

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

**KATKILI BETONLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ
VE FARKLI SICAKLIKLARDA TAZE BETON DENEYLERİYLE
KARŞILAŞTIRILMASI**

Cemal ÜNSAL

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2012**

© 2012 [Cemal ÜNSAL]

TAAHHÜTNAME

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

Cemal ÜNSAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Taze Betonun İşlenebilirlik Tanımları	3
2.2. Taze Betonun İşlenebilirlik Deneyleri	9
2.3.1. Tek faktör deneyleri.....	12
2.3.2. İki faktör deneyleri.....	15
2.4. Taze Betonun Reolojisi	19
2.4.1. Taze betonun işlenebilirliğinde akışkan ve süspansiyon reolojisi	21
2.4.1.1 Bünye denklemleri	21
2.4.1.2 Viskozite	23
2.4.1.3 Akışkan ve süspansiyon.....	29
2.5. Taze Betonun İşlenebilirliğine Katkıların Etkileri	40
2.5.1. Kimyasal katkılar	42
2.5.2. Mineral katkı maddeleri.....	43
2.5.2.1. Uçucu küller.....	45
2.5.2.2. Silis dumanı	47
2.6. Önceki Çalışmalar	50
3. MATERYAL ve METOD.....	58
3.1. Agregaların Seçimi ve Sağlanması.....	60
3.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	60
3.3. Çimento	61
3.4. Kimyasal Katkı.....	61
3.5. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi	61
3.6. Uçucu Küller	62
3.7. Silis Dumanı	62
3.8. Beton Karıştırma Cihazı ve Metodu.....	63
3.9. Beton Karışım Hesapları	64
3.10. Taze Beton Deneyleri	65
3.10.1. Çökme ve çökme yayılması	65
3.10.2. K-Çökme (K-slump) Deneyi.....	68
3.10.3. J ring deneyi.....	70
3.10.4. İki nokta işlenebilirlik deney cihazı (CTPT)	72
3.10.5. Cihazın kullanımı ve deneyin yapılışı.....	75
3.10.6. CTPT cihazının kalibrasyonu	79
3.11. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar	82
3.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	83
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	86
4.1. Agregaların Granülometrik Özellikleri	86
4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	88
4.3. Karışım Agregalarının Oranları ve Granülometreleri	89
4.4. Kimyasal Katkı.....	90

4.5. Çimento	91
4.6. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi	91
4.7. Silis Dumanı	92
4.8. Uçucu Küller	93
4.9. Üretilen Betonların Taze Beton Deney Sonuçları	93
4.9.1. İki Nokta İşlenebilirlik Deney Sonuçları	94
4.9.2. Çökme deneyi sonuçları.....	102
4.9.3. J ring deneyi sonuçları	108
4.9.4. K-çökme deneyi sonuçları	112
4.10. Taze Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin İstatistiksel Analiz Sonuçları.....	117
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR	134
EKLER.....	139
ÖZGEÇMİŞ	167

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATKILI TAZE BETONLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE TAZE BETON DENEYLERİNE SICAKLIĞIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Cemal ÜNSAL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

Beton geri dönüşümü olmayan bir malzemedir. Taze haldeki betonun minimum enerji kullanılarak, en uygun işlenebilirlik değerine ulaşması ve homojenliğini yitirmeden; kalıbını boşluksuz doldurabilmesi gerekir. Saha ve laboratuvar beton üretimlerinde, istenilen taze beton işlenebilirliğini sağlamak için taze betonun denetim ve kontrolünün yapılması büyük önem taşımaktadır. Günümüzde saha ve laboratuvar çalışmalarında, betonun işlenebilirlik değeri yerine genellikle kıvam değerleri ve ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır. Kıvam deneylerinden elde edilen deney ölçümleri tek nokta testler olarak tanımlanır. Bu tek nokta ölçüm deneyleri: çökme, k-çökme, yayılma ve-be olarak uygulanmaktadır. Ancak, bu deneylerin uygulanabildiği beton kıvamları sınırlıdır ve betonun işlenebilirliğini ifade etmekte yetersiz kalmaktadırlar. Bu bakımdan betonun işlenebilirliği, betonun reolojik malzeme sabitleri ile açıklanması uluslararası literatürlerde daha doğru bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, farklı sıcaklık (18 °C, 30 °C) koşulları etkisindeki katkı betonların işlenebilirlik ifadesi, İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazı Celsum Two Point Workability Tester (CTPT) kullanılarak taze betonların reolojik özellikleri (τ : kayma eşiği ve η : plastik viskozite değerleri) ile belirlenmiş ve üretilen betonlarda, tek nokta taze beton kıvam deneyleri (çökme, k-çökme ve yayılma) uygulanmıştır. Araştırma deneylerinde, CEM I 42,5 R ve CEMII 42,5 A-M R tip çimento kullanılmıştır. Su/çimento oranı 400 kg/m³ dozajlı betonlar için 0,35, 300 kg/m³ dozajlı betonlarda 0,45 olarak belirlenmiş ve çökmesi 20 cm üzerinde olan betonlar üretilmiştir. Kimyasal katkı olarak yeni nesil akışkanlaştırıcı, mineral katkı olarak 4 farklı uçucu kül (Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli ve Çayırhan) ve silis dumanı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, taze beton deneylerinin çimento tipi ve dozajı, mineral katkı ve deney zamanına göre değişiklikler gösterdiği ancak sıcaklığın bu değerlere etkisinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taze beton, mineral katkı, çökme, j ring, k-çökme, işlenebilirlik, reoloji, Sıcaklık

2012, 167 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON FRESH CONCRETE TESTS AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FRESH CONCRETE WITH ADDITIVE

Cemal ÜNSAL

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

Concrete is a non-recyclable material. Fresh concrete form should reach the optimal value of workability by using minimum energy and should fill its plate without having gaps and without loss of its homogeneity. In field and laboratory production of concrete, supervision and control of fresh concrete is of great importance in order to obtain the desired workability of fresh concrete. Today, in field and laboratory studies, consistency and measurement methods are generally used instead of the value of concrete workability. The experiment measurements obtained from consistency tests are defined as single point measurement tests. These single point measurement tests of fresh concrete are implemented as slump, k-slump, spread and ve-be. However, concrete consistencies on which these tests can be applied are limited and inadequate in terms of expressing the workability of concrete. In this regard, explaining the workability of concrete with rheological material constants is considered as a much more correct approach in the international literature. In the proposed project study, expressing the workability values of fresh concretes with additives numerically was planned to be the basic objective. During the concrete pouring processes carried out in open areas, the effects of evaporation losses originating from wind and temperature effect on the consistency of concrete and workability are also important. For this reason, the effects of temperature on rheological constants will also be examined in the project study. In the project study, the expression of workability of concretes with additives which are under the effect of different temperature conditions (18 °C, 30 °C) will be defined with rheological properties of fresh concretes (τ : shear threshold and η : plastic viscosity) by using Celsum Two Point Workability Tester (CTPT) and single point concrete consistency tests (slump, k-slump and spread) will also be applied in the concretes produced. In research studies, CEM I 42,5 R and CEM II 42,5 A-M R type of cement is planned to be used. Water/cement ration will be chosen between the values of 0,35 for 400 kg/m³ dosage concretes and 0,45 for 400 kg/m³ dosage concretes and concretes and having a slump above 20 cm will be produced. As a chemical additive, a new generation plasticizer, and as a mineral admixture, four different fly ash (Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli ve Çayırhan) and silica fume have been used. As a result of the experimental studies, it is concluded that the cement type and the dosage of the fresh concrete experiments change according to the mineral admixture type, however, the effect of the temperature on these values is very low.

Keywords: Fresh concrete, mineral additives, slump, j ring, k-slump, workability, reology, temperature.

2012, 167 pages

TEŞEKKÜR

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

2911-YL-11ve 2517-M-10 No`lu Projeler ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin kimyasal analiz aşamasındaki desteklerinden dolayı GÖLTAŞ A.Ş. ye teşekkür ederim.

Tezimin üretim aşamasındaki desteklerinden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda yardımlarından dolayı Ozan SUNGUR ve Mecit TARKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

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

Cemal ÜNSAL
ISPARTA, 2012

ŞEKİLLER DİZİNİ

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. Newtoniye akışkan için açısal hız ile tork arasındaki lineer ilişki.....	17
Şekil 2. 6. A alanı üzerine etkiyen 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 denklemini	24
Şekil 2. 9. Newton sıvısı	25
Şekil 2. 10. Newtoniye akışkan viskozitenin belirlenmesi.....	25
Şekil 2. 11. Reolojik davranışın tipleri	26
Şekil 2. 12. Viskozite – kayma şekil değiştirme oranı ilişkisi	27
Şekil 2. 13. Zamana bağlı Non-Newtoniye akışta tiksotropi için η -t ilişkisi	27
Şekil 2. 14. Zamana bağlı Non-Newtoniye akışta reopeksi için η -t ilişkisi.....	28
Şekil 2. 15. Zamana bağlı Non-Newtoniye malzemeler için akış eğrileri	29
Şekil 2. 16 . Süspansiyonun mikroyapısı	30
Şekil 2. 17. Beton reolojisi kavramı.....	34
Şekil 2. 18. Taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham sıvısı.	35
Şekil 2. 19. Beton bileşenleri ve bağlayıcı maddelerin g ve h üzerindeki etkileri	50
Şekil 3. 1. Yayılma tablası ile çimento-katkı uyumunun belirlenmesi	62
Şekil 3. 2. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri.....	63
Şekil 3. 3. Betonun karılma işlem aşamaları.....	63
Şekil 3. 4. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı.	66
Şekil 3. 5. Deneylerde kullanılan K Çökme deney aleti	69
Şekil 3. 6. J Ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları.	69
Şekil 3. 7. Deneylerde kullanılan J Ring Deney cihazı.....	72
Şekil 3. 8. Tattersall iki nokta işlenebilirlik cihazı için karıştırıcı kanatlar	73
Şekil 3. 9. Beton reometrelerinde kullanılan farklı kanat tipleri.....	74
Şekil 3. 10. İki nokta işlenebilirlik deney cihazının (CTPT) genel görünüşü.....	75
Şekil 3. 11. CTPT Cihazında, zamanla motor iç sıcaklığının değişimi	76
Şekil 3. 12. CTPT motor iç sıcaklık ölçümü ve şematik görüntüsü.....	77
Şekil 3. 13. CTPT'nin veri okuma ayarları	78
Şekil 3. 14. CTPT'nin hız ve zaman aracı ekranı	79
Şekil 3. 15. Kalibrasyon sıvısı özgül ağırlığının sıcaklıkla değişimi (12500 cSt).	80
Şekil 3. 16. 12500 cSt'luk sıvı ile yapılan kalibrasyon sonuçları.	81
Şekil 3. 17. 75. dk. reoloji deney sonuçları.....	82
Şekil 3. 18. Çalışmalarda kullanılan tartılar	82
Şekil 3. 19. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve kalıplar	83
Şekil 4. 1. Kumların granülometreleri	87
Şekil 4. 2. İri Agreganın Granülometri Analizi Değerleri	87
Şekil 4. 3. Seri için karışım agregası granülometrisi ve sınır değerleri	89
Şekil 4. 4. 30CI18-30CII18 serisi betonların 15.dk CTPT deney sonuçları	95
Şekil 4. 5. 300 doz 18 °C 45. betonların CTPT deney sonuçları.....	96
Şekil 4. 6. 400 doz 18 °C 15.dk betonların CTPT deney sonuçları.....	97
Şekil 4. 7. 400 doz 18 °C 45.dk betonların CTPT deney sonuçları.....	98
Şekil 4. 8. 300 doz 30 °C 15. dk betonların CTPT deney sonuçları.....	99

Şekil 4. 9. 300 doz 30 °C 45.dk betonların CTPT deney sonuçları.....	100
Şekil 4. 10. 400 doz 30 °C 15.dk betonların CTPT deney sonuçları.....	101
Şekil 4. 11. 400 doz 30 °C 45.dk serisi betonların CTPT deney sonuçları	102
Şekil 4. 12. 300 doz 18 °C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları.....	103
Şekil 4. 13. 400 doz 18 °C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları.....	103
Şekil 4. 14. 300 doz 30 °C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları.....	104
Şekil 4. 15. 400 doz 30 °C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları.....	105
Şekil 4. 16. 300 doz 18 °C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları.....	105
Şekil 4. 17. 400 doz 18 °C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları.....	106
Şekil 4. 18. 300 doz 30 °C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları.....	107
Şekil 4. 19. 400 doz 30 °C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları.....	108
Şekil 4. 20. 18 °C 15. dakika j ring sonuçları.....	109
Şekil 4. 21. 30 °C 15. dakika j ring sonuçları.....	110
Şekil 4. 22. 18 °C 45. dakika j ring sonuçları.....	111
Şekil 4. 23. 30 °C 45. dakika j ring sonuçları.....	112
Şekil 4. 24. 18 °C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları	113
Şekil 4. 25. 30 °C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları	114
Şekil 4. 26. 18 °C 45. dakika k-çökme deneyi sonuçları	115
Şekil 4. 27. 30 °C 45. dakika k-çökme deneyi sonuçları	116
Şekil A.1. CTPT den elde edilen Plastik Viskozite ve Kayma Eşiğinin ilişkisi	140
Şekil A.3. Yayılma-Kayma Eşiği ilişkisi	141
Şekil A.4. J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 ile Kayma Eşiği ilişkisi	142
Şekil A.5. J ring yayılması-Kayma Eşiği ilişkisi	143
Şekil A.6. K-çökme deneyinden elde edilen k,w değerleri ile Kayma Eşiği ilişkisi	144
Şekil A.7. Çökme-Plastik Viskozite ilişkisi.....	145
Şekil A.8. Çökme yayılması-Plastik viskozite ilişkisi	146
Şekil A.9. J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 değerleriyle Plastik Viskozite ilişkisi	147
Şekil A.10. Jring yayılması-Plastik Viskozite ilişkisi.....	148
Şekil A.11. K-çökme deney aletinden elde edilen k,w değerleriyle Plastik Viskozite ilişkisi	149
Şekil A.12. Çökme-Çökme Yayılması ilişkisi	150
Şekil A.13. Çökme-j ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 değerleri ilişkisi....	151
Şekil A.14. Çökme-Jring Yayılma ilişkisi	152
Şekil A.15. Çökme-K-çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi	153
Şekil A.16. Çökme yayılması-J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 değerlerinin ilişkisi	154
Şekil A.17. Çökme Yayılması-J ring Yayılması ilişkisi	155
Şekil A.18. Çökme Yayılması-K-çökme deneyinden elde edilen k ve w değerlerinin ilişkisi	156
Şekil A.19. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile h_1 ve h_2 değerlerinin ilişkisi	157
Şekil A.20. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile Jring Yayılma ilişkisi.....	158
Şekil A.21. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile k-çökme deneyinden elde edilen k ve w değerlerinin ilişkisi	159
Şekil A.22. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile h_0 , h_2 ilişkisi	160
Şekil A.23. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile J ring Yayılma ilişkisi	161
Şekil A.24. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi	162
Şekil A.25. Jring deneyinden elde edilen h_2 ile J ring Yayılma ilişkisi	163

Şekil A.26. Jring deneyinden elde edilen h_2 ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi	164
Şekil A.27. Jring Yayılma ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi	165

ÇİZELGELER DİZİNİ

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.	32
Çizelge 2. 6. Kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili denklemler	36
Çizelge 2. 7. Akışkan yüksek performanslı beton elde etmenin iki yolu.....	49
Çizelge 2. 8. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkileri	49
Çizelge 3. 1. Çalışmada takip edilen standart ve yöntemler	59
Çizelge 3. 2. 1000 dm ³ 'teki malzeme miktarı	64
Çizelge 3. 3. CTPT'nin teknik özellikleri	77
Çizelge 4. 1. Karışım hesaplarının ASTM C-33 sınırları.....	86
Çizelge 4. 2. ASTM ve TS' e göre elek analizi	86
Çizelge 4. 3. İri ve ince agregaların tane yoğunlukları ve su emme oranları.....	88
Çizelge 4. 4. İri ve ince agregaların sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri (yığınyoğunlukları) (kg/m ³)	88
Çizelge 4. 5. İri ve ince agreganın özgül ağırlıkları (kg/m ³)	88
Çizelge 4. 6. Agregalar karışım oranları (%)	89
Çizelge 4. 7. Kullanılan kimyasal katkının özellikleri	89
Çizelge 4. 8. Deneylerde kullanılan çimentonun (PÇ 42.5 R) özellikleri.....	91
Çizelge 4. 9. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I I /A-M (P-LL) 42,5 R) özellikleri	91
Çizelge 4. 10. Kimyasal katkı – çimento uyumunun belirlenmesi deneyi sonuçları .	92
Çizelge 4. 11. Silis dumanının (FeSi) kimyasal özellikleri.....	92
Çizelge 4. 12. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve görünen tane yoğunlukları	93
Çizelge 4. 13. Taze beton deneyleri ile reolojik parametrelerin ilişkisi	120
Çizelge 4. 14. Taze Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin ilişkisi	120
Çizelge 4. 15. 18 derece 15. dk üretimleri weka sonuçları	120
Çizelge 4. 16. 18 derece 15. dk üretimleri weka sonuçları	121
Çizelge 4. 17. 30 derece 15. dk üretimleri weka sonuçları	122
Çizelge 4. 18. 30 derece 15. dk üretimleri weka sonuçları	123
Çizelge 4. 19. 18 derece 45. dk üretimleri weka sonuçları	124
Çizelge 4. 20. 18 derece 45. dk üretimleri weka sonuçları	125
Çizelge 4. 21. 30 derece 45. dk üretimleri weka sonuçları	126
Çizelge 4. 22. 30 derece 45. dk üretimleri weka sonuçları	127
Çizelge 5.1. Taze beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	131
Çizelge 5.2. Taze beton deneyleriyle plastik viskozitenin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	132

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BM	Bingham model
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
Sd	Silis Dumanı
SNF	Naftelen Sülfonat Formaldehit
SP (veya SA)	Süper Plastikleştirici (veya Süperakışkanlaştırıcı)
T	Tork
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 dönüşümü olmayan bir malzemedir. Bu nedenle betonun taze haldeyken her türlü denetim ve kontrolü 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 buharlaşma sonucu aşırı su kaybı meydana gelebilir. Bunun sonucunda çökme kaybı, priz hızlanması, hava boşlukları ve yüzeyde plastik rötre çatlakları meydana gelebilir. Buda betonun dayanıklılığını 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.

Literatürde yapılan deneylerin pek çoğunda sahada uygulanan beton özellikleri dikkate alınmamış, sıcaklık etkisinin dikkate alındığı çalışmaya rastlanmamıştır. 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) ve reolojik parametreleri (τ : kayma eşiği ve η : plastik viskozite değerleri) belirleme deneyleri saha koşullarıyla uygunluk sağlaması için 18 °C ve 30 °C de 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

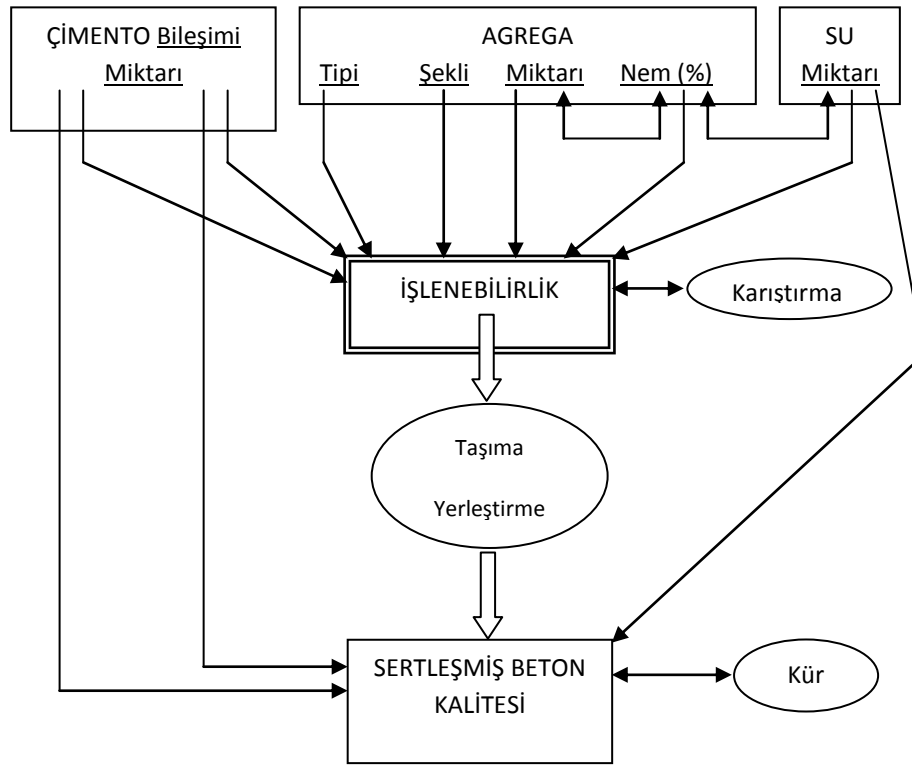
Beton, çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin (mineral, kimyasal, fiber vb.) belirli şartlar ve oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta şekil verilebilen plastik formda olup, zamanla çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonun gelişmesiyle (hidratasyon) sertleşerek mukavemet kazanan, harç fazı ve agregadan oluşan kompozit bir 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. İşlenebilirlik özeliği betonun yapısından kaynaklanan; taze beton kütleinde 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 işlenebilirliğin 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 agreganın en büyük tane boyutu, yüzey yapısı, kökeni 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 toplumlarca yapılmış tanımlamalarından bazıları verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Çeşitli toplumların 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

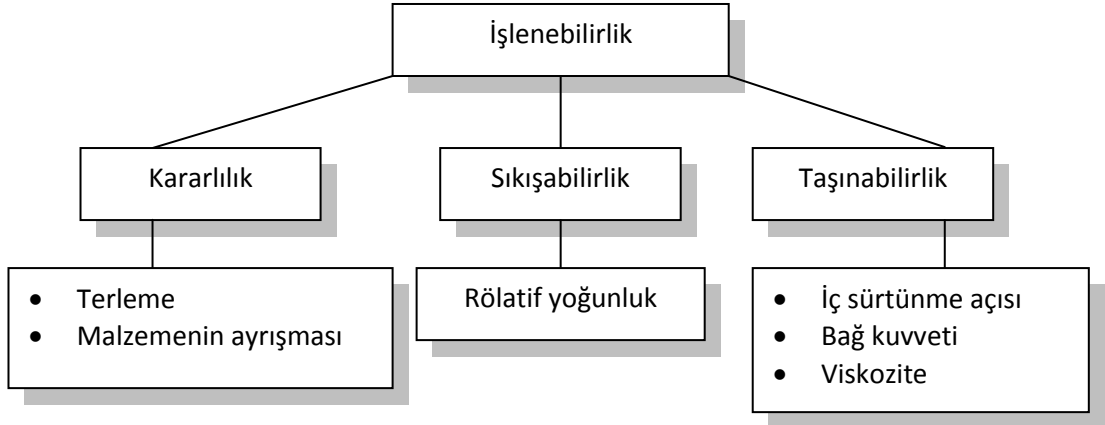
Bu tanımlar incelendiğinde tanımların hepsinde genel kabullerin ortak olduğu ancak tanımların fiziksel büyüklükleri kapsamadığı görülmektedir.

İşlenebilme konusunda amaç, taze betonun sürtünmesini yenerek daha kolay yerleşmesini sağlamaktır. İşlenebilir bir betonun niteliklerinin başında kohezyon gelir. Kohezyon, betonu oluşturan malzemelerin birbirine ne ölçüde bağlanmış olmaları, böylece segregasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. İri agrega tanelerinin karıştırma, taşıma ve 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 homojen olamaz; iri agregalar bir yanda, harç bir yanda birikir ve betondaki mukavemet dağılımı çok farklılık gösterir. Bir betonun kohezyonu basit olarak, avuç içine top (küre) yaparak gözlenebilir, küçük beton küresi kendi kendini tutabilmelidir. 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), kütlede ayrılarak yüzeye çıkmasına “Terleme” (su salma veya betonun kanaması) denir. Terlemenin bir nedeni segregasyondur. Ancak terlemenin diğer bir sebebi çimentonun flokülleşmesidir. Suyla teması geçen çimento taneleri, tek tek ıslanmak yerine flokülleşerek ıslanırlar 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 özellikle yerine yerleştirilmiş taze betonda önemlidir. Beton dökülüp, üstü masterlandıktan (kadronla düzeltilip, mala ile pürüzleri giderildikten sonra) hemen sonra terleme başlar ve bir saat içinde yüzeyde su kaybolur. Terleme erken rötre 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 kolay ve az enerji ile karılması, yerleştirmesi ve kalıbı boşluksuz doldurabilmesine 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 iletebilmesi 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 metodlarının 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. Açık ve seçik olarak tanımlanması çok güç, karmaşık bir teknolojik özellik olan işlenebilmenin malzemeye özgü ve uygulamada önem taşıyan iki ana niteliği akıcılığı ve stabilitesidir. Birbiriyle çelişen bu iki özelliği bir optimumda birleştirmek amaçlanan çözümdür. 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 sebeplerindendir. 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.

a. Deneylerin I. Gruplandırılması

Kohezyon, kararlılık gibi nitelikleri ölçmeye yönelik deneyler ve işlenebilme 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 silindir 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).

b. 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 metotları ile dönel reometreler (rotational rheometer) deney metotlarıdır. 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 katogorilerin hiç birinin içine dahil edilmemiştir.

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. Serbest akışlı deneyler: Hem yerçekimi tarafından betona giren nesneleri 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 korumasını (stabiliteyi) belirleyen deneyler; Segregasyon direnci, V hunide T_5 zamanı ve GTM Elek tutarlılık deneyi vb.'dir (Bartos, 2000; EFNARC, 2002).

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)

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, Üçeksenli toprak deneyi'dir (Koehler ve Fowler, 2003).

2.3.1. 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).

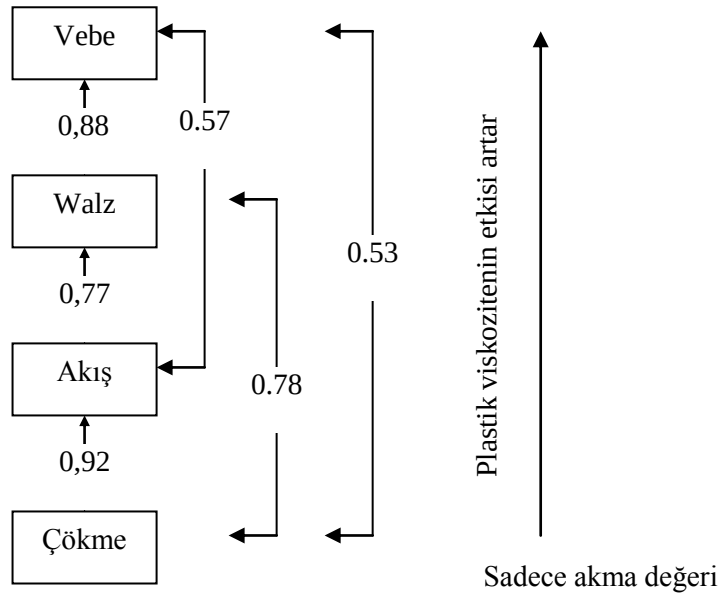
- Penetrasyon deneyleri; kelly topu deneyi, wigmore kıvam ölçeri, halka penetrasyon deneyi
- Tekrar kalıplanma (remolding) testleri; çökme deneyi, sarsma tablası, deneyi, Vebe deneyi, powers'ın tekrar kalıplama deneyi, powers ve wiler cihazı, thaulow deney cihazı,
- Akış deneyleri; LCL cihazı, akış konisi, 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).

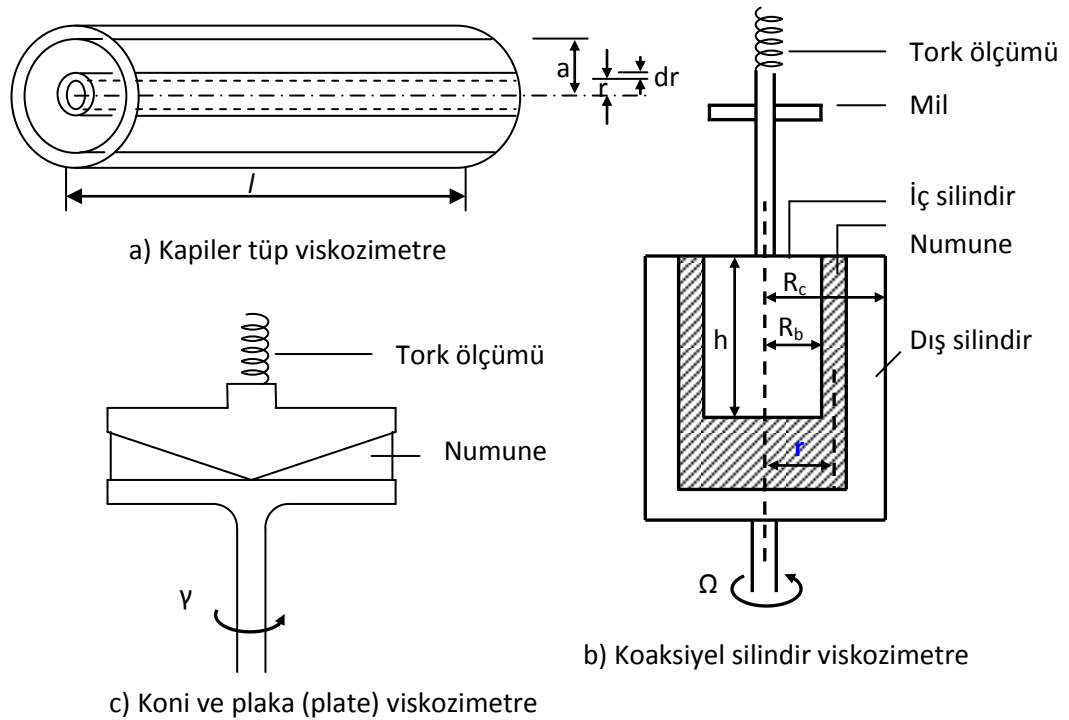
Yaygın olarak kullanılan testlerin çoğu yalnızca ya plastik viskozite ya da akma gerilimi ile ilgilidir. Elde edilen ölçüm değerleri, deney aleti tipi ve operatörün becerisine bağlı olarak değişebilmektedir. Şu halde standart deneyler, betonun tür ve kıvamı hakkında fikir verebilirler fakat taze betonun 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).

2.3.2. 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 dönel 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, eksenel 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 diğesine göre rölatif 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 diğer viskozimetreler ise;

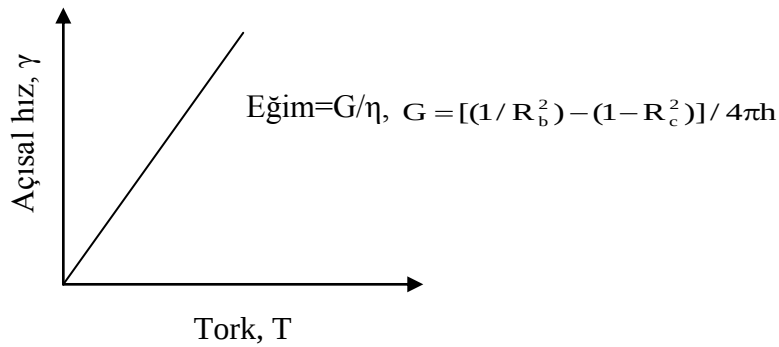
- ✓ Kılcal borulu viskozimetre; $\eta=1$ poise'den küçük sıvılarda % 0,1 duyarlılıkta,
- ✓ Düşen küreli viskozimetre'dir.

Reolojik sabitler olan; plastik viskozite ve kayma eşiğinin 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, malzemede 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. Eş eksenli 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).

2.4. 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 ($\dot{\gamma}$) dir. Yani akış, gerilme, kayma, kayma oranı ve zaman arasındaki ilişkiye bağımlıdır (Özkul ve Sağlam, 2002; Leslie ve Xihuang, 2000; Banfill, 2003).

¹ Birimi N/m² (ML⁻¹T⁻²) dir

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

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

Beton parçacıklar şeklindedir ve gömülü parçacık kuvvetleri doğrudan hesaba katılamaz, bu bilinmeyen verilen metodolojiler veya modeller de akılda tutulmalıdır. Birbirini etkileyen parçalar olarak, sadece çimentonun hidratasyonu ve

flokülasyonun devamlı meydana gelmesi gibi olayları içeren, zamana bağımlı özellikler kabul edilmiştir. (Ferraris, 1996; 1999)

2.4.1. Taze betonun işlenebilirliğinde akışkan ve süspansiyon reolojisi

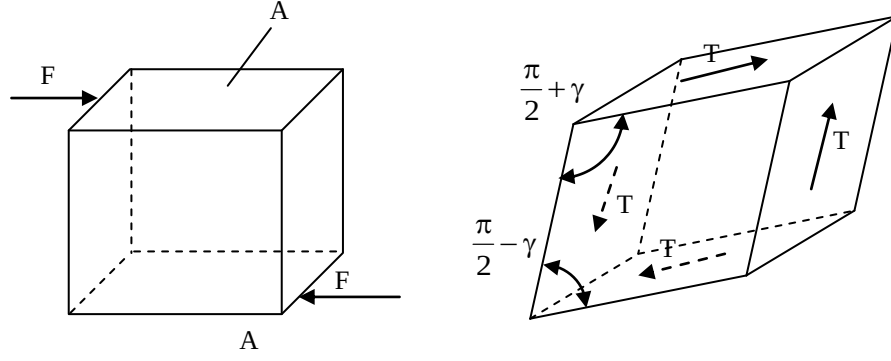
2.4.1.1. Bünye denklemleri

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;

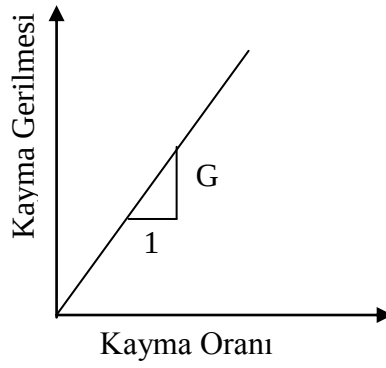
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

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 etkiğinde 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 düzlemle 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).

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

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

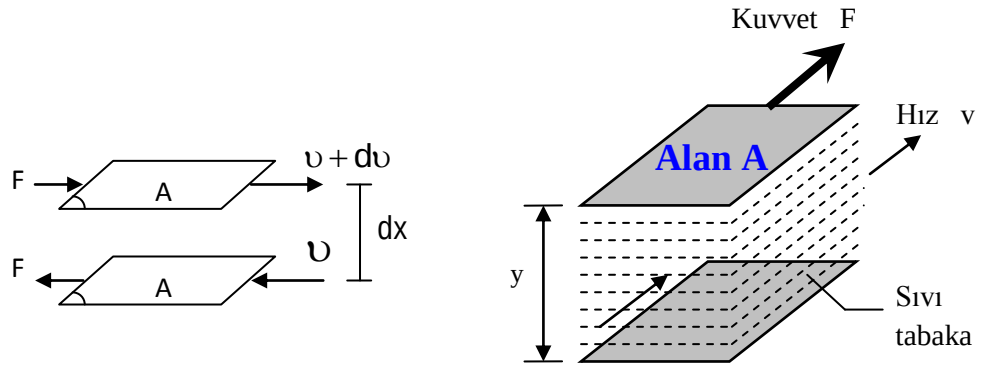
³ 20°C deki suyun viskozitesi 1 cp'dir.

Bir akımdaki iki nokta arasında dt zamandan sonra aralarındaki düzlemde $d\gamma$ kadar açı bozulması olacaktır.

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

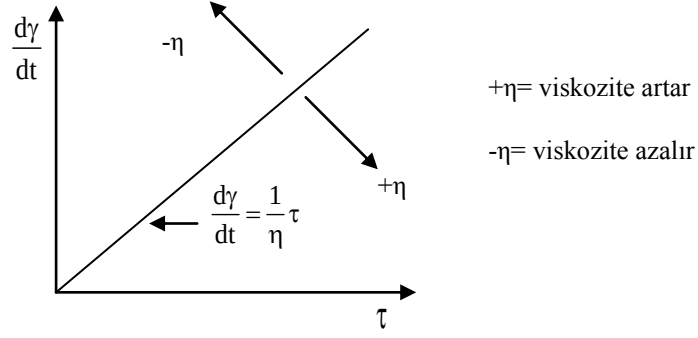
Açısal şekil değiştirme hız değişimi kayma oranına $\left(\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}\right)$ eşittir. Kuvvet ve değişim arasındaki orantı faktörü (kayma gerilmesi (τ) ile açısal şekil değiştirme hızı) viskozite olarak adlandırılır (η) . Reolojide en basit viskoz sıvı modeli Newton sıvısı (Newtoniyen) 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)

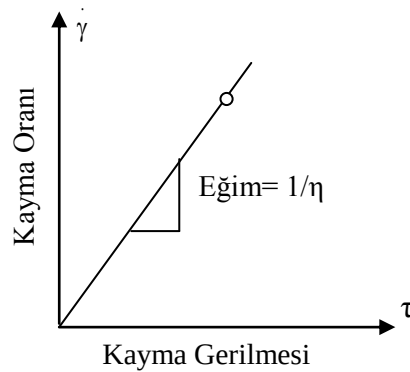
2.7 denklemi Newton sıvısının bünye denklemidir. Newton yasasına uyan cisimlere Newtoniyen cisimler denir. Newton yasası, viskoz şekil değiştirme hızının kayma gerilmesi ile orantılı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.9.'da Newton sıvısının diyagramı gösterilmiştir (Yücel, 1993).



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

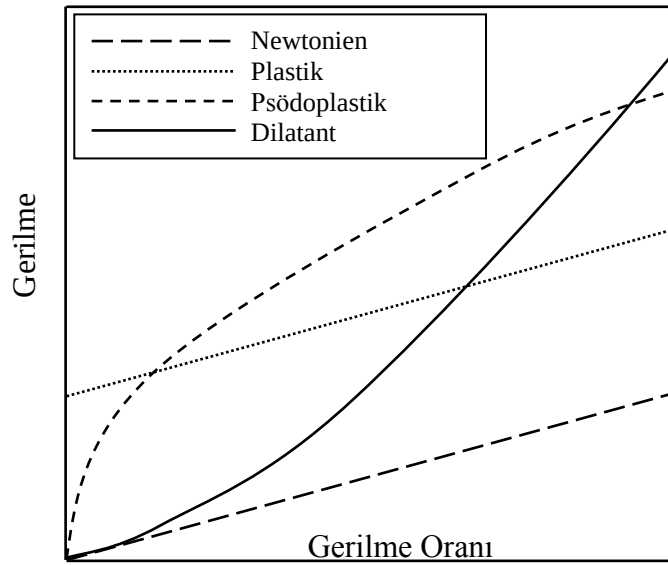
Şekil 2.10’da görüldüğü gibi sabit sıcaklıktaki Newtoniyen akışkanda, akışın özelliklerini tanımlayan viskozite değerinin hesaplanabilmesi için bir deneysel değerin belirlenmiş olması yeterlidir (Yücel, 1993). Çünkü bütün Newtoniyen sıvılar orijinden geçen bir doğru ile temsil edilirler. Doğrunun eğimi 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)

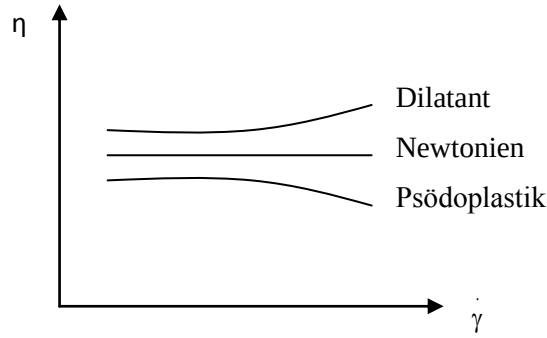
Akış davranışının bir kaç tipi bulunmaktadır (Şekil 2.11 ve 2.12). Bu davranışlardan en basiti gerilme oranı sıfır iken gerilmesi sıfır olan ve gerilme oranı ile gerilme arasında lineer ilişki bulunan Newtoniye davranışdır. Viskozitenin kayma oranı ile değişimi sabitse reoloji, Newtoniye olarak ifade edilir. Şayet viskozite kayma oranı ile değiştiği zaman reoloji Non-Newtoniye'dir. Newtoniye davranış ideal akış davranışdır ve katılardaki Hooke davranışına benzerdir. Non-Newtoniye malzemelerde viskozite sabit değildir. Kayma gerilmesinin veya kayma oranının ve zamanın fonksiyonudur. Non-Newtoniye malzemeler zamandan bağımsız ise viskozite, $\eta = F(\dot{\gamma} \text{ veya } \tau)$ 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).



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

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

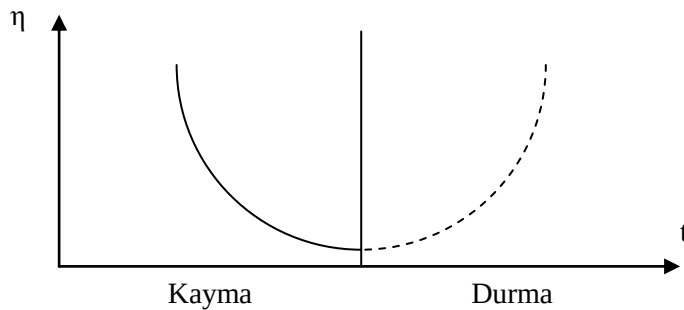
⁵ Shear Thickening (Dilatant); kayma kalınlaşması veya kalınlaşma



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

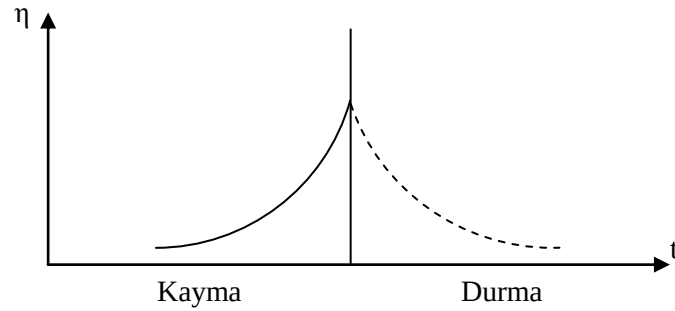
Ancak birçok Non-Newtoniye akışkan zamana bağlı davranış gösterir. Zamana bağlı ise viskozite, $\eta = F(\gamma \text{ veya } \tau \text{ ve } t)$ olacaktır. Bu tür malzemeler Tiksotropik ve Reopektik malzeme olarak belirlenir (Yücel, 1993).

- ✓ Tiksotropi = Sabit kayma oranında tiksotropik sıvıların viskozitesinde azalma olur. Benzer olarak, 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 edilebilir (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-Newtoniye akışta tiksotropi için η - t ilişkisi (Basics of Rheology, 1991).

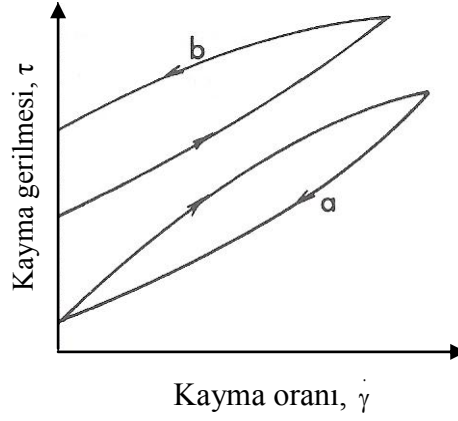
- ✓ Reopektik⁶ (Tiksotropik olmayan) = Kayma deformasyon hızının artması veya azalması çoğu kez farklı kayma gerilmelerine neden olur ve diyagramda histeresis çevrimi olarak gösterilir. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları tam olarak çakışmıyorsa yani kayma deformasyon hızı sıfır olduğunda 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).



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

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

⁶ Anti-Tiksotropi



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

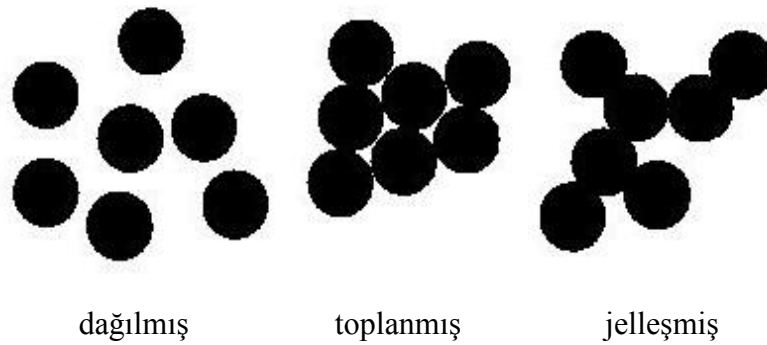
2.4.1.3. Akışkan ve süspansiyon

Gerçek sıvıların çoğu normal şartlar altında Newtoniyen akış davranışı gösterirler. Askıdaki katı madde konsantrasyonun 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, yığınlaşmış) 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, dağılılı 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 gerilme oranı daha fazla arttıkça aşamalı olarak bozulur. 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 sınırlandırdığı 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 kaçı 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 arttıkça, 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 $\phi_{\max}$ = 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 yönlenirler. 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

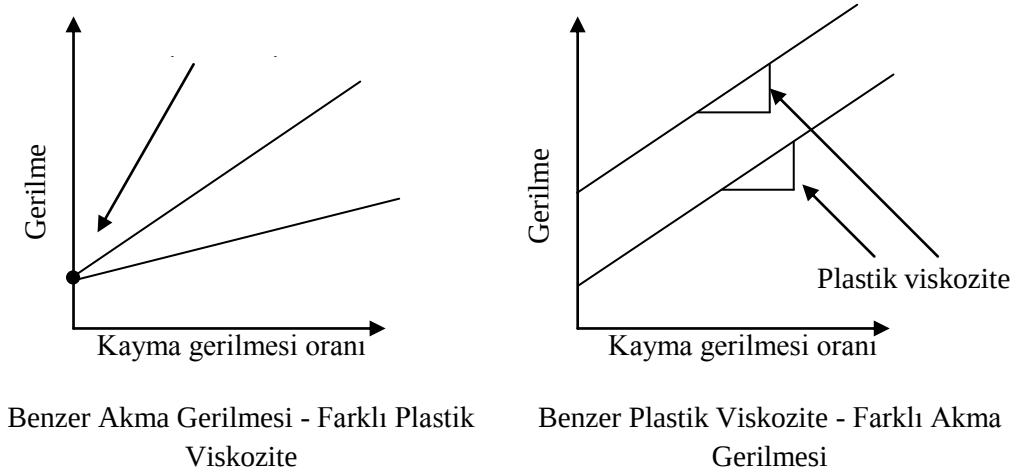
olmayan parçacıklar için ise daha yüksektir. $\phi \rightarrow \phi_m$ olarak gözlenen viskozitedeki önemli artışı Krieger-Dougherty daha doğru ön görmektedir. Krieger-Dougherty'ye göre yoğunluk ile viskozite artar. Akma gerilmesi yoğunluk artarken de artar. Bu ilişki genellikle power kanunu kullanılarak 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).

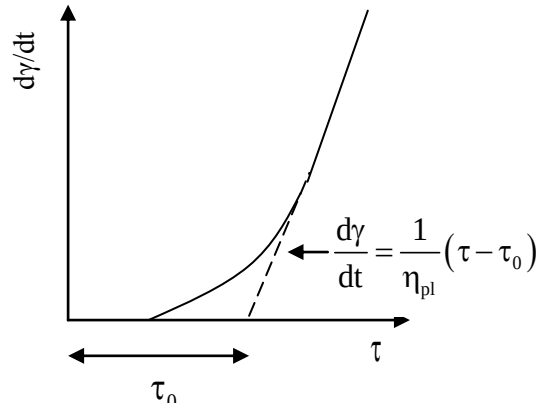
Betonun reolojik davranışı Newton sıvısından farklıdır, çimento pastasının plastisitesi ve viskoelastisitesi gibi reolojik davranışları ile ilişkilidir. Taze betonu, çimento pastası ile temsil edilen likit ortamdaki agrega dispersiyonu olarak varsaymak uygulamada yaygındır. Çimento pastasının kendisi, 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 ($\tau_0 = A.B, \eta = A$), diğer yandan $B=0$ için Power yasasına uymakta, $B=0$ ve $C=1$ içinse Newtoniye 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 hesaplamadır. 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 süspansiyonun 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 incelmesi
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.

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

Robertson-Stiff	$\tau = a \left(\dot{\gamma} + B \right)^C$ B: kıvam 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	$\tau = a \cdot \dot{\gamma} + b \cdot \dot{\gamma}^c \quad c < 1$ 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 τ = Kayma gerilmesi τ_0 = Akma gerilmesi
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 denklemdir. 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.

- a. Süreklilik: malzemenin herhangi iki noktası arasında hiçbir kesikliği olmamalıdır.
- b. Homojen Karışım: Malzeme tümüyle homojen bileşimdedir.
- c. 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).

2.5. 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.

1. 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 katkılar bu grubun içerisinde yer alır.
2. Mineral katkılar; 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.
3. Fiber katkılar; fiberin özelliğine göre, betondaki rötrenin azaltılması, betonda oluşan mikro-makro çatlakların oluşmasının ve ilerlemesinin önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır.
4. Diğer katkılar; hava sürükleyici, korozyon önleyici, nem önleyici, su geçirgenliğini azaltan, renklendirici gibi katkılar bu grup içerisinde yer alan bazı katkı maddeleridir. (Türker ve Erdoğan, 2003; Ünal vd., 2005; Yan vd., 2002).

2.5.1. Kimyasal katkılar

Genellikle sıvı halde olan bu katkılar, 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 katılara “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 katkılar uygulamada en çok kullanılan ve en çok bilinen katkılardır. Son yıllarda yüksek performanslı betonlar genelde süperakışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak üretilmektedirler. Akışkanlaştırıcılar 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 katkılar, 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 Kurbetçi, 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 akışkanlaştırıcılar 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).

2.5.2. 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, ısı işlem görmüş killer 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, hidratasyon ısını azaltmak, su geçirgenliğini azaltmak, nihai dayanımını arttırmak, sülfata karşı dayanıklılığı arttırmak gibi betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de iyileştirmektedirler. Artık günümüz standardlarında 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 taşunu 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).

2.5.2.1. 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 ısını 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 , SO_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 olmaktadır. 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).

2.5.2.2. 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” yada “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 “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” 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 SiO_2 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 cm^2/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, özelliklede 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 katkılar 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 flokülasyonun azaltılması	Gradasyonun iyileştirilmesi
Plastikleştirici vb. 1. Sülfone edilmiş sentetik polimerler • Melamin formaldehit sülfonat • Naftalin formaldehit sülfonat 2. Karboksile edilmiş sentetik polimerler (polikarbonatlar) • Polikarboksilat polimerler • Özellikli poliakrilat'lar 3. Karma işlevli edilmiş sentetik polimerler (kimyasal yapılarında farklı anodik ve polar fonksiyonlara sahip katkılar) • Aminosülfat • Modifiye linyosülfonatlar	Bağlayıcı ve dolgu katkıları: • Silis dumanı • Uçucu kül • Yüksek fırın cürufu • Kalker kökenli katkıları • Agrega granülometrisinin iyileştirilmesi

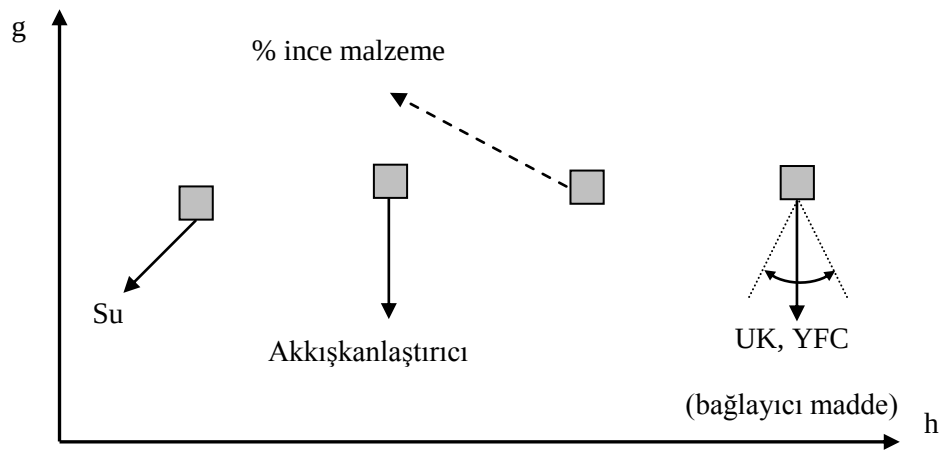
Yücel (1997), UK, Sd ve YFC içeren süperplastifiye betonların işlenebilmeleri ve işlenebilme kayıpları üzerine yapılan araştırma sonuçları Çizelge 2.8'de görüldüğü gibi özetlenmiştir.

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)

2.6. 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 aralıkta 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 naftelen 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 rötire 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 naftelen 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. Deneylerde, 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 deneylerin KYB'ları tanımlamada yetersiz olduğunu, kullanılan reometreler arasında plastik viskozite değerlerinin korelasyonunun iyi (%84), akma gerilmesi değerlerinin korelasyonun 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/m^3), % 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 incelemiştir. 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 (Mettler 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 ($500-600 \text{ m}^2/\text{kg}$), toplam bağlayıcı miktarı en az 500 kg/m^3 , 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 arasındadır. 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 METOD

İlk olarak beton üretimlerinde kullanılacak çakıl I, çakıl II, 0-5 kum, 0-8 kum, CEM I 42,5 R ve CEM II 42,5 A-M R çimento, kimyasal katkı olarak üçüncü nesil hiperakışkanlaştırıcı, mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanının temini sağlanmıştır. Daha sonra malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenerek uygun beton karışımları üretebilmek için betonun taze haldeki özellikleri ve reolojik sabitleri ölçülerek ön deneyler yapılmıştır. Ön deneyler sonucunda ilgili standartlara uygun gradasyon elde edilip taze betonun özellikleri, çimento dozajı, kimyasal ve mineral katkı maddelerinin tür ve miktarları belirlenmiştir.

Hedeflenen beton özellikleri ise;

- ✓ Su/Çimento (W/C) oranı 0,40-0,50 değeri arasında, katkı türüne bağlı olarak tutulacak veya değiştirilecektir.
- ✓ Betonun çökmesi 10 cm ve üzerinde olacaktır.
- ✓ Beton üretiminde agrega olarak dere kumu ve çakılı kullanılması planlanmaktadır.
- ✓ Çimento CEM I 42,5 R sınıfında ve $300-400 \text{ kg/m}^3$ nominal dozajlarında hazırlanacaktır.
- ✓ Betona farklı miktarlarda ve özelliklerde uçucu kül ve silis dumanı ilave edilmesi düşünülmektedir. Ayrıca, su/ toplam bağlayıcı oranı dikkate alınarak mevcut yeni nesil katkıları örnek çalışma sonuçlarına göre araştırma deneylerinde kullanılacaktır.
- ✓ Taze beton deneyleri(çökme, k çökme, yayılma) ve reolojik sabit ölçümleri, saha koşullarına uygun olması için 16°C , 23°C ve 30°C de yapılacaktır.

Çalışma süresince yapılan deneysel çalışmalar ve bu deneyler için yararlanılan yada uygulanan standard veya yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

Çizelge 3. 1. Çalışmada takip edilen standart ve yöntemler

Tanımlayıcı Deneyler	Ön Deneyler	Araştırma deneyleri
• Agrega Deneyleri Elekt analizi (TS 706 EN 12620) (ASTM C 136) Birim hacim kütle ve su emme oranı tayini (ASTM C 127 ve ASTM C 128) Sıkışık ve gevşek birim hacim kütle (yığın yoğunlukları) tayini (ASTM C 29) Karışım oranlarının belirlenmesi (ACI 304-2R ve ASTM C33) • Çimento Deneyleri Basınç ve eğilme dayanımı tayini (TS EN 196-1, Bölüm 1) Priz süresi ve hacim genleşme tayini (TS EN 196-3, Bölüm 3) Bileşimi ve özellikleri; kimyasal analiz, karma oksit bileşenleri ve fiziksel özellikler (TS EN 197-1) • Mineral Katkı Deneyleri Uçucu küllerin ve silis dumanının kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi (TS EN 450, TS EN 197-1, TS 639, ASTM C 618) • Kimyasal Katkı Deneyleri Kimyasal katkıların katı oranlarının belirlenmesi (ASTM C 494 ve TS EN 934-2, NF-EN 934-2) • Kalibrasyon Sıvısının Özelliklerinin Belirlenmesi Sıcaklığa bağlı; viskozite (dinamik (η) ve kinematik (ν)) ile reolojik özellikler; kayma oranı, kayma gerilmesi ve yoğunluğu'nun belirlenmesi (ASTM D7042-04, ASTM D2270, ASTM D445)	• Kıvam için gerekli olan su miktarı tayini deneyi (TS EN 196-3) • Kimyasal katkı - çimento uyumun belirlenmesi (TS EN 1015-3) • Kimyasal katkı dozajının ve çökme kaybına etkisinin belirlenmesi • Mineral katkı dozajının ve çökme kaybına etkisinin belirlenmesi • CTPT'nin kalibrasyonu	• Taze beton deneyleri Taze Betonun Yoğunluk Tayini (TS EN 12350-6) Çökme (Slump) ve çökme yayılması (ASTM C143; TS EN 12350-2) K-Çökme (K-slump) Deneyi J ring (Çökme deneyi ile birlikte) (EFNARC, 2002) İki Nokta İşlenebilirlik Deneyi
Analiz ve değerlendirmeler (Veri Madenciliği)		

3.1. Agregaların Seçimi ve Sağlanması

Elek analizlerinde ASTM Elek Serisi kullanıldı. Elek analizi en az 5 kez tekrarlanmış ve bu beş değerin ortalaması alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanmak üzere iki farklı iri agrega ve iki farklı kum temin edilmiştir.

- ✓ **Doğal iri agrega;** Antalya Karaöz beldesinde bulunan çakıl ocağından sağlanan Çakıl I ve Çakıl II
- ✓ **Doğal Kum:** Antalya Akseki beldesinde bulunan kum ocağından sağlanan, doğal dere kumu

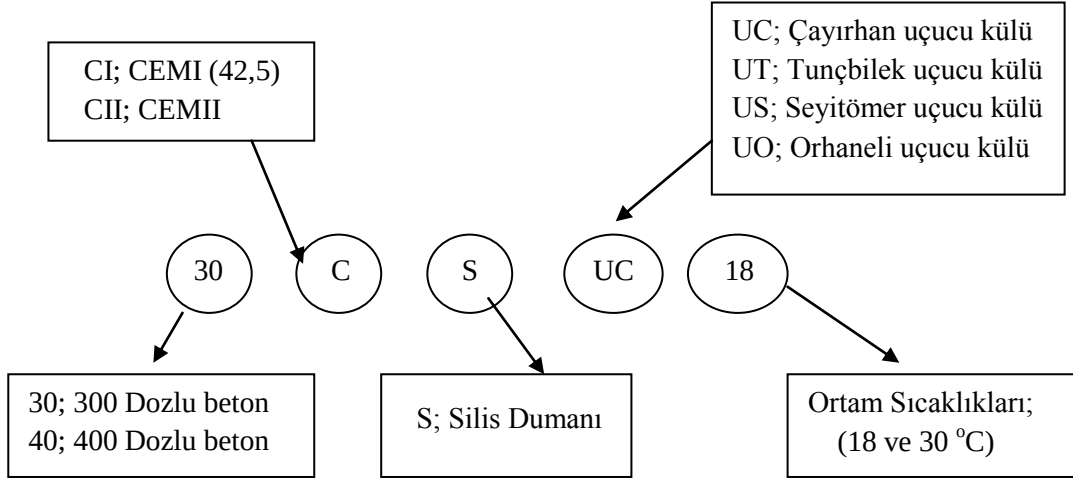
3.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Birim hacim kütle ve su emme oranı tayini deneyleri iri agrega için ASTM C127'e göre, ince agrega için ise ASTM C128'e göre yapılmıştır. Sıkışık ve gevşek birim hacim kütle (yığın yoğunlukları) tayini ASTM C 29'a göre yapılmıştır. Deneyler her malzeme için üç kez tekrarlanıp ve ortalama değerleri alınmıştır.

Çalışmalarda kullanılacak agrega oranları, ACI 304-2R Sayılı "Pompalama Yöntemleri ile Betonun Yerleştirilmesi" ve ASTM C33 Beton agregası sınır eğrilerine uygun olarak ayarlandı.

Karışım ; Çakıl I + Çakıl II + 0-5 kum+0-8 kum'dur.

Üretilen betonlara ait kodlama aşağıda belirtilmiştir.



3.3. Çimento

Beton üretiminde CEM I 42.5 R ve CEM II 42.5 A-M R sınıfı çimentolar kullanılmıştır. Çimentolar, 50 kg'lık torbalar halinde temin edilmiştir. Çimentolar laboratuvar şartlarında nem almaması için temininden sonra en fazla 1 hafta içinde kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler GÖLTAŞ Çimento A.Ş. laboratuvarlarında yapılmıştır. Kıvam için gerekli olan su miktarı tayini, TS EN 196-3 “Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini” standardına göre yapılmıştır.

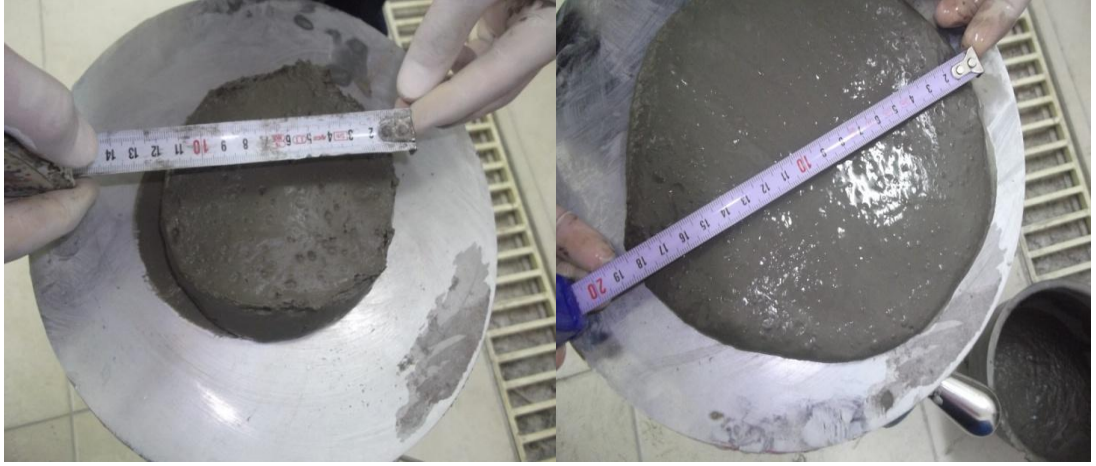
3.4. Kimyasal Katkı

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.

3.5. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi

Kullanılacak kimyasal katkılar yapılan ön denemeler sonucunda katkı çimento uyumuna göre seçilmiştir. Kimyasal katkı ile çimento arasındaki uyumun belirlenebilmesi için TS EN 1015-3'e göre “Kagir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayıma Tablası İle)” deneyler yapılmıştır (Şekil 3.2). Deneyler, normal kıvam için gerekli su (TS EN 196-3, madde 5.2.3'e göre

belirlenen) kullanılarak sıra ile çimento kütlesinin %0,3, %0,5, %1 oranlarında akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak yapılmıştır. Ancak bu deneylerde kullanılan katkıların yüksek oranda akışkanlaştırıcı olmasından dolayı %0,3 değerini aşan oranlarda zaman ve düşüş sayıları belirlenememiştir. Bu nedenle her katkı tipi için çimento ağırlığının %0,3 oranı da sabit kabul edilip, düşüş sayıları ve zaman okumaları arasında değerlendirme yapılabilmektedir. Değerlendirmelerde en çok 25 düşüş veya yayılma tablasından çimento pastasının akması dikkate alınmıştır.



Şekil 3.1. Yayılma tablası ile çimento-katkı uyumunun belirlenmesi

3.6. Uçucu Küller

Çalışmalarda kullanılacak uçucu külü belirlemek için; Seyitömer ve Tunçbilek Uçucu külü (Kütahya), Orhaneli uçucu külü (Bursa) ve Çayırhan Uçucu külü (Ankara) Termik santralleri'nden sağlanan dört farklı külün analizi yapılmıştır. Bu uçucu küllerin tamamı deneylerde kullanılmıştır.

3.7. Silis Dumanı

Deneysel çalışmalarda kullanılan silis dumanı (ferrosilisyum, FeSi) Antalya Etibank Ferrokrom fabrikasından sağlanmıştır.

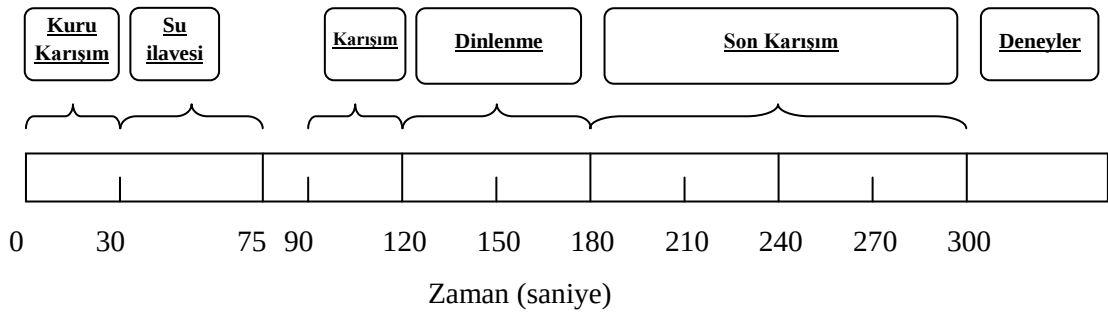
3.8. Beton Karıştırma Cihazı ve Metodu

Beton karışımlarının hazırlanmasında 45-50 lt etkili kullanım kapasiteli düşey eksenli cebri karıştırıcı mikser kullanılmıştır (Şekil 3.2). Cihaz, karışımların homojen olabilmesi için birbirine zıt ekseninde ve bağımsız olarak dönebilen, üst karıştırıcı ve alt kazan olarak bizim tarafımızdan tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri

Karılma işlemi, Şekil 3.3’de gösterildiği gibi, 30 s. kuru (iri agrega, ince agrega, bağlayıcı madde), 90 s. ıslak karışım (ilk 1 dk.’da su ve kimyasal katkı ilavesi), 60 s. dinlenme ve 120 s. son karışım olmak üzere toplam 300 s’de (5 dk.) yapılmıştır.



Şekil 3.3. Betonun karılma işlem aşamaları

3.9. Beton Karışım Hesapları

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. 1000 dm³ karışımdaki kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.4. verilmiştir.

Çizelge 3.4. 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)
Seri ismi									
30CI18-30CI30 30CII18-30CII30	415,02	645,33	700,35	201,21	300,00	153,81	-	-	4,50
30CIS18-30CIS30 30CIIS18-30CIIS30	407,20	633,17	687,16	197,42	300,00	153,46	-	30,00	4,95
30CIUC18-30CIUC 30CIHUC18-30CIHUC30	404,59	629,10	682,74	196,14	300,00	153,34	45,00	-	5,18
30CISUC18-30CISUC30 30CIISUC18-30CIISUC30	396,77	616,94	669,55	192,35	300,00	152,98	45,00	30,00	5,63
30CIUS18-30CIUS30 30CIHUS18-30CIHUS30	403,46	627,34	680,84	195,60	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUS18-30CISUS30 30CIHUS18-30CIHUS30	395,64	615,19	667,64	191,81	300,00	152,93	45,00	30,00	5,63
30CIUT18-30CIUT30 30CIHUT18-30CIHUT30	404,07	628,30	681,88	195,90	300,00	153,32	45,00	-	5,18
30CISUT18-30CISUT30 30CIHUT18-30CIHUT30	396,25	616,15	668,68	192,10	300,00	152,97	45,00	30,00	5,63
30CIUO18-30CIUO30 30CIHIO18-30CIHIO30	403,73	627,76	681,29	195,73	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUO18-30CISUO30 30CIHSUO18-30CIHSUO30	395,91	615,59	668,09	191,94	300,00	152,94	45,00	30,00	5,63
40CI18-40CI30 40CII18-40CII30	394,53	613,62	665,94	191,32	400,00	157,89	-	-	6,00
40CIS18-40CIS30 40CIIS18-40CIIS30	384,21	697,41	648,35	186,26	400,00	157,41	-	40,00	6,60

Çizelge 3.4. 1000 dm³'teki malzeme miktarı(devamı)

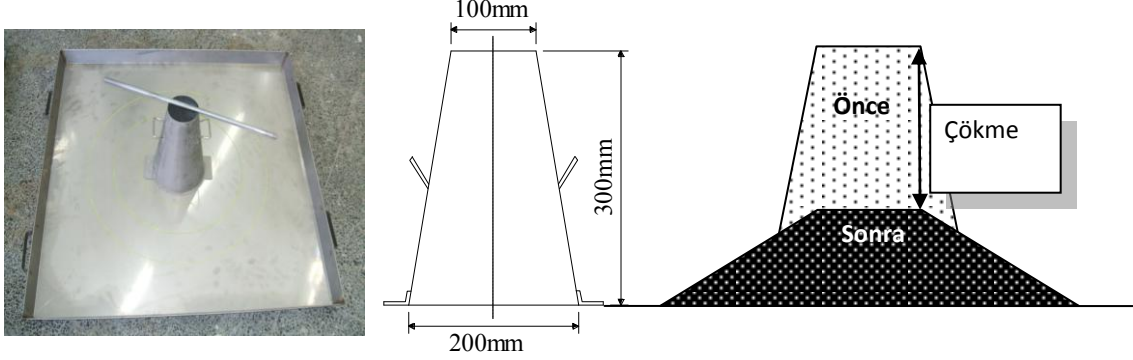
40CIUC18-40CIUC 40CHUC18-40CHUC30	380,71	591,98	642,45	184,57	400,00	157,26	60,00	-	6,90
40CISUC18-40CISUC30 40CHSUC18-40CHSUC30	370,29	575,76	624,86	179,52	400,00	156,78	60,00	40,00	7,50
40CIUS18-40CIUS30 40CHUS18-40CHUS30	379,21	589,64	639,92	183,85	400,00	157,18	60,00	-	6,90
40CISUS18-40CISUS30 40CHSUS18-40CHSUS30	368,79	573,43	622,32	178,79	400,00	156,72	60,00	40,00	7,50
40CIUT18-40CIUT30 40CHUT18-40CHUT30	380,03	590,92	641,31	184,24	400,00	157,23	60,00	-	6,90
40CISUT18-40CISUT30 40CHSUT18-40CHSUT30	369,61	574,71	623,72	179,19	400,00	156,74	60,00	40,00	7,50
40CIUO18-40CIUO30 40CHUO18-40CHUO30	379,57	590,19	640,51	184,02	400,00	157,20	60,00	-	6,90
40CISUO18-40CISUO30 40CHSUO18-40CHSUO30	369,14	573,98	622,92	178,96	400,00	156,73	60,00	40,00	7,50

3.10. Taze Beton Deneyleri

Betonların işlenebilmesi, çökme (slump), çökme yayılması (slump spread), J Ring, K çökme ve Tattersall'ın geliştirmiş olduğu iki nokta işlenebilirlik deney cihazı (CTPT) kullanılarak belirlenmiştir.

3.10.1. Çökme ve çökme yayılması

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 3.4. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı.

Betonun çökmesi Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ölçülür. Bu ölçüm basitliğinden dolayı yaygın olarak kullanılır. Bu deneyde gerilme, birim alandaki betonun ağırlığından oluşmuştur. Beton, sadece akma gerilmesi aşıldığında çökecek, gerilme (veya alan/betonun ağırlığı) akma gerilmesinin altında olduğu zaman duracaktır. Bundan dolayı çökme testi akma gerilmesi ile ilişkilidir. Bazı araştırmacılar sonlu elemanlar metodunu kullanarak, çökme testine benzeterek deneme yapmışlardır. Betonun zamana karşı çökme tanımlamasını yapabilen Bingham denkleminin betonu tanımladığı varsayılır ancak kullanılan bileşenler (çimento pastası, agrega) için malzeme özelliğini kapsamadığından beton bileşiminin önceden tahmin edilmesi mümkün değildir (Ferraris, 1999; Vincent ve Ferraris, 2001).

Pratikte taze beton deneylerinde ve özellikle pompa betonlarında çökme deneyi çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Çökme deneyi sonunda, betonun konik formunu bozmadan deforme olması, yanlardan kaymaması (shear slump) ve segregasyonu verecek ölçüde yayılmaması (collapse) doğru bir çökme değerinin ölçümü için gereklidir. Kayma şeklinde çökme olması durumunda deney tekrarlanır. Tekrar yapılan deneyde çökme, yine kayma şeklinde olur ise, bu durumun karışımın kaba ve kohezyonunun eksik olduğuna işaret ettiği kabul edilir. Çökme ayrışma şeklinde olur ise betonun su/çimento oranının çok yüksek olduğu veya karışıma sonradan su ilave edilmiş olabileceği anlaşılr (Yücel, 1997).

Çökme deneyinden elde edilen sonuçların kayma eşiği (τ_0) ile lineer ters orantılı değiştiği, plastik viskozitenin (η_{pl}) ise çökme değerleri ile ilişkisi zayıftır. Şu halde

çökmeleri eşit olan betonların akışkanlıkları eşit olamayabilir; aynı çökmeyi gösteren betonlarda plastik viskozite (η_{pl}) değeri küçük olan daha akışkan bir beton olacaktır. Öte yandan kayma eşikleri (τ_0) eşit ve bu nedenle çökmeleri eşit betonlardan plastik viskozitesi (η_{pl}) yüksek olanın stabilitesi daha iyi olacaktır (Akman, 1996).

Çökme deneyi, kuvvetli vibrasyonla yerleştirilebilecek çok kuru betonlar ve mıcır oranı yüksek betonlar bakımından pek bir şey ifade etmez, zira bu betonlarda genellikle çökme sıfır değerinde olur. Deney, betonun sıkıştırılma kolaylığı hakkında bir fikir veremez ve betonun vibrasyon, bitirme işlemi, pompalama gibi dinamik koşullar altında davranışını yansıtamaz. Çökme deneyi akıcıya yakın plastik kıvamda betonlar için uygulanabilir. Değişik agregalarla, özellikle farklı ince agreganın içeriğine sahip ve iri agreganın yuvarlak ve köşeli oluşuna göre, aynı çökme değeri farklı işlenebilmeleri gösterebilmektedir. Çökme deneyi, şantiye koşullarında, agreganın rutubetlerinde meydana gelebilecek olası artışların gözlemlenmesi amacı ile, beton karışımının üniformluğundaki değişkenliklerin takibinde oldukça kullanışlı olmasına rağmen tek başına betonun işlenebilmesini belirlemek için yeterli değildir (Akman, 1987; Neville, 1996; Özkul ve Sağlam, 2002; Koehler ve Fowler 2003).

Çok yüksek çökmeli betonlar için kullanılan (kaba agreganın çapı 305 mm'den küçük), yükseklik azalmasının yerine yayılmasının ölçülmesi yapılır. Bu ölçüm nadiren yapılır ve standart değildir. Çökme ölçümlerinin değişkenliği başlıca, karışım oranının değişmesine ve operatöre bağlıdır. Bu test, karıştırma suyu miktarının değişmesi gibi teslim edilen betonun bileşenlerinin değişimini ortaya çıkarmaya yardım edebileceği için kalite kontrol araçlarında kullanılması faydalıdır (Ferraris, 1999).

Yapılan çökme deneyinde, çökme yüksekliği ve toplam yayılma çapı her beton için 15. ve 45. dakikalarda ölçülmüştür.

3.10.2. K-Çökme (K-slump) Deneyi

Deney, 1970'lerde Kanada Saskatchewan Üniversitesi'nden K. W. Nasser tarafından geliştirilmiştir. 1997 de ASTM standardı olan bu test çok yaygın olarak kullanılır. Bu test ASTM'de "Yeni karıştırılmış betonun hem zamanla değişimi ve üniformluğu hem de akış ve kıvamın hızlı değerlendirilmesi" olarak tanımlanmaktadır (Ferraris, 1999).

K-Çökme deney cihazı delikli borudan oluşur ve yüzer (batmadan) düzeyde ölçen çubuktur. Delikli boru, beton içine sokulur ve deney aleti içine belirli bir süre içinde deliklerin içinden harç veya çimento pastası akar. Yaklaşık 170 mm uzunluğundaki bir ucu sivri olan aletin ortasına kadar devam eden delikli kısmının bitiminde yüzdürücü levha (flatör, şamandıra) vardır. Öteki ucunda ise tüp içinde hareket eden ölçekli bir çubuk vardır (Wong vd., 2001).

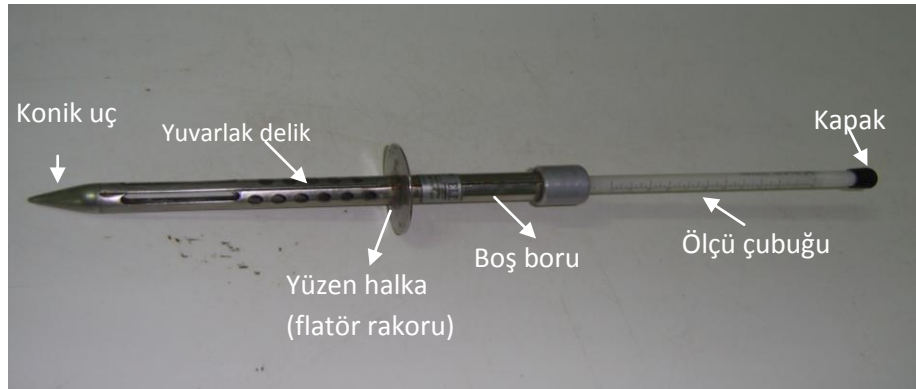
Flatör seviyesinde gösterilen akış pastanın miktarıdır. Bu cihaz pastanın birkaç tabakada statik akma sınırını ölçer. Boru üzerindeki deliklerin küçük olmasından dolayı agreganın etkisi bu test tarafından ölçülemez. Derinlikte sondadaki eklemeler önemli miktarda arttırmadıkça yüksek çökmeli limitlerde dahi uygulanabilir (Wong vd., 2001).

Flatör rakoru (Collar Floater) beton yüzeyindeyken test edilen betonun içine sonda yerleştirilir. Betonun harç fazı deliklerden süzülerek tüp içine girer ve ölçekli çubuğun skalasından K-çökme değeri okunur. K-çökme değeri klasik çökme değerinin yaklaşık % 40'ı mertebesindeydir. Düşey olarak yukarı çekilen silindir içinde kalan betonun yüksekliği gene ölçekli çubuk yardımıyla okunur. İkinci okunan bu değer işlenebilirlik ve sıkışmanın ölçümüdür. Bu değer ne kadar büyükse betonun işlenebilirliği, sıkıştırılabilirliği ve yerleştirilmesi o kadar iyi olacaktır. İlk okuma ve ikinci okuma arasındaki fark, segregasyonu azaltmak için 2 cm'yi geçmemelidir. k-çökme cihazı üzerinde yapılan okumalar karışımdaki sürtünme kuvvetleri, yapışma (adhesion) ve kohezyondan etkilendiğinden betonun işlenebilirlik ve kıvamının ölçüsü olduğu iddia edilmektedir (Bartos, 1992; Yücel, 1997; Ferraris, 1999).

Bazı araştırmacılar, iç boruya betonun serbest aktığını farz eder. Betonun reolojisinde nitelenen iki temel parametrenin (akma gerilimi ve viskozite) göstergesi olarak, beton akma gerilimi olmaksızın sonda içine taşınamayacağından betonun akma gerilimi ile ilgili değeri bu testin vereceği iddia edilmektedir. Gerilim, çevreleyen malzemenin ağırlığı ile uygulanan kuvvettir. Bu testte sonda, betonun çok derinine sokulmadığı için sonda çevresindeki malzeme tarafından uygulanan gerilim çok yüksek değildir bu nedenle düşük akma gerilimli malzeme için uygundur. Dış borudaki deliklerden daha büyük agregalı beton boru içine akamayacaktır. Bu durumda sadece harç cihaza akacak ve cihaz sadece betonun segregasyon yeteneğini ölçecektir (Ferraris, 1999).

K-çökme deneyi yüksek işlenebilirlikteki akıcı betonlar için uygundur, düşük işlenebilirlikteki akıcı olmayan karışımlarda kullanılamaz. K-çökme aletinin geliştirilmiş hali olarak dijital akış ölçer’de (digital flowmeter) kullanılmaktadır. Dijital akış ölçerle betonun akış, kıvam ve işlenebilirlik değerleri ve sıcaklığı hızlı bir şekilde tespit edilebilir. Veri dağılımı rölatif olarak yüksek olmasına rağmen bu test çökme testi sonuçlarıyla ilişkilidir. Standart sapma aynı cihazı kullanan tek operatör için % 68’dir (Ferraris, 1999; Koehler ve Fowler 2003).

Yapılan deneylerde kullanılan cihaz Şekil 3.5’da gösterilmiştir. K Çökme ölçümü olarak; sondanın betona sokulmasından sonra ölçülen yükseklik “ilk Yükseklik (h_1)”, sondanın çıkarılmasıyla okunan yükseklik “Son Yükseklik (h_2)” ölçümleri yapıldı.



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan K Çökme deney aleti

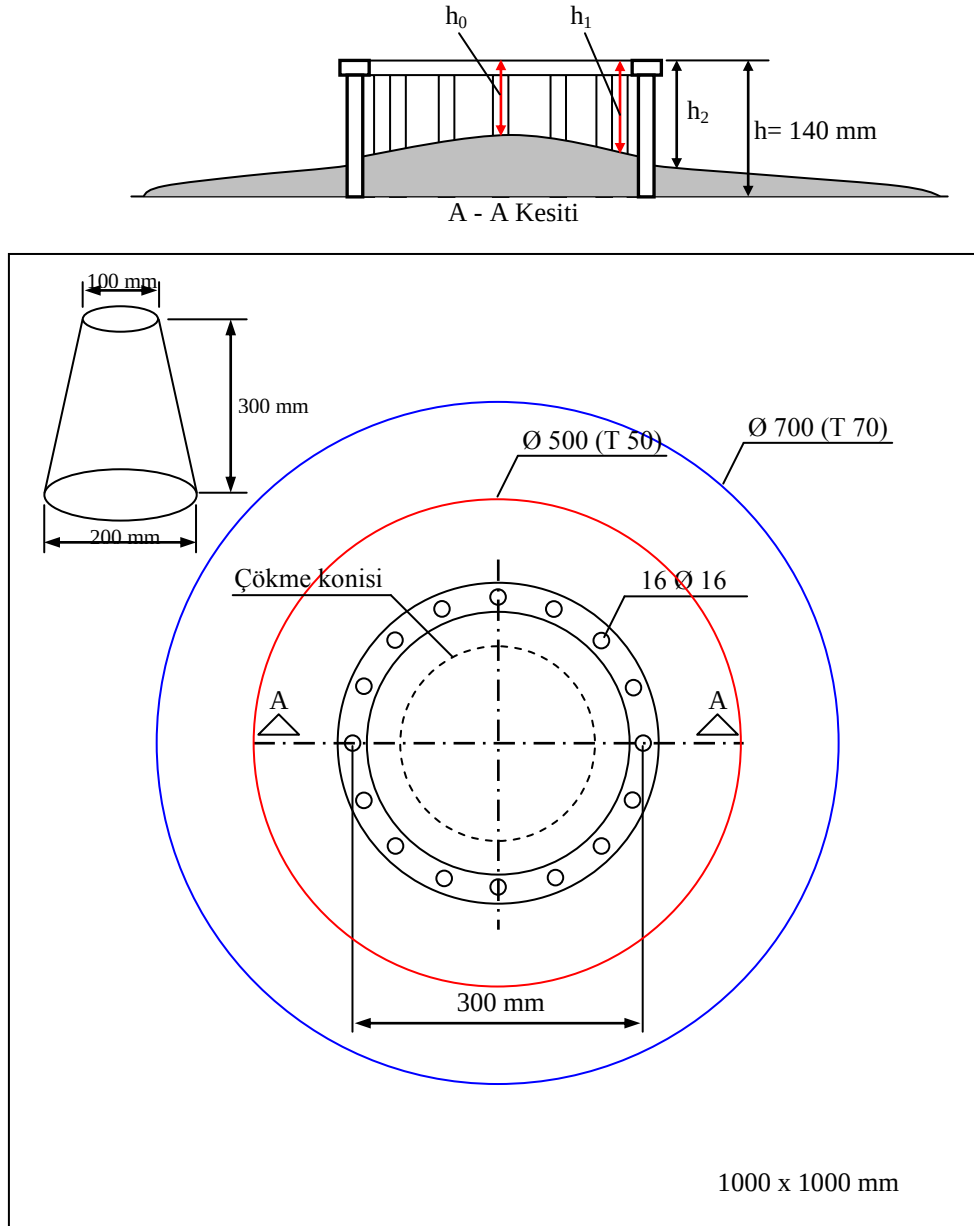
3.10.3. J ring deneyi

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 3.6'da 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. Çelik çubuklar halka üzerindeki boşluklara dikey olarak takılmıştır ve dikey çubuklar arasında oluşan açıklıktan beton geçer. Bu çubuklar farklı çap ve aralık mesafesinde olabilir. Ancak bu aralıklar en az, en büyük agrega çapının 3 katı olmalıdır. J Ring çubuk aralıkları fazla olursa betonun geçme yeteneği oldukça yüksek ölçülür. Dikey çubukların bağlandığı halka çapı 300 mm'dir.

J Ring; çökme, 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.

Orimet seçeneği, dinamik deney olarak avantajlıdır (EFNARC, 2002; Koehler ve Fowler 2003).



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

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan deney cihazı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Deneylerin tamamında 60. saniyedeki ölçümler dikkate alınmıştır. J Ring çökme yüksekliği (h_0), J Ring içi (h_1) ve dışındaki (h_2) yükseklikler Şekil 3.6’da gösterildiği gibi alınmıştır.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan J Ring Deney cihazı.

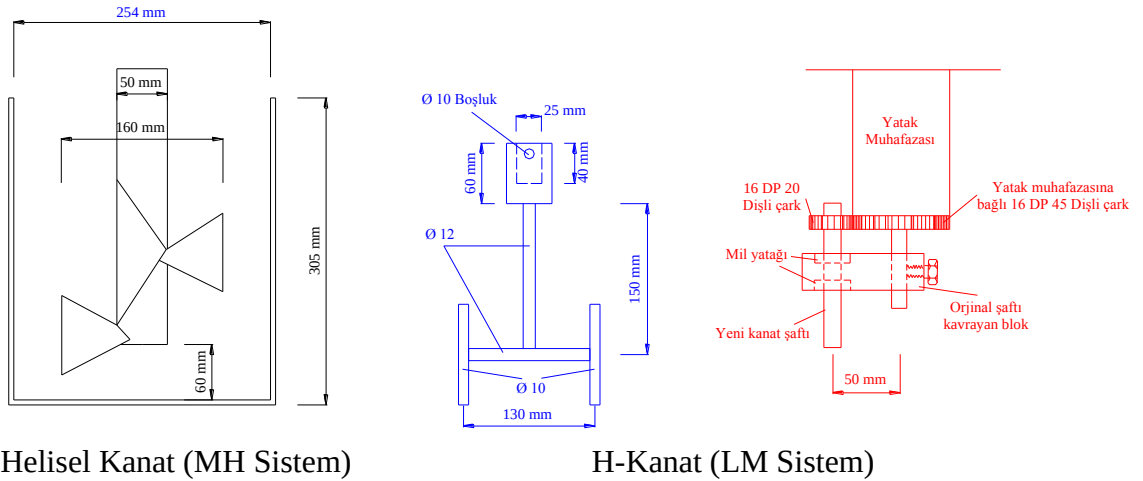
3.10.4. İki nokta işlenebilirlik deney cihazı (CTPT)

İki nokta işlenebilirlik cihazını G. H. Tattersall tarafından 1970’lerde Sheffield üniversitesinde geliştirilmiştir. Tattersall, beton ölçümlerinde eş eksenli silindir reometrelerin silindirler arasındaki boşluklardan dolayı başarısız olduğunu belirlemiştir. Tattersall cihazında, beton içine yerleştirilen kanatların dönmesiyle gerekli tork ölçülmektedir. Bu cihazın geliştirmesine torku ölçmek için, elektrik gücünü ölçen dinamometreye bağlanan karıştırıcı çengelin, yemek mikserine takılmasıyla başlamıştır. Bu cihaz MK I olarak tanımlanmaktadır. Eş eksenli reometrelere karşılık olarak MK I in çengeli betonlarda daha sürekli olarak temas halindedir.

Başlangıçtaki yemek mikserinin geliştirilmesiyle, MK II olarak bilinen cihaz geliştirilmiştir. Bu cihaz, şimdi “Tattersall İki Nokta İşlenebilirlik Cihazı-CTPT” olarak bilinmektedir. Geniş çerçeveye takılmış sabit kovadan oluşmaktadır. Hidrolik sürücü motordaki, betonun içine daldırılmış kanatları çevirir. Betonun işlenebilirliğini belirlemede iki farklı kanat tipi kullanılır. 75-100 mm çökmelerden daha fazla için kullanılan MH sistem, merkezi şaft üzerine, helezon şeklinde (sarmal) yerleştirilmiş dört adet açılı bıçaktır. Bıçaklar, aslında betonu kaldırarak, karıştırma hareketini sağlar. Buna alternatif olarak geliştirilen LM sistem, 50 mm den daha düşük çökmeli, düşük işlenebilirlikteki betonlar için geliştirilmiştir. LM sistemi betonda gezici hareket yapan H şeklindeki karıştırıcıdan oluşur. Bu kanatlar takıldığı zaman cihaz MK III olarak da adlandırılabilir. Çok düşük çökmeli betonlara ilave olarak, bu yüksek plastik viskozite MH sistemin karıştırma veriminde azalacağı

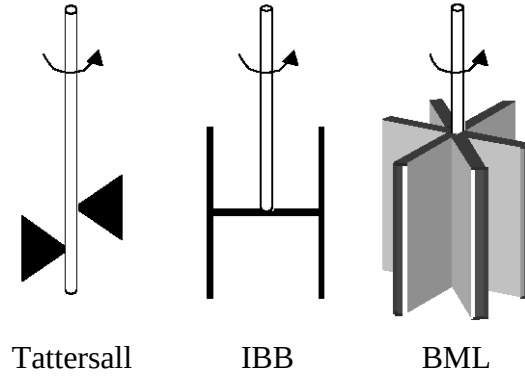
için yüksek plastik viskoziteli, yüksek performanslı ve kendiliğinden yerleşen betonların reolojik ölçümlerinde LM sistemi kullanmak daha uygundur. MH ve LM kanat sistemi Şekil 3.10’da gösterilmiştir (Tattersall, 1991; Tattersall ve Banfill, 1983).

Cihazın ilk versiyonlarında, kanatların hızı el ile (manuel) kontrol edilmekte ve tork, hidrolik motordaki yağ basıncı göstergesi (basınç göstergesinden okunan) tarafından ölçülmektedir. Cihazın sonraki versiyonlarında, sürekli veri kaydetmeye izin veren basınç dönüştürücüleri (transducer) ve takometreler (hızölçer) kullanılmıştır. Gjorv, Wallevick ve Beaupré bu cihazla elde edilen tork ve hızı bilgisayar kullanarak otomatik ölçümler yapması şeklinde geliştirip ticarileştirmiştir (Wong vd., 2001; Ferraris, 1999; Koehler ve Fowler 2003).



Şekil 3.8. Tattersall iki nokta işlenebilirlik cihazı için karıştırıcı kanatlar (Tattersall, 1991)

İki nokta işlenebilme aygıtları başka araştırmacılar tarafından da tasarlanmış veya geliştirilmiştir. Bunlar; IBB beton reometresi veya BML viskozimetresi olarak adlandırılmıştır. Bu cihazları bir birinden ayıran temel özellik kanat şekilleridir. IBB’de “H” şekilli kanat kullanılırken BML’de girintili çıkıntılı (testere dişli) silindir türündedir (Şekil 3.11) (Ferraris, 1999).



Şekil 3.9. Beton reometrelerinde kullanılan farklı kanat tipleri (Vincent ve Ferraris, 2001).

Bu aleti geliştiren Tattersall, açısal şekil değiştirme hızı $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)$ yerine ‘N’ dönme hızı, kayma gerilmesi (τ) yerine ‘T’ tork burulma momenti değerlerini koyarak problemi daha pratik hale getirmiştir. SI birimlerinde açısal şekil değiştirme hızı $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)$, $\frac{1}{sn}$ ve kayma gerilmesi (τ), $\frac{N}{m^2}$ (yani Pascal) birimindedirler. Buna karşılık dönme hızı, devir/sn, tork ise $N \cdot m$ birimindedir. Tattersall tarafından önerilen denklemi;

$$T = (G / K) \tau_0 + (G \eta) N \quad (5.1)$$

$\tau_0 = g / (G / K)$ ve $\eta = h / G$ denklemde yerine yazılırsa

$$T = g + h \cdot N \quad (5.2)$$

elde edilir. Burada:

T = Tork

G = Newtoniyen akışkan ile kalibrasyonundan elde edilen sabit

K = Newtoniyen olmayan akışkanı ile kalibrasyonundan elde edilen sabit

N = Kanatların hızı

τ_0 = Akma gerilmesi

η = Viskozite

Bu ifade de g akma eşiğinin, h ise plastik viskozitenin ölçütü olarak ölçülen değerlerdir. Maalesef, G ve K 'nın varlığı, üç ana sonucun elde edilmesini hemen hemen imkansızlaştırır;

- Aletteki örneğin akışı, G ve K 'nın hesaplanması için çok karmaşıktır ve lineer değildir (veya çalkantılı akıştır).
- Kaptaki örnekte, reometrenin kalibrasyonu için standart sıvının kullanılması çok önemli olabilir.
- Aletin kalibrasyonundaki granül malzemenin varlığı standart değildir (Ferraris, 1999).



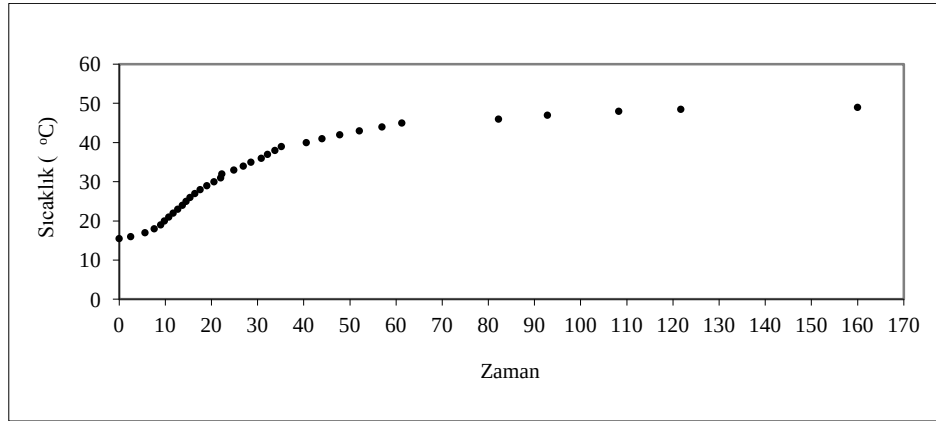
Şekil 3.10. İki nokta işlenebilirlik deney cihazının (CTPT) genel görünüşü.

3.10.5. Cihazın kullanımı ve deneyin yapılışı

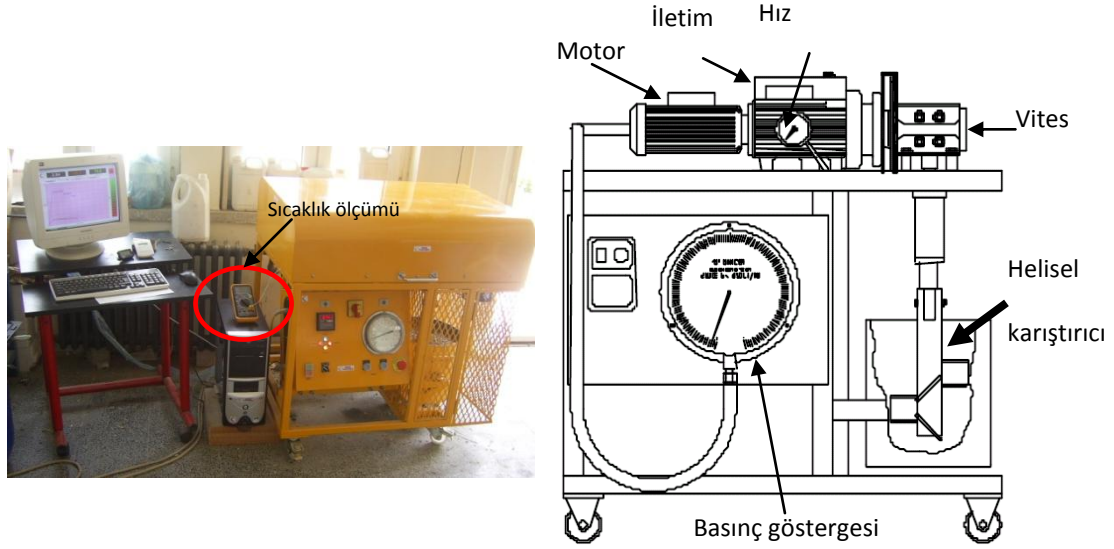
Tattersall'ın İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazı'nda (CTPT), deneyi yapılacak olan beton bir kap içine (25 lt) doldurulur. Üzerinde kanatlar olan karıştırıcı uç, numune içine indirilir. Bu ucun dönmesine malzeme direnç gösterir. Bu direnç her hız değişimi için bar olarak ölçülür. Hız arttıkça bar değeri de artar. Hız 20 rpm'den başlatılarak 120 rpm'e kadar 20 rpm farkla kademeli olarak 30 sn'de bir manuel olarak arttırılır. Her hıza karşılık gelen bar değerlerini makine hafızasında

kaydeder. Bu değerler hız ve buna karşı koyan kuvvetin grafiği excelde çizilir. Bu grafiğin eğrisinden bulunan g ve h değerlerimizi kalibrasyondan elde ettiğimiz sabitlerle çarpılması sonucunda Plastik vizkozite ve kayma eğiği değerlerini elde ederiz.

Araştırma deneylerinde kullanılan iki nokta işlenebilirlik cihazında (Model: CTPT, Seri No: 05LS201, Supply : 230, FREQ : 50), üretilen betonlarda hedef çökme 160 mm'den fazla olduğu için, CTPT'de MH sistem kullanılmıştır. Motor iç sıcaklığına bağlı olarak CTPT'de farklı değerler ölçüldüğü ön çalışmalar sonucunda tespit edildiğinden (Şekil 3.13), motor iç sıcaklığını kontrol edebilmek için ise cihaza termometre bağlanmışır (Şekil 3.14). Kalibrasyon aşamasında ve araştırma deneylerinde motor iç sıcaklığı 50-54°C arasındadır. Bu yüzden deney başlamadan cihaz yaklaşık 1 saat kadar boşta çalıştırılır ve bu sıcaklık değerine gelmesi sağlanır. Kullanılan CTPT cihazının diğer özellikleri Çizelge 3.11'te verilmiştir.



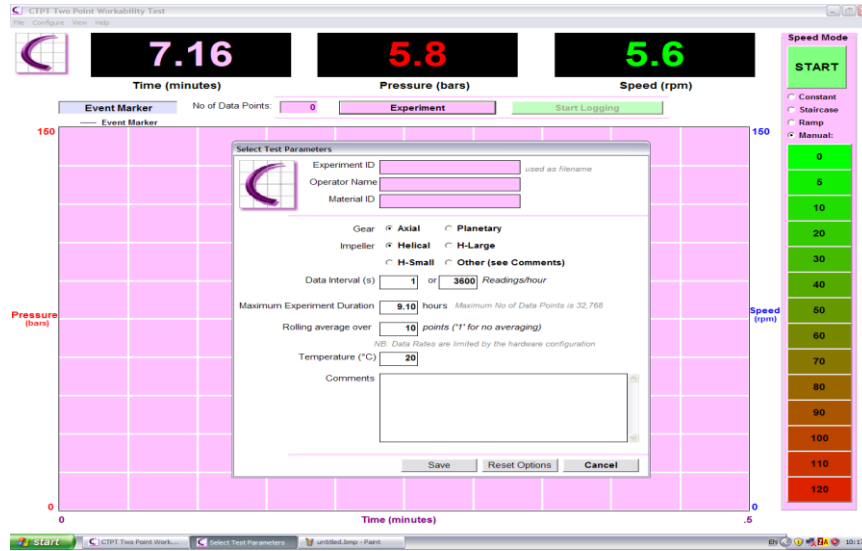
Şekil 3.11. CTPT Cihazında, zamanla motor iç sıcaklığının değişimi



Şekil 3.12. CTPT motor iç sıcaklık ölçümü ve şematik görüntüsü.

Çizelge 3.3. CTPT'nin teknik özellikleri

Hız Kontrol Doğruluğu	$\pm 2\text{rpm}$
Motor Gücü	375 W (1/2 HP)
En Büyük Kanat Mili Hızı	120 rpm
En Küçük Kanat Mili Hızı	5 rpm
Hız Aralığı (Değişimi)	28:1
En büyük Tork Çıktısı	30 N·m
Basınç Göstergesi	150 mm (6") Çapında 0-140 bar (0 – 2000 psi)
Basınç Dönüştürücü	100 bars (0- 1500 psi)
Basınç Göstergesinin Doğruluğu	15 bits (32768'de 1 veya % 0,003)
Saniyedeki Okuma sıklığı	10 Hz
Elektriksel Güç	230V 50 Hz 5 amp 110V 60Hz 10 amp



Şekil 3.13. CTPT'nin veri okuma ayarları

Şekil 3.13'de gösterilen Data interval; Alınan ardışık iki veri arasındaki süreyi belirlemede kullanılır. Veri alma aralığı her saniyede (s) veya okuma/saat; 3600 ile 1 arasında değer almaktadır. CTPT'de en fazla 32768 veri okuması yapılabilmektedir. Bu nedenle 1 s ara ile veri alındığında (Data interval (s): 1, okuma/saat: 3600) deney süresi en fazla 9.10 saat olabilmektedir. 2 s ile veri alındığında ise; Data interval (s): 2, okuma/saat: 1800, deney süresi en fazla 18.20 saat olmaktadır.

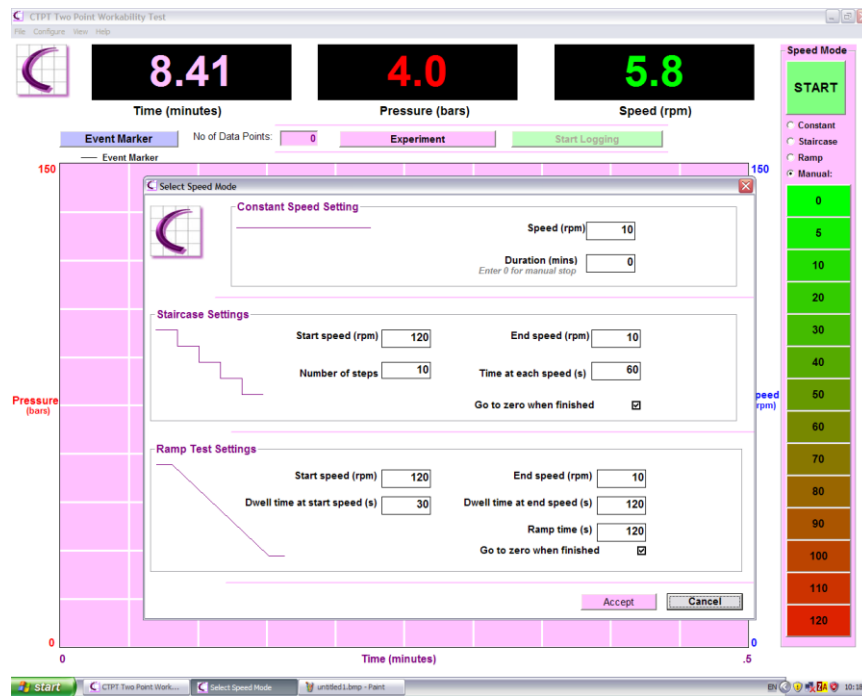
Rolling average over; 1 ile 10 arasında değer alır. 1 haricindeki diğer sayılar kadar verinin ortalamalarını alıp grafik çizmede kullanılır. 10 sayısı girildiğinde, 10 verinin ortalamasını alıp grafik çizilmektedir. "1" değeri ortalama almadan çizilen grafik için kullanılır.

Otomatik (bilgisayar yardımıyla) kullanım için hız ayarları;

- Sabit Hız Modu (Constant); Hız rpm olarak istenilen değerde ve sürede girilebilir (10 rpm ve 5 dk gibi)
- Basamaklı Hız Modu (Staircase); Başlangıç ve bitiş hızları, başlangıç ile bitiş arasında kaç tane hız adımı olacağı ve bu hız adımlarında ölçüm süresi girilebilir (Başlangıç hızı 120 rpm, hız adımı sayısı 10, her hızdaki ölçüm süresi 60 s, bitiş hızı 10 rpm)

- Eğimli Hız Modu (Ramp); Başlangıç ve bitiş hızları, başlangıç ve bitiş hızlarında yapılacak ölçüm süresi ile bitiş süresi girilebilir (başlangıç hızı 120 rpm, başlangıç hızında durma zamanı 30 s, eğim süresi 60 s, bitiş hızı 10 rpm, son hızda durma zamanı 30 s)
- Manuel mod hızı ve arttıracığımız hız zamanını kendimiz ayarladığımız başlangıç ve bitiş hızı manuel olarak tamamladığımız moddur

Deneyler sırasında manuel mod tercih edilmiştir, kalibrasyon ve deneyler bu moda göre hesaplanarak yapılmıştır.



Şekil 3.14. CTPT'nin hız ve zaman ayarı ekranı

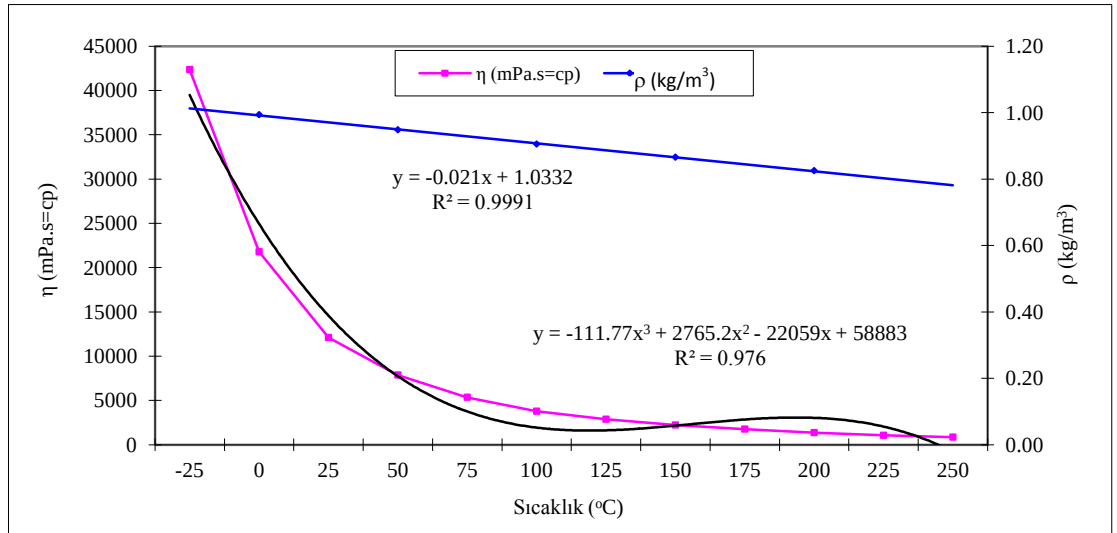
3.10.6. CTPT cihazının kalibrasyonu

Cihazın Kalibrasyonu için Polidimetilsiloksan polimer sıvı kullanılmıştır. Sıvının viskozite, kayma gerilmesi, özgül ağırlık değerleri ve bu değerlerin sıcaklıkla değişimi “Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer” cihazı ile belirlenmiştir.

Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer cihazı; dönen konsantrik silindir ve U-osilasyon (salınım) tüp sistemlerini içeren bir ölçüm haznesine sahiptir ve

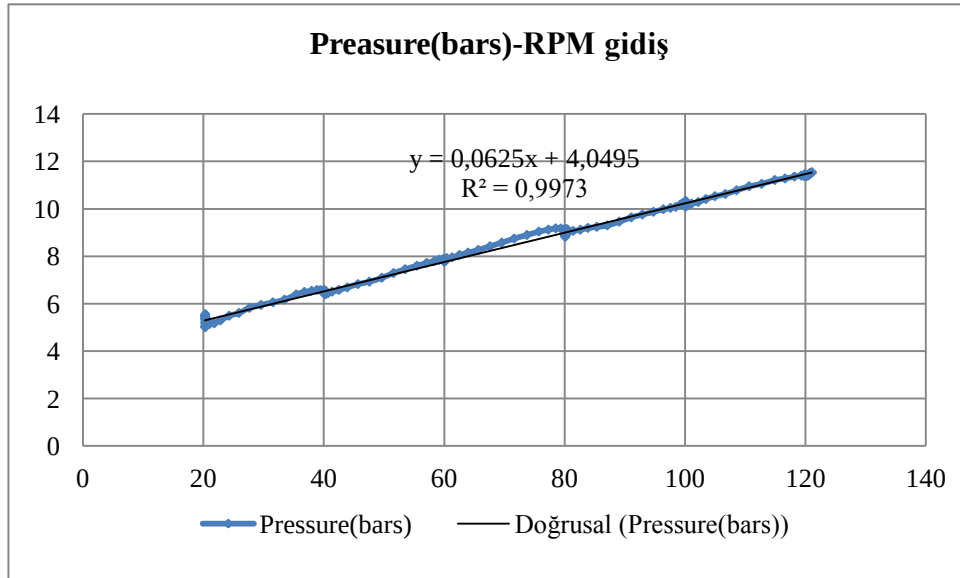
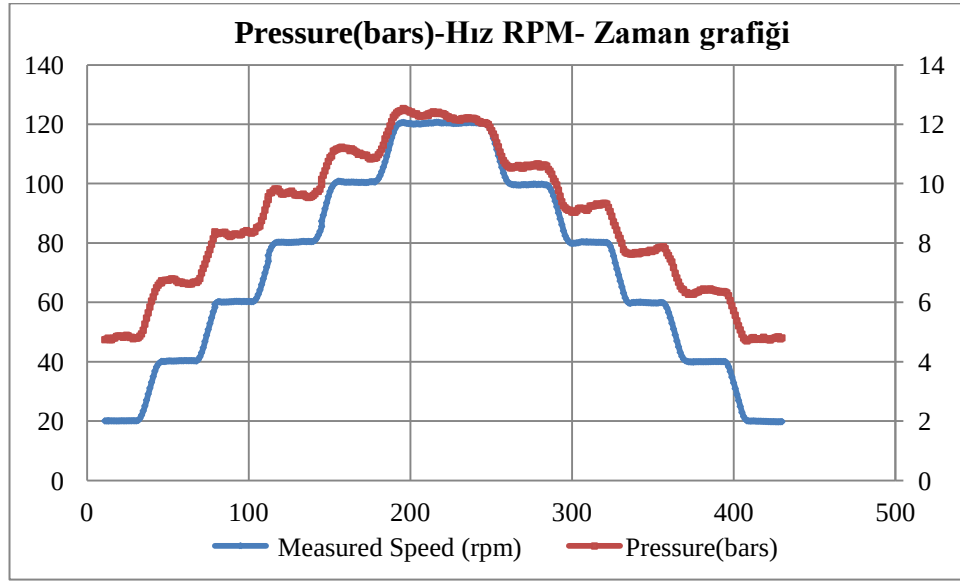
viskozite (dinamik; η), reolojik özellikler; kayma hızı (γ), kayma gerilmesi (τ) ve yoğunluğu (ρ) ASTM D7042-04 standart yöntemi kullanılarak ölçülmektedir. Kinematik viskozite (ν), dinamik viskozite (η) ve yoğunluk (ρ) ölçümünden, viskozite indeksi (VI) ise ASTM D2270 standart yöntemine uygun olarak hesaplanmaktadır.

“Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer” cihazında en düşük 20°C’ye kadar ölçüm yapılabilmektedir. Ara değerler R^2 değeri “1” olan; ρ , τ ve γ değerlerinin eğri denklemlerinden 0-20 °C değerlerinin belirlenmesi ve bunların dinamik ve kinematik viskozite ($\eta = \tau/\gamma$, $\nu = \eta/\rho$) ilişkilerinden faydalanılmasıyla hesaplanmıştır.



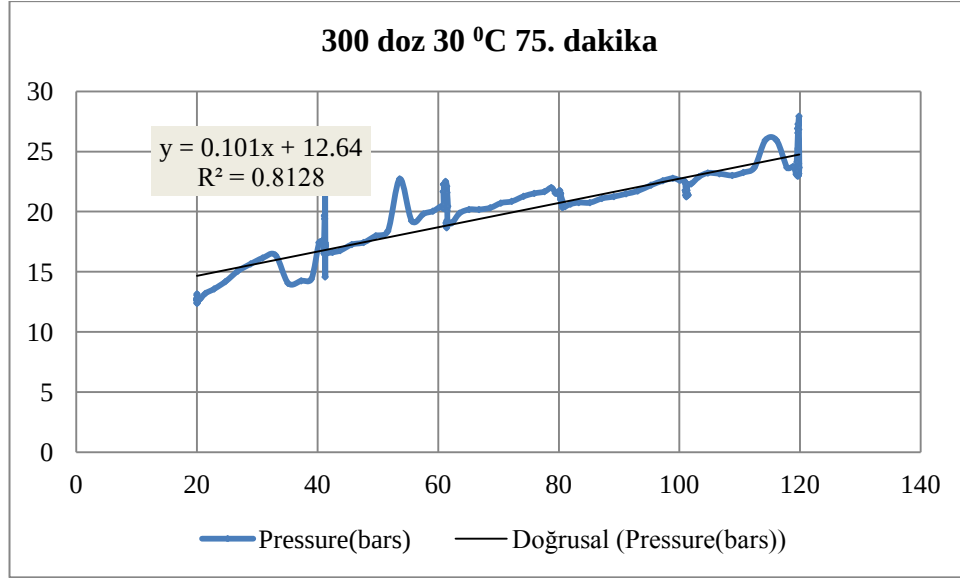
Şekil 3.15. Kalibrasyon sıvısı özgül ağırlığının sıcaklıkla değişimi (12500 cSt).

CTPT cihazında “Carter Variator” biriminden yağ basıncını, basınç dönüştürücüsü aracılığı ile “bar” olarak okumaktadır. Kalibrasyon iki nokta işlenebilirlik cihazından (CTPT) deney cihazında 12.500 cSt’luk viskozitesi belli sıvıyla yapılmıştır. Deney sırasında hız değeri 20 rpm’den başlatılmaktadır. Hız değeri her 30 sn’de 20 rpm’lik bir artışla 120 rpm’e kadar çıkarılır. 120 rpm hızda 60 sn beklendikten sonra tekrar 30 sn’lik adımlarla 20 rpm’e hız düşürülerek deney tamamlanır. 12.500 cSt’luk sıvı ile yapılan kalibrasyon deneyinin sonuçları göz önüne alınarak elde edilen grafikte (Grafik 1-2) bulunan g değerinin 200 katının bize sıvının viskozite değeri olan 12,5 Pa.s olduğu görülmüştür. kayma eşiği değerinin, h değerimizin 40 katı olduğu belirlendi.



Şekil 3.16. 12500 cSt'luk sıvı ile yapılan kalibrasyon sonuçları

Yapılacak beton reoloji deneyleri ilk başta 15., 45. ve 75. dk'da yapılması planlanmıştır ama yapılan ön deneylerde 75. dakikada CTPT deney aletinden alınan verilerin çok fazla pik değerler oluşturmasından dolayı viskozite ve kayma eşiği değerlerinin aşağıdaki grafikte de görüldüğü yanıltıcı olduğu görülmüştür ve deneylerden 75. dk kanın çıkarılıp 45. dakika'da sonlandırılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.17. 75. dk reoloji deneyi sonuçları

3.11. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar

a. Tartılar

Çalışmada kullanılan tartılar Şekil 3.18’de gösterilmiştir. 360 gr’a kadar olan ağırlıklarda Şekil 3.18.a ($\pm 0,001$ gr), 30 kg’a kadar ağırlıklarda Şekil 3.18.b ($\pm 0,1$ gr), 150 kg’ a kadar olan ağırlıklarda ise Şekil 3.18.c (± 5 gr) kullanılmıştır.



(a) Hassas



(b) Hassas

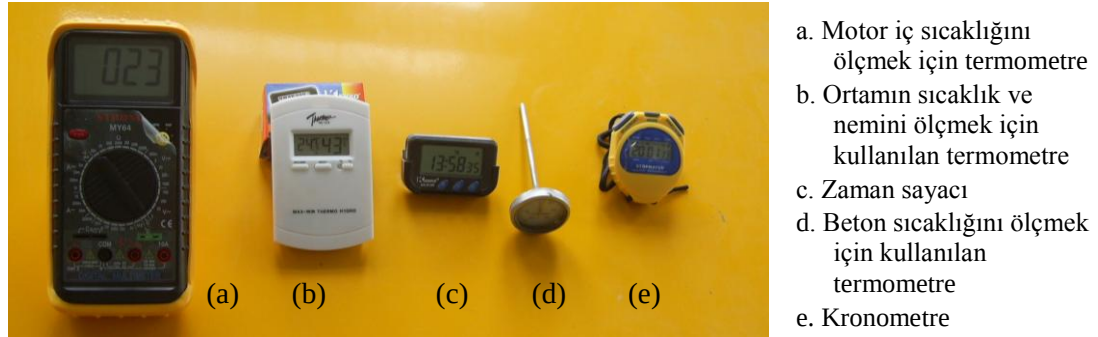


(c) Baskül

Şekil 3.18. Çalışmalarda kullanılan tartılar

b. Sıcaklık, nem ve zaman ölçüm cihazları

Çalışmada kullanılan ölçü aletleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve kalıplar

Bölüm 3’de belirtilen karışımlar üzerinde eş zamanlı taze beton deneyleri olarak; Çökme, K Çökme, J Ring ve CTPT cihazları ile 15. ve 45. dakikalarda ölçümler yapıldı. Böylece üretilen betonun zamanla işlenebilirliği ve taze özellikleri takip edilebildiği gibi, taze beton deneyleri ile CTPT arasındaki ilişki için farklı değerlerde üretildi.

3.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde SPSS programıyla lineer regresyon analizi yapılmıştır. Öncelikli olarak çökme, j ring, k çökme deney sonuçları ve karışımda bulunan malzemelerin (toplam bağlayıcı, su/bağlayıcı, mineral katkı/bağlayıcı, kimyasal katkı/bağlayıcı, kum/bağlayıcı, agrega/bağlayıcı, kum/toplam hacim, çakıl/toplam hacim oranları) hacim ve ağırlık oranları ayrı ayrı girdi olarak

kullanılmış ve CTPT çıktıları olan plastik viskozite ile kayma eşiğini belirleyen modeller kurulmasına çalışılmıştır.

Ayrıca farklı istatistiksel metotlara göre (Linear Regression, Simple Linear Regression, Pace Regression, M5Rules, Least MedSq vb) değerlendirme de yapılmıştır. Bu değerlendirmede, elde edilen ve hesaplara bulunan verilerin (hacim oranları vb.) % 80'i model eğitimi (model oluşturulması), % 20'si de model ile hesaplanan çıktılar ile gerçek çıktıların ilişkisini belirlemede kullanılmıştır. Model oluşturulması sırasında elde edilen en yüksek ilişki (regresyon katsayısı) veren istatistiksel modellerle tüm veriler için yeniden değerlendirme yapılmıştır. Kullanılan istatistiksel metotlar aşağıda özetlenmiştir.

Linear regression; lineer regresyon bir veya daha fazla bağımsız değişkenle, bağımlı bir değişken arasında ilişkiyi belirleyen matematiksel modeldir. Regresyon var olan (veya bilinen) değerlere göre gerekli değerlerin önceden tahmin edilmesinde kullanılır. Regresyon, lineer regresyon gibi standart istatistiksel tekniklerle kullanılır. Maalesef bir çok durumda açık lineer ilişkiler üretilemez. Bu durumda daha kompleks teknikler (lojistik regresyon, karar ağaçları veya neural network gibi) kullanılır.

Simple linear regression; Bu model lineer regresyon modelinin geliştirilmişidir. Bağımlı değişken (çıktı, tahmin edilen) ile bağımsız değişken arasında lineer olmayan dağınık ilişkinin bulunması durumunda basit linner model, basit lineer olmayan regresyon modeline dönüştürülmekte ve sonuçlar linner model metodolojine göre veri analizi yapılmaktadır.

Pace regression; Klasik en küçük kareler yönteminin yalın ve geliştirilmiş halidir. Küme analizini kullanarak, her değişkenin etkilediği parametreye göre regresyona katkısı olanlarla model oluşturur.

M5P Rules, tüm eğitim verilerine uygulanır, girdi ve çıktı arasında en yüksek ilgili veriler için kural oluşturur. Kural oluşturulan veriler gruptan çıkarılır ve kalanlar arasında tekrar kural oluşturulur. Tüm verileri kapsayan kurallar oluşturulduğunda işleme son verilir ve model oluşturulur. Kurduğu parçalı lineer modellerle, lineer

olmayan fonksiyonları da kapsar. Kurulan modelde öğrenme ve sonuçlandırma, regresyon modellerine göre daha küçük birimlerden oluştuğu için karar verme mekanizmaları bir çok değişkeni de kapsar (Şencan, 2006).

Least MedSq, en küçük kareler yönteminin geliştirilmiştir. En küçük kareler regresyon fonksiyonu, verilerin alt örneklemelerinde rasgele üretilir. En küçük medyan kareleriyle, en küçük kareler regresyonu hatayı, sonuç model daha da azaltır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Agregaların Granülometrik Özellikleri

Agregalar üzerinde yapılan elek analizlerinde ASTM Elek Serisi ve TS 706 EN 12620 (Nisan, 2003)'de belirtilen elek serisi kullanıldı.

Çizelge 4. 1. Karışım hesaplarının ASTM C-33 sınırları

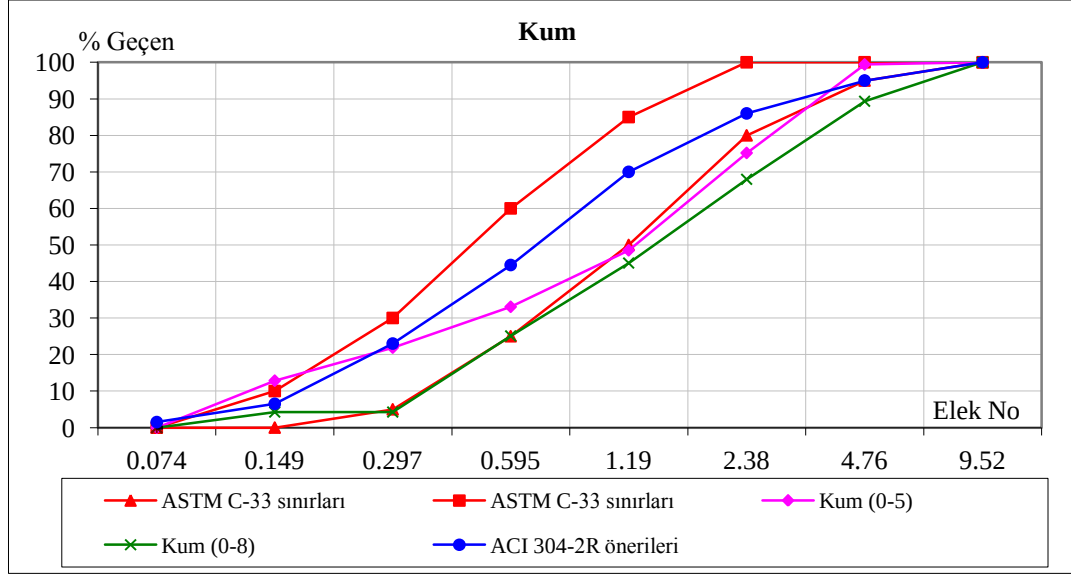
Elek Açıklığı	0,074	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	9,52
ASTM C-33 sınırları	0,00	0,00	5	25	50	80	95	100
ASTM C-33 sınırları	0,00	10	30	60	85	100	100	100
ACI 304-2R önerileri	2	7	23	45	70	86	95	100

Çizelge 4. 2. ASTM ve TS' e göre elek analizi

ASTM	Elekten Geçen Malzeme (%)'leri								
Elek açıklığı(mm)	25,4	19,1	9,52	4,76	2,38	1,19	0,59	0,27	0,14
Agrega türü									
Çakıl II	67,6	34,14	3,54	0,32	0	0	0	0	0
Çakıl I	100	98,38	37,1	4,65	0,2	0	0	0	0
Kum (0.5)	100	100	100	99,4	75,1	48,5	33,0	21,8	12,8
Kum (0.8)	100	100	100	89,3	67,9	45,0	25,0	4,25	4,25

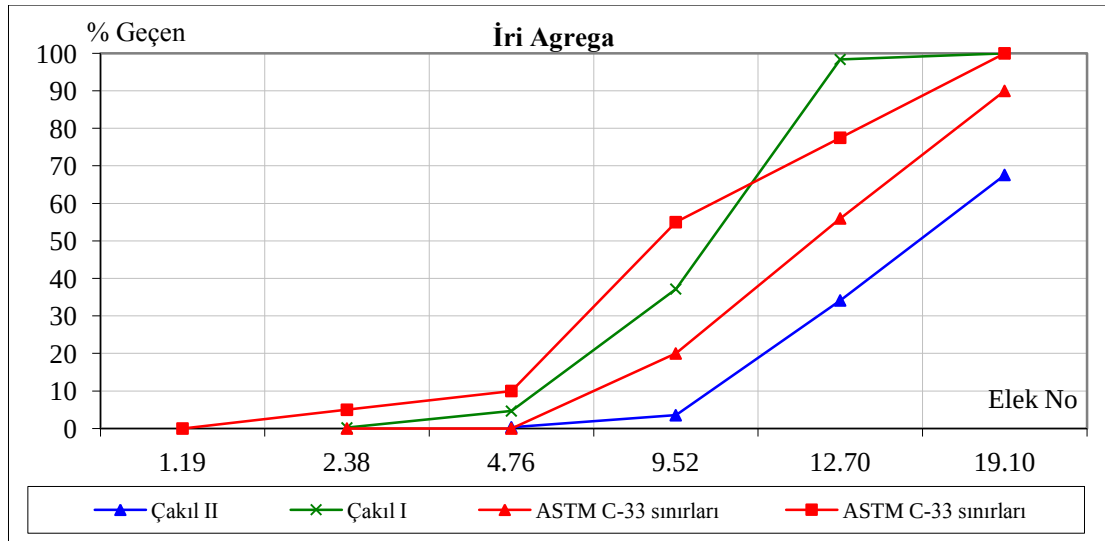
TS	Elekten Geçen Malzeme (%)'leri								
Elek açıklığı(mm)	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125
Agrega türü									
Çakıl II	100	17,67	0,23	0	0	0	0	0	0
Çakıl I	100	97,98	22,92	0,37	0,16	0	0	0	0
Kum (0.5)	100	100	100	99,28	69,53	43,60	30,75	20,72	11,03
Kum (0.8)	100	100	100	86,83	63,53	40,70	21,66	1,96	1,96

Deneysel çalışmalarda kullanmak üzere ince malzeme (0-5 Kum ve 0-8 Kum) için elek analizi yapıldı (Şekil 4.1). İncelenen malzeme Antalya Manavgat ilçesinde bulunan ocaktan sağlanan Kum 0-5 ve Kum 0-8'dir.



Şekil 4.1. Kumların granülometrilere

Deneysel çalışmalarda kullanmak üzere iri agrega (Çakıl I ve Çakıl II) için elek analizi yapıldı (Şekil 4.2). İncelenen iri agregalar Antalya Akseki beldesinde bulunan çakıl ocağından sağlanan Çakıl I ve Çakıl II dir.



Şekil 4.2. İri Agreganın Granülometri Analizi Değerleri

4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri bölüm 3.2’de belirtildiği gibi yapılmıştır. Elde edilen tane yoğunluğu ve su emme değeri Çizelge 4.3’te’de verilmiştir.

Çizelge 4. 3. İri ve ince agregaların tane yoğunlukları ve su emme oranları

	Tane Yoğunluğu (kg/m ³)		Su Emme Oranı (%)
	Etüv Kur.	YKSD	Kütle oranı
Ç I	2,66	2,68	0,60
Ç II	2,66	2,68	0,50
Kum 0-8	2,32	2,42	1,25
Kum 0-5	2,20	2,37	1,27

Agregalar üzerinde, diğer fiziksel özelliklerden: özgül ağırlık ve sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri deneyleri gerçekleştirilmiştir ve deney sonuçları Çizelge 4.4 ve 4.5’te verilmiştir.

İri ve ince agreganın sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri (yığın yoğunlukları) (kg/m³)

Çizelge 4. 4. İri ve ince agregaların sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri (yığın yoğunlukları) (kg/m³)

	Kum(0-5)	Kum(0-8)	Ç I	Ç II
Gevşek(kg/m ³)	1481	1437	1656	1658
Sıkışık(kg/m ³)	1800	1769	1756	1768

Çizelge 4. 5. İri ve ince agreganın özgül ağırlıkları (kg/m³)

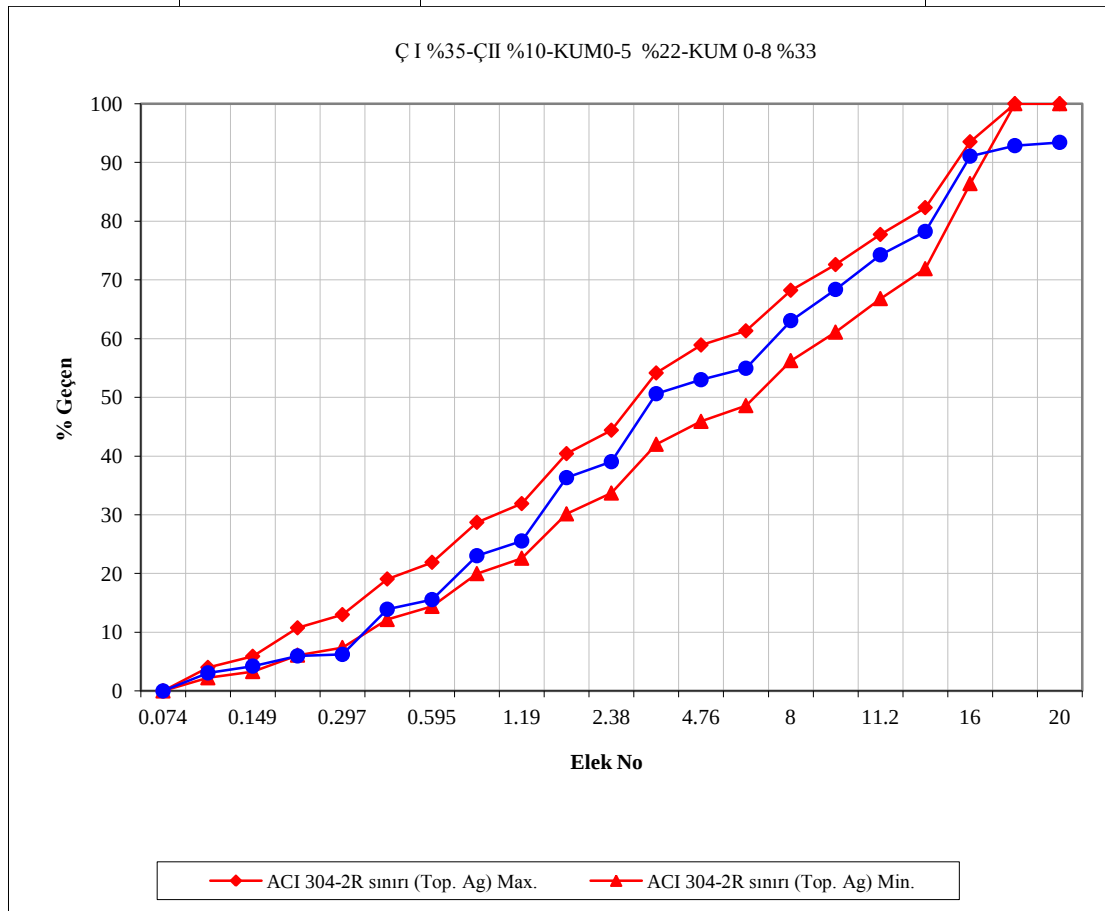
	Kum(0-5)	Kum(0-8)	Ç I	Ç II
Özgül ağırlıkları(kg/m ³)	2520	2612	2655	2667

4.3. Karışım Agregalarının Oranları ve Granülometrileri

İri ve ince agreganın granülometrilere göre hesaplanan agregalar karışım oranları mutlak hacimce % olarak Çizelge 4.6'de, bu yüzdelere göre karışım agreganın granülometrik bileşimi ise Şekil 4.3'de görülmektedir.

Çizelge 4. 6. Agregalar karışım oranları (%)

Agrega Türü	Agrega karışım oranları (%)
Çakıl I	35
Çakıl II	10
Kum 0-5	22
Kum 0-8	33



Şekil 4. 3. Seri için karışım agregası granülometrisi ve sınır değerleri

4.4. Kimyasal Katkı

Deneyleerde kullanılacak Sika ViscoCrete PC 10 kimyasal katkıının özellikleri Çizelge 4.7’ de verilmiştir.

Çizelge 4. 7. Kullanılan kimyasal katkıının özellikleri

Fiziksel Özellikler ve Depolama Şartları	
Görünüm / Renk	Açık kahverengi sıvı
Ambalaj	200 kg varil
Depolama Koşulları / Raf Ömrü	5 °C ile 35°C arasında / 12 ay
Teknik Bilgi	
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.09±0,02 kg/l, 20°C’de
pH Değeri	3 – 7
Suda Çözünebilir Klorür Yüzdesi	Maksimum %0,1, klorür içermez (TS EN 934-2)
Prize Etkisi	Geciktirici değildir
Aşırı Dozlama	Terleme meydana gelebilir
Uygulama Detayları	
Sarfiyat / Dozaj	Plastik ve akıcı kıvamlı betonlar için kullanılan bağlayıcının ağırlıkça % 0,4 - 1,0’i (100 kg bağlayıcı için 400–1000 g) oranında.
	Kendiliğinden Yerleşen Beton için kullanılan bağlayıcının ağırlıkça % 1,0–2,0’si (100 kg bağlayıcı için 1000–2000 g) oranında.

4.5. Çimento

Deneylerde kullanılan çimentonun özellikleri Çizelge 4.8 ve 4.9’da görülmektedir.

Çizelge 4. 8. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEMI 42.5 R) özellikleri

Blaine (cm ² /g)	Özgül Ağ. (g/cm ³)		Priz Baş. (Dak.)		Priz Son. (Saat)		Genleşme (mm)		Mukavemet Değerleri (MPa)	
									B2	B28
3460	3,17		140		03:10		0		26,6	53,6
SO ₃ (%)	K.K (%)	Ç.K (%)	Cl ⁻ (%)		C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A	C ₄ Af Alkali A.E
3,02	2,61	0,67	0,008		61,25		8,92		6,27	9,72 0,68

Çizelge 4.9. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R) özellikleri

Blaine (cm ² /g)		Özgül Ağ. (g/cm ³)	Priz Baş. (Dak.)	Genleşme (mm)
4130		3,09	130	1
Mukavemet Değerleri (MPa)		SO ₃ (%)	Top.Kat. (%)	Cl (%)
B2	B28			
27,6	51,1	2,81	15,98	0,013

4.6. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi

Kimyasal katkı-çimento uyumunun belirlenmesi için yapılan deney sonuçları Çizelge 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Kimyasal katkı – çimento uyumunun belirlenmesi deneyi sonuçları

Katkı kodu	Katkısız çimento hamurunun 25 düşüşte yayılma çapı, (cm)
S1	19
S2	16
S3	17
S4	12
S5	14
S6	11

Katkıların içinde en iyi yayılmayı veren süperakışkanlaştırıcı S1 katkı uygun değer vermiştir. Bu katkı kullanılarak; Karışım agregası, S/Ç oranı 300 kg/m³ çimento içeren karışım için 0,45, 400 kg/m³ çimento içeren karışımda ise 0,35 olarak belirlenmiştir. Kullanılacak süper akışkanlaştırıcı miktarı olarakta toplam bağlayıcı oranın %1,5 olarak seçilmesi yapılan ön deneyler sonucunda karar verilmiştir.

4.7. Silis Dumanı

Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.11’de verildi. Silis dumanının görünen tane yoğunluğu 2,10 Mg/m³tür. İnceliği; 90 µ altı % 16,4, 200 µ altı % 39,2’ir.

Çizelge 4.11. Silis dumanının (FeSi) 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	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
77,06	0,84	1,28	79,17	0,73	5,70	0,21	5,16	1,19	3,21	0,03
Rut %= 1,11				Kızdırma kaybı			Tayin edilemeyen			
Alkali Top= 6,35				0,74			1,46			

4.8. Uçucu Küller

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve görünür tane yoğunlukları Çizelge 4.12.'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve görünen tane yoğunlukları

Oksit (%)	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618		Orhaneli	Seyitömer	Tunçbilek	Çayırhan	Değerlendirme
		V	W		F	C					
SiO ₂							48,53	54,38	57,98	50,18	
Al ₂ O ₃							24,61	20,6	19,87	13,30	
Fe ₂ O ₃							7,59	11,16	10,14	8,77	
S+A+F				> 70,00	> 70,00	> 50,00	80,73	86,14	87,99	72,26	TS 639 ve ASTM C 618' e uygun
CaO							9,48	2,92	2,26	12,84	
MgO				< 5,00			2,28	4,13	4,76	5,37	Çayırhan hariç diğerleri TS 639' a uygun
SO ₃	< 3,00			< 5,00	< 5,00	< 5,00	2,48	0,59	0,41	3,34	TS 639 ve ASTM C 618' e uygun, Çayırhan hariç diğerleri TS EN 450'ye uygun
K ₂ O							2,51	3,15	1,78	2,16	
Na ₂ O							0,35	0,79	0,32	2,99	
KK	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 10,00	< 6,00	< 6,00	1,69	3,01	2,115	0,86	Tüm Standartlara Uygun
Cl-	< 0,10						0,005	0,006	0,002	0,014	TS EN 450'ye uygun
Serb. CaO	< 1,00						0,11	0,26	0,16	0,56	TS EN 450'ye uygun
Reak. SiO ₂	> 25,00	> 25,00	> 25,00				34,06	39,01	40,06	40,89	TS EN 450'ye ve TS EN 197-1'e uygun
Reak. CaO		< 10,00	> 10,00				0,65	2,49	1,03	8,78	TS EN 197-1'e göre Küllerin hepsi V Sınıfı
Cr ₂ O ₃								0,06	0,11	0,03	
TiO ₂								0,89	1	0,72	
Rut %								0,35	0,18	0,20	
Alkali Top								3,93	2,10	5,14	
Görünen tane yoğunluğu (Mg/m ³)							2,18	2,13	2,25	2,36	

4.9. Üretilen Betonların Taze Beton Deney Sonuçları

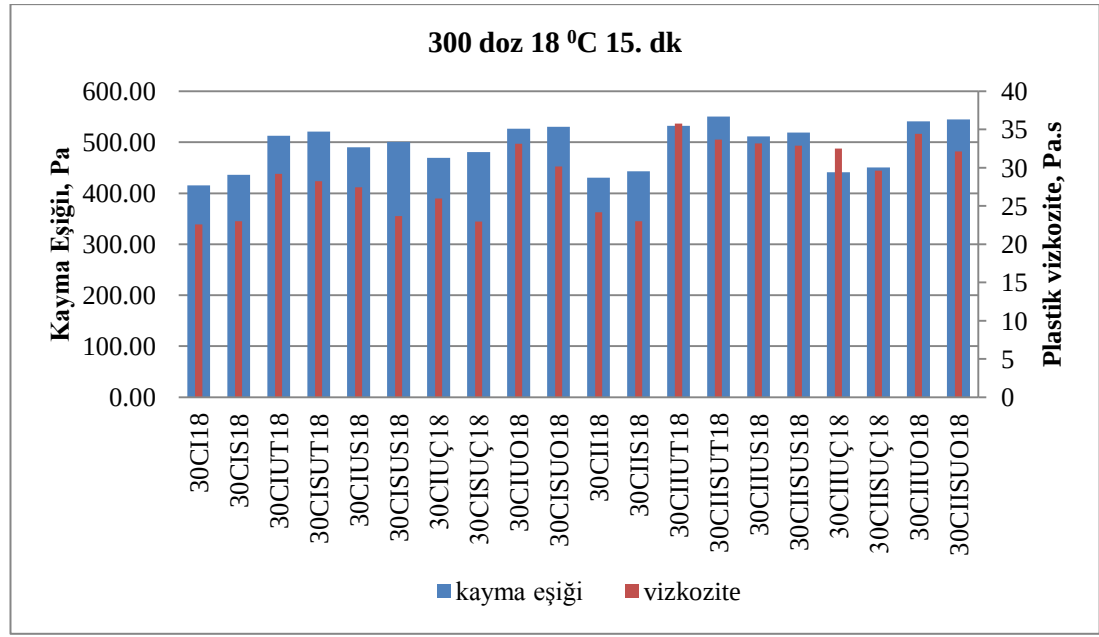
Taze beton deneyleri çökme, yayılma, j ring h₀, h₁, h₂ ve j ring yayılması ile k çökme deney sonuçlarından elde edilen k ve w değerlerinin tamamında ölçülen sonuçlar 15. dakika ölçümlerine göre 45. dakikada azalmaktadır. CTPT deneyinden elde edilen Plastik Viskozite ve Kayma Eşiği değerlerinde ise farklılıklar gözlenmektedir.

4.9.1. İki Nokta İşlenebilirlik Deney Sonuçları

İki nokta işlenebilirlik deneyinden elde edilen verilerin zamanla değişimi Şekil 4.4 - 4.27’de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek plastik viskozite değeri 30CIIUO18 karışımının 45. dk.’sında (45.22 Pa.s), en düşük plastik viskozite değeri ise, 30CI30 karışımının 15 dk.’sında (17,46 Pa.s), kayma eşiği ise en yüksek, 40CIISUO30 karışımının 45.dk.’sında (798.88 Pa), en düşük kayma eşiği değeri ise 30CII18 karışımının 15. dk.’sında (406.92 Pa) elde edilmiştir. CTPT’den elde edilen diğer reolojik veriler aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

30CI18-30CII18 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.4.) kayma eşiği değerlerinde; silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 30CI’li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO18 numunesindedir. 30CISUO18 numunesi CI’li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%27,6) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI18 şahit numunesindedir. 30CII’li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIISUO18 numunesindedir. 30CISUO18 numunesi CII’li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%66,7) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII18 şahit numunesindedir.

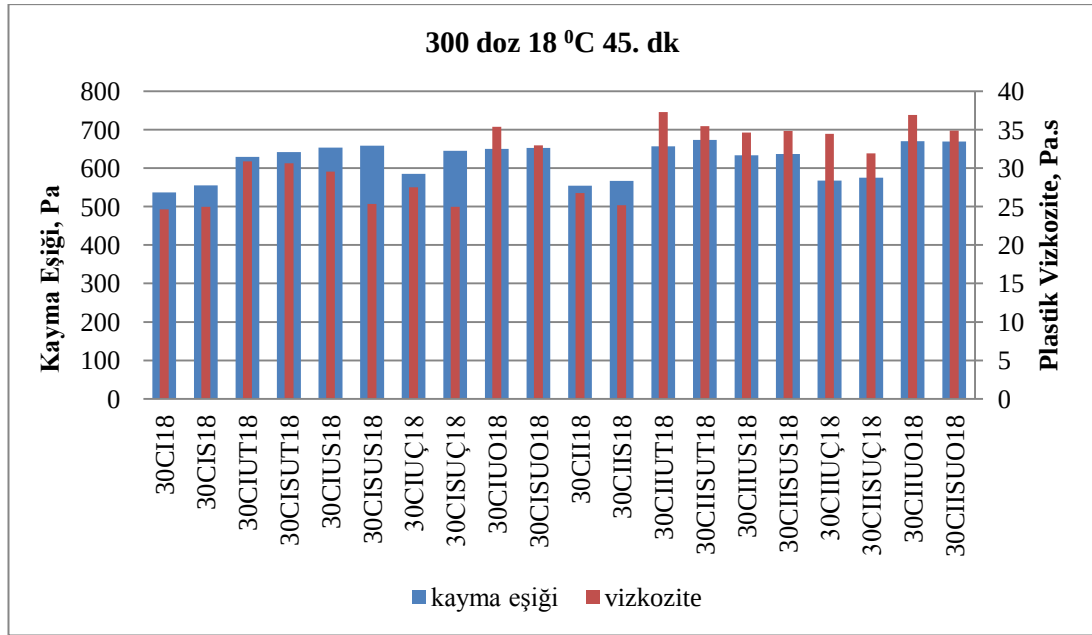
30CI18-30CII18 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.4) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CIS18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO18 olup şahit numunesine göre (%33,0)’lık bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIIUO18’dir şahit numunesine göre (%42,4)’lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CIIS18 numunesindedir.



Şekil 4.4. 30CI18-30CII18 serisi betonların 15.dk CTPT deney sonuçları

30CI18-30CII18 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.5.) kayma eşiği değerlerinde 30CIISUO18 numunesi hariç, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUS18 numunesindedir. 30CISUS18 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%22,7) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI18 şahit numunesindedir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIISUT18 numunesindedir. 30CISUS18 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%21,6) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII18 şahit numunesindedir.

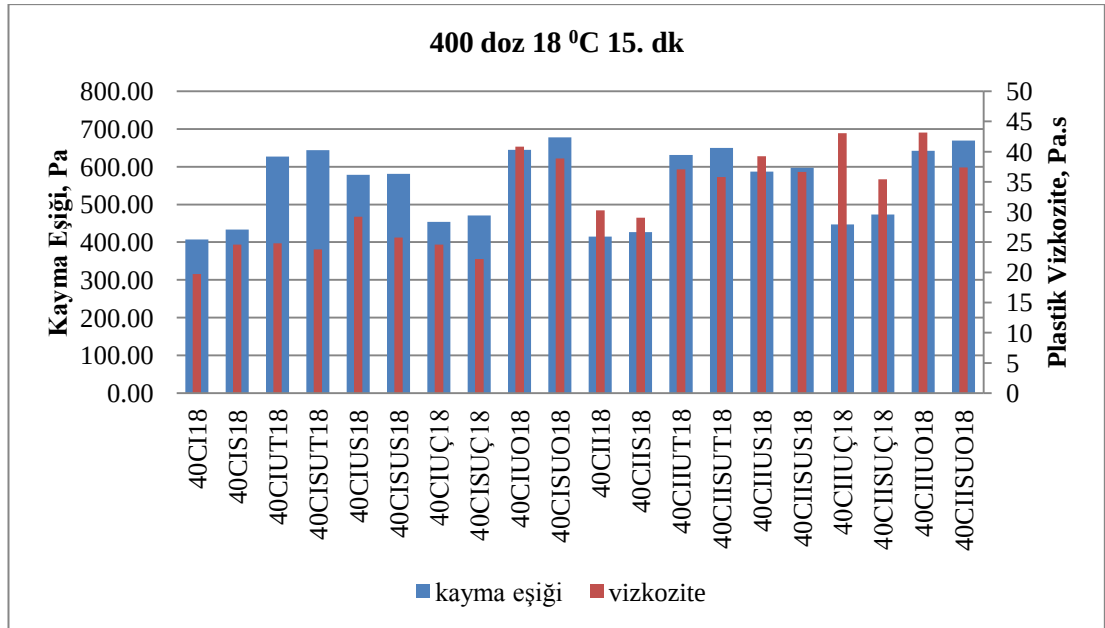
30CI18-30CII18 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.5.) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI18 ve 30CIIUS18 numuneleri hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO18 olup şahit numunesine göre (%43,2)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIIUT18'dir şahit numunesine göre (%39,3)'lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CIIUS18 numunesindedir.



Şekil 4.5. 300 doz 18°C 45. dk betonların CTPT deney sonuçları

40CI18-40CII18 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.6.) kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO18 numunesindedir. 40CISUO18 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%66,7) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI18 şahit numunesindedir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIISUO18 numunesindedir. 40CISUO18 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%61,3) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII18 şahit numunesindedir.

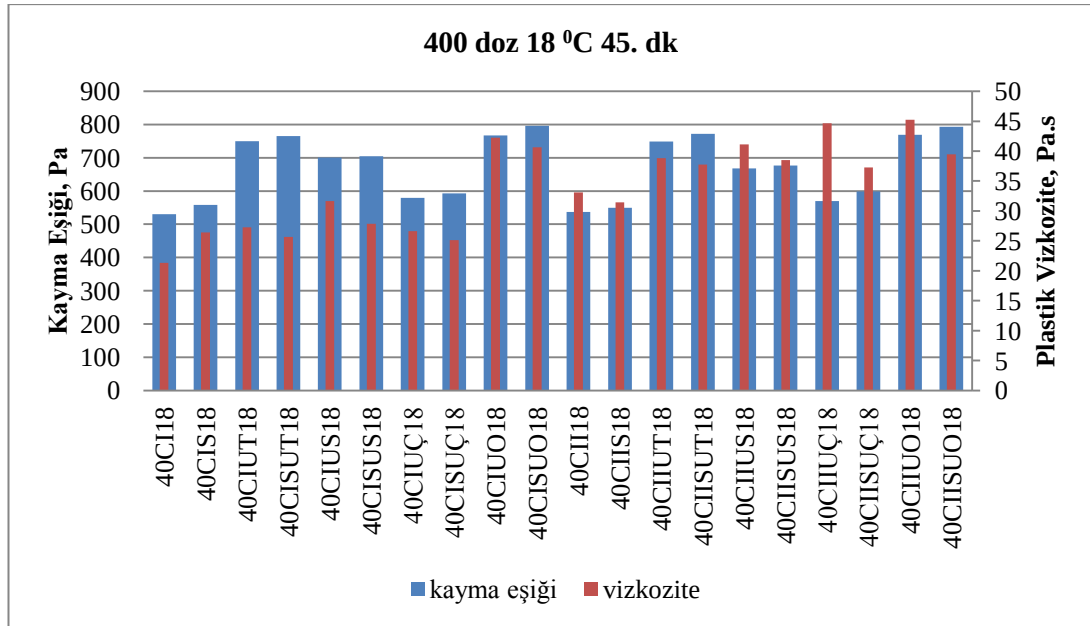
40CI18-40CII18 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.6.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO18 olup şahit numunesine göre (%107,3)'lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIIUO18'dir şahit numunesine göre (%42,6)'lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CIIS18 numunesindedir.



Şekil 4.6. 400 doz 18⁰C 15.dk betonların CTPT deney sonuçları

40CI18-40CII18 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.7.) kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO18 numunesindedir. 40CISUO18 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%49,9) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI18 şahit numunededir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIIISUO18 numunesindedir. 40CISUO18 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%47,5) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII18 şahit numunededir.

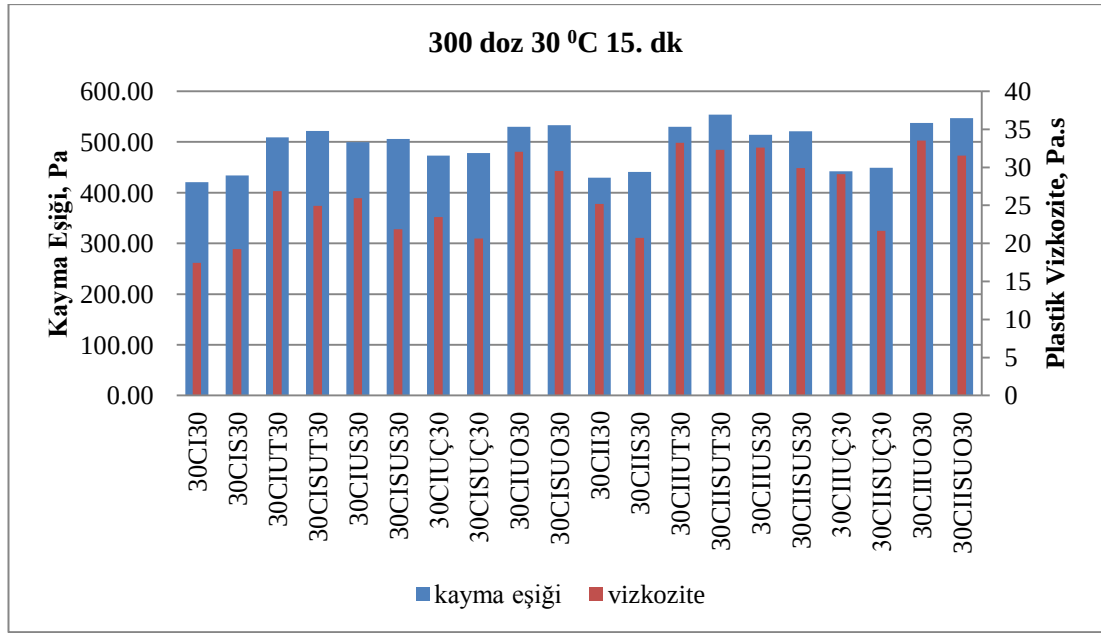
40CI18-40CII18 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.7.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO18 olup şahit numunesine göre (%104,8)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIIUO18'dir şahit numunesine göre (%36,5)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CIIIS18 numunesindedir.



Şekil 4.7. 400 doz 18⁰C 45.dk betonların CTPT deney sonuçları

30CI30-30CII30 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.8) kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO30 numunesindedir. 30CISUO30 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%26,6) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI30 şahit numunededir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIIISUO30 numunesindedir. 30CISUO30 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%27,4) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII30 şahit numunededir.

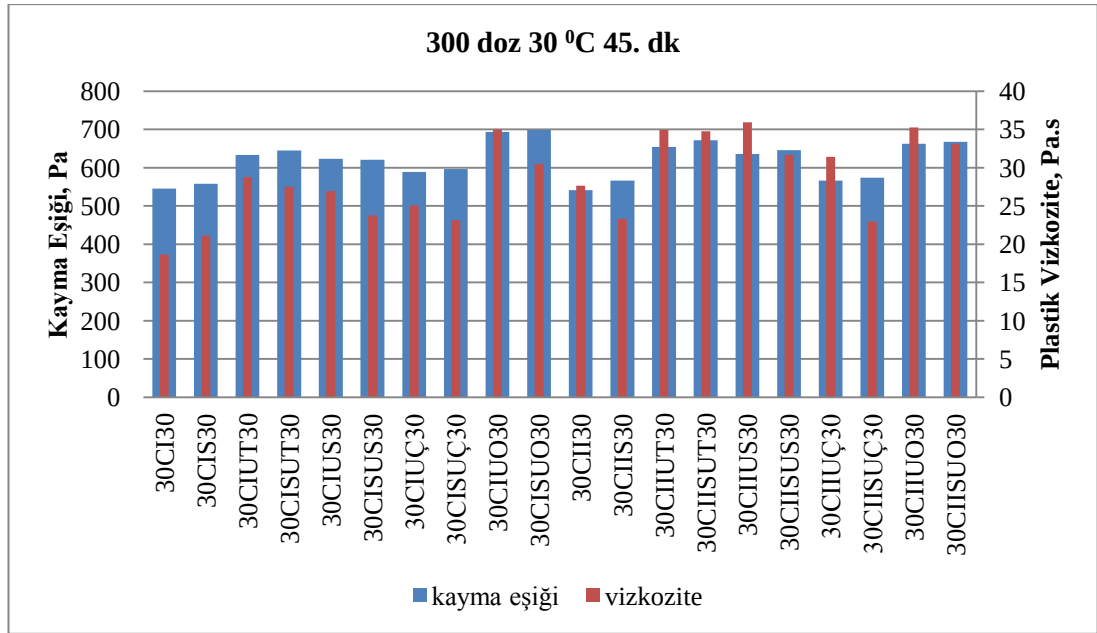
30CI30-30CII30 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.8) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO30 olup şahit numunesine göre (%83,5)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CI30 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIIUO30'dir şahit numunesine göre (%33,1)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CIIIS30 numunesindedir.



Şekil 4.8.. 300 doz 30⁰C 15. dk betonların CTPT deney sonuçları

30CI30-30CII30 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.9) kayma eşiği değerlerinde, 30CISUS30 numunesi hariç, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO30 numunesindedir. 30CISUO30 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%28,0) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI30 şahit numunededir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIIUO30 numunesindedir. 30CISUO30 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%23,5) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII30 şahit numunededir.

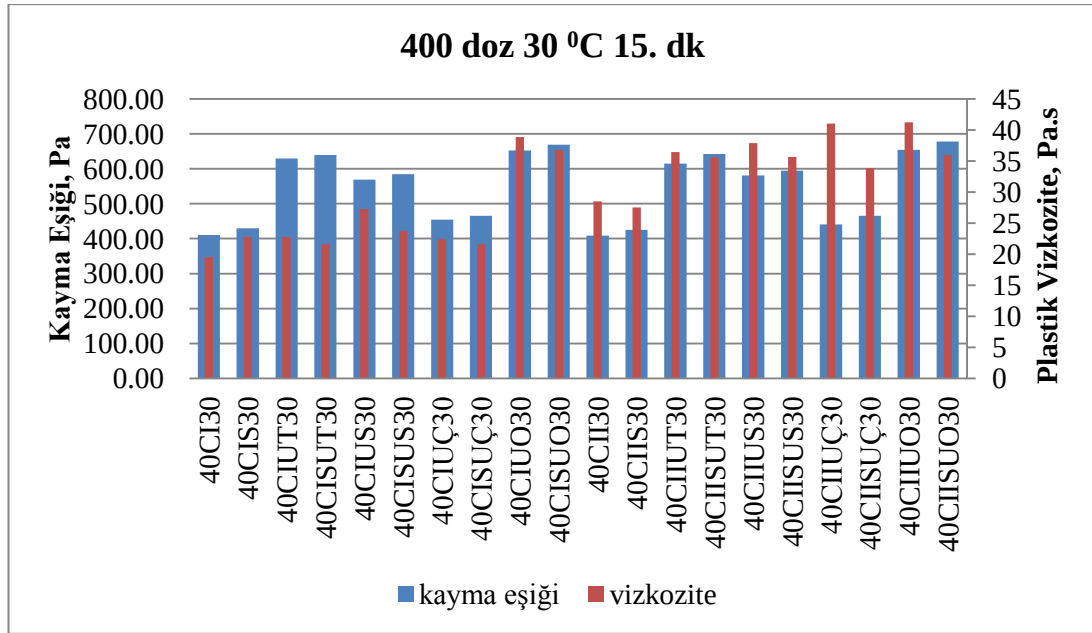
30CI30-30CII30 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.9) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO30 olup şahit numunesine göre (%87,7)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CI30 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIIUO30'dir şahit numunesine göre (%27,4)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 30CII30 numunesindedir.



Şekil 4.9. 300 doz 30⁰C 45.dk betonların CTPT deney sonuçları

40CI30-40CII30 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.10.) kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO30 numunesindedir. 40CISUO30 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%63,1) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI30 şahit numunededir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIIISUO30 numunesindedir. 40CISUO30 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%65,9) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII30 şahit numunededir.

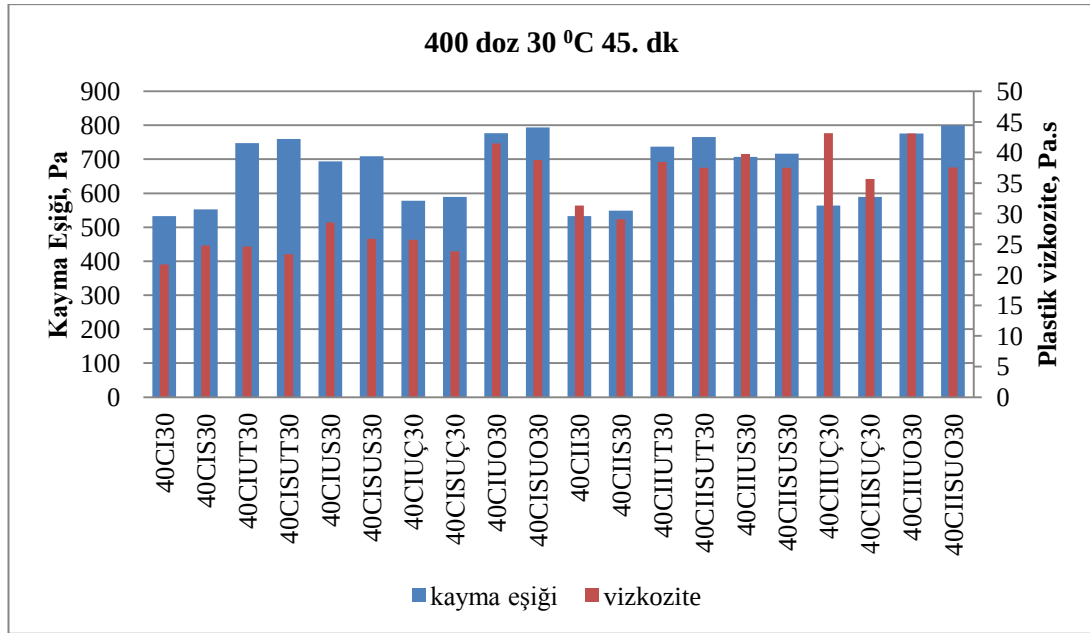
40CI30-40CII30 beton serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.10.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO30 olup şahit numunesine göre (%99,1)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CI30 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIIUO30'dir şahit numunesine göre (%44,8)'lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CIIIS30 numunesindedir.



Şekil 4.10. 400 doz 30⁰C 15.dk betonların CTPT deney sonuçları

40CI30-40CII30 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.11.) kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı beton numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO30 numunesindedir. 40CISUO30 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%48,9) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI30 şahit numunededir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIIUO30 numunesindedir. 40CISUO30 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%49,8) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII30 şahit numunededir.

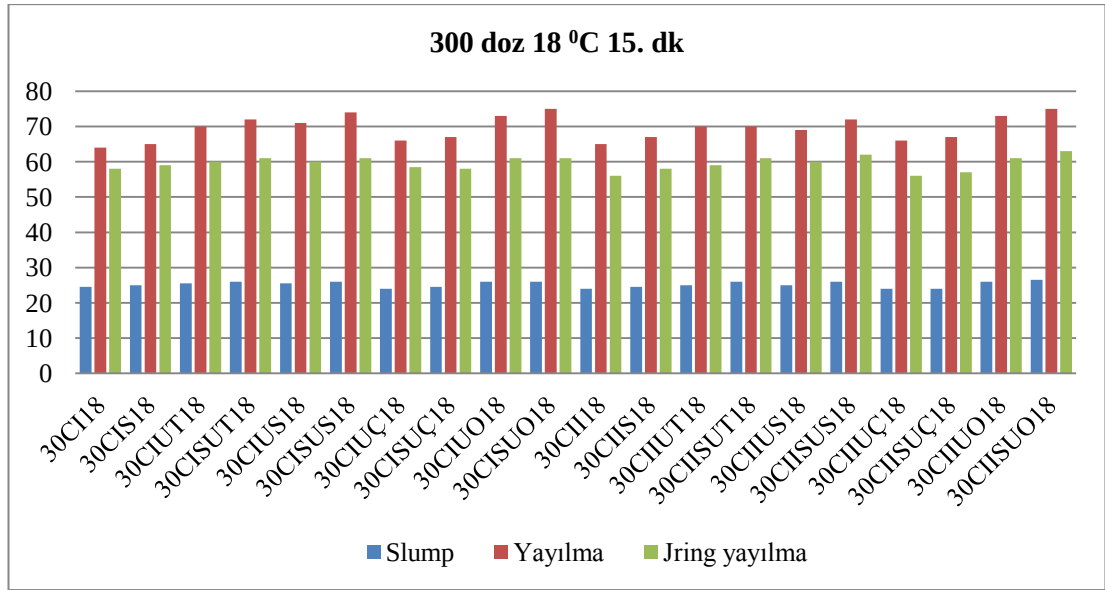
40CI30-40CII30 beton serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.11.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO30 olup şahit numunesine göre (%91,2)'lik bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CI30 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIIUO30'dir şahit numunesine göre (%37,6)'lük bir artış göstermiştir. En düşük viskozite değeri 40CIIS30 numunesindedir.



Şekil 4.11. 400 doz 30⁰C 45.dk serisi betonların CTPT deney sonuçları

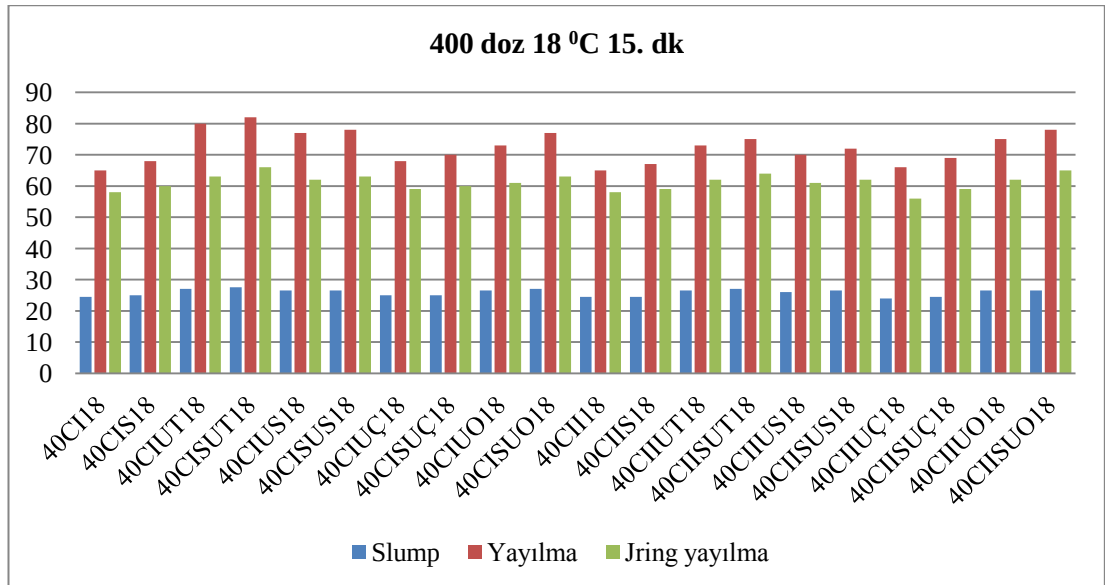
4.9.2. Çökme deneyi sonuçları

300 dozlu betonların 18 °C'de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 265mm ile 30CIHSUO18 karışımından, yayılma çapı 750mm ile 30CISUO18 ve 30CIHSUO18 karışımlarından, j ring yayılması ise 630mm ile 30CIHSUO18 karışımından, en düşük; çökme(slump) 240mm ile 30CIUÇ18, 30CII18, 30CIHUÇ18 ve 30CIHSUÇ18 karışımından, yayılma çapı 640mm ile 30CI18 betonundan, j ring yayılması ise 560mm ile 30CII18 ve 30CIHUÇ18 karışımlarından elde edilmiştir.



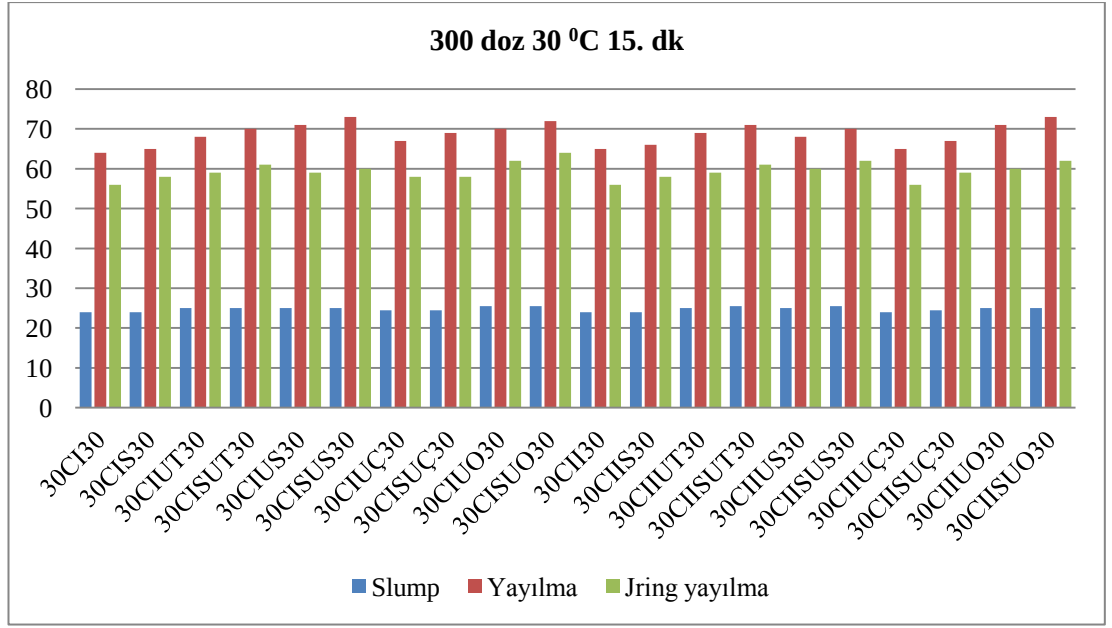
Şekil 4. 12. 300 doz 18⁰C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları

400 dozlu betonların 18 °C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 275mm ile 40CISUT18 karışımından, yayılma çapı 820mm ile 40CISUT18 karışımından, j ring yayılması ise 660mm ile 40CISUT18 karışımından, en düşük; çökme(slump) 240mm ile 40CIH18 karışımından, yayılma çapı 650mm ile 40CIH18 karışımından, j ring yayılması ise 560mm ile 40CIH18 karışımından elde edilmiştir.



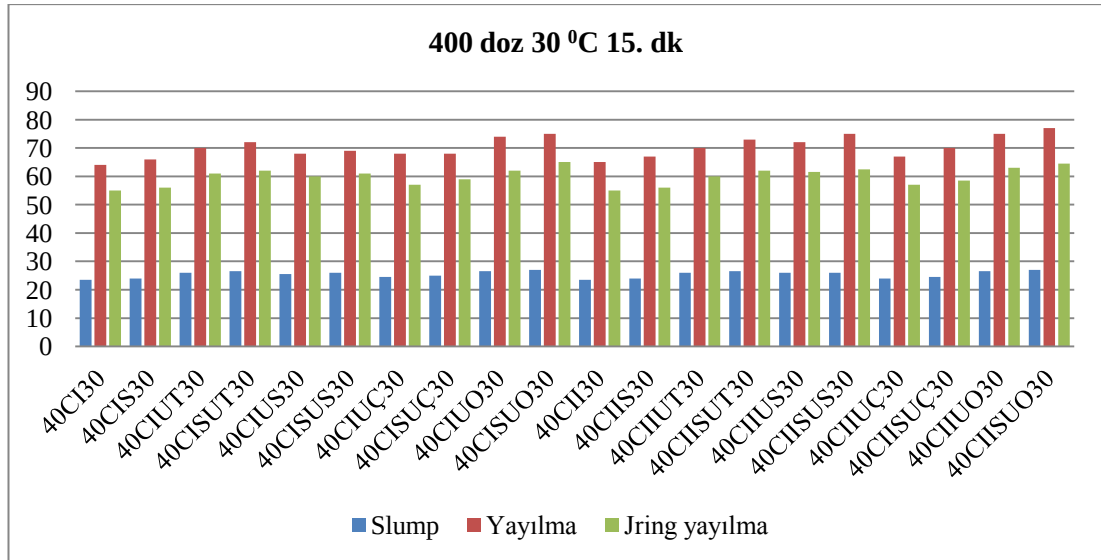
Şekil 4. 13. 400 doz 18⁰C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları

300 dozlu betonların 30 °C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 255mm ile 30CIUO30, 30CISUO30, 30CIISUT30 ve 30CIISUS30 karışımlarından, yayılma çapı 730mm ile 30CISUS30 ve 30CIISUO30 karışımlarından, j ring yayılması ise 640mm ile 30CISUO30 karışımlarından, en düşük; çökme(slump) 240mm ile 30CI30, 30CIS30, 30CII30, 30CIIS30, 30CIIUÇ30 karışımlarından, yayılma çapı 640mm ile 30CI30 karışımından, j ring yayılması ise 560mm ile 30CI30, 30CII30 ve 30CIIUÇ30 karışımlarından elde edilmiştir.



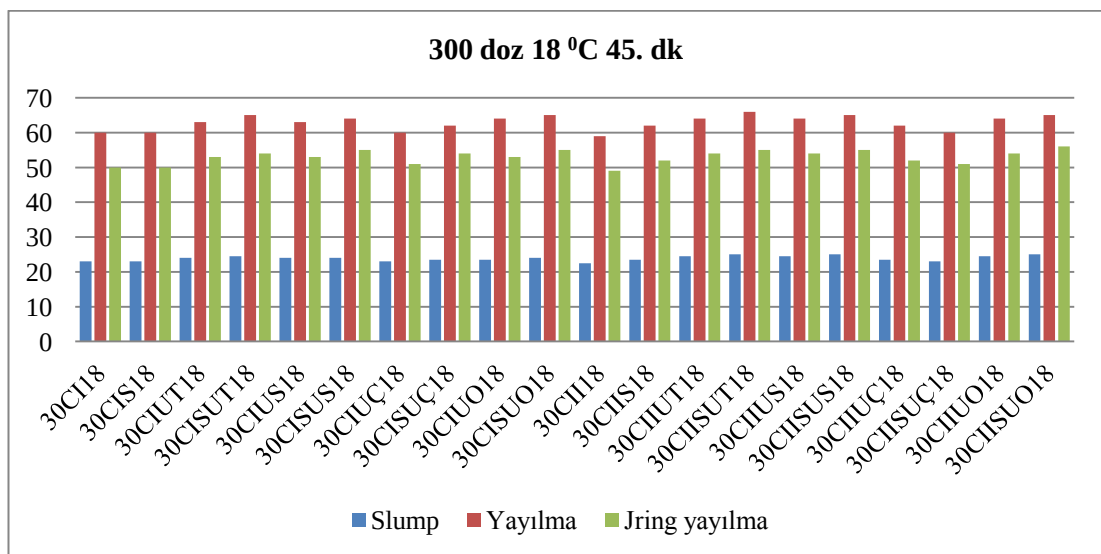
Şekil 4. 14. 300 doz 30°C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları

400 dozlu betonların 30 °C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 270mm ile 40CISUO30 ve 40CIISUO30 karışımlarından, yayılma çapı 770mm ile 40CIISUO30 karışımından, j ring yayılması ise 650mm ile 40CISUO30 karışımından, en düşük; çökme(slump) 235mm ile 40CI30 ve 40CII30 karışımlarından yayılma çapı 640mm ile 40CI30 karışımından, j ring yayılması ise 550mm ile 40CI30 ve 40CII30 karışımlarından elde edilmiştir.



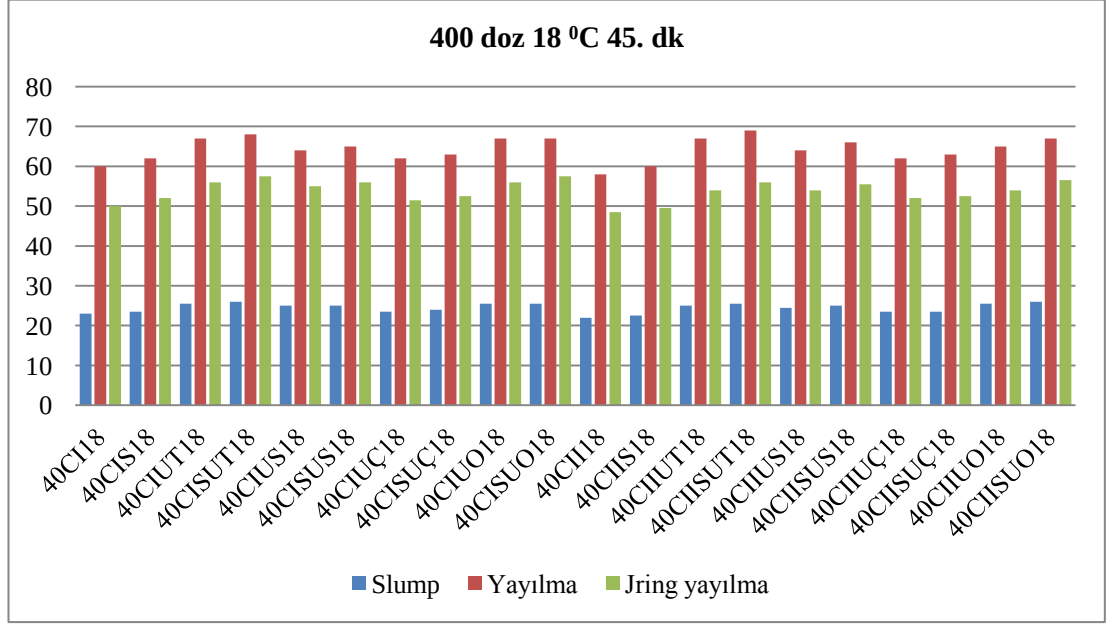
Şekil 4. 15. 400 doz 30°C serisi betonun 15. dk. Çökme deney sonuçları

300 dozlu betonların 18 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 250mm ile 30CIISUT18, 30CIISUS18, ve 30CIISUO18 karışımlarından, yayılma çapı 660mm ile 30CIISUT18 karışımlarından, j ring yayılması ise 560mm ile 30CIISUO18 karışımlarından, en düşük; çökme(slump) 225mm ile 30CII18 karışımından, yayılma çapı 590mm ile 30CII18 karışımından, j ring yayılması ise 490mm ile 30CII18 karışımından elde edilmiştir.



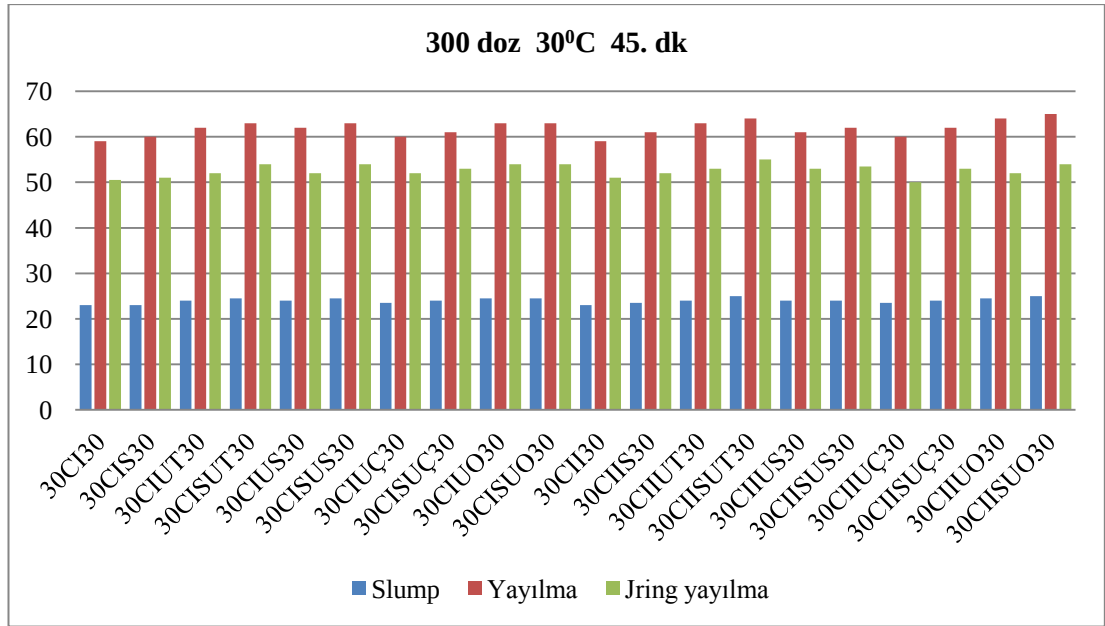
Şekil 4. 16. 300 doz 18°C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları

400 dozlu betonların 18 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 260mm ile 40CIISUO18 karışımından, yayılma çapı 690mm ile 40CIISUT18 karışımından, j ring yayılması ise 575mm ile 40CISUT18 ve 40CISUO18 karışımlarından, en düşük; çökme(slump) 220mm ile, yayılma çapı 580mm ile, j ring yayılması ise 485mm ile 40CII18 karışımından elde edilmiştir.



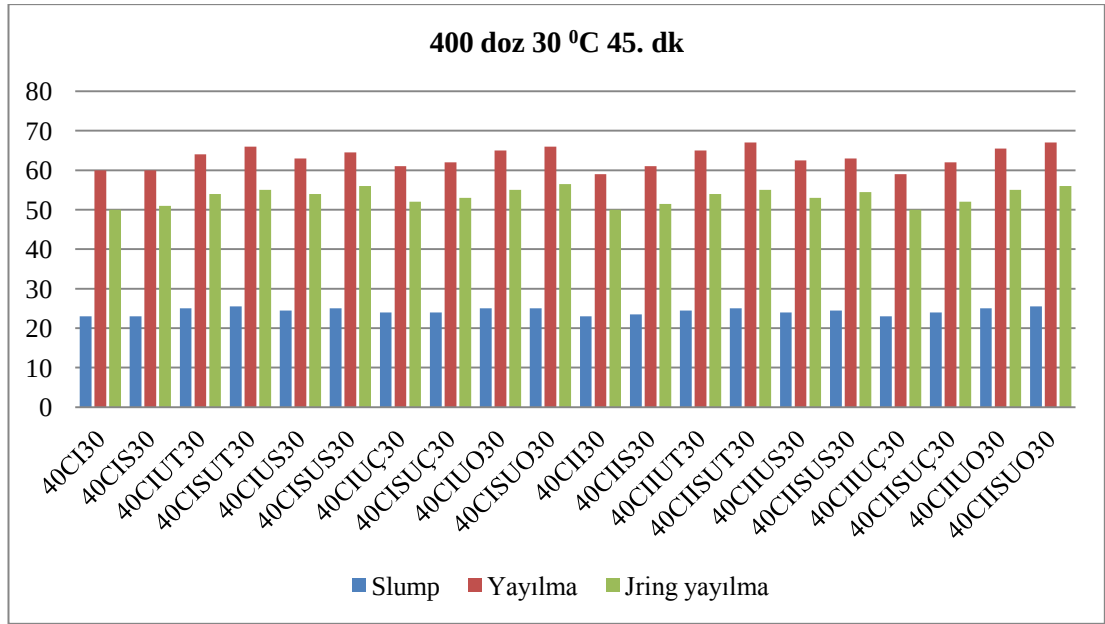
Şekil 4.17. 400 doz 18°C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları

300 dozlu betonların 30 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 250mm ile 30CIISUT30 ve 30CIISUO30 karışımlarından, yayılma çapı 650mm ile 30CIISUO30 karışımlarından, j ring yayılması ise 550mm ile 30CIISUT30 karışımından, en düşük; çökme(slump) 230mm ile 30CI30, 30CIS30 ve 30CII30 karışımlarından, yayılma çapı 590mm ile 30CI30 ve 30CII30 karışımlarından, j ring yayılması ise 500mm ile 30CIUÇ30 karışımından elde edilmiştir.



Şekil 4.18. 300 doz 30°C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları

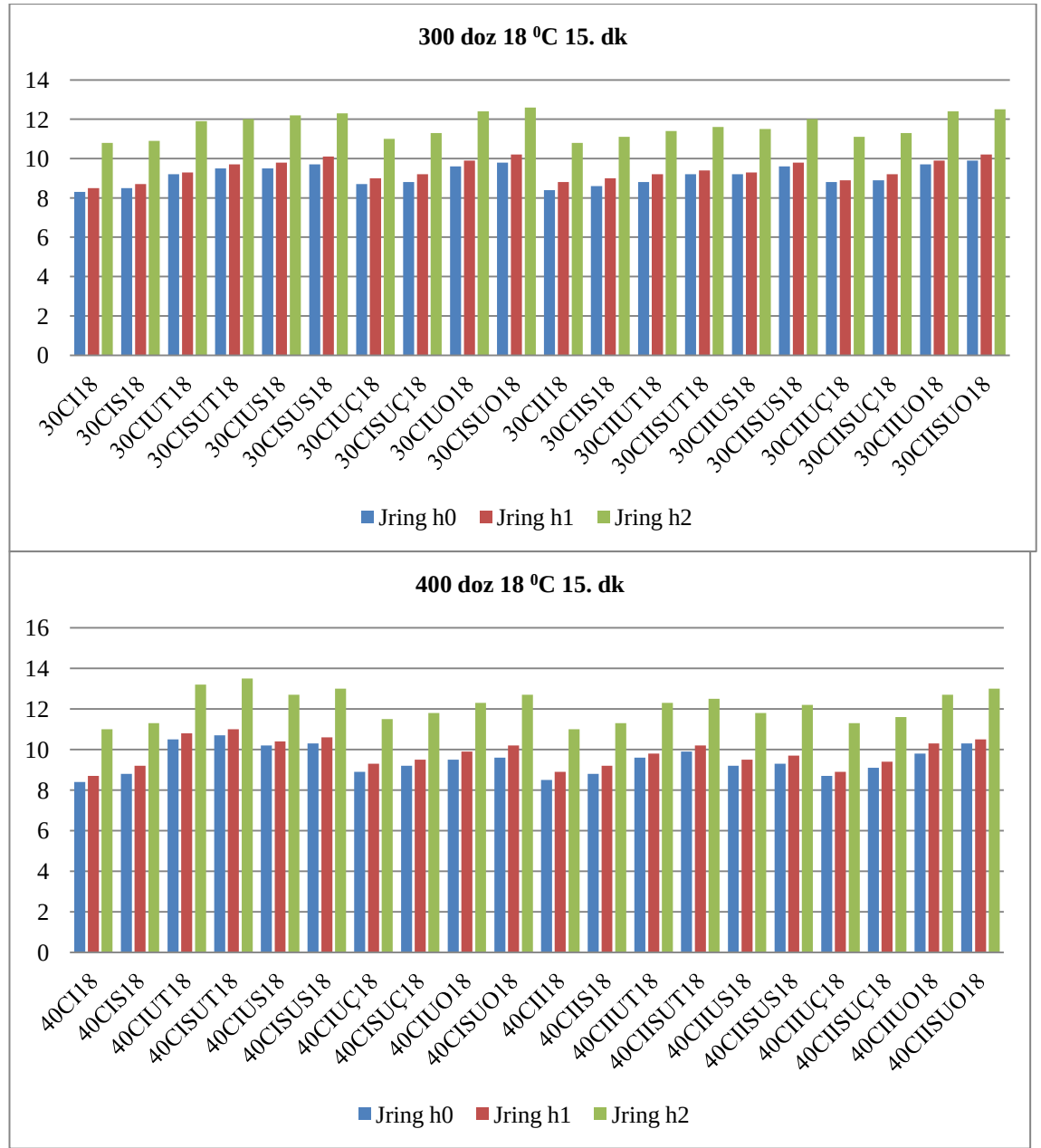
400 dozlu betonların 30 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan sonuçları dikkate alındığında en fazla; çökme(slump) 255mm ile 40CISUT30 ve 40CIISUO30 karışımlarından, yayılma çapı 670mm ile 40CIISUT30 ve 40CIISUO30 karışımlarından, j ring yayılması ise 565mm ile 40CISUO30 karışımlarından, en düşük; çökme(slump) 230mm ile 40CI30, 40CIS30, 40CII30 ve 40CIUÇ30 karışımlarından, yayılma çapı 590mm ile 40CII30 ve 40CIUÇ30 karışımlarından, j ring yayılması ise 500mm ile 40CI30, 40CII30 ve 40CIUÇ30 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.19. 400 doz 30⁰C serisi betonun 45. dk. çökme deney sonuçları

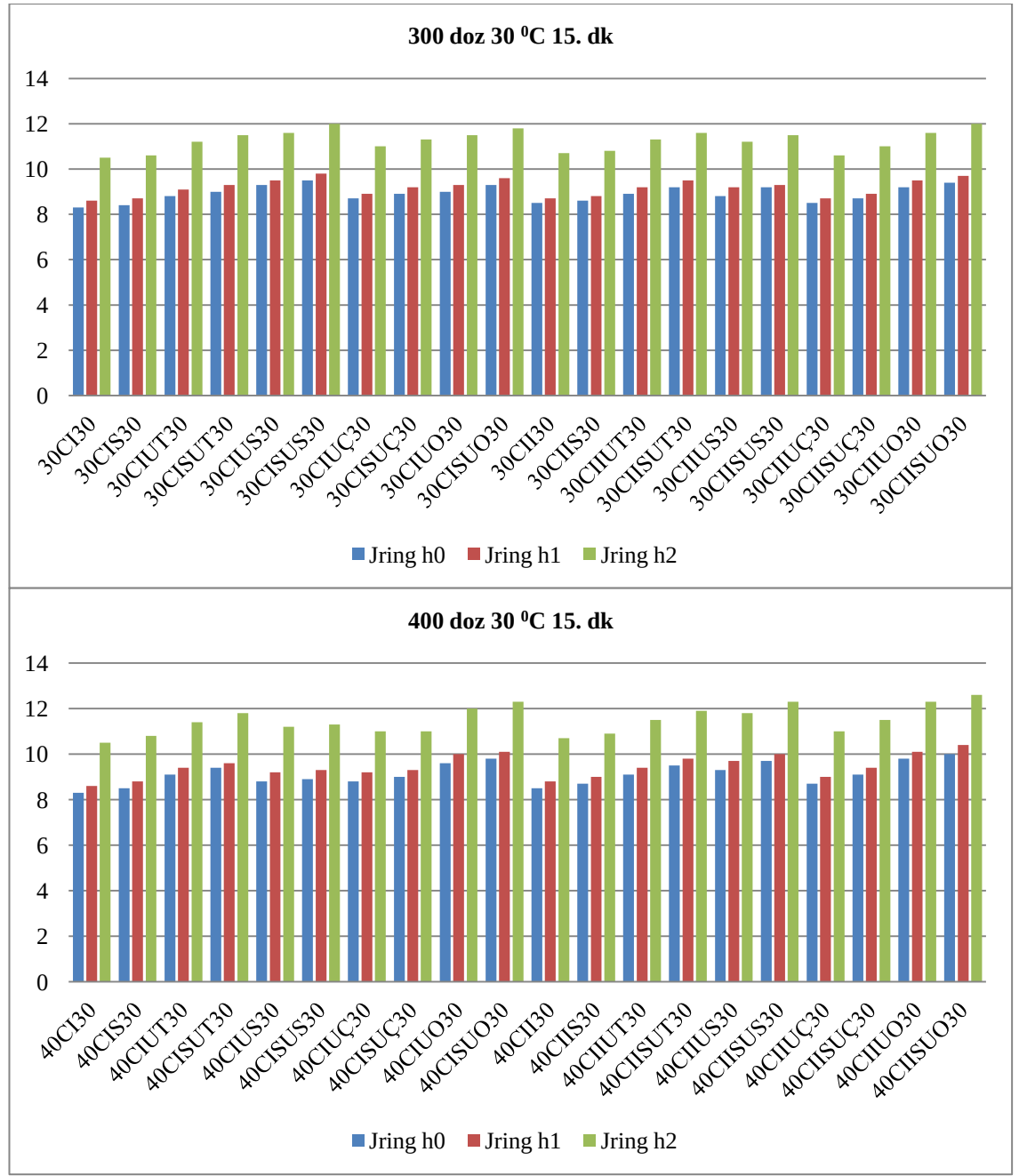
4.9.3. J ring deneyi sonuçları

18 ⁰C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan j ring sonuçları dikkate alındığında en fazla; j ring çökme yüksekliği (h_0) 107mm ile 40CISUT18 karışımından, iç yükseklik(h_1) 110mm ile 40CIUT18 karışımından, dış yükseklik(h_2) ise 135mm ile 40CISUT18 karışımından, en düşük; j ring çökme yüksekliği (h_0) 83mm ile 30CI18 karışımından, iç yükseklik(h_1) 85mm ile 30CI18 karışımından, dış yükseklik(h_2) ise 108mm ile 30CI18 ve 30CII18 karışımından elde edilmiştir.



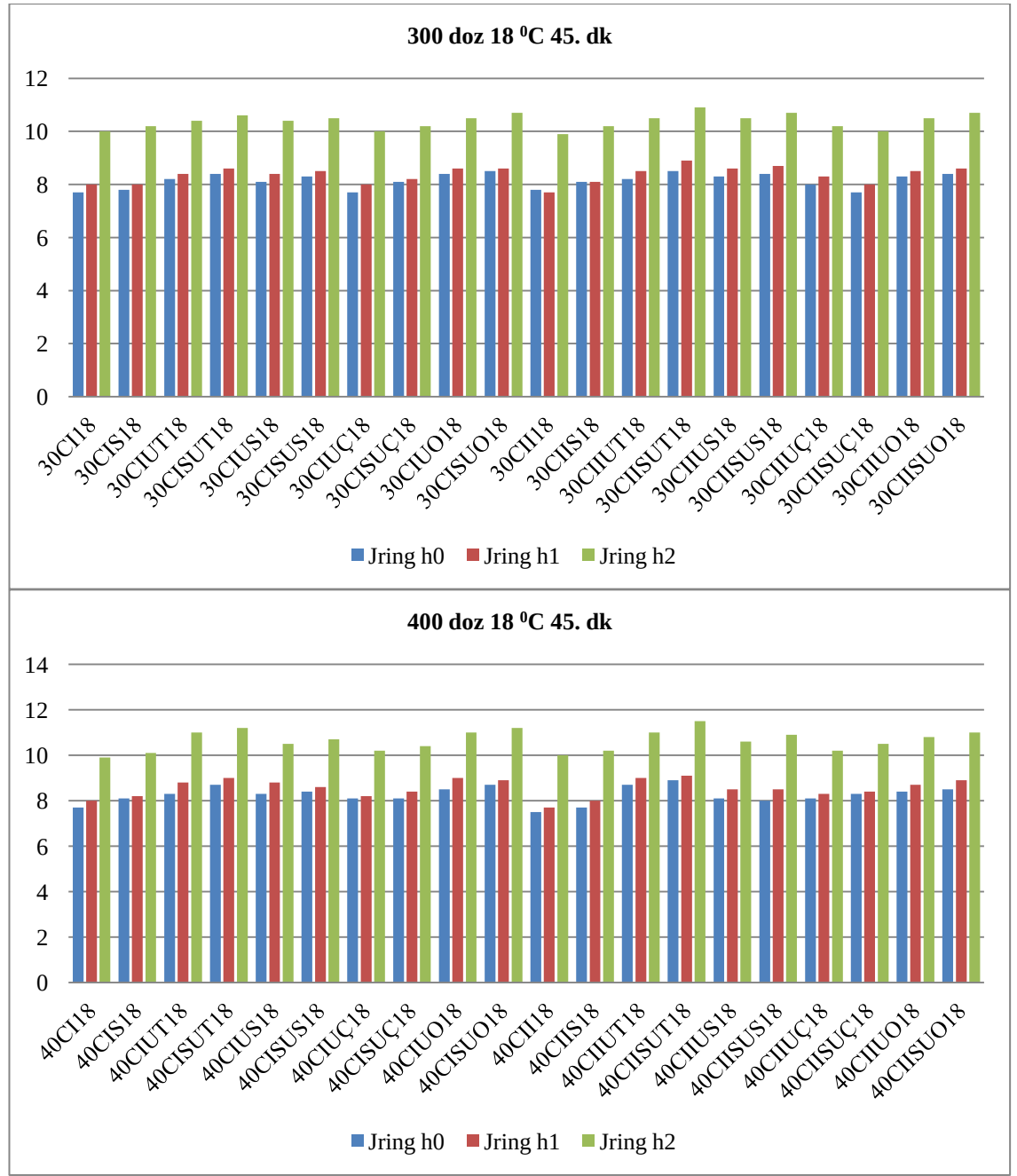
Şekil 4.20. 18⁰C 15. dakika j ring sonuçları

30 °C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan j ring sonuçları dikkate alındığında en fazla; j ring çökme yüksekliği (h₀) 100mm ile 40CIISU030 karışımından, iç yükseklik(h₁) 104mm ile 40CIISU030 karışımından, dış yükseklik(h₂) ise 126mm ile 40CIISU030 karışımından, en düşük; j ring çökme yüksekliği (h₀) 83mm ile 30CI30 karışımından, iç yükseklik(h₁) 86mm ile 30CI30 ve 40CI30 karışımlarından, dış yükseklik(h₂) ise 105mm ile 30CI30 ve 40CI30 karışımlarından elde edilmiştir.



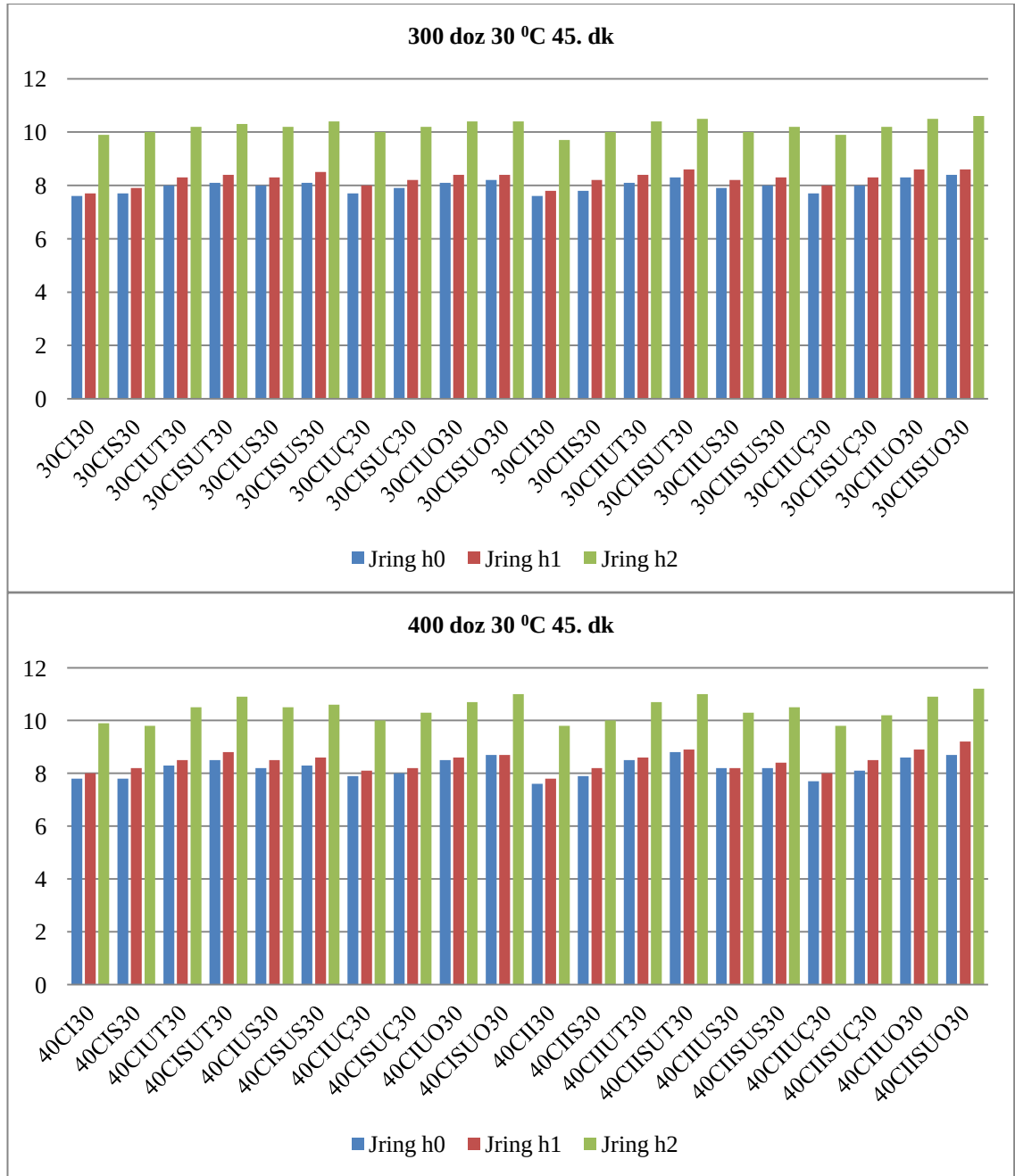
Şekil 4.21. 30°C 15. dakika j ring sonuçları

18 °C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan j ring sonuçları dikkate alındığında en fazla; j ring çökme yüksekliği (h_0) 89mm ile 40CIISUT18 karışımından, iç yükseklik(h_1) 91mm ile 40CIISUT18 karışımından, dış yükseklik(h_2) ise 115mm ile 40CIISUT18 karışımından, en düşük; j ring çökme yüksekliği (h_0) 75mm ile 40CII18 karışımından, iç yükseklik(h_1) 77mm ile 30CII18 ve 40CII18 karışımlarından, dış yükseklik(h_2) ise 99mm ile 30CII18 ve 40CI18 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.22. 18⁰C 45. dakika j ring 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.

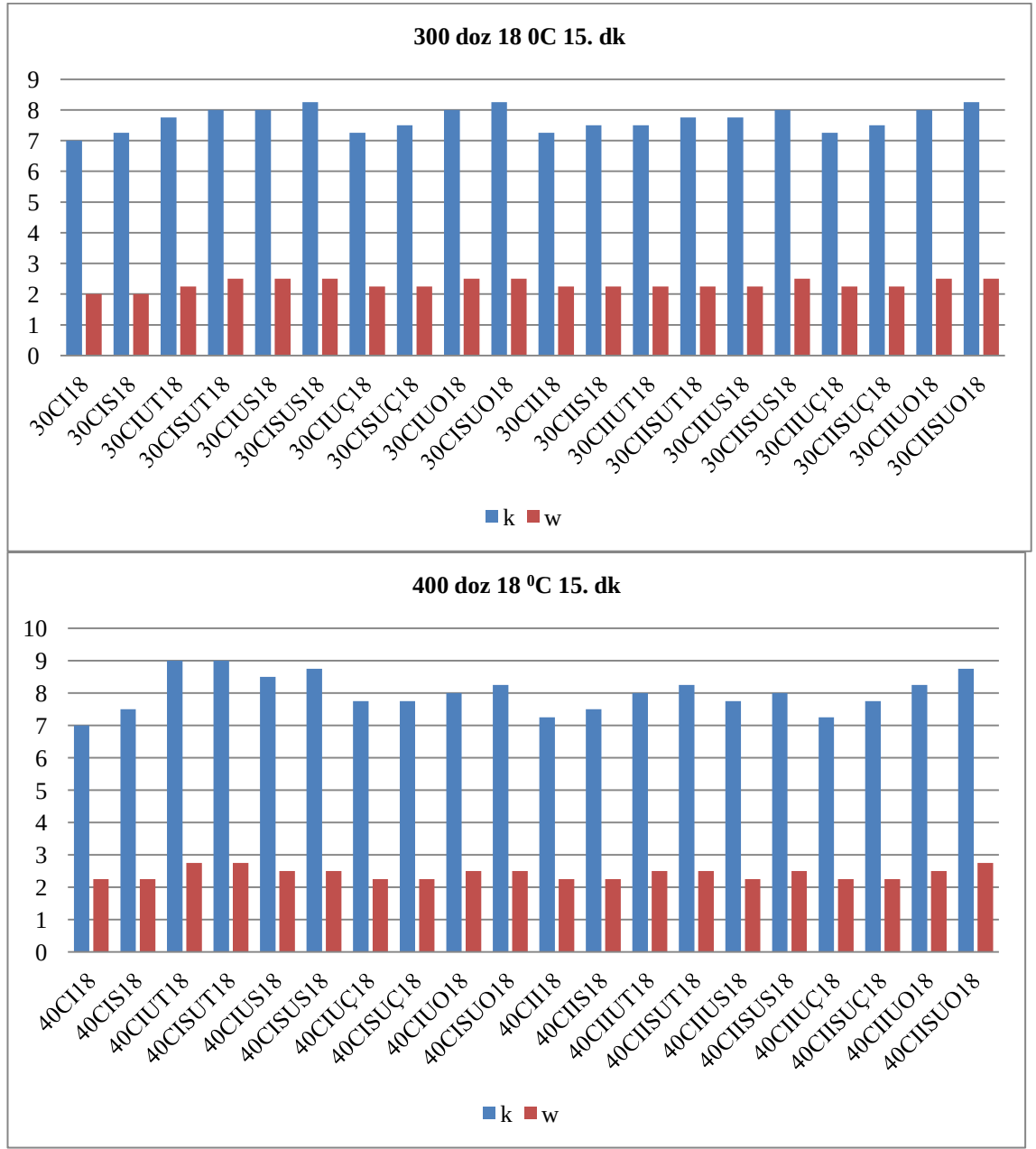


Şekil 4.23. 30°C 45. dakika j ring sonuçları

4.9.4. K-çökme deneyi sonuçları

18 °C'de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 9 cm ile 40CIUT18 ve 40CISUT18 karışımlarından, son yükseklik(w) 2,75 cm ile 40CIUT18 ve 40CISUT18 karışımlarından, en düşük; ilk yükseklik(k) 7 cm ile 30CI18 ve 40CI18

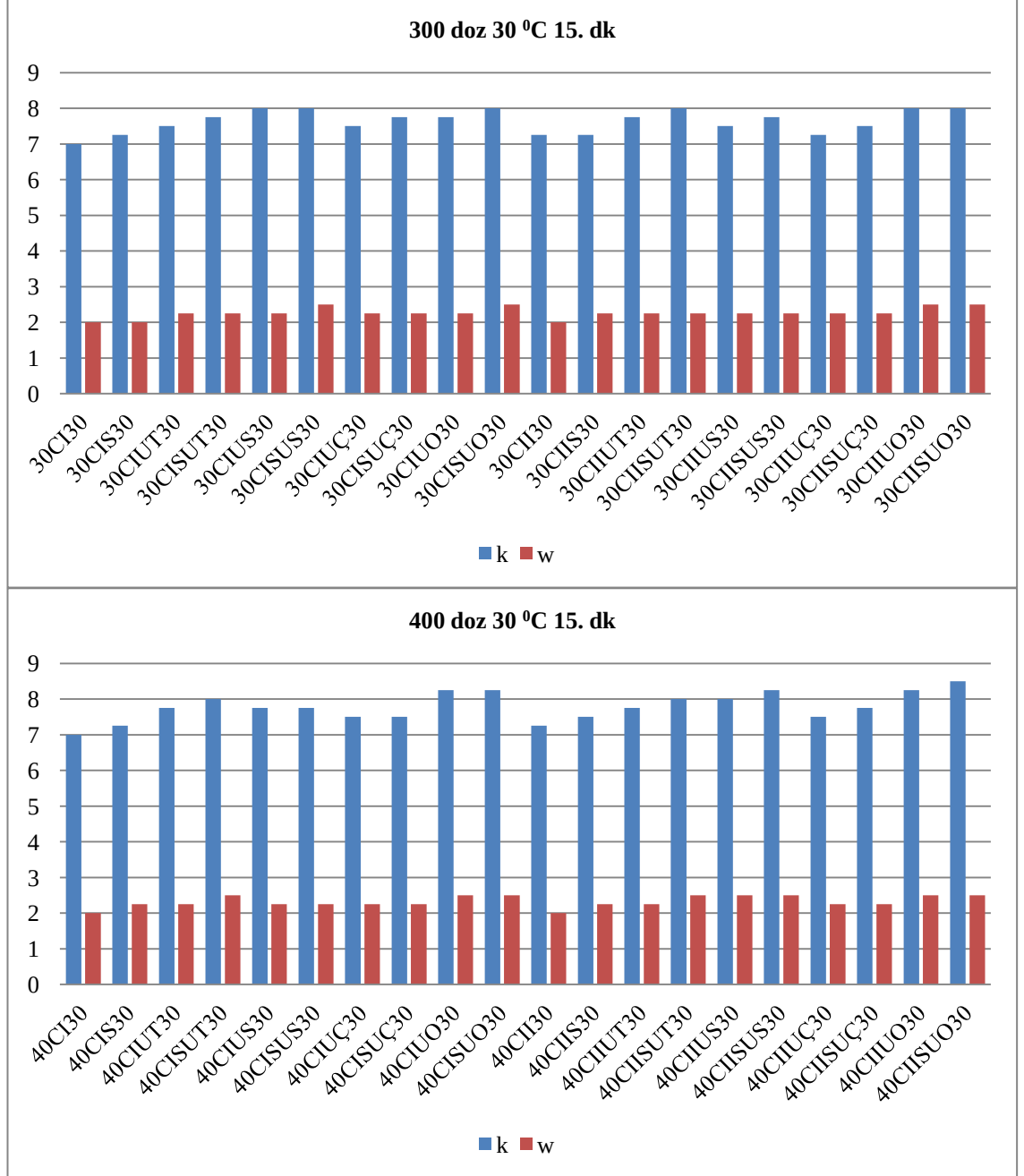
karışımlarından, son yükseklik(w) 2 cm ile 30CI18 ve 30CIS18 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.24. 18 °C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları

30 °C'de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 8,5 cm ile 40CIISUO30 karışımından, son yükseklik(w) 2,5 cm ile 30CISUS30, 30CISUO30, 30CHUO30, 30CIISUO30, 40CISUT30, 40CIUO30, 40CISUO30, 40CIISUT30, 40CHUS30, 40CIISUS30,

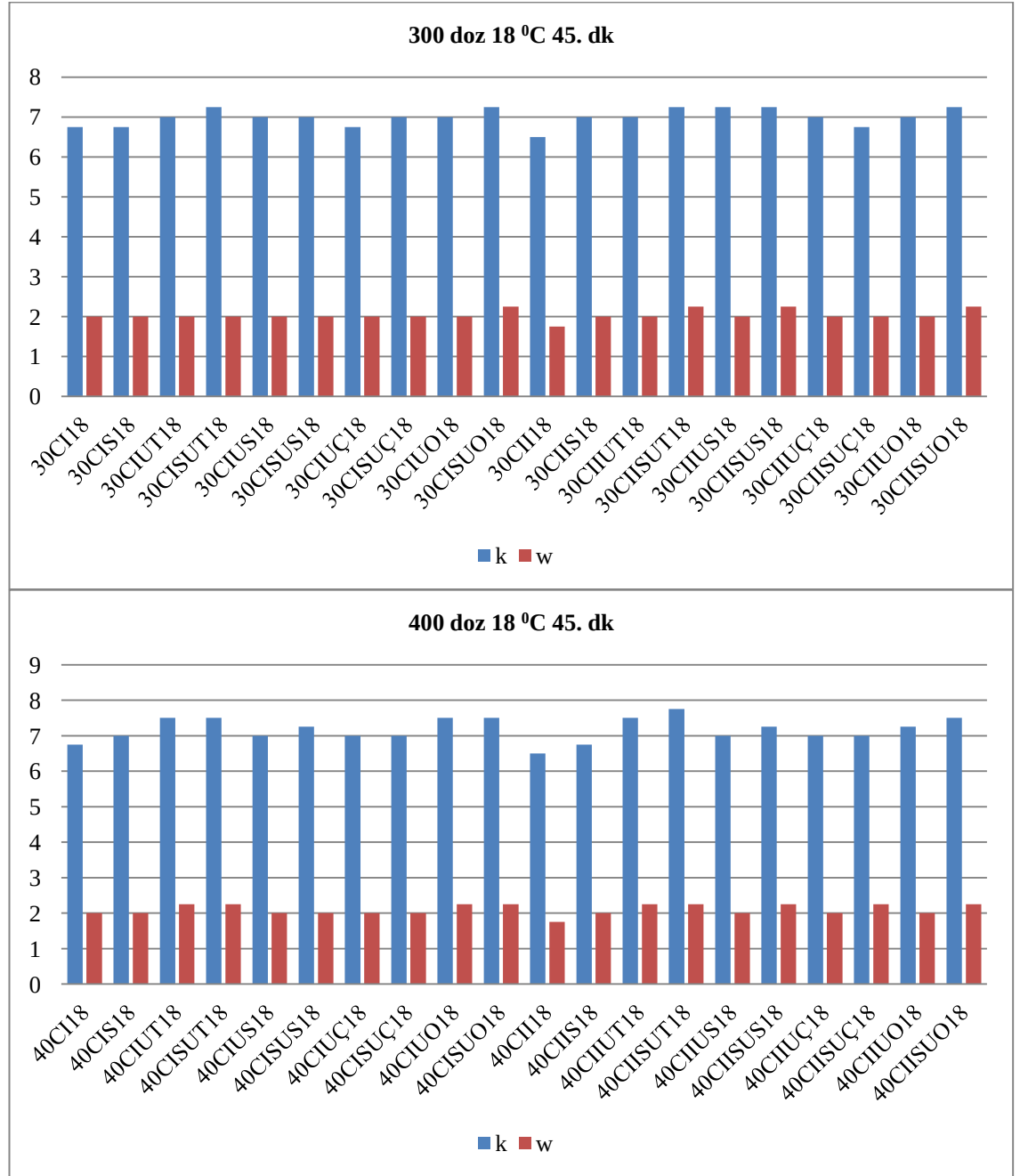
40CIH30, 40CIH30 karışımlarından, en düşük; ilk yükseklik(k) 7 cm ile 30CI30 ve 40CI30 karışımlarından, son yükseklik(w) 2 cm ile 30CI30, 30CIS30, 30CII30, 40CI30, 40CII30 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.25. 30⁰C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları

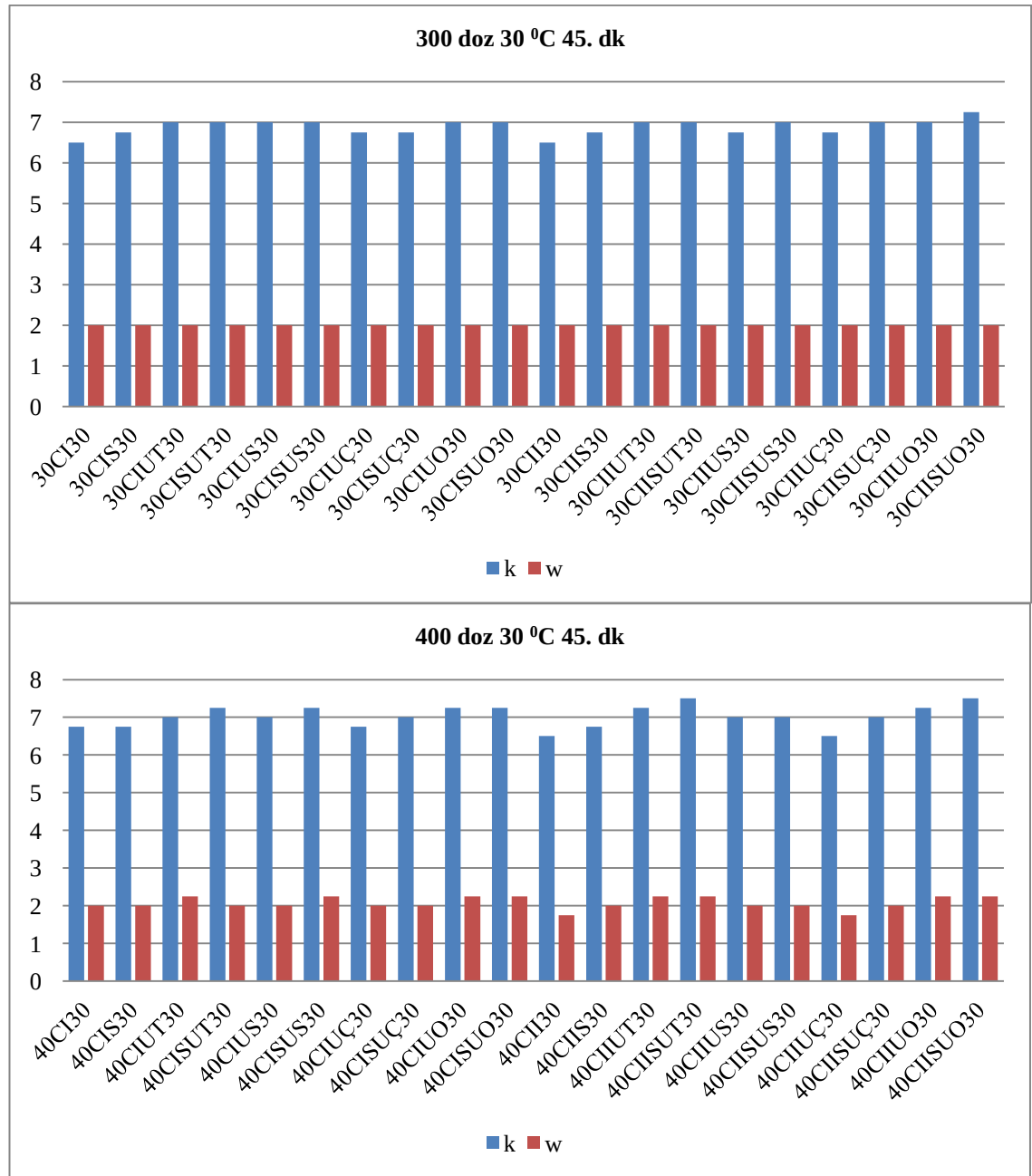
18 °C'de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 7,75 cm ile 40CIH30 karışımından, son

yükseklik(w) 2,25 cm ile 30CISUO18, 30CIISUT18, 30CIISUS18, 40CIUT18, 40CISUT18, 40CIUO18, 40CISUO18, 40CIIUT18, 40CIISUT18, 40CIISUS18, 40CIISUÇ18, 40CIISUO18 karışımlarından, en düşük; ilk yükseklik(k) 6,5 cm ile 30CII18 ve 40CII18 karışımlarından, son yükseklik(w) 1,75 cm ile 30CII18 ve 40CII18 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.26. 18⁰C 45. dakika k-çökme deneyi sonuçları

30 °C'de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 7,5 cm ile 40CIISUT30 ve 40CIISUO30 karışımlarından, son yükseklik(w) 2,25 cm ile 40CIUT30, 40CISUS30, 40CIUO30, 40CISUO30, 40CIHUT30, 40CIISUT30, 40CIHUO30, 40CIISUO30 karışımlarından, en düşük; ilk yükseklik(k) 6,5 cm ile 30CI30, 30CII30, 40CII30, 40CIHUÇ30 karışımlarından, son yükseklik(w) 1,75 cm ile 40CII30, 40CIHUÇSS30 karışımlarından elde edilmiştir.



Şekil 4.27. 30°C 45. dakika k-çökme deneyi sonuçları

4.10. Taze Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin İstatistiksel Analiz Sonuçları

Elde edilen verilerin birbirleriyle olan ilişkileri, ekler bölümünde verilmiştir. Bu Excel grafiklerinden elde edilen regresyon (R^2) değerleri ise Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Deneylerden elde edilen en yüksek ve en düşük değerler vurgu rengiyle belirtilmiştir.

Çizelge 4.13. Taze Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin ilişkisi

			Plastik Viskozite	Kayma eşiği	Çökme (Slump)	Yayılma çapı	J ring h ₀	J ring h ₁	J ring h ₂	Jring yayılması	k	w
15. DAKİKA	18 °C	Plastik Viskozite	1	0.3014	0.0986	0.0607	0.0555	0.0566	0.0841	0.0539	0.035	0.069
		Kayma eşiği	0.3014	1	0.8041	0.7404	0.663	0.6882	0.7277	0.7274	0.66	0.601
		Çökme(Slump)	0.0986	0.8041	1	0.8385	0.7756	0.7937	0.833	0.895	0.773	0.654
		Yayılma çapı	0.0607	0.7404	0.8385	1	0.9783	0.9842	0.9787	0.8271	0.974	0.839
		J ring h ₀	0.0555	0.663	0.7756	0.9783	1	0.9693	0.9571	0.7919	0.962	0.822
		J ring h ₁	0.0566	0.6882	0.7937	0.9842	0.9693	1	0.9699	0.7952	0.97	0.844
		J ring h ₂	0.0841	0.7277	0.833	0.9787	0.9571	0.9699	1	0.8025	0.942	0.837
		Jring yayılması	0.0539	0.7274	0.895	0.8271	0.7919	0.7952	0.8025	1	0.793	0.642
		k	0.0345	0.6597	0.7728	0.974	0.9615	0.9702	0.9421	0.7927	1	0.81
		w	0.0689	0.6005	0.6535	0.8392	0.8216	0.8435	0.8365	0.6424	0.81	1
	30 °C	Plastik Viskozite	1	0.3114	0.2823	0.3719	0.3647	0.3866	0.3831	0.2608	0.387	0.3
		Kayma eşiği	0.3114	1	0.9544	0.7373	0.7247	0.7475	0.7302	0.7676	0.731	0.538
		Çökme(Slump)	0.2823	0.9544	1	0.7563	0.7567	0.7715	0.7435	0.8312	0.745	0.549
		Yayılma çapı	0.3719	0.7373	0.7563	1	0.9837	0.9815	0.9912	0.7934	0.958	0.772
		J ring h ₀	0.3647	0.7247	0.7567	0.9837	1	0.9784	0.9698	0.7689	0.938	0.75
		J ring h ₁	0.3866	0.7475	0.7715	0.9815	0.9784	1	0.9633	0.7594	0.938	0.744
		J ring h ₂	0.3831	0.7302	0.7435	0.9912	0.9698	0.9633	1	0.8025	0.948	0.754
		Jring yayılması	0.2608	0.7676	0.8312	0.7934	0.7689	0.7594	0.8025	1	0.767	0.603
		k	0.3872	0.7313	0.745	0.9578	0.9377	0.9381	0.9478	0.7666	1	0.735
		w	0.3001	0.538	0.5488	0.7715	0.7501	0.7438	0.7535	0.6026	0.735	1
45. DAKİKA	18 °C	Plastik Viskozite	1	0.2477	0.2034	0.2109	0.185	0.2466	0.2505	0.1443	0.185	0.128
		Kayma eşiği	0.2477	1	0.8511	0.8258	0.6973	0.8087	0.8399	0.7882	0.75	0.417
		Çökme(Slump)	0.2034	0.8511	1	0.8961	0.7159	0.8728	0.826	0.8724	0.828	0.517
		Yayılma çapı	0.2109	0.8258	0.8961	1	0.8615	0.9417	0.9349	0.8764	0.931	0.627
		J ring h ₀	0.185	0.6973	0.7159	0.8615	1	0.8699	0.7839	0.7499	0.815	0.487
		J ring h ₁	0.2466	0.8087	0.8728	0.9417	0.8699	1	0.8695	0.8256	0.868	0.582
		J ring h ₂	0.2505	0.8399	0.826	0.9349	0.7839	0.8695	1	0.7808	0.876	0.626
		Jring yayılması	0.1443	0.7882	0.8724	0.8764	0.7499	0.8256	0.7808	1	0.789	0.544
		k	0.1854	0.7504	0.8283	0.9309	0.8151	0.8683	0.8755	0.7894	1	0.664
		w	0.1277	0.417	0.5165	0.6272	0.4867	0.5818	0.6257	0.544	0.664	1
	30 °C	Plastik Viskozite	1	0.3107	0.1402	0.1983	0.2773	0.2176	0.1962	0.1242	0.161	0.544
		Kayma eşiği	0.3107	1	0.8089	0.8465	0.8649	0.7389	0.8687	0.7864	0.743	0.534
		Çökme(Slump)	0.1402	0.8089	1	0.8999	0.8412	0.8392	0.8627	0.8558	0.79	0.421
		Yayılma çapı	0.1983	0.8465	0.8999	1	0.9715	0.9164	0.9605	0.8044	0.925	0.535
		J ring h ₀	0.2773	0.8649	0.8412	0.9715	1	0.8955	0.9435	0.7661	0.893	0.55
		J ring h ₁	0.2176	0.7389	0.8392	0.9164	0.8955	1	0.8777	0.7253	0.865	0.453
		J ring h ₂	0.1962	0.8687	0.8627	0.9605	0.9435	0.8777	1	0.8075	0.882	0.528
		Jring yayılması	0.1242	0.7864	0.8558	0.8044	0.7661	0.7253	0.8075	1	0.731	0.485
		k	0.1611	0.7432	0.7899	0.9252	0.8928	0.8653	0.8822	0.7306	1	0.545
		w	0.544	0.5341	0.4213	0.5353	0.5501	0.4528	0.5283	0.4853	0.545	1

Elde edilen deney sonuçları veri madenciliği analiz edilerek, değerlendirmeler yapılmıştır. Burada taze beton sonuçları girdi, reolojik parametreler çıktı olarak kullanılmak suretiyle istatistiksel modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

Kayma eşiği ve plastik viskozitenin, taze beton deneylerinden elde edilen veriler % 80 model eğitim seti kullanılarak formüsel olarak aralarındaki ilişkiler belirlenmiş ve aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Bu formüller 18 ve 30 derecede yapılan üretimlerin 15. ve 45. dakikadaki değerler göz önüne alınarak yapılmıştır. Modellerden en iyi regresyon değerini veren model vurgu rengiyle belirtilmiştir.

18 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 15. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,945 ile functions.LinearRegression kuralıyla hesaplanmıştır.(Çizelge 4.14)

Çizelge 4.14. 18⁰C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ring(h₀), j ringh1(h₁), j ringh2(h₂), k, w</i>	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9264	
functions.GaussianProcesses	0,93	
functions.LeastMedSq	0,8788	KE = -20.4306 * S + 12.8194 * Y + 99.3636 * Jh0 + -138.3654 * Jh1 + -0.9938 * Jh2 + 3.9024 * JY + 43.3459 * K + 75.7062 * W + -232.4151
functions.LinearRegression	0,945	
functions.PaceRegression	0,9225	
Linear Regression Model	0,7631	
functions.SimpleLinearRegression	0,9225	
functions.SMOreg	0,8948	
lazy.IBk	0,8851	
lazy.Kstar	0,8555	
lazy.LWL	0,772	
meta.AdditiveRegression	0,9325	
meta.Bagging	0,9024	
rules.DecisionTable	0,9222	
rules.M5Rules	0,9071	KE = 71.3173 * S - 1297.7223 [40/44.266%]
trees.M5P	0,9084	KE =71.3173 * S - 1297.7223

18 ⁰C ortam sıcaklığında üretilen betonların 15. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,6338 ile functions.GaussianProcesses kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.15. 18⁰C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ring(h₀), j ringh1(h₁), j ringh2(h₂), k, w</i>	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,1833	
functions.GaussianProcesses	0,6338	
functions.LeastMedSq	0,5955	PV = 5.8927 * S + 0.3147 * Y + -9.1578 * Jh0 + -2.2742 * Jh2 + -0.401 * JY + 27.1818 * W + -71.2518
functions.LinearRegression	-0,2389	PV = 1.9415 * S + -19.0755
functions.MultilayerPerceptron	0,1511	
functions.PaceRegression	0,7555	PV = 25.6964 + 12.254 * Jh2 + -17.9446 * K
functions.RBFNetwork	0,2298	
functions.SimpleLinearRegression	0,4228	
functions.SMOreg	0,6846	
lazy.IBk	-0,1709	
lazy.Kstar	-0,53	
lazy.LWL	-0,146	
meta.AdditiveRegression	0,2188	
meta.Bagging	0,1565	
rules.DecisionTable	-0,1372	
rules.M5Rules	-0,2389	PV = 1.9415 * S - 19.0755
trees.DecisionStump	0,3511	
trees.M5P	-0,2389	PV = 1.9415 * S - 19.0755

30 ⁰C ortam sıcaklığında üretilen betonların 15. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9908 ile functions.MultilayerPerceptron kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.16. 30⁰C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ring(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2),k,w</i>	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,979	
functions.GaussianProcesses	0,9633	
functions.LeastMedSq	0,9763	KE = 76.3435 * S + -10.2263 * Y +- 0.2967 * Jh0 + -10.8717 * Jh1 + 107.6467 * Jh2 + -1.7502 * JY +26.507 * K +33.5065 * W +-1442.5059
functions.LinearRegression	0,9827	KE = 91.8792 * S +-87.2693 * Jh0 + 85.0714 * Jh2 + -6.9184 * JY + - 1552.292
functions.MultilayerPerceptron	0,9908	
functions.PaceRegression	0,9874	KE = -1537.5805 +86.1414 * S + - 9.3714 * Jh0 +12.353 * Jh2 +-2.6598 * JY
functions.SimpleLinearRegression	0,9925	
functions.SMOreg	0,988	
lazy.IBk	0,9525	
lazy.Kstar	0,9709	
lazy.LWL	0,9223	
meta.AdditiveRegression	0,9222	
meta.Bagging	0,98	
rules.DecisionTable	0,979	
rules.M5Rules	0,9827	KE = 91.8792 * S - 87.2693 * Jh0+ 85.0714 * Jh2 - 6.9184 * JY - 1552.292
trees.DecisionStump	0,979	
trees.M5P	0,9827	KE = 91.8792 * S - 87.2693 * Jh0 + 5.0714 *h2 - 6.9184 * JY- 1552.292

30 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 15. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9767 ile functions.RBFNetwork kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17. 30°C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w</i>	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,5999	
functions.GaussianProcesses	0,7115	
functions.LeastMedSq	0,8521	PV =2.5707 * S +1.8808 * Jh0 + -10.6761 * Jh1 +15.8283 * Jh2 + -2.0844 * JY +7.7609 * K + 3.308 * W + -75.809
functions.LinearRegression	0,8232	PV =9.1064 * Jh1 +-56.2551
functions.MultilayerPerceptron	0,5378	
functions.PaceRegression	0,8232	PV =-56.2426 + 9.105 * Jh1
functions.RBFNetwork	0,9767	
functions.SimpleLinearRegression	0,8232	
functions.SMOreg	0,837	
lazy.IBk	0,0928	
lazy.Kstar	0,4362	
lazy.LWL	0,4886	
meta.AdditiveRegression	0,5176	
meta.Bagging	0,6503	
rules.DecisionTable	-0,0344	
rules.M5Rules	0,8313	PV = 9.1064 * Jh1- 56.2551 [40/78.32%]
trees.DecisionStump	0,5012	
trees.M5P	0,8313	PV = 9.1064 * Jh1 - 56.2551

18 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 45. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9927 ile lazy.Kstar kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18. 18°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w</i>	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,93	
functions.GaussianProcesses	0,9504	
functions.LeastMedSq	0,9226	KE =18.0518 * S + -5.0186 * Y + 25.8366 * Jh0 +40.2809 * Jh1 +144.654 * Jh2 + 10.5347 * JY + -110.4849 * K + -89.7949 * W + -1148.013
functions.LinearRegression	0,9508	KE =32.5679 * S + -17.9683 * Y + 53.1849 * Jh1 +162.8866 * Jh2 +9.0741 * JY + -120.556 * W + -1396.3626
functions.MultilayerPerceptron	0,9353	
functions.PaceRegression	0,9485	KE = -1332.9873 +40.0937 * S + 117.6382 * Jh2 + -109.7381 * W
functions.RBFNetwork	0,8909	
Linear Regression Model		
functions.SimpleLinearRegression	0,929	
functions.SMOreg	0,9397	
lazy.IBk	0,9707	
lazy.Kstar	0,9927	
lazy.LWL	0,864	
meta.AdditiveRegression	0,8725	
meta.Bagging	0,9344	
rules.DecisionTable	0,98	
rules.M5Rules	0,954	
trees.M5P	0,9447	KE = 34.35 * S +10.372 * Y - 32.5115 * W - 749.6281
trees.REPTree	0,8904	

18 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,7191 ile trees.DecisionStump kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19. 18°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ringh0(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2),k,w</i>	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,5776	
functions.GaussianProcesses	0,5504	
functions.LeastMedSq	0,7028	PV =1.7516 * S +-0.7869 * Y +- 6.9909 * Jh0 +18.7745 * Jh1 +16.6673 * Jh2 + -0.2017 * JY + -19.8771 * K + -3.917 * W + -75.703
functions.LinearRegression	0,652	PV =-3.2564 * Y + 16.4944 * Jh1 + 14.946 * Jh2 +-57.0233
functions.MultilayerPerceptron	-0,5293	
functions.PaceRegression	0,6581	PV = -48.5906 + 7.7169 * Jh2
functions.RBFNetwork	0,7186	
functions.SimpleLinearRegression	0,6581	
functions.SMOreg	0,6721	
lazy.IBk	0,8219	
lazy.Kstar	0,4659	
lazy.LWL	0,7156	
meta.AdditiveRegression	0,3358	
meta.Bagging	0,6164	
rules.DecisionTable	0,4241	
rules.M5Rules	0,652	
trees.DecisionStump	0,7191	
trees.M5P	0,652	PV =-1.1359 * Y + 5.7539 * Jh1+5.2137 * Jh2+ 2.8156
trees.REPTree	0,7191	

30 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 45. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9706 ile functions.IsotonicRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.20. 30°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w</i>	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9706	
functions.GaussianProcesses	0,8666	
functions.LeastMedSq	0,9025	
functions.LinearRegression	0,9367	KE =52.7913 * S + -30.9755 * Y + 259.3684 * Jh0 + -81.834 * Jh1 + 137.701 * Jh2 + -1529.5442
functions.MultilayerPerceptron	0,8271	
functions.PaceRegression	0,926	KE = -1540.8626 +37.441 * S + -28.3009 * Y +207.9703 * Jh0 + -91.1224 * Jh1 +154.6827 * Jh2 + 8.2563 * JY +46.9523 * W
functions.RBFNetwork	0,7564	
Linear Regression Model		
functions.SimpleLinearRegression	0,9338	
functions.SMOreg	0,9002	
lazy.IBk	0,7466	
lazy.Kstar	0,8105	
lazy.LWL	0,7947	
meta.AdditiveRegression	0,9069	
meta.Bagging	0,8894	
rules.DecisionTable	0,9301	
rules.M5Rules	0,9337	
trees.DecisionStump	0,9145	
trees.M5P	0,9337	KE = -23.4063 * Y + 204.295 * Jh0 +111.5709 * Jh2 + 13.756 * JY - 1424.8184
trees.REPTree	0,8363	

30 °C ortam sıcaklığında üretilen betonların 45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,8211 ile functions.PaceRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21. 30°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	<i>Sulump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ringh0(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2),k,w</i>	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	Korelasyon	Formül
functions.IsotonicRegression	0,4555	
functions.GaussianProcesses	0,434	
functions.LeastMedSq	0,2032	PV =-3.6958 * S +4.011 * Y + -3.6258 * Jh1 + 7.0135 * Jh2 + -1.4002 * JY + -12.5408 * K +11.0789 * W + -33.872
functions.LinearRegression	0,4519	PV =1.3189 * Y + -51.8374
functions.MultilayerPerceptron	0,4823	
functions.PaceRegression	0,8211	PV =-6.1698 + -7.4951 * Y + 64.2006 * Jh0 -7.1697 * W
functions.RBFNetwork	0,3767	
Linear Regression Model		
functions.SimpleLinearRegression	0,6442	
functions.SMOreg	0,5931	
lazy.IBk	-0,0388	
lazy.Kstar	-0,0447	
lazy.LWL	0,3847	
meta.AdditiveRegression	-0,0243	
meta.Bagging	0,4442	
rules.DecisionTable	0,2725	
rules.M5Rules	0,4519	PV = 9.6301 * Jh1 - 49.8362
trees.DecisionStump	0,3787	
trees.M5P	0,4519	PV = 9.6301 * Jh1 - 49.8362

Mevcut değerler incelendiğinde taze beton deneyleri ile kayma eşiğinin iyi korelasyon vermesine karşılık plastik viskoziteyle korelasyonunun kayma eşiğine göre düşük olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı sıcaklıklarda katkılı taze betonların reolojik özelliklerinin belirlendiği ve reolojik özelliklerin taze beton deneyleriyle karşılaştırılması ana konu olarak incelenen bu çalışmada sıcaklık, dozaj, çimento sınıfı ve mineral katkılara göre farklı bulgu ve bağıntılar elde edilmiştir.

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 80 farklı numune üretilmiştir.

Üretilen taze betonlardan çökme yüksekliği, yayılma çapı, J ring yayılması, Jring çökme, iç ve dış yükseklik değerleri, k çökme deney aletinden elde edilen k ve w değerleri ve Celcum Two Point Workability Tester (CTPT) cihazı kullanılarak plastik viskozite ve kayma eşiği değerleri ölçülmüştür. Üretimin 15. ve 45. dakikasında yapılan ölçümlere göre;

45. dakikada deneylerden elde edilen değerlerin 15. dakikada elde edilen verilere göre çökme değerlerinde %2-%8, yayılma çapında %7-%19, J ring yayılmasında %9-%16, Jring çökmede %6-%18, j ring iç yükseklikde %7-%19, dış yükseklikde %9-%17, k çökme deney aletinden elde edilen k değerlerinde %4-%18 ve w değerinde %0-%29 oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. Reolojik parametrelerde ise hem plastik viskozitenin hemde kayma eşiği değerlerinde artış olduğu bu artışın kayma eşiğinde(%15-%23) plastik viskozitedeki artışa (%4-13) göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

300 kg/m³ dozajlı betonlara göre 400 kg/m³ dozajlı betonlardan elde edilen sonuçların viskozite değerlerinde ortalama %12,2 (Tunçbilek Uçucukül katkılı karışımlar hariç), kayma eşiğinde ortalama %9,5 artış gösterdiği buna karşılık çökme değerinin ortalama %8,5, yayılmanın ortalama %14,3, j ring yayılmanın ortalama %8,2, h_0, h_1 ve h_2 değerlerinin ortalama %14-16, k ve w nun ise ortalama %16-22 oranları arasında arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla çimento dozajı arttıkça karışım kıvamlarının arttığı ve işlenebilir betonlar elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Mineral katkıların reolojik parametrelere etkisi incelendiğinde; mineral katkılı betonların plastik viskozite ve kayma eşiği değerlerinde zamanla artış gözlemlenmiştir. Silis dumanı mineral katkısız şahit numuneye ilave edildiğinde η_{pl} ve τ_0 'ni artırmıştır. Yalnız uçucu kül ve silis dumanı kullanıldığında reolojik parametreler yalnız uçucu kül kullanılan örneklerle göre azalmış ancak şahit örneğe göre artmıştır. Şahit numuneye göre en yüksek viskozite artışı sırasıyla ortalama %40 seviyesinde Orhaneli, ortalama %30 ile Tunçbilek, ortalama %25 ile Seyitömer, ortalama %12 ile Çayırhan uçucu külü katkılı betonlardan elde edilmiştir. En yüksek kayma eşiği değeri ise sırasıyla ortalama %45 ile Orhaneli, ortalama %38 ile Tunçbilek, ortalama %33 ile Seyitömer ve ortalama %16 ile Çayırhan uçucu külü katkılı numunelerden elde edilmiştir. Şahit betonun içerisine ilave edilen uçucu kül ve silis dumanı taze beton deneyleri değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Yine uçucu kül ve silis dumanı kullanımı reolojik değerleride yükseltmektedir. Dolayısıyla uçucu kül ve silis dumanı betonun işlenebilirliği ve pompalanabilirliği üzerine olumlu etkiler yaptığı gözlemlenmiştir.

Çimento sınıfının etkisi incelendiğinde CEMI çimento sınıfı katkılı betonlara göre CEMII çimento katkılı betonlarda kayma eşiği değerlerinde çok düşük oranlarda artış ve azalmalar olmasına karşın plastik viskozite değerleri tüm karışımlarda artış göstermiş ve buna bağlı olarak çökme, yayılma ve j ring değerlerinde düşük oranlarda azalmalar meydana gelmiştir.

Ortam sıcaklığı 30⁰C'de gerçekleştirilen üretimlerde 18⁰C'ye göre taze beton deneylerinin ortalama %1,8 artış gösterdiği, viskozite değerinin nispeten azaldığı(ort

%4,5), kayma eşiğinin artış gösterdiği (ort %0,2) gözlemlenmiştir. Bu artışın sıcaklık artışına bağlı olarak karışımlarda meydana gelen su kaybından oluştuğu ve bu değerlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Deneyler için belirlenen ortam sıcaklığının taze beton deneylerine ve reolojik sabitlere etkisinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.1. Taze beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri

		Girdiler	Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w	
		Çıktı	Kayma Eşiği (KE)	
		Kural	Korelasyon	Formül
18 derece	15. dakika	functions.LeastMedSq	0,8788	KE = -20.4306 * S + 12.8194 * Y + 99.3636 * Jh0 - 138.3654 * Jh1 - 0.9938 * Jh2 + 3.9024 * JY + 43.3459 * K + 75.7062 * W - 232.4151
		rules.M5Rules	0,9071	KE = 71.3173 * S - 1297.7223
		trees.M5P	0,9084	KE = 71.3173 * S - 1297.7223
	45. dakika	functions.LeastMedSq	0,9226	KE = 18.0518 * S - 5.0186 * Y + 25.8366 * Jh0 + 40.2809 * Jh1 + 144.654 * Jh2 + 10.5347 * JY - 110.4849 * K - 89.7949 * W - 1148.013
		functions.LinearRegression	0,9508	KE = 32.5679 * S - 17.9683 * Y + 53.1849 * Jh1 + 162.8866 * Jh2 + 9.0741 * JY - 120.556 * W - 1396.3626
		functions.PaceRegression	0,9485	KE = -1332.9873 + 40.0937 * S + 117.6382 * Jh2 - 109.7381 * W
		trees.M5P	0,9447	KE = 34.35 * S + 10.372 * Y - 32.5115 * W - 749.6281
30 derece	15. dakika	functions.LeastMedSq	0,9763	KE = 76.3435 * S + -10.2263 * Y + -60.2967 * Jh0 - 10.8717 * Jh1 + 107.6467 * Jh2 - 1.7502 * JY + 26.507 * K + 33.5065 * W - 1442.5059
		functions.LinearRegression	0,9827	KE = 91.8792 * S - 87.2693 * Jh0 + 85.0714 * Jh2 - 6.9184 * JY - 1552.292
		functions.PaceRegression	0,9874	KE = -1537.5805 + 86.1414 * S - 9.3714 * Jh0 + 12.353 * Jh2 - 2.6598 * JY
		rules.M5Rules	0,9827	KE = 91.8792 * S - 87.2693 * Jh0 + 85.0714 * Jh2 - 6.9184 * JY - 1552.292
		trees.M5P	0,9827	KE = 91.8792 * S - 87.2693 * Jh0 + 85.0714 * Jh2 - 6.9184 * JY - 1552.292
	45. dakika	functions.LinearRegression	0,9367	KE = 52.7913 * S - 30.9755 * Y + 259.3684 * Jh0 - 81.834 * Jh1 + 137.701 * Jh2 - 529.5442
		functions.PaceRegression	0,926	KE = -1540.8626 + 37.441 * S - 28.3009 * Y + 207.9703 * Jh0 - 91.1224 * Jh1 + 154.6827 * Jh2 + 8.2563 * JY + 46.9523 * W
		trees.M5P	0,9337	KE = -23.4063 * Y + 204.295 * Jh0 + 111.5709 * Jh2 + 13.756 * JY - 1424.8184

Çizelge 5.2. Taze beton deneyleriyle plastik viskozitenin korelasyon ve formülasyon değerleri

		Girdiler	<i>Sulump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w</i>	
		Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
		Kural	Korelasyon	Formül
18 derece	15. dakika	functions.LeastMedSq	0,5955	PV =5.8927 * S + 0.3147 * Y -9.1578 * Jh0 -2.2742 * Jh2 -0.401 * JY + 27.1818 * W - 71.2518
		functions.LinearRegression	-0,2389	PV =1.9415 * S -19.0755
		functions.PaceRegression	0,7555	PV =25.6964 +12.254 * Jh2 -17.9446 * K
		rules.M5Rules	-0,2389	PV =1.9415 * S - 19.0755
		trees.M5P	-0,2389	PV =1.9415 * S - 19.0755
	45. dakika	functions.LeastMedSq	0,7028	PV =1.7516 * S + -0.7869 * Y + -6.9909 * Jh0 + 18.7745 * Jh1 + 16.6673 * Jh2 -2017 * JY -19.8771 * K -3.917 * W -75.703
		functions.LinearRegression	0,652	PV = -3.2564 * Y +16.4944 * Jh1 +14.946 * Jh2 -57.0233
		functions.PaceRegression	0,6581	PV = -48.5906 + 7.7169 * Jh2
		trees.M5P	0,652	PV = -1.1359 * Y + 5.7539 * Jh1 + 5.2137 * Jh2 + 2.8156
30 derece	15. dakika	functions.LeastMedSq	0,8521	PV =2.5707 * S + 1.8808 * Jh0 -10.6761 * Jh1 +15.8283 * Jh2 -2.0844 * JY + 7.7609 * K +3.308 * W -75.809
		functions.LinearRegression	0,8232	PV =9.1064 * Jh1 -56.2551
		functions.PaceRegression	0,8232	PV =-56.2426 + 9.105 * Jh1
		rules.M5Rules	0,8313	PV = 9.1064 * Jh1 - 56.2551
		trees.M5P	0,8313	PV = 9.1064 * Jh1 - 56.2551
	45. dakika	functions.LeastMedSq	0,2032	PV =-3.6958 * S + 4.011 * Y + -3.6258 * Jh1 + 7.0135 * Jh2 -1.4002 * JY -12.5408 * K +11.0789 * W -33.872
		functions.LinearRegression	0,4519	PV = 1.3189 * Y -51.8374
		functions.PaceRegression	0,8211	PV = -6.1698 -7.4951 * Y + 64.2006 * Jh0 -7.1697 * W
		rules.M5Rules	0,4519	PV = 9.6301 * Jh1 - 49.8362
		trees.M5P	0,4519	PV = 9.6301 * Jh1 - 49.8362

Taze beton deneylerinin kendi aralarında regresyonunun hem 15. dakika hemde 45. dakikada alınan ölçümlerde, 18⁰C ve 30⁰C de R=0.70-0.99 aralığında olduğu belirlenmiştir. Reolojik parametrelerle taze beton sonuçlarının ilişkisinde 18⁰C’de 15. dakika üretimlerinde taze betonlar ile plastik viskozitenin 0,75, kayma eşiğinin 0,93, 30⁰C’de 15. dakika üretimlerinde plastik viskoziteyle 0,9767, kayma eşiğiyle 0,9925, 18⁰C’de 45.dakika üretimlerinde plastik viskoziteyle 0,8219 kayma eşiğiyle 0,9927 ve 30⁰C’de 45. dakika üretimlerinde plastik viskoziteyle 0,8211 kayma eşiğinde 0,906’ya kadar korelasyonlar ve formülasyonlar elde edilmiştir. Taze beton

deneyleriyle reolojik parametrelerin korelasyon ve formülasyon değerleri izelge 5.1 ve 5.2 te verilmiştir. Weka programıyla elde edilen analizler incelendiğinde tüm taze beton deneyleri karşılaştırıldığında çökme, j ring ve k çökme deneylerinin birbiriyle ilişkili olduğu, taze beton deneyleri ile kayma eşiğinin iyi korelasyon verdiği ve tek nokta taze beton deneyleriyle kayma eşiğini belirlemede kullanılabileceği, viskozitenin ise kayma eşiğine göre düşük korelasyon verdiği gözlemlenmiştir. Belirlenen reolojik parametrelerden hem kayma eşiği hemde plastik viskozitenin taze beton deneyleriyle ilişkilerinin beraber incelenmesi gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- ACI 304-2R, 1996. Placing Concrete by Pumping Methods. American Concrete Institute, 25p. USA.
- Akman, M.S., 1987. Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat fakültesi yayını, İstanbul, 161s.
- Akman, M.S., 1996. Süperakışkanlaştırıcı Katkıların Taze Beton İşlenebilmesindeki Sorunları. Dördüncü Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 55-71.
- Akman, M.S., 1996 Yücel, K.T., Effects of Cement – High Range Water Reducer - Fly Ash Ternary System on Concrete Workability. 4th International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, Gazimagusa, 5p.
- Akman, M.S., 1999. Yüksek Performanslı Betonların Taze Haldeki Özellikleri Üzerine Katkı Maddelerinin Etkisi. (Role of Admixtures on High Performance Concrete, RILEM TC 158 AHC, Monterrey, Meksika, Çeviren Mehmet Mutlu), SİKA-Teknik Bülteni sayı: 2000/1 ve 2000/2, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., İstanbul.
- ASTM C 29, 1997. Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, 4p. USA.
- ASTM C 494, 1999a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 9p. USA.
- ASTM C 597, 1997. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 4p. USA.
- ASTM C 618, 2000. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 4p. USA.
- ASTM C127, 2001. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, p. USA.
- ASTM C128, 1997. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, 5p. USA.
- ASTM C33, 2002. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, 8p. USA.
- Atzeni, C., Massida, L., Sanna, U., 1985. Comparison Between Rheological Models for Portland Cement Pastes, Cem. Concr. Res., 15, 511-519.

- Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., Larrard D. F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik, J. E., 2000. Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at LCPC. (Ed. Ferraris, C. F., Brower, L. E.), NISTIR 6819, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 157p.
- Banfill, P.F.G., 1991. Rheology of Fresh Cement and Concrete. E.&F.N. Spon Publisher, 373p. London.
- Banfill, P.F.G., 2003. The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review. 11th International Cement Chemistry Congress, 13p. Durban.
- Banfill, P.F.G., 1991. Rheology of Fresh Cement and Concrete. E.&F.N. Spon Publisher, London, 373p.
- Banfill, P.F.G., 2003. The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review. 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, 13p.
- Baoju, L., Youjun, X., Shiqiong, Z., Qianlian Y., 2000. Influence of Ultrafine Fly Ash Composite on the Fluidity and Compressive Strength of Concrete. Cement and Concrete Research, 30 (9), 1489-1493.
- Baradan, B., 1998. Yapı Malzemesi II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 207, İzmir, 222s.
- Bartos, P. J. M., 2000. Measurement of Key Properties of Fresh Self-compacting Concrete. CEN/STAR PNR Workshop (Measurement, testing and standardisation: Future needs in the field of construction materials), 6p.
- Bartos, P., 1992. Fresh Concrete Properties and Tests. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 291s.
- Basics of Rheology, 1991. Rheomat 115 Manuel, Mattler, 72p.
- Beaupré, D., Chapdelaine, F., Domone, P., Koehler, E., L., Shen, M., Sonebi, Struble, L., Tepke, D., Wallevik, O., Wallevik, J. E., 2003. Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB. (Ed. Ferraris, C. F., Brower, L. E.), NISTIR 7154, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. 116p.
- Bouzoubaâ, N., Lachemi, M., 2001. Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash. Cement and Concrete Research, 31 (3), 413-420.
- Cullen, R., West, R., 2004. The Development of a Hand-Held Rheology Tool for characterizing the Rheological Properties of Fresh Concrete. Annual Transactions of The Nordic Rheology Society, 12, 71-78.

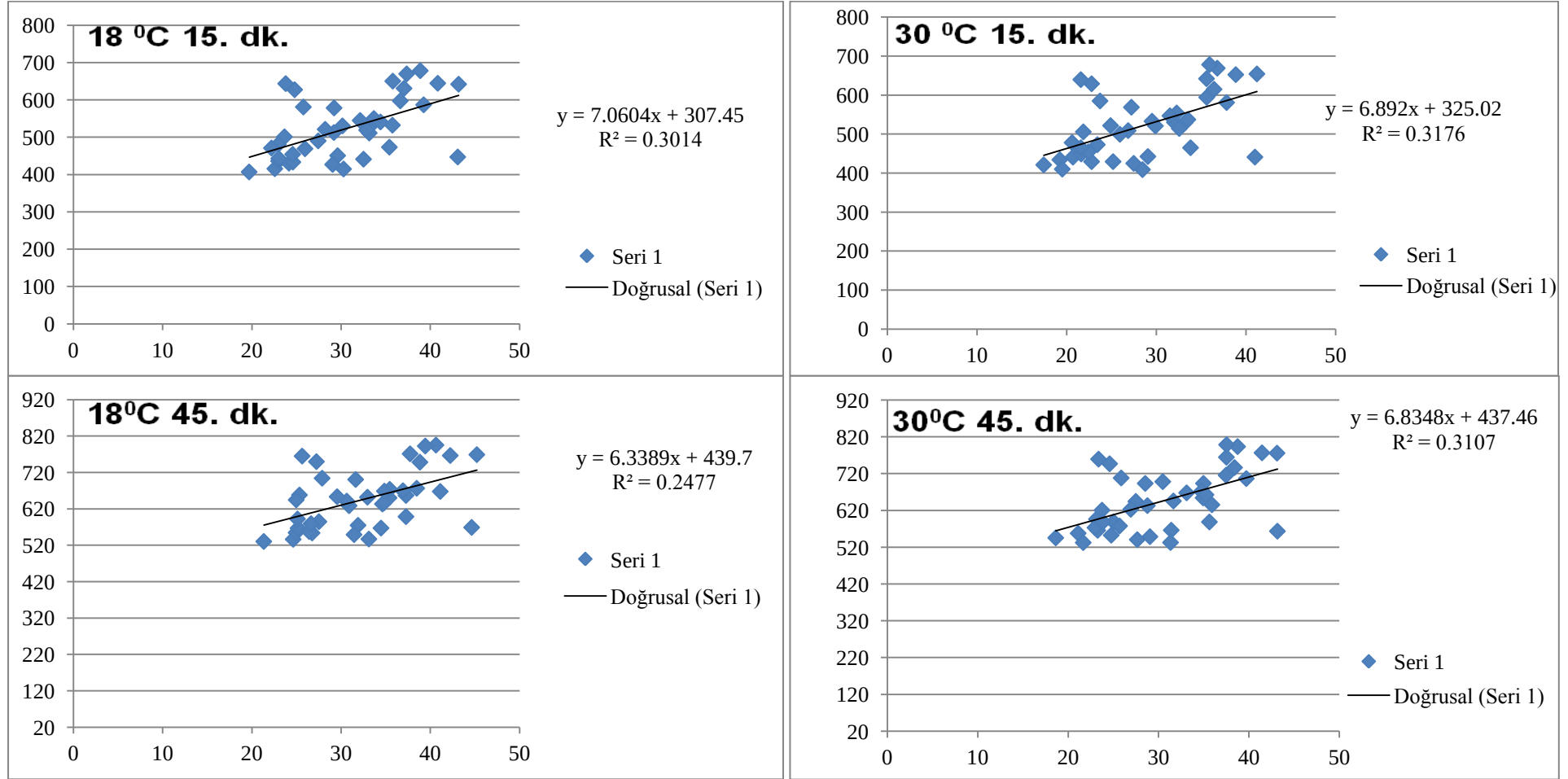
- EFNARC, 2002. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Farnham, UK. 32p.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741 s.
- Ferraris, C. F., Brower, L., Ozyildirim, C., Daczko, J., 2000. Workability of Self-Compacting Concrete. PCI/FHWA/FIB International Symposium on High Performance Concrete. 10p.
- Ferraris, C. F., 1999. Measurement of The Rheological Properties of High Performance Concrete. Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology, 104 (5), 461-478.
- Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L. N., Bager, D. H., Wallevik, O., 2002. The Effect OF Measuring Procedure on the Apparent Rheological Properties of Self-Compacting Concrete. Cement and Concrete Research, 32 (11), 1791-1795.
- Koehler E. P., Fowler D. W., 2003. Summary of Concrete Workability Test Methods. The University of Texas, International Center for Aggregates Research (ICAR), Report Number: ICAR 105-1, 92p.
- Larrard, F. D., Ferraris, C. F., Sedran, T., 1998. Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley Material. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 31, 494-498.
- Leslie J. S., Xihuang, .J, 2000 Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology (Principles, Techniques, and Applications), Noyes Publications, (Edited by V. S. Ramachandran and James J. Beaudoin), Institute for Research in Construction National Research Council Canada, 333-367. Ottawa, Canada.
- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M., 1999. Her Yönüyle Beton. THBB yayını, İstanbul. 121s.
- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M., 1999. Her Yönüyle Beton. THBB yayını, İstanbul. 121s.
- Özkul, H., Sağlam, A. R., 2002. Süperakışkanlaştırıcı ve Mineral Katkıların Betonun Reolojik Özelliklerine Etkisi. TÜBİTAK Proje No: İNTAG-655, Ankara.
- Sağlam A. R., Mutlu, M., Taze Betonda İşlenebilmenin Ölçülmesi ve Deney Aletlerinin İrdelenmesi. Sika Yapı Kimyasalları, 8 s., (2001).
- Shi, Y., Matsui, I., Feng , N., 2002. Effect of Compound Mineral Powders on Workability and Rheological Property of HPC. Cement and Concrete Research, 32 (1), 71-78.

- Tattersall G. H., 1992. Workability and Quality Control of Concrete, E.&F.N. Spon Publ., London. 262s.
- Tattersall, G. H. ve Banfill P. F. G., 1983. The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Books Limited, London, 353p.
- TS 639, 1975. Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü, 14s. Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, 46s. Ankara.
- TS EN 12350-1, 2002. Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 1: Numune Alma. Türk Standartları Enstitüsü, 2s. Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım. Türk Standartları Enstitüsü, 24s. Ankara.
- TS EN 196-3, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 8s. Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar, Bileşim, Özellikleri ve Uygunluk Değerleri. Türk Standartları Enstitüsü, 25s. Ankara.
- TS EN 450-1, 2006. Uçucu kül-Betonda kullanım için – Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriteri. Türk Standartları Enstitüsü, 35s. Ankara.
- TS EN 934-2, 2002. “Kimyasal katkılar - Beton, Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları - Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, 5s. Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., 2003 Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 139s.
- UCL 2005. Civil and Environmental Engineering, Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete (Final Report). European Union Growth Contract No. G6RD-CT-2001-00580, Project Coordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK, 62p.
- Vincent A. H., Ferraris, C. F., 2001. Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems. NIST Special Publication 946, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 36p.
- Wallevik, J. E., 2006. Relationship Between the Bingham Parameters and Slump. Cement and Concrete Research, 36 (7), 1214-1221.
- Wong G. S., Alexander A. M., Haskins R., Poole T. S., Malone P.G., Wakeley L., 2001. Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report. Publication No. FHWA-RD-00-025, Performing Organization Report No. ERDC-TR-S-XX-00, Structures Laboratory USAE Research and Development Center (ERDC) Halls Ferry Road, Vicksburg, 102p.

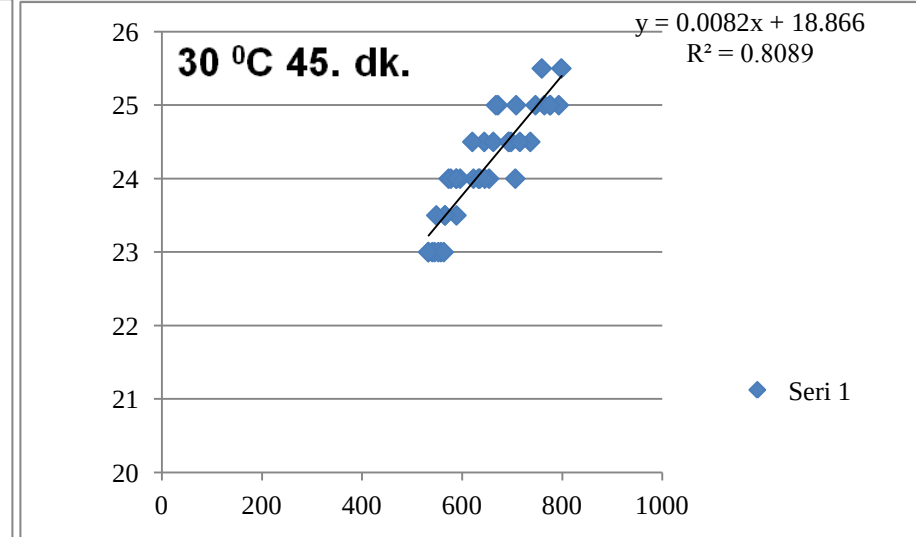
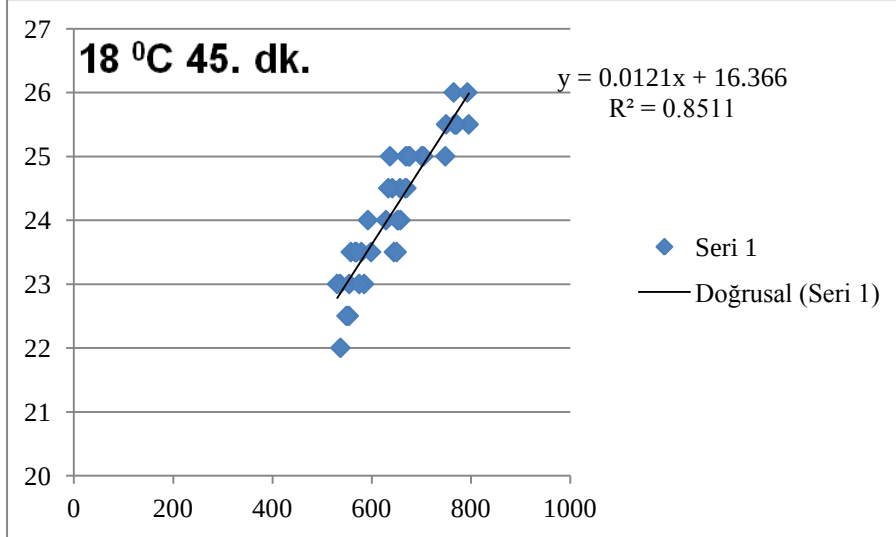
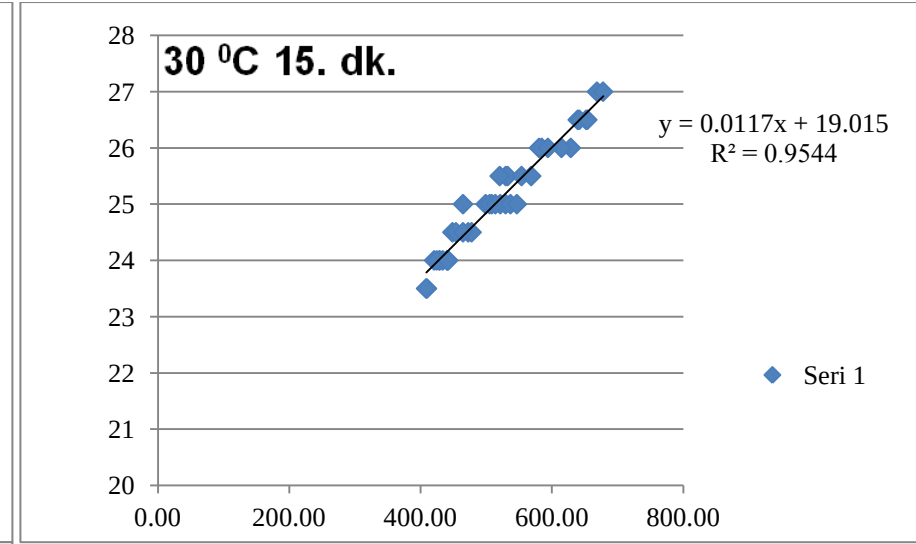
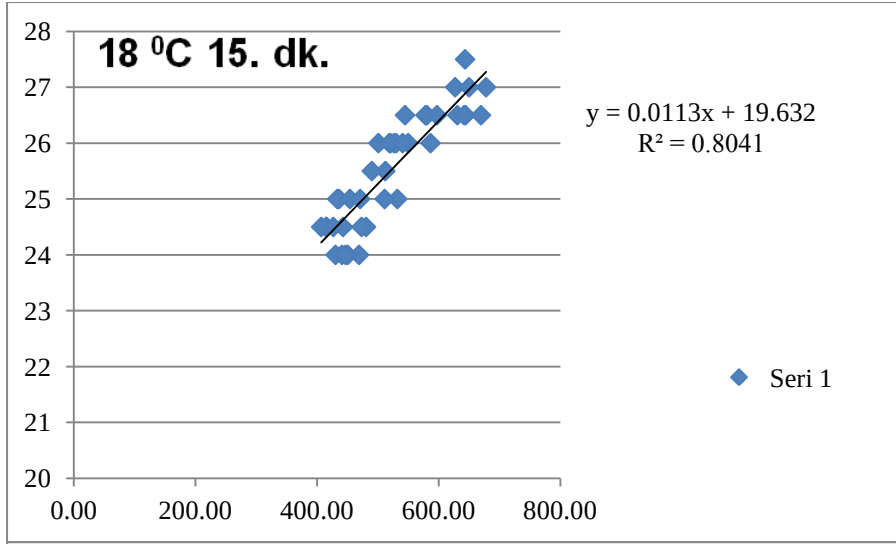
- Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S., 2002. Optimum Mix Parameters of High-Strength Self-Compacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 32 (3), 477-480.
- Yazıcı, Ş., 2002. Değişik Akışkanlaştırıcıların Betondaki Performansları. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4 (2), 41-52.
- Yücel, K.T., 1997. Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi. (Doktora Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yücel, K.T., 1993. Taze Betonun İşlenebilirliğinin Teorik ve Deneysel İfadeleri. (Doktora semineri), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zain, M. F. M., Safiuddin, M., Yusof, K. M., 1999. Study on the Properties of Freshly Mixed High Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (9), 1427-1432.

EKLER

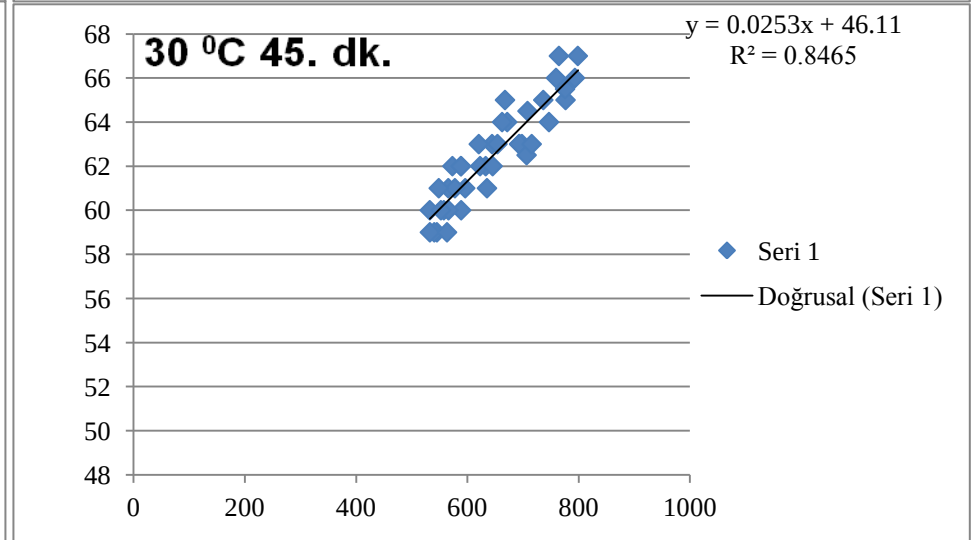
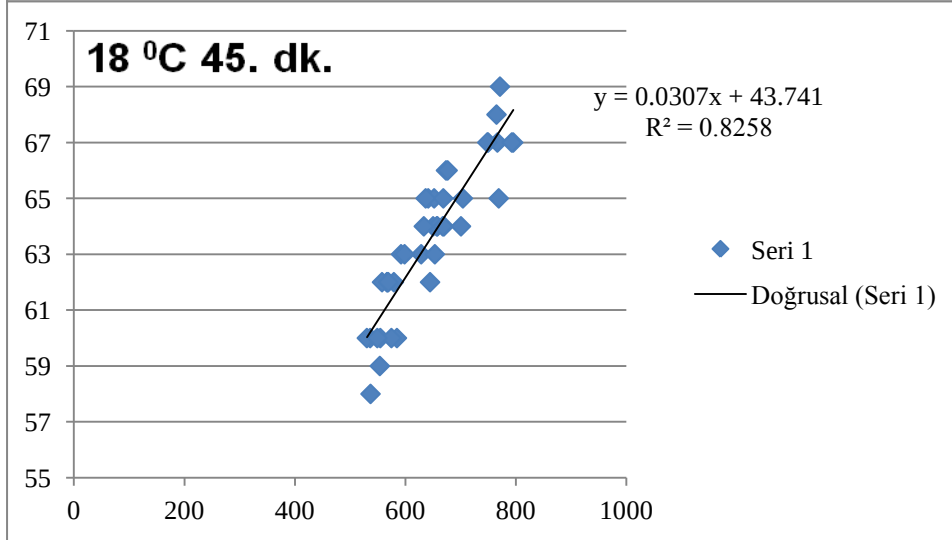
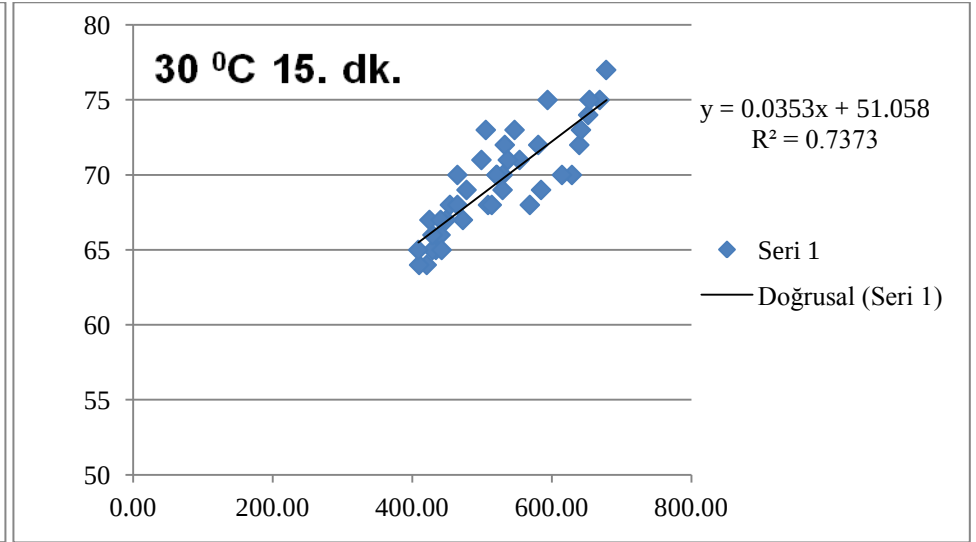
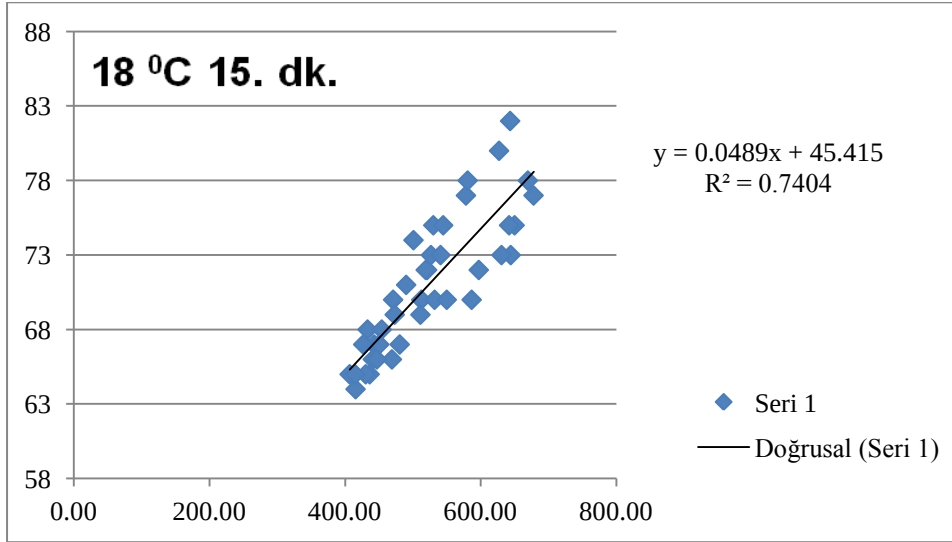
EK A. Taze Beton Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması



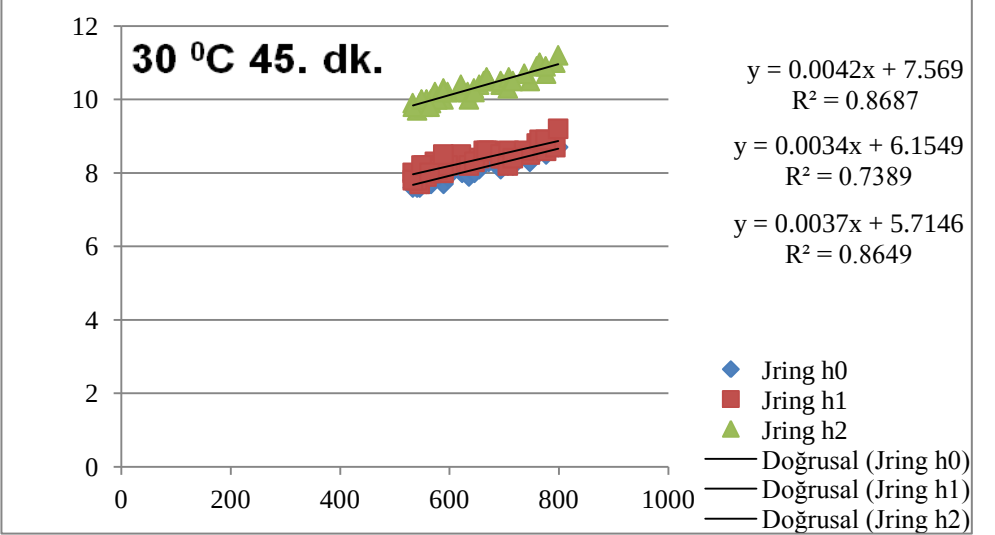
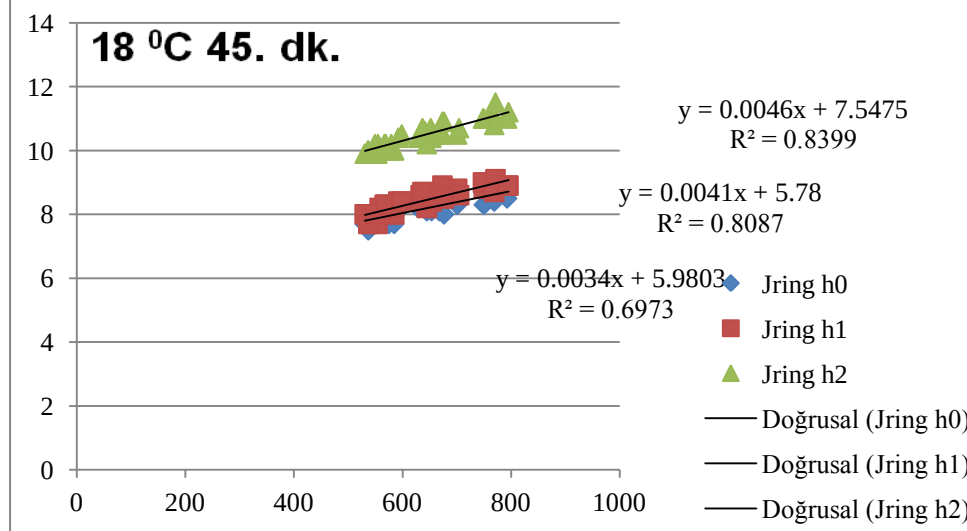
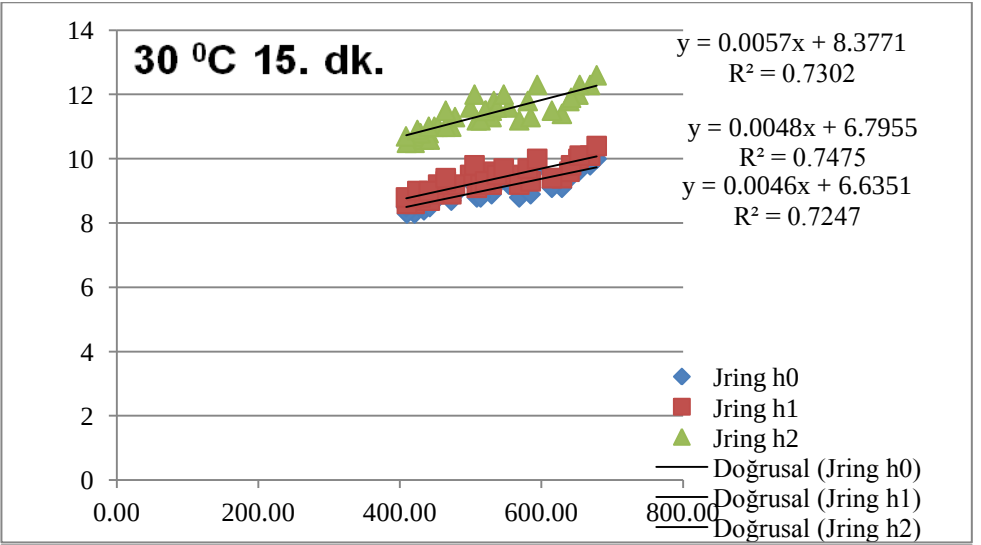
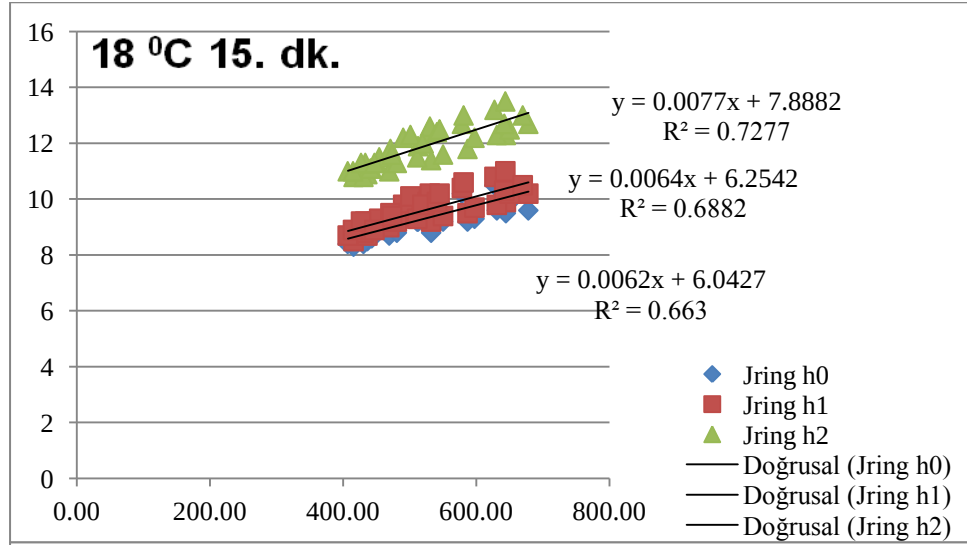
Şekil A.1.CTPT den elde edilen Plastik Viskozite ve Kayma Eşliğinin ilişkisi



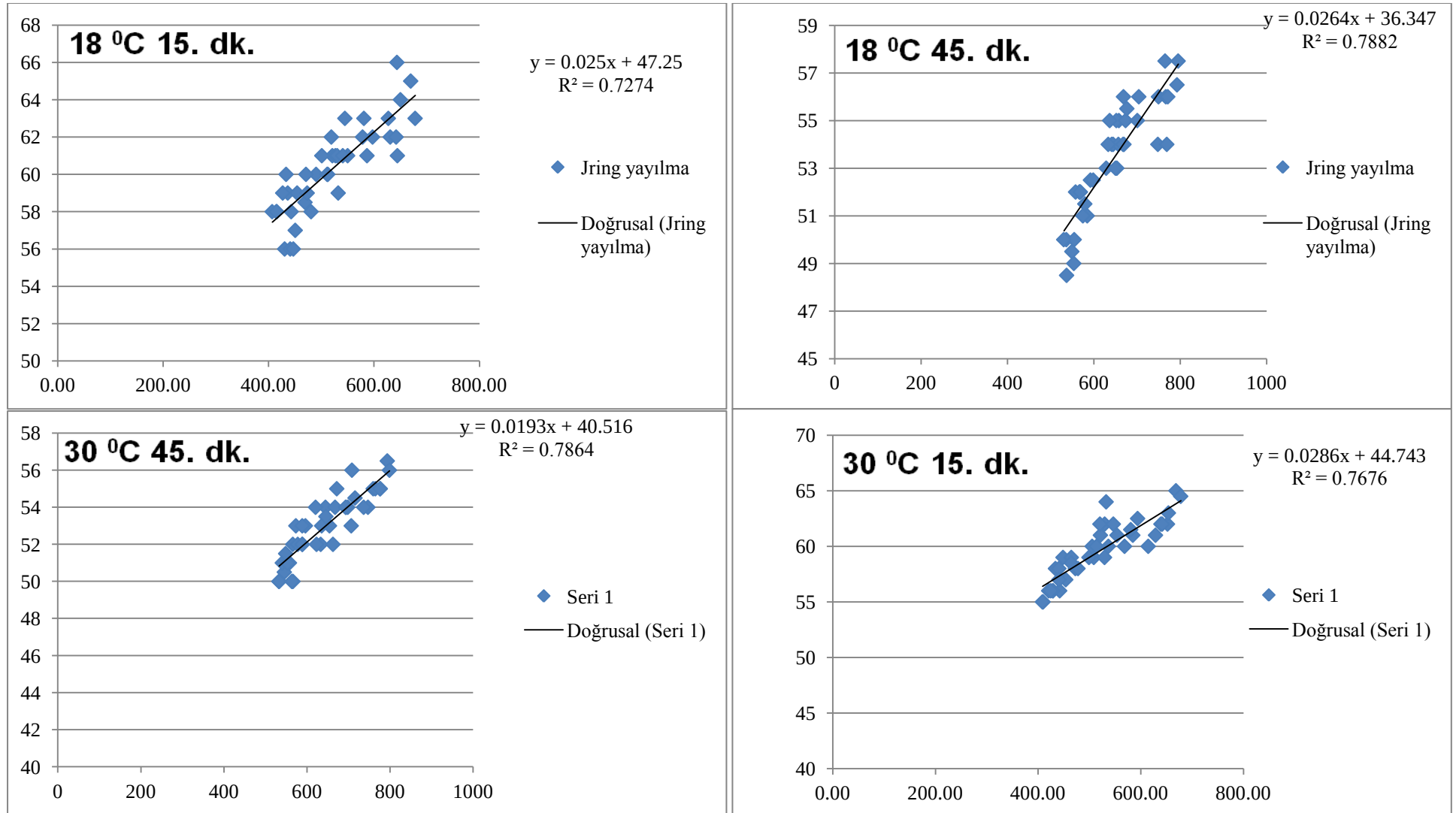
Şekil A.2. Çökme- Kayma Eşiği ilişkisi



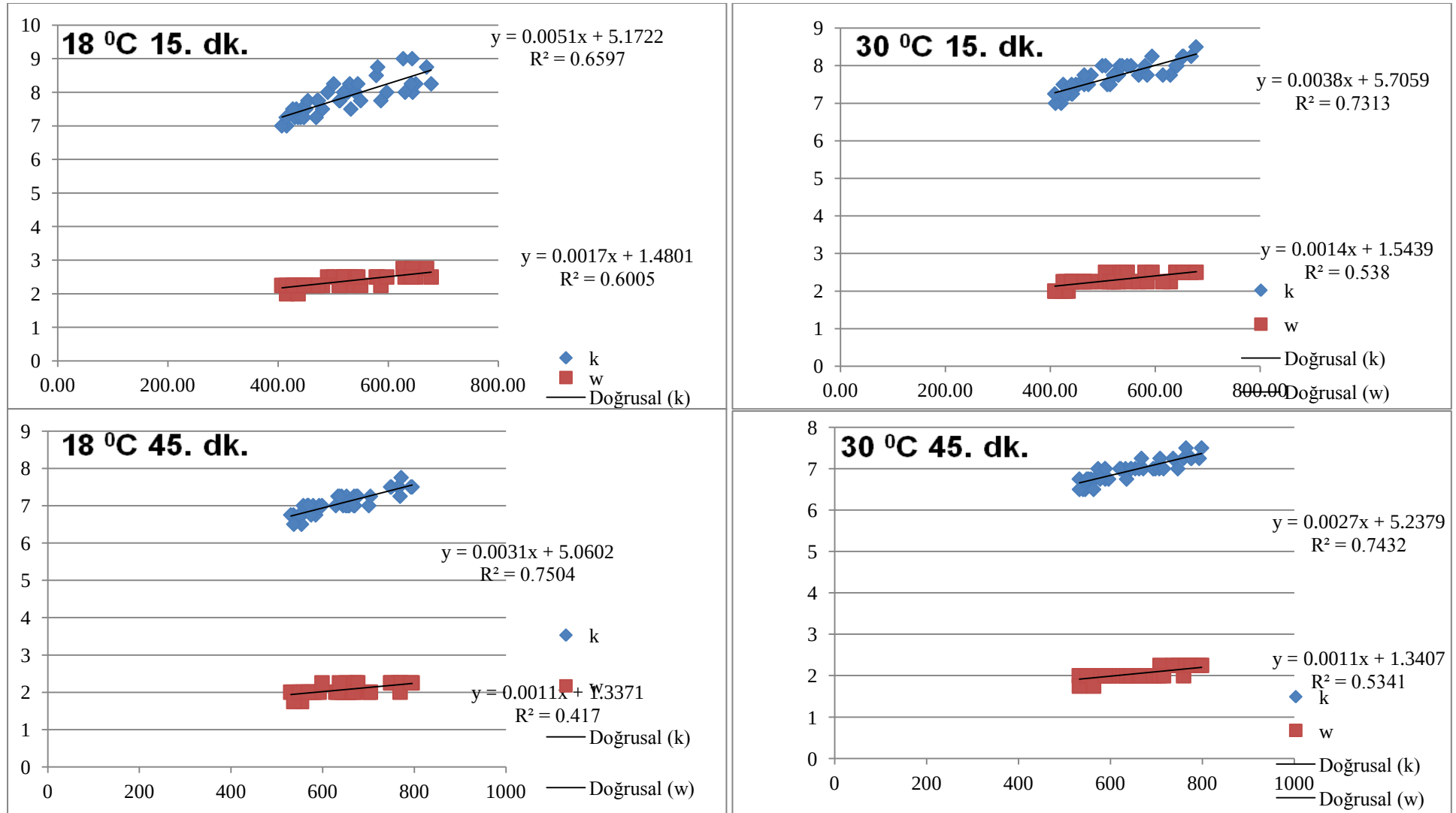
Şekil A.3. Yayılma-Kayma Eşiği ilişkisi



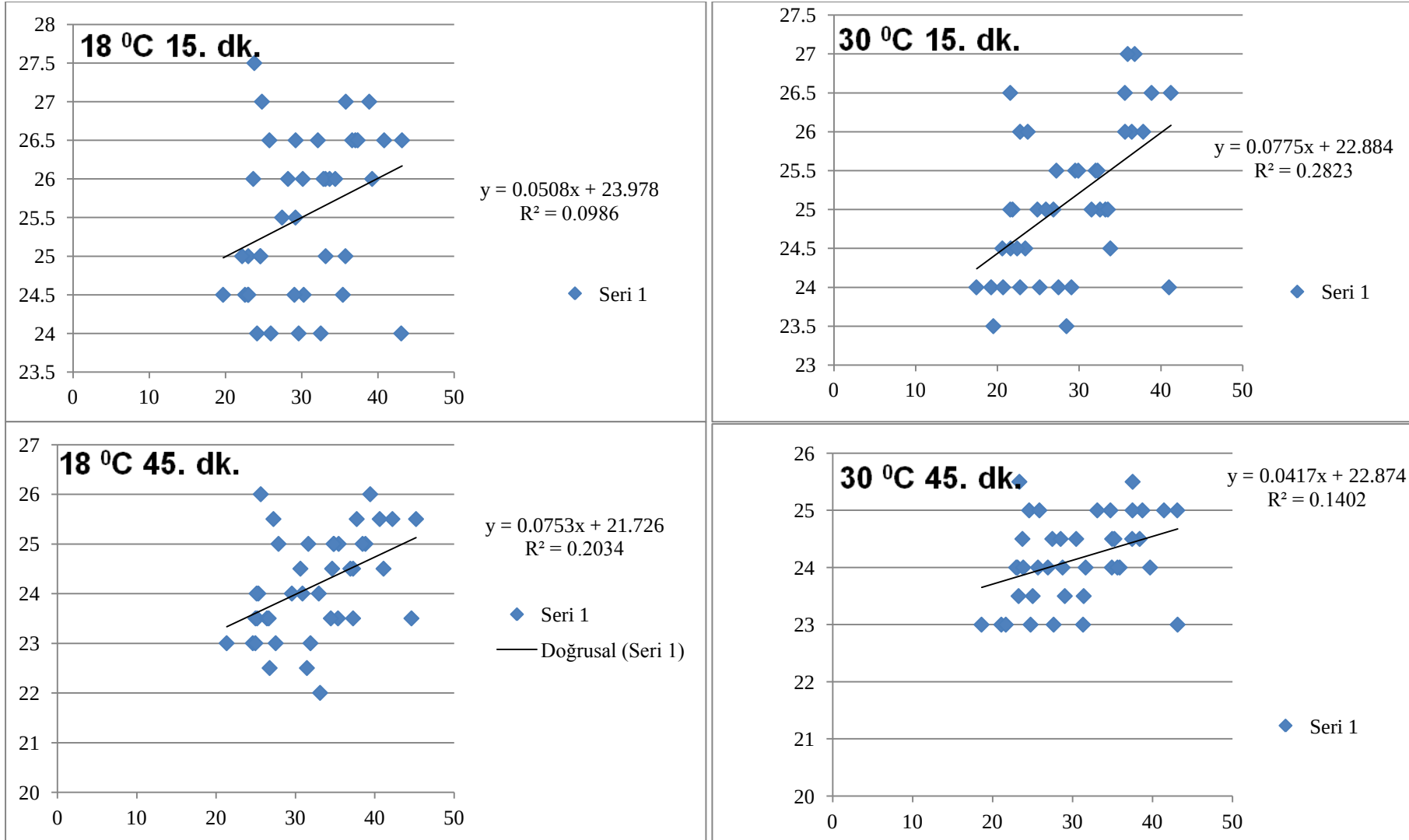
Şekil A.4. J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 ile Kayma Eşiği ilişkisi



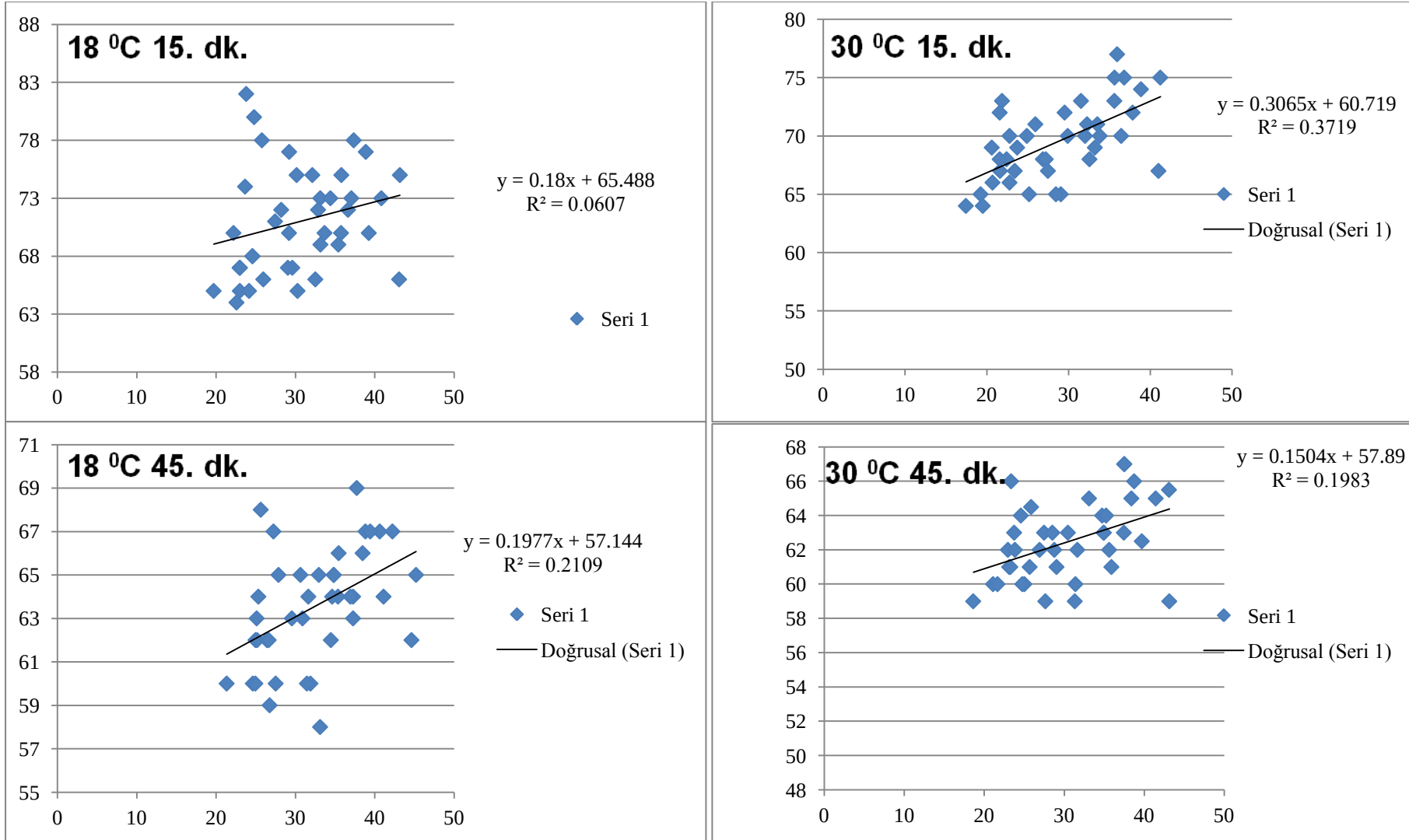
Şekil A.5. J ring yayılması-Kayma Eşiği ilişkisi



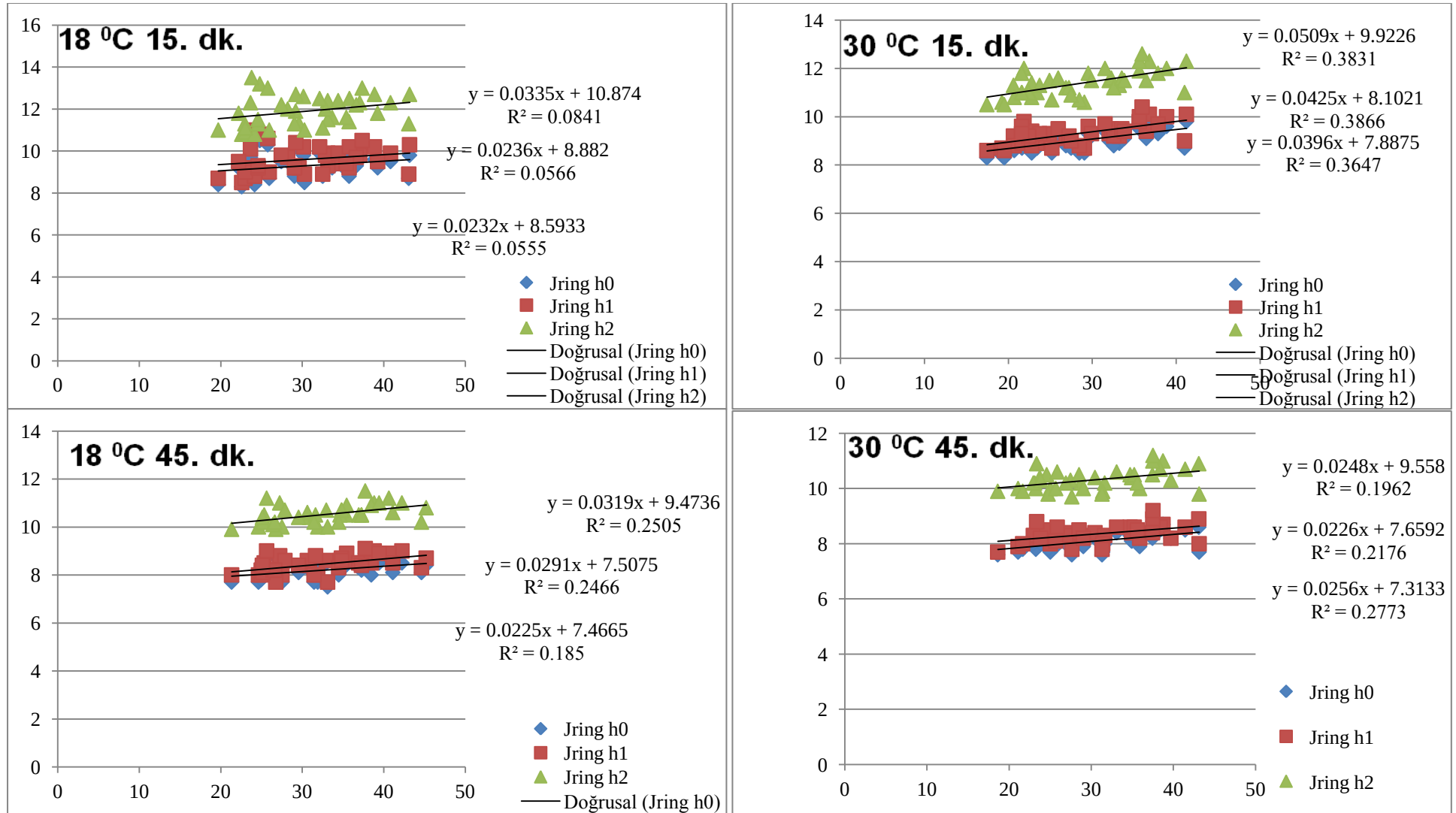
Şekil A.6. K-çökme deneyinden elde edilen k,w değerleri ile Kayma Eşiği ilişkisi



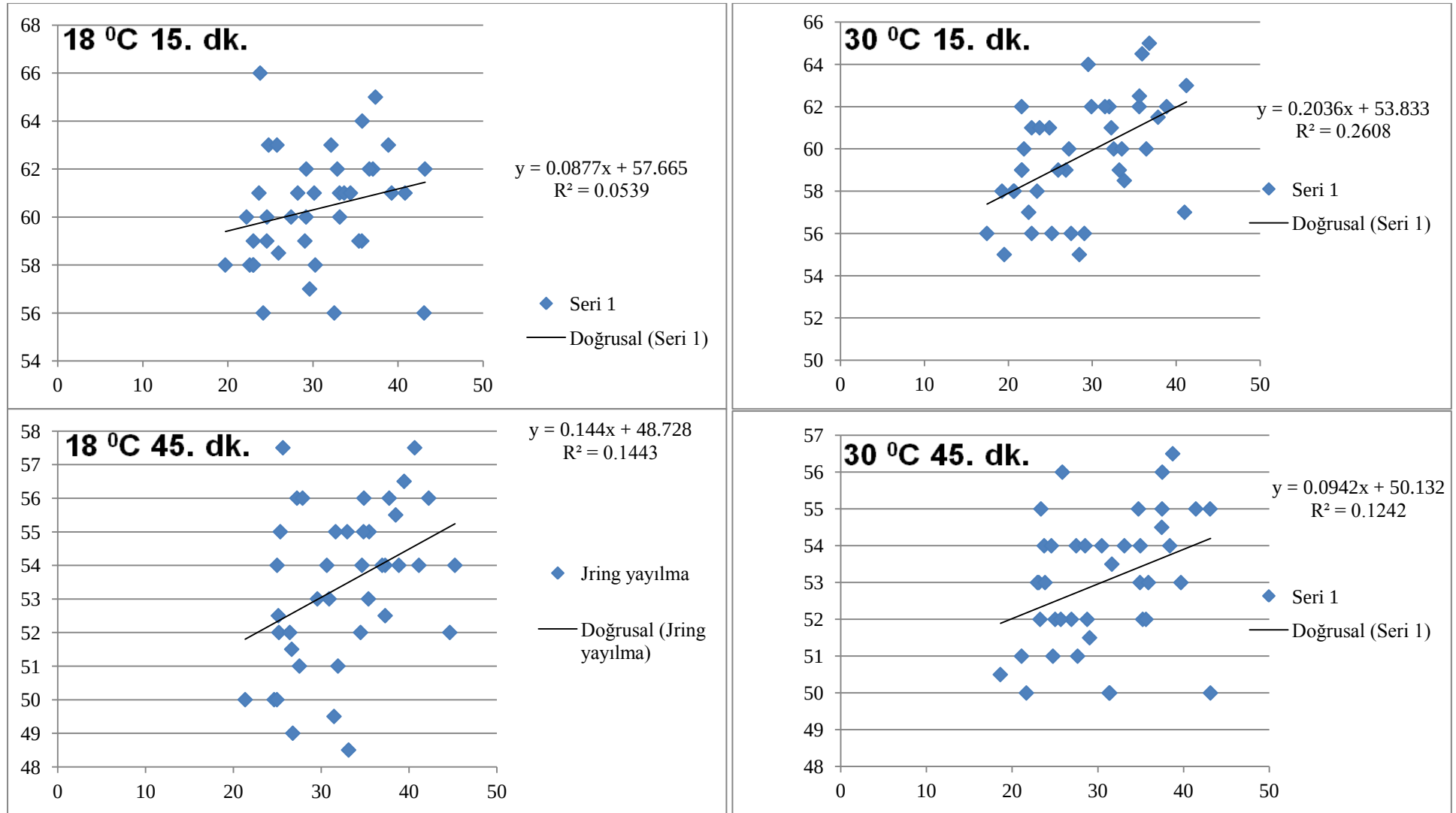
Şekil A.7. Çökme-Plastik Viskozite ilişkisi



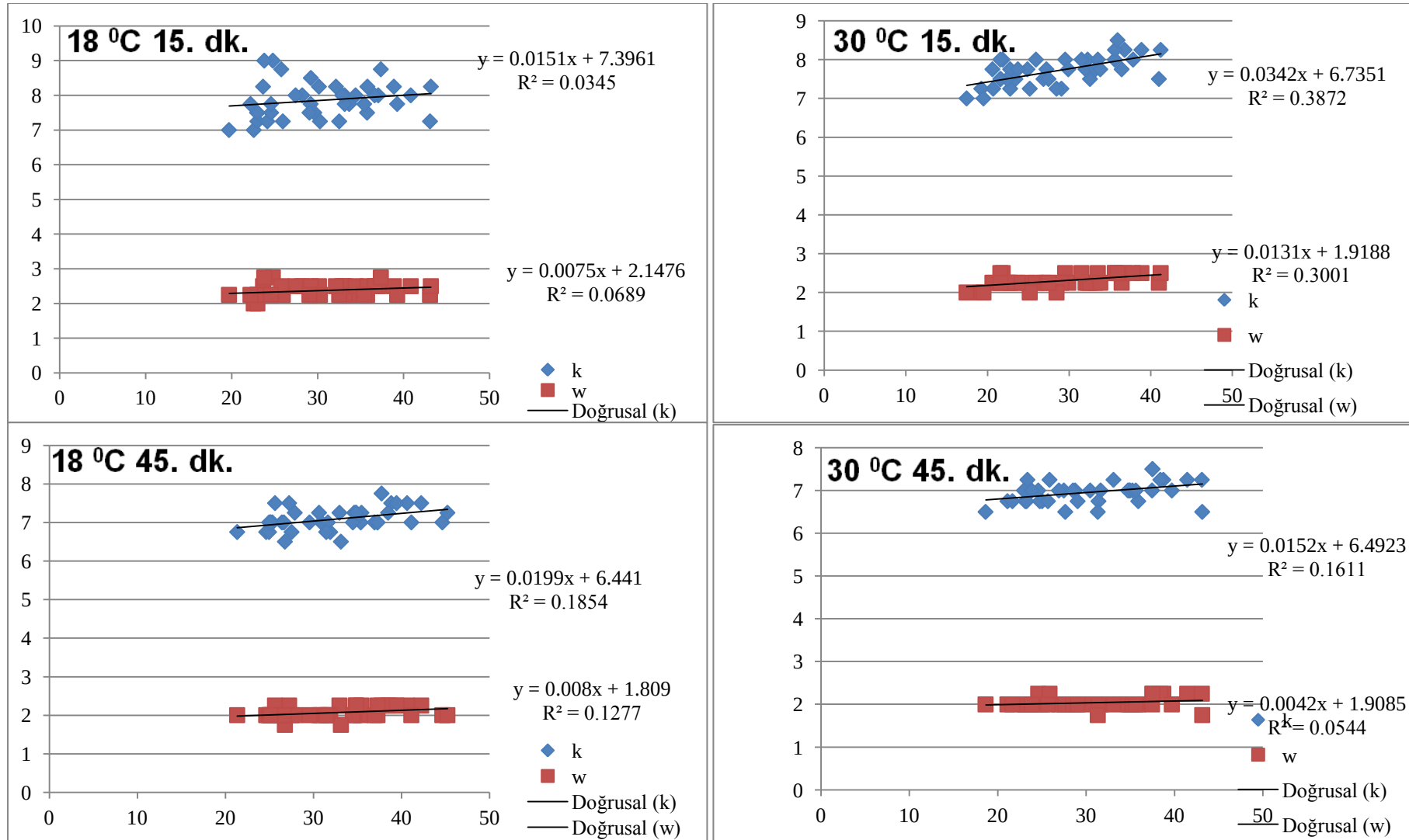
Şekil A.8. Çökme yayılması-Plastik viskozite ilişkisi



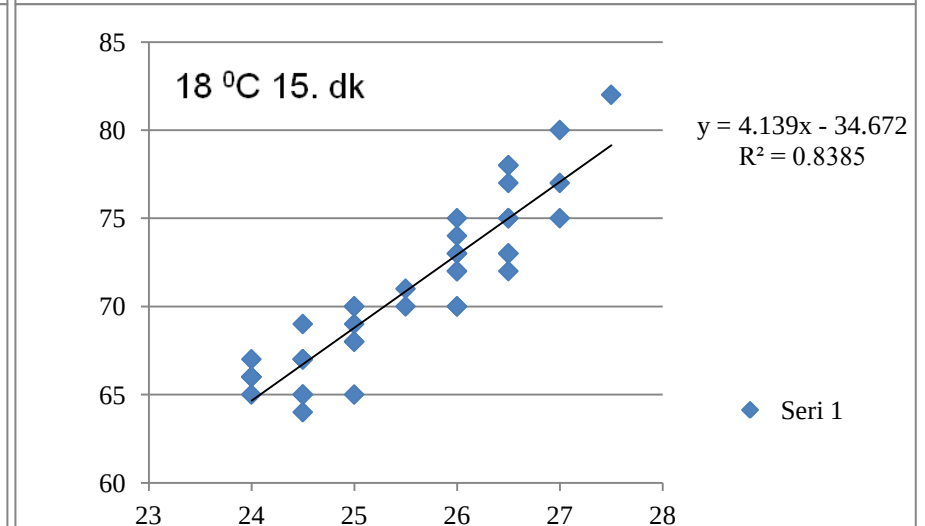
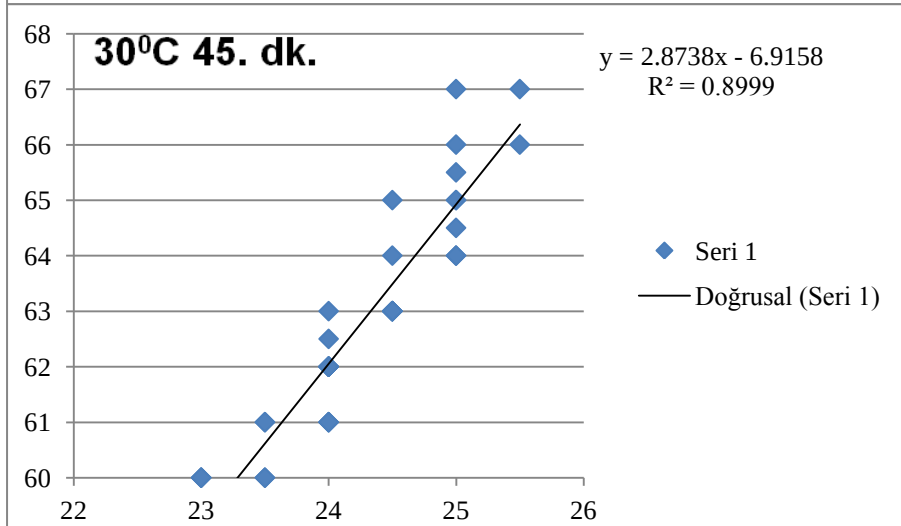
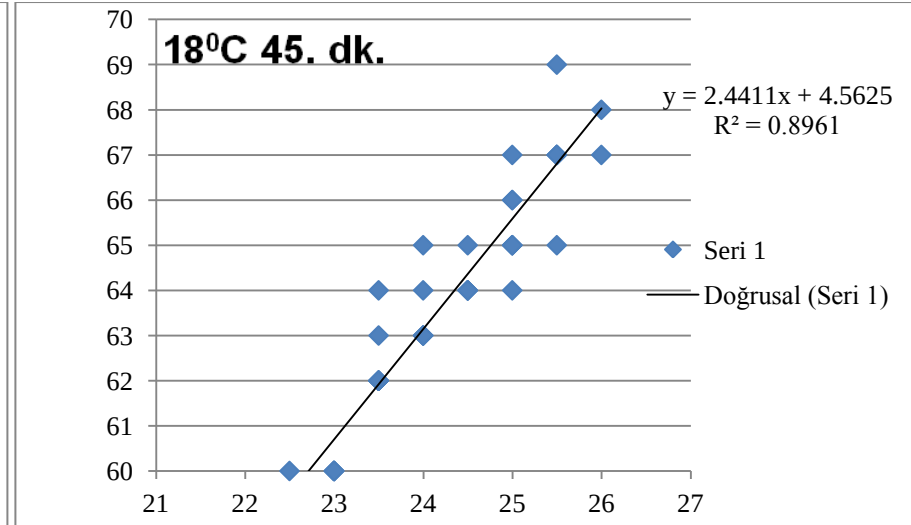
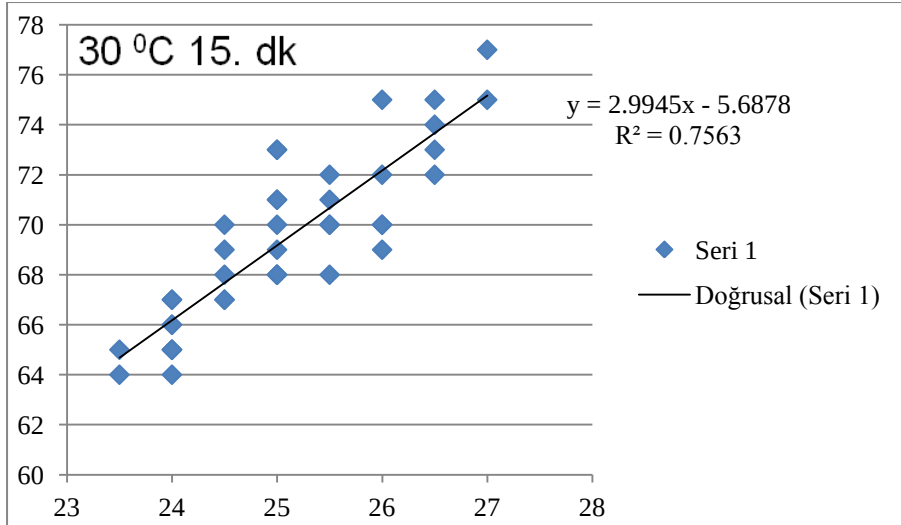
Şekil A.9. J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 değerleriyle Plastik Viskozite ilişkisi



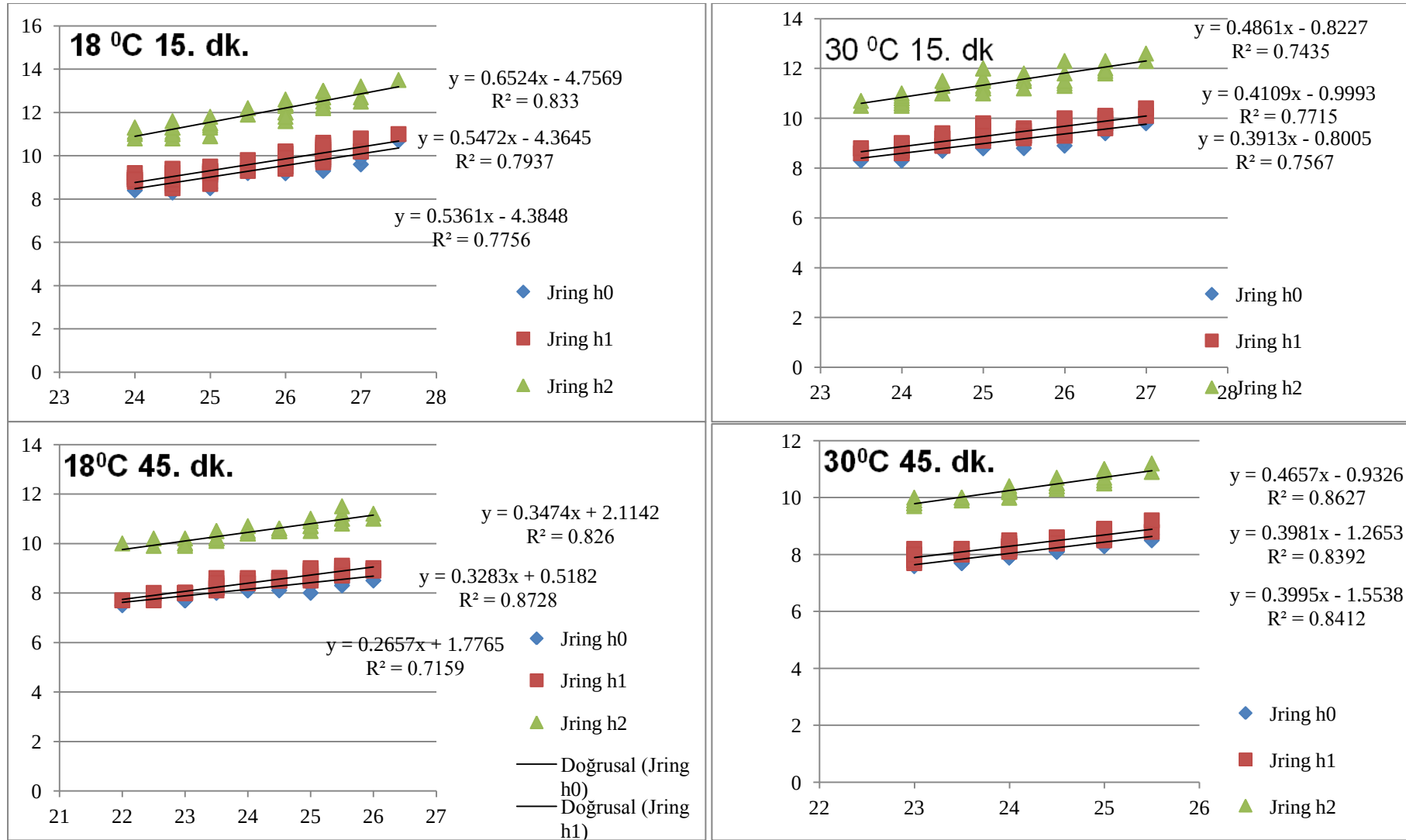
Şekil A.10. Jring yayılması-Plastik Viskozite ilişkisi



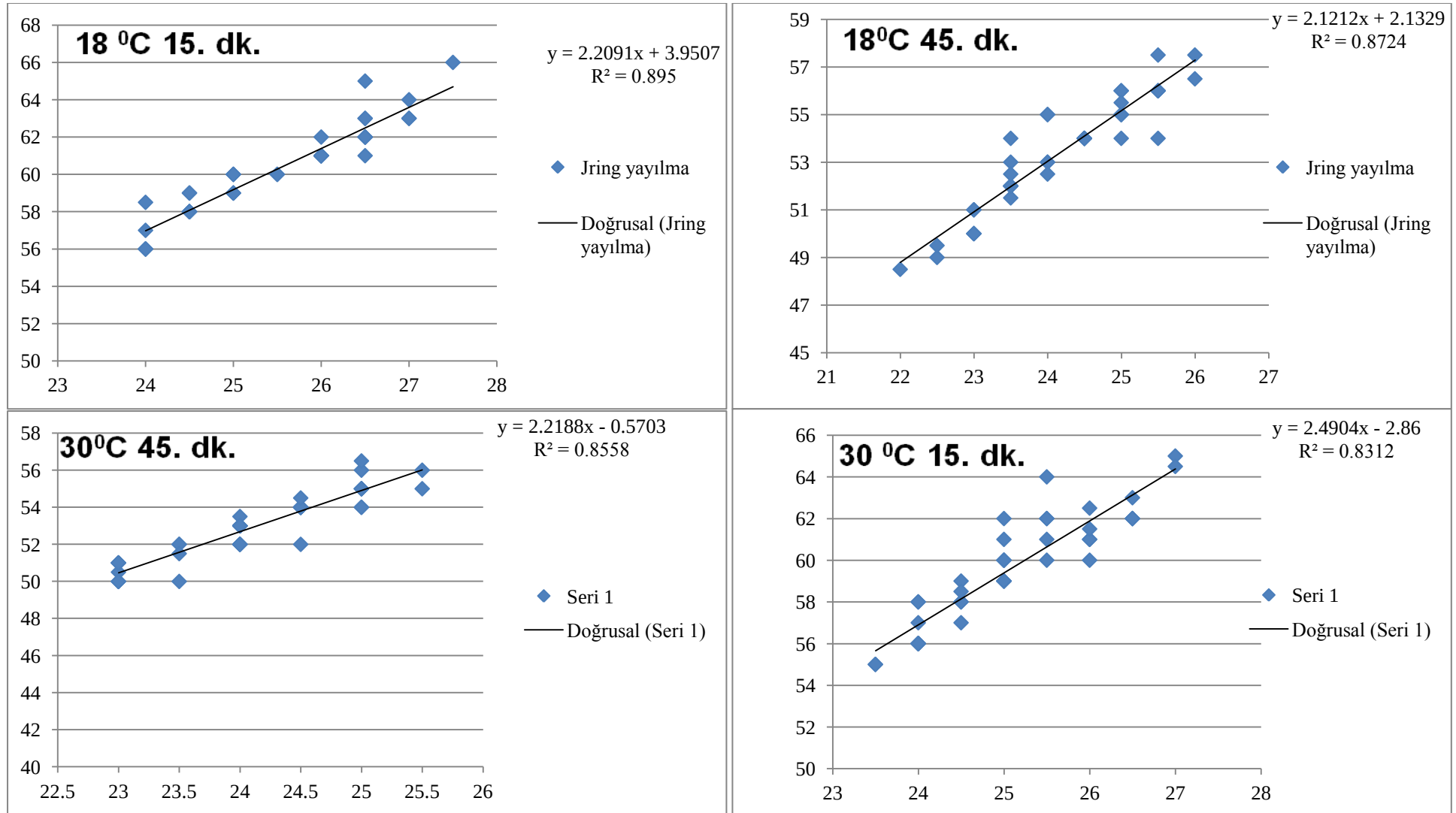
Şekil A.11. K-çökme deney aletinden elde edilen k, w değerleriyle Plastik Viskozite ilişkisi



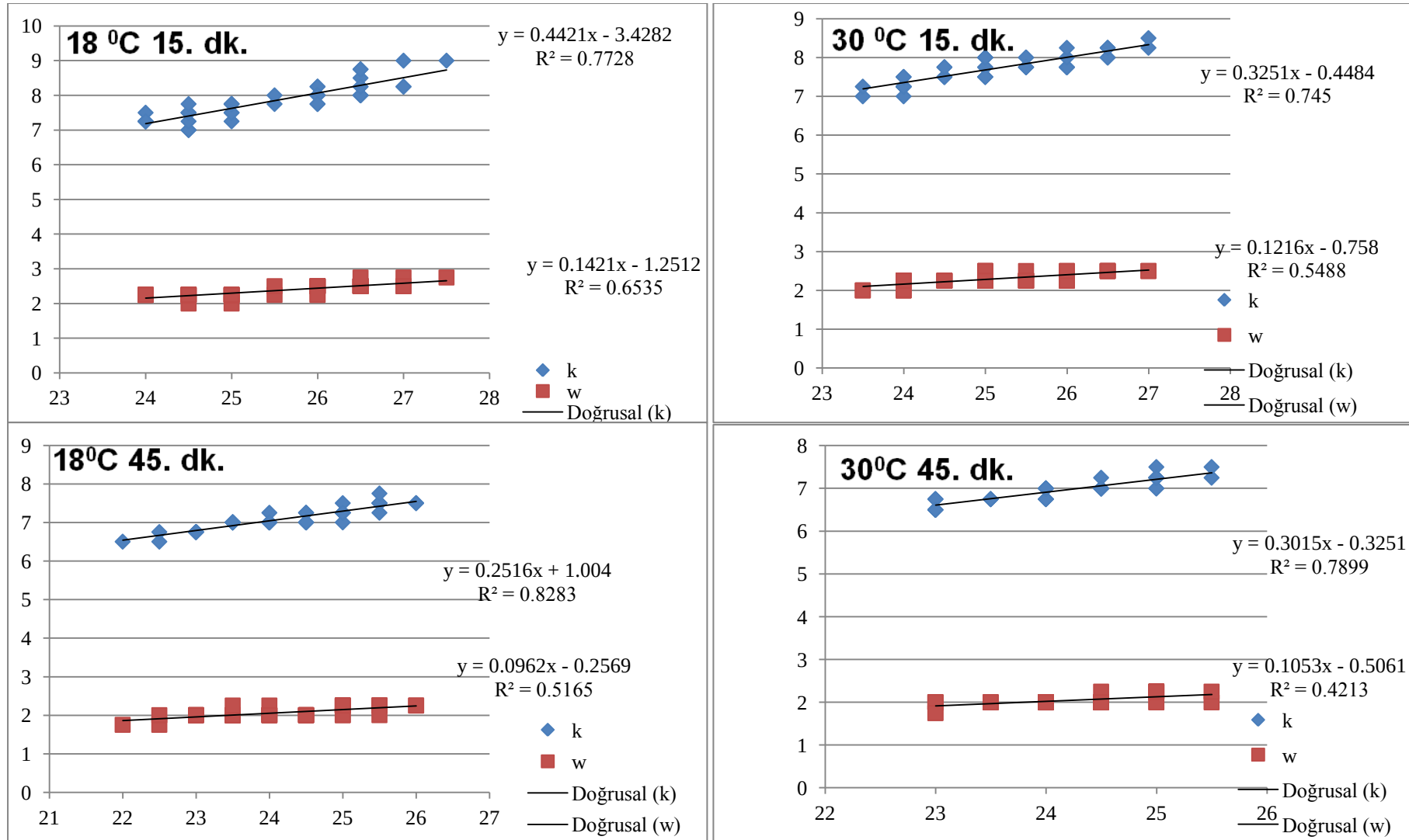
Şekil A.12. Çökme-Çökme Yayılması ilişkisi



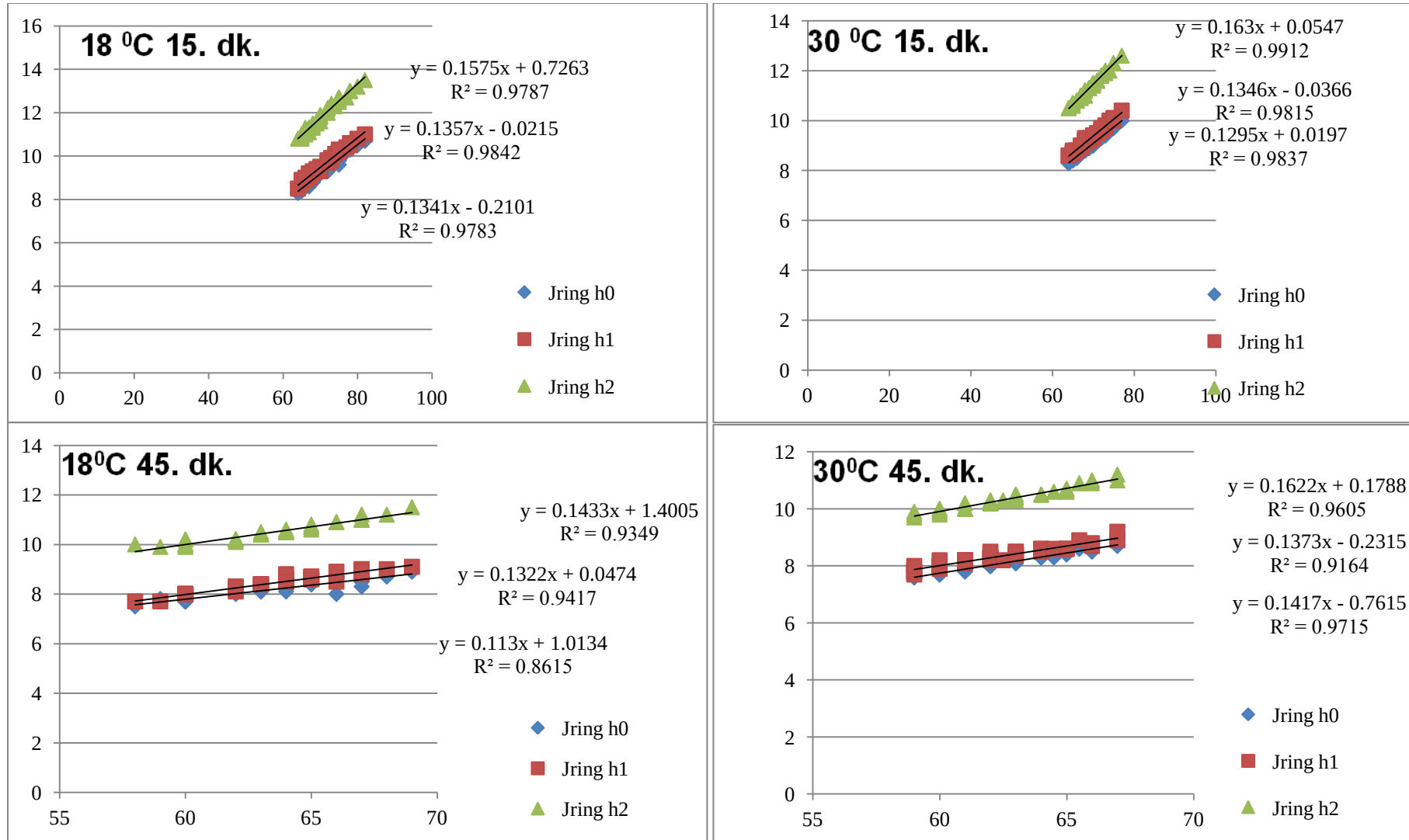
Şekil A.13. Çökme-j ring deneyinden elde edilen h_0, h_1, h_2 değerleri ilişkisi



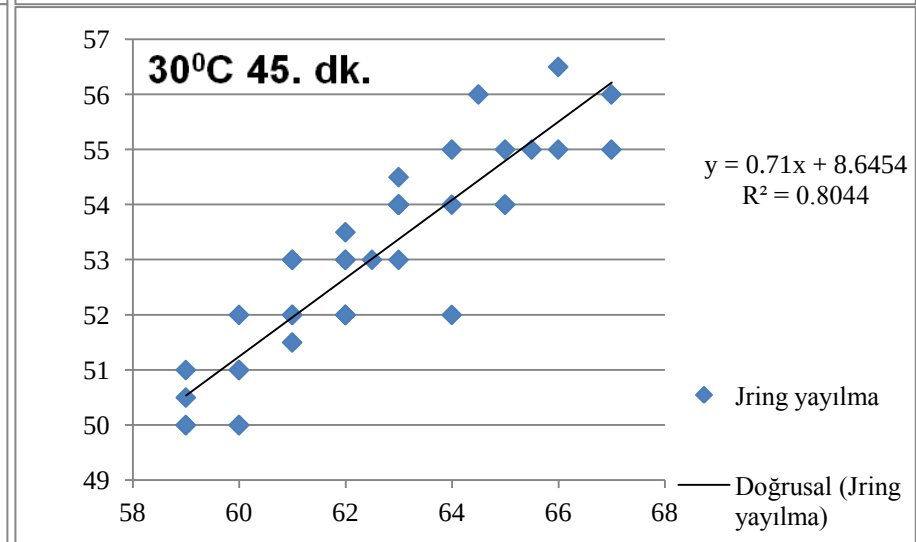
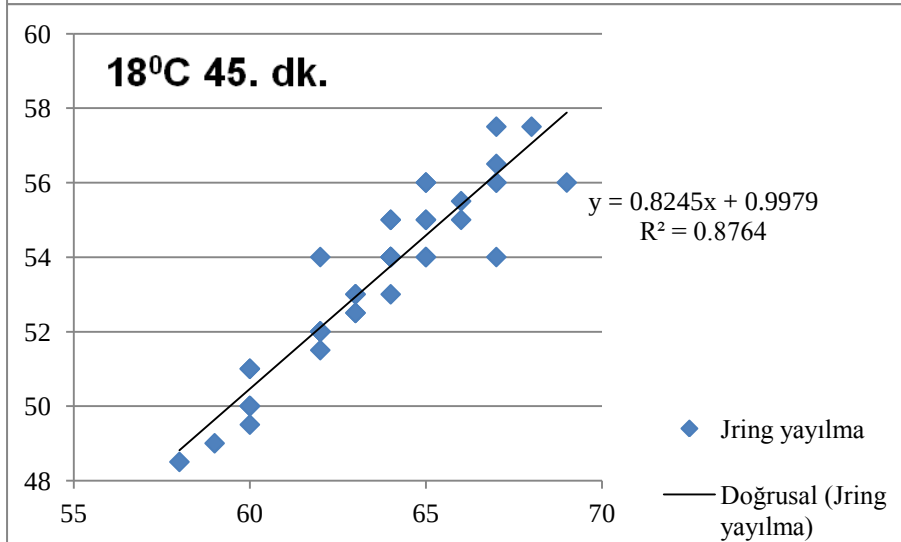
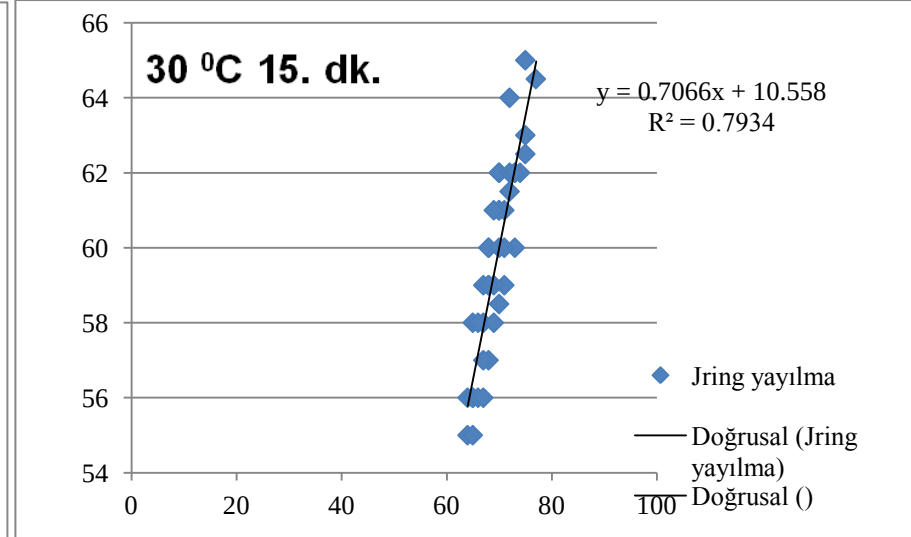
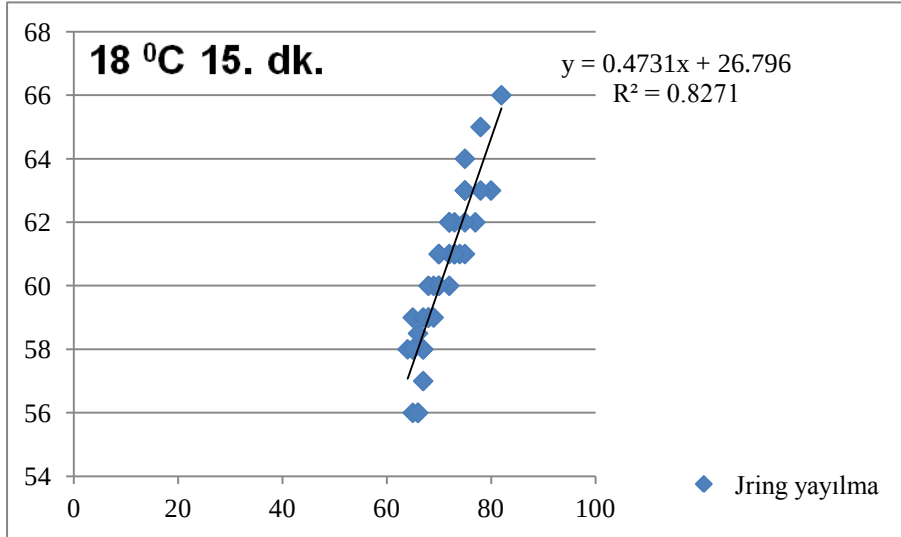
Şekil A.14. Çökme-Jring Yayılma ilişkisi



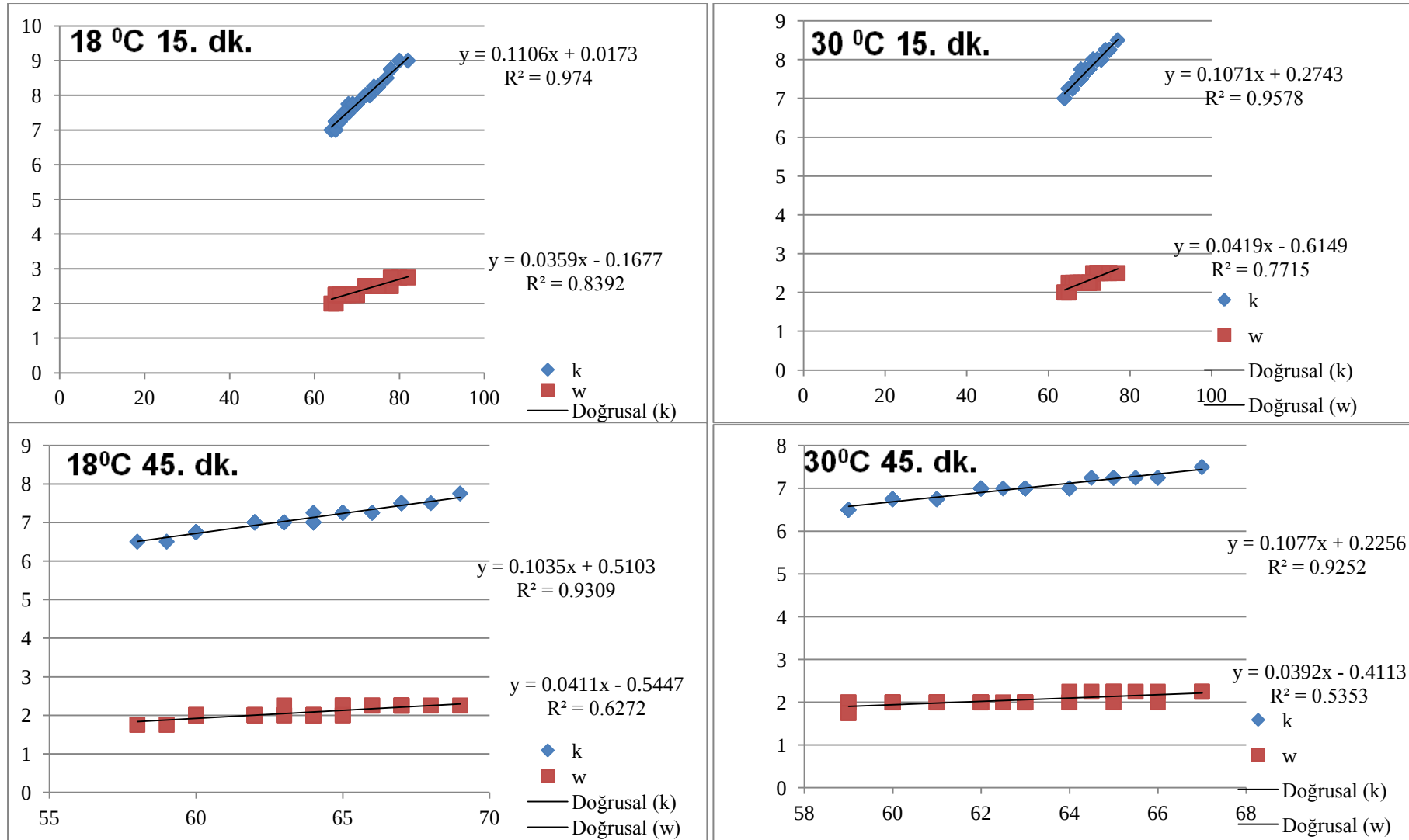
Şekil A.15. Çökme-K-çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi



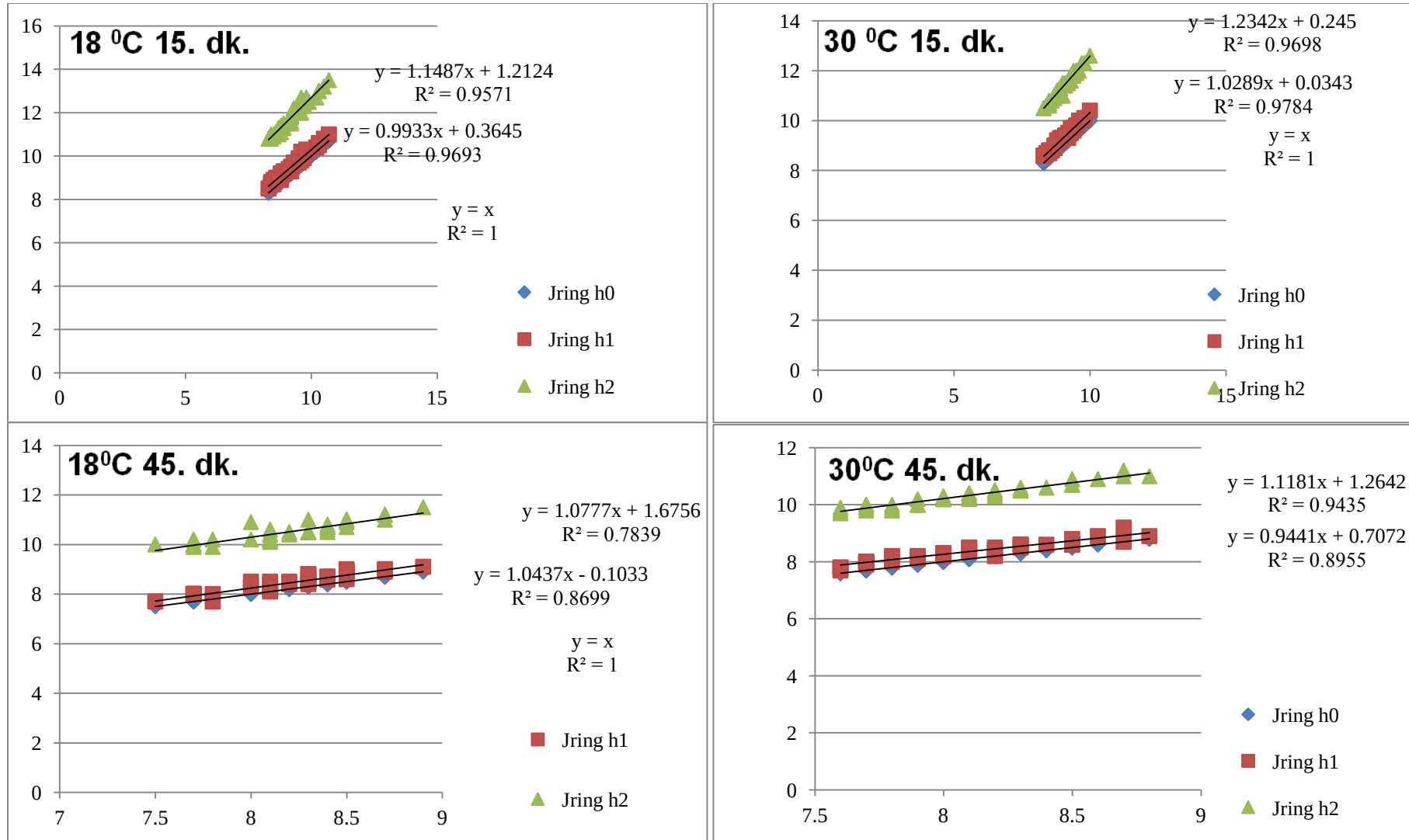
Şekil A.16. Çökme yayılması-J ring deneyinden elde edilen h_0 , h_1 , h_2 değerlerinin ilişkisi



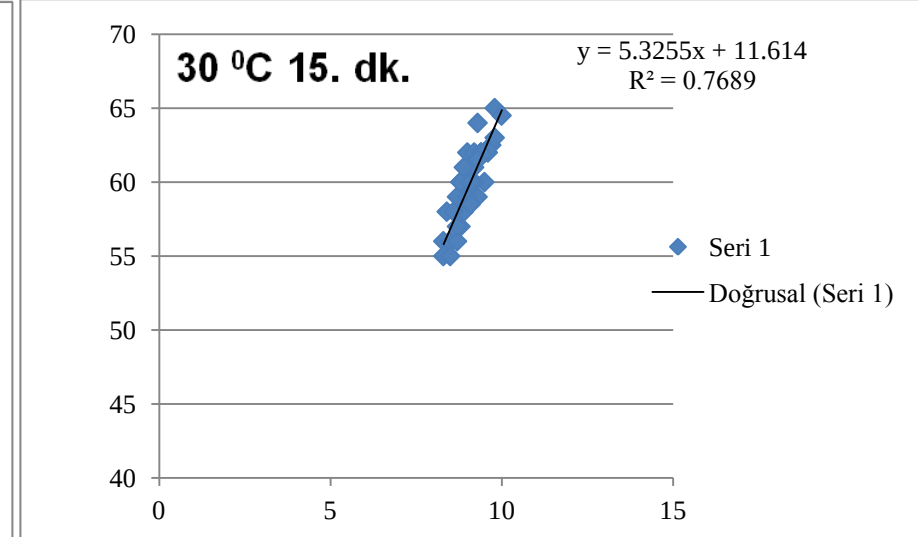
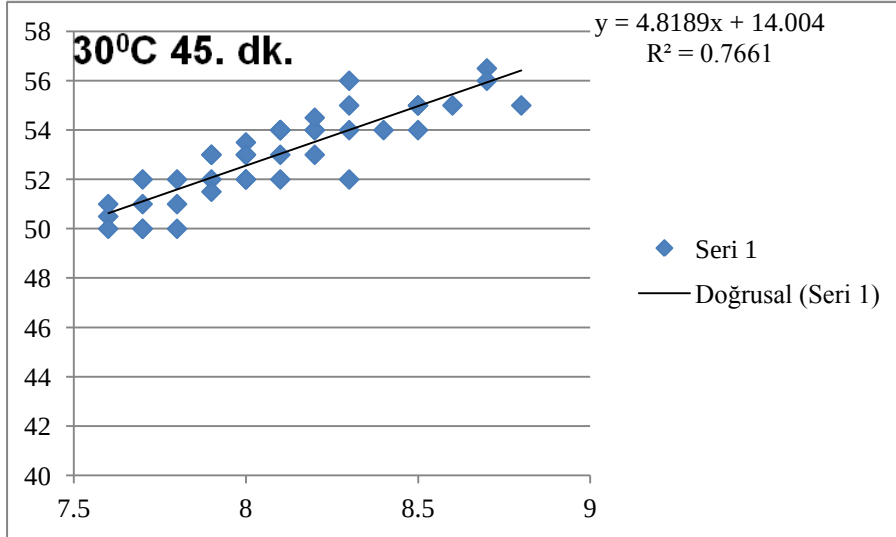
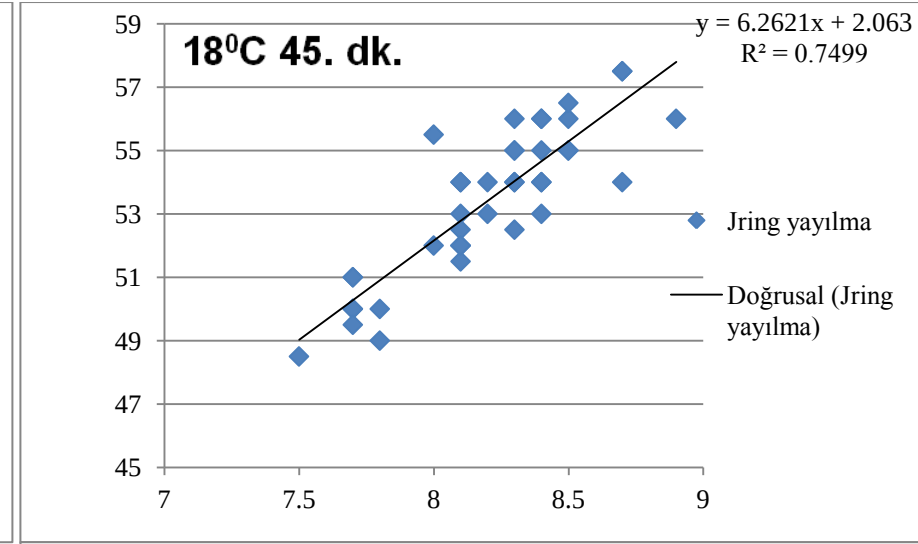
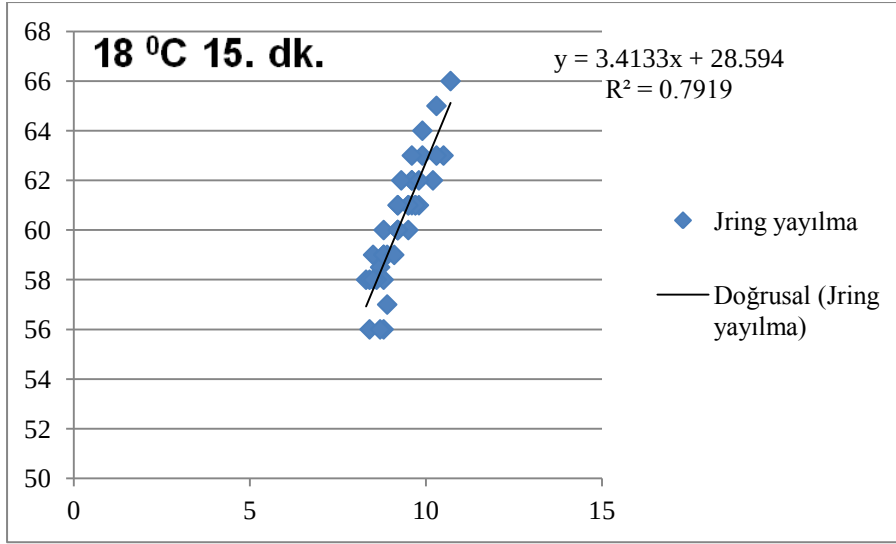
Şekil A.17. Çökme Yayılması-J ring Yayılması ilişkisi



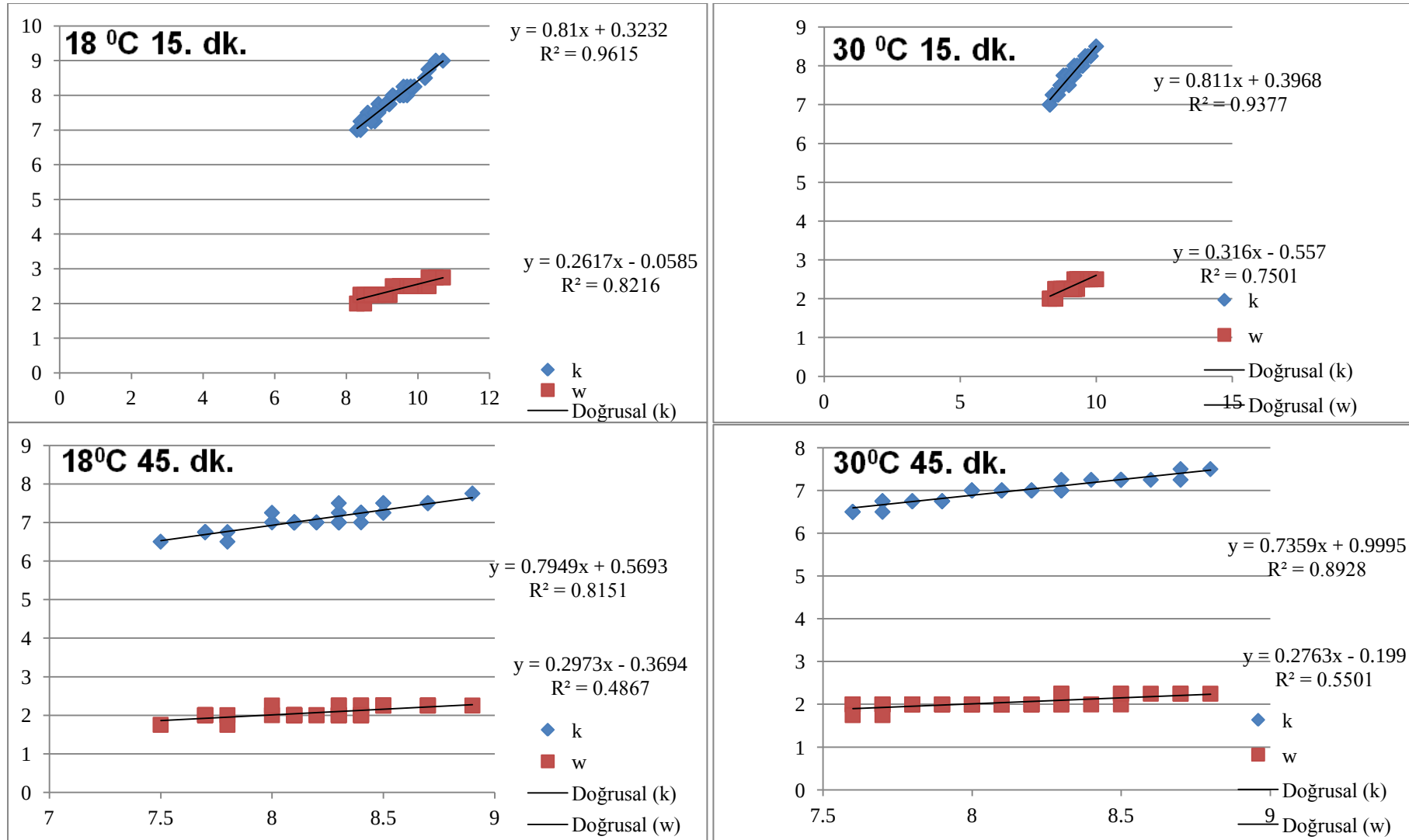
Şekil A.18. Çökme Yayılmaları-K-çökme deneyinden elde edilen k ve w değerlerinin ilişkisi



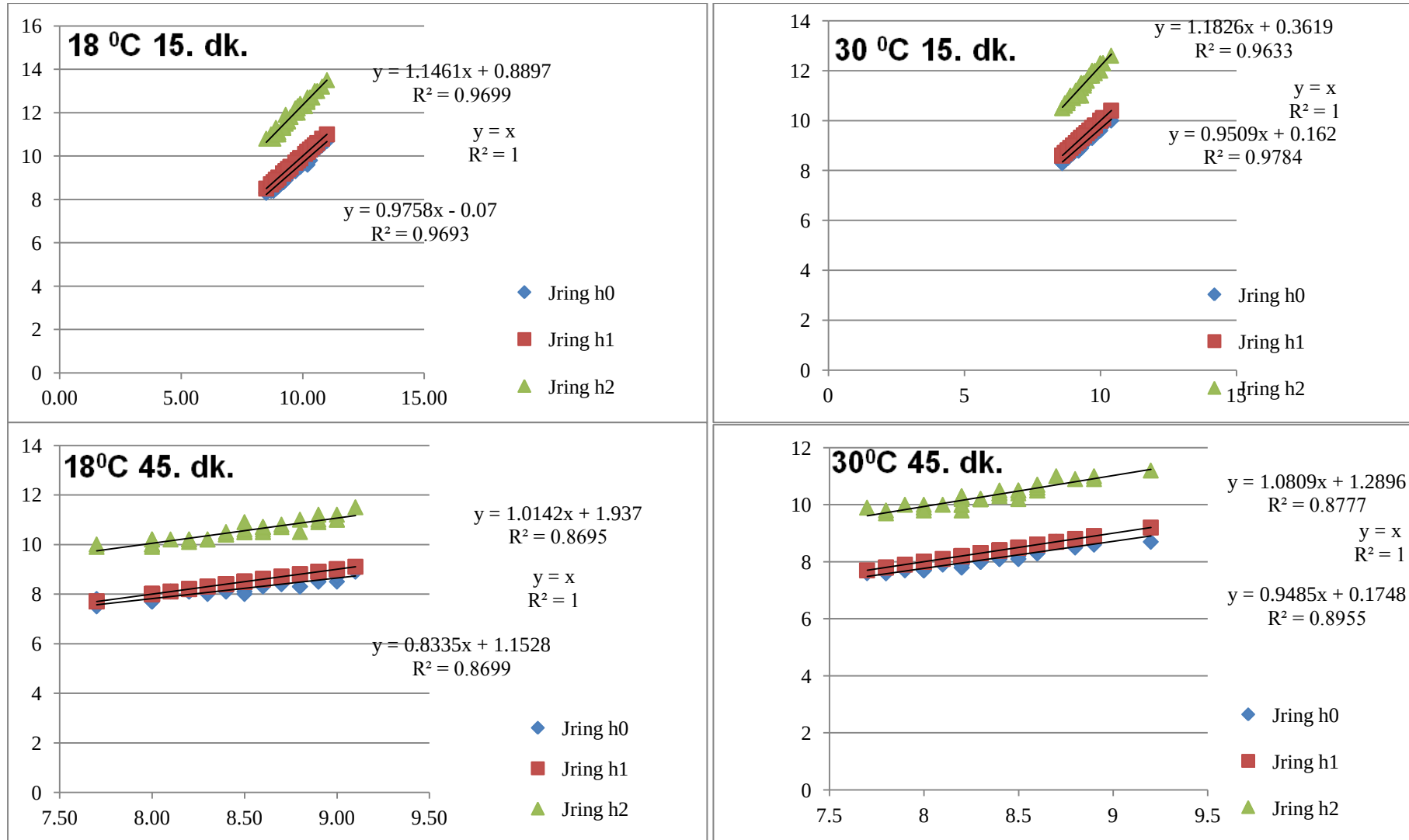
Şekil A.19. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile h_1 ve h_2 değerlerinin ilişkisi



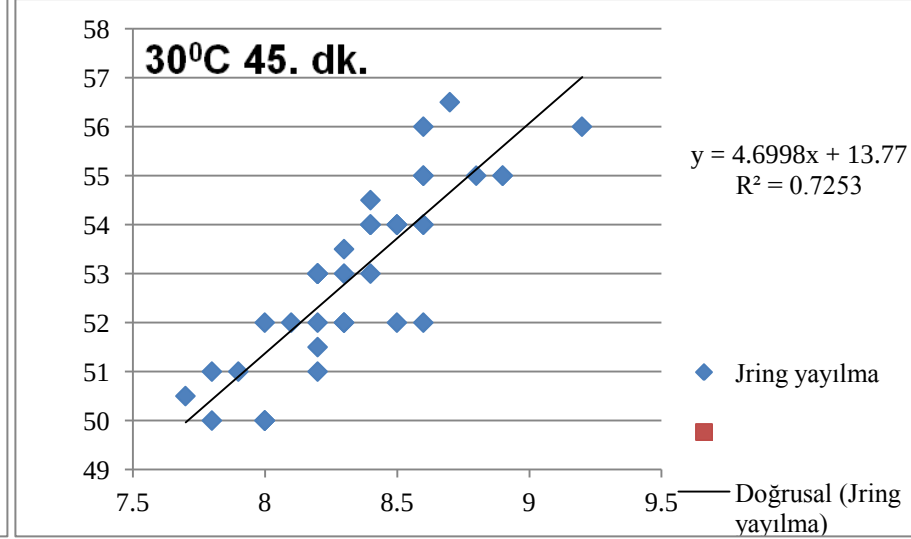
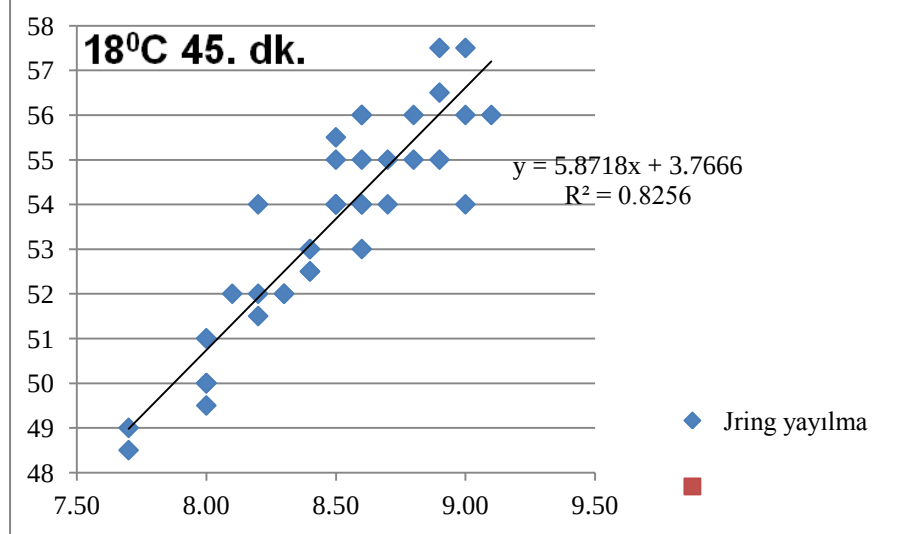
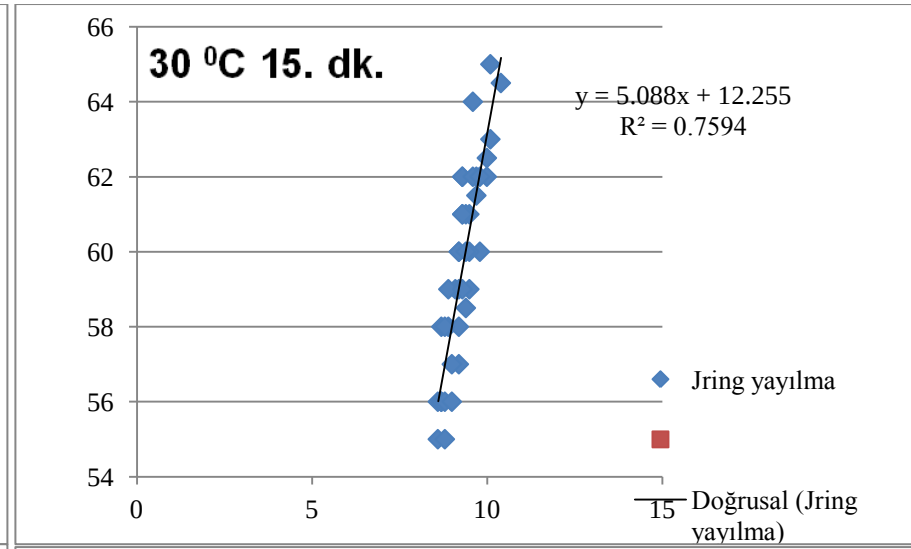
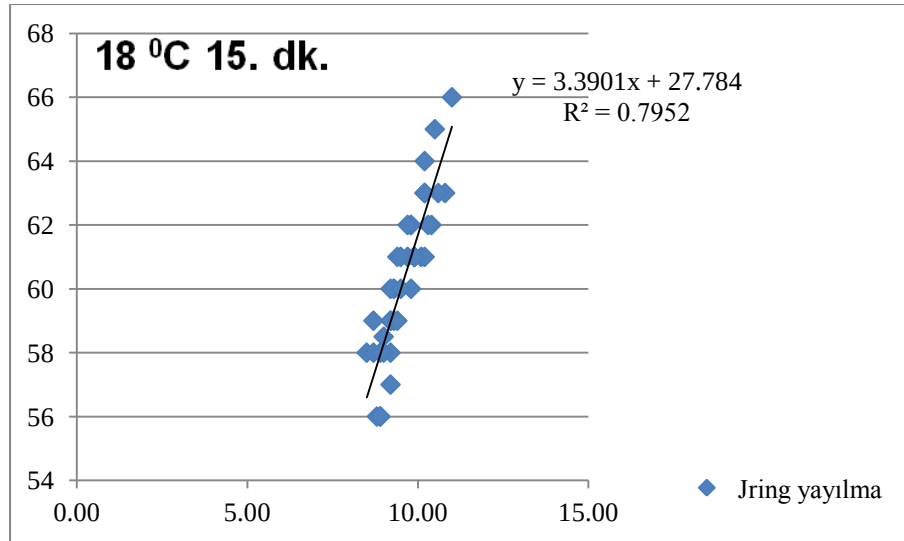
Şekil A.20. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile Jring Yayılma ilişkisi



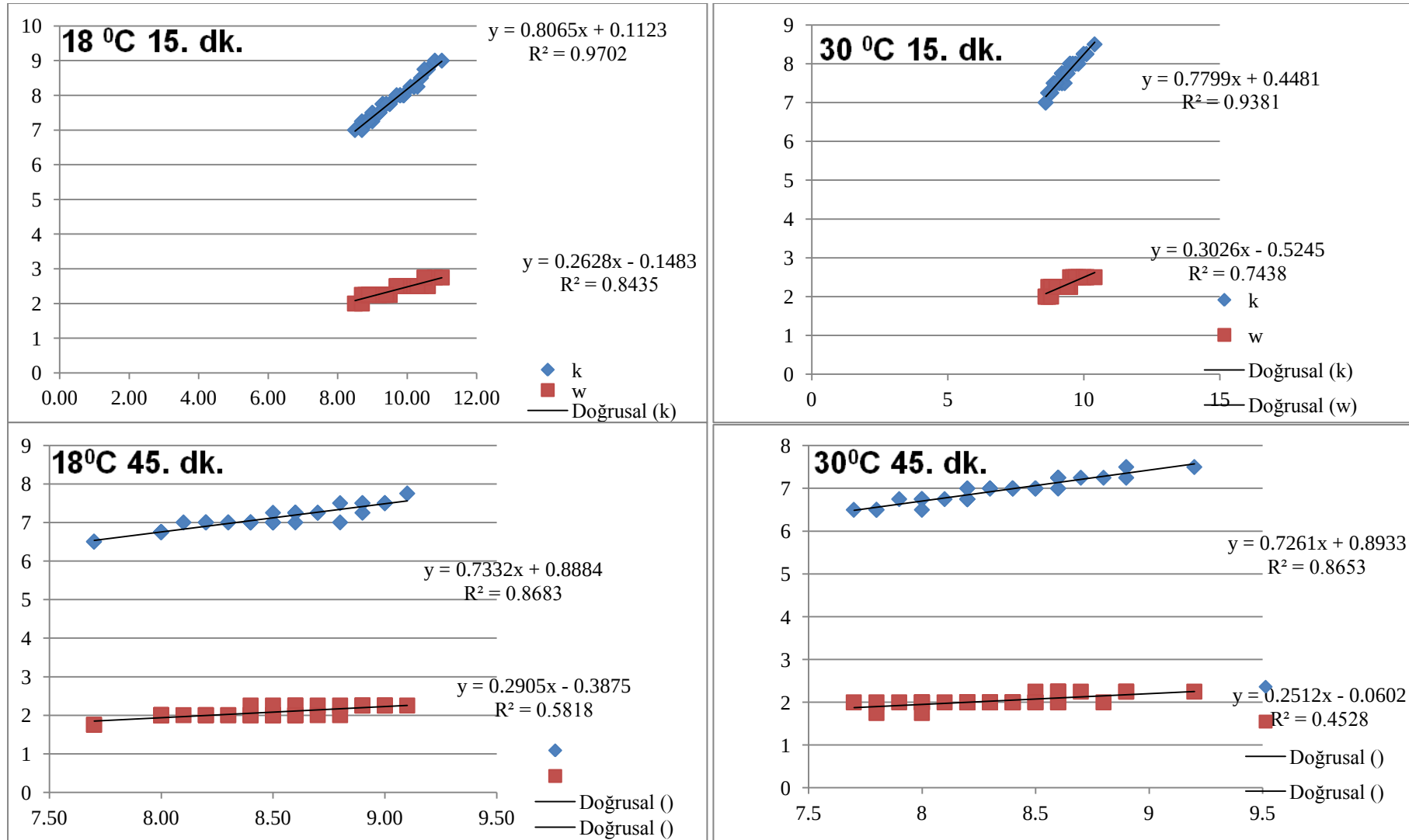
Şekil A.21. Jring deneyinden elde edilen h_0 ile k -çökme deneyinden elde edilen k ve w değerlerinin ilişkisi



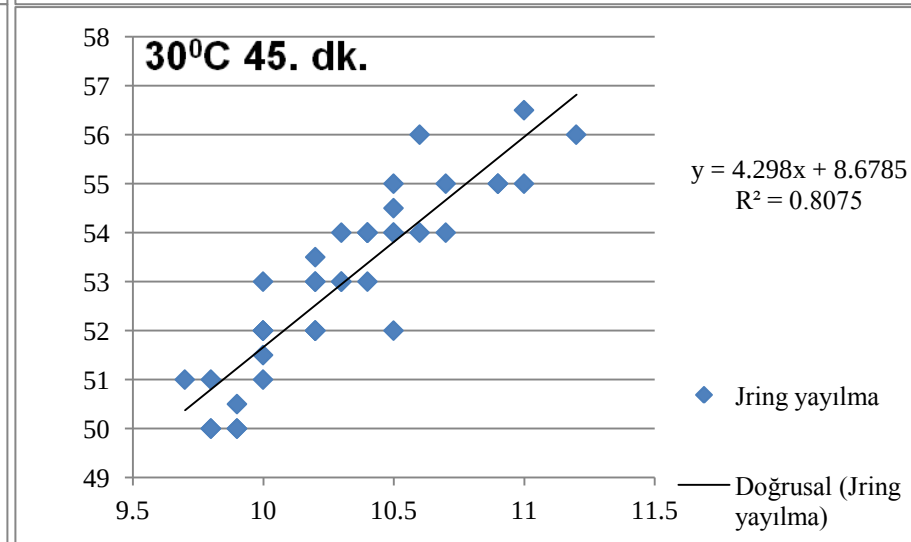
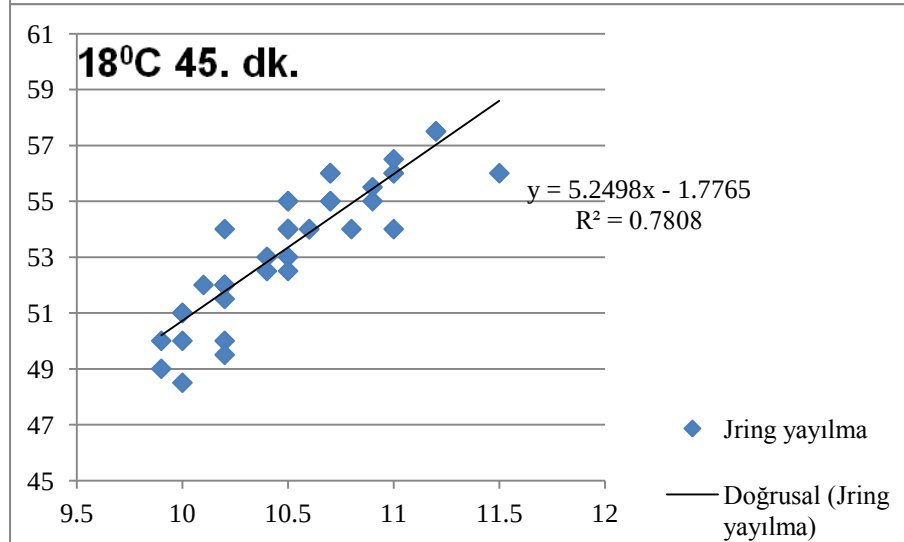
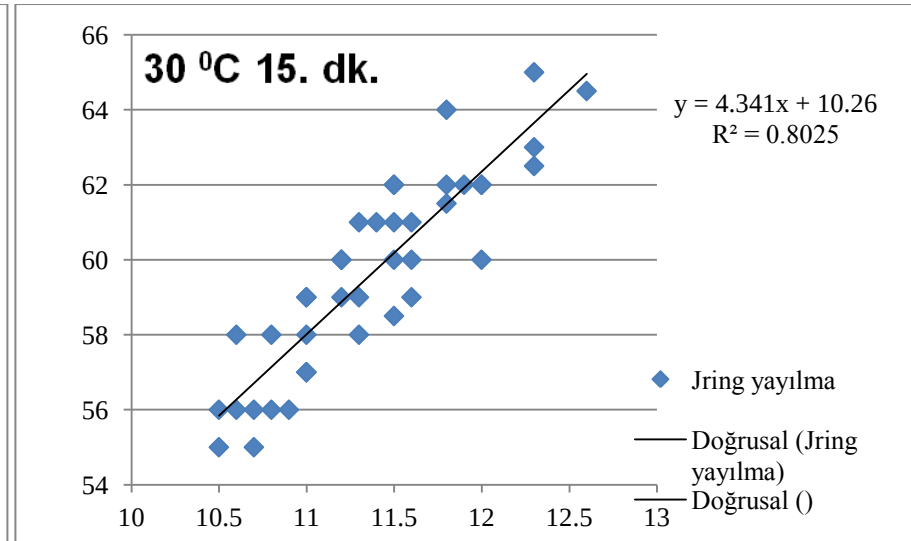
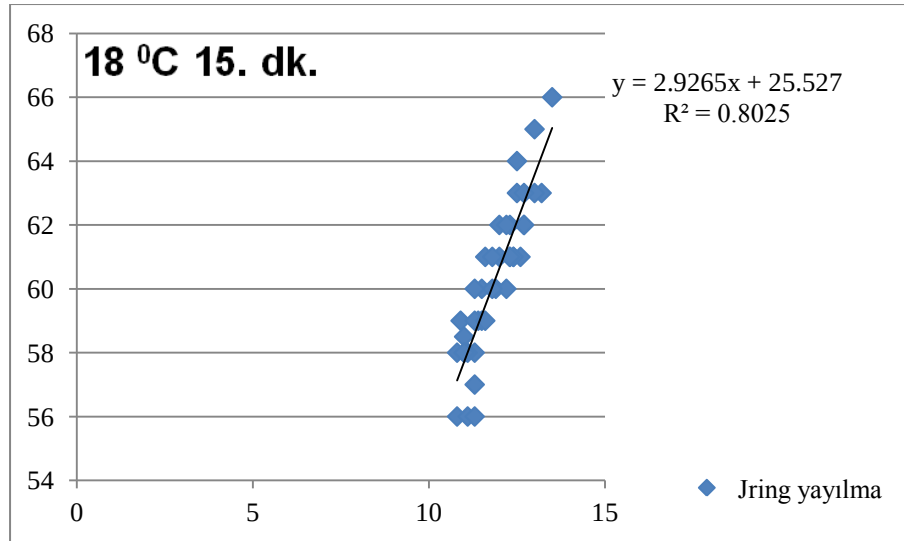
Şekil A.22. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile h_0 , h_2 ilişkisi



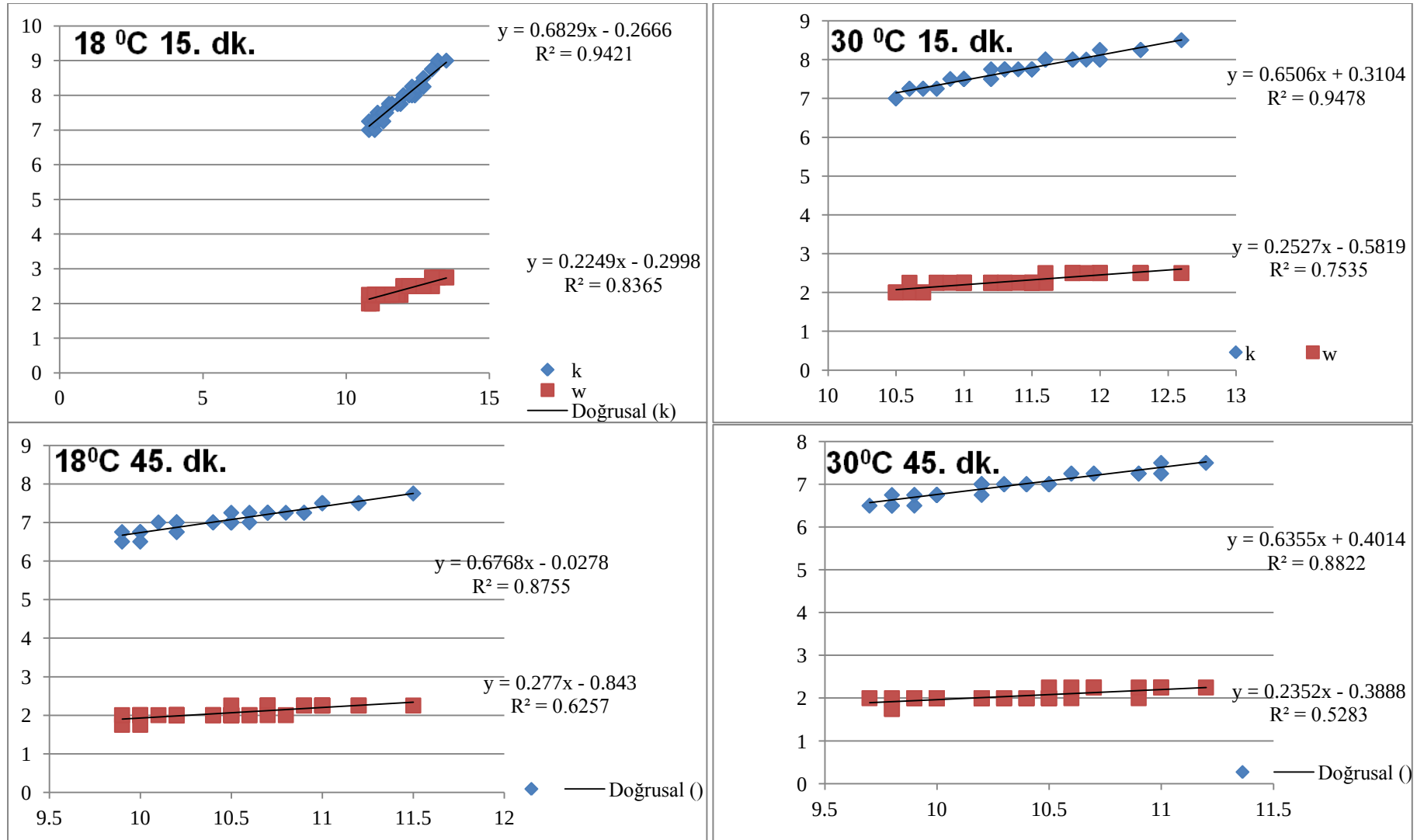
Şekil A.23. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile J ring Yayılma ilişkisi



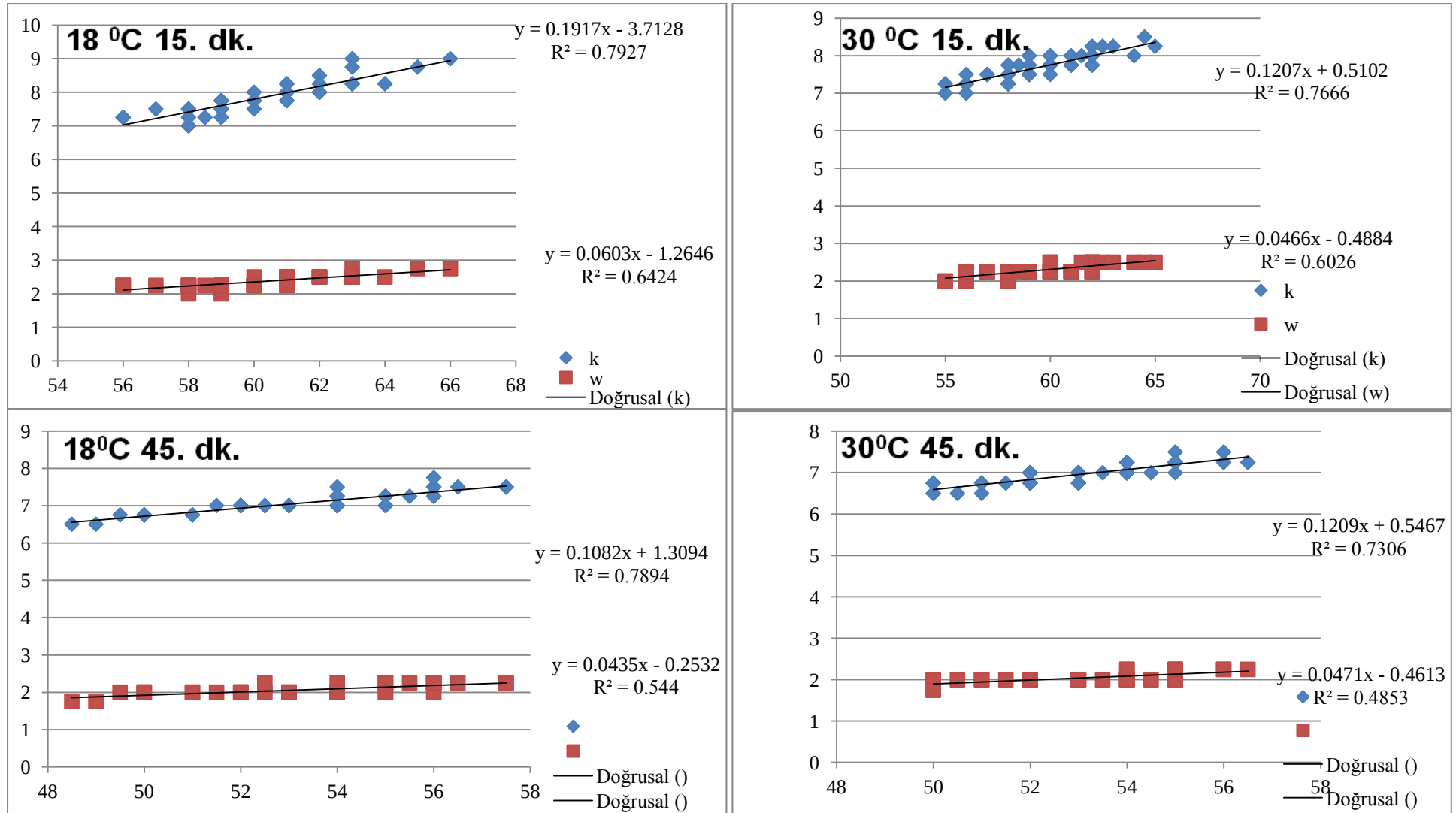
Şekil A.24. Jring deneyinden elde edilen h_1 ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi



Şekil A.25. Jring deneyinden elde edilen h_2 ile J ring Yayılma ilişkisi



Şekil A.26. Jring deneyinden elde edilen h_2 ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi



Şekil A.27. Jring Yayılma ile K çökme deneyinden elde edilen k ve w değerleri ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cemal ÜNSAL

Doğum Yeri ve Yılı : Kütahya, 1986

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : cemalunsal@windowlive.com

Eğitim Durumu

Lise : Tavşanlı Anadolu Lisesi, 2004

Lisans : SDÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Mesleki Deneyim

İDS Yapı Denetim Ltd. Şti. 2011-Halen