap, bu suyun toplanması için bir pipet ve biriktirilmesi için 250 cl'lik bir cam kap kullanıldı. Literatüre uygun şekilde her 10, 20, 30, 40 ve 70 dakikalarda üretilen numunelerin terleme davranışları incelenmiştir.



Şekil 3.7. Terleme Deneyi

3.3.2.6. Basınç altında terleme deneyi

Alt başlığı takılı honlanmış borunun içi kestamid pistonun altına 1.5 cm kalacak şekilde betonla doldurulmuştur. Beton, honlanmış borunun tam olarak dolmasını sağlamak amacıyla iki eşit tabaka halinde şişlenerek silindire yerleştirilmiştir. Beton, pompa silindirine konduğunda bu durumu elde etmek gerçekte mümkün olmayacağından betonu tam olarak sıkıştırmak çok önemli değildir. Daha sonra üst başlık sabitlenmiş ve terleme musluğu kapalıyken beton 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 barlık basınçlara tabi tutulmuştur. Terleme musluğu açılarak basınç her 20 sn'de bir 5 bar arttırılmıştır. Terleme musluğundan çıkan su miktarı basınç arttırıldıkça ölçülmüştür.



Şekil 3.8. Basınç Altında Terleme Deneyi

3.3.2.7. Basınç dayanımı deneyi

Üretilen her beton için 28 günlük basınç dayanım deneyleri 15×15×15 cm boyutundaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Betonlar kalıplarından 24 saat sonra çıkarılarak 28. gün sonuna kadar 20 °C sıcaklıktaki kirece doymun suda bekletilmiş ve 28. gün sonunda basınç dayanım deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.9. Basınç Dayanımı Deneyi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. Çökme, Yayılma, Birim Ağırlık ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

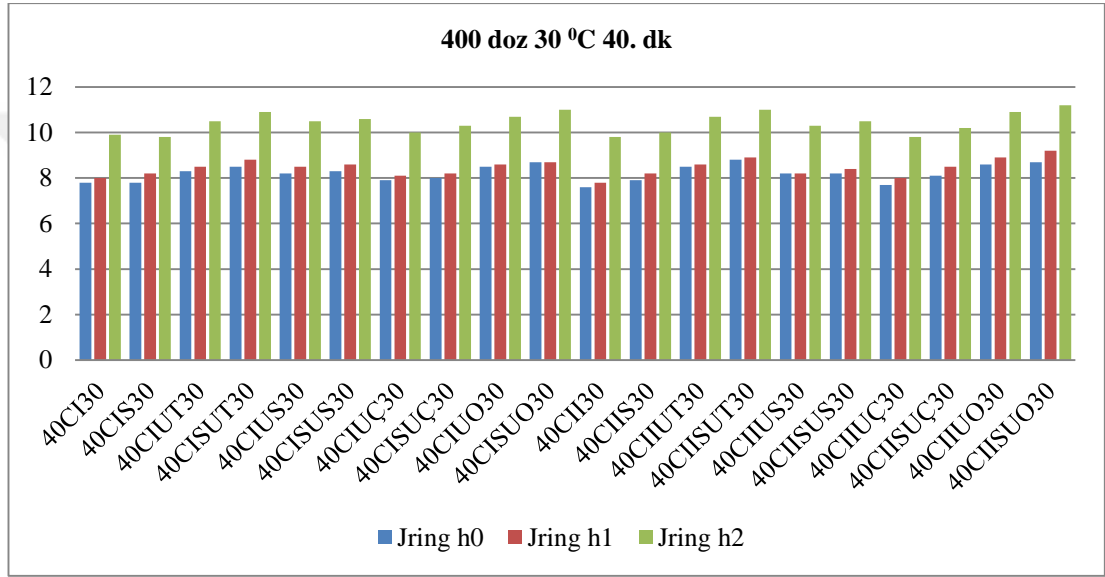
Çökme, çökme yayılması, birim ağırlık ve basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Betonların çökme, çökme yayılması, birim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri

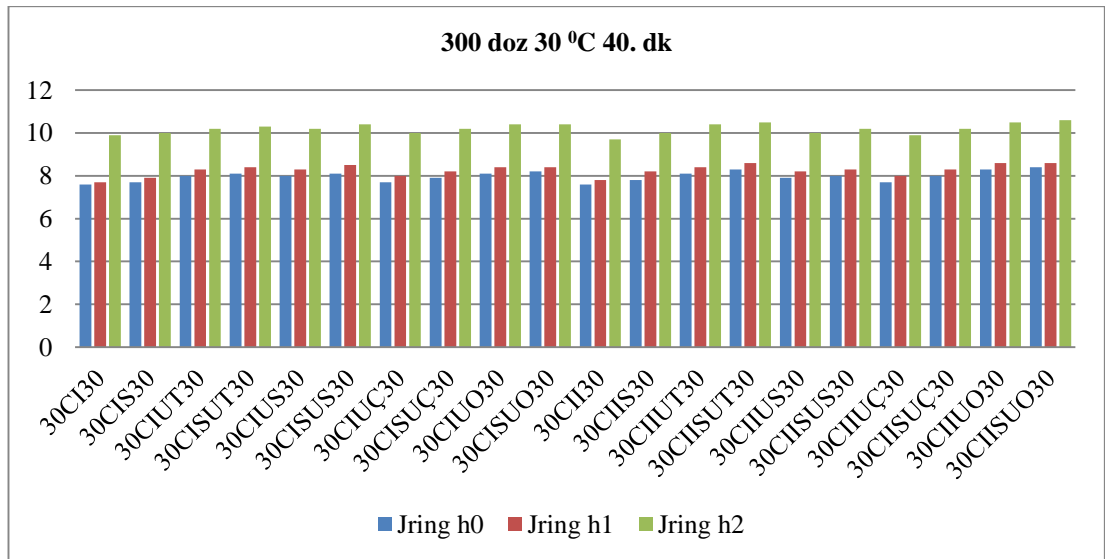
Karışım Tipi	Çökme cm	Çökme yayılması cm	Birim ağırlık kg/m ³	28 günlük basınç muk. MPa
30CI	19	28	2393	47.3
30CII	17	27	2380	50
30CIS	17	30	2350	51.2
30CIIS	15	27	2325	50.3
30CIUC	22	41	2363	56.5
30CIIUC	21	37	2358	60
30CISUC	15.5	26	2343	53.6
30CIISUC	13	25	2329	51
30CIUS	20	38	2350	61.8
30CIIUS	17	31	2291	49.8
30CISUS	15	26	2290	47
30CIISUS	20	40	2315	59.2
30CIUT	20	39	2326	58.5
30CIIUT	15	26	2302	51.1
30CISUT	13.5	25	2283	50.3
30CIISUT	19	37	2314	61
30CIUO	18.5	35	2328	61.8
30CIIUO	16.5	28	2367	48
30CISUO	15	27	2358	45.3
30CIISUO	22	40	2381	58.6
40CI	21	38	2376	59.1
40CII	14.5	25	2370	49.6
40CIS	13	24	2353	46.8
40CIIS	20	39	2380	60
40CIUC	15	26	2290	47
40CIIUC	15.5	25	2375	41.2
40CISUC	20	39	2326	58.5
40CIISUC	20.5	40	2378	50.3
40CIUS	20	39	2330	49.2
40CIIUS	14.5	26	2372	43.6
40CISUS	16	33	2370	53.6
40CIISUS	18	31	2379	58.7
40CIUT	15	27	2358	45.3
40CIIUT	17	29	2396	52,9
40CISUT	21	38	2376	59.1
40CIISUT	14.5	25	2370	49.6
40CIUO	13	24	2353	46.8
40CIIUO	17	33	2369	51.1
40CISUO	19	39	2377	61.1
40CIISUO	15.5	25	2375	41.2

4.1.1. J ring deneyi sonuçları

30 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan j ring sonuçları dikkate alındığında en fazla; j ring çökme yüksekliği (h_0) 87mm ile 40CIISUO30 karışımından, iç yükseklik(h_1) 92mm ile 40CIISUO30 karışımından, dış yükseklik(h_2) ise 112mm ile 40CIISUO30 karışımından, en düşük; j ring çökme yüksekliği (h_0) 76mm ile 30CI30, 30CII30, 40CII30 karışımlarından, iç yükseklik(h_1) 77mm ile 30CI30 karışımından, dış yükseklik(h_2) ise 97mm ile 30CII30 betonundan elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Jring Deney Sonuçları



Şekil 4.2 Jring Deney Sonuçları

4.2. Terleme Deneylerinin Sonuçları

Terleme deneylerinin sonuçları her uçucu kül ve 300 ve 400 doz beton sınıfları için terleme miktarı – zaman grafikleri Çizelge 4.4.’den, itibaren verilmiştir.

Çizelge 4.2. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	9.8	9.1	7.8	20.7
20	23.1	22.4	20.3	36.8
30	44.9	41.2	39.1	59.9
40	60.5	57.3	51.5	74
70	86.5	80.8	74.6	102.1

Çizelge 4.3. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	10.9	10.1	8	20.7
20	25.3	23.8	20.2	36.8
30	46.6	42.2	40.3	59.9
40	63.6	60	54.4	74
70	88.9	83.5	77.2	102.1

Çizelge 4.4. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	11.6	10.7	8.9	20.7
20	26.4	24.6	22.1	36.8
30	48.6	43.8	41	59.9
40	64.9	61.4	58.8	74
70	91.1	86.6	80.2	102.1

Çizelge 4.5. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	12.3	11.2	9.6	20.7
20	27.7	26.1	23.5	36.8
30	49.9	45.6	42.9	59.9
40	67.7	63	60.6	74
70	94.4	89.6	85	102.1

Çizelge 4.6. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taşolan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	8.6	8	7.4	18.7
20	17.8	16.1	13.7	32.8
30	40.3	38.6	35.1	56.4
40	56.1	50.7	45.5	71.9
70	80.2	76.6	71.1	95

Çizelge 4.7. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	9.1	8.4	7.8	18.7
20	19.6	17.6	14.7	32.8
30	42.1	39.3	36.2	56.4
40	57.8	52.9	46	71.9
70	82.9	79.3	73.5	95

Çizelge 4.8. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	9.6	9	8.5	18.7
20	21.3	19.1	16.5	32.8
30	43.2	40.6	39.9	56.4
40	59.9	54.6	49.1	71.9
70	84	81.1	76.7	95

Çizelge 4.9. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	10.8	9.7	9	18.7
20	22.2	20.3	18.8	32.8
30	47.6	42.6	40	56.4
40	63	57.9	52.6	71.9
70	87.1	82.6	80.8	95

Çizelge 4.10. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	7.4	6.8	5.9	14.2
20	14.6	13.2	11.8	27.8
30	34.6	32.2	30.7	50.1
40	50.1	47.1	42.2	65.3
70	74.3	72.2	70.1	89.2

Çizelge 4.11. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	7.9	7.3	6.6	14.2
20	16.7	14	12.5	27.8
30	37.9	34.8	32.3	50.1
40	53.7	49.8	44.6	65.3
70	77.7	73.3	70.6	89.2

Çizelge 4.12. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	8.5	7.9	7.3	14.2
20	17.9	16.5	15	27.8
30	39.8	37.7	35.1	50.1
40	54.6	51.3	47.9	65.3
70	79.1	74.4	69.7	89.2

Çizelge 4.13. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	8.8	8.1	7.9	14.2
20	18.7	17.3	16.6	27.8
30	40.9	38.8	36.2	50.1
40	55.2	52.8	48.7	65.3
70	81.1	76.7	73.9	89.2

Çizelge 4.14. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	6.6	6	5.2	16.8
20	11.2	10.1	9.2	28.9
30	29.2	27.5	26.9	49
40	43.2	41.4	37	63.9
70	65.3	63.4	62.5	87.3

Çizelge 4.15. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	7.1	6.5	5.4	16.8
20	13.1	12.3	11.5	28.9
30	31.6	29.6	27.3	49
40	46.6	42.3	37.5	63.9
70	69.2	67.5	63.6	87.3

Çizelge 4.16. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	7.6	6.7	5.9	16.8
20	14.6	13.3	12.4	28.9
30	33.5	31.2	28.9	49
40	48.5	44.9	42	63.9
70	73	69.9	65.2	87.3

Çizelge 4.17. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların terleme miktarı – zaman grafiği

Süre (dk)	Terleme miktarı (ml)			
	S	U	U+S	Şahit-K
10	8.1	7.4	7.1	16.8
20	15.5	14.6	13.3	28.9
30	35	33.6	29.9	49
40	49.3	46.6	43.1	63.9
70	74.5	73.9	72	87.3

4.3. Basınç Altında Terleme Deneyinin Sonuçları

Basınç altında terleme deneylerinin sonuçları her uçucu kül, 300-400 doz beton sınıfları, segregasyon basınçları ve uygulanan basınçlarda altında ki terleme miktarları Çizelge 4.20'den, itibaren verilmiştir.

Çizelge 4.18. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	9.8	6.5	6.1	5.2
10	13.9	7.9	6.9	6
15	17.9	11.8	10.6	9.9
20	30.2	22.1	20.2	19.3
25	50.1	27.7	25.9	23.5
30	52	39.1	36.1	33.4
SB(BAR)	35.6	52.4	59	64.4
SBT(ML)	71.6	55.5	48.7	44.2

Çizelge 4.19. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	9.8	7.9	7	6.2
10	13.9	9.6	7.8	7.1
15	17.9	13	12.1	11.6
20	30.2	24.5	22.3	21.1
25	50.1	30.3	27.1	25.6
30	52	43.9	41.2	34.9
SB	35.6	47.7	53.3	58.5
SBT	71.6	57.9	55.1	49.4

Çizelge 4.20. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	9.8	6.8	5.9	5.9
10	13.9	8.1	7.9	7.1
15	17.9	11.1	10.6	10.3
20	30.2	23.4	21.9	20.8
25	50.1	29.1	26.7	24.9
30	52	41.3	36.9	34
SB	35.6	49.9	56.1	60
SBT	71.6	56.9	51.2	46.4

Çizelge 4.21. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	9.8	8.1	7.1	6.6
10	13.9	10.5	8.9	8
15	17.9	13.9	12.9	12.1
20	30.2	25.3	23.1	22.4
25	50.1	31.8	25.3	23.5
30	52	44.8	42.4	36.8
SB	35.6	46.4	52.4	57.7
SBT	71.6	60.1	57.8	54.4

Çizelge 4.22. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	8.9	5	4.6	4.1
10	11.3	6.7	6.1	5.3
15	16.9	10.1	9.4	8.9
20	27.8	20.9	19.3	16.5
25	45.6	25.3	22.5	19.4
30	46.3	35.6	37.1	30.8
SB	31.8	50.1	58.5	64.4
SBT	64.4	49.6	42.1	37.9

Çizelge 4.23. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	8.9	6.5	6	5.8
10	11.3	7.4	6.8	5.9
15	16.9	11.3	10.3	9.5
20	27.8	22.2	20.1	17.9
25	45.6	26.3	24.1	21.2
30	46.3	42.6	40.4	31.2
SB	31.8	47.7	54.9	60.3
SBT	64.4	52.9	44.9	40.5

Çizelge 4.24. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	8.9	7.3	6.6	6.3
10	11.3	8.2	7.5	6.4
15	16.9	12	11.2	10.3
20	27.8	21.1	19.9	17.7
25	45.6	25.9	22.9	20.8
30	46.3	40.2	38.8	30.4
SB	31.8	49	56.4	62
SBT	64.4	50.5	42.9	38.6

Çizelge 4.25. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 300 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	8.9	7.9	6.8	6.5
10	11.3	8.9	8.1	7.8
15	16.9	13.3	12.9	11.8
20	27.8	22.4	19.8	18.7
25	45.6	26.2	24	22.3
30	46.3	42	39.9	32.5
SB	31.8	44.9	51.6	56.8
SBT	64.4	54.8	46.6	41.9

Çizelge 4.26. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	7.3	5.9	4.6	4
10	10.1	7.9	6.7	6.3
15	15.5	10.1	9.5	8.8
20	23.1	15.6	13.8	12.4
25	43.6	20.9	18.7	16.8
30	44.4	32.5	29	26.1
SB(BAR)	28.4	45.5	52.3	57.5
SBT(ML)	64.5	48.4	41.2	37.1

Çizelge 4.27. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	7.3	6.3	4.9	4.5
10	10.1	8.3	6.5	6
15	15.5	11.1	9.8	9.1
20	23.1	17.1	15	13.7
25	43.6	22.3	20.8	18.7
30	44.4	37.8	35.1	28.2
SB	28.4	40.7	46.8	51.5
SBT	64.5	51.7	48.6	42.5

Çizelge 4.28. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	7.3	6.8	5.6	5.2
10	10.1	8.9	6.9	6.3
15	15.5	12.3	10.9	10.1
20	23.1	16.6	14.8	13.3
25	43.6	21.9	19.6	17.3
30	44.4	34.1	30.3	27
SB	28.4	42.8	49.2	53.6
SBT	64.5	49.9	44.3	39.9

Çizelge 4.29. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMI iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	7.3	7.2	6.6	5.9
10	10.1	9.5	7.7	7
15	15.5	13.1	12.2	11.4
20	23.1	17.7	15.8	13.9
25	43.6	23.1	17.1	15.6
30	44.4	38.5	36.1	29.7
SB	28.4	39.6	45.5	50.1
SBT	64.5	53.9	50.9	47.8

Çizelge 4.30. Orhaneli uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	6.9	5	4.4	3.2
10	10.2	5.9	5.6	3.6
15	14.3	8.9	6.9	6.6
20	20.4	13.8	12.4	9.8
25	38.2	18.3	16.6	13.2
30	38.8	28.8	30.1	23
SB	24.6	39.4	45.3	49.8
SBT	56.4	42.5	36.1	32.5

Çizelge 4.31. Seyitömer uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	6.9	5.5	4.8	3.9
10	10.2	6.6	5.9	5.1
15	14.3	9.4	7.3	7.1
20	20.4	14.1	12.8	10.6
25	38.2	18.9	17.3	13.9
30	38.8	35.5	33.4	24.4
SB	24.6	36.3	45.9	50.3
SBT	56.4	45.6	38.9	34.9

Çizelge 4.32. Tunçbilek uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	6.9	5.7	5.2	4.2
10	10.2	6.9	6.1	5.3
15	14.3	9.9	7.8	7.5
20	20.4	15.3	13.9	12.1
25	38.2	20.1	18.3	14.3
30	38.8	36.7	35.5	26.3
SB	24.6	35.1	42.9	44.9
SBT	56.4	47.6	39.6	36.7

Çizelge 4.33. Çayırhan uçucu külü kullanılan, 400 doz, CEMII iri agregası çakıl ve kırma taş olan betonların basınç altında terleme miktarı ve segregasyon basınçları

Uygulanan basınç (bar)	Terleme miktarı (ml)			
	Şahit-K	S	U	S+U
5	6.9	5.9	5.5	4.6
10	10.2	7	6.5	5.9
15	14.3	10.6	8.3	7.9
20	20.4	15.6	14.2	12.9
25	38.2	21.3	19.4	15.1
30	38.8	37.4	36.1	27.6
SB	24.6	35	41.9	43.3
SBT	56.4	48.9	43.2	39.6

4.4. Weka Analizleri

Çizelge 4.34. Weka Analizleri

<i>Girdiler</i>	<i>Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2)</i>	
<i>Çıktı</i>	Terleme (T)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,4876	
functions.GaussianProcesses	0,5003	
functions.LeastMedSq	0,6913	$T = 1.7516 * S + 0.7869 * Y + 6.9909 * Jh0 + 18.7745 * Jh1 + 16.6673 * Jh2 + 0.2017 * JY + 19.8771$
functions.LinearRegression	0,621	$T = -3.2564 * Y + 16.4944 * Jh1 + 14.946 * Jh2 + 57.0233$
functions.MultilayerPerceptron	-0,5132	
functions.PaceRegression	0,5991	$T = -44.6916 + 7.8695 * Jh2$
functions.RBFNetwork	0,7186	
functions.SimpleLinearRegression	0,6581	
functions.SMOreg	0,6721	
lazy.IBk	0,8919	
lazy.Kstar	0,4799	
lazy.LWL	0,7342	
meta.AdditiveRegression	0,3223	
meta.Bagging	0,6363	
rules.DecisionTable	0,4449	
rules.M5Rules	0,862	
trees.DecisionStump	0,6998	
trees.M5P	0,683	$T = -1.1265 * Y + 5.8832 * Jh1 + 5.3216 * Jh2 + 2.9011$
trees.REPTree	0,7099	

Beton numunelerin 40. dakikaları dikkate alındığında ve terleme çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,8919 ile lazy. IBk kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.35. Weka Analizleri

Girdiler	<i>Slump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ringh0(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2)</i>	
Çıktı	Segregasyon Basıncı (SB)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,4212	
functions.GaussianProcesses	0,421	
functions.LeastMedSq	0,2101	$SB = -3.359 * S + 3.991 * Y + -3.5893 * Jh1 + 6.9131 * Jh2 + -1.3966 * JY + -12.3654$
functions.LinearRegression	0,4299	$SB = 1.2988 * Y + -52.0372$
functions.MultilayerPerceptron	0,4901	
functions.PaceRegression	0,8361	$SB = -6.0998 + -7.5050 * Y + 63.9886 * Jh0 - 7.1169$
functions.RBFNetwork	0,3599	
Linear Regression Model		
functions.SimpleLinearRegression	0,6895	
functions.SMOreg	0,6003	
lazy.IBk	-0,0409	
lazy.Kstar	-0,0499	
lazy.LWL	0,3901	
meta.AdditiveRegression	-0,0255	
meta.Bagging	0,4636	
rules.DecisionTable	0,2999	
rules.M5Rules	0,4667	$SB = 9.6301 * Jh1 - 49.8362$
trees.DecisionStump	0,3881	
trees.M5P	0,4963	$SB = 9.6301 * Jh1 - 49.8362$

Beton numunelerin reolojik değerleri dikkate alındığında ve segregasyon basıncı çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,8361 ile functions.PaceRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.36. Weka Analizleri

Girdiler	<i>Slump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ringh0(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2)</i>	
Çıktı	Segregasyon Basıncı Terlemesi(SBT)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9066	
functions.GaussianProcesses	0,8199	
functions.LeastMedSq	0,8935	
functions.LinearRegression	0,9608	$SBT = 50.9963 * S + -29.9963 * Y + 266.0084 * Jh0 + -80.034 * Jh1 + 149.777 * Jh2 + -1369.6332$
functions.MultilayerPerceptron	0,8319	
functions.PaceRegression	0,8993	$SBT = -1630.8869 + 40.644 * S + -27.9909 * Y + 211.0961 * Jh0 + -94.2124 * Jh1 + 186.9887 * Jh2 + 7.9593 * JY + 51.0023$
functions.RBFNetwork	0,7985	
Linear Regression Model		
functions.SimpleLinearRegression	0,9189	
functions.SMOreg	0,899	
lazy.IBk	0,8009	
lazy.Kstar	0,7963	
lazy.LWL	0,8016	
meta.AdditiveRegression	0,8931	
meta.Bagging	0,8974	
rules.DecisionTable	0,9103	
rules.M5Rules	0,9009	
trees.DecisionStump	0,8939	
trees.M5P	0,9009	$SBT = -22.9161 * Y + 212.095 * Jh0 + 109.9709 * Jh2 + 15.006 * JY - 1569.0096$
trees.REPTree	0,8596	

Beton numunelerin reolojik değerleri dikkate alınıp ve segregasyon basıncı terlemesi çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9966 ile functions.IsotonicRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.37. Weka Analizleri

Girdiler	<i>Sulump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ring(h₀),j ringh1(h₁),j ringh2(h₂)</i>	
Çıktı	Terleme (T70)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,1383	
functions.GaussianProcesses	0,6883	
functions.LeastMedSq	0,5966	T70 = 6.0026 * S + 0.2977 * Y + -9.3636 * Jh0 + -2.0772 * Jh2 + -0.381 * JY + 27.0116
functions.LinearRegression	-0,2229	T70 = 1.9965 * S + -18.9965
functions.MultilayerPerceptron	0,1515	
functions.PaceRegression	0,7665	T70 = 25.0993 + 11.954 * Jh2
functions.RBFNetwork	0,2318	
functions.SimpleLinearRegression	0,4339	
functions.SMOreg	0,6949	
lazy.IBk	-0,1909	
lazy.Kstar	-0,49	
lazy.LWL	-0,166	
meta.AdditiveRegression	0,2098	
meta.Bagging	0,1465	
rules.DecisionTable	-0,1289	
rules.M5Rules	-0,2765	T70 = 1.7661 * S - 18.9995
trees.DecisionStump	0,3616	
trees.M5P	-0,2765	T70 = 1.7661 * S - 18.995

Beton numunelerin 70. dakikaları dikkate alındığında ve terleme çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,7665 ile functions. PaceRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Farklı dozajlarda katkılı taze betonların reolojik özelliklerinin belirlendiği ve reolojik özelliklerinin ve terleme davranışının taze beton deneyleriyle karşılaştırılması ana konu olarak incelenen bu çalışmada dozaj, çimento sınıfı ve mineral katkılara göre farklı bulgu ve bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağlamda üretilen betonlar üzerinde çökme, çökme yayılması, terleme ve basınç altında terleme deneyleri yapıldı. Ayrıca beton dayanımlarının belirlenebilmesi için basınç dayanım deneyleri de yapıldı.

Araştırmada çimento dozajı 300 ve 400 kg/m³ seçilmiş ve iki farklı çimento tipi ile mineral katkı olarak 4 farklı uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Tüm karışımlarda kimyasal katkı oranı ön deneylerde çökme deneyleri (en az 20 cm olacak şekilde) dikkate alınarak bağlayıcı maddenin %1,5'i olarak belirlenmiştir. 300 dozlu betonlar için 0,45, 400 dozlu betonlar için 0,35 S/Ç oranı alınmıştır. Çimento olarak CEM I 42.5 R ve CEMII 42.5 A-M R kullanılmıştır. Tüm karışımlarda şahit numunelerin haricinde 4 farklı uçucu kül (Çayırhan, Orhaneli, Seyitömer ve Tunçbilek) çimentonun %15'i oranında ve silis dumanı çimentonun %10 u oranında katılarak 40 farklı numune üretilmiştir.

Elde edilen deney sonuçları veri madenciliği analiz edilerek, değerlendirmeler yapılmıştır. Burada taze beton sonuçları girdi, terleme ve segregasyon basıncı parametreleri çıktı olarak kullanılmak suretiyle istatistiksel modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

Terleme davranışı ve segregasyon basıncı, taze beton deneylerinden elde edilen veriler % 80 model eğitim seti kullanılarak formüsel olarak aralarındaki ilişkiler belirlenmiştir. Bu formüller deneylerin 40 ve 70. dakikaları baz alınarak hazırlanmıştır. Modellerden en iyi regresyon değerini veren model çizelgelerde belirtilmiştir.

Mevcut değerler incelendiğinde taze beton deneyleri ile terleme davranışı ile iyi korelasyon vermesine karşılık segregasyon basıncına göre düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda; betona ilave edilen tüm uçucu küllerde çökme miktarının ve çökme yayılmasının azaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla uçucu külün betonun işlenebilirlik kalitesini düşürdüğü söylenebilir.

Uçucu kül kullanılarak elde edilen betonlara silis dumanı eklenmesi durumunda sadece uçucu kül ile üretilen betonlara nazaran betonun çökme miktarı oldukça artış göstermiştir. Dolayısıyla betona silis dumanı ilave edildiği takdirde betonun işlenebilirlik kalitesinin arttığı söylenebilir.

Terleme sonuçları neticesinde ise , 300 doz ve 400 doz üretilen beton numuneler arasında ilişkide 300 doz beton numunenin 400 doza göre daha fazla terleme davranışı gösterdiği görülmüştür. Dolayısıyla mukavemeti yüksek olan betonun daha az terleme davranışı gösterdiği söylenebilir.

Beton numunelerde kullanılan CEMI ve CEMII çimento sınıfları arasında mukayesede ise CEMI çimento sınıfının CEMII çimento sınıfına göre daha fazla terleme davranışı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Beton numunelere ilave edilen uçucu küllerin tamamında terleme davranışı üzerinde olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. Uçucu küller arasında ise en olumlu etkiyi Orhaneli uçucu külü en az etkiyi ise Çayırhan uçucu külü göstermiştir.

Basınç altında terleme deneyinde de betona uçucu kül ilavesinin kullanılan her uçucu kül için terleme miktarını azalttığı görülmüştür. Bu etki en fazla Orhaneli uçucu külünde görülürken en az etkiyi Çayırhan uçucu külü göstermiştir. Uçucu kül miktarının artması terlemeyi bir miktar daha azaltmıştır. Kullanılan uçucu küle göre terleme miktarlarının değiştiği söylenebilir. Belirlenen segregasyon basınçlarına göre uçucu kül ilavesinin segregasyon basıncını yükselttiği söylenebilir. Silis dumanı ilavesi terleme miktarlarını sadece uçucu küle üretilen betonlara göre azaltırken segregasyon basınçlarını da arttırarak yine olumlu bir etki göstermiştir.

KAYNAKLAR

- ACI 304-2R, 2017. ACI 304. 2R-17 Guide to Placing Concrete by Pumping Methods, American Concrete Institute
- Akman M.S., 1992, "Deniz yapılarında beton teknolojisi", İTÜ, Gemi inşaatı ve deniz bilimleri fakültesi, offset matbaası, İstanbul. s. 74-105.
- Akman M.S., Akçay B., Kimyasal Beton Katkılarının Gelişimi ve Çimentolarla Uyumu, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyumu, 24-25 Mart 2005, Ankara, ss. 15-32.
- Akman, M.S., 1987. Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat Fakültesi yayını, 161s, İstanbul
- Akman, M.S., 1996. Kimyasal Katkıların Betona Uygulanması. 4. Ulusal Beton Kongresi. (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 1-11, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- Akman, M.S., Yücel, K.T., 1996. Effects of Cement – High Range Water Reducer – Fly Ash Ternary System on Concrete Workability. 4th International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, Gazimagusa.
- Aköz, F., Koral, S., Yüzer, N., Türker, F., 1995. Effects of Sodium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume. Cement and Concrete Research, 25 (6) 1995, 1360-1368.
- ASTM C 125, 1994. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 127, 2015, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 128, 2015, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 136, 2014. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 138, 2016. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 219, 1993. Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 29, 1997. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 33, 2017. Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards.

- ASTM C 494, 2017. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618, 1998. Standard Specification for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, No:4.
- ASTM D 2270, 2016. Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D 445, 2018. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D 7042-04, 2004. Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity), Annual Book of ASTM Standards.
- Atiş, C.D., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U.K., Demir, A., 2003. Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri. Türkiye Mühendislik Haberleri, Yıl:48/2003-4, Sayı:426, 121-124.
- Baradan S., 1997, “Çimento tipinin Donatı-Beton Aderansına Etkisi”, Ege Üniversitesi, Fen Bil. Ens. İnşaat Müh. A.B.D., Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Berkday, İ., 2003, “Betonarme-I”, TMMOB, İnşaat Müh. Odası, İstanbul Şubesi.
- C. Zekai, K. Nahit, 2005, “Betonarme Yapılar” İTÜ İnşaat Fakültesi, Beta Dağıtım, İstanbul 2005
- Campione C., Cucchiara C., Mendola L.L., Papia M., “Steel–concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions”, Engineering Structures 27 (2005) 881–890.
- Çolak A., “Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels”, International Journal of Adhesion & Adhesives 21 (2001) 487–493.
- Dadone, P., 2001, “Design Optimization of Fuzzy Logic Systems”, Virginia Polytechnic Institute and State University, Electrical Engineering, Doctoral Thesis.
- Daniel, J.I., 1998. Glass Fiber Reinforced Concrete. Fiber Reinforced Concrete. (Portland Cement Association), 11-20, Illinois.
- Daniel, J.I., 1998. Types of Fiber Reinforced Concrete. Fiber Reinforced Concrete. (Portland Cement Association), 2-3, Illinois.
- Daniel, J.I., Roller, J.J., Anderson, E.D., 1998. Polymeric Fiber Reinforced Concrete. Fiber Reinforced Concrete. (Portland Cement Association), 22-33, Illinois.

- Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, O.W., Davis, N.E., 1937. Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash. ACI Journal, Proceedings, V.33, No:5, 557-612.
- Ekinci, C.E., Yeğınobalı, A., 1996. Silis Dumanı Katkılı Betonların Çarpma Dayanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi. (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 25-33, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- Ekinciöğlu, Ö., 2002. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Sika Teknik Bülten, Yıl:5, Sayı:2002/3, 10-17.
- Elmas, Ç., “Bulanık Mantık Denetleyiciler”, Seçkin yayınevi, Ankara, 2003. ISBN 975 347 613 2.
- EN 934-2, 2012. Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling (includes Amendment
- Erdoğan, T.Y., 1997. Admixures for Concrete, Middle East Technical University, 188 s Ankara.
- Erdoğdu, Ş., Kurbetci, Ş., 2003. Farklı Firma Ürünü Su İndirgeyici Katkı Maddelerinin Normal Dayanımlı Beton Üretiminde Etkin Kullanımı. Çimento ve Beton Dünyası, Yıl:7, Sayı:42, 40-47, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Guo, J., Cox J.V., “Implementation of a plasticity bond model for reinforced Concrete”, Computers and Structures 77 (2000) 65±82.
- Haddad R.H., Numayr K.S., “Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete–steel bond”, Construction and Building Materials (In press).
- Hamad B.S., Itani M.S., Bond strength of reinforcement in high performance concrete: The role of silica fume, casting position and superplasticizer dosage. ACI Mater, J. 98, 499-511.
- Joshi, R.C., Day, R.L., Langan, B.W., Ward, M.A., 1986. Engineering Properties of Concrete Containing High Proportions of Fly Ash and Other Mineral Admixtures. 2nd CANMET/ACI International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Suppl. Papers, 20, Madrid.
- Liang, W., Cheng, J., Hu, Y., Luo, H., 2002. Improved Properties of GRC Compozites Using Commercial E-glass Fibers with New Coatings. Materials Research Bulletin, 37 (2002), 641-646.
- Malhotra, V.M., 1983. Strenght and Durability Characteristics of Concrete Incorporating a Pelletized Blast Furnace Slag. ACI SP-79, V2, 891-921.

- Minnick, I.J., Webster, W.C., Purdy, E.J., 1971. Predictions of the Effect of Fly Ash in Portland Cement Mortar and Concrete. *Journal of Materials*, Vol.6, No:1, 163-187.
- Neville, A.M., Brooks, J.J., 1987. *Concrete Technology*, Longman Scientific and Technical, 155p.
- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M., 1999. *Her Yönüyle Beton*. THBB yayını, İstanbul
- Ramachandran V.S., “Concrete Admixtures Handbook (Properties, Science and Technology)”, Second Edition, Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Ontario, Canada, 1995.
- Ravina, D., 1981. Efficient Utilization Coarse and Fire Fly Ash in Precast Concrete by Incorporating Thermal Curing. *ACI Journal, Proceedings*, V.77, No:3, 194-200.
- Şen, Z., “Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri”, İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2004.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yerlikaya, M., 2003. Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Yıl:48/2003-4, Sayı:426, 76-84.
- Tattersal, G.H., 1991. *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. E.&F.N. Spon Publisher, 262s, London.
- Tautanji, A.H., Bayasi, Z., 1999. Effect of Curing Procedures on Properties of Silica Fume Concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (4) 1999, 497-501.
- Tokyay, M., 1990. Uçucu Küllerin Beton Malzemesi Olarak Kullanılması Üzerine Yapılan Araştırmaların Gözden Geçirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı:348, 4-10.
- TS 500, “Betonarme hesap ve Yapım Kuralları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- TS 639, 1975, “Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2003, “Beton Agregaları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 708, “Beton Çelik Çubukları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1996.
- TS EN 1015-3, “Kagır harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- TS EN 12350-1, “Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 1: Numune Alma”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

- TS EN 12350-2, “Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12350-5, “Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12350-6, “Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12390-1, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri” , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12390-2, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerininin yapımı ve küre tâbi tutulması” , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12390-3, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
- TS EN 12390-4, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinalarının özellikleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 12390-7, “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 196-1, 2009. “Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3, “Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450, 2002. Uçucu kül-Betonda kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrol, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, “Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin- Bölüm 2: Beton Katkıları- Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- Türk K., 2002, “Bileşik Eğilmeye Maruz Betonarme Elemanlarda Donatı Aderansının Beton Özelliklerine Bağlı Olarak İncelenmesi”, Fırat Üniv., Fen Bilimleri Ens., İnşaat Müh. A.B.D., Doktora Tezi, Elazığ.
- Türker, F., Aköz, F., Koral, S., Yüzer, N., 1997. Effects of Magnesium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume. Cement and Concrete Research, 27 (2) 1997, 205-214.

- Türker, P., Erdoğan, B., “Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB 2003 ANKARA.
- Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D., 1997. The Role of Steric Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in Fresh Paste Prepared with Organic Admixture. *Cement and Concrete Research*, 27, 37-50.
- Uyan, M., Yıldırım, H., Süvari, Y., 1996. Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliği. 4. Ulusal Beton Kongresi. (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 13-23, Maya Basın Yayın, İstanbul.
- Uygunoğlu T., Ünal O., “Seyitömer Uçucu Külünün Betonun Basınç Dayanımına Etkisi Üzerine Bulanık Mantık Yaklaşımı”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi (YTED)*, 2005 (1) 13-20.
- Uygunoğlu T., Ünal O., Yücel K.T., “Uçucu Külün Betonun Basınç Dayanımına Etkisi Üzerine Bulanık Mantık Yaklaşımı”, 4. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 28-30 Eylül 2005, Konya.
- Ünal O., Uygunoğlu T., Elmacı Ö., “Lif Katkılı Betonun Elastisite Modülü Üzerine Kür Ortamının Etkisi”, 6. Ulusal Beton Kongresi (Yüksek Performanslı Betonlar), 15-17 Kasım 2005, İstanbul.
- Ünal Y., 1998, “Aderansın Betonun Agregata Tane Çapı ve Dayanımına Bağlı Olarak Değişimi Üzerine Bir Araştırma”, Fırat Üniversitesi, Fen Bil. Ens., İnşaat Mühendisliği A.B.D., Yük.Lis. Tezi, Elazığ.
- Ünal, B., Köksal, F., Eyyubov, C., 2003. Polipropilen ve Çelik Liflerin Yol Kaplama Betonlarının Mekanik ve Dürabilite Özelliklerine Etkisi. *Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi*, İstanbul.
- Wang X., Liu X., “A strain-softening model for steel–concrete bond”, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1669–1673.
- Yan, A., Wu, K., Zhan, X., 2002, “A Quantitative Study on the Surface Crack Pattern of Concrete With High Content Steel Fiber”, *Cement and Concrete Research* 32, 1371–1375
- Yazıcı, Ş., 2003. Süper Akışkanlaştırıcıların Betondaki Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkileri. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:5, Sayı:1, 103-114.
- Yerlici V., Ersoy U., Özturan T., Türk M., Özden Ş., “Yüksek Dayanımlı Beton Elemanlarda Donatı Kenetlenmesi”, *İMO Teknik Dergi*, Cilt 6, Sayı 3, Temmuz 1995.
- Yıldırım, H., Uyan, M., 2005. Betonda Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımında İstenen Şartlar ve Türkiye’deki Durum. *Yapılarda Kimyasal Katkıları Sempozyumu ve Sergisi*. (TMMOB Kimya Mühendisleri ve İnşaat Mühendisleri Odası), 157-168, Ankara.

Yıldırım, H., Yorulmazel, V., Ardaç, E., 1996. Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliği. 4. Ulusal Beton Kongresi. (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 25-33, Maya Basın Yayın, İstanbul.

Yılmaz, A.D., 2003. Yeni Kuşak Hiper Akışkanlaştırıcı Beton Katkıları. Türkiye Mühendislik Haberleri, Yıl:48/2003-4, Sayı:426, 125-129.

Yılmaz, K., 2002. Normal ve Süper Akışkanlaştırıcıların Betona Kazandırdıkları. Hazır Beton Dergisi, Yıl:9, Sayı:50, 54-59, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.

Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets," *Information and Control*, 8, 338-352, 1965.

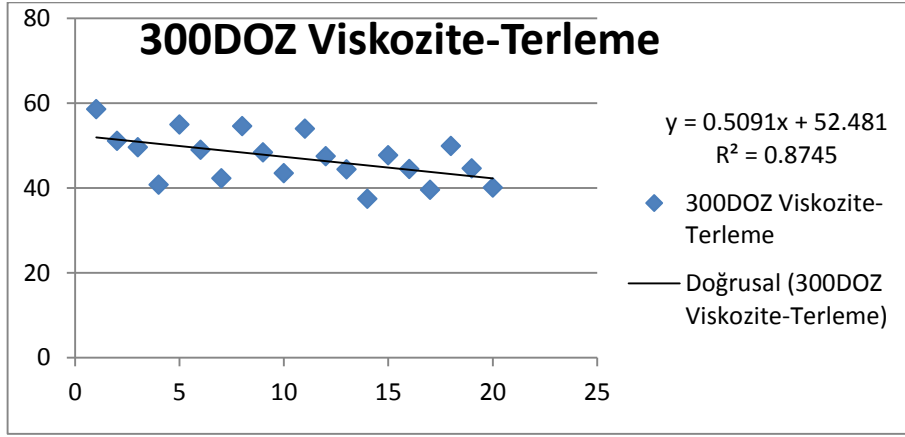


EKLER

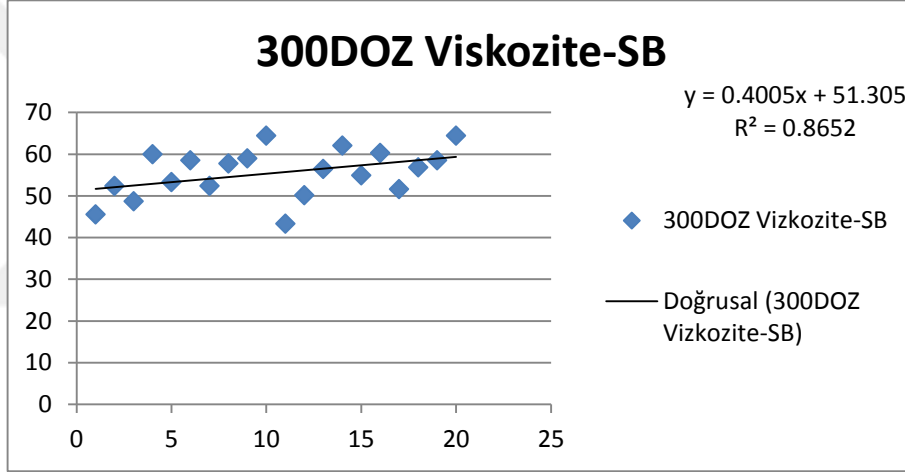
EK A. Taze Beton Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması



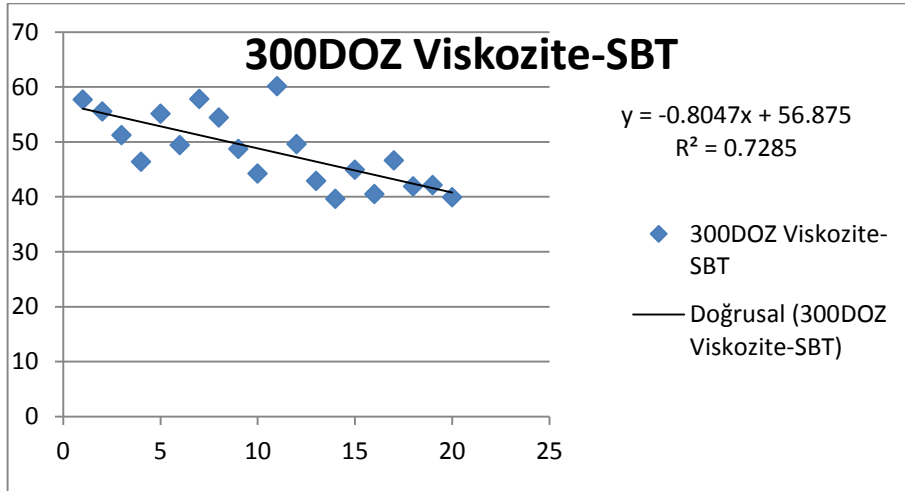
EK A.Taze Beton Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması



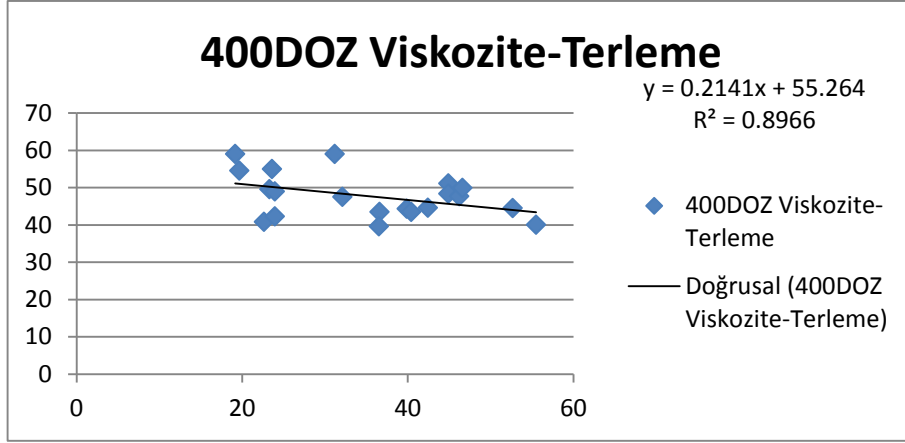
Şekil A.1. Viskozite-Terleme İlişkisi



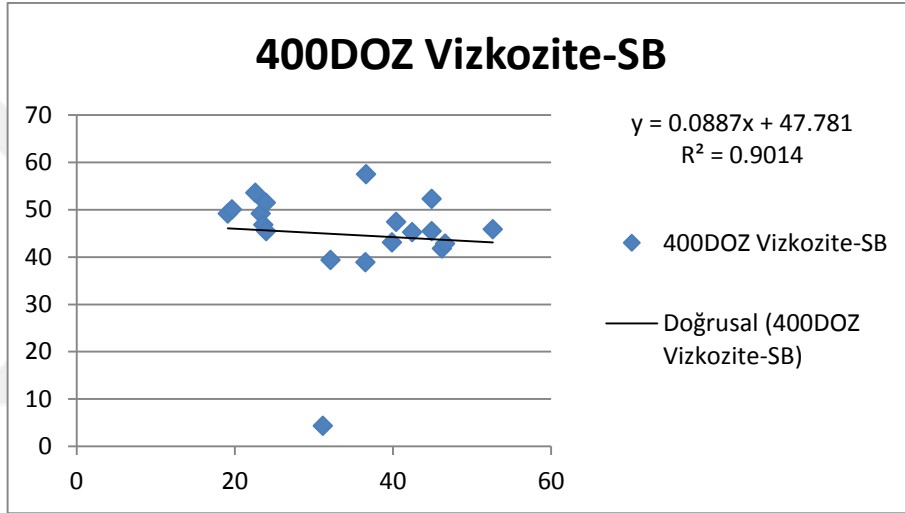
Şekil A.2. Viskozite-Segregasyon Basıncı İlişkisi



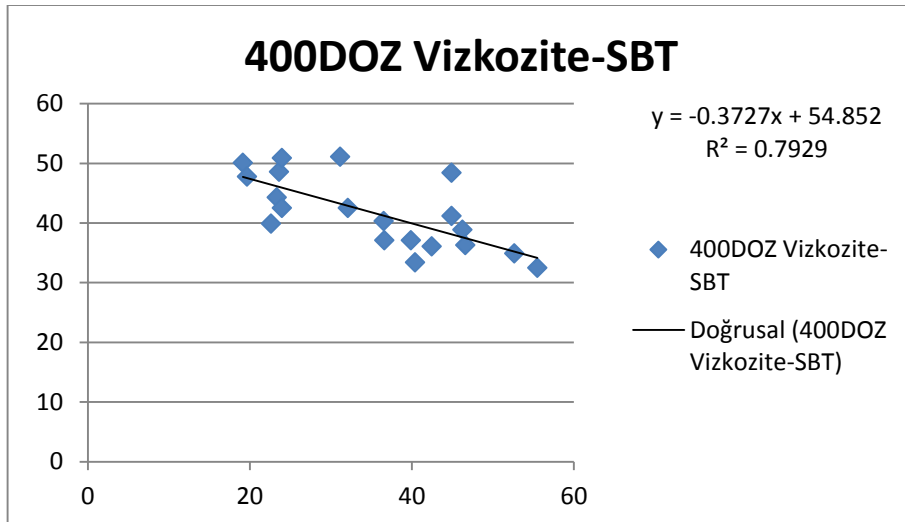
Şekil A.3. Viskozite-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



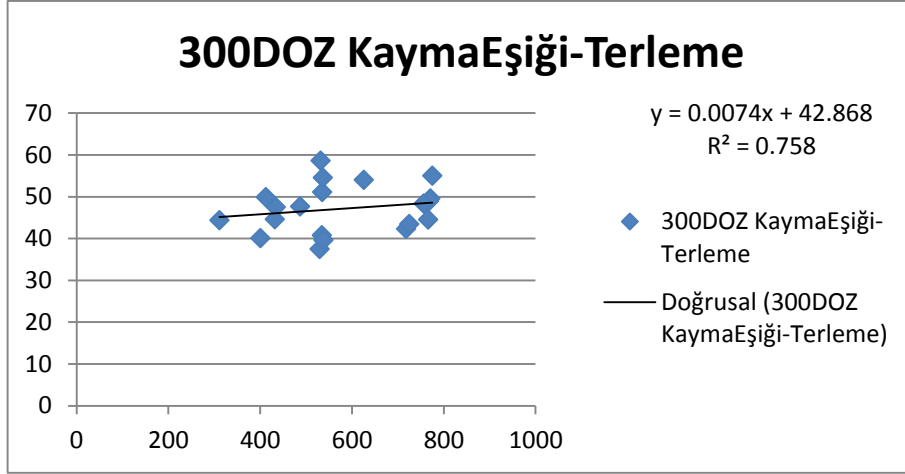
Şekil A.4. Viskozite-Terleme İlişkisi



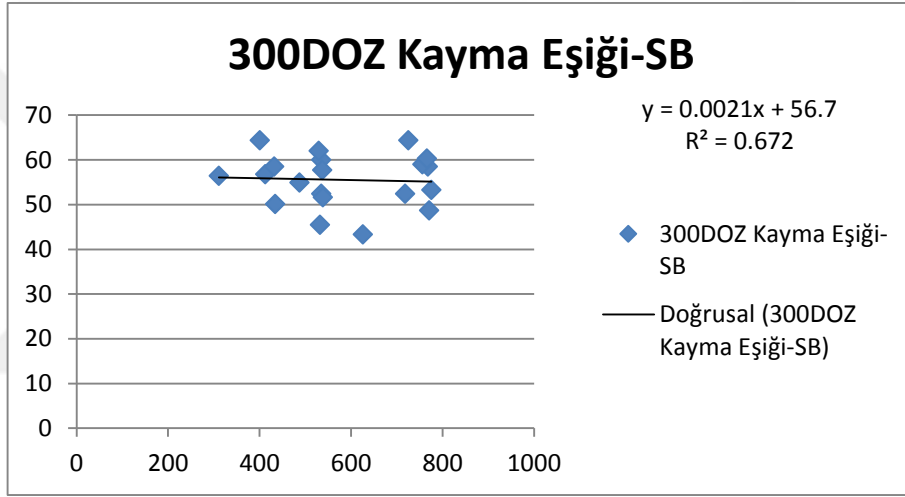
Şekil A.5. Viskozite-Segregasyon Basıncı İlişkisi



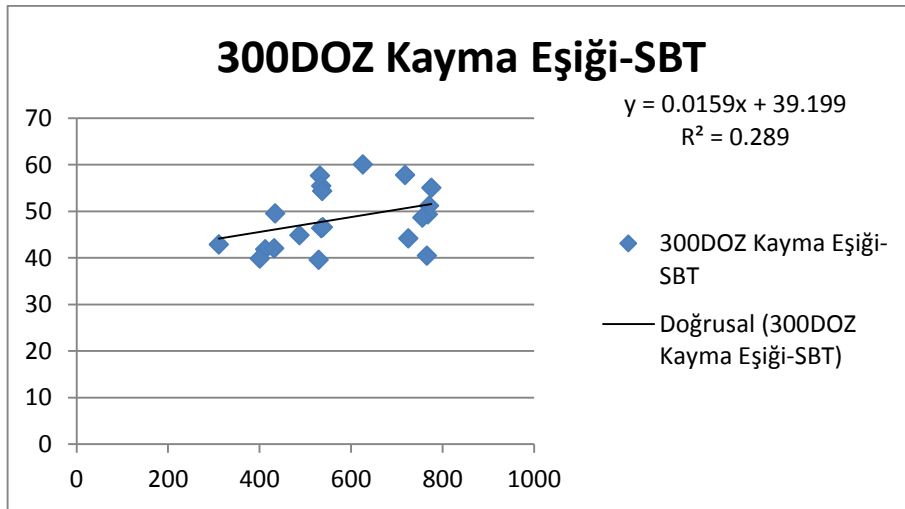
Şekil A.6. Viskozite-Segregasyon Basıncı İlişkisi



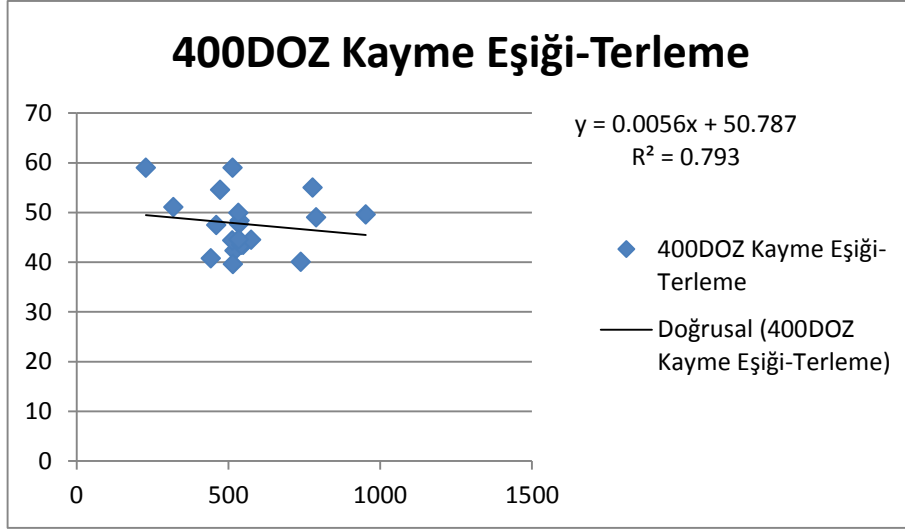
Şekil A.7. Kaymaeşiği-Terleme İlişkisi



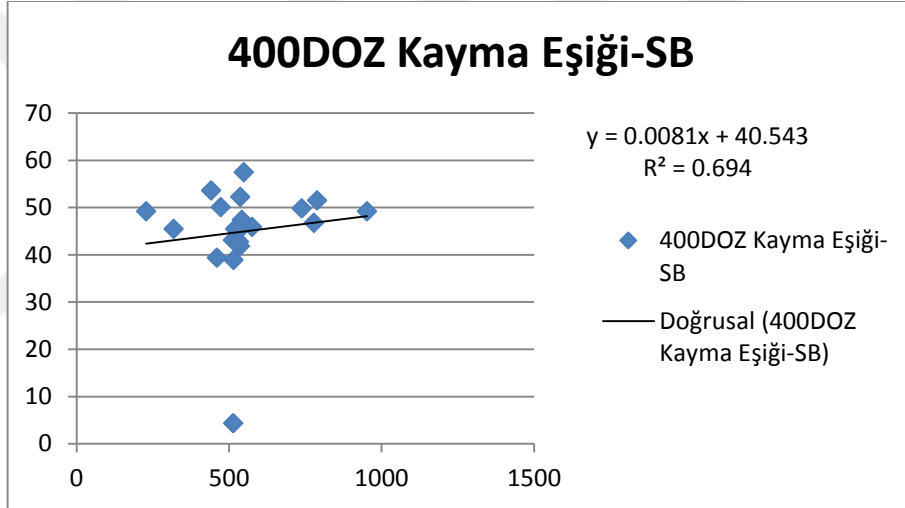
Şekil A.8. Kaymaeşiği-Segrasyon Basıncı İlişkisi



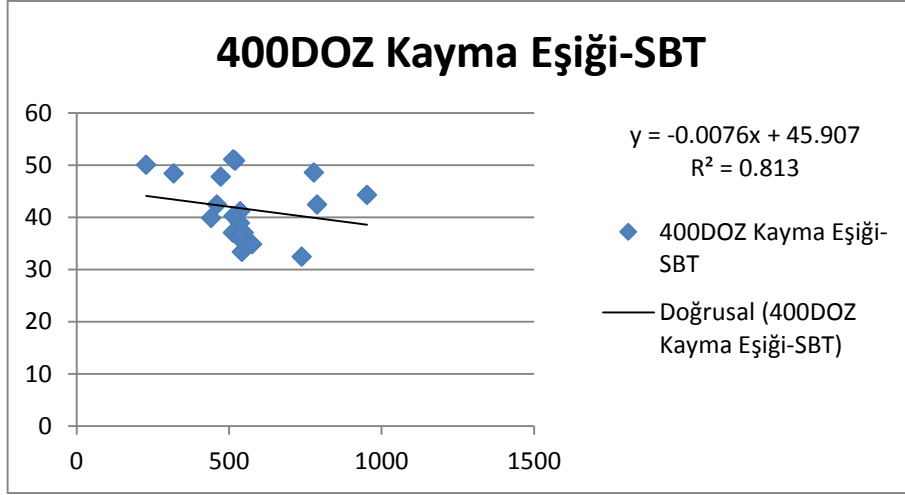
Şekil A.9. Kaymaeşiği-Segrasyon Basıncı Terleme İlişkisi



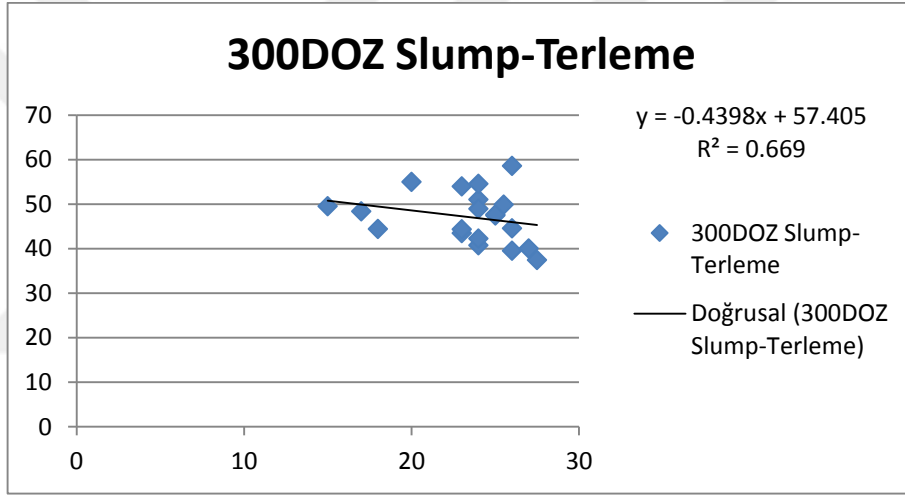
Şekil A.10. Kaymaeşiği-Terleme İlişkisi



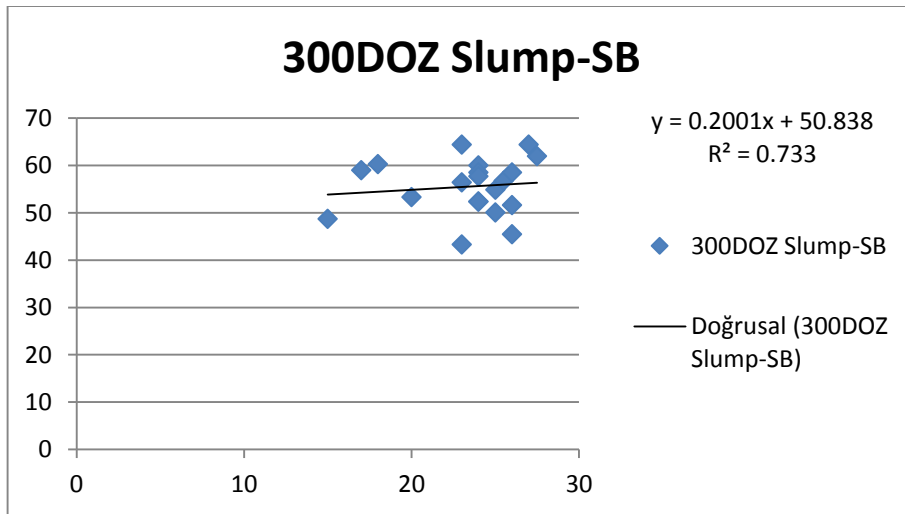
Şekil A.11. Kaymaeşiği-SegregasyonBasıncı İlişkisi



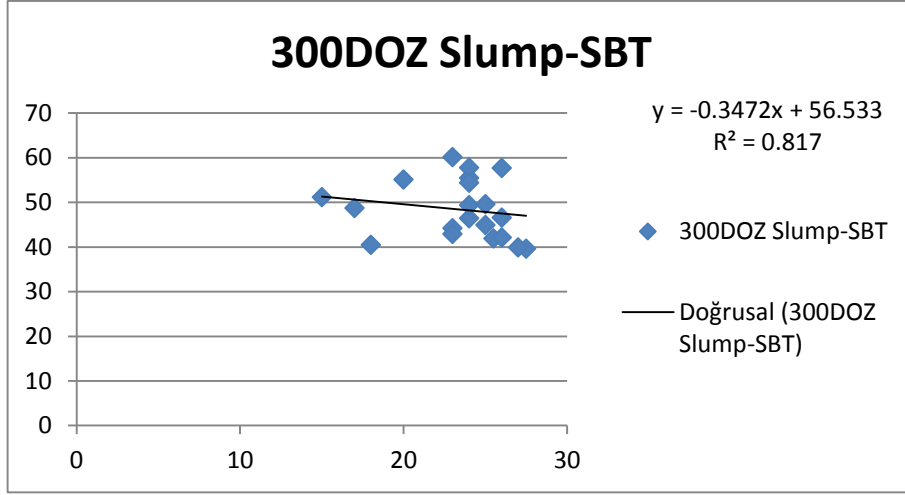
Şekil A.12. Kaymaeşiği-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



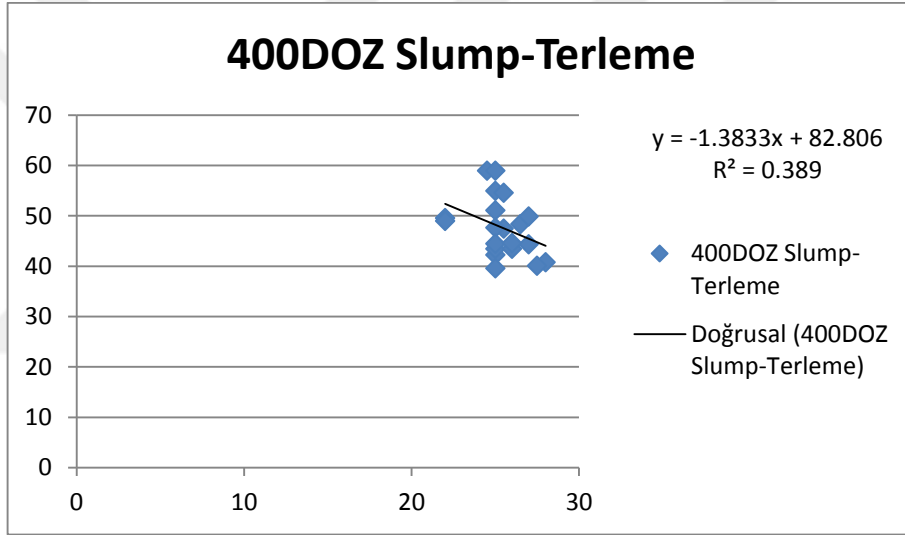
Şekil A.13. Slump-Terleme İlişkisi



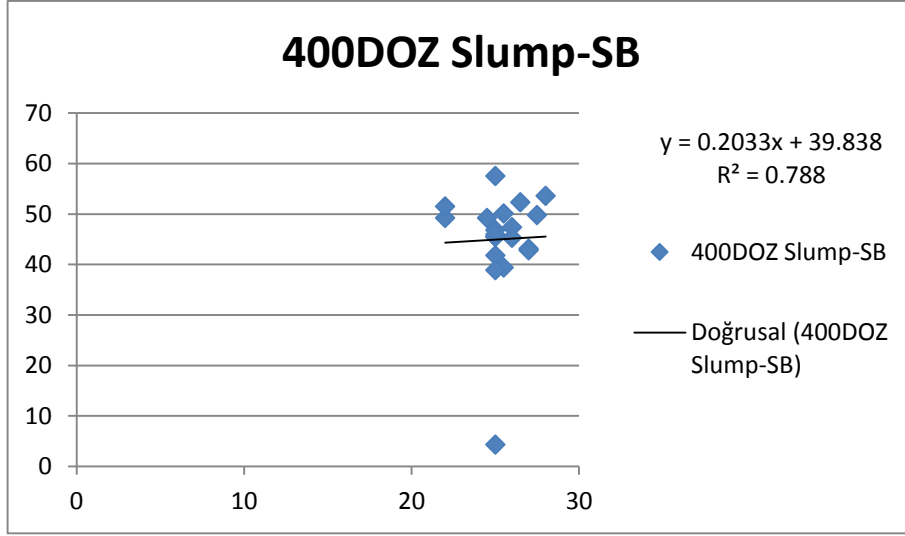
Şekil A.14. Slump-Segregasyon Basıncı İlişkisi



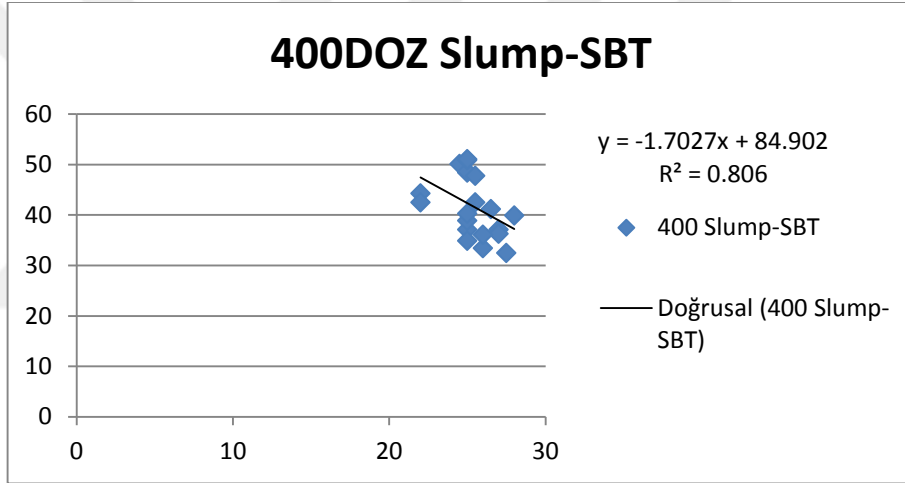
Şekil A.15. Slump-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



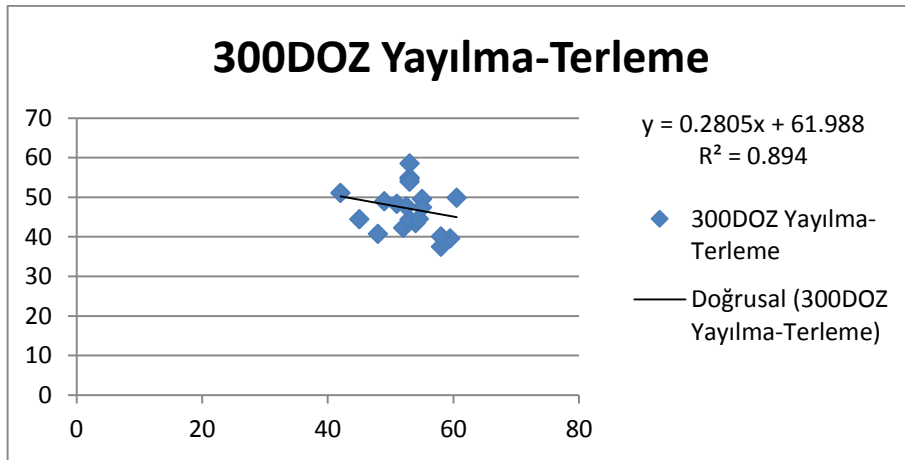
Şekil A.16. Slump-Terleme İlişkisi



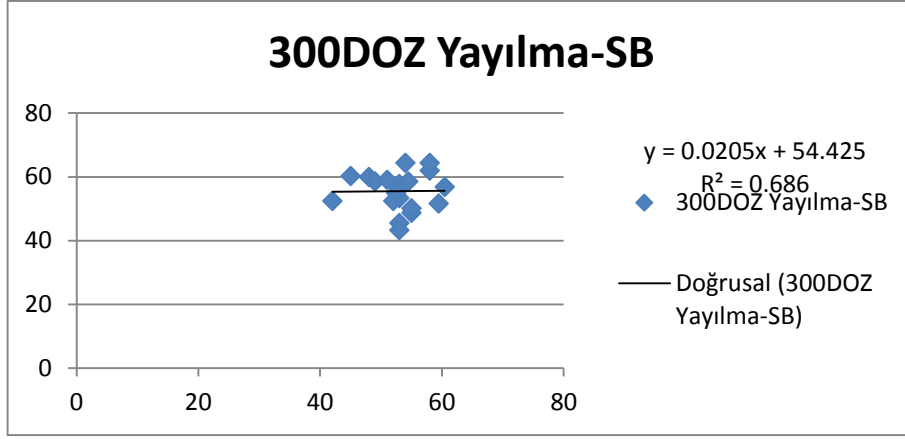
Şekil A.17. Slump-Segregasyon Basıncı İlişkisi



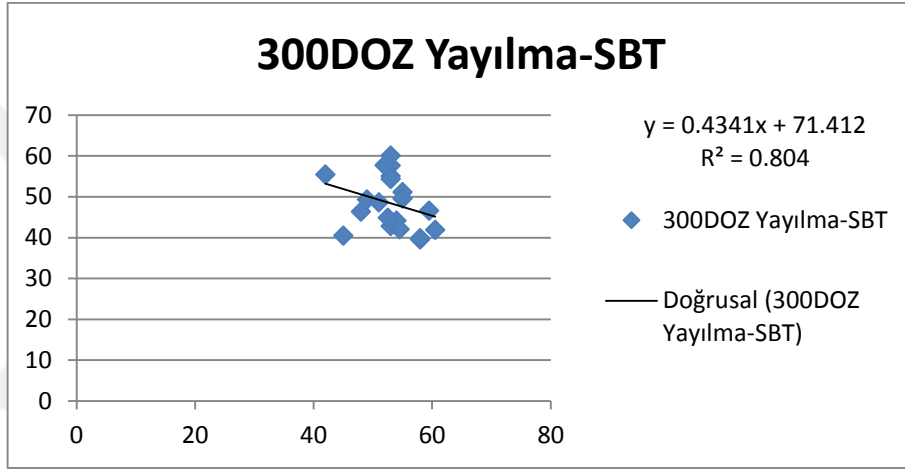
Şekil A.18. Slump-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



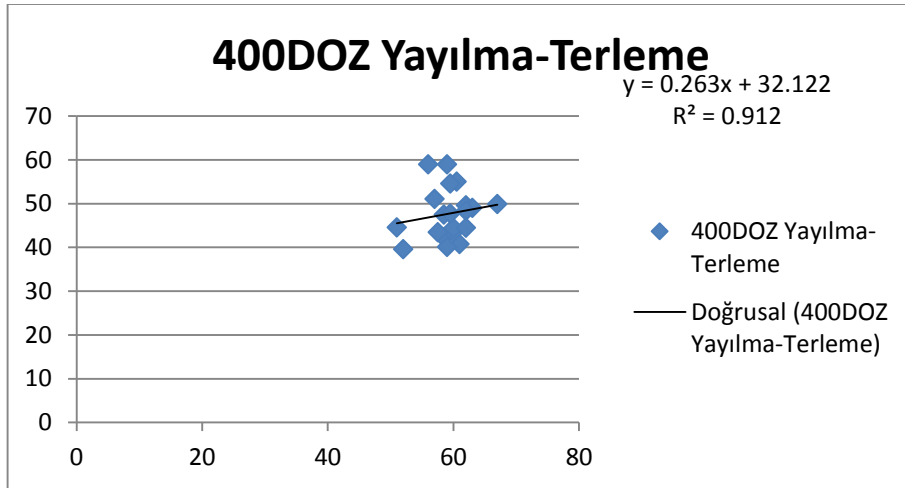
Şekil A.19. Yayılma-Terleme İlişkisi



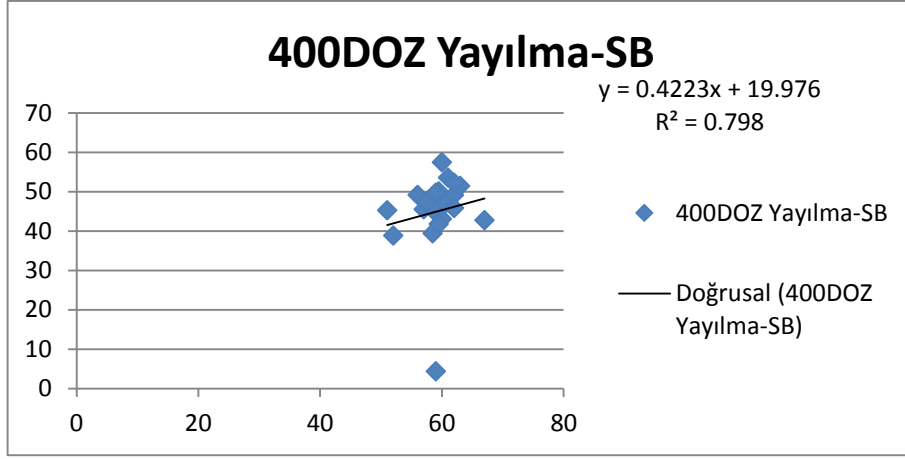
Şekil A.20. Yayılma-Segregasyon Basıncı İlişkisi



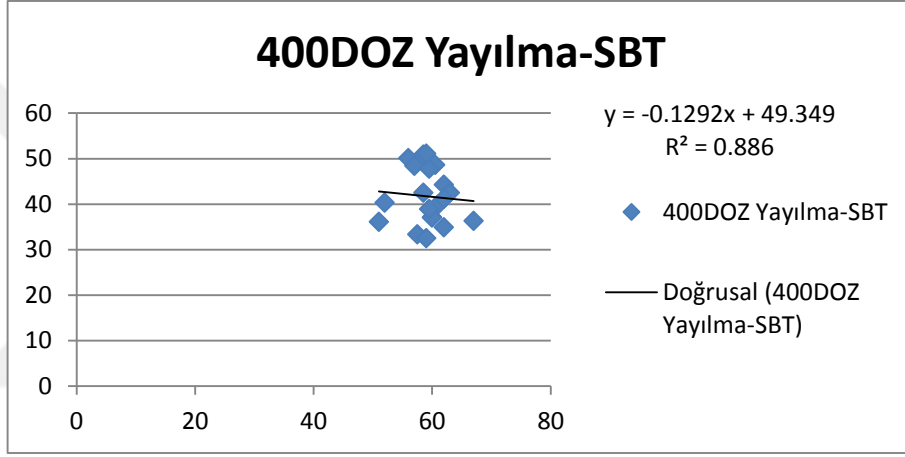
Şekil A.21. Yayılma-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



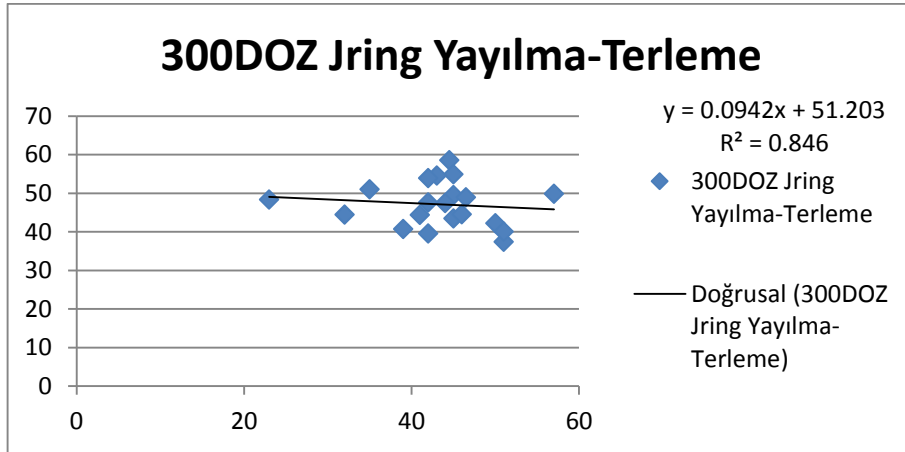
Şekil A.22. Yayılma-Terleme İlişkisi



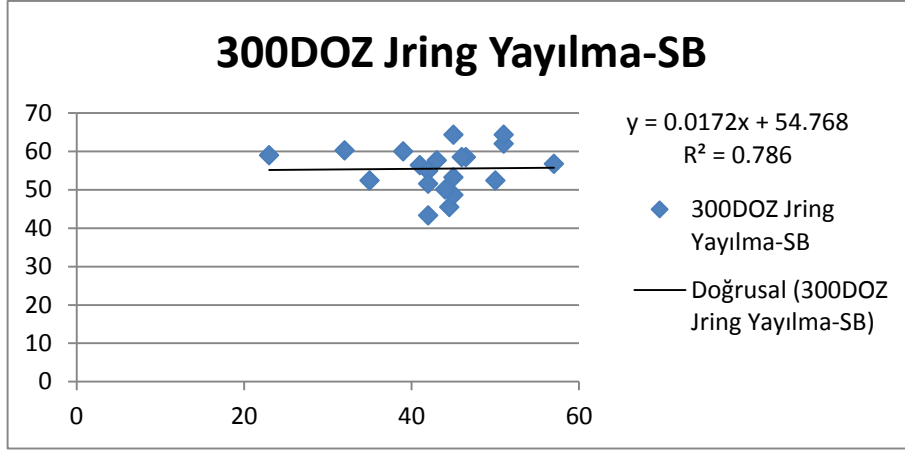
Şekil A. 23. Yayılma-Segregasyon Basıncı İlişkisi



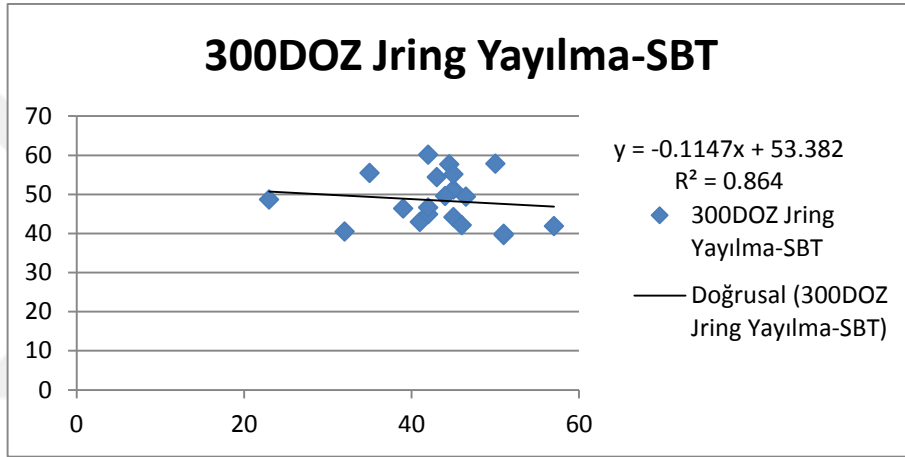
Şekil A.24. Yayılma-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



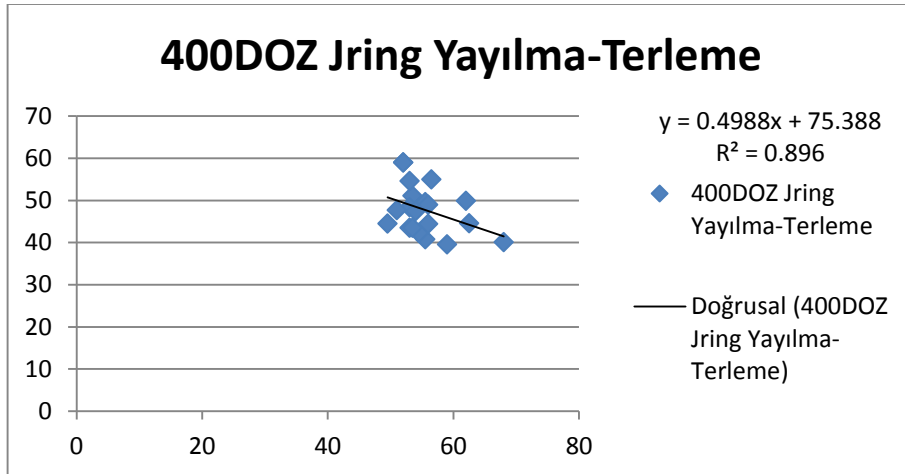
Şekil A.25. Jring-Terleme İlişkisi



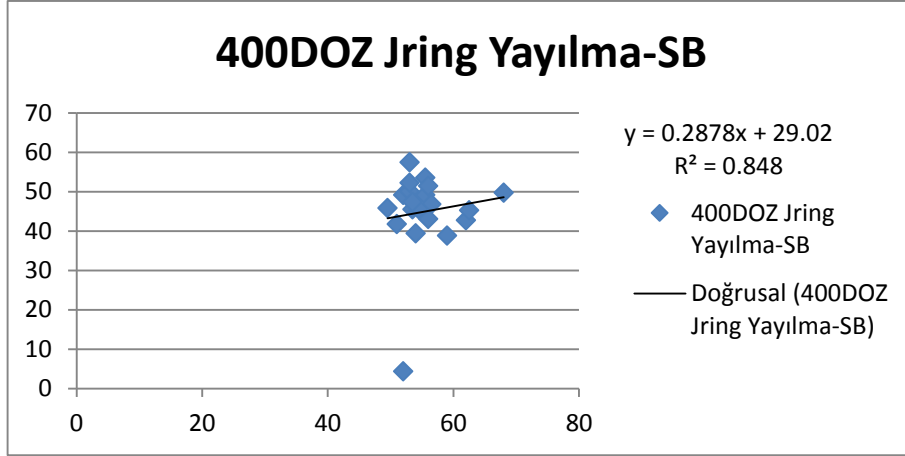
Şekil A.26. Jring-Segregasyon Basıncı İlişkisi



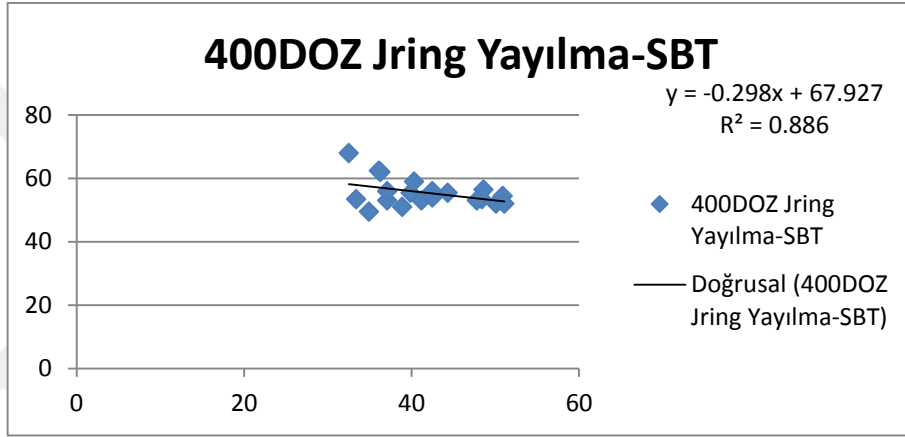
Şekil A.27. Jring-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



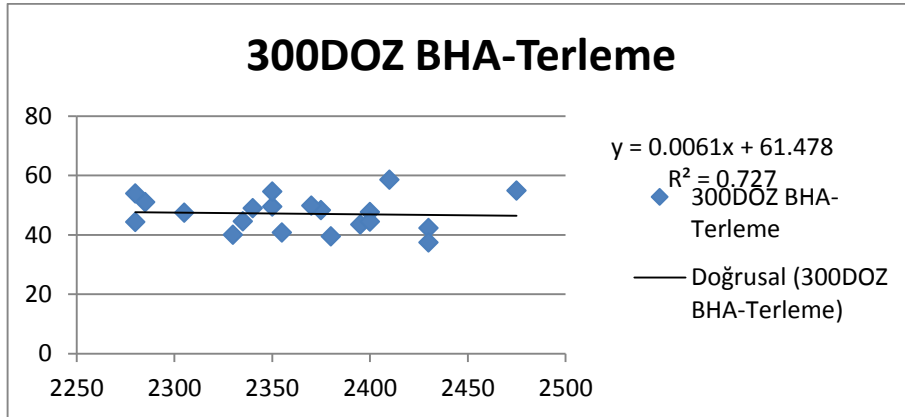
Şekil A.28. Jring-Terleme İlişkisi



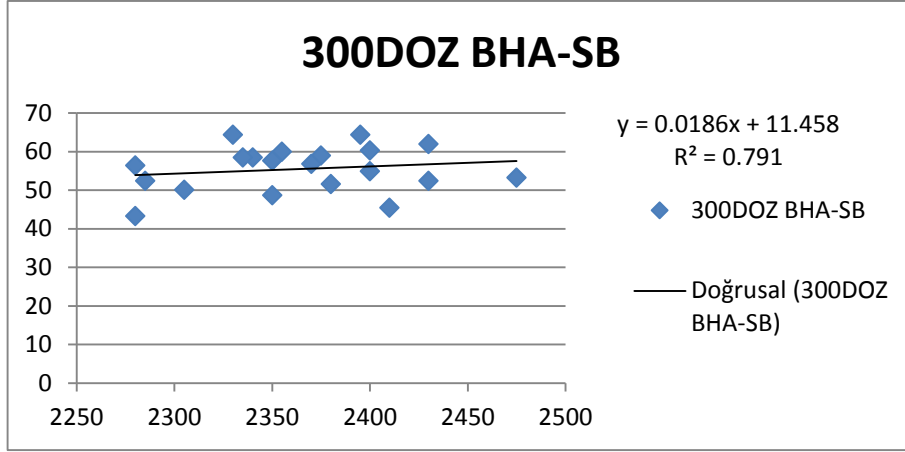
Şekil A.29. Jring-Segregasyon Basıncı İlişkisi



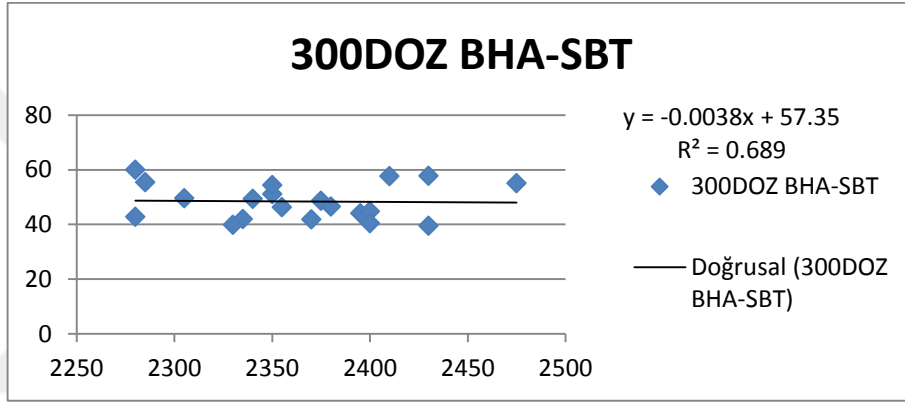
Şekil A.30. Jring-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



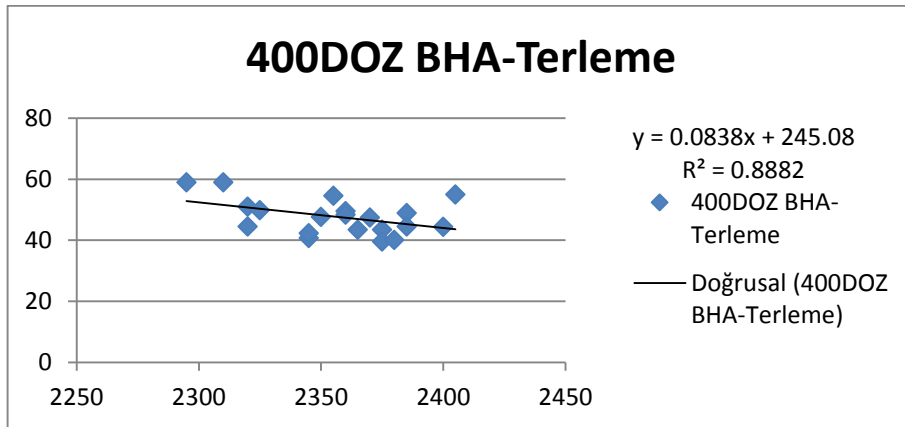
Şekil A.31. Birim Hacim Ağırlık-Terleme İlişkisi



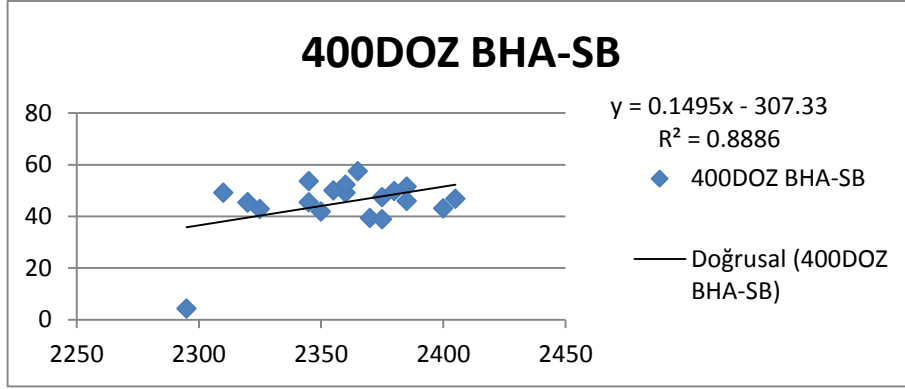
Şekil A.32. Birim Hacim Ağırlık-Segregasyon Basıncı İlişkisi



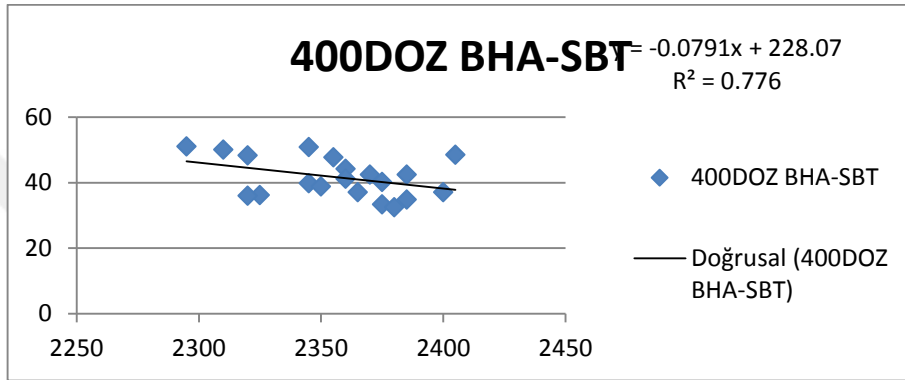
Şekil A.33. Birim Hacim Ağırlık-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi



Şekil A.34. Birim Hacim Ağırlık-Terleme İlişkisi



Şekil A.35. Birim Hacim Ağırlık-Segregasyon Basıncı İlişkisi



Şekil A.36. Birim Hacim Ağırlık-Segregasyon Basıncı Terleme İlişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tolga ZEYBEK
Doğum Yeri Yılı : Isparta, 1985
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : academy32@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Isparta Milli Piyango Anadolu Lisesi
Lisans :Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

Meslek Deneyimi

2014-Halen Metro Mühendislik Gıda. San. Tic. Ltd. Şti.