

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

**KATKILI TAZE HARÇLARIN REOLOJİK PERFORMANSINA
SICAKLIĞIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mecit TARKAN

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

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

© 2012 [Mecit TARKAN]

TEZ ONAYI

Mecit TARKAN tarafından hazırlanan “Katkılı Taze Harçların Reolojik Performansına Sıcaklığın Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman **Yrd. Doc. Dr. Kemal TUŞAT YÜCEL**
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Yrd. Doc. Dr. Kemal TUŞAT YÜCEL**
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Aynur KAZAZ**
Akdeniz Üniversitesi

Jüri Üyesi **Yrd. Doç. Dr. Hamide TEKELİ**
Süleyman Demirel Üniversitesi

Enstitü Müdürü **Prof. Dr. Cengiz KAYACAN**

TAAHHÜTNAME

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

Mecit TARKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	ii
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	13
2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER.....	16
2.1. Önceki Çalışmalar	16
2.1.1. Çimento pastası ile ilgili çalışmalar.....	16
2.1.2. Harçlarla ilgili çalışmalar.....	19
2.1.3. Betonla ilgili çalışmalar	21
2.2. Taze Harç ve Betonun İşlenebilirlik Tanımları	31
2.3. Taze Harç ve Betonun İşlenebilirlik Deneyleri	38
2.3.1. Tek faktör deneyleri.....	41
2.3.2. İki faktör deneyleri.....	44
2.4. Taze Betonun Reolojisi	48
2.4.1. Taze harç ve betonun işlenebilirliğinde akışkan ve süspansiyon reolojisi.....	50
2.4.1.1. Bünye denklemleri	50
2.4.1.2. Viskozite	52
2.4.1.3. Akışkan ve süspansiyon	58
2.5. Taze Harç ve Betonun İşlenebilirliğine Katkıların Etkileri.....	69
2.5.1. Kimyasal katkılar	70
2.5.2. Mineral katkı maddeleri.....	72
2.5.2.1. Uçucu küller	73
2.5.2.2. Silis dumanı.....	75
3. MATERYAL ve METOD.....	80
3.1. Agregaların Seçimi ve Sağlanması.....	82
3.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	82
3.3. Çimento	83
3.4. Kimyasal Katkı.....	83
3.5. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi	83
3.6. Uçucu Küller	84
3.7. Silis Dumanı	84
3.8. Harç ve Beton Karıştırma Cihazı ve Metodu	85
3.9. Harç Karışım Hesapları	86
3.10. Taze Harç ve Beton Deneyleri	88
3.10.1. Yayılma Tablası (Flow table)	88
3.10.2. Çökme ve çökme yayılması.....	89
3.10.3. K-Çökme (K-slump) Deneyi	91
3.10.4. J ring deneyi.....	93
3.10.5. İki nokta işlenebilirlik deney cihazı (CTPT)	96
3.10.6. Cihazın kullanımı ve deneyin yapılışı	99
3.10.7. CTPT cihazının kalibrasyonu	103
3.11. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar	106
3.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	107
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	110
4.1. Agregaların Granülometrik Özellikleri	110
4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	111

4.3. Karışım Agregalarının Oranları ve Granülometrileri	112
4.5. Çimento	114
4.6. Kimyasal Katkı-Çimento Uyumunun Belirlenmesi	115
4.7. Silis Dumanı	115
4.8. Uçucu Küller	116
4.9. Üretilen Harçların Taze Harç Deney Sonuçları.....	117
4.9.1. Kayma eşiği ve plastik viskozite sonuçları.....	117
4.9.2. Harç Örneklerin K-çökme deneyi sonuçları	125
4.10. Taze Harç ve Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin İstatistiksel Analiz Sonuçları	132
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	155
ÖZGEÇMİŞ	166

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATKILI TAZE HARÇLARIN REOLOJİK PERFORMANSINA SICAKLIĞIN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mecit TARKAN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

20. yüzyılın sonlarına doğru hazır beton ve katkı teknolojisindeki gelişmeler, betonun işlenebilirlik değerlerini oldukça yükseltmiştir. İşlenebilir beton kavramı, birçok önemli özelliği beraberinde getirmiştir. Beton, üretim kalitesi ve verimlilik açısından sağladığı yararlar ile çevre ve çalışma koşullarında sağladığı iyileşmeler neticesinde dünyada olduğu gibi ülkemizde de son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu gün beton sektöründe kullanılan, yeni nesil kimyasal katkıların maliyeti artırması bir dezavantaj olsa da, getirdiği yararlar bunun çok üstünde kalmaktadır. Ayrıca, bağlayıcı olarak çimento ile yer değiştirmeli uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve taş tozu kullanımı da maliyeti azaltmaktadır. Akıcı viskoz betonlarda aranan özellikleri etkileyen önemli faktörlerden biri de temel yapılarını oluşturan harçların özelliğidir. Bu anlamda, bu özellikte ki betonların karışım bileşenleri hesaplanırken reolojik özellikleri dikkate alınır. Ayrıca, kimyasal ve mineral katkıların işlenebilme, ayrışma direnci ve priz alma süresi gibi özelliklerine etkileri de önemli olacaktır. Akış bilimi olarak tanımlayabileceğimiz reoloji, sıvı veya katı cisimlerin gerilme-deformasyon ilişkilerini zaman değişkenini de dikkate alarak, yani gerilme ve deformasyonun zamana göre türevlerini de hesaplayarak inceler. Betonların kolay iletilmesi ve 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. Yüksek dayanımlı ve durabil beton üretimi, betonun taze haldeki özelliklerinin kontrollü takip edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Betonun taşınması, pompalanması, yayılması, kalıplanması ve sıkıştırılması, harcın ve betonun reolojik özelliklerine bağlıdır. Harcın ve betonun taze haldeki özelliklerini tanımlamak için geliştirilen deney metotları konvansiyonel tabanlı cihazlar üzerinde yoğunlaşmakta, teorik yaklaşımlar ise Bingham modeli ile süspansiyon teorilerinin geliştirilmesine yönelik yapılmaktadır. Özetle; bu çalışmada, farklı ortam sıcaklıklarında (18⁰C, 30⁰C), katkılı taze harçlar ele alınarak, karışımların kayma eşiği ve viskozite değerleri ölçülerek elde edilecek parametrelerin betonun işlenebilirliğine etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Yukarıda belirtilen test yöntemleri ve kullanılacak cihazlar günümüz beton sektörünün ulaştığı düzeye paralel çalışmaları içermektedir. Böylece özel sektörün ihtiyaçları karşılanırken aynı zamanda akademik çalışmaların gelişmesine imkân sağlayabilecektir. Tez çalışmasında, farklı ortam sıcaklıklarında; taze harçların reolojik özelliklerinin (η;

plastik viskozite ve τ : Kayma eşiği), deneysel yolla “Celsum iki nokta işlenebilirlik deney aleti-Celsum two-point workability test apparatus kullanılarak ölçülmeye çalışılmıştır. Çimento türleri, mineral ve kimyasal katkılar ile değişimi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Araştırma deneylerinde, CEM I 42,5 R ve CEM II 42,5 A-M R tip imento kullanılmıştır. Su/imento oranı beton kıvam değerleri dikkate alınarak, 400 kg/m³ dozajlı harç karışımları için 0,45 su/imento oranı, 300 kg/m³ dozajlı harç karışımları 0,55 olarak belirlenmiş ve harç numuneleri üretilmiştir. Kimyasal katkı olarak yeni nesil akışkanlaştırıcı, mineral katkı olarak 4 farklı uçucu kül (Tunçbilek, Seyitömer, Orhaneli ve Çayırhan) ve silis dumanı kullanılmıştır. Sonuç olarak deneylerden elde edilen verilerin aralarındaki ilişkiler istatistiksel yöntemler kullanılarak model geliştirilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Reoloji, harç, işlenebilirlik, sıcaklık, katkı.

2012, 166 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE RHEOLOGICAL PERFORMANCE OF FRESH MORTARS WITH ADDITIVE

Mecit TARKAN

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Kemal Tuşat YÜCEL

The concept of workable concrete brought about several important features. Concrete, in terms of production quality and efficiency benefits provided by the environment and working conditions as a result of improvements in recent years is widely used in Turkey as in the world. Viscous fluid and time-dependent self-compacting concrete in the form of the mold, under its own weight without vibration, and settling and compacting concretes without decomposition is defined as. The properties of self-compacting concretes saving the cost of a new generation of chemical additives to increase much higher than a disadvantage, even though it brought benefits.. Also, with the displacement of cement as a binder of fly ash, silica fume, ground blast furnace slag and reduces the cost of the use of stone dust. Fluency in one of the important factors influencing the viscous properties of concrete, called charges that make up the basic structures of the feature. In this sense, these types of rheological properties of concrete mixture proportions are taken into account in the calculation. In addition, the workability of mineral additives, such as weathering resistance, and setting time of making the effects of the properties will be important. Flow which can be defined as the science of rheology, liquid or solid stress-strain relations, taking into account the time variable, ie, by calculating the stress and deformation in the review according to the time derivatives. Be located easily in terms of concrete instead of transmitting and asked to be their fluent consistency. Concrete shear viscosity of the low threshold values and is a fluent. On the other hand, the concrete is expected to be processed is not only streamlines, concrete must be determined at the same time. Cohesion synonymous with stability. State properties of fresh concrete and can stand the production of high-strength concrete can be performed with controlled monitoring. Transportation of concrete, pumping, distribution, and compression molding of the concrete depends on the rheological properties. Fresh concrete and mortar test methods are developed to define the specifics of state konvexial-based devices tend to concentrate on theoretical approaches for the development of theories of the Bingham model and the suspension is done. In summary, this study, different ambient temperatures, doped by taking fresh mortars, mixtures slip threshold and observing the effects of viscosity values obtained by measuring the workability of the concrete parameters to be studied. The above-mentioned testing methods and devices used in today's concrete industry reached the level of work includes a parallel. Thus, at the same time meeting the needs of the

private sector will enable the development of academic studies. In this study study, the range of ambient temperatures (18°C , 30°C); rheological properties of fresh cement mortars(η : plastic viscosity and τ : shear threshold), mineral and chemical additives will be studied by observing changes. In the research experiments, CEM I 42,5 R ve CEMII 42,5 A-M R types of cements are used. Water / cement ratio is defined as 0,45 for 400 kg/m^3 concrete dosage and 0,55 for 300 kg/m^3 concrete dosage are 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. In experimental studies, under different temperature conditions, fresh mortar rheological parameters (η : plastic viscosity, and τ : Shear threshold), an experimental way “two-point workability workability test apparatus” will be used to measure Relationships between the data obtained from experiments using statistical methods will be studied to develop the model.

Keywords: Rheology, mortar, workability, temperature, additive.

2012, 166 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.

Deney çalışmaları sırasında Çimento ve kimyasal analizlerden dolayı GÖLTAŞ Çimento A.Ş., kimyasal katkı temininde yardımlarından dolayı SİKA Yapı kimyasalları A.Ş. firmasına teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda yardımlarından dolayı Cemal Ünsal, Ozan Sungur, Hilmi Arık ve Ümran Uysal'a teşekkürlerimi sunarım.

2517-M-10 ve 2908-YL-11 No`lu Projeler ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

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

Mecit TARKAN
ISPARTA, 2012

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Beton özelliklerini etkileyen faktörler .	33
Şekil 2.2. İşlenebilirliği oluşturan elemanlar	36
Şekil 2. 3. Tek parametrelili taze beton deneyleri arasındaki ilişki	42
Şekil 2. 4. Viskozimetrelerin çalışma prensibi.....	45
Şekil 2. 5. Newtoniyen akışkan için açısal hız ile tork arasındaki lineer ilişki.....	46
Şekil 2. 6. A alanı üzerine etkiyen F kayma kuvveti ve kayma deformasyonu	51
Şekil 2. 7. İdeal Elastik Katılarda G Kayma Modülü.	51
Şekil 2. 8. İki düzlem arasındaki sürtünme kuvveti ve Newton'un viskoz akış denklemleri	53
Şekil 2. 9. Newton sıvısı.	54
Şekil 2. 10. Newtoniyen akışkanda viskozitenin belirlenmesi.....	54
Şekil 2. 11. Reolojik davranışın tipleri.....	55
Şekil 2. 12. Viskozite (η) – kayma şekil değiştirme oranı ($\dot{\gamma}$) ilişkisi.....	56
Şekil 2. 13. Zamana bağlı Non-Newtoniyen akışta tiksotropi için η -t ilişkisi.....	56
Şekil 2. 14. Zamana bağlı Non-Newtoniyen akışta reopeksi için η -t ilişkisi.....	57
Şekil 2. 15. Zamana bağlı Non-Newtoniyen malzemeler(a ve b için) için akış eğrileri	58
Şekil 2. 16. Süspansiyonun mikroyapısı.	59
Şekil 2. 17. Beton reolojisi kavramı	63
Şekil 2. 18. Taze harç ve betonlar için kabul edilen Bingham sıvısı.	64
Şekil 2. 19. Beton bileşenleri ve bağlayıcı maddelerin g ve h üzerindeki etkileri.....	79
Şekil 3. 1. Yayılma tablası ile çimento-katkı uyumunun belirlenmesi	84
Şekil 3. 2. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri.....	85
Şekil 3. 3. Betonun karılma işlem aşamaları.....	86
Şekil 3. 4. Yayılma tablası (flow table) deney aleti.	89
Şekil 3. 5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı.	89
Şekil 3. 6. Deneylerde kullanılan K Çökme deney aleti	93
Şekil 3. 7. J Ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları	95
Şekil 3. 8. Deneylerde kullanılan J Ring Deney cihazı.....	96
Şekil 3. 9. Tattersall iki nokta işlenebilirlik cihazı için karıştırıcı kanatlar	97
Şekil 3. 10. Beton reometrelerinde kullanılan farklı kanat tipleri.....	98
Şekil 3. 11. İki nokta işlenebilirlik deney cihazının (CTPT) genel görünüşü.....	99
Şekil 3. 12. CTPT Cihazında, zamanla motor iç sıcaklığının değişimi	100
Şekil 3. 13. CTPT motor iç sıcaklık ölçümü ve şematik görüntüsü.....	100
Şekil 3. 14. CTPT'nin veri okuma ayarları	101
Şekil 3. 15. CTPT'nin hız ve zaman ayarı ekranı	103
Şekil 3. 16. Kalibrasyon sıvısı özgül ağırlığının sıcaklıkla değişimi.....	104
Şekil 3. 17. CTPT'nin hız ve rpm ayarı grafiği.....	105
Şekil 3. 18. CTPT'nin basınç ve rpm grafiği	105
Şekil 3. 19. CTPT'nin basınç ve rpm grafiği	106
Şekil 3. 20. Çalışmalarda kullanılan tartılar.....	106
Şekil 3. 21. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve kalıplar	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Çeşitli toplulukların işlenebilirlik tanımlamaları	34
Çizelge 2. 2. BS 1881'e göre betonun işlenebilirliğine göre uygulanan taze beton deney metotları	42
Çizelge 2. 3. Tek noktalı deneyler ve geçerli oldukları kıvam aralıkları	43
Çizelge 2. 4. Ritchie'nin bazı standart testlerden elde ettiği deney sonuçları.....	43
Çizelge 2. 5. Süspansiyon konsantrasyonu için viskozite ile ilgili denklemler	61
Çizelge 2. 6. Kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili denklemler	65
Çizelge 2. 7. Akışkan yüksek performanslı beton elde etmenin iki yolu.....	77
Çizelge 2. 8. Mineral katkıların işlenebilirlik üzerindeki etkileri	78
Çizelge 3. 1. Çalışmada takip edilen standart ve yöntemler	81
Çizelge 3. 2. Üretilen beton karışımlarında kullanılan 1 m ³ 'teki malzeme miktarı ...	85
Çizelge 3. 3. Üretilen Harç karışımlarında kullanılan 1 m ³ 'teki malzeme miktarı	86
Çizelge 3. 4. CTPT'nin teknik özellikleri	101
Çizelge 4. 1. Karışım hesaplarının ASTM C-33 sınırları.....	109
Çizelge 4. 2. ASTM ve TS' e göre elek analizi	109
Çizelge 4. 3. İri ve ince agregaların tane yoğunlukları ve su emme oranlar	110
Çizelge 4. 4. İri ve ince agreganın sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri (yığın yoğunlukları)(kg/m ³).....	111
Çizelge 4. 5. İri ve ince agreganın özgül ağırlıkları (kg/m ³)	111
Çizelge 4. 6. Harçların ve betonların karışım oranları (%)	111
Çizelge 4. 7. Sika ViscoCrete PC 10 katkısının özellikleri	112
Çizelge 4. 8. Deneylerde kullanılan çimentonun (PÇ 42.5 R) özellikleri.....	114
Çizelge 4. 9. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I I/A-M (P-LL) 42,5 R) özellikleri	114
Çizelge 4. 10. Kimyasal katkı – çimento uyumunun belirlenmesi deneyi sonuçları	115
Çizelge 4. 11. Silis dumanının (FeSi) kimyasal özellikleri.....	115
Çizelge 4. 12. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri ve görünen tane yoğunlukları ..	116
Çizelge 4. 13. Regreasyon çizelgesi.....	129
Çizelge 4. 14. 18 °C 15. dk üretimleri weka sonuçları.....	132
Çizelge 4. 15. 18 °C 15. dk üretimleri weka sonuçları.....	133
Çizelge 4. 16. 30 °C 15. dk üretimleri weka sonuçları.....	134
Çizelge 4. 17. 30 °C 15. dk üretimleri weka sonuçları.....	135
Çizelge 4. 18. 18 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	136
Çizelge 4. 19. 18 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	137
Çizelge 4. 20. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	138
Çizelge 4. 21. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	139
Çizelge 4. 22. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	140
Çizelge 4. 23. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	141
Çizelge 4. 24. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	142
Çizelge 4. 25. 30 °C 45. dk üretimleri weka sonuçları.....	143
Çizelge 4.26. 18°C-30°C 15-45. dk üretimleri weka sonuçları	144
Çizelge 4.27. 18°C-30°C 15-45. dk üretimleri weka sonuçları	145
Çizelge 5.1. Taze harç deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	149
Çizelge 5.2. Taze harç deneyleriyle plastic viskozitenin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	150

Çizelge 5.3. Taze harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	151
Çizelge 5.4. Taze harç ve beton deneyleriyle plastic viskozitenin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	152
Çizelge 5.5. Harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	153
Çizelge 5.6. Harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri.....	154

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BM	Bingham model
FT	Flow Table
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
KEH	Harçların Kayma Eşiği
kh	Harçların K Çökme Deneyi İlk Yükseklik
KYB	Kendiliğinden yerleşen betonlar
PÇ	Portland Çimentosu
PV	Plastik Viskozite
S/B (veya SB)	Su/Bağlayıcı
S/Ç	Su/Çimento
Sd	Silis Dumanı
SP (veya SA)	Süper Plastikleştirici (veya Süperakışkanlaştırıcı)
SNF	Naftelen Sülfonat Formaldehit
T	Tork
UK	Uçucu Kül
VAK	Viskozite Azaltıcı Katkı
v	Kinematik Viskozite
w	K Çökme Deneyi Son Yükseklik
wh	Harçların K Çökme Deneyi Son Yükseklik
Y	Yayılma
YH	Harçın Yayılması
$\dot{\gamma} = d\gamma/dt$	Açısal Şekil Değiştirme Hızı
η	Viskozite (sıvının dinamik viskozitesini)
η_{pl} (veya PV)	Plastik Viskozite
τ	Kayma Gerilmesi
τ_0 (veya KE)	Kayma Eşiği (veya Akma Eşiği)

1. GİRİŞ

Son yıllarda hazır beton ve katkı teknolojisindeki gelişmeler, betonun işlenebilirlik değerlerini oldukça yükseltmiştir. İşlenebilir beton kavramı, birçok önemli özelliği beraberinde getirmiştir. Betonun işlenebilirliği, en kolay şekilde betonun taşınması, iletilmesi, kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinin bütünü olarak tanımlanmaktadır. Tüm bunların minimum enerjiyle yapılması işlenebilir betonların en temel özellikleri olarak tanımlanır. Beton, üretim kalitesi ve verimlilik açısından sağladığı yararlar ile çevre ve çalışma koşullarında sağladığı iyileşmeler neticesinde dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hazır beton inşaat sektöründe vazgeçilmez olarak kabul edilen önemli bir üretim birimidir. Beton sektörünün gelişiminde, kimyasal ve mineral katkıların payı büyüktür. Bu katkılar özellikle betonun harç fazında ve harç-iri agrega fazı bağlantısında etkindirler. Yapılan çalışmalar daha çok, hamur ve harç fazlarının reolojik özellikleri ile ilgilidir. Harçların reolojik özelliklerinin incelenmesinde farklı yaklaşım ve kabuller esas alınmaktadır. Bu davranış modelleri tek bir parametreye bağlı kalmadan farklı test yöntemleriyle ortaya konulmaktadır. Yapılan çalışmanın esası, betonun işlenebilirlik ifadesinin, klasik deney metotlarının yanında taze harç ve betonun reolojik özellikleriyle ifade edilmesi ve alınacak sonuçların, saha çalışmalarının yönlendirilebilmesine imkân verecek yöntemlerin ortaya konulması olarak ifade edilebilir. Bu değerlendirme; laboratuvar ortamında elde edilen test yöntemlerinin, sahada yapılan klasik test yöntemleriyle arasındaki ilişkilerin ortaya konulması ile çalışmada belirtilen amaca ulaşabilir.

Bu noktada, yaz ve kış ortamında dökülen betonların ortam sıcaklığı sonucunda oluşan etkiler göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle tez çalışmasında, ortam koşullarında sıcaklık etkisi dikkate alınmıştır.

Yüksek dayanımlı ve durabil beton üretimi, betonun taze haldeki özelliklerinin kontrollü takip edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Betonun taşınması, pompalanması, yayılması, kalıplanması ve sıkıştırılması harçların ve betonun reolojik özelliklerine bağlıdır.

Harcın ve betonun taze haldeki özelliklerini tanımlamak için geliştirilen deney metotları konvansiyonel tabanlı cihazlar üzerinde yoğunlaşmakta, teorik yaklaşımlar ise Bingham modeli ile süspansiyon teorilerinin geliştirilmesine yönelik yapılmaktadır. Taze betonun işlenebilirlik ifadesi, harcın ve betonun reolojik sabitlerinin (η : plastik viskozite ve τ : Kayma eşiği) incelenmesiyle ve uygun değerlerin bulunmasıyla çözümlenebilir. Bu nedenle; betonun temel yapısını oluşturan harç fazının reolojik sabitlerinin betonun bileşenleri ile uyumu, mineral ve kimyasal katkılarla etkileşiminin açıklığa kavuşturulması gereklidir.

Çalışmanın amacı, beton üretiminin ana yapısı olan harç fazının reolojik sabitlerine dayanarak; işlenebilir betonun tasarlanması, yeterli akıcılık ve kohezyon değerlerinin araştırılmasıdır. Bu tez çalışmasında, sıcaklık koşullarının harç fazının reolojik sabitleriyle ilişkisi ana konu olarak araştırılmıştır. Deneyler sırasında, ortam koşullarının etkisi takip edilmiştir. Reolojik sabitlerin belirlenmesinde İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazı Celsum Two Point Workability Tester (CTPT) kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, farklı ortam sıcaklıklarında (18⁰C, 30⁰C), katkılı taze harçlar ele alınarak; karışımların kayma eşiği ve viskozite değerleri ölçülerek taze harçların reolojik özelliklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazından (CTPT) elde edilen sonuçlar, benzer karışımlar kullanılarak üretilen taze harç deneylerinden elde edilen parametrelerle ilişkileri tespit edilerek taze betonun işlenebilirliğine etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen parametrelerin betonun işlenebilirliğine etkileri gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Tüm bu veriler ışığında, farklı sıcaklık ortamlarında, taze harçların reolojik özelliklerinin betonun işlenebilirliğine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca; ülkemizde, pratik saha uygulamalarında kullanılan beton dizayn ve kıvam değerleri de göz ardı edilmemiştir.

Bu çalışma, Ülkemizde büyük bir ekonomik güç olan hazır beton sektörü için önemli bir kazanç olabilecektir. Böylece özel sektörün ihtiyaçları karşılanırken aynı zamanda akademik çalışmaların gelişmesine de imkân sağlayabilecektir.

Bu tez çalışmasında, CEM I 42,5 R ve CEM II 42,5 A-M R tip çimento kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,45-0,55 değerleri arasında seçilerek, çimento dozajları 300-400 kg/m³ arasında kullanılmış ve akışkan betonlara eşdeğer harç karışımları üretilmiştir. Kimyasal katkı olarak yeni nesil akışkanlaştırıcı, mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Taze harç deneyleri (yayılma tablası deneyi, k çökme, birim hacim ağırlık) ve reolojik parametreleri (τ : kayma eşiği ve η : plastik viskozite değerleri) belirleme deneyleri saha koşullarıyla uygunluk sağlaması için 18⁰C ve 30⁰C’de yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda taze harç deneyleri sonuçları ile reolojik parametreler arasındaki ilişki kurularak taze betonun reolojik ifadelerine geçiş sağlanmıştır.

İkinci bölümde, konu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, materyal ve metot kısmında çalışmanın deneysel kısmında kullanılan malzemeler, bu malzemeler üzerinde yapılan tanımlayıcı ön deneyler ve araştırma deneylerinde kullanılan cihazlar ve deneylerin yapıları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur.

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

2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER

2.1. Önceki Çalışmalar

2.1.1. Çimento pastası ile ilgili çalışmalar

Saak vd. (2004), katkılı çimento pastası (Sd, UK ve SP), kil ve seramik süspansiyonlar üzerinde koaksiyel reometre ile silindirik çökme ve konik çökme deneyleri arasında reolojik parametrelerin ilişkisini araştırmıştır. Koaksiyel reometreden elde ettikleri akma gerilmesinin, silindirik çökme deneyi ile ilişkili olduğu, koni çökme deneyinde ise düşük akma gerilmesinde ilişkinin geçerli olduğunu, viskozitenin ise çökme deneyi ile ilişkili olmadığını belirtmişlerdir. Yazarlar, büyük ölçüde koni geometrisinden ve kullanılan malzemeden bağımsız olan çökme ve akma gerilmesi arasında ilişki olduğunu belirtip analitik model önerisinde bulunmuşlar ve bu modeli koni geometrisinin fonksiyonu olarak genelleştirmişlerdir.

Morigana (1973), konsantrik silindirik beton reometresi kullanarak çökme ve akma gerilmesi arasından ters ilişki olduğunu bulmuştur. Murata (1984) Morigana'nın sonucunu normal ve hafif agregalı betonlar kullanarak araştırmıştır ve çökmenin viskozite tarafından etkilenmediğini belirtmiştir. Murata'da basit kuvvet dengesi modeline dayanarak akma gerilmesi ile çökmeyi ilişkilendirmiştir. Christensen (1991) orijinal modelindeki hataları düzeltmiş ve ölçüsüz nicelik birimine çevirmiştir. Christensen modeli çökme konisinin boyutlarından ve deneyi yapılan malzemenin özelliklerinden bağımsızdır. Bununla birlikte Christensen modelinin doğruluğunu ispatlayamamıştır (Saak vd., 2004).

Ferraris vd. (2001a), 0,28 ile 0,35 S/Ç oranında, altı farklı mineral katkı (dört farklı gronülometrik özelliğe sahip UK, Sd ve Metakaolin), naftelen sülfonat bazlı SP (%0,45 – 0,70) kullanarak ürettiği çimento pastası üzerinde, paralel plakalı reometre, mini-slam ve marsh konisi kullanarak reolojik parametreleri incelemiştir. Çimento pastasının reolojik parametrelerini aynı zamanda karıştırıcı tipine (hobart veya blender) göre de değerlendirmişlerdir. Blender'la karıştırılan pastanın daha tutarlı ve

doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Mini-slamp ve marsh konisinin çimento pastası ile ilgili yeterli tanımlama yapamadığını belirtmişlerdir. Katkısız pastanın akma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri ile mineral katkılı pastanın sonuçları karşılaştırıldığında, bu reolojik parametrelerin en düşük değerlerinin çok ince UK'lü karışımında, en yüksek Sd'lı karışımında olduğunu ve Metakaolin'in ise etkisiz olduğunu belirtmişlerdir. Çimento pastasında en uygun yer değiştirme oranının çok ince UK'de olduğu (%12) belirtilmiştir. Bu orandaki UK ve Sd ile yer değiştirmeyi betonlar üzerinde de deneyerek çökme değerleri ile karşılaştırmışlardır. Çok ince UK ilavesinin maliyet artışı veya sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini azaltmadan betonun taze haldeki akışını geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Nehdi ve Rahman (2004), kayma gerilmesi-kayma oranı değerlerinin değişimini mineral (Sd, UK) ve kimyasal katkıları (Welan Gum RGK, SNF SP) içeren çimento pastası üzerinde yapmışlardır. Paralel plaka ve koaksiyel reometreler kullanarak kayma yüzeylerinin sürtünme kapasitelerini ve reometrelerdeki karıştırıcı uçlar arası mesafenin, reolojik parametrelerdeki etkisini incelemiş, farklı analitik modellerle de reolojik özellikleri; akma gerilmesi (Bingham, Modifiye Bingham, Herschel–Bulkley ve Casson modelleri), plastik viskozite (Bingham, Modifiye Bingham ve Casson modelleri) ve teorik viskozite (Sisko ve Williamson modelleri) değerlerini hesaplamışlardır. Çimento pastasının reolojik özelliklerinin, çimento pastasının bileşimi kadar deney geometrisi ile de (paralel plaka veya koaksiyel) değiştiğini, kritik analizler ve karşılaştırmalar için reolojik deney yöntemlerinin standardizasyonu gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Akma gerilmesi değerlerinde en düşük değeri Modifiye Bingham vermiş, HB modeli, Casson ve Bingham modellerine göre daha yüksek değerler vermiştir. Bingham ve Modifiye Bingham Modellerinde S/B oranının azalmasıyla akma gerilmesi artarken bu durum diğer modellerde gözlenememiştir. Reolojik modeller tarafından belirlenen akma gerilmesi değeri, genellikle RMA dozajı artışıyla artmaktadır. Plaka aralığı arttığında, Modifiye Bingham modeli, Bingham ve Casson Modellerine göre daha yüksek plastik viskozite değeri hesaplamıştır. 3 modelde de S/B'nin azalması, yüksek plastik viskozite ile sonuçlanmıştır. Koaksiyel viskozimetrelerde, Bingham, Casson, Williamson ve Sisko modellerinde, RMA dozajının artması ile sonsuz kayma oranı, sıfır viskozite ve plastik viskozite artmıştır. Oysa Modifiye Bingham modelinde, plastik viskozitenin tepe noktası RMA'nın ara değerlerinde gözlemlenmiştir. Paralel

plaklı deneyler için bu durum gözlemlenmemiştir. Pürüzsüz (düzgün) plakalar için, Bingham, HB ve Casson modellerinde artan plaka aralığında, kayma yüzeyleri arasındaki boşluğun artması ile azalan akma gerilmesi hesaplanmıştır. Testere dişli plaklar için, akma gerilmesinin tepe noktası %25 cürufu çimento pastası için 0,7 mm boşluk aralığında hesaplanmışken, % 8Sd içeren çimento pastası için benzer durum gözlemlenmiştir. Çimento pastasının ölçülen reolojik özelliklerinde sadece S/B, mineral ve kimyasal katkıların kullanılmasına bağlı değildir. Aynı zamanda; deney cihazı geometrisi, kayma yüzeylerinin sürtünme kapasitesi ve boşluğu, reolojik özelliklerin hesaplanmasında kullanılan reolojik modellerde beraber etkilidir. Bu nedenle, çimento pastasının hesaplanan reolojik karakteristiklerinde kullanılan yaklaşım ve deney metodunun standart hata ile birlikte hesaplayıp, karşılaştırmalı laboratuvar sonuçlarına ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

Svermova vd. (2003), çimento harcı üzerinde %0,35-0,42 S/B, %0,3-1,2 SP, %0,02-0,7 VA (bağlayıcının oranı) ile %12-45 oranında çimento ile yer değiştiren LSP'li (limostone powder) karışımlar için reolojik özellikleri ile basınç mukavemeti özelliklerinin değişimini incelemişlerdir. S/B oranının artmasıyla çökme değeri artmakta, plastik viskozite ve basınç mukavemeti değeri azalmaktadır. SP oranının artmasıyla çökme değeri artmakta, akma değeri ve plastik viskozite değerleri azalmaktadır. Düşük S/B oranında artan SP dozajı kumaya neden olmakta, S/B oranının artmasıyla terleme azalmaktadır. VA (viscosity agent) dozajı arttıkça çökme değeri azalmakta, plastik viskozite değeri artmaktadır. Düşük S/B oranında yüksek VA dozajı, betonun terlemesini azaltmakta, S/B oranı arttıkça terleme değeri de artmaktadır. LSP oranının artmasıyla S/B, SP ve VA dozajıyla birlikte çökme ve terleme artmakta, akma değeri, plastik viskozite ve basınç mukavemeti ise azalmaktadır. Çimento ile yer değiştirilen LSP'nin, basınç mukavemeti değişiminde S/B'dan daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Banfill (2003), taze çimento, harç ve betonun reolojisini tanımlamış, bu malzemelerin davranışlarını reolojik açıdan yorumlamış ve son 20 yıldaki araştırmaları belirtip yapılması gerekli çalışmalar hakkında tavsiyelerde bulunmuştur. Çimento tabanlı malzemelerin tekrar kalıplanmasında ve akışında, hem dönmeli hem de borulu viskozimetrelerden farklı değerler elde edilebilmesi ölçümler için çok önemli olduğunu belirtmiştir. Boru içindeki akış oranının değişimi ve basınç

düşüşü ile ya da dönel viskozimetrelerdeki farklı dönüş hızları ve tork'dan, kayma oranı ve kayma gerilmesinin hesaplanabildiği formüllerin üretilmesi gerektiğini önermiştir.

2.1.2. Harçlarla ilgili çalışmalar

Golaszewski ve Szwabowski (2004), Viskomat PC viskozimetresi ile üç farklı çimento tipinin (CEM I 32,5, CEM II/B 32,5, CEM III/A 32,5) ve farklı S/Ç oranındaki harçların reolojik özellikleri üzerinde beş farklı kimyasal katkı (1 polikarboksilik asit, 2 polikarboksilik ester, 3 naftalen sülfonat asit kökenli SP) tipinin, katkı ilave zamanına, (karışım suyu ile beraber ilavesine, karışımdan 30 sn ve 60 sn sonra ilave edilmesine bağlı olarak) çimento dozajına ve sıcaklığa (10, 20 ve 30°C) etkisini araştırmışlardır. Aynı dozajlar kullanıldığında polikarboksilik kökenli harçların SNF'ye göre akma gerilmesi oldukça düşük, plastik viskozite değerlerinin ise daha yüksek olduğunu, ancak düşük S/Ç oranı için, polikarboksilik kökenli SP'nin etkinliğinin iyi, normal ve yüksek S/Ç oranlı harçlar için etkisinin SNF'ye benzer olduğunu belirtmiş ve ekonomik açıdan pahalı oldukları için bu karışımlarda kullanılmasını önermemişlerdir. Bunlara ilave olarak polikarboksilik kökenli SP'nin etkisinin katkı ilave zamanına bağlı olmadığını, SNF'nin ise etkinliğinin değiştiğini, çimentonun tipi, kimyasal bileşimi ve dozajının SP'nin etkinliğinde önemli olduğunu ve çok büyük farklılıklar gösterdiğini, SP'li harçların reolojik özelliklerinde sıcaklığında önemli bir etken olduğunu, sıcaklık azaldığında kayma gerilmesi düştüğünü, plastik viskozitenin ise yükseldiğini belirtmişlerdir.

Petit vd. (2006), kimyasal (polinaftalen ve polikarboksilat kökenli) ve mineral katkılar kullanarak elde ettikleri kendiliğinden yerleşen harçların akma değeri üzerinde sıcaklık ve zamanın etkisini araştırmışlardır. Başlangıçtaki reolojik sabitlerin, SP miktarı ve tipi, sıcaklık ve zaman ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Polinaftalen sülfonat kökenli katkıyla yapılan karışımların akma değerinin, karışımın başlangıç sıcaklığına bağlı olmaksızın zaman ile lineer arttığını, polikarboksilat kökenli karışımlarda ise katkının dağıtma etkisinden dolayı sadece karışım sıcaklığına göre değiştiğini belirtmişlerdir. 15-20°C altındaki polikarboksilat polimer katkı içeren karışımların hidratasyonun başladığı ana kadar geçen sürenin % 30'luk ilk diliminde, kayma değerinin ani azaldığını bu süreden sonra kayma değerinin

zaman ile lineer olarak arttığını belirtmiştir. Özellikle polikarboksilat kökenli kimyasal katkıları kullanılarak elde edilen karışımlarda, başlangıç sıcaklığının bileşenler nedeniyle değişken olduğunu, başlangıç sıcaklığının etkisinin kullanılan hesaplama modellerinde göz önünde bulundurulması gerektiğini önermişlerdir.

Sonebi (2006), harçlar üzerinde, farklı oranlardaki UK, polikarboksilat kökenli SP ve iki tür iyonik olmayan polisakkarit kökenli (viskozite azaltıcı ve akışkanlaştırıcı) kimyasal katkının reolojik parametrelerdeki ve akışkanlıktaki etkisini incelemiştir. 0,40 S/B oranındaki harçlarda; UK'ün çimento ile yer değiştirme oranını %5, 13 ve 20, kimyasal katkı dozajını ise %0,02, 0,04, 0,06 ve 0,08 oranında kullanmıştır. İyonik olmayan polisakkarit kökenli katkıların artan dozajlarında akma değerinin arttığını, plastik ve görünür viskozitenin ise azaldığını belirtmiştir. SP dozajının artması ile de düşük kayma oranlarında görünür viskozite, yüksek kayma oranlarından daha fazla artmış, bunun nedeninin kullanılan polisakkarit kökenli kimyasal katkının moleküler ağırlığı ve polimer zincirlerinin karmaşıklığından olabileceğini belirtmiştir. Yazara göre, yüksek kayma oranında, polimer zincirlerdeki karmaşıklık bozulmakta ve akış yönünde dizilmektedir. Çimento ile yer değiştirilen UK'lü harçlarda kimyasal katkıların kullanılmasıyla, akma değerinin azaldığını, plastik viskozite değerinin ise arttığını belirtmiştir.

Yahia ve Khayat (2001), S/Ç oranı 0,40 olan, kimyasal katkı olarak reoloji değiştiren katkı (Welan Gum) ve naftalen bazlı yüksek oranda su azaltıcı katkı ile mineral katkı olarak da (çimento ile yer değiştirerek) Sd ve YFC'nu farklı oranlarda kullanarak yüksek pseudoplastik özellik gösteren harçlar üzerinde Bingham, Modifiye Bingham, Casson, Herschel-Bulkley, Log-Metod ve De Kee modellerden elde ettiği kayma gerilmesi değerlerinin değişimini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda iki koaksiyel silindirik viskozimetre kullanmıştır. Karşılaştırdığı analitik modellerinde tahmin edilen akma gerilmesi değerleri bir birinden farklı çıkmıştır. Bingham modeli diğer modellerden daha yüksek akma gerilmesi verirken, en düşük değerleri Herschel-Bulkley modeli vermiştir. Log-Metodun pseudoplastik harçların akma gerilmesinde, düşük kayma oranındaki lineer olmayan kısımlarını eleyip, lineer akış eğrisini dönüştürülmesinde kullanılmasını önermiştir. Önerilen Log-Metot, özellikle akışkan harç için, akma değerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Genellikle, Casson ve De Kee modelleri, silis dumanlı karışımların akma değerinin hesaplamasında

kullanılabilir iken YFC'lu karışımlarda, bir birine daha yakın sonuçları Bingham ve Log-Metot vermiştir. Araştırılan karışımlar için en tutarlı sonuçları De Kee modelinin verdiğini, akma gerilmesi hesaplamada düşük kayma oranında ($5,1 \text{ s}^{-1}$) akma gerilmesi ve görünen viskozite arasındaki ilişki kullanılabileceğini belirtmiştir.

2.1.3. Betonla ilgili çalışmalar

Banfill vd. (2000), BML, Btrheom, Camegraf-Img, IBB ve İki Nokta reometrelerinin analitik ve deneysel değerlendirmelerini yapıp ürettikleri aynı tür (çökme aralığı 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. Kullandığı reometrelerin farklı geometri ve aralıkta olduğundan, Bingham değerlerini farklı verdiğini belirtmiştir. Tüm reometrelerin çökme ile kayma eşiği değerleri ilişkisi iyi olduğunu, geliştirilmiş çökme ile viskozite arasında ilişki olmadığını belirlemiştir. 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 Camegraf-Img koaksiyel (eşeksenli), Btrheom paralel plakalı, IBB ve İki nokta işlenebilirlik cihazı kanatlarla karıştırma hareketlidir. Yazar, KYB'leri de kapsayan daha çok karışım, farklı viskozite değerinde, farklı agrega boyut ve şeklinde (köşeli ve yuvarlatılmış), nümerik çözümler ve reometreler için standart kalibrasyon sıvısının geliştirilmesi gerektiğini önermiştir.

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. Kalibrasyon işlemi için yağ kullanılmış, ancak bu cihazların hiç birinin Newtoniyen ölçümler için tasarlanmadığından yeterli olmadığını, kalibrasyon için doğal tanecikli saf yağ kullanılması gerektiğini de önermişlerdir.

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 korelasyonun 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 reometrenin (TCD iki nokta işlenebilirlik) tasarım ve teknik özelliklerini tanımlamışlardır. Geliştirdikleri cihazın çökme yayılması deneyi ile de ilişkili sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Duval ve Kadri (1998), kısmi ikame metoduyla karışımlara ilave edilen Sd'lı betonların basınç mukavemeti ve işlenebilirlik değişimlerini incelemişlerdir. Hedeflenen 170-200 mm çökmeyi sağlamak için SNF bazlı SP katkı kullanmışlardır. Gerekli SP dozajının, çimentonun C₃A ve alkali sülfat içeriğine bağlı değiştiğini belirtmişlerdir. %10 C₃A içeriğindeki beton için gerekli SP dozajı, %2 C₃A içeriğindeki betonun iki katı olduğunu belirtmişlerdir. %10 oranında kısmi yer değiştirilen Sd beton işlenebilirliğini azaltmadığını ve bu orandaki karışımda, gerekli SP dozajının Sd katkısız beton karışımlarından da düşük olduğunu belirtmişlerdir. S/B oranı arttıkça çökme kaybı artmamaktadır. %20'nin üzerindeki yer

değiştirmelerde yüksek mukavemetli betonlar üretilmiştir, yine de mukavemet artışı referans betonla karşılaştırıldığında %15 den küçüktür. Sd'lı betonların basınç mukavemetindeki artış çimento ile yer değiştiren Sd miktarından daha ziyade S/B oranının azalmasına daha çok bağıldır. %20 Sd içeriğinde basınç mukavemeti artmakta ve Sd düzeyi %10-15 için en büyük olmaktadır. S/B ve Silis-Çimento oranları ile ilişkili karışım modeli önerisinde bulunmuşlar ancak bu modelin başarı oranının % 50'den fazla olmadığını belirtmişlerdir.

Felekoğlu vd. (2007), beş farklı S/Ç (0,37-0,60 arasında) ve SP (polikarboksilik asit bazlı F tipi YOSA) kullanarak, sabit dozlu 65-80 cm çökme yayılması aralığındaki KYB karışımları üzerinde taze beton özelliklerini; 50 cm yayılma zamanı, V huni, L kutu ve hava içeriğini, sertleşmiş beton özellikleri olarak da basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve elastisite modülü değişimini incelemiştir. KYB üretmek için optimum S/Ç oranını 0,48-0,60 olarak önermiştir, bu değerin altında blokaj, üstünde segregasyon oluştuğunu belirtmişlerdir. Normal vibrasyonlu betonlarla karşılaştırıldığında KYB'larda yüksek çekme ve düşük elastisite modülü elde edilmiştir. Basınç mukavemeti olarak ise farklı değerler elde etmiştir. Bununla birlikte normal betonlarla karşılaştırıldığında KYB'larda yüksek çekme mukavemeti ve düşük elastisite modülü olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar, KYB deneyleri arasında basınç mukavemetini değerlendirebilen kabul edilebilir bir yöntem olmadığını, malzeme tipi ve oranına göre uygun beton karışımların deneme yanılma ile bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Ferraris ve Gaidis (1992), çimento pastasında, agregalar arasındaki uzaklığa benzetilen reometrenin levhaları arasındaki boşluğa bağılı reolojik farklılıkların olduğunu göstermiştir. Agregaların arasındaki mesafe, çimento pastasının hacim içeriğine bağıldır. Aynı zamanda malzemelerin reolojik davranışları, kayma oranı, sıcaklık, karıştırma enerjisi gibi deneylerin durumuna bağıldır. Bu yüzden betonda yapılacak deneylerde aynı durumlarda çimento pastasının ölçülebilmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, çimento pastasının akış özelliklerinin, karışım metotlarından etkilerini saptamaya çalışmışlardır.

Ferraris vd. (2000a), 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 belirtmişlerdir.

Geiker vd. (2002), S/Ç oranı 0,45, CEM I 52,5 (350 kg/m^3), % 3 Sd, % 27 UK ve üçüncü nesil SP (SikaAer 15b conc. 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 blokajın 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.

Hu ve Larrard (1996), YPB'lar üzerinde Btrheom reometresi kullanarak reolojik parametreleri ölçmüşlerdir. Betonun vibrasyon uygulanırken veya uygulanmazken Bingham akışkanı olarak davrandığını, vibrasyon uygulanırken elde edilen akma gerilmesinin vibrasyonsuz durumdaki kadar olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte plastik viskozitenin vibrasyondan çok etkilenmediğini belirleyip, plastik viskozitenin karışım oranlarına göre tahmin edilmesi için metot önermişlerdir. Deneyin durmasından sonra betonda tiksotropinin oluştuğunu ve YPB'da birden akmanın başlayıp durabileceğini belirtmişlerdir. Zamanla artan kayma gerilmesinin artışı kapsayan model önerisinde bulunmuşlardır.

Larrard vd. (1998), harç ve normal beton (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 SNF bazlı SP ile Sd katkısı kullanarak, çökme ve reolojik parametreleri (Btrheom

Reometresi ile) ölçüp, Bingham ve Herschel-Bulkley modelleri (HB) 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.

Nehdi vd. (1998), yüksek mukavemetli betonların reolojik parametrelerinde çimento ile kısmi oranda yer değiştirilen çok ince malzemelerin; kireçtaşı filler (3 μ m ve 0.7 μ m), çok ince öğütülmüş Sd'nın (0,26 μ m) betonun terlemesine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca SNF bazlı SP ve 0,33 S/B oranındaki betonlarda, çökme ve reolojik özellikler üzerinde zamanın etkisini araştırmışlardır. Düşük akış direncinin olması için mikro filler malzemenin inceliği nedeniyle SP kullanılması gerektiğini, sabit işlenebilirlik için %20 öğütülmüş silis ve kireç taşı tozu ilavesinin, mineral katkısız betona göre SP gereksinimini arttırmadığını, Sd'nın reolojik açıdan çok etkili olmasına rağmen SP gereksinimini arttırdığını belirtmişlerdir. Yazarlar mikro fillerin betonun çökme kaybını önemli derecede azaltmadığını, işlenebilirliğin uzun süreli korunmasında ve betonun terlemesini önlemede faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Reolojik özellikleri geliştirmek için, farklı filler malzemeler içeren üç bileşenli çimento esaslı bağlayıcı tasarımı yapmanın uygun olacağını, bu tasarımın çökme kaybı, dayanım ve reolojik özellikler açısından fayda sağlayacağını belirtilmiştir. Filler malzemenin kısmi ikamesi ve agrega boyutunun küçülmesiyle, beton iletiminde blokajın azalacağı ve yağlanma etkisinin artacağını, özellikle yuvarlak agregalarda akma gerilmesi ve plastik viskozitenin azalacağını belirlemişlerdir. Ayrıca düşük hızda elde edilen tork'un, yüksek hızda elde edilenden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Kum, çimento oranı yer değiştirilirse SP ihtiyacının artacağı (ıslanabilir yüzey azalması, S/Ç artışı), böylece akma gerilmesinin arttığını, ancak kum ile kısmi yer değiştirmede azaldığını (yüzey alanı ve S/B oranının artmasıyla) ve kumun kısmi ikamesi ile plastik viskoziteyi azalttığı sonucuna varmışlardır.

Özkul vd. 2000, UK, Sd ve suda eriyebilen N-vinil kopolimer kullanarak ürettikleri KYB karışımların akış özelliklerine çimento tipinin etkisini (beş farklı tip çimentoda)

araştırmışlardır. Karışımlarda, akış kapasitesini tasarladıkları deney metoduyla belirleyip, homojenlik, rötre, ultrases hızı ve basınç mukavemeti deneyleri yapmışlardır. Akışkan beton için en az 500 kg/m³ çimento veya 450 kg/m³ çimento UK ile birlikte kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Traslı çimento ve puzolanik çimento KYB için uygun sonuçlar vermediğini, mukavemet ve ultrases özellikleri %10'den daha düşük değişim gösterdiği için üretilen betonların homojen olduğunu belirtmişlerdir.

Özkul ve Sağlam (2002), iki farklı çimento (PÇ 42,5) ve üç farklı mineral katkı (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 viskozimetre (Metter Rheomat 180), betonlarda ise Tattersall cihazına benzer yeni yaptıkları viskozimetre kullanmışlardır. S/B, KK/B, MK/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, K/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.

Roussel, (2006), taze beton için kullanılan tiksotropi modelleri ile kullanılan ölçüm metotlarını tanımlayıp, KYB'ların sınıflandırılması için kayma gerilmesi ve kayma oranı değişimlerinin malzemenin flokülasyonuna bağlı olduğunu belirtmiş, flokülasyon oranına göre kullanılabilecek model (kayma eşiği ve zamanının fonksiyonu olarak) önerisinde bulunmuştur. Modeli beton reometresinden (Btrheom) elde edilen sonuçlarla; kayma oranı-kayma gerilmesi arasındaki ilişki ile hız-basınç arasındaki ilişkiye göre karşılaştırılmıştır.

Sağlam vd., (2004) uçucu kül ve polikarboksilat kökenli kimyasal katkıları kullanarak çökme yayılma > 60cm ve 50 cm'ye yayılma süresi <6 s olan betonlarda çimento katkı uyumunu araştırmıştır. 350 dozlu ürettikleri betonlarda üç farklı fabrikada üretilen PÇ 42,5 (CEM I) ve beş farklı SP kullanmışlardır. S/B oranı 0,26-0,35 arasında değişirken 7 günlük basınç mukavemeti değerleri 37,1-59,6 arasında değişmektedir. Çimento-katkı uyumunun hem taze beton özellikleri hem de üretilen betonların dayanımları açısından çok fazla değişkenlik gösterebildiğini belirtmişlerdir.

Shi vd. (2002), Sd ile 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 kilitlenme 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.

Struble vd. (2001), Btrheom reometresine benzer reometre tasarımı yapmıştır. Bu cihazdan elde edilen tork ve açısal hız değerlerinden kayma gerilmesi ve gerilme oranı hesabı için denklem geliştirmiştir. Ayrıca bu reometrede malzemenin içine konulduğu kap yüzeyinde oluşan beton, harç ve çimento sınır katmanlarının etkisini araştırmışlardır. Katmanı oluşturan malzemenin, akma gerilmesi ve plastik viskozite değerlerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmiş ve sınır katmanındaki çimento pastası kabulüyle, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar elde etmiştir. Ölçülen gerilme oranı ve tork değerlerinde, alt ve üst plakalar arasındaki kap yüksekliğinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Akma gerilmesi ve plastik viskozitenin belirlenmesinde kap yüzeylerinin de etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir. Reometrenin yüksekliği azaldığında, kap yüzeyi etkisi azalır. Plakalar arası aralık büyüdüğünde düşük tork elde edilmesi ve bu nedenle de düşük kayma gerilmesi ve yüksek kayma oranı elde edilecektir. Ancak bu etkinin hesaplanan görünür viskozitede çok az etkili olduğu belirtilmiştir.

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 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 (H2/H1) 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 sırasında deneyi yapan operatör ve kullanılan deney ekipmanlarının yıpranmasıyla ölçümlerde büyük hatalara neden olabileceğine dikkat çekmişlerdir.

Yen vd. (1999), F tipi UK ve YFC içeren çimento pastası için en büyük SP (G tipi) dozajını viskozite özelliklerine göre belirlemişlerdir. Daha sonra bu pastanın viskozitesinde kum oranının etkisini (kum oranı %30-40-50-60, çökme yayılması ve görünür viskozite arasında) araştırmışlardır. Son olarak da YPB'nun akış davranışını incelemek için harç karışımına çeşitli oranlarda iri agrega (%30-35-40) ilave etmişlerdir. Betonun reolojik özelliklerini çökme, çökme yayılması ve iki nokta işlenebilirlik cihazı (Tattersall'ın iki nokta işlenebilirlik cihazı (Mk II)'ye göre geliştirilen FHPCM cihazı) ile belirlemişlerdir. Reolojiye dayanarak akış özelliğini tanımlamak için betonun iri agrega ve harç matrisinden oluşan iki fazlı bir kompozit olarak kabul edilebileceğini, segregasyon olmaksızın üniform YPB'nun reolojik sabitlerinin Bingham denklemine göre belirlenebileceğini belirtmiştir. Çimento pastasının görünür viskozitesinin, taze YPB'nun işlenebilirliğini tanımlamada kullanılabilir olduğunu, gerekli SP dozajının ise çimento pastasının viskozitesinden belirlenebileceği sonucuna varmışlardır. İyi işlenebilir beton için %39-54 oranında pasta hacmi olması gerektiğini önermişlerdir. UK'ün %30-45 ilavesinde segregasyon olabileceğini, %50'yi geçtiği zaman ise zayıf işlenebilirlik göstereceğini belirtmişlerdir. Çökme ve çökme yayılması deneylerinin 25-175 mm çökme veren betonlarda uygulamanın uygun olduğunu, YPB'nun çökmesinin 200 mm'den fazla olduğu için işlenebilirliğini değerlendirmede yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca YPB'da üniform ve sabit akış olduğundan reolojik parametrelerle akış özelliklerinin tanımlanabileceğini belirtmiştir. Kum oranı arttıkça akış azaldığını, bunun nedenin ise kum arttıkça kumu çevreleyen çimento pastası miktarı azalmasıyla kum tanelerinin kilitlenmesine neden olduğunu ancak kumun gereğinden az olması durumunda da kuma olacağını belirtmiştir. Sabit SP dozajında, iri agrega azalmasıyla çökmenin artacağını, hem SP hem de iri agrega sabit tutulup ince agrega azaltılırsa çökme yayılması artacağını, pasta hacminin artmasıyla çökme yayılması

artacağını, benzer olarak betonun işlenebilirliğin de içindeki harç miktarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yücel (1997), harç fazının reolojik parametrelerinin (kayma eşiği ve plastik viskozite), betonun kohezyonu ve pompanın itme gücüne etkisini incelemiştir. Su ve harç içerikleri sabit olarak yuvarlak ve kırmataşlı agregalarla akıcı ve yüksek mukavemetli betonlar üretmiştir. Çalışmada farklı oranlarda mineral katkı (üç farklı UK), kimyasal katkıyı (SMF ve SNF) çimentonun farklı dozajları ($300-400 \text{ kg/m}^3$) için kullanmıştır. Harç için reolojik sabitleri koaksiyel viskozimetre ile (Rheomat 180), betonda işlenebilmeyi ise çökme, çökme yayılması ve K çökme deneyleri ile belirlemiştir. Betonun kohezyonu ile harcın reolojik parametreleri arasında lineer bir ilişki kurmuştur. Çimentolu malzemelerin kompozisyonunun, kaba agreganın pürüzlülüğünün, harç fazının ve betonun ilişkisinin etkilediğini belirtmiştir. UK'ün kısmi ikame oranının %15-20 mertebesinde tutulmasını ve en küçük çimento dozajının 400 kg/m^3 'ün altına düşmemesini, SP katkı miktarının bağlayıcı madde içeriğine oranının %2,0-2,5 oranında katılmasının pompalanabilme, mukavemet, durabilite ve ekonomik açıdan faydalı olacağını önermiştir. SP'nin artması ile τ_0 ve η_{pl} değerinin azaldığını, en düşük τ_0 değerinin en yüksek SP/(C+UK) değerinden elde edildiğini, katkısız harçların η_{pl} değerinin SP içeren UK harçlara göre % 35 daha düşük olduğunu (UK η_{pl} değerini arttırdığını), SP etkisinin yüksek çimento dozajı ve düşük UK içeren harçlarda hızla ortaya çıktığını, salt çimento ile elde edilen harçlarda dozajın azalması ile τ_0 ve η_{pl} değeri azalmakta yani kohezyonunu kaybettiğini (η_{pl} değerinin azalması nedeniyle) UK değerinin artması harçlarda τ_0 ve η_{pl} değerinin artmasına ancak SP kullanımı ile bu etkinin kaybolduğunu hatta tersine döndüğünü 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 viskoziteyi (BML Viskozimetre C-200 ile) belirleyip çökme arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmalarında çimento tip (CEM I 42,5 R) ve dozajını sabit tutarlarken, sekiz farklı SP (6 lignosülfonat kökenli, SNF kökenli ve 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) kapsamaması gerektiği sonucuna varmıştır. Çökme ve plastik viskozite arasında ise korelasyonun düşük olduğunu, bu nedenle de analitik değerlendirmelerin yapılamadığını belirtmiştir.

Wüstholtz, (2003), KYB karışımlar üzerinde J ring deneyinden elde ettiği; yayılma çapı, T50 zamanı ve çökme yüksekliği değerleri ile çökme (yayılması çapı ve T50 zamanı), V huni akış zamanı değerlerini karşılaştırmıştır. J ring deneyinde, donatıdaki blokaj (blocking) yüksekliği ve yayılma çapı arasında ilişkinin yüksek olduğunu ($R= 0.95$), donatıdan geçen malzeme ile de betonun blokaj oranının hesaplanabileceğini belirtmiş ve model önerisinde bulunmuştur. V huni deneyinde akış zamanının betonun görünür viskozitesinin tanımlayabileceğini, bununla birlikte J ring yayılma çapı ile çökme yayılması çapı arasında korelasyonun yüksek ($R= 0.93$) olmasına karşılık V huni ile de kabul edilebilir ($R \approx 70$) olduğunu belirtmiştir.

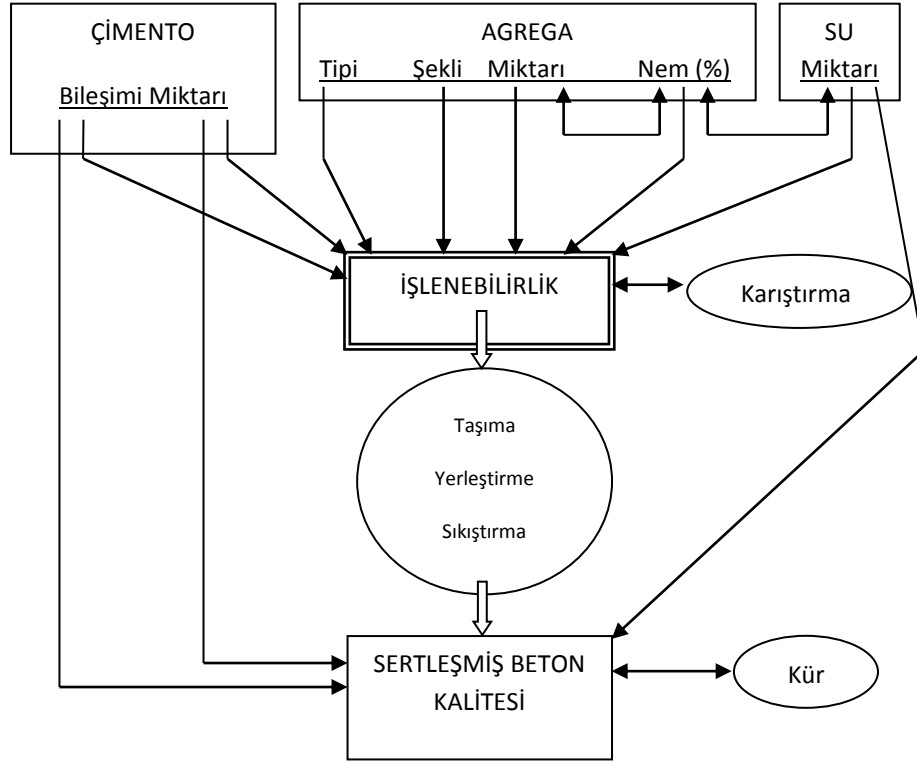
2.2. Taze Harç ve Betonun İşlenebilirlik Tanımları

Harç, çimento, su, agrega ve gerektiğinde katkı maddelerinin (mineral, kimyasal, fiber vb.) belirli şartlar ve oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, betonun harç fazını oluşturan bir yapı malzemesidir. 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. Kompasitesi 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, kompasitesini ve dolayısıyla dayanımını kaybetmemesi istenir. Ayrıca kalıpları, kolaylıkla yerleştirilerek en az boşluk bırakacak şekilde sıkıştırılması gerekir. Bu nedenle taze beton yeterli işlenebilmeye sahip olmalıdır, yani üniform, kolayca karıştırılabilir, taşınabilir (veya iletilebilir), yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltilebilir olmalıdır. Taze betonun segregasyon göstermeden sahip olduğu bu özelliklerin tümü “işlenebilme” olarak adlandırılır. Ayrıca, yerine yerleştirilen taze betonda mümkün olabildiği kadar az terleme (su salma) olmalı ve priz (sertleşme) süresi kullanım amacına uygun olmalıdır. İşlenebilme özeliği betonun yapısından kaynaklanan; taze beton kütleğinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun gösterdiği direnç (kayma dayanımı, kohezyon) ile yerleştirilmeyi ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık özellikleri ile ilgilidir (Erdoğan, 2003; Baradan, 1998).

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



Şekil 2. 1. Beton özelliklerini etkileyen faktörler (Tattersall, 1991).

Bu etkenlerin dışında 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 topluluklarca yapılmış tanımlamalarından bazıları verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Çeşitli toplulukların işlenebilirlik tanımlamaları.

Topluluk İsmi	Tanım
Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 116R-00)	“Homojen durumda karıştırılması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve sonuçlandırabilirliği 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

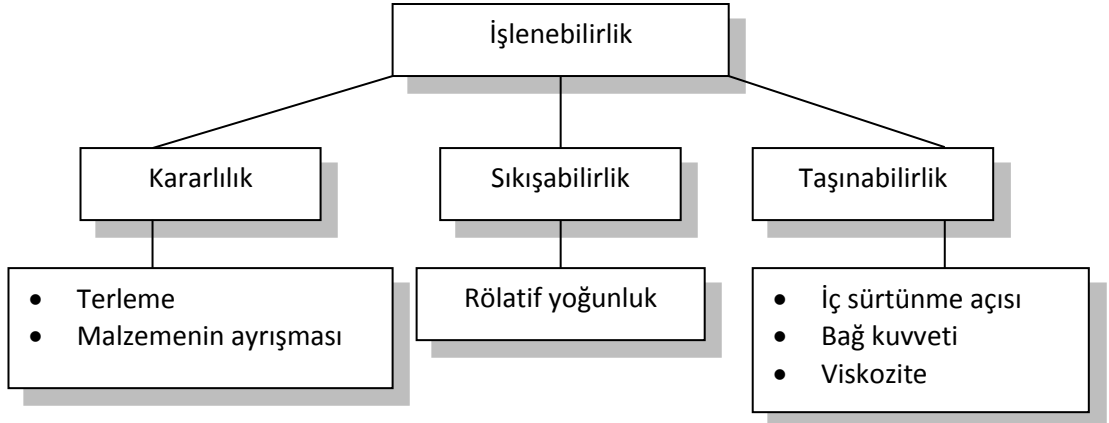
Bu tanımlar incelendiğinde tanımların hepsinde genel kabullerin ortak olduğu ancak tanımların fiziksel büyüklükleri kapsamadığı görülmektedir.

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 ayrılmaz. 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 (Sağlam ve Mutlu, 2001, Erdoğan, 2003). Pompa betonunun

işlenebilirliğine “Pompalanabilirlik” adı verilir. İşlenebilirlik özelliklerine ilave olarak pompalanabilirlik kavramıyla, boru içinde betonun minimum enerjiyle, kesintisiz ve niteliklerini yitirmeden iletilebilmesi 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) çökelme (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 olduğunu söyleyebilir (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, Vebe 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 iyileştirilmektedir. 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. 3.Taze Harç ve Betonun İşlenebilirlik Deneyleri

Taze harçların işlenebilirliği öncelikle flow table (yayılam tablası) yöntemiyle belirlenmektedir. 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 standard deneyler kullanılarak yapılmaktadır. Ne yazık ki standart deneylerin sonuçları böyle bir optimumu bulmaya yetecek düzeyde bilgi vermezler. 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 simule ederken, dördüncü grup deneyler betona geleneksel reometre kavramını uygular. Bunlarla

birlikte betonun akış özellikleri doğrudan ölçemeyen (örneğin, çok düşük çökmeli betonların bir çoğu) deney metodlarının 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 T5 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).

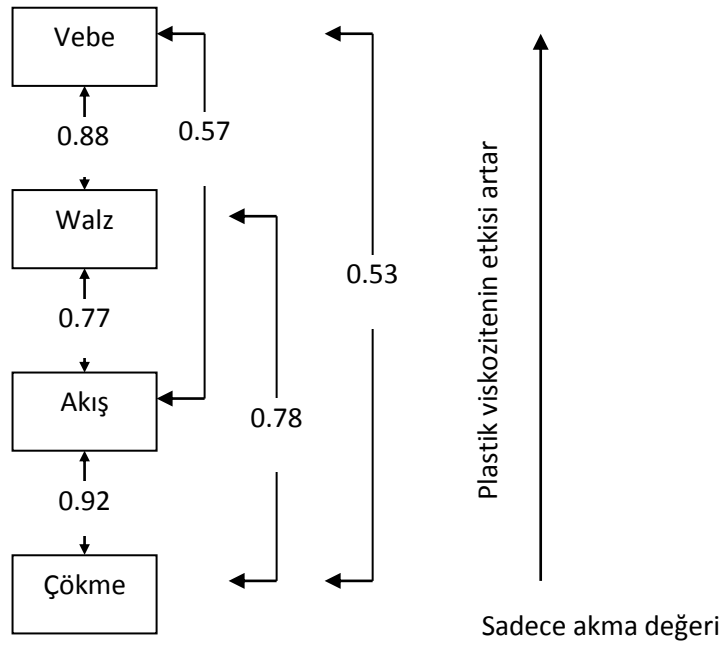
- ❖ Penetrasyon deneyleri; kelly topu deneyi, wigmore kıvam ölçeri, halka penetrasyon deneyi
- ❖ Tekrar kalıplanma (remolding) testleri; çökme deneyi, sarsma tablası, deneyi, Vebe deneyi, powers'ın tekrar kalıplama deneyi, powers ve wiler cihazı, thaulow deney cihazı,
- ❖ Akış deneyleri; LCL cihazı,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

Çizelge 2.3’de bazı standart deneylerin geçerli olduğu beton tipleri ve kullanıldıkları aralıklar verilmiştir.

Çizelge 2.3. Tek noktalı deneyler ve geçerli oldukları kıvam aralıkları

		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

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).

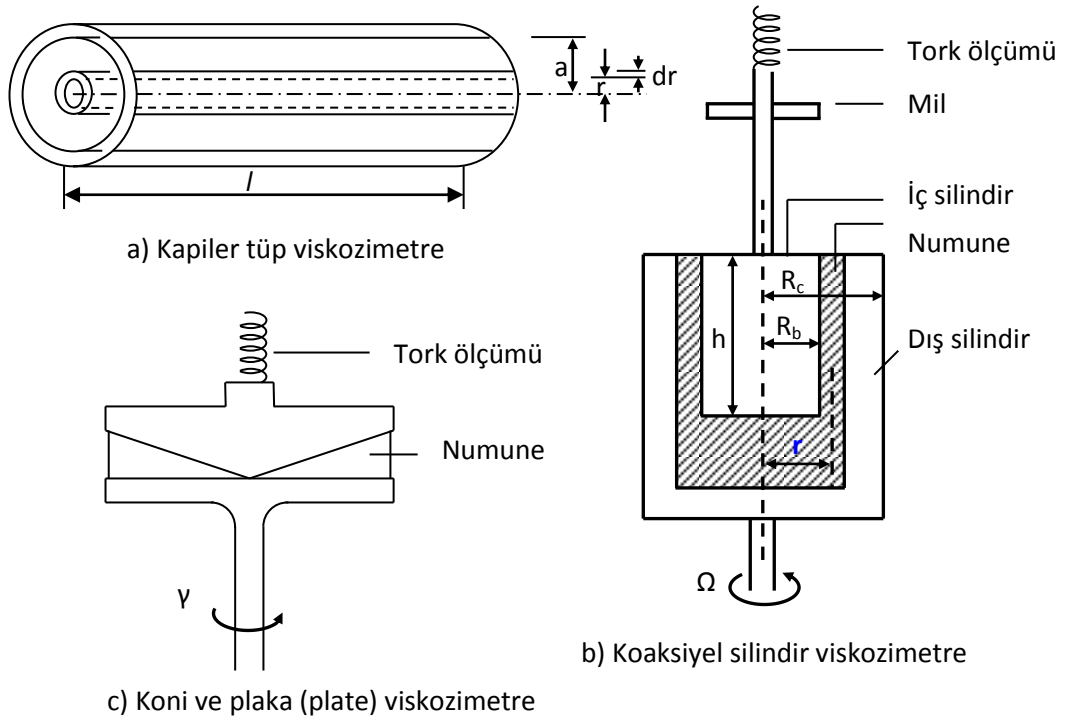
Yaygın olarak kullanılan testlerin çoğu yalnızca ya plastik viskozite yada akma gerilimi ile ilgilidir. Elde edilen ölçüm değerleri, deney aleti tipi ve operatörün becerisine bağlı olarak değişebilmektedir. Şu halde standart deneyler, betonun tür ve kıvamı hakkında fikir verebilirler fakat taze betonun işlenebilirliğini tam olarak açıklayamazlar. Amaç betonun işlenebilirliğini kantitatif olarak ifade etmek olarsa, 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, aksel veya gezici hareket yapan kanatlar, çeşitli hızlarda dönen beton içine koyulur. Koni ve plaka viskozimetrelerde (Şekil 2.4 c) ise; koaksiyel viskozimetrelerin iki silindiri, düz bir plaka ve geniş açılı koni ile yer değiştirmiştir. İncelenen malzeme kama şeklindeki iki aralığa yerleştirilir. Bunlardan biri 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 diğler viskozimetreler ise;

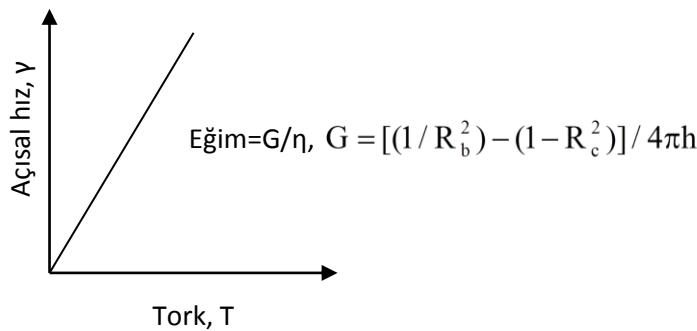
- ✓ Kılcal borulu viskozimetre; $\eta=1$ poise'den küçük sıvılarda % 0,1 duyarlılıkta,
- ✓ Düşen küreli viskozimetre'dir.

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

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 oranı ($\dot{\gamma}$) dir². Yani akış, gerilme,

¹ Birimi N/m² (ML⁻¹T⁻²) dir

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

kayma, kayma oranı ve zaman arasındaki ilişkiye bağımlıdır (Özkul ve Sağlam, 2002; Leslie ve Xihuang, 2000; Banfill, 2003).

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

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

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

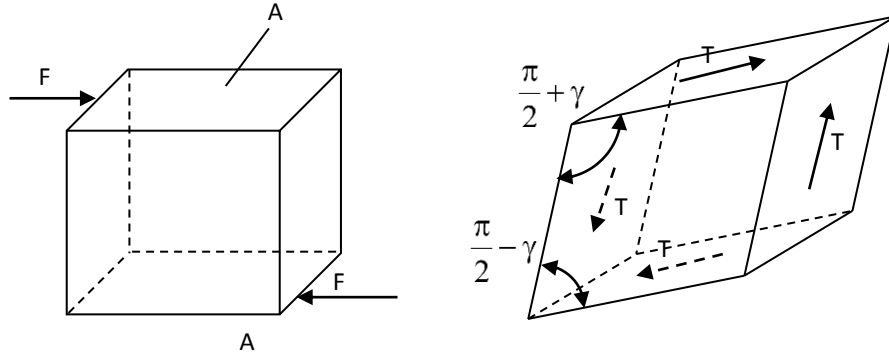
2.4.1.1. Bünye denklemleri

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;

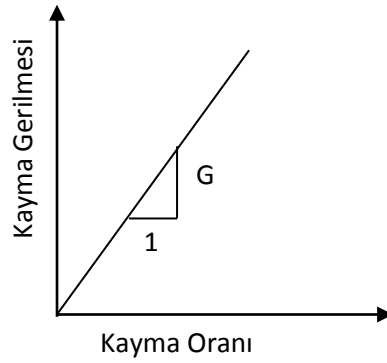
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

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



Şekil 2. 6. A alanı üzerine etkiyen F kayma kuvveti ve kayma deformasyonu

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.

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

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 laminar 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.s/cm²), 1/100 poise= 1 centipoise (cp) dir)³. Şekilsiz (amorf) malzemelerin ve akışkanların (sıvı malzemeler; su, asfalt, 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 açısal 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.

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

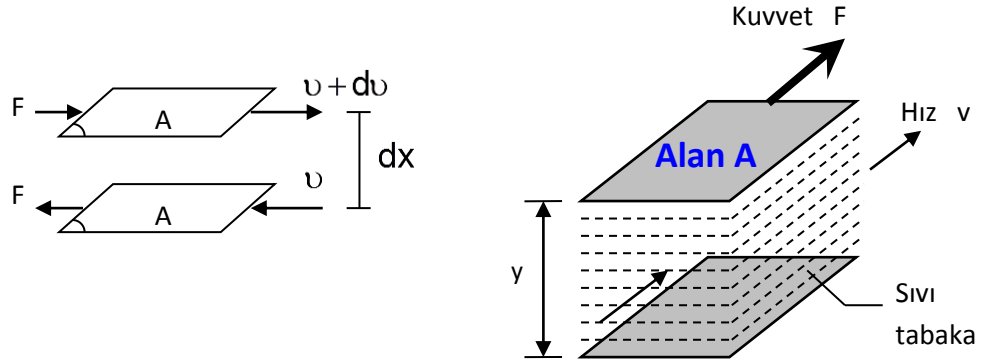
$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.5)$$

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

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

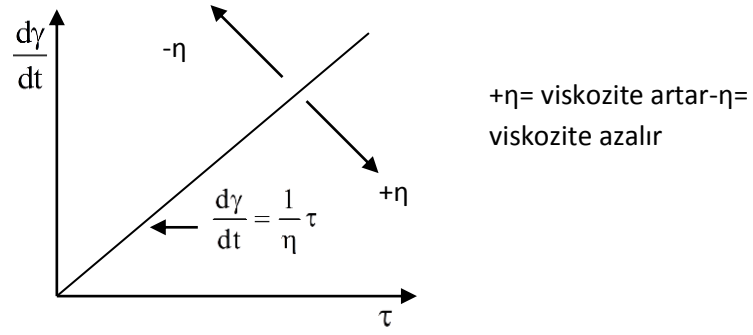
Açısal şekil değiştirme hız değişimi kayma oranına $\left(\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}\right)$ eşittir. Kuvvet ve değişim arasındaki orantı faktörü (kayma gerilmesi (τ) ile açısal şekil değiştirme hızı) viskozite olarak adlandırılır (η). Reolojide en basit viskoz sıvı modeli Newton sıvısı (Newtoniyen)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

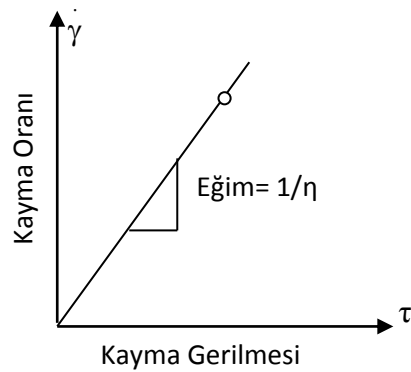
2.7 denklemi Newton sıvısının bünye denklemidir. Newton yasasına uyan cisimlere Newtoniyen cisimler denir. Newton yasası, viskoz şekil değiştirme hızının kayma gerilmesi ile orantılı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.9.'da Newton sıvısının diyagramı gösterilmiştir (Yücel, 1993).



Şekil 2. 9. Newton sıvısı (Tattersall ve Banfill, 1983; Basics of Rheology, 1991).

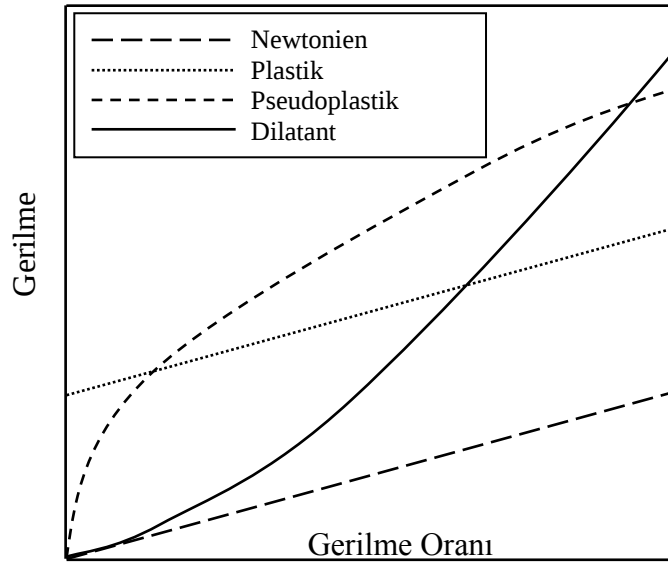
Şekil 2.10’da görüldüğü gibi sabit sıcaklıktaki Newtoniyen akışkanda, akışın özelliklerini tanımlayan viskozite değerinin hesaplanabilmesi için bir deneysel değerin belirlenmiş olması yeterlidir (Yücel, 1993). Çünkü bütün Newtoniyen sıvılar orijinden geçen bir doğru ile temsil edilirler. Doğrunun eğimi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

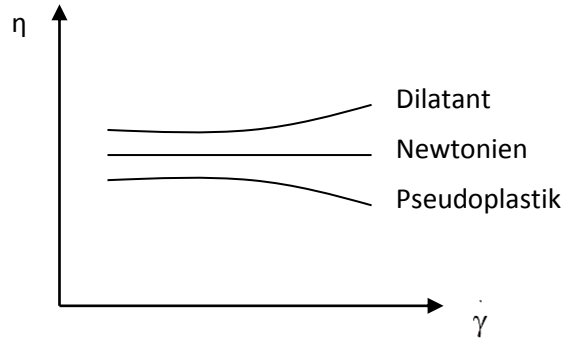
Akış davranışının bir kaç tipi bulunmaktadır (Şekil 2.11 ve 2.12). Bu davranışlardan en basiti gerinme oranı sıfır iken gerilmesi sıfır olan ve gerinme oranı ile gerilme arasında lineer ilişki bulunan Newtoniye davranışdır. Viskozitenin kayma oranı ile değişimi sabitse reoloji, Newtoniye olarak ifade 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 pseudoplastik davranıştır⁴. 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 Pseudoplastik (pseudoplastic veya Shear Thinning) ; yalancı plastik veya kayma incelmesi.

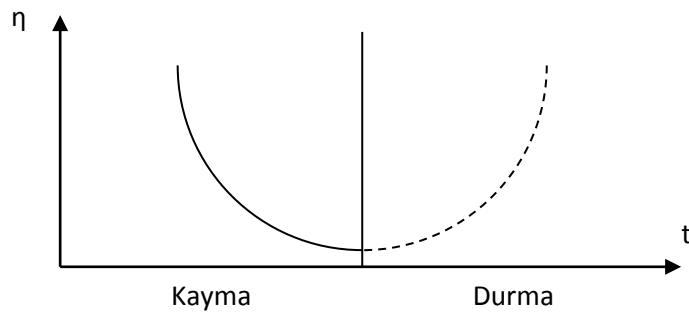
⁵ Shear Thickening (Dilatance); kayma kalınlaşması veya kalınlaşma



Şekil 2. 12. Viskozite (η) – kayma şekil değiştirme oranı ($\dot{\gamma}$) ilişkisi (Yücel, 1993).

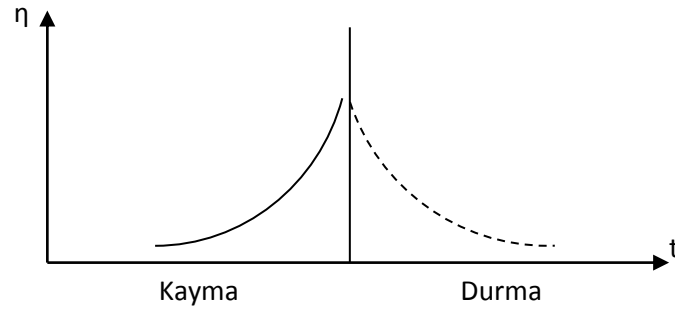
Ancak birçok Non-Newtoniye akışkan zamana bağlı davranış gösterir. Zamana bağlı ise viskozite, $\eta = F(\gamma \text{ veya } \tau \text{ ve } t)$ olacaktır. Bu tür malzemeler Tiksotropik ve Reopektik malzeme olarak belirlenir (Yücel, 1993).

- ✓ Tiksotropi = Sabit kayma oranında tiksotropik sıvıların viskozitesinde azalma olur. Benzer olara, aynı etki ölçülen kayma gerilmesinin azalması olarak görülür. Kayma gerilmesi, aynı kayma hızında zamanla küçülür. Kayma deformasyon hızı sıfıra geldiğinde malzeme toparlanmaya başlar. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları çakışır. Belirli bir süre sonra aynı sonuçlar tekrar 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

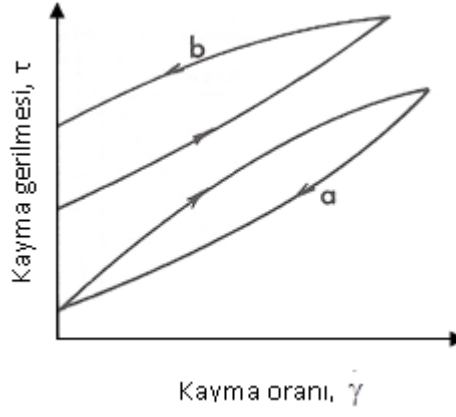
- ✓ Reopektik⁶ (Tiksotropik olmayan) = Kayma deformasyon hızının artması veya azalması çoğu kez farklı kayma gerilmelerine neden olur ve diyagramda histeresis çevrimi olarak gösterilir. Histeresis çevriminde başlangıç ve bitiş noktaları tam olarak çakışmıyorsa yani kayma deformasyon hızı sıfır olduğunda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

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-Tixotropy



Şekil 2. 15. Zamana bağlı Non-Newtoniye malzemeler (a ve b için) için akış eğrileri

2.4.1.3. Akışkan ve süspansiyon

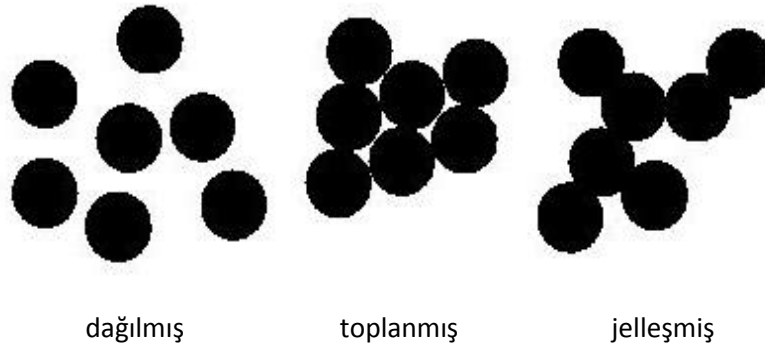
Gerçek sıvıların çoğu normal şartlar altında Newtoniye akış davranışı gösterirler. Askıdaki katı madde konsantrasyonun düşük veya çok ince ve üniform olarak dağılmış süspansiyonlar için benzer bir kabul yapıldığında, katı maddenin temel etkisi süspansiyonun viskozitesini artırmaktır (Özkul ve Sağlam, 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, yığılanmış) parçacıkların boyutu, süspansiyonun davranışını etkileyen iki önemli faktördür. Süspansiyondaki katıların hacim oranındaki artışı, viskozitede önemli artışa sebep olur (Leslie ve Xihuang, 2000).

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

Test sırasındaki kayma gerilmesi ve deformasyon oranı, askıdaki katı madde

taneciklerinin dağılımını etkileyebileceğinden, yoğun süspansiyonların reolojik parametrelerini ölçmek zordur.

Akışkan davranışının etkilendiği diğer faktör, dağılı veya flokülleşen parçacıkların boyutudur. Anında flokülleşebilen kolloideal parçacıklar için (1 μm den daha düşük çapta) flokülasyon özellikle önemlidir. Şekil 2.16'da ya farklı toplanmalardan (kümeleşmeden) ya da jelden (sürekli oluşan üç boyutlu ağ) flokülleşen parçacıklar gösterilmiştir. Çoğunlukla kuvvetler oldukça zayıftır ve kayma tarafından kolayca koparılır. Böylece süspansiyonda ki akış başladığında flokülleşmiş ağın bozulmasına sebep olan yeterli gerilme uygulanabilir. Çoğu kez bu bozulma akma gerilmesinde tamamlanamaz, bu yüzden süspansiyon akışkan olmasına rağmen hala biraz flokülleşir ve bu kalan flokülasyon 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-Newtoniyeen 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 Newtoniyeen olsa da olmasa da, Non-Newtoniyeen sıvı gibi davranırlar. Davranış, akışın tipine bağlıdır. Newtoniyeen 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 Newtoniyeen sıvı, kayma eşiği ve değişik tiplerde Non Newtoniyeen davranış gösterebilir (Leslie ve Xihuang, 2000).

Çizelge 2. 5. Süspansiyon konsantrasyonu için viskozite ile ilgili denklemler

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 dir. İçsel viskozite $[\eta] = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\eta/\eta_c - 1}{\phi}$ küresel parçacıklar için 2.5, küre

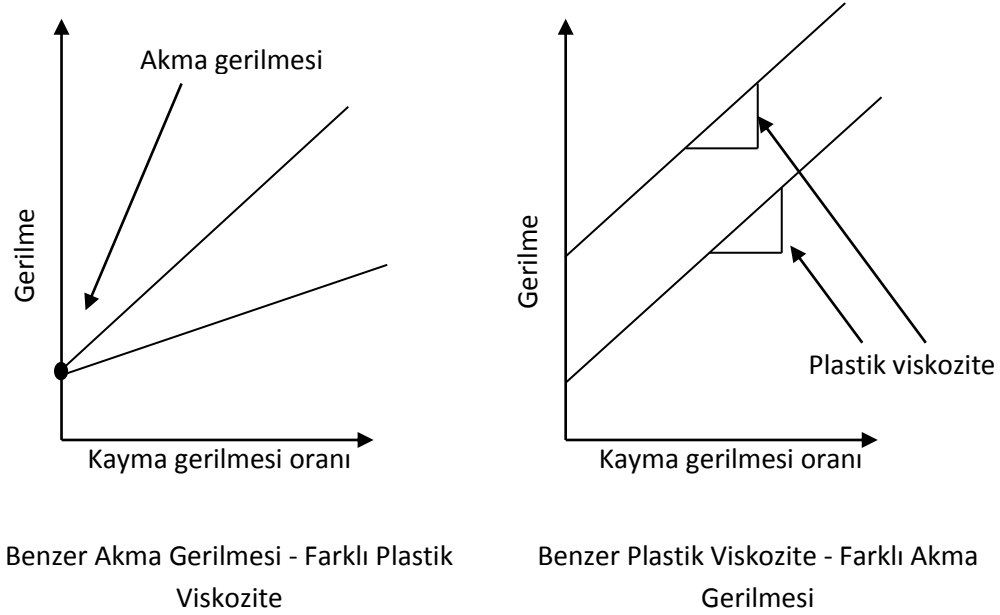
olmayan parçacıklar için ise daha yüksektir. $\phi \rightarrow \phi_m$ olarak gözlenen viskozitedeki önemli artışı Krieger-Dougherty daha doğru ön görmektedir. Krieger-Dougherty'ye göre yoğunluk ile viskozite artar. Akma gerilmesi yoğunluk artarken de artar. Bu ilişki genellikle power kanunu kullanılarak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

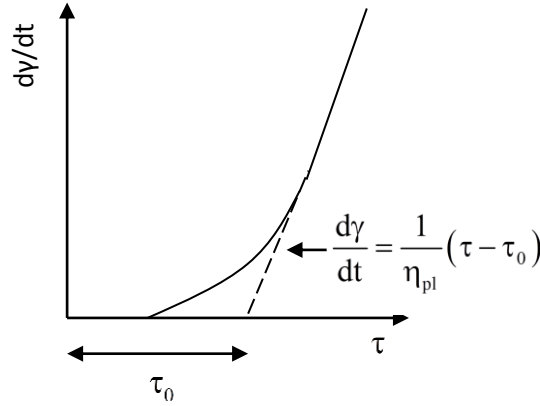
varsaymak uygulamada yaygındır. Çimento pastasının kendisi, sıvı ortamdaki (su), katı taneciklerin (çimento) süspansiyonu olduğundan, taze betonu çok fazlı bir malzeme olarak varsaymak daha uygundur (Özkul ve Sağlam, 2002). Şekil 2.17’de aynı betonun iki ayrı parametrede değişimi gösterilmiştir. Bu betonların 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 (tiksotropik) 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 hesaplamaadır. Bununla birlikte bu model akma değeri terimini kapsamadığından dolayı hareketli iletim kavramını açıklamak için kullanılabilir.

Çizelge 2. 6. Kayma oranı ve kayma gerilmesiyle ilişkili denklemler

Denklem ismi	Denklem
Newtoniye	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
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	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$ Newtoniye akışı $n > 1$ Kayma kalınlaşması $n < 1$ Kayma incilmesi
Vom Berg, Ostwald-de Waele	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} \left(\dot{\gamma} / C \right)$
Eyring	$\tau = a \cdot \sinh^{-1} (b \cdot \dot{\gamma})$ a, b; sabit. akma değeri içermez, büyük kayma oranlarında lineer bağımlılık verir.

Robertson-Stiff	$\tau = a \left(\dot{\gamma} + B \right)^C$ B: 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
n; Newtoniyen davranıştan sapmayı gösteren power indisi'dir. N, kayma pseudoplastik sistemler için 1 den küçüktür.	

Yukarıdaki denklemlerin tümünde (Newton'un akış kanunundan hariç tutulması ile) kullanılan ve akışta tanımlanan en az iki parametrenin olduğu temel sonuçtur. Beton gibi yoğunlaştırılmış süspansiyonlarda akma gerilimi vardır. Fiziksel ana prensip, akma gerilimi ile var olan en az iki parametre, Herschel-Bulkley ve Bingham denklemleridir. Herschel-Bulkley denklemleri üç parametre içermektedir. Bunlardan biri olan n fiziksel varlığı simgelememektedir. KYB'lar gibi belirli betonlarda davranış en iyi tanımlayan denklemdir. Bununla birlikte çoğunlukla bu gün

kullanılan denklem Bingham denklemidir. Kullanılan parametreler bağımsız ölçülebilen faktör olduğu için ve takibinde görülen gerçek betonun akışı olduğundan birçok durumda bu denklem yeterlidir (Ferraris, 1999).

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

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

Bunlara ilave olarak reolojik parametreler için malzemeye göre değişen bir çok sayısal değerler verilmiştir. Bunun nedeni farklı deneysel teknik ve cihazlardan kaynaklanmaktadır. Deney anındaki kayma farklılıkları, viskozimetrelerin düzgün yüzeylerindeki fark edilemeyen tıkaç akış ve kayış mesafeleri, elde edilen verilerdeki farklılıklara neden olabilir. Çimento pastasının etkileyen deneysel parametrelerin çok olması reolojik verilerin elde edilmesini zorlaştırır. Pastanın içerdiği (su/çimento oranı veya % katı), çimento türü (yada bileşimi) ve inceliği, kullanılan katkı türü (mineral, kimyasal ve fiber) ile sıcaklık ve zamanın etkisi araştırmalarda göz önünde bulundurulmalıdır. Çimento tabanlı malzemelerin akışında birçok önemli etken vardır. Mukavemetlerinin gelişmesi ve sertleşmeleri sürecinde kendi ağırlığı altında akmaksızın durabilirler. Ölçüm tamamlanmadan sertleşme olacağından çimento tabanlı sistemler için uzun zaman diliminde yapılan ölçümler uygun değildir. Katıya benzer davranış gösteren malzemeleri açıklayan en kolay analiz Bingham modelidir (Banfill, 2003).

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

- 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 Harç ve Betonun İşlenebilirliğine Katkılarının 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 katkılara “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 katkılar 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 özellikli poliakrilat'lerden 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, ısıtılmış 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 ısısını 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 küllerini 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. Gerekğinde 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 olmaktadırlar. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 - %50'si civarında değişebilmektedir.

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Çimento ağırlığının %20 – 30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacına yaklaşık %7 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

madde de silis dumanıdır. Ferrosilikon veya metalik silikon alaşımlarının 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 “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır.

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımlarının 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’nin 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’nin beton teknolojisinde kullanımı ancak süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddelerinin geliştirilmesinden sonra yaygınlaşmıştır (Deborah, 2001; Ekinci ve Yeğınobalı, 1996).

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

Genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık ağırlıkça %7 - %10 azaltılmakta ve onun yerine bu puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince taneli olması ve çok yüksek miktarda SiO₂ içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda ve gerekse nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesinde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması (0,1 – 0,2 µm, özgül yüzeyi 130.000 – 280.000 cm²/g), taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su ihtiyacını arttırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi

için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığında, ayrıca su azaltıcı kimyasal katkı maddesi de kullanılmaktadır (Erdoğan, 1997; 2003).

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

Beton teknolojisindeki gelişmeler mineral ve kimyasal katkıların bulunması beton özelliklerinin, özellikle işlenebilmenin ölçülmesini gerekli kılmaktadır. Mineral ve kimyasal katkıların betona kazandırdığı özelliklerin doğru tespit edilmesi, beton özelliklerine etkisinde uygun kriteri sağlayacaktır. Böylece taze haldeki özellikleri belirlenen beton, prizini aldıktan sonra bu katkıların kullanılmasıyla amaçlanan yüksek performanslı beton özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayacaktır. 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

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 katkılar: - Silis dumanı - Uçucu kül - Yüksek fırın cürufu - Kalker kökenli katkılar - Agrega granülometrisinin iyileştirilmesi

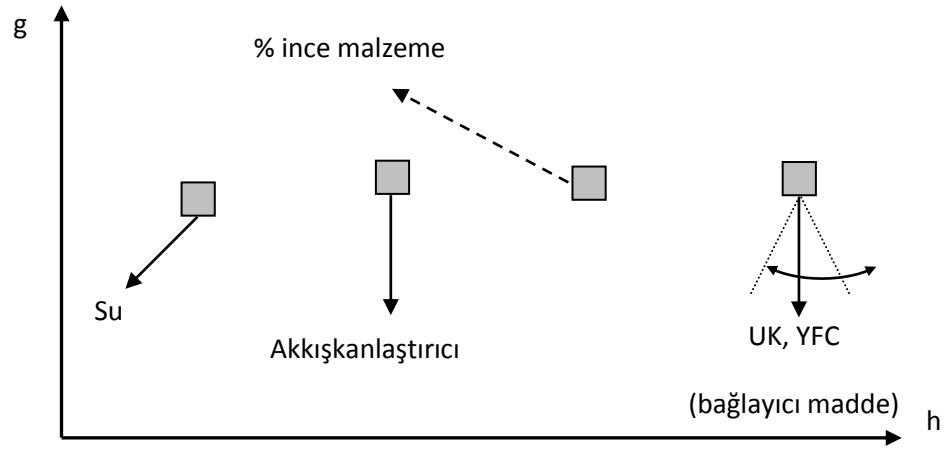
Yücel (1997), UK, Sd ve YFC içeren süperplastifiye betonların işlenebilmeleri ve işlenebilme kayıpları üzerine yapılan araştırma sonuçları Çizelge 2.8’de görüldüğü gibi özetlenmiştir.

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

3. MATERYAL ve METOD

İlk çalışmalar literatürlerdeki önerilere uygun harç karışımlarını tespit etmek olmuştur. Bu aşamada uygun kimyasal ve mineral katkıların tespiti yapılarak çıkabilecek sorunların giderilmesine çalışılmıştır. Bu ön çalışmalar özellikle harç fazındaki, kumunun cinsi ve granülometrisinin tespitine imkân sağlamıştır. Sonraki aşamada, taze harçların özellikleri, çimento dozajı, kimyasal ve mineral katkı maddelerinin tür ve miktarları değiştirilip, uygun harç karışımları üretilerek harçların taze haldeki özellikleri ve reolojik sabitleri ölçülmüştür.

Gradasyonun iyileştirilmesi, mekanik özelliklerin yükseltilmesi ve uygun taze harçların özelliklerinin elde edilebilmesi için, bağlayıcı ve dolgu malzemesi olarak silis dumanı (Sd) ve uçucu kül (C “Uc” ve F “Uf” tipi uçucu küller) mineral katkıları kullanılmıştır.

Hedeflenen harç özellikleri ise;

- ✓ Çökme değerleri 10 cm ve üzerinde olan beton karışımlarının eşdeğer harç deney örnekleri hazırlanacaktır.
- ✓ Uçucu kül ve silis dumanı ilave yöntemi ile kullanılacaktır.
- ✓ Su/Çimento (W/C) oranı 0,45-0,55 değeri arasında, katkı türüne bağlı olarak tutulacak veya değiştirilecektir.
- ✓ Harç karışımlarında agrega olarak dere kumu kullanılması planlanmaktadır.
- ✓ Çimento CEM I 42,5 R ve CEMII 42,5 A-M R sınıfında ve 300-400 kg/m³ nominal dozajlarında hazırlanacaktır.
- ✓ Taze harç deneyleri(akış masası, k çökme, BHA) ve reolojik sabit ölçümleri, saha koşullarına uygun olması için 16⁰C, 23⁰C ve 30⁰C 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

	Ön Deneyler	Araştırma deneyleri
• Agrega Deneyleri Elek 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 tayinideneyi (TS EN 196-3) • Kimyasal katkı - çimento uyumun belirlenmesi (TS EN 1015-3) • Kimyasal katkı dozajının çökme kaybına etkisinin belirlenmesi • CTPT'nin kalibrasyonu	• Taze ve Harç beton deneyleri Yayılma tablası Deneyi (TS EN 12350-6 EN 459-2, 1015-3 ASTM C230-83) K Çökme (K Slump) Deneyi İki Nokta İşlenebilirlik Deneyi • Kalıplama, saklama ve kür TS EN 12350-1'e uygun alınan taze beton numuneleri, yine TS EN 12390-1'e uygun kalıplara koyularak, TS EN 12390-2'ye uygun olarak hazırlanıp bakım uygulanmıştır.
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 üç değerin ortalaması alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanmak üzere iki farklı kum temin edilmiştir. Doğal dere kumu(0-8mm) ve kırmataş tozu(0-5mm).

✓ ***Doğal Kumu ve Dere Çakılı:*** Antalya Akseki beldesinde bulunan nehir yatağından sağlanan doğal dere kumu(0-8mm) ve çakılı (5-15mm ve 15-25mm).

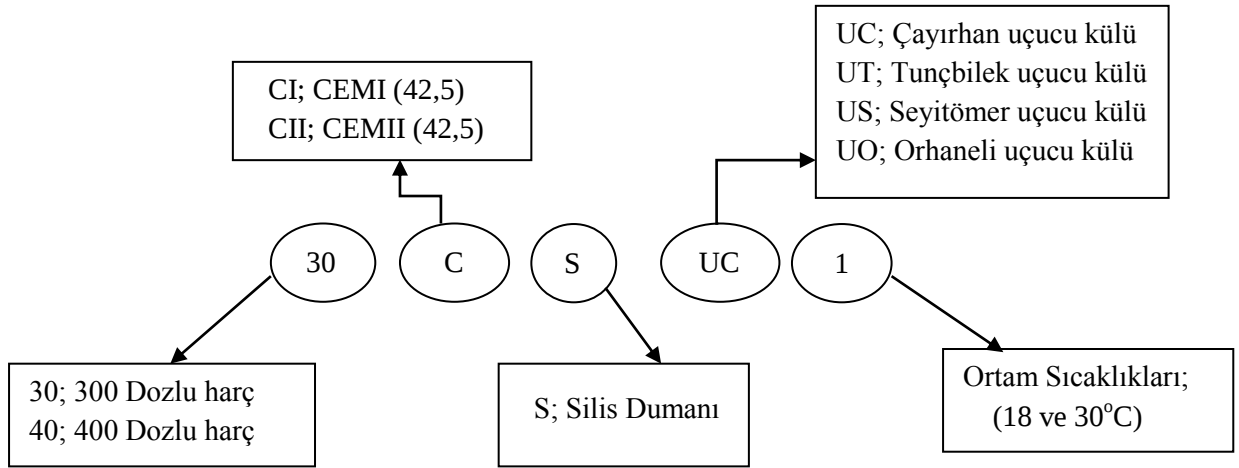
3.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Birim hacim kütle ve su emme oranı tayini deneyleri iri agregalar için ASTM C127'e göre, ince agregalar 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 tekrarlandı ve ortalama değerleri alınmıştır.

Çalışmalarda kullanılacak agregalar oranları, ACI 304-2R Sayılı "Pompalama Yöntemleri ile Betonun Yerleştirilmesi" ve ASTM C33 Beton agregası sınır eğrilerine uygun olarak ayarlandı. Deneylerde kullanılan karışımlar beton ve harç karışımları olarak tasarlanmıştır.

Deneysel çalışmada uyulan planlama ve karışım bileşenleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Üretilen harçlara ve betonlara ait kodlama ise aşağıda belirtilmiştir.

Şekil 3. 1. Üretilen harçlara ve betonlara ait kodlama



3.3. Çimento

Harç ve 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" standardı, madde 5.2.3'e göre yapılmıştır.

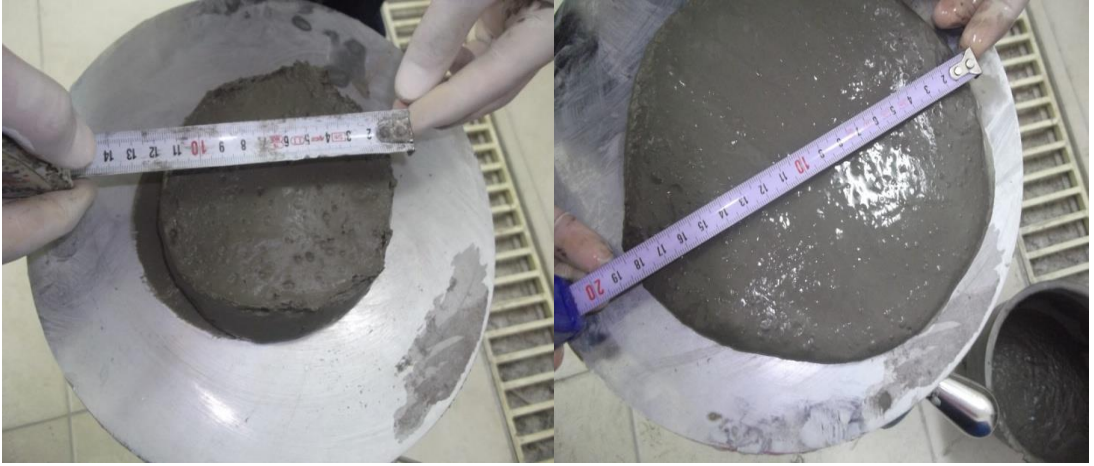
3.4. Kimyasal Katkı

Çalışmada kullanılacak katkının belirlenmesi için; ASTM C 494 ve TS EN 934-2 standartlarına uygun, 3 ayrı ticari markadan; 7 Polikarboksilat esaslı hiper akışkanlaştırıcı 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 (Yayılma 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. 2. 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

Deneyisel çalışmalarda kullanılan silis dumanı (ferrosilisyum FeSi) Antalya Etibank Ferrochrom fabrikasından sağlanmıştır.

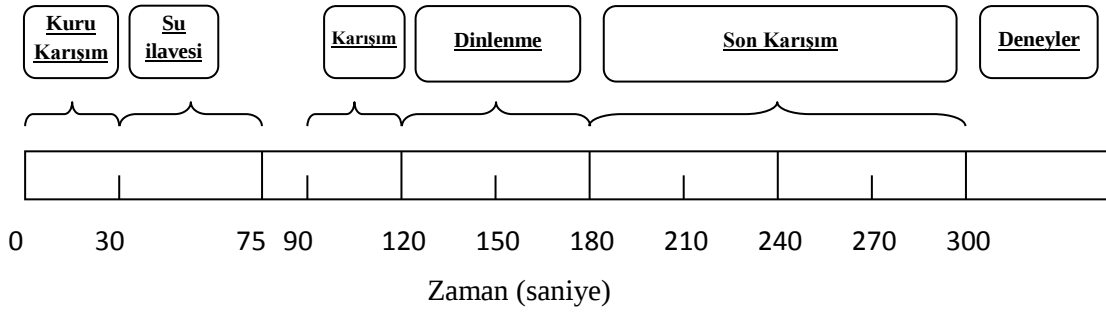
3.8. Harç ve Beton Karıştırma Cihazı ve Metodu

Harç ve beton karışımlarının hazırlanmasında 45-50 lt etkili kullanım kapasiteli düşey eksenli cebri karıştırıcı mikser kullanılmıştır (Şekil 3.3). 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. 3. Çalışmalarda kullanılan beton mikseri

Karılma işlemi Şekil 3.4’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. 4. Harçların ve betonun karılma işlem aşamaları

3.9. Harç 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 karışımları için 0,45, 400 dozlu harçlar için 0,55 olarak belirlendi.

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.

Harç ve beton karışım hesaplamalarında kimyasal katkı denemelerinde terleme olmaksızın en fazla çökme veren katkı tipi ve dozajı dikkate alınmıştır. 1 m³ karışımdaki kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.2. verilmiştir.

Çizelge 3.2. Üretilen beton karışımlarında kullanılan 1 m³'teki malzeme miktarı

Kullanılan Malzeme (1 m 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 30CI18-30CI30	415,02	645,33	700,35	201,21	300,00	153,81	-	-	4,50
30CIS18-30CIS30 30CIS18-30CIS30	407,20	633,17	687,16	197,42	300,00	153,46	-	30,00	4,95
30CIUC18-30CIUC 30CIUC18-30CIUC30	404,59	629,10	682,74	196,14	300,00	153,34	45,00	-	5,18
30CISUC18-30CISUC30 30CISUC18-30CISUC30	396,77	616,94	669,55	192,35	300,00	152,98	45,00	30,00	5,63

Çizelge 3.2.Üretilen beton karışımlarında kullanılan 1 m³'teki malzeme miktarı
(Devam)

30CIUS18-30CIUS30 30CIUS18-30CIUS30	403,46	627,34	680,84	195,60	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUS18-30CISUS30 30CIUS18-30CIUS30	395,64	615,19	667,64	191,81	300,00	152,93	45,00	30,00	5,63
30CIUT18-30CIUT30 30CIUT18-30CIUT30	404,07	628,30	681,88	195,90	300,00	153,32	45,00	-	5,18
30CISUT18-30CISUT30 30CISUT18-30CISUT30	396,25	616,15	668,68	192,10	300,00	152,97	45,00	30,00	5,63
30CIUO18-30CIUO30 30CIUO18-30CIUO30	403,73	627,76	681,29	195,73	300,00	153,29	45,00	-	5,18
30CISUO18-30CISUO30 30CISUO18-30CISUO30	395,91	615,59	668,09	191,94	300,00	152,94	45,00	30,00	5,63
40CI18-40CI30 40CI18-40CI30	394,53	613,62	665,94	191,32	400,00	157,89	-	-	6,00
40CIS18-40CIS30 40CIS18-40CIS30	384,21	697,41	648,35	186,26	400,00	157,41	-	40,00	6,60
40CIUC18-40CIUC 40CIUC18-40CIUC30	380,71	591,98	642,45	184,57	400,00	157,26	60,00	-	6,90
40CISUC18-40CISUC30 40CISUC18-40CISUC30	370,29	575,76	624,86	179,52	400,00	156,78	60,00	40,00	7,50
40CIUS18-40CIUS30 40CIUS18-40CIUS30	379,21	589,64	639,92	183,85	400,00	157,18	60,00	-	6,90
40CISUS18-40CISUS30 40CISUS18-40CISUS30	368,79	573,43	622,32	178,79	400,00	156,72	60,00	40,00	7,50
40CIUT18-40CIUT30 40CIUT18-40CIUT30	380,03	590,92	641,31	184,24	400,00	157,23	60,00	-	6,90
40CISUT18-40CISUT30 40CISUT18-40CISUT30	369,61	574,71	623,72	179,19	400,00	156,74	60,00	40,00	7,50
40CIUO18-40CIUO30 40CIUO18-40CIUO30	379,57	590,19	640,51	184,02	400,00	157,20	60,00	-	6,90
40CISUO18-40CISUO30 40CISUO18-40CISUO30	369,14	573,98	622,92	178,96	400,00	156,73	60,00	40,00	7,50

Çizelge 3.3.Üretilen Harç karışımlarında kullanılan 1 m³'teki malzeme miktarı

Harçlar içinKullanılan Malzeme (1 m ³ için)	Kum 0-5 (kg)	Kum 0-8 (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Uçucu kül (kg)	Silis dumanı (kg)	Kimyasal katkı (kg)
Seri ismi							
30CI18-30CI30 30CI18-30CI30	757,79	1180,2	300	149,58	-	-	4,5
30CIS18-30CIS30 30CIS18-30CIS30	732,96	1139,706	300	153,46	-	30	4,95
30CIUC18-30CIUC 30CIUC18-30CIUC30	728,262	1132,38	300	153,34	45	-	5,18
30CISUC18-30CISUC30 30CISUC18-30CISUC30	714,186	1110,492	300	152,98	45	30	5,63
30CIUS18-30CIUS30 30CIUS18-30CIUS30	726,228	1129,212	300	153,29	45	-	5,18
30CISUS18-30CISUS30 30CISUS18-30CISUS30	712,152	1107,342	300	152,93	45	30	5,63

Çizelge 3.3.Üretilen beton karışımlarında kullanılan 1 m³'teki malzeme miktarı
(Devam)

30CIUT18-30CIUT30 30CHUT18-30CHUT30	727,326	1130,94	300	153,32	45	-	5,18
30CISUT18-30CISUT30 30CHSUT18-30CHSUT30	713,25	1109,07	300	152,97	45	30	5,63
30CIUO18-30CIUO30 30CHUO18-30CHUO30	726,714	1129,968	300	153,29	45	-	5,18
30CISUO18-30CISUO30 30CHSUO18-30CHSUO30	712,638	1108,062	300	152,94	45	30	5,63
40CI18-40CI30 40CH18-40CH30	710,154	1104,516	400	157,89	-	-	6
40CIS18-40CIS30 40CHS18-40CHS30	691,578	1255,338	400	157,41	-	40	6,6
40CIUC18-40CIUC 40CHUC18-40CHUC30	685,278	1065,564	400	157,26	60	-	6,9
40CISUC18-40CISUC30 40CHSUC18-40CHSUC30	666,522	1036,368	400	156,78	60	40	7,5
40CIUS18-40CIUS30 40CHUS18-40CHUS30	682,578	1061,352	400	157,18	60	-	6,9
40CISUS18-40CISUS30 40CHSUS18-40CHSUS30	663,822	1032,174	400	156,72	60	40	7,5
40CIUT18-40CIUT30 40CHUT18-40CHUT30	684,054	1063,656	400	157,23	60	-	6,9
40CISUT18-40CISUT30 40CHSUT18-40CHSUT30	665,298	1034,478	400	156,74	60	40	7,5
40CIUO18-40CIUO30 40CHUO18-40CHUO30	683,226	1062,342	400	157,2	60	-	6,9
40CISUO18-40CISUO30 40CHSUO18-40CHSUO30	664,452	1033,164	400	156,73	60	40	7,5

3.10. Taze Harç ve Beton Deneyleri

Harçların ve Betonların işlenebilmesi, yayılma tablası (flow table), 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. Yayılma Tablası (Flow table)

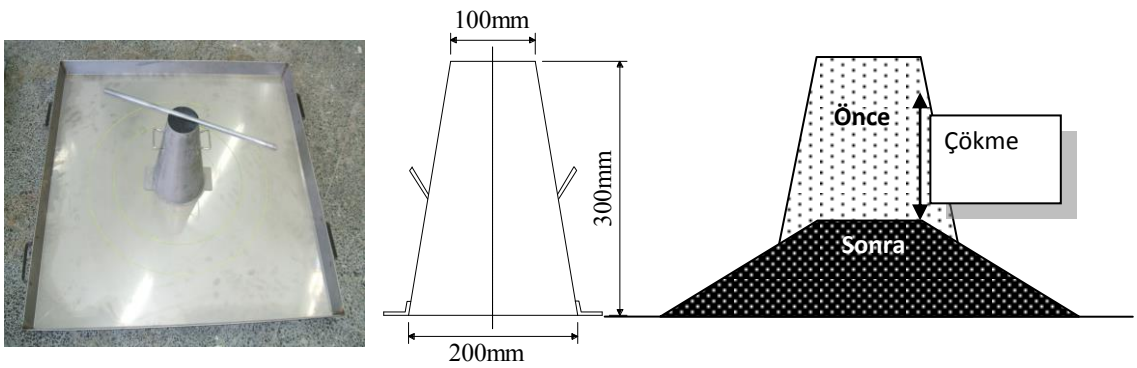
Bu test ASTM C230-83, TS EN 12350-6 EN 459-2, 1015-3 ve birçok ülkede standard olarak da kabul edilmiştir.Harç, kireç, çimento numunelerinin yayılma (akışkanlık) testlerinde kullanılır. Tabla 300mm çapında olup, düşüş yüksekliği 10mm'dir. Kalıp 100mm alt çap x 70mm üst çap x 60mm yükseklik, boyutlarında olup pirinçten imal edilmiştir. Motorlu model 1 devre/ san. özelliğinde motora sahip olup, düşüş sayıları önceden ayarlanabilir ve devre tamamlandığında otomatik durabilir özelliktedir.



Şekil 3. 5. Yayılma tablası (flow table) deney aleti.

3.10.2. Çökme ve çökme yayılması

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



Şekil 3. 5. Çökme deneyinde kullanılan aletler ve deneyin yapılışı.

Betonun çökmesi Şekil 3.5’de 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 kaymaeşikleri (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 agrega içeriğine sahip ve iri agreganın yuvarlak ve köşeli oluşuna göre, aynı çökme değeri farklı

işlenebilmeleri gösterebilmektedir. Çökme deneyi, şantiye koşullarında, agrega 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 agrega 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 (CCY), toplam yayılma çapı (CTYÇ), ve toplam yayılma süresi (CTYS) üretilen her beton için 15. ve 45. dk.'larda ölçülmüştür. Ayrıca deney sonuçlarının analizinde son yayılma çapının, başlangıç çapına oranı olarak tanımlanan “Yayılma Alanı Oranı (CYAO)” da kullanılmıştır.

3.10.3. 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). K-çökme aleti Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

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).

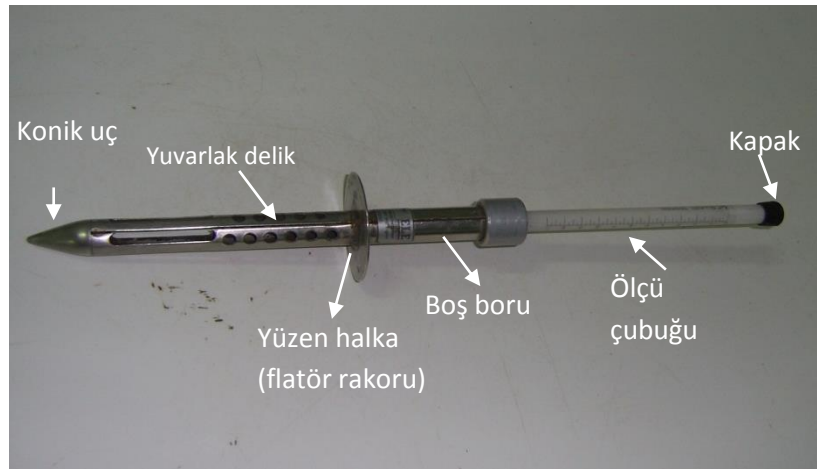
Flatör rakoru (*Collar Floater*) beton yüzeyindeyken test edilen betonun içine sonda yerleştirilir. Betonun harç fazı deliklerden süzülerek tüp içine girer ve ölçekli çubuğun skalasından K-çökme değeri okunur. K-çökme değeri klasik çökme değerinin yaklaşık %40'ı mertebesindedir. Düşey olarak yukarı çekilen 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. Uç üzerinde yapılan okumalar karışımındaki 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 3.6’da gösterilmiştir. K ökme ölçümü olarak; sondanın betona sokulmasından sonra ölçülen yükseklik “ilk Yükseklik (İY)”, sondanın çıkarılmasıyla okunan yükseklik “Son Yükseklik (SY)” ölçümleri yapıldı. Ayrıca ilk yüksekliğin, son yüksekliğe oranı olarak tanımlanan “K ökme Oranı (KO)” da analizlerde kullanıldı.



Şekil 3. 7. Deneylerde kullanılan K ökme deney aleti

3.10.4. J ring deneyi

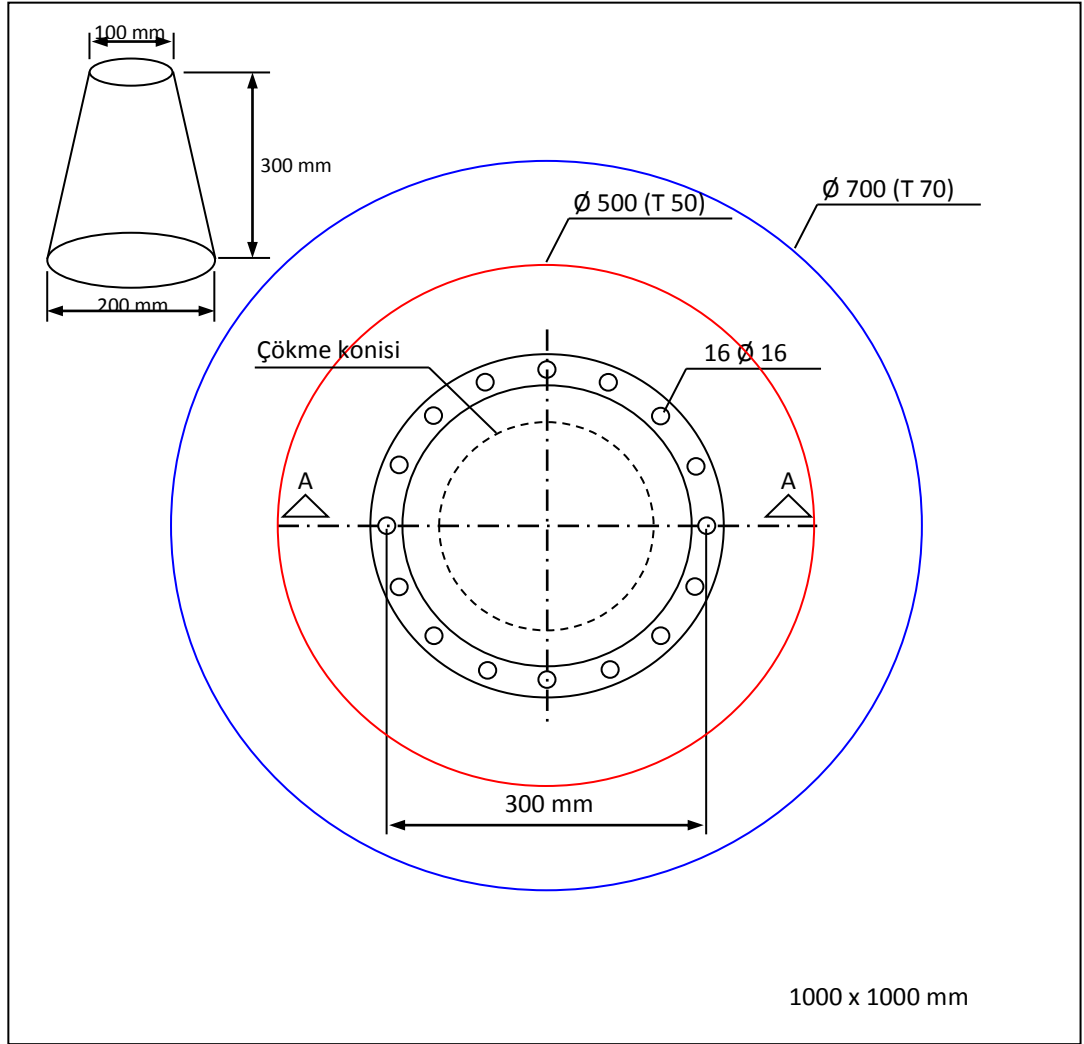
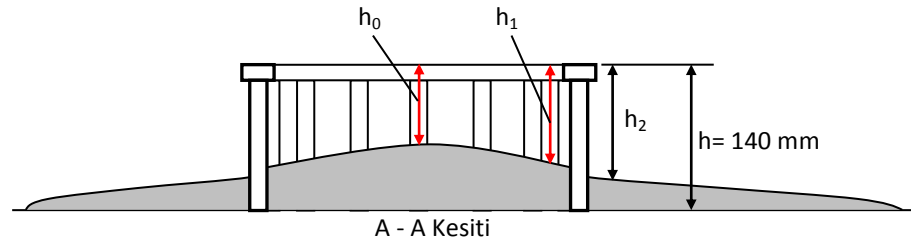
J Ring deneyinin prensibi Japonlara dayandığı belirtilmesine rağmen ancak bilinen kaynak yoktur. J Ring deneyi Paisley Üniversitesi’nde bugünkü kullanım formuna geliştirilmiştir. Deney cihazı, ayak parçası olmayan alt çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan kesik koni (ökme konisi) ve 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 3.7’de gösterildiği gibi ölçölür. 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 ölçölür. 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 ölçölür. Deneyden sonra, J Ring’in dışındaki ve içindeki beton yüksekliği ölçölür. 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. 8. J Ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları (EFNARC, 2002).

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan deney cihazı Şekil 3.9.'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 3.7'de gösterildiği gibi alınmıştır.



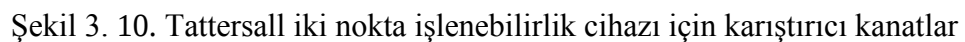
Şekil 3. 9. Deneylerde kullanılan J Ring Deney cihazı.

3.10.5. İki nokta işlenebilirlik deney cihazı (CTPT)

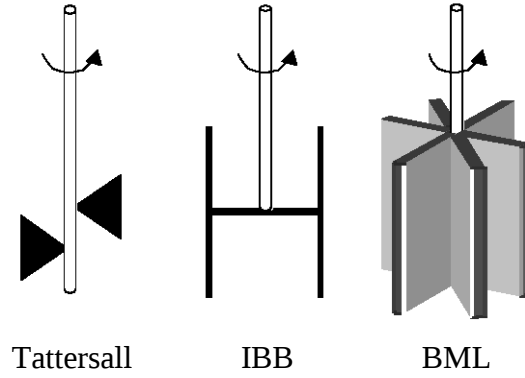
İki nokta işlenebilirlik cihazını G. H. Tattersall tarafından 1970’lerde Sheffield üniversitesinde geliştirilmiştir. Tattersall, beton ölçümlerinde eş eksenli silindir reometrelerin silindirler arasındaki boşluklardan dolayı başarısız olduğunu belirlemiştir. Tattersall cihazında, beton içine yerleştirilen 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

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 dönüştürücüler (transducer) ve takometreler (hızölçer) kullanılmıştır. Gjorv, Walleveick 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).



97



Şekil 3. 11. Beton reometrelerinde kullanılan farklı kanat tipleri

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·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).



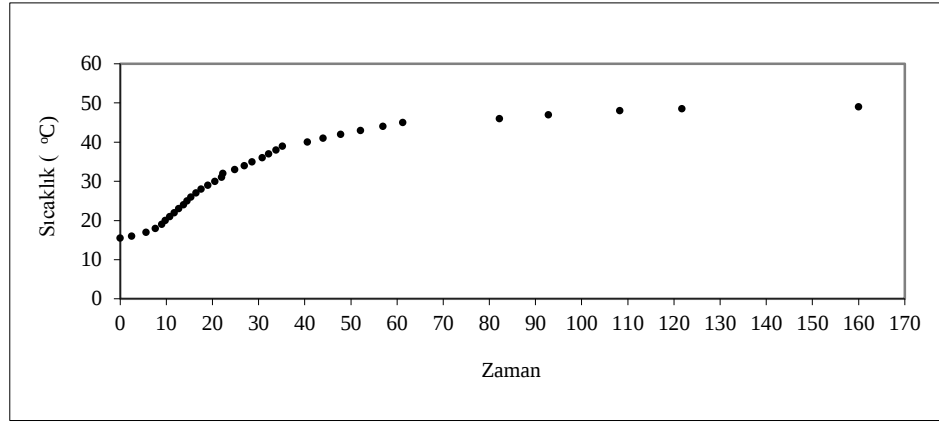
Şekil 3.12. İki nokta işlenebilirlik deney cihazının (CTPT) genel görünüşü.

3.10.6. Cihazın kullanımı ve deneyin yapılışı

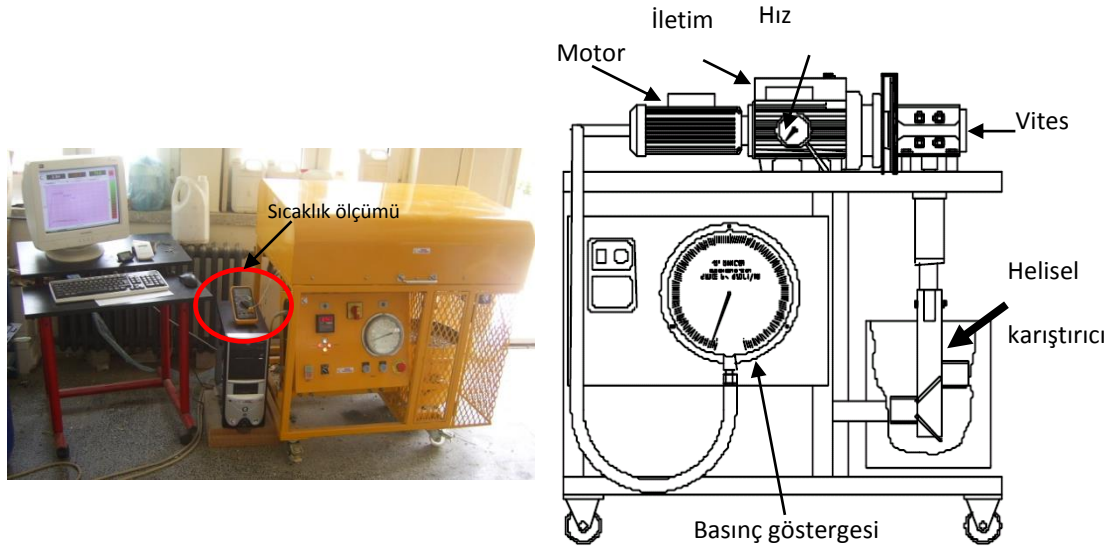
Tattersall'ın İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazı'nda (CTPT), deneyi yapılacak olan beton bir kap içine (25 lt) doldurulur. Üzerinde kanatlar olan karıştırıcı uç, numune içine indirilir. Bu ucun dönmesine malzeme direnç gösterir. Bu direnç her hız değişimi için bar olarak ölçülür. Hız arttıkça bar 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 eşiği 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 bağlanmıştır (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 3.2' de verilmiştir.



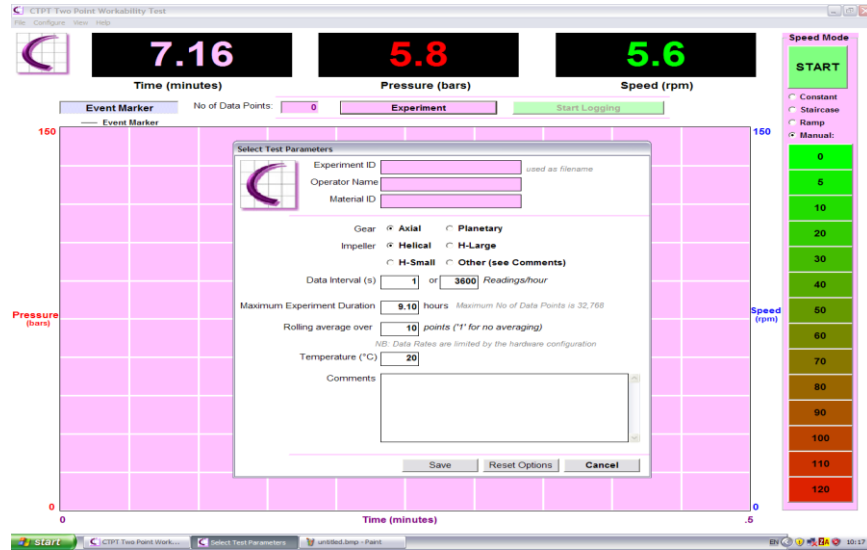
Şekil 3.13. CTPT Cihazında, zamanla motor iç sıcaklığının değişimi



Şekil 3.14. CTPT motor iç sıcaklık ölçümü ve şematik görüntüsü.

Çizelge 3. 2. CTPT'nin teknik özellikleri

Hız Kontrol Doğruluğu	± 2 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. 15. CTPT'nin veri okuma ayarları

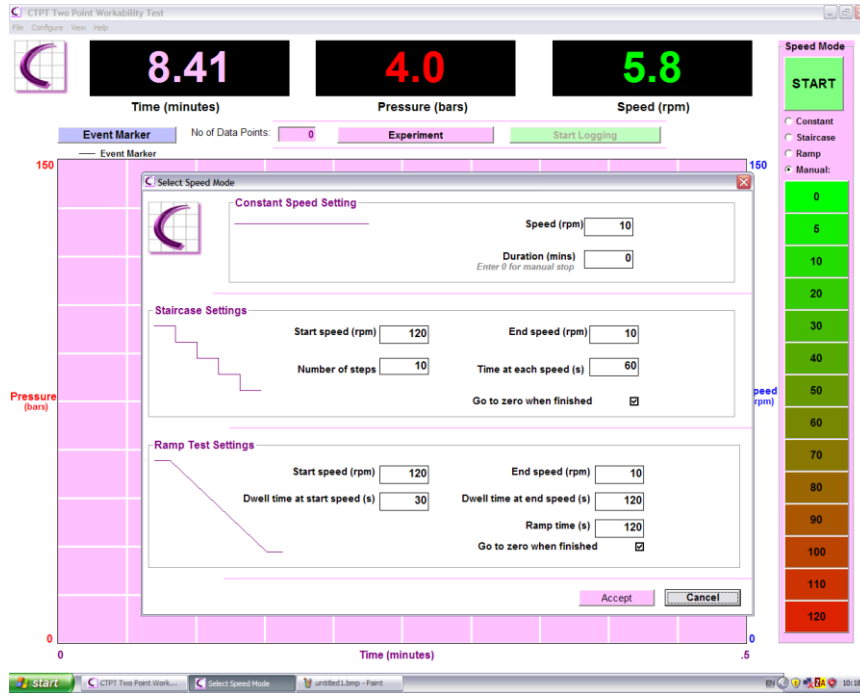
Şekil 3.15’de gösterilen Data interval; Alınan ardışık iki veri arasındaki süreyi belirlemede kullanılır. Veri alma aralığı her saniyede (s) veya okuma/saat; 3600 ile 1 arasında değer almaktadır. CTPT’de en fazla 32768 veri okuması yapılabilmektedir. Bu nedenle 1 s ara ile veri alındığında (Data interval (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 (Şekil 3.16);

- 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 manuel olarak tamamladığımız modtur

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



Şekil 3. 16. CTPT'nin hız ve zaman ayarı ekranı

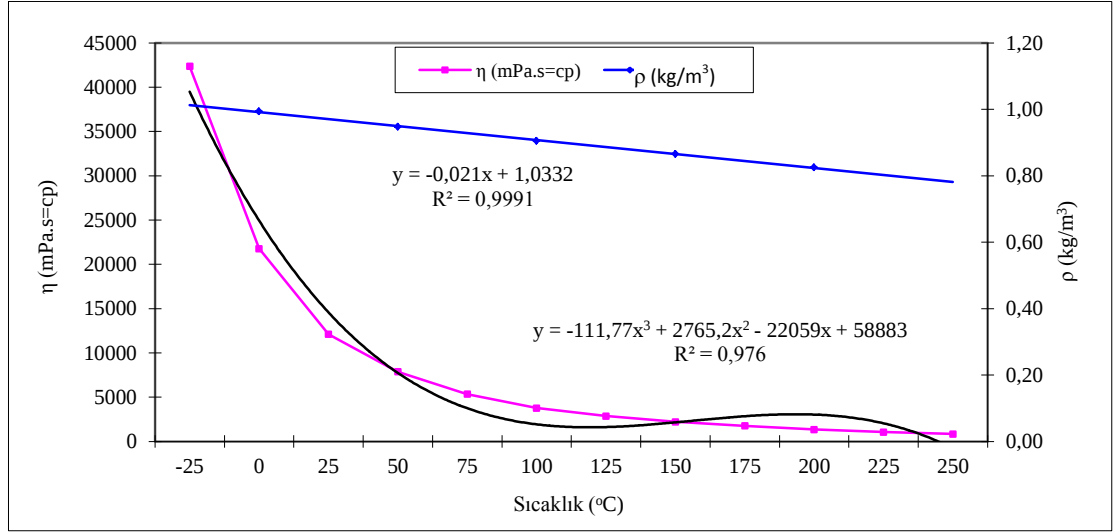
3.10.7. CTPT cihazının kalibrasyonu

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. Bu değerler Şekil 3.17’de verilmiştir.

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 ($\dot{\gamma}$), 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.

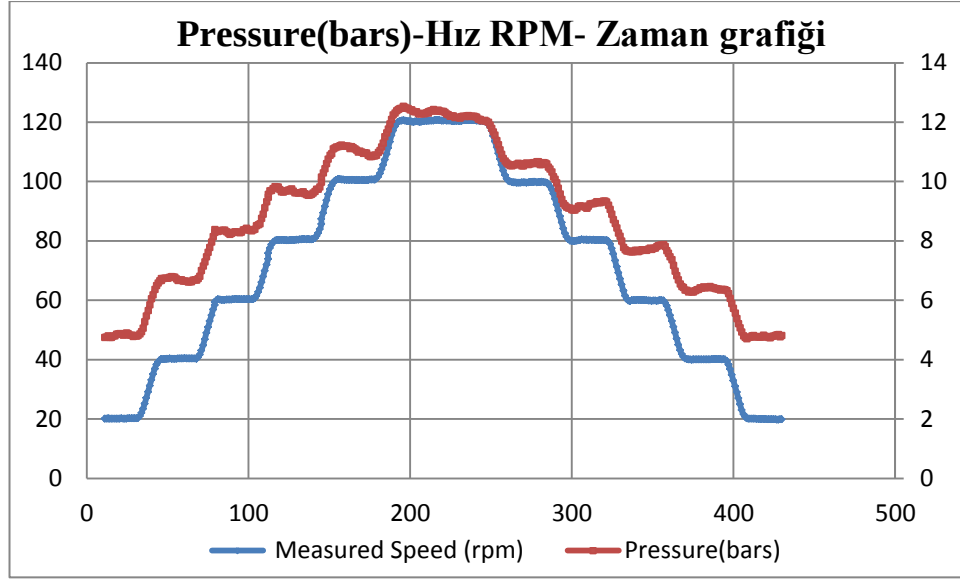
“Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer” cihazında en düşük 20°C’ye kadar ölçüm yapılabilir. Ara değerler R^2 değeri “1”olan; ρ , τ ve $\dot{\gamma}$ değerlerinin eğri

denklemlerinden 0-20 °C değerlerinin belirlenmesi ve bunların dinamik ve kinematik viskozite ($\eta = \tau/\gamma$, $\nu = \eta/\rho$) ilişkilerinden faydalanılmasıyla hesaplanmıştır.

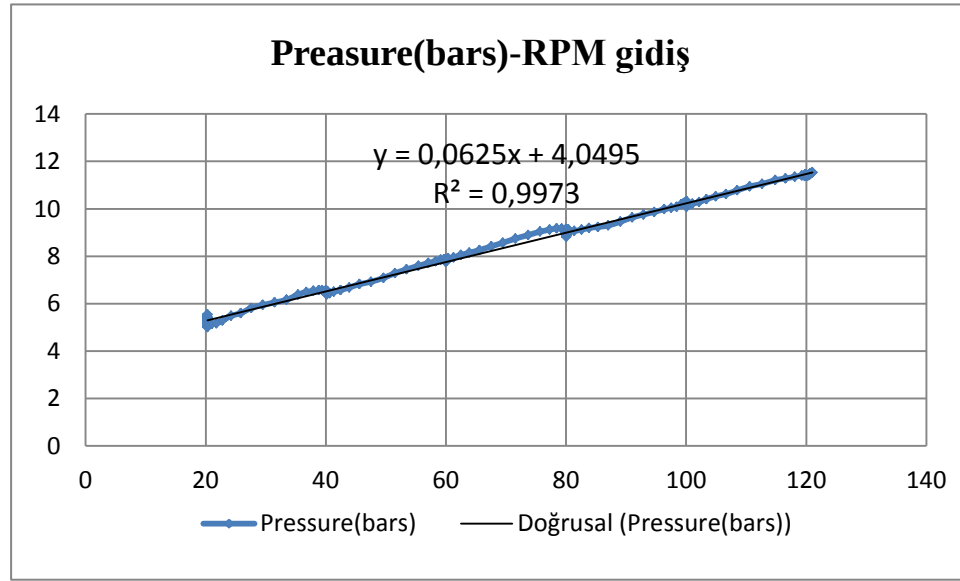


Şekil 3. 17. Kalibrasyon sıvısı özgül ağırlığının sıcaklıkla değişimi (12500 cSt).

CTPT cihazında “Carter Variator” biriminden yağ basıncını, basınç dönüştürücüsü aracılığı ile “bar” olarak okumaktadır. Kalibrasyon iki nokta işlenebilirlik cihazından (CTPT) deney cihazında 12500 cc’luk vizkozitesi 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. 12500 cc’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.

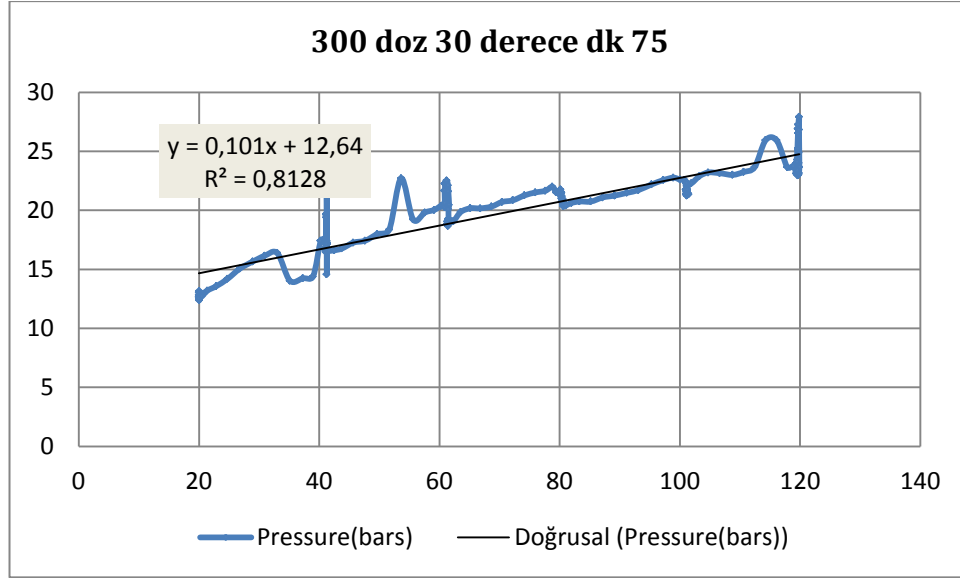


Şekil 3. 18. CTPT'nin hız ve rpm ayarı grafiği



Şekil 3. 2. CTPT'nin basınç ve rpm grafiği

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 (şekil 3.20) viskozite ve kayma eşiği değerlerinin aşağıdaki grafikte de görüldüğü yanıltıcı olduğu görülmüştür ve deneylerden 75. dakikanın çıkarılıp 45. dakika'da sonlandırılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3. 20. CTPT'nin basınç ve rpm grafiği

3.11. Deneylerde Kullanılan Diğer Araç, Gereç ve Cihazlar

a. Tartılar

Çalışmada kullanılan tartılar Şekil 3.21'de gösterilmiştir. 360 gr'a kadar olan ağırlıklarda Şekil 3.21.a ($\pm 0,001$ gr), 30 kg'a kadar ağırlıklarda Şekil 3.21.b ($\pm 0,1$ gr), 150 kg' a kadar olan ağırlıklarda ise Şekil 3.21.c (± 5 gr) kullanılmıştır.



(a) Hassas

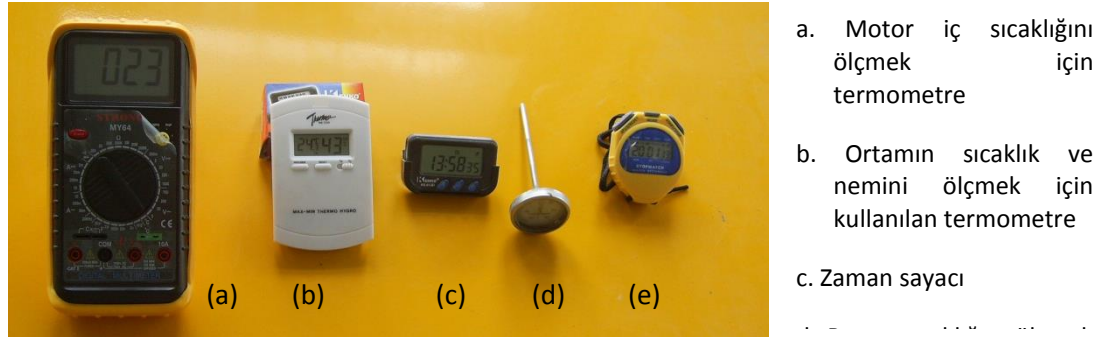
(b) Orta

(c) Baskül

Şekil 3. 21. Çalışmalarda kullanılan tartılar

b. Sıcaklık, nem ve zaman ölçüm cihazları

Çalışmada kullanılan ölçü aletleri Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 22. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve kalıplar

Bölüm 3’de belirtilen karışımlar üzerinde eş zamanlı taze harç deneyleri olarak; Yayılma tablası, K Çökme, ve CTPT cihazları ile 15 ve 45. dk.’larda ölçümler yapıldı. Böylece üretilen karışımların zamanla işlenebilirliği ve taze özellikleri takip edilebildiği gibi, taze harç deneyleri ile CTPT arasındaki ilişki için farklı değerlerde üretildi.

3.12. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Elde edilen veriler arasındaki ilişki veri madenciliği (data mining) ile değerlendirilmiştir. Büyük veritabanlarından gizli kalmış örüntüleri çıkarma sürecine veri madenciliği adı verilmektedir. Geleneksel yöntemler kullanılarak çözülmesi çok zaman olan problemlere veri madenciliği süreci kullanılarak daha hızlı bir şekilde çözüm bulunabilir. Veri madenciliğinin ana amacı elimizde bulunan veriden gizli

kalmış örüntüleri (patterns) çıkarmak, elimizdeki verinin değerini arttırmak ve veriyi bilgiye dönüştürmektir. Veri madenciliği bir yöntem değildir bir süreçtir. Bu süreçte ana unsur süreci gerçekleştiren uygulamacıdır. Süreçte bulunan adımlar doğru olarak yerine getirilmediğinde istenilen sonuca ulaşılamaz (Terzi vd., 2005).

Veri madenciliği uygulamalarını gerçekleştirmek için bugüne kadar birçok araç geliştirilmiştir. Bu araçlardan biri Waikato Üniveristesi tarafından java platformu üzerinde açık kodlu olarak geliştirilen de devamlı güncellenen WEKA'dır. WEKA bir proje olarak başlayıp bugün dünya üzerinde birçok insan tarafından kullanılmaya başlanan bir veri madenciliği uygulaması geliştirme programıdır. WEKA java platformu üzerinde geliştirilmiş açık kodlu bir programdır WEKA programı <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> adresinden temin edilebilmektedir.

Veri madenciliği sürecinin model kurma aşamasında deneysel olarak elde edilen ve hesaplarla bulunan veriler, girdi ve çıktı olarak düzenlenmiştir. WEKA programında var olan tüm algoritmalar bu veri dosyaları üzerinde sırayla çalıştırılmış ve en yüksek regresyon katsayısı veren beş algoritma için değerlendirilme yapılmıştır. Bu algoritmalar aşağıda belirtilmiştir.

Lineer regresyon (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 birçok durumda açık lineer ilişkiler üretilmez. Bu durumda daha kompleks teknikler (lojistik regresyon, karar ağaçları veya neurol network gibi) kullanılır.

Basit lineer regresyon (simple linear regression); bu model lineer regresyon modelinin geliştirilmişidir. Bağımlı değişken (çıktı veya tahmin edilen) ile bağımsız değişken (girdiler) arasında lineer olmayan dağılı ilişkisinin bulunması durumunda basit lineer model, basit lineer olmayan regresyon modeline dönüştürülmekte ve sonuçlar lineer model metodolojine göre veri analizi yapılmaktadır.

Sıralı (adımlı) regresyon (pace regression); klasik en küçük kareler yönteminin yalın ve geliştirilmiş halidir. Küme analizini kullanarak, her değişkenin etkilediği parametreye göre regresyona katkısı olanlarla model oluşturur.

M5 kuralları (M5 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 birçok değişkeni de kapsar (Şencan, 2006).

En küçük medyan kareleri yöntemi (Least MedSq); en küçük kareler yönteminin geliştirilmişidir. En küçük kareler regresyon fonksiyonu, verilerin alt örneklemelerinde rasgele üretilir. En küçük medyan kareleriyle en küçük kareler regresyonu, sonuç modelde hatayı daha da azaltır.

Değerlendirmede deneysel olarak bulunan ve hesaplanan tüm verilerin %80'i model eğitimleri ve model oluşturulması için test veri seti olarak, %20'si ise analiz veri seti olarak (model oluşturulmasında kullanılmayan, elde edilen modellerin geçerliliğinin sınanması ve model sonuçları ile önceden bilinen veriler arasındaki regresyon katsayısının belirlenmesi için) iki gruba ayrılmıştır. Test verileri kullanılan WEKA programı tarafından, tüm deneyler arasından rasgele seçilmişmiş olmasına rağmen eğitim ve test verileri, tüm modellerde aynı seri betondan oluşmuştur. Yukarıda açıklanan beş model için elde edilen model denklemler, tüm veriler (%100) için tekrar uygulanmış ve bu modellere ait determinasyon katsayısı (R²) değerleri belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Agregaların Granulometrik 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

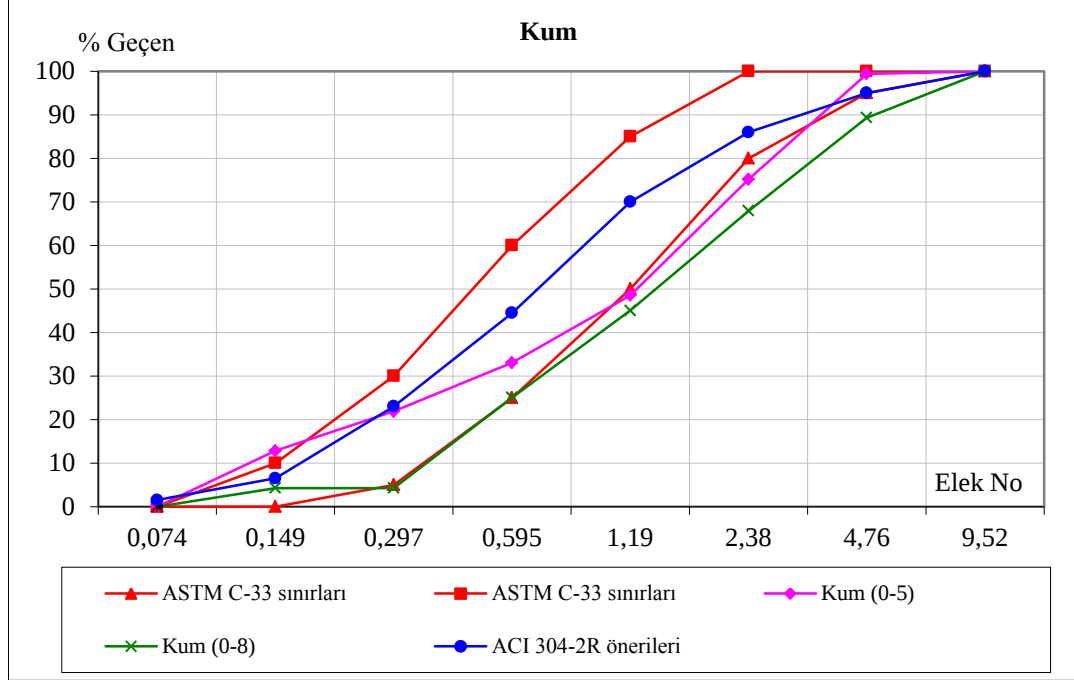
ELEK AÇIKLIĞI	0,074	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	9,52
ASTM C-33 sınırları	0,00	0,00	5	25	50	80	95	100
ASTM C-33 sınırları	0,00	10	30	60	85	100	100	100
ACI 304-2R önerileri	2	7	23	45	70	86	95	100

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	40,7	21,66	1,96	1,96

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



Şekil 4. 1. Kumların granülometreleri

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'de, birim hacim kütle değerleri Çizelge 4.4'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 4-5'te verilmiştir.

Çizelge 4. 4. İri ve ince agreganın sıkışık ve gevşek birim hacim kütleleri

	Kum(0-5)	Kum(0-8)	Ç I	Ç II
Gevşek	1481	1437	1656	1658
Sıkışık	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 ağırlık(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 Çizelge 4.6'de görülmektedir.

Çizelge 4.6. Harçların ve betonların karışım oranları (%)

Agrega Türü	Agrega karışım oranları (%)
Kum 0-5	40
Kum 0-8	60

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

4.4. Kimyasal Katkı

Deneylerde kullanılacak Sika ViscoCrete PC 10 kimyasal katkının özellikleri Çizelge 4.7 de verilmiştir.

Çizelge 4. 7. Sika ViscoCrete PC 10 katkısının özellikleri

Yapı	
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’de görülmektedir.

Çizelge 4. 8. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I 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 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’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 10. Kimyasal katkı – çimento uyumunun belirlenmesi deneyi sonuçları

Katkı Adı	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 0,55 400 kg/m³ çimento içeren karışım ise 0,45 olarak belirlenmiştir. Kullanılacak süper akışkanlaştırıcı miktarı olarakta toplam bağlayıcı oranının %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 (2.04) Mg/m³’tür. 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	

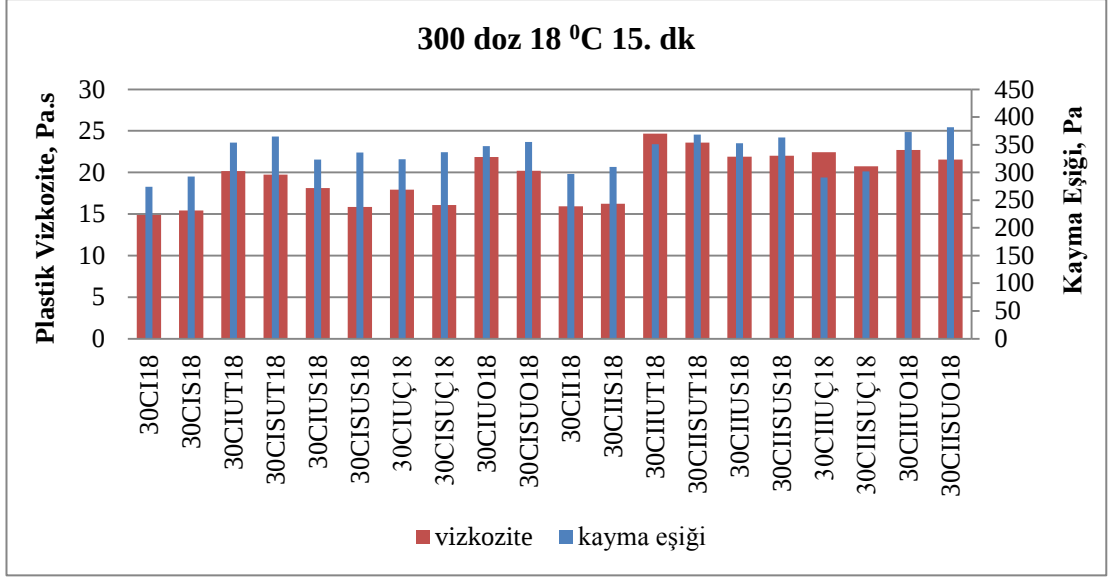
4.9. Üretilen Harçların Taze Harç Deney Sonuçları

Taze harç deneyleri yayılma tablası 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 gözlemlenmektedir.

4.9.1. Kayma eşiği ve plastik viskozite sonuçları

30CI18-30CII18 harç serisi 15.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde; silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO18 numunesindedir. 30CISUO18 numunesi CI'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%30,6) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI18 şahit numunesindedir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CII18 numunesindedir. 30CISUO18 numunesi CII'li kendi şahit numunesine göre, kayma eşiği değeri (%54,7) artış göstermiştir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII18 şahit numunesindedir.

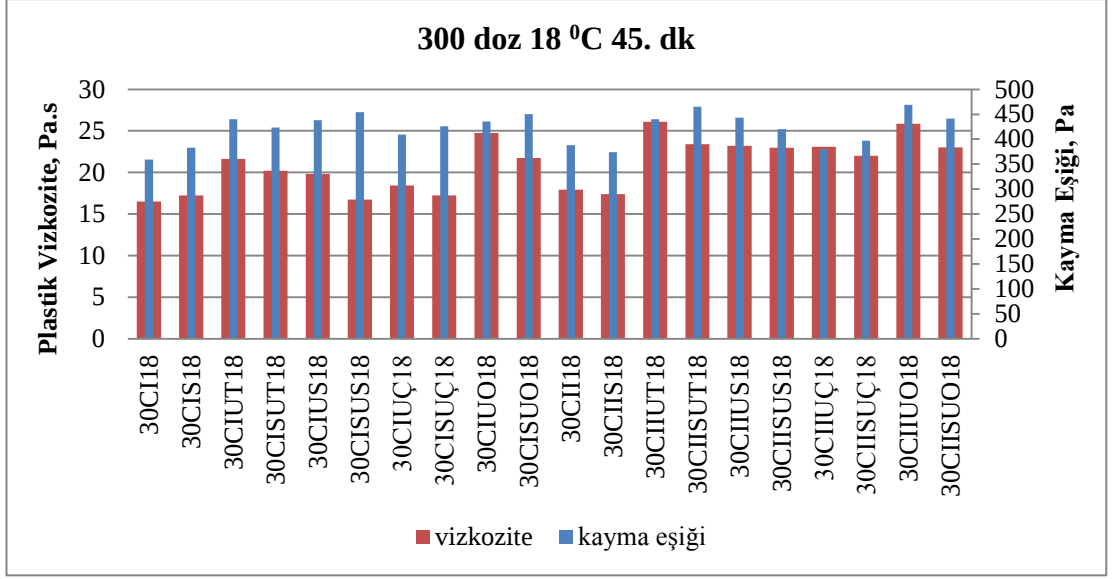
30CI18-30CII18 harç serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.2.) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CIS18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin vizkozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük vizkozite değeri 30CIS18 numunesindedir. En düşük vizkozite değeri 30CII18 numunesindedir.



Şekil 4. 2. 30CI18-30CII18 serisi harçların 15.dk CTPT deney sonuçları

30CI18-30CII18 harç serisi 45.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde 30CIIS18 numunesi hariç, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUS18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI18 şahit numunesindedir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIISUO18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII18 şahit numunesindedir.

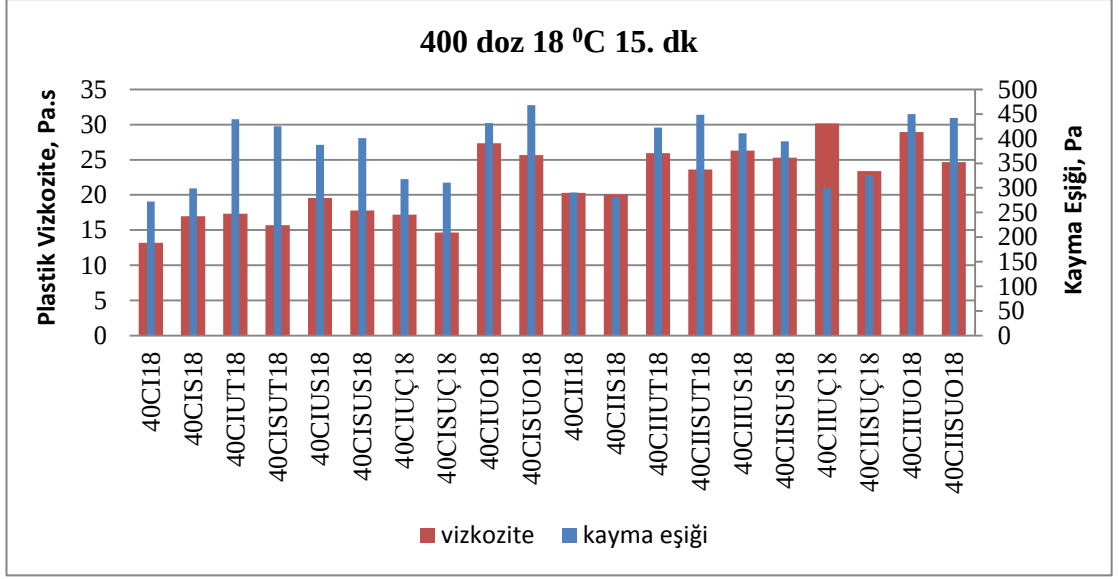
30CI18-30CII18 harç serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.3.) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO18'dir. En düşük viskozite değeri 30CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIUT18'dir. En düşük viskozite değeri 30CIIS18 numunesindedir.



Şekil 4.3. 300 doz 18°C 45.dk harçların CTPT deney sonuçları

40CI18-40CII18 harç serisi 15.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, 30CIUT18 numunesi hariç, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seride en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI18 şahit numunesindedir. 40CII'li seride en yüksek kayma eşiği değeri 40CIISUT18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CIIS18 şahit numunesindedir.

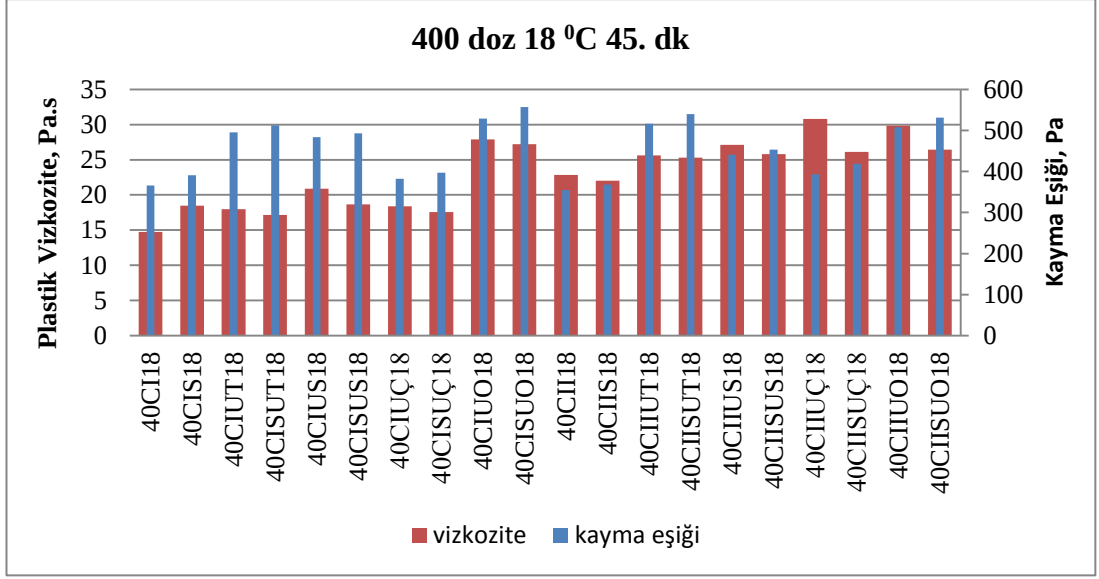
40CI18-40CII18 harç serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.4.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO18'dir. En düşük viskozite değeri 40CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIUÇ18'dir. En düşük viskozite değeri 40CII18 numunesindedir.



Şekil 4. 4. 400 doz 18°C 15.dk harçların CTPT deney sonuçları

40CI18-40CII18 harç serisi 45.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI18 şahit numunesindedir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIISUT18 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII18 şahit numunesindedir.

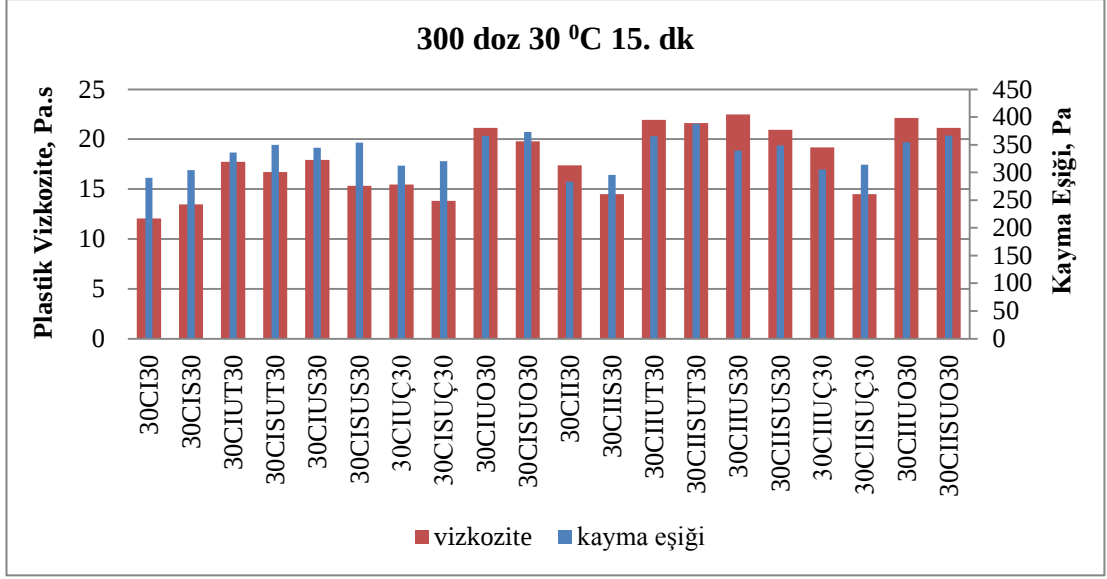
40CI18-40CII18 harç serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.5.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI18 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO18'dir. En düşük viskozite değeri 40CI18 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 40CIUÇ18'dir. En düşük viskozite değeri 40CIIS18 numunesindedir.



Şekil 4. 5. 400 doz 18°C 45.dk harçların CTPT deney sonuçları

30CI30-30CII30 harç serisi 15.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI30 şahit numunesindedir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIIISUT30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CII30 şahit numunesindedir.

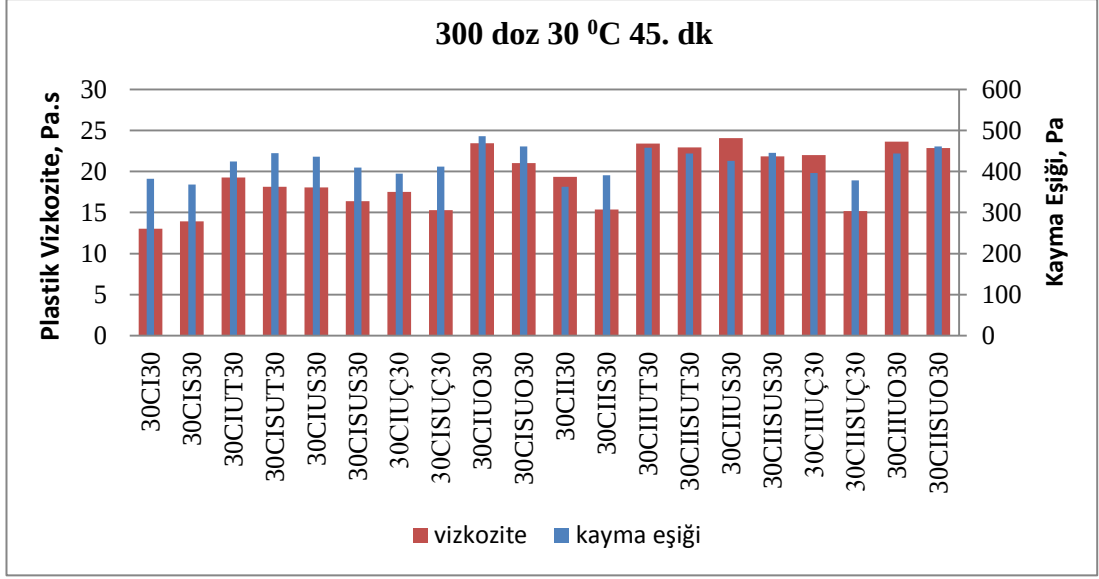
30CI30-30CII30 harç serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.6.) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO30'dir. En düşük viskozite değeri 30CI30 numunesindedir. CII serisinde ise en yüksek viskozite değeri 30CIIUS30'dir. En düşük viskozite değeri 30CIIIS30 numunesindedir.



Şekil 4. 6. 300 doz 30°C 15. dk harçların CTPT deney sonuçları

30CI30-30CII30 harç serisi 45.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, 30CISUT30 numunesi hariç, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 30CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CI30 şahit numunededir. 30CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 30CIISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 30CIIS30 şahit numunededir.

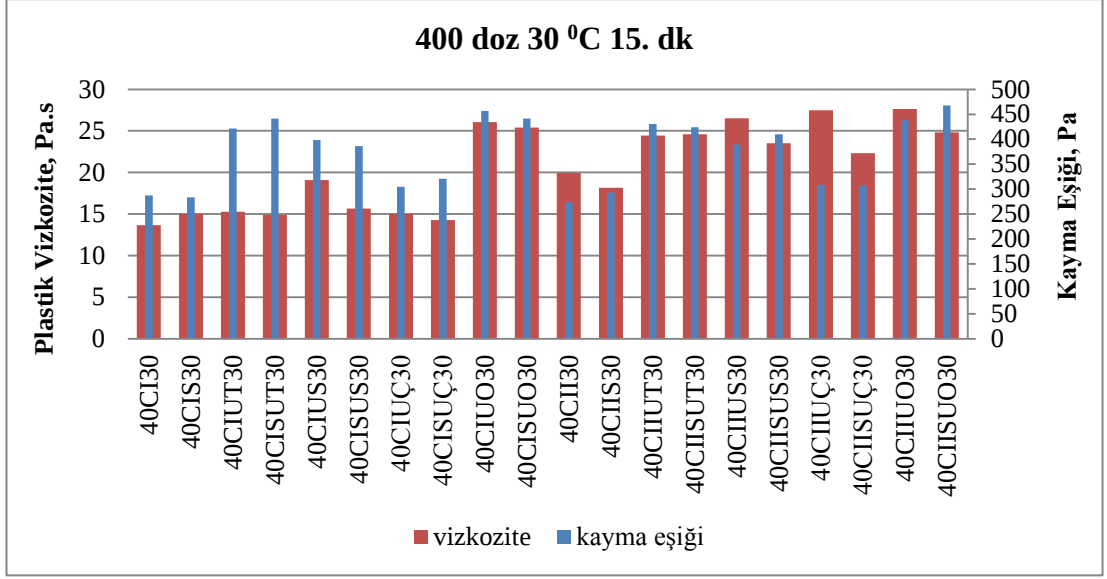
30CI30-30CII30 harç serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.7.) plastik viskozite değerlerinde ise; 30CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 30CIUO30'dır. En düşük viskozite değeri 30CISUÇ30 numunesindedir.



Şekil 4. 7. 300 doz 30°C 45.dk harçların CTPT deney sonuçları

40CI30-40CII30 harç serisi 15.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, 40CIUO30 ve 40CIUS30 numuneleri hariç, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CIS30 şahit numunesindedir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII30 şahit numunesindedir.

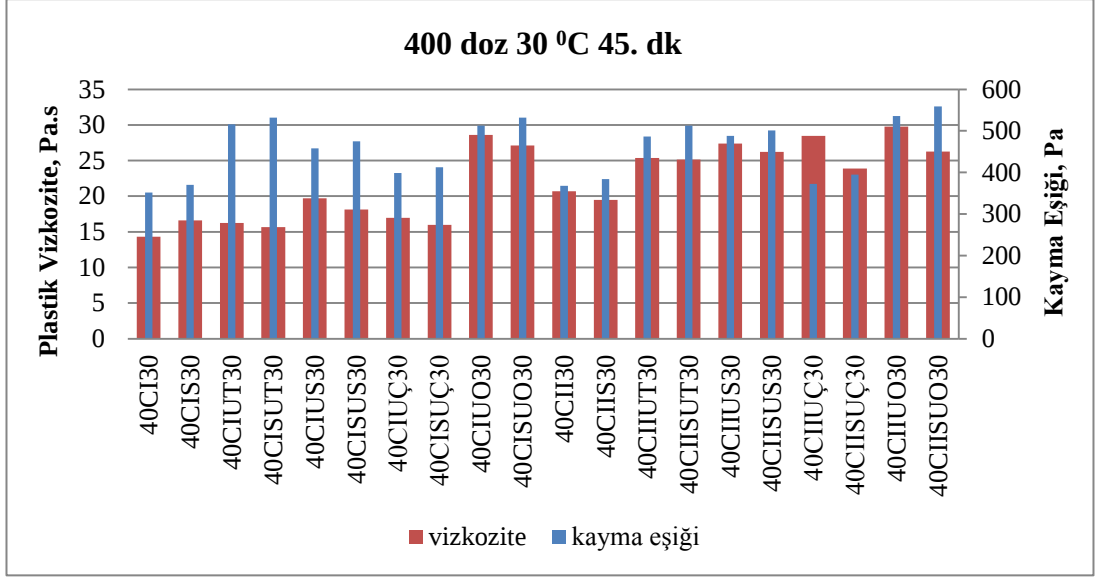
40CI30-40CII30 harç serisi 15.dk sonuçları (Şekil 4.8.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük viskozite değeri 40CI30 numunesindedir. En yüksek viskozite değeri 40CIISUO30 numunesindedir. En düşük viskozite değeri 40CIIS30 numunesindedir.



Şekil 4. 8. 400 doz 30°C 15.dk harçların CTPT deney sonuçları

40CI30-40CII30 harç serisi 45.dk sonuçları incelendiğinde kayma eşiği değerlerinde, silis dumanlı harç numunelerinde artış olmuştur. 40CI'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CISUT30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CI30 şahit numunesindedir. 40CII'li seridede en yüksek kayma eşiği değeri 40CIISUO30 numunesindedir. En düşük kayma eşiği değeri 40CII30 şahit numunesindedir.

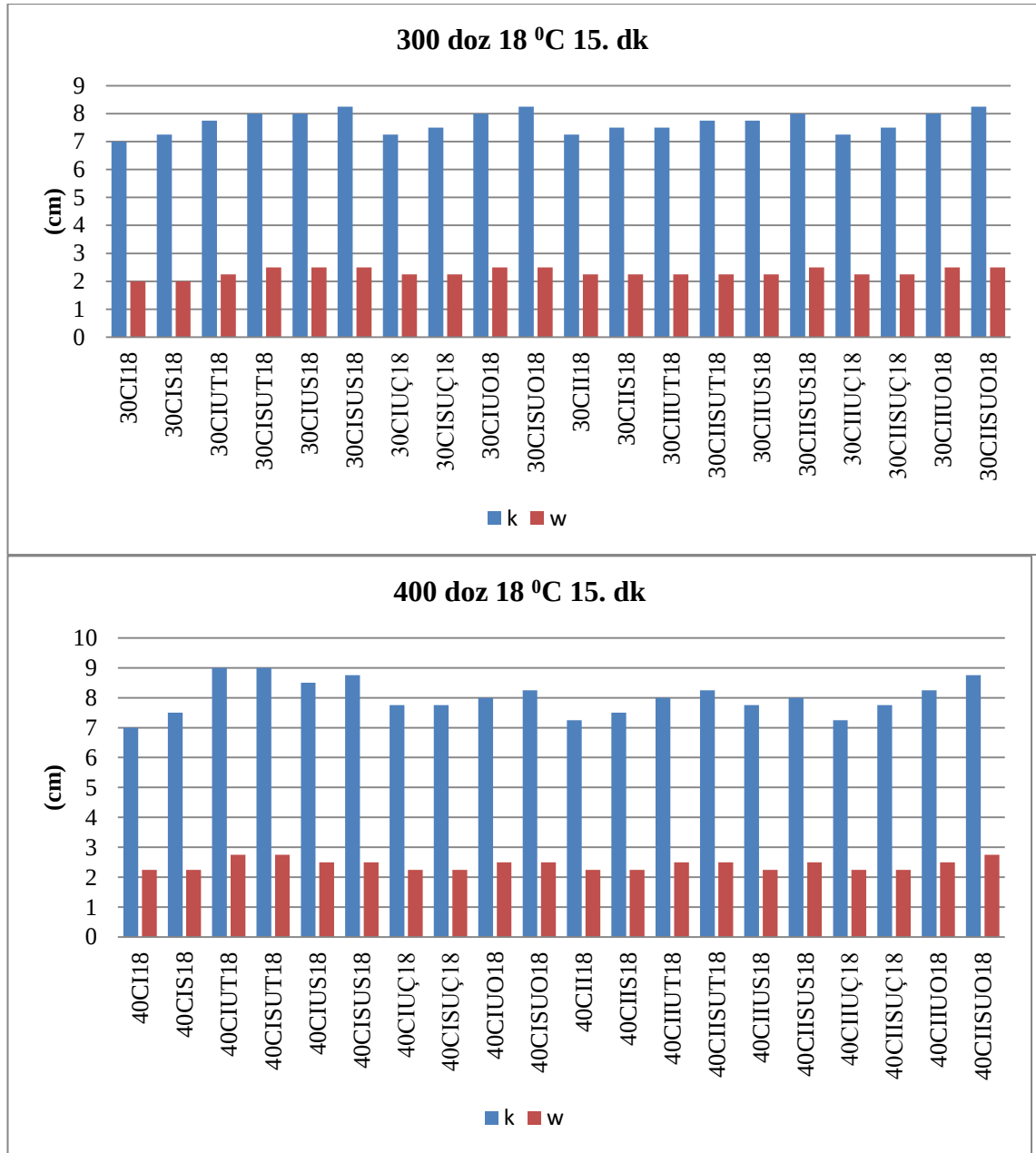
40CI30-40CII30 harç serisi 45.dk sonuçları (Şekil 4.9.) plastik viskozite değerlerinde ise; 40CI30 numunesi hariç, silis dumanının eklenmesiyle numunelerin viskozite değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. CI serisinde en yüksek viskozite değeri 40CIUO30'dir. En düşük viskozite değeri 40CI30 numunesindedir. En düşük viskozite değeri 40CIIS30 numunesindedir.



Şekil 4. 9. 400 doz 30°C 45.dk serisi harçların CTPT deney sonuçları

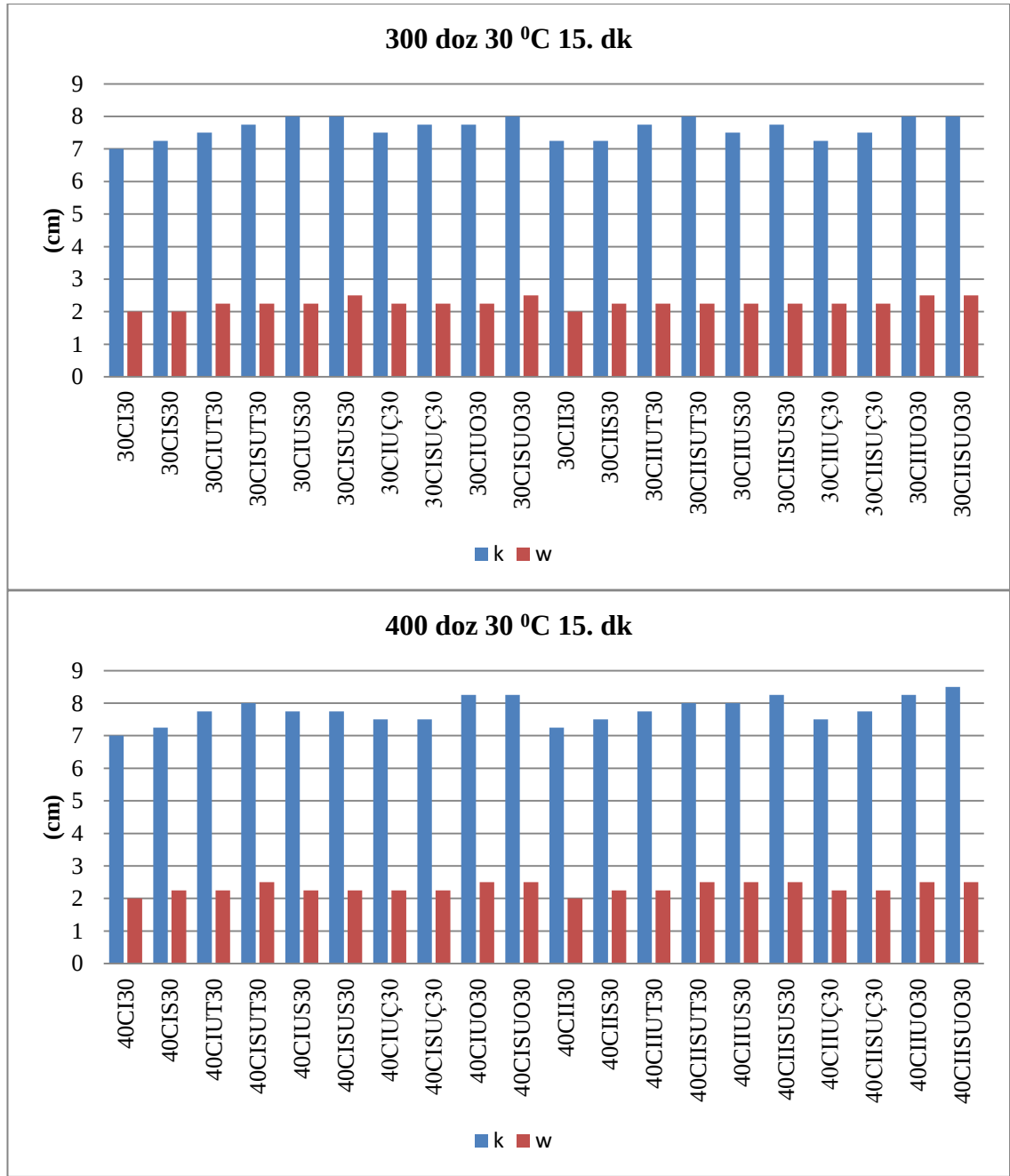
4.9.2. Harç Örneklerin K-çökme deneyi sonuçları

18⁰C’de yapılan deneylerin 15. Dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 9 cm ile 40CIUS18 ve 40CISUT18 karışımlardan, son yükseklik(w) 2,75 cm ile 40CIUS18 ve 40CISUS18 karışımlardan, en düşük; ilk yükseklik(k) 7 cm ile 30CI18 ve 40CI18 karışımlardan, son yükseklik (w) 2 cm ile 30CI18 ve 30CIS18 karışımlardan elde edilmiştir.



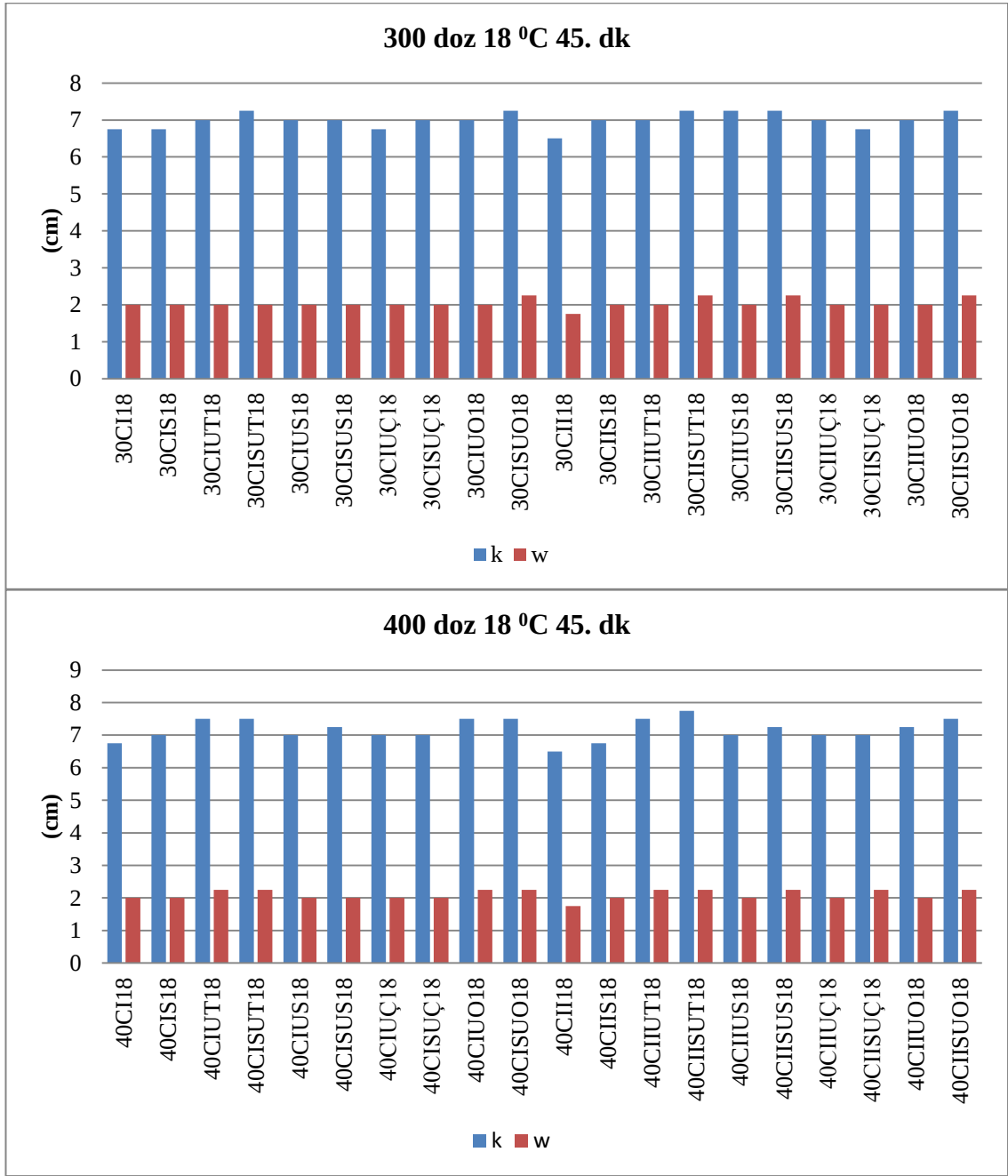
Şekil 4. 10. 18°C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları

30°C’de yapılan deneylerin 15. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 8,5 cm ile 40CIIISUO30 karışımlardan, son yükseklik(w) 2,5 cm ile 30CISUS30, 30CISUO30, 30CIIUO30, 30CIIISUO30, 40CISUT30, 40CIUO30, 40CISUO30, 40CIIISUT30, 40CIIUS30, 40CIIISUS30, 40CIIUO30, 40CIIISUO30 harçlarından, en düşük; ilk yükseklik(k) 7 cm ile 30CI30 ve 40CI30 karışımlardan, son yükseklik(w) 2 cm ile 30CI30, 30CIS30, 30CII30, 40CI30, 40CII30 karışımlardan elde edilmiştir.



Şekil 4.11. 30°C 15. dakika k-çökme deneyi sonuçları

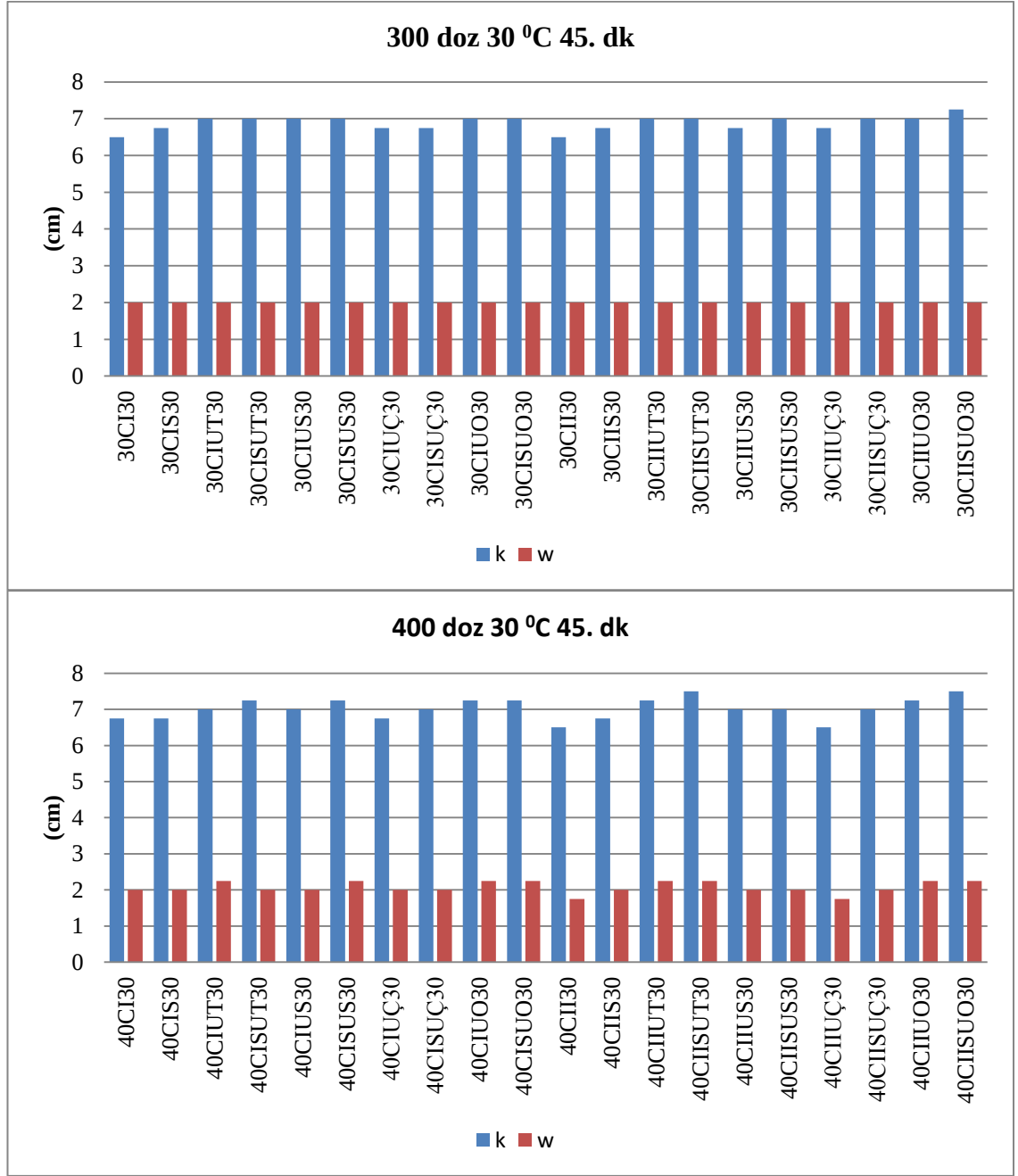
18°C’de yapılan deneylerin 45. dakikada alınan k-çökme sonuçları dikkate alındığında en fazla; ilk yükseklik(k) 7,75 cm ile 40CIIISUT18karışımlardan, son yükseklik(w) 2,25 cm ile 30CISUO18, 30CIIISUT18, 30CIIISUS18, 40CIUT18, 40CISUT18, 40CIUO18, 40CISUO18, 40CIIUT18, 40CIIISUT18, 40CIIISUS18, 40CIIISUÇ18, 40CIIISUO18 karışımlardan, en düşük; ilk yükseklik(k) 6,5 cm ile 30CII18 ve 40CI18 karışımlardan, son yükseklik(w) 1,75 cm ile 30CII18 ve 40CII18 karışımlardan elde edilmiştir.



Şekil 4. 12. 18 °C 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 40CIHSUT30 ve 40CIHSUO30 karışımlardan, son yükseklik(w) 2,25 cm ile 40CIUT30, 40CISUS30, 40CIUO30, 40CISUO30, 40CIHUT30, 40CIHSUT30, 40CIHUO30, 40CIHSUO30 karışımlardan, en düşük; ilk yükseklik(k) 6,5 cm ile 30CI30, 30CIH30, 40CIH30, 40CIHUÇ30

karişimlardan, son yükseklik(w) 1,75 cm ile 40CII30, 40CIUÇSS30 karişimlardan elde edilmiştir.



şekil 4. 13. 30°C 45. dakika k-çökme deneyi sonuçları

Harçlardan elde edilen plastik viskozite ve kayma eşiği reolojik deney parametreleri yayılma çapı, k çökme ve w deney sonuçları ile taze beton deney değerleri yayılma,

slump, J Ring, K çökme değerleri arasındaki regresyon analizleri grafik olarak EK-I ve regresyon sonuçları çizelge 4.13. sunulmuştur.

En yüksek regreasyon değeri 0,8323 değeri ile kayma eşiği ile yayılma arasındadır. En düşük regreasyon değeri 0,067 ile plastik vizkozite ile k çökme değeri arasında bulunmuştur.

Çizelge 4. 13. Harçların ve Betonunu Regreasyon çizelgesi

Harçların			Plastik Viskozitesi	Kayma eşiği	Yayılma çapı	k	w
15. DAKİKA	18 °C	Plastik Viskozite	-	0,2696	0,338	0,067	0,058
		Kayma eşiği	0,2696	-	0,8323	0,704	0,577
		Yayılma çapı	0,338	0,8323	-	0,641	0,49
		k	0,0668	0,7043	0,6408	-	0,712
		w	0,058	0,5766	0,4895	0,712	-
	30 °C	Plastik Viskozite	-	0,3196	0,2707	0,265	0,242
		Kayma eşiği	0,3196	-	0,6751	0,653	0,431
		Yayılma çapı	0,2707	0,6751	-	0,493	0,315
		k	0,2646	0,6532	0,493	-	0,451
		w	0,242	0,4312	0,3146	0,451	-
45. DAKİKA	18 °C	Plastik Viskozite	-	0,1949	0,1374	0,21	0,028
		Kayma eşiği	0,1949	-	0,7224	0,689	0,451
		Yayılma çapı	0,1374	0,7224	-	0,509	0,476
		k	0,21	0,6891	0,5094	-	0,507
		w	0,028	0,4506	0,4755	0,507	-
	30 °C	Plastik Viskozite	-	0,3113	0,2168	0,156	0,006
		Kayma eşiği	0,3113	-	0,5773	0,663	0,341
		Yayılma çapı	0,2168	0,5773	-	0,495	0,369
		k	0,1555	0,6631	0,4945	-	0,401
		w	0,0063	0,3411	0,3692	0,401	-

Betonun			Betonun Plastik Viskozitesi	Betonun 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	Betonun Plastik Viskozitesi		0,3014	0,0986	0,0607	0,0555	0,0566	0,0841	0,0539	0,035	0,069
		Betonun Kayma eşiği	0,3014		0,8041	0,7404	0,663	0,6882	0,7277	0,7274	0,66	0,601
		Çökme(Slump)	0,0986	0,8041		0,8385	0,7756	0,7937	0,833	0,895	0,773	0,654
		Yayılma çapı	0,0607	0,7404	0,8385		0,9783	0,9842	0,9787	0,8271	0,974	0,839
		J ring h_0	0,0555	0,663	0,7756	0,9783		0,9693	0,9571	0,7919	0,962	0,822
		J ring h_1	0,0566	0,6882	0,7937	0,9842	0,9693		0,9699	0,7952	0,97	0,844
		J ring h_2	0,0841	0,7277	0,833	0,9787	0,9571	0,9699		0,8025	0,942	0,837
		Jring yayılması	0,0539	0,7274	0,895	0,8271	0,7919	0,7952	0,8025		0,793	0,642
		k	0,0345	0,6597	0,7728	0,974	0,9615	0,9702	0,9421	0,7927		0,81
		w	0,0689	0,6005	0,6535	0,8392	0,8216	0,8435	0,8365	0,6424	0,81	
	30 °C	Betonun Plastik Viskozitesi		0,3114	0,2823	0,3719	0,3647	0,3866	0,3831	0,2608	0,387	0,3
		Betonun Kayma eşiği	0,3114		0,9544	0,7373	0,7247	0,7475	0,7302	0,7676	0,731	0,538
		Çökme(Slump)	0,2823	0,9544		0,7563	0,7567	0,7715	0,7435	0,8312	0,745	0,549
		Yayılma çapı	0,3719	0,7373	0,7563		0,9837	0,9815	0,9912	0,7934	0,958	0,772
		J ring h_0	0,3647	0,7247	0,7567	0,9837		0,9784	0,9698	0,7689	0,938	0,75
		J ring h_1	0,3866	0,7475	0,7715	0,9815	0,9784		0,9633	0,7594	0,938	0,744
		J ring h_2	0,3831	0,7302	0,7435	0,9912	0,9698	0,9633		0,8025	0,948	0,754
		Jring yayılması	0,2608	0,7676	0,8312	0,7934	0,7689	0,7594	0,8025		0,767	0,603
		k	0,3872	0,7313	0,745	0,9578	0,9377	0,9381	0,9478	0,7666		0,735
		w	0,3001	0,538	0,5488	0,7715	0,7501	0,7438	0,7535	0,6026	0,735	
45. DAKİKA	18 °C	Betonun Plastik Viskozitesi		0,2477	0,2034	0,2109	0,185	0,2466	0,2505	0,1443	0,185	0,128
		Betonun Kayma eşiği	0,2477		0,8511	0,8258	0,6973	0,8087	0,8399	0,7882	0,75	0,417
		Çökme(Slump)	0,2034	0,8511		0,8961	0,7159	0,8728	0,826	0,8724	0,828	0,517
		Yayılma çapı	0,2109	0,8258	0,8961		0,8615	0,9417	0,9349	0,8764	0,931	0,627
		J ring h_0	0,185	0,6973	0,7159	0,8615		0,8699	0,7839	0,7499	0,815	0,487
		J ring h_1	0,2466	0,8087	0,8728	0,9417	0,8699		0,8695	0,8256	0,868	0,582
		J ring h_2	0,2505	0,8399	0,826	0,9349	0,7839	0,8695		0,7808	0,876	0,626
		Jring yayılması	0,1443	0,7882	0,8724	0,8764	0,7499	0,8256	0,7808		0,789	0,544
		k	0,1854	0,7504	0,8283	0,9309	0,8151	0,8683	0,8755	0,7894		0,664
		w	0,1277	0,417	0,5165	0,6272	0,4867	0,5818	0,6257	0,544	0,664	

30 °C	Betonun Plastik Viskozitesi		0,3107	0,1402	0,1983	0,2773	0,2176	0,1962	0,1242	0,161	0,544
	Betonun Kayma eşiği	0,3107		0,8089	0,8465	0,8649	0,7389	0,8687	0,7864	0,743	0,534
	Çökme(Slump)	0,1402	0,8089		0,8999	0,8412	0,8392	0,8627	0,8558	0,79	0,421
	Yayılma çapı	0,1983	0,8465	0,8999		0,9715	0,9164	0,9605	0,8044	0,925	0,535
	J ring h ₀	0,2773	0,8649	0,8412	0,9715		0,8955	0,9435	0,7661	0,893	0,55
	J ring h ₁	0,2176	0,7389	0,8392	0,9164	0,8955		0,8777	0,7253	0,865	0,453
	J ring h ₂	0,1962	0,8687	0,8627	0,9605	0,9435	0,8777		0,8075	0,882	0,528
	Jring yayılması	0,1242	0,7864	0,8558	0,8044	0,7661	0,7253	0,8075		0,731	0,485
	k	0,1611	0,7432	0,7899	0,9252	0,8928	0,8653	0,8822	0,7306		0,545
	w	0,544	0,5341	0,4213	0,5353	0,5501	0,4528	0,5283	0,4853	0,545	

4.10. Taze Harç ve Beton Deneyleri ile Reolojik Parametrelerin İstatistiksel Analiz Sonuçları

Elde edilen deney sonuçları veri madenciliği ile analiz edilerek, değerlendirmeler yapılmıştır.

Analizler 3 aşamada değerlendirilmiştir.

1. Aşamada harçlarda yapılan yayılma, k ve w değerlerinden harçların reolojik deney sonuçları elde edilmiştir.
2. Aşamada, harçlarda yapılan yayılma, k ve w kayma eşiği ve plastik viskozite değerlerinden beton kayma eşiği ve plastik vizkozite değeri elde edilmiştir.
3. Aşamada harçlarda yapılan kayma eşiği ve plastik vizkozite değerlerinden beton kayma eşiği ve plastik vizkozite değeri elde edilmiştir.

Bu analiz çalışmasında harçlarda yapılan yayılma tablası, k ve w sonuçları, taze beton deneyleri ve reolojik paremetreleri girdi, CTPT sonuçları çıktı olarak kullanılmış ve reolojik parametrelerin hesaplanabilmesi için etkili parametrelerle modeller kurulmuştur.

Reolojik veriler olan kayma eşiği ve viskozitenin, taze harç deneylerinden elde edilen veriler % 80 model eğitim seti kullanılarak formüsel olarak aralarındaki ilişkiler belirlenmiş ve aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Bu formüller reolojik parametrelerin bulunduğu 18, 30°C ve 15. ve 45. dakikadaki değerleri göz önüne

alınarak yapılmıştır. Modellerden en iyi regrasyon değerini veren model koyu renkle belirtilmiştir.

1. Aşamada harçlarda yapılan yayılma, k ve w değerlerinden harçların reolojik deney sonuçları

18⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9188 ile meta.AdditiveRegression kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 14. 18⁰C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası(yh), kh, wh	
Çıktı	Harcın kayma eşiği (keh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,864	
functions.GaussianProcesses	0,8425	
functions.LeastMedSq	0,8535	keh = 5,4923 * yh + 23,2228 * kh + 21,9237 * wh -279,5374
functions.LinearRegression	0,8678	
functions.PaceRegression	0,8887	keh = -368,5576 + 15,1185 * yh - 44,4283 * kh
Linear Regression Model	0,7631	
functions.SimpleLinearRegression	0,8678	
functions.SMOreg	0,8948	
lazy.IBk	0,8375	
lazy.Kstar	0,8573	
lazy.LWL	0,772	
meta.AdditiveRegression	0,9188	
meta.Bagging	0,9024	
rules.DecisionTable	0,7362	
rules.M5Rules	0,8678	keh = 10,2776 * yh - 374,0176
trees.M5P	0,8956	

18⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,5224 ile functions.GaussianProcesses kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 15. 18⁰C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası(yh), kh, wh	
Çıktı	Harcın plastik viskozitesi (pvh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,3997	
functions.GaussianProcesses	0,5224	
functions.LeastMedSq	0,4392	$pvh = -0,0739 * kh + 9,5134 * wh + -1,4407$
functions.PaceRegression	0,3507	
functions.RBFNetwork	0,1497	
functions.SimpleLinearRegression	0,2955	
functions.SMOreg	0,3065	
lazy.IBk	-0,6554	
lazy.Kstar	-0,5182	
lazy.LWL	0,1397	
meta.AdditiveRegression	-0,2126	
meta.Bagging	0,485	
rules.DecisionTable	-0,4541	
trees.M5P	0,408	

30°C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9976 ile rules. Decision Table kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 16. 30°C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası(yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın kayma eşiği (keh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9249	
functions.GaussianProcesses	0,9315	
functions.LeastMedSq	0,9108	$keh = 4,1808 * pvh + 16,6419 * yt - 36,6632 * kh - 81,0814 * wh - 419,4624$
functions.LinearRegression	0,9575	$keh = 130,4211 * kh + -651,0112$
functions.MultilayerPerceptron	0,9447	
functions.PaceRegression	0,9675	$keh = -651,0112 + 130,4211 * kh$
functions.SimpleLinearRegression	0,9575	
functions.SMOreg	0,9452	
lazy.IBk	0,9324	
lazy.Kstar	0,9464	
lazy.LWL	0,9375	
meta.AdditiveRegression	0,8975	
meta.Bagging	0,988	
rules.DecisionTable	0,9926	
rules.M5Rules	0,9575	$keh = 130,4211 * kh - 651,0112$
trees.DecisionStump	0,9025	
trees.M5P	0,9575	$keh = 130,4211 * kh - 651,0112$
trees.DecisionStump	0,8735	

30°C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9593 ile functions.RBFNetwork kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 17. 30°C 15. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayımla tablası(yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın plastik viskozitesi (pvh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,6297	
functions.GaussianProcesses	0,7808	
functions.LeastMedSq	0,7506	$pvh = 0,0652 * keh - 0,1609 * yh - 0,8413 * kh + 8,3305 * wh - 5,43$
functions.LinearRegression	0,8146	$pvh = 7,6121 * kh - 39,3826$
functions.MultilayerPerceptron	0,6735	
functions.PaceRegression	0,8146	$pvh = -39,3756 + 7,6112 * kh$
functions.RBFNetwork	0,9593	
functions.SimpleLinearRegression	0,8146	
functions.SMOreg	0,79	
lazy.IBk	0,3377	
lazy.Kstar	0,5452	
lazy.LWL	0,639	
rules.DecisionTable	0,5682	
rules.M5Rules	0,8313	$pvh = 0,8198 * yh - 37,6288$
trees.DecisionStump	0,502	
trees.M5P	0,813	$pvh = 0,8198 * yh - 37,6288$

18⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 45. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9366 ile trees.REPTree kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18. 18⁰C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası (yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın kayma eşiği (keh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,8746	
functions.GaussianProcesses	0,9073	
functions.LeastMedSq	0,86	keh = 0,5224 * pvh + 153,6444 * kh -0,3305 * wh -665,5825
functions.LinearRegression	0,8904	keh = 1,7716 * pvh + 23,2861 * yt - 55,9468 * kh -680,9822
functions.MultilayerPerceptron	0,8895	
functions.PaceRegression	0,9081	keh = -708,5969 + 1,6011 * pvh + 24,3101 * yt -50,547 * k -34,9116 * w
functions.RBFNetwork	0,5948	
functions.SMOreg	0,9228	
functions.SimpleLinearRegression	0,8904	
lazy.IBk	0,7786	
lazy.Kstar	0,9519	
lazy.LWL	0,9163	
meta.AdditiveRegression	0,8604	
meta.Bagging	0,9109	
rules.DecisionTable	0,8789	
rules.M5Rules	0,98	
trees.M5P	0,8904	
trees.REPTree	0,9366	keh = 1,8615 * pvh + 17,4203 * yt - 706,4541

18⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,7782 ile trees.M5P kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 19. 18⁰C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayımla tablası (yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın plastik viskozitesi (pvh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,6963	
functions.GaussianProcesses	0,7722	
functions.LeastMedSq	0,7405	$pvh = 0,0494 * keh + 1,1134 * yt - 12,1501 * kh - 17,7651 * wh - 23,2583$
functions.LinearRegression	0,7563	$pvh = 0,0455 * keh + 0,7336$
functions.MultilayerPerceptron	0,7169	
functions.PaceRegression	0,7258	
functions.RBFNetwork	0,561	
functions.SimpleLinearRegression	0,7782	
functions.SMOreg	0,7547	
lazy.IBk	0,6935	
lazy.Kstar	0,7372	
lazy.LWL	0,5324	
meta.AdditiveRegression	0,6256	
meta.Bagging	0,6896	
rules.DecisionTable	0,4648	
rules.M5Rules	0,5896	
trees.DecisionStump	0,6454	
trees.M5P	0,7782	$pvh = -1,1359 * yt + 5,7539 * kh + 5,2137 * wh + 2,8156$
trees.REPTree	0,3718	

30°C ortam sıcaklığında üretilen harçların 45. dakikaları dikkate alındığında ve kayma eşiğinin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9792 ile functions.LeastMedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 20. 30°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası (yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın kayma eşiği (keh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9627	
functions.GaussianProcesses	0,9554	
functions.LeastMedSq	0,9792	
functions.LinearRegression	0,9495	$Keh = 2,39 * vizkozite + 36,5772 * Yt - 104,7714 * kh + 126,8158 * wh - 1241,8274$
functions.MultilayerPerceptron	0,9443	
functions.PaceRegression	0,9485	$Keh = -1245,9117 + 2,1503 * pvh + 36,0461 * Yt - 104,3662 * kh + 147,3242 * wh$
functions.RBFNetwork	0,7758	
functions.SimpleLinearRegression	0,9265	
functions.SMOreg	0,9732	
lazy.IBk	0,9683	
lazy.Kstar	0,9687	
lazy.LWL	0,8542	
meta.AdditiveRegression	0,8906	
meta.Bagging	0,9498	
rules.DecisionTable	0,9635	
rules.M5Rules	0,9613	
trees.DecisionStump	0,7526	
trees.M5P	0,9613	$Keh = 2,4916 * pvh + 25,7567 * Yt + 111,5455 * wh - 1266,4843$
trees.REPTree	0,9382	

30°C ortam sıcaklığında üretilen harçların 45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,8055 ile lazy.LWL kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 21. 30°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Yayılma tablası (yt), kh, wh	
Çıktı	Harcın plastik viskozitesi (pvh)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,631	
functions.GaussianProcesses	0,607	
functions.LeastMedSq	0,7224	$pvh = 0,0945 * keh + 1,0749 * yt + 19,8198 * kh + 6,7975 * wh + 54,4284$
functions.LinearRegression	0,7125	$pvh = 0,0677 * keh - 20,6581 * wh + 28,8865$
functions.MultilayerPerceptron	0,5631	
functions.PaceRegression	0,7477	$pvh = 49,9034 + 0,0724 * keh + 0,2178 * yt - 9,4954 * kh - 6,7264 * wh$
functions.RBFNetwork	0,1894	
functions.SimpleLinearRegression	0,7789	
functions.SMOreg	0,7755	
lazy.IBk	0,2325	
lazy.Kstar	0,5006	
lazy.LWL	0,8055	
meta.AdditiveRegression	0,4687	
meta.Bagging	0,5466	
rules.DecisionTable	0,1153	
rules.M5Rules	0,7476	$pvh = 0,0677 * keh - 20,6581 * wh + 28,8865$
trees.DecisionStump	0,4777	
trees.M5P	0,7476	$pvh = 0,0677 * keh - 20,6581 * wh + 28,8865$

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

2. Aşamada, harçlarda yapılan yayılma, k ve w kayma eşiği ve plastik viskozite değerlerinden beton kayma eşiği ve plastik vizkozite değerleri sonuçları

2. Aşama taze beton deneyleri 2517-M-10 no'lu ve proje başlıklı araştırma projesinden alınmıştır. Bu verilere dayanarak 18⁰C ortam sıcaklığında taze harç deneyleri, reoloji deneyleri ve taze beton deneylerinin sonuçlarını girdi, betonun kayma eşiğini çıktı olarak düşünüldüğünde; en yüksek korelasyon değeri 0,9825 ile functions.LeastMedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 22. 30⁰C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w, Yayılma tablası(yh) ,kh, wh Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,9264	
functions.GaussianProcesses	0,9782	
functions.LeastMedSq	0,9825	$Ke = 4,1423 * v + 34,0605 * s + 2,2856 * y - 23,953 * h0 + 63,3268 * h1 - 41,2002 * h2 + 6,7762 * jy - 11,7339 * k + 37,0961 * w - 0,0587 * vh + 0,9273 * keh + 2,2856 * yh - 11,7339 * kh + 37,0961 * wh - 1074,0974$
functions.LinearRegression	0,9775	
functions.PaceRegression	0,9811	
Linear Regression Model	0,7311	
functions.SimpleLinearRegression	0,9225	
functions.SMOreg	0,9802	
lazy.IBk	0,9029	
lazy.Kstar	0,9005	
lazy.LWL	0,7689	
meta.AdditiveRegression	0,9076	
meta.Bagging	0,913	
rules.DecisionTable	0,9222	
rules.M5Rules	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$
trees.M5P	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$

Bu verilere dayanarak 18⁰C ortam sıcaklığında taze harç deneyleri, reoloji deneyleri ve taze beton deneylerinin sonuçlarını girdi, betonun plastik viskozitesi çıktı olarak düşünüldüğünde; en yüksek korelasyon değeri 0,9372 ile functions.LeastMedSq kuralıyla hesaplanmıştır

Çizelge 4. 23. 30⁰C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Slump(S),Yayılma(Y),j ring yayılma(JY),j ringh0(h0),j ringh1(h1),j ringh2(h2),k,w, Yayılma tablası(yh), kh, wh, Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,7157	
functions.GaussianProcesses	0,6872	
functions.LeastMedSq	0,9372	$PV = 0,0869 * ke + 1,1291 * s - 0,6111 * y + 0,3494 * h0 + 7,4824 * h1 + 0,7302 * h2 + 0,0499 * jy - 2,9793 * k + 1,8415 * w - 0,0149 * vh + 0,046 * keh - 0,6111 * yh - 2,9793 * kh + 1,8415 * wh + 12.767$
functions.LinearRegression	0,7698	$PV = 1,9415 * S - 19,0755$
functions.MultilayerPerceptron	0,1511	
functions.PaceRegression	0,8641	$PV = 0,1077 * ke + -0,9344 * y + 8,4423 * h0 + 9,1774 * h2 - 1,3823 * jy - 12,0646 * k - 0,9344 * yh + 97,3529$
functions.RBFNetwork	0,5465	
functions.SimpleLinearRegression	0,6534	
functions.SMOreg	0,6846	
lazy.IBk	0,6821	
lazy.Kstar	0,3321	
lazy.LWL	0,6315	
meta.AdditiveRegression	0,0678	
meta.Bagging	0,4589	
rules.DecisionTable	0,6896	
rules.M5Rules	0,833	$PV = -8,6332 * s + 10,2002 * h0 + 149.4785$
trees.DecisionStump	0,3511	
c	0,9172	$PV = 0,0817 * ke - 5,4936 * h0 - 3,7303 * h1 + 2,4313 * h2 - 0,726 * jy + 91,0594$

Bu verilere dayanarak 30⁰C ortam sıcaklığında taze harç deneyleri, reoloji deneyleri ve taze beton deneylerinin sonuçlarını girdi, betonun kayma eşiğini çıktı olarak düşünüldüğünde; en yüksek korelasyon değeri 0,99927 ile lazy.Kstar kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 24. 30⁰C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma (JY), j ringh0 (h0), j ringh1(h1), j ringh2 (h2), k, w, Yayılma tablası (yh), kh, wh, Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,93	
functions.GaussianProcesses	0,9597	
functions.LeastMedSq	0,9249	$KE = -0,505 * pvh + 0,9424 * S - 2,0683 * h0 - 4,4874 * h1 - 37,0679 * h2 + 105,0199 * Jy + 25,5335 * Jy - 40,7315 * k + 31,915 * w - 0,2037 * vh - 0,7973 * keh + -2,0683 * yh - 40,7315 * kh - 31,915 * wh + -793,1458$
functions.LinearRegression	0,9508	$KE = 32,5679 * S - 8,9842 * Y + 53,1849 * h1 + 162,8866 * h2 + 9,0741 * jy + -8,9841 * yh - 120,556 * wh + -1396,3626$
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	0,9459	$KE = 45,8076 * S + 10,0761 * Y - 1102,0616$
trees.REPTree	0,8904	

Bu verilere dayanarak 30°C ortam sıcaklığında taze harç deneyleri, reoloji deneyleri ve taze beton deneylerinin sonuçlarını girdi, betonun plastik viskozitesi çıktı olarak düşünüldüğünde; en yüksek korelasyon değeri 0,9246 ile functions.LeastMedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 25. 30°C 45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma (JY), j ringh0 (h0), jringh1(h1), j ringh2 (h2), k, w, Yayılma tablası (yh), kh, wh, Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı	Plastik viskozite (PV)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,6221	
functions.GaussianProcesses	0,4477	
functions.LeastMedSq	0,9246	$PV = 0,0406 * ke - 0,201 * S + 0,2916 * Y - 10,621 * h0 + 5,8548 * Jring h1 + 11,3725 * h2 - 0,0518 * Jy - 2,26 * k - 3,3052 * w - 0,0113 * yh - 0,0827 * keh + 0,2916 * yh - 2,26 * kh - 3,3052 * wh - 36,0536$
functions.LinearRegression	0,652	$PV = 16,4944 * h1 + 14,946 * h2 - 3,2564 * yh - 57,0233$
functions.MultilayerPerceptron	0,5698	
functions.PaceRegression	0,6581	$PV = -48,5906 + 7,7169 * Jh2$
functions.RBFNetwork	0,79046	
functions.SimpleLinearRegression	0,72391	
functions.SMOreg	0,6721	
lazy.IBk	0,8219	
lazy.Kstar	0,46562	
lazy.LWL	0,7156	
meta.AdditiveRegression	0,8952	
meta.Bagging	0,6164	
rules.DecisionTable	0,4241	
rules.M5Rules	0,652	
trees.DecisionStump	0,7191	
trees.M5P	0,652	$PV = 0,0389 * ke - 1,1359 * Y + 5,7539 * h1 + 5,2137 * h2 - 1,5156 * Jy + 59,0307$
trees.REPTree	0,2567	

3.Aşamada harçlarda yapılan kayma eşiği ve plastik vizkozite değerlerinden betonun kayma eşiği ve plastik vizkozite değerlerinin sonuçları

3. Aşama taze beton deneyleri 2517-M-10 no'lu ve proje başlıklı araştırma projesinden alınmıştır. 18⁰C-30⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15.-45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,8142 ile functions.LeastMedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 26. 18⁰C-30⁰C 15.-45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Harcın kayma eşiği(keh), harcın plastik vizkozitesi(pvh)	
Çıktı	Kayma eşiği (KE)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,6963	
functions.GaussianProcesses	0,7722	
functions.LeastMedSq	0,8142	KE =0,0474 * keh +1,1134 * pvh -12,15
functions.LinearRegression	0,7563	KE=0,0455 * keh +0,7336
functions.MultilayerPerceptron	0,7169	
functions.PaceRegression	0,7258	
functions.RBFNetwork	0,561	
functions.SimpleLinearRegression	0,7782	
functions.SMOreg	0,7547	
lazy.IBk	0,6935	
lazy.Kstar	0,7372	
lazy.LWL	0,5324	
meta.AdditiveRegression	0,6256	
meta.Bagging	0,6896	
rules.DecisionTable	0,4648	
rules.M5Rules	0,5896	
trees.DecisionStump	0,6454	
trees.REPTree	0,3718	

18⁰C-30⁰C ortam sıcaklığında üretilen harçların 15-45. dakikaları dikkate alındığında ve plastik viskozitenin çıktı olarak düşünüldüğünde en yüksek korelasyon değeri 0,9328 ile rules.M5Rules kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 27. 18⁰C-30⁰C 15-45. dk üretimleri weka sonuçları

Girdiler	Harcın kayma eşiği(keh), harcın plastik vizkozitesi(pvh)	
Çıktı	Plastik vizkozite (pv)	
Kural	R	Formül
functions.IsotonicRegression	0,7157	
functions.GaussianProcesses	0,6872	
functions.LeastMedSq	0,7852	
functions.LinearRegression	0,7698	
functions.MultilayerPerceptron	0,1511	
functions.PaceRegression	0,8641	
functions.RBFNetwork	0,5465	
functions.SimpleLinearRegression	0,6534	
functions.SMOreg	0,6846	
lazy.IBk	0,6821	
lazy.Kstar	0,3321	
lazy.LWL	0,6315	
meta.AdditiveRegression	0,0678	
meta.Bagging	0,4589	
rules.DecisionTable	0,6896	
rules.M5Rules	0,9372	PV =0,0485 * keh +2,152 * pvh -22,18
trees.DecisionStump	0,3511	
trees.REPTree	0,9172	

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı sıcaklıklarda katkılı taze harçların reolojik özelliklerinin belirlenmesi ve reolojik özelliklerin taze harç ve 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 yayılma tablası deneyleri (en az 20 cm olacak şekilde) dikkate alınarak bağlayıcı maddenin %1,5'i olarak belirlenmiştir. 300 dozlu harçlar için 0,55, 400 dozlu harçlar için 0,45 S/Ç oranı alınmıştır. Çimento olarak CEM I 42,5 R ve CEMII 42,5 A-M R kullanılmıştır. Tüm karışımlarda şahit numunelere ilave olarak 4 farklı uçucu kül (Çayırhan, Orhaneli, Seyitömer ve Tunçbilek) çimentonun %15'i oranında ve silis dumanı çimentonun %10 u oranında katılmıştır. Şahit, şahit+silis dumanı, uçucu küllü ve uçucu kül+ silis dumanı katkılı olmak üzere 80 farklı numune üretilmiştir.

Üretilen taze harçlardan yayılma çapı, k çökme deneyinden 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 ölçümler sonucunda;

Tüm karışımlarda yayılma çapı, k çökme deney aletinden elde edilen k ve w değerlerinin 15.dakikaya göre 45. dakikada zamanla azalmasına karşılık reolojik parametrelerde hem plastik viskozitenin hemde kayma eşiği değerlerinde artış olduğu, bu artışın kayma eşiğinde(%15-25) plastik viskozitedeki artışa (%5-10) göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Harçların reolojik ifadeleriyle betonun reolojik ifadeleri arasında % 65 - 75 arasında bir ilişkinin olduğu bulunmuştur.

300 kg/m³ dozajlı harçlara göre 400 kg/m³ dozajlı betonlardan elde edilen hem reolojik parametrelerde hemde taze harç ve beton deney sonuçlarından elde edilen tüm deneysel parametrelerde artış olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla çimento dozajı arttıkça işlenebilir kohezif betonlar elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Mineral katkının reolojik parametrelere etkisi incelendiğinde; mineral katkılı harçların plastik viskozite ve kayma eşiği değerlerinde zamanla artış bulunmuştur. Silis dumanı mineral katkısız şahit numuneye ilave edildiğinde η_{pl} ve τ_0 'ni artırmasına karşın uçucu küllerle birlikte kullanıldığında bu reolojik parametreleri azaltmıştır. Şahit harç karışımlara ilave edilen uçucu kül ve silis dumanının, k çökme ve yayılma değerlerini (%15-25) arttırdığı gözlemlenmiştir. Reolojik parametrelerden kayma eşiği ve viskozite değerlerinde de artış tespit edilmiştir.

Çimento sınıfının etkisi incelendiğinde; CEM II kullanılan katkılı harçlar, CEM I kullanılan katkılı harç örneklerine göre kayma eşiği değerlerinde (%10-20) düşük oranlarda artış ve azalmalar olmasına karşın plastik viskozite değerleri tüm karışımlarda (%5-10) artış göstermiştir.

30°C gerçekleştirilen üretimlerde 18°C 'ye göre taze harç deney sonuçları ve viskozite değerleri nispeten azalırken, kayma eşiğinin sabit kaldığı veya arttığı gözlemlenmiştir. Deneyler için belirlenen ortam sıcaklığının taze beton deneylerine ve reolojik sabitlere etkisinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonucun karışım suyunun buharlaşma kayıplarından ileri geldiği ifade edilebilir.

Harçların ve betonun taze haldeki deney sonuçları ve reolojik parametrelerinin regreasyon değerleri incelendiğinde en yüksek değer 0,8323 değeri ile kayma eşiği ile yayılma arasındadır. En düşük regreasyon değeri 0,067 ile plastik viskozite ile k çökme değeri arasında bulunmuştur.

Ayrıca deney sonuçları Weka programıyla analiz edilerek, değerlendirmeler yapılmıştır. Burada taze harç deney sonuçları girdi, CTPT sonuçları çıktı olarak kullanılmış ve reolojik parametrelerin hesaplanabilmesi için etkili parametrelerle modeller kurulmuştur. 0,80-0,99 korelasyona sahip modeller bulunmuştur.

1. aşamada harçlarda yapılan yayılma, k ve w değerlerinden harçların reolojik deney sonuçları incelendiğinde en yüksek korelasyon değeri 30°C' deki üretimlerden elde edilen 0,9976 ile rules. Decision Table kuralıyla hesaplanmıştır. En düşük korelasyon

değeri değeri 18⁰C’ deki üretimlerden elde edilen 0,5224 ile functions. Gaussian Processes kuralıyla hesaplanmıştır

Çizelge 5.1. Taze harç deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyonları

Girdiler		Harçların Yayılma tablası (yt), Harçların kh, Harçların wh	
Çıktı		Harcın kayma eşiği (keh)	
Kural		R	Formül
18 derece	Decision Table	0,9976	
	functions.LinearRegression	0,9495	$Keh = 2,39 * vizkozite + 36,5772 * Yt - 104,7714 * kh + 126,8158 * wh - 1241,8274$
	functions.PaceRegression	0,9485	$Keh = -1245,9117 + 2,1503 * pvh + 36,0461 * Yt - 104,3662 * kh + 147,3242 * wh$
	trees.M5P	0,9613	$Keh = 2,4916 * pvh + 25,7567 * Yt + 111,5455 * wh - 1266,4843$
30 derece	functions.LeastMedSq	0,9108	$keh = 4,1808 * pvh + 16,6419 * yt - 36,6632 * kh - 81,0814 * wh - 419,4624$
	functions.LinearRegression	0,9575	$keh = 130,4211 * kh + -651,0112$
	functions.PaceRegression	0,9675	$keh = -651,0112 + 130,4211 * kh$
	rules.DecisionTable	0,9926	
	rules.M5Rules	0,9575	$keh = 130,4211 * kh - 651,0112$
	trees.M5P	0,9575	$keh = 130,4211 * kh - 651,0112$

Çizelge 5.2. Taze harç deneyleriyle plastic viskozitenin korelasyon ve formülasyon

Girdiler		Harçların Yayılma tablasu (yt), Harçların kh, Harçların wh	
Çıktı		Harcın plastik viskozitesi (pvh)	
Kural		R	Formül
18 derece	functions.GaussianProcesses	0,5224	
	functions.LeastMedSq	0,4392	$pvh = -0,0739 * kh + 9,5134 * wh + -1,4407$
30 derece	functions.LeastMedSq	0,7506	$pvh = 0,0652 * keh - 0,1609 * yh - 0,8413 * kh + 8,3305 * wh - 5,43$
	functions.LinearRegression	0,8146	$pvh = 7,6121 * kh - 39,3826$
	functions.PaceRegression	0,8146	$pvh = -39,3756 + 7,6112 * kh$
	rules.M5Rules	0,8313	$pvh = 0,8198 * yh - 37,6288$
	trees.M5P	0,8137	$pvh = 0,8198 * yh - 37,6288$

2. Aşamada, harçlarda yapılan yayılma, k ve w kayma eşiği ve plastik viskozite değerlerinden beton kayma eşiği ve plastik vizkozite değerleri sonuçları incelendiğinde en yüksek korelasyon değeri 30⁰C’ deki üretimlerden elde edilen 0,9927 ile trees.M5P kuralıyla hesaplanmıştır. En düşük korelasyon değeri değeri 18⁰C’ deki üretimlerden elde edilen 0,9246 ile functions. Least MedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3. Taze harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri

Girdiler		Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0(h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w, Yayılma tablası(yh) ,kh, wh Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı		Kayma eşiği (KE)	
Kural		R	Formül
18 derece	functions.LeastMed Sq	0,9825	$Ke = 4,1423 * v + 34,0605 * s + 2,2856 * y - 23,953 * h0 + 63,3268 * h1 - 41,2002 * h2 + 6,7762 * jy - 11,7339 * k + 37,0961 * w - 0,0587 * vh + 0,9273 * keh + 2,2856 * yh - 11,7339 * kh + 37,0961 * wh - 1074,0974$
	rules.M5Rules	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$
	trees.M5P	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$
30 derece	functions.LeastMed Sq	0,9249	$KE = -0,505 * pvh + 0,9424 * S - 2,0683 * h0 - 4,4874 * h1 - 37,0679 * h2 + 25,5335 * Jy - 40,7315 * k + 31,915 * w - 0,2037 * vh - 0,7973 * keh + -2,0683 * yh - 40,7315 * kh - 31,915 * wh + -793,1458$
	functions.LinearRegression	0,9508	$KE = 32,5679 * S - 8,9842 * Y + 53,1849 * h1 + 162,8866 * h2 + 9,0741 * jy + -8,9841 * yh - 120,556 * wh + -1396,3626$
	functions.PaceRegression	0,9485	$KE = -1332,9873 + 40,0937 * S + 117,6382 * Jh2 - 109,7381 * W$
	trees.M5P	0,9927	$KE = 45,8076 * S + 10,0761 * Y - 1102,0616$

Çizelge 5.4. Taze harç ve beton deneyleriyle plastic viskozitenin korelasyon ve formülasyon değerleri

Girdiler		Slump(S), Yayılma(Y), j ring yayılma(JY), j ringh0 (h0), j ringh1(h1), j ringh2(h2), k, w, Yayılma tablası(yh) ,kh, wh Harcın Kayma eşiği (Keh), harcın plastik viskozitesi(pvh)	
Çıktı		Plastik viskozite (PV)	
Kural		R	Formül
18 derece	functions.LeastMed Sq	0,9825	$Ke = 4,1423 * v + 34,0605 * s + 2,2856 * y - 23,953 * h0 + 63,3268 * h1 - 41,2002 * h2 + 6,7762 * jy - 11,7339 * k + 37,0961 * w - 0,0587 * vh + 0,9273 * keh + 2,2856 * yh - 11,7339 * kh + 37,0961 * wh - 1074,0974$
	rules.M5Rules	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$
	trees.M5P	0,9775	$Ke = 4,3263 * v + 41,7733 * s + 14,5142 * y - 59,6726 * h2 - 995,8156$
30 derece	functions.LeastMed Sq	0,9372	$PV = 0,0869 * ke + 1,1291 * s - 0,6111 * y + 0,3494 * h0 + 7,4824 * h1 + 0,7302 * h2 + 0,0499 * jy - 2,9793 * k + 1,8415 * w - 0,0149 * vh + 0,046 * keh - 0,6111 * yh - 2,9793 * kh + 1,8415 * wh + 12,767$
	functions.LinearRegression	0,7698	$PV = 1,9415 * S - 19,0755$
	functions.PaceRegression	0,8641	$PV = 0,1077 * ke + -0,9344 * y + 8,4423 * h0 + 9,1774 * h2 - 1,3823 * jy - 12,0646 * k - 0,9344 * yh + 97,3529$
	rules.M5Rules	0,833	$PV = -8,6332 * s + 10,2002 * h0 + 149,4785$

3. aşamada harçlarda yapılan kayma eşiği ve plastik vizkozite değerlerinden beton kayma eşiği ve plastik vizkozite değerlerinin deney sonuçları incelendiğinde en yüksek korelasyon değeri 30⁰C’ deki üretimlerden elde edilen 0,9328 ile rules.M5Rules kuralıyla hesaplanmıştır. En düşük korelasyon değeri değeri 18⁰C’

deki üretimlerden elde edilen 0,8142 ile functions. Least MedSq kuralıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 5.5. Harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri

Girdiler		Harcın kayma eşiği(keh), harcın plastik vizkozitesi(pvh)	
Çıktı		Kayma eşiği (KE)	
Kural		R	Formül
18 derece	functions.LeastMedSq	0,8142	$KE = 0,0474 * keh + 1,1134 * pvh - 12,15$
	functions.LinearRegression	0,7563	$KE = 0,0455 * keh + 0,7336$
30 derece	rules.M5Rules	0,9328	
	functions.RBFNetwork	0,561	

Çizelge 5.6. Harç ve beton deneyleriyle kayma eşiğinin korelasyon ve formülasyon değerleri

Girdiler		Harcın kayma eşiği(keh), harcın plastik vizkozitesi(pvh)	
Çıktı		Plastik vizkozite (PV)	
Kural		R	Formül
18 derece	rules.M5Rules	0,9372	PV =0,0485 * keh +2,152 * pvh -22,18
	functions.PaceRegression	0,8641	
30 derece	trees.REPTree	0,9172	
	functions.RBFNetwork	0,561	
	trees.REPTree	0,9172	

WEKA programıyla yapılan analizlerle oluşturulan formüller incelendiğinde taze harç deneyleri ile kayma eşiğinin iyi korelasyon verdiği ve taze harç ve taze beton deneyleriyle kayma eşiğini belirlemede kullanılabileceği, viskozitenin ise kayma eşiğine göre düşük korelasyon verdiği ve taze beton değerlerinden elde edilmesi için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca harçların reolojik ve taze haldeki deney sonuçlarından betonun reolojik ifadelerine ulaşabileceğimiz yüksek korelasyona sahip modeller kurulmuştur.

Özet olarak tez çalışmasında, sıcaklığın taze harç, beton ve reolojik deneyleri üzerindeki etkilerinin düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca taze harç ve beton deneyleri yayılma k ve w çökme, slump, J ring ve reolojik parametreleriyle taze beton reolojik parametreleri arasında uygun korelasyonlar geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında sahada yapılan taze harç ve beton deney sonuçları kullanılarak taze beton ve harçların reolojik parametrelerinin (kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (η_{pl})) hesap edilebileceği yüksek korelasyonlu ifadeler geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- ACI 304-2R, 1996. Placing Concrete by Pumping Methods. American Concrete Institute, 25p. USA.
- 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, 5p. 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.
- 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.
- 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.
- Bartos, P., 1992. Fresh Concrete Properties and Tests. Elsevier Science Publisher, 291s., Amsterdam.
- Basics of Rheology, 1991. Rheomat 115 Manuel, 72p.Mattler.

- Bouzoubaâ, N., Lachemi, M., 2001. Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 31 (3), 413-420.
- Ferraris, C. F., 1996. Measurement of The Rheological Properties of High Performance Concrete. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5869, 40p. Gaithersburg.
- 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, Gaithersburg.
- Ferraris, C. F., de Larrard F., Martys N., 2001. Fresh Concrete Rheology: Recent Developments, *Materials Science of Concrete VI*, Sidney Mindess and Jan Skalny, eds., The American Ceramic Society, 735 Ceramic Place, 215-241, Westerville.
- Ferraris, C. F., Obla, K. H., Hill, R., 2001a. The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete. *Cement and Concrete Research*, 31 (2), 245-255.
- 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.
- 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, pp. 333-367, Ottawa, Canada.
- Özkul, H., Sağlam, A. R., 2002. Süperakışkanlaştırıcı ve Mineral Katkıların Betonun Reolojik Özelliklerine Etkisi. TÜBİTAK Proje No: İNTAG-655, 169s., Ankara.
- Özkul, M. H., Doğan, Ü. A., Çavdar, Z., Sağlam, A. R., Parlak, N., 2000. Effects of Self Compacting Concrete Admixtures on Fresh and Hardened Concrete Properties. *Cement and Concrete Technology in the 2000 s Second International Symposium*, İstanbul.
- Roshavelov, T., 2005. Prediction of Fresh Concrete Flow Behavior Based on Analytical Model for Mixture Proportioning. *Cement and Concrete Research*, 35 (5), 831-835.

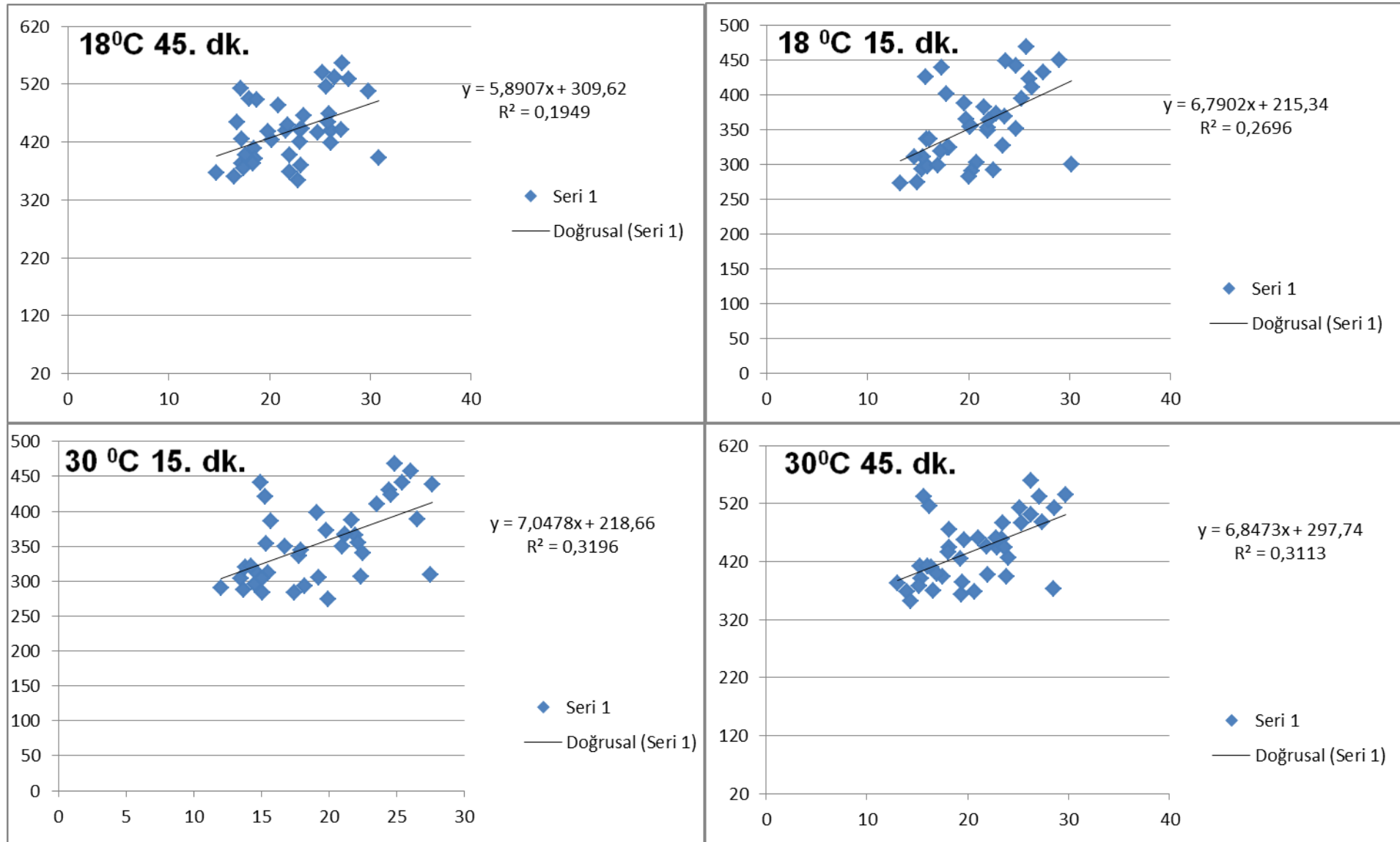
- Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, Ü. A., Özkul, M. H., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu. Beton 2004 Kongresi Bildirileri, İstanbul.
- Siddique R., 2004. Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete. Cement and Concrete Research, 34 (3), 487-493.
- Şencan, A., 2007. Modeling of Thermodynamic Properties of Refrigerant/Absorbent Couples Using Data Mining Process. Energy Conversion and Management, 48(2), 470-480.
- Tattersall, G. H. ve Banfill P. F. G., 1983. The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Books Limited, 353p. London.
- Terzi, Ö., Küçüksille, E.U., Keskin, M.E., 2005. Modeling of Daily Pan Evaporation Using Data Mining. International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, 182-185, İstanbul.
- TS 639, 1975. Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü, 14 s., Ankara.
- TS EN 1015-3, 2000. Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle) Türk Standartları Enstitüsü, 6s., 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 katkıları - Beton, Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları - Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, 5s., Ankara.

- 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, 102p. Vicksburg
- Yahia, A., Khayat K. H., 2001, Analytical Models for Estimating Yield Stress of High-Performance Pseudoplastic Grout. Cement and Concrete Research, 31 (5), 731-738.
- Yazıcı, Ş., 2002. Değişik Akışkanlaştırıcıların Betondaki Performansları. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4 (2), 41-52.
- Yücel, K.T., 1993. Taze Betonun İşlenebilirliğinin Teorik ve Deneysel İfadeleri İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora semineri.
- Yücel, K.T., 1997. Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 122s., İstanbul.

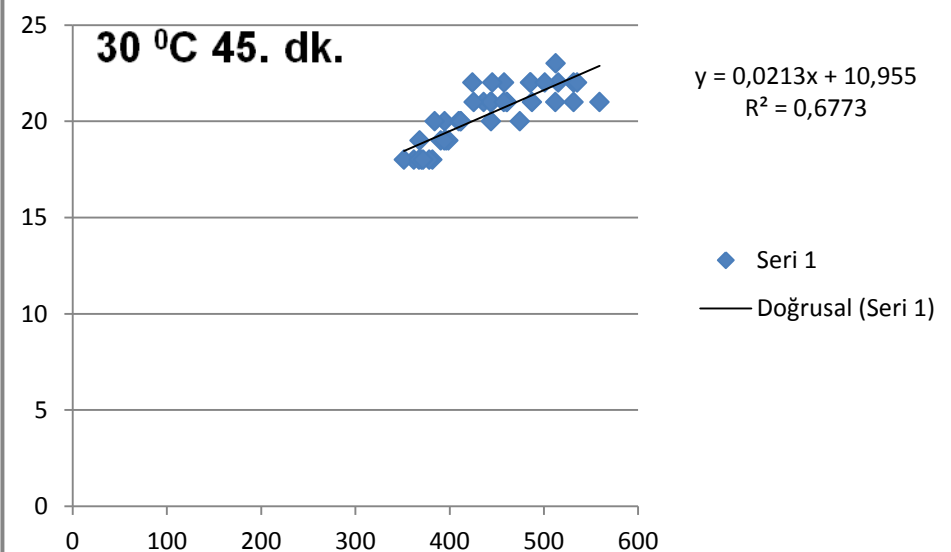
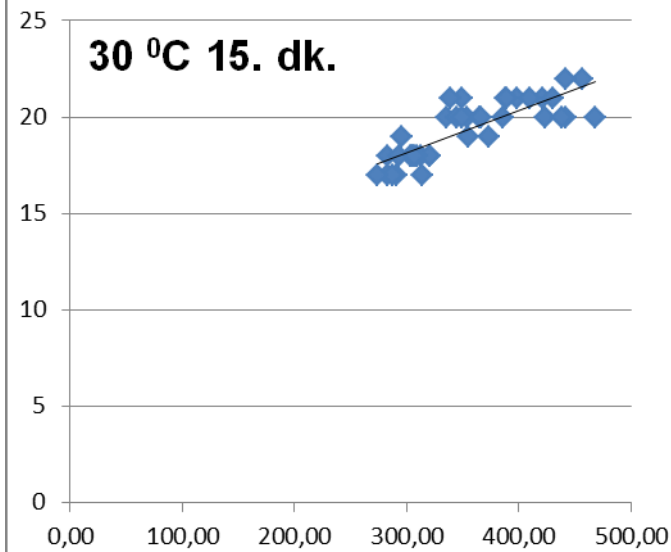
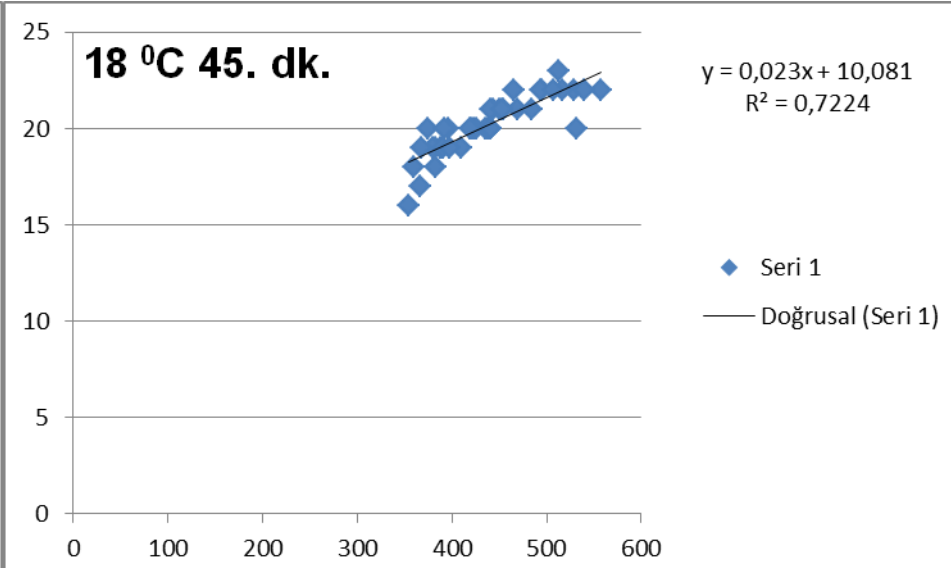
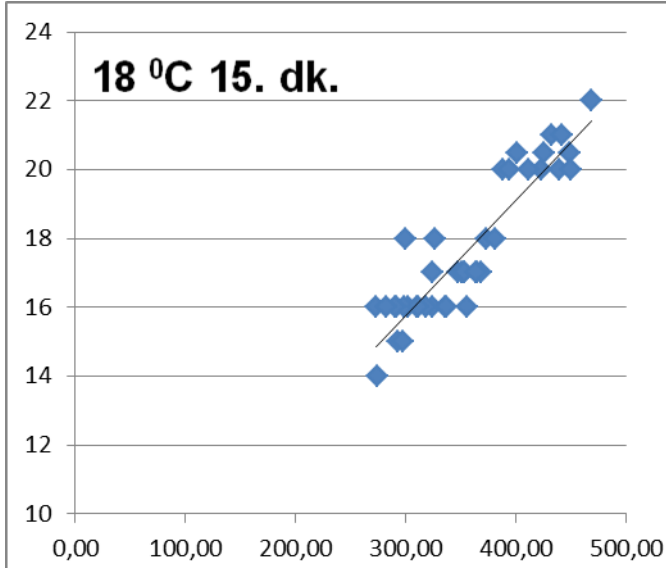
EKLER

EK A. Taze harç deney sonuçlarının karşılaştırılması

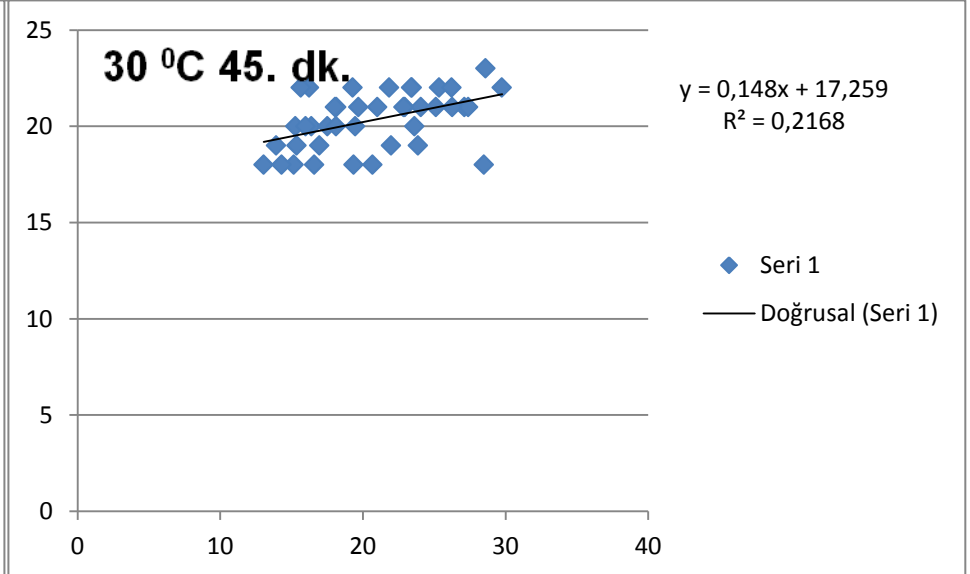
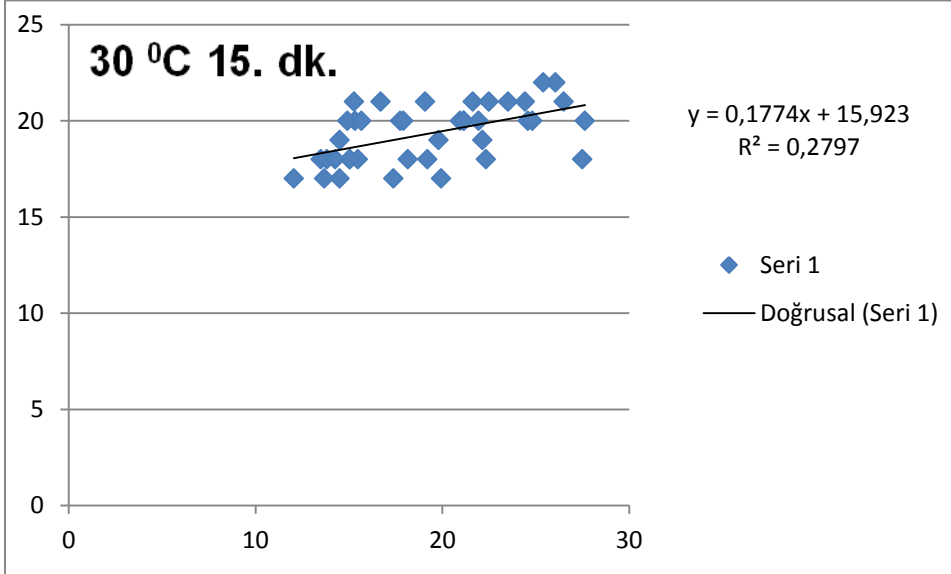
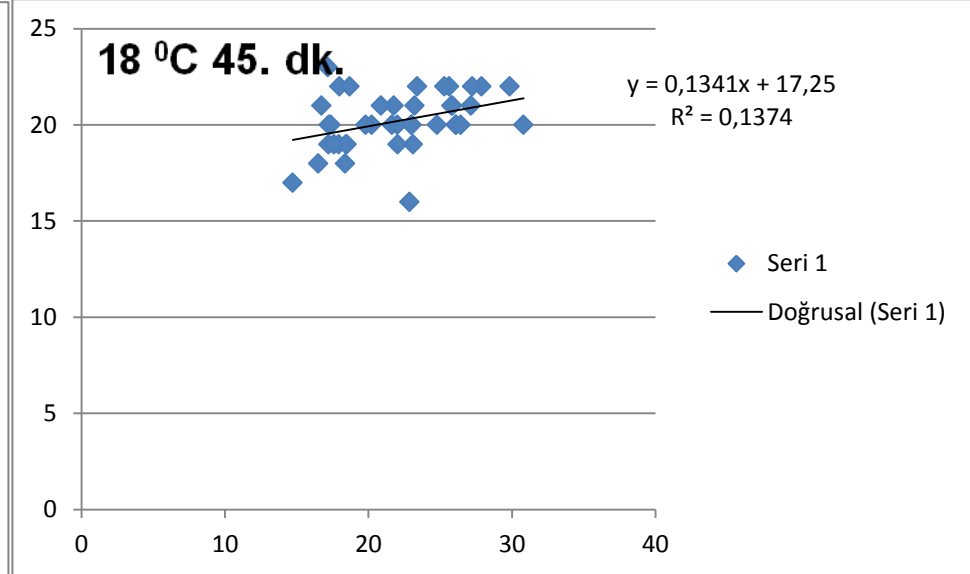
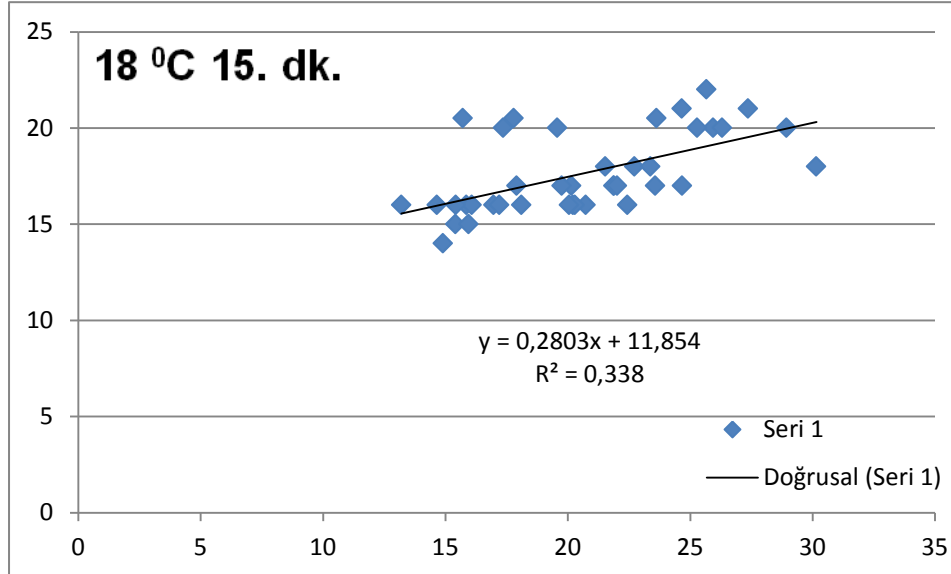
EK A Taze harç deney sonuçlarının karşılaştırılması



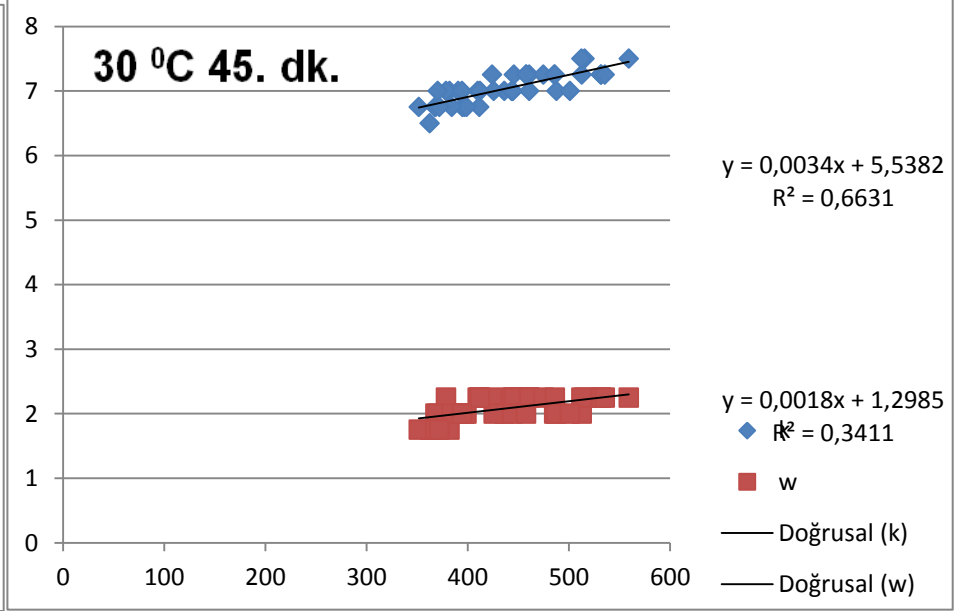
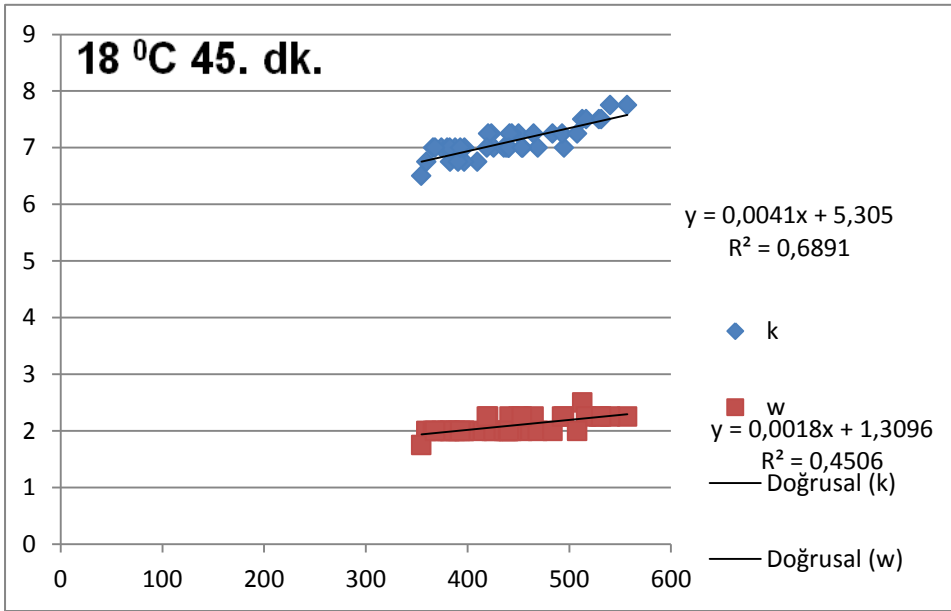
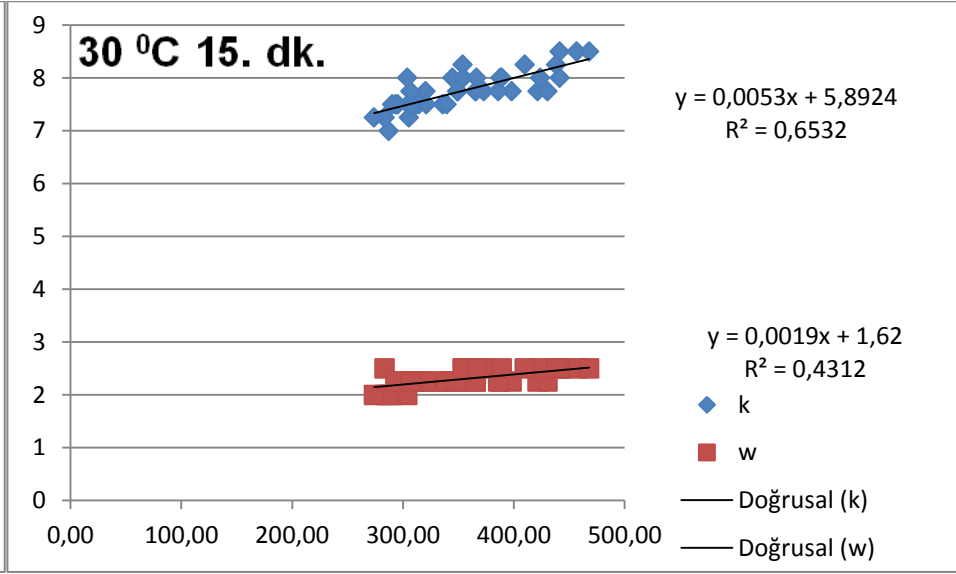
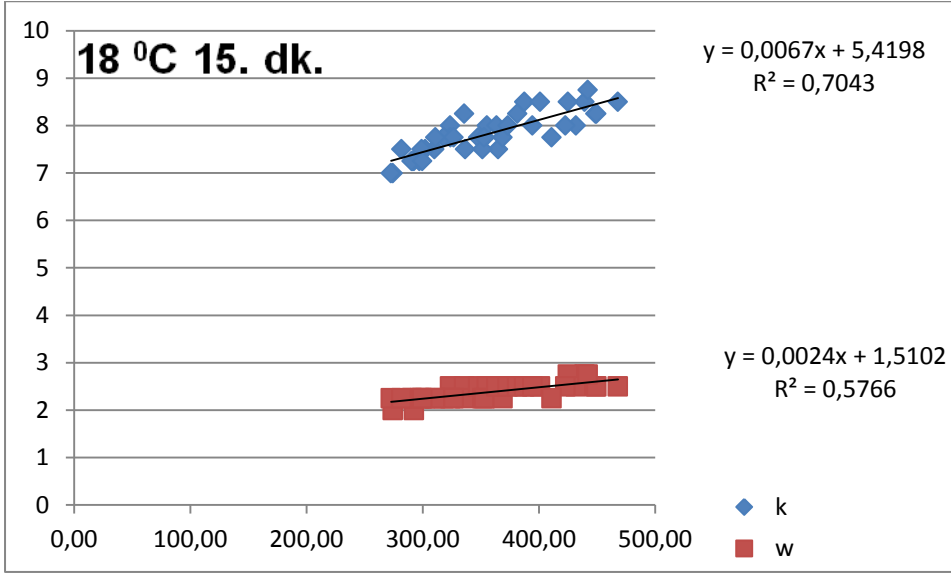
Şekil A.1.CTPT den elde edilen Plastik Viskozite (Pa.s) ve Kayma Eşiğinin (Pa) ilişkisi



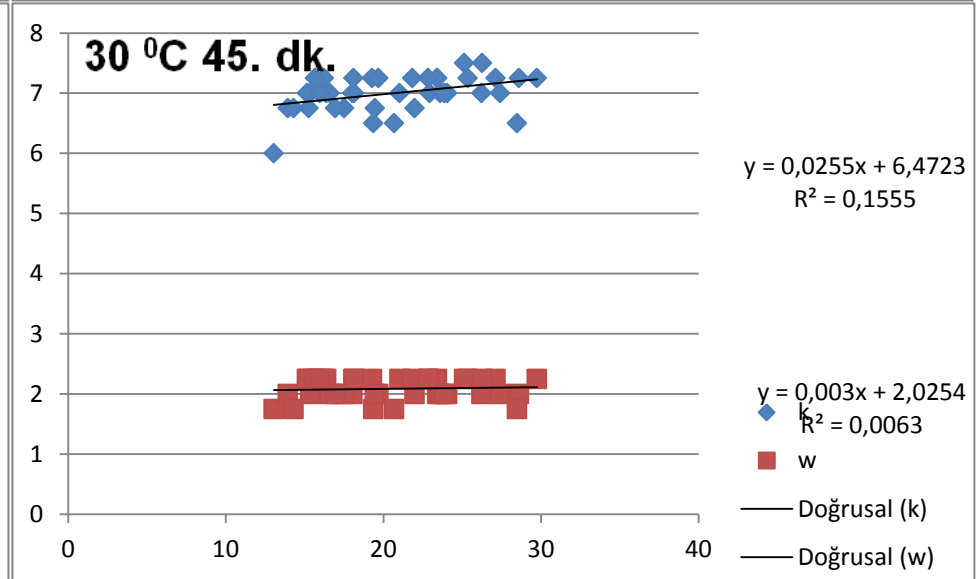
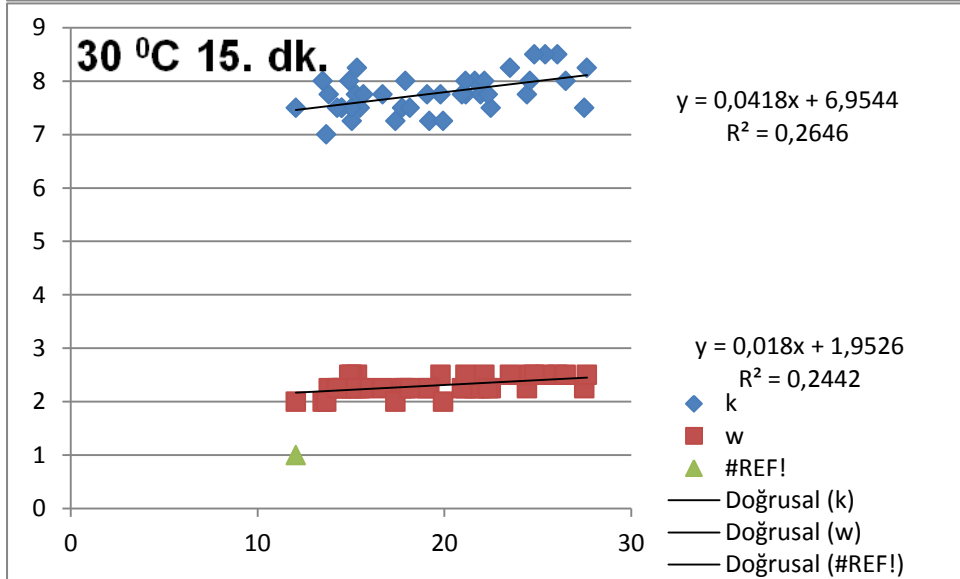
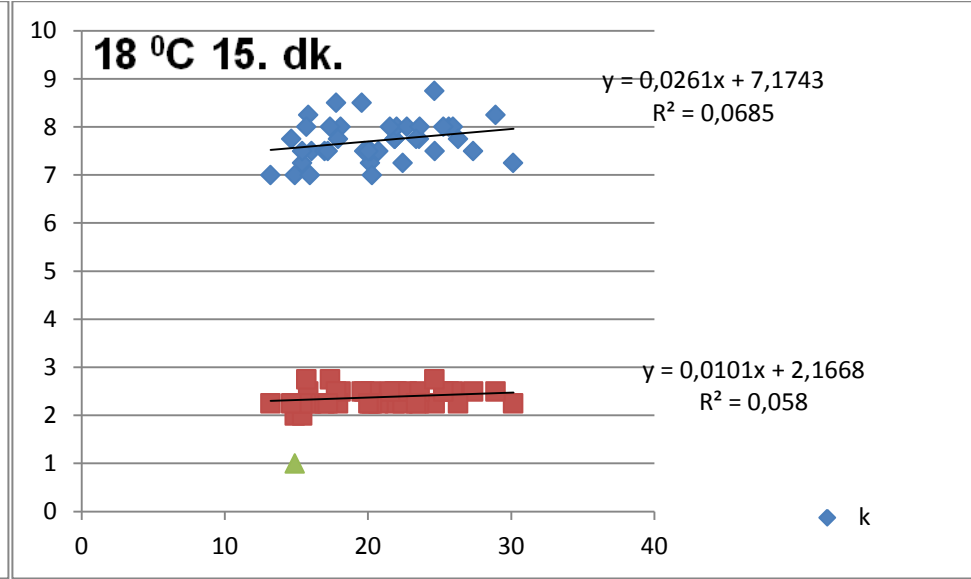
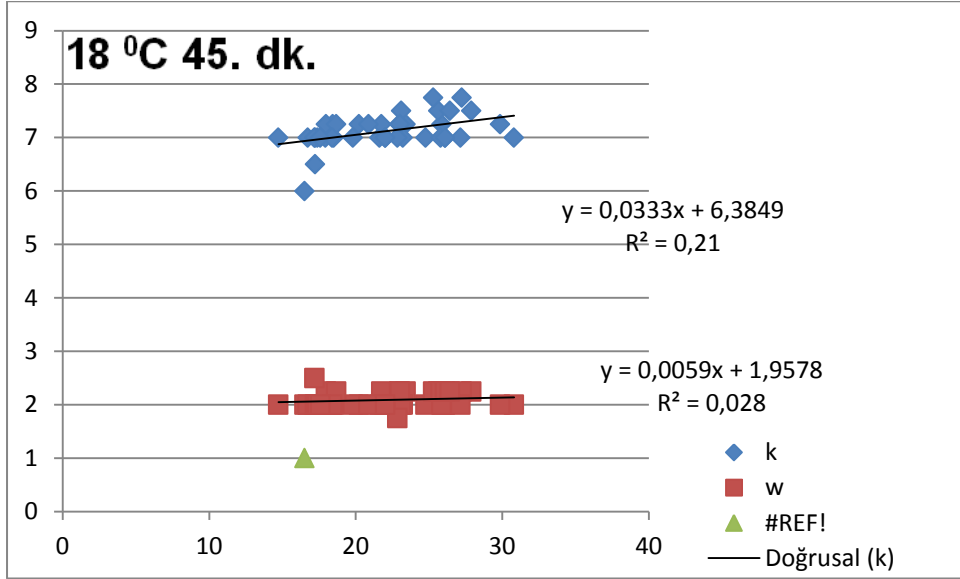
Şekil A.2.Yayılma (cm) -Kayma Eşiği (Pa) ilişkisi



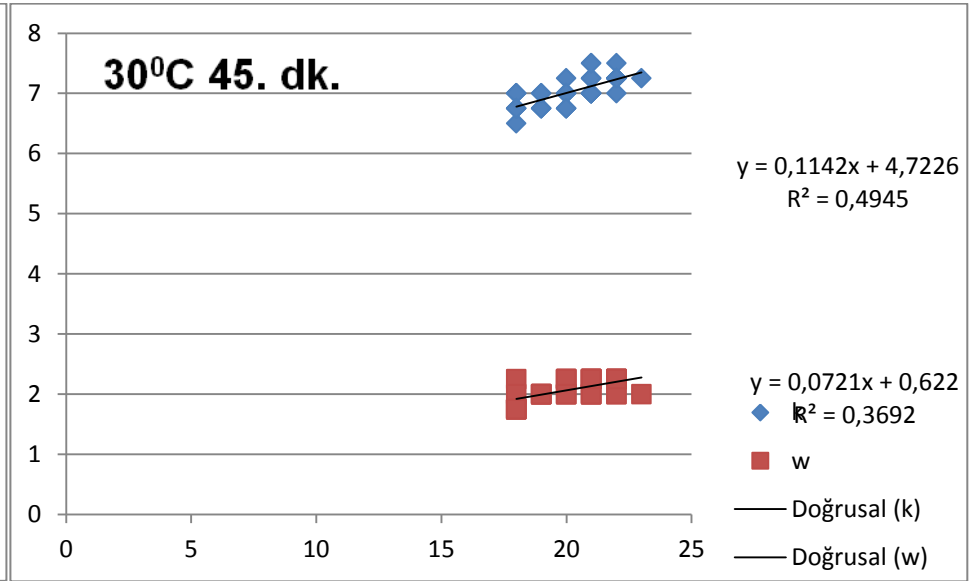
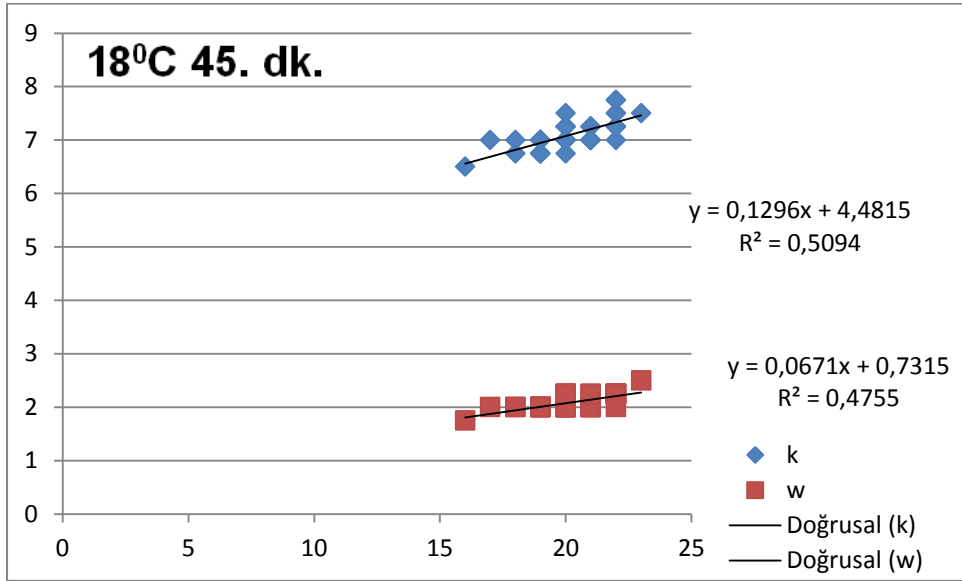
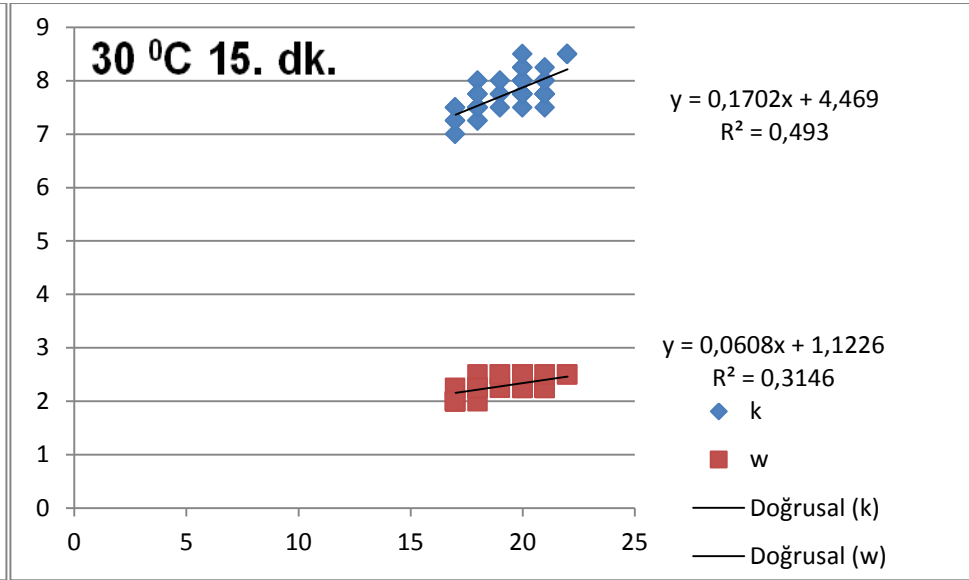
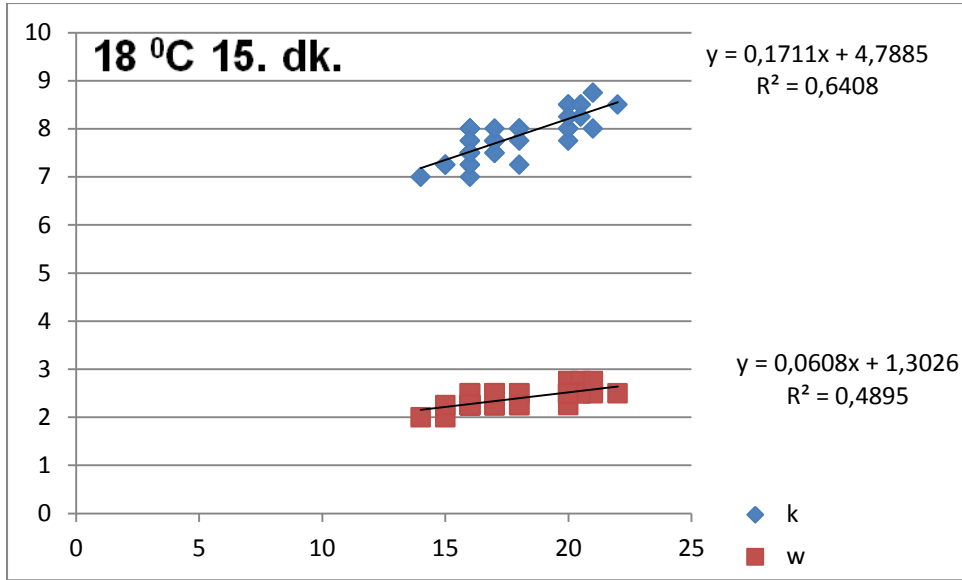
Şekil A.3.Yayılma(cm) - Plastik Viskozite (Pa.s)ilişkisi



Şekil A.4.K (cm) - w(cm) -Kayma Eşiği (Pa) ilişkisi



Şekil A.5.K (cm) –w (cm) -Plastik Viskozite (Pa.s) ilişkisi



Şekil A.6.Yayılma (cm) –k (cm) –w (cm) ilişkisi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mecit TARKAN

Doğum Yeri ve Yılı : Ankara/Altındağ, 1987

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : mecit_tarkan@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Özel Yavuz Sultan Fen Lisesi, 2005

Lisans : SDÜ, Müh. Mim. Fakültesi İnşaat Mühendisliği, 2010

: SDÜ, Müh. Mim. Fakültesi Çevre Mühendisliği, 2011

Mesleki Deneyim

Serdar Planlama Mühendislik Mimarlık Ltd. Şti. 2010- (Halen)

Karahisar Yapı Denetim Ltd. Şti. 2012- (Halen)