

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONDA
TİKSOTROPİNİN KALIP BASINCINA ETKİSİ**

Murat TUYAN

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 624.05.00

Sunuş Tarihi: 08.08.2011

Bornova-İZMİR

2011

Murat TUYAN tarafından **yüksek lisans tezi** olarak sunulan “**Kendiliğinden Yerleşen Betonda Tiksotropinin Kalıp Basıncına Etkisi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 08.08.2011 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR	
Raportör Üye	:Yrd.Doç.Dr. Özge ANDİÇ ÇAKIR	
Üye	:Yrd.Doç.Dr. Tahir Kemal ERDEM	

ÖZET**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONDA
TİKSOTROPİNİN KALIP BASINCINA ETKİSİ**

TUYAN, Murat

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Ağustos 2011, 119 sayfa

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yoğun donatılı elemanlarda bile yerleştirme ve sıkıştırma işleminde vibratöre gerek kalmayan, kendi ağırlığı ile akıp kalıbı doldurabilen ve tamamen sıkışabilen çok akıcı kıvamlı özel bir betondur. KYB'nin akıcı kıvamda olması taze beton özellikleri açısından normal betona göre birçok avantaj sağlamaktadır. Ancak, KYB'nin çok akıcı kıvamlı olmasından dolayı kalıba yaptığı basınç hidrostatik basınç olarak düşünülmekte, bu da kalıp maliyetlerini arttırmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda KYB'nin tiksotropik davranış göstermesi nedeniyle kalıba yaptığı basıncın hidrostatik basınçtan daha düşük olduğu belirtilmektedir.

Tez çalışmasının amacı, değişik kompozisyonlarda üretilen KYB'lerin tiksotropisinin kalıp basıncına etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, 15 farklı KYB karışımı üzerinde taze beton işlenebilirlik, reoloji, tiksotropi, yanal kalıp basıncı ve sertleşmiş beton dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, KYB'nin su/bağlayıcı oranı, yayılma çapı ve iri agregat/toplam agregat oranı gibi parametrelerinin değişmesiyle, betonun akış özelliklerinin ve kalıba yaptığı basıncın değiştiği görülmüştür. Ayrıca, tiksotropisi yüksek KYB karışımlarının zaman içinde kalıba yaptığı yanal basınç değerlerindeki azalmanın daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Kendiliğinden yerleşen beton, tiksotropi, kalıp basıncı, reoloji

ABSTRACT**EFFECT OF THIXOTROPY ON FORMWORK PRESSURE
OF SELF COMPACTING CONCRETE**

TUYAN, Murat

MSc in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

August 2011, 119 pages

Self-compacting concrete (SCC) is a special type of highly flowable concrete that does not require vibration for placing and compaction. It is able to flow under its own weight, completely fill formwork and achieve full compaction, even in the presence of congested reinforcement. The high flowability of SCC provides many advantages compared to conventional vibrated concrete. However, this high flowing ability causes the lateral pressure of fresh SCC on formwork to be assumed as hydrostatic pressure, thus, increasing the mold cost. In recent years, researchers indicate that due to the thixotropic behavior of SCC, the lateral pressure on formwork caused by fresh concrete is less than the hydrostatic pressure.

The aim of this thesis is to investigate the effect of thixotropy on formwork pressure of SCC mixtures having varying compositions. For this purpose, rheology, thixotropy, formwork pressure of fresh concrete and strength of hardened concrete tests were conducted on 15 different SCC mixtures. According to the results, variation in water/binder ratio, slump flow and coarse aggregate/total aggregate ratio of SCC mixtures led to change in flow characteristics of concrete and formwork pressure values. Besides, it was observed that, the greater the magnitude of thixotropy of SCC, the higher the decrease in lateral pressure.

Keywords: Self compacting concrete, thixotropy, formwork pressure, rheology

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince, 109M615 no.lu proje ile destek veren TÜBİTAK'a, tez danışmanlığımı yürüten Sayın Hocam Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a, TÜBİTAK projesi kapsamında ve tez kapsamında yol gösterici olan Yrd. Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM'e ve Özge ANDİÇ ÇAKIR'a, laboratuvar ve tez yazımı aşamalarında yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Arş. Gör. Cihat YÜKSEL'e ve diğer E.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü personeline, laboratuvar çalışmalarında desteklerinden dolayı Reza SALEHAHARİ ve Hasan Yavuz ERSÖZ'e, "İz Bırakanlar Bursu" ile destek sağlayan T.Ç.M.B.'ye, kimyasal katkı temini konusunda yardımlarından dolayı BASF firmasına ve maddi, manevi her türlü desteği sağlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	2
2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)	5
2.1 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tanımı ve Tarihçesi	5
2.2 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Uygulama Alanları	7
2.3 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantaj ve Dezavantajları	9
2.3.1 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları	9
2.3.2 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları	10
2.4 Kendiliğinden Yerleşen Beton Tasarımı	11
2.4.1 Kendiliğinden Yerleşebilirlik Mekanizması	11
2.4.2 KYB Tasarımında Kullanılan Malzeme	12

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4.2 KYB'nin Tasarım Yöntemleri	14
2.5 KYB'nin Taze Beton Özellikleri ve Deney Yöntemleri	15
2.5.1 KYB'nin Doldurma Yeteneği	16
2.5.2 KYB'nin Geçiş Yeteneği	17
2.5.3 KYB'nin Ayrışmaya Karşı Direnci.....	18
2.5.4 KYB'de Kıvamın Korunması	19
2.6 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri.....	19
2.7 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Durabilite Özellikleri.....	20
3. KYB'NİN REOLOJİK VE TİKSOTROPİK ÖZELİKLERİ.....	23
3.1 Reolojini Tanımı ve Taze Beton Reolojisi.....	23
3.2 Taze Betonda Reolojik Parametreleri Ölçme Yöntemleri	27
3.2.1 Tek Parametre Belirleyen Deney Yöntemleri.....	27
3.2.2 İki Parametre Belirleyen Deney Yöntemleri.....	30
3.3 KYB'nin Reolojik Özellikleri	34
3.4 Tikotropinin Tanımı	36
3.5 KYB'nin Tikotropik Özellikleri	39

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. KYB’DE KALIP BASINCI	41
4.1 Betonda Kalıp Basıncının Önemi	41
4.1.1 Kalıp Basıncına Etki Eden Faktörler	41
4.2 KYB’de Kalıp Basıncı.....	45
4.3 KYB’de Tiksotropinin Kalıp Basıncına Etkisi	49
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	53
5.1 Çalışma Programı	53
5.2 Kullanılan Malzeme	53
5.2.1 Çimento ve Uçucu Kül	53
5.2.2 Agregat	54
5.2.3 Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı.....	55
5.2.4 Su	56
5.3 Karışım Oranları	56
5.4 Karışımların Hazırlanması.....	58
5.5 Deneylerin Yapılışı.....	59
5.5.1 Taze Beton Deneyleri	59
5.5.2 Reoloji Deneyi.....	62

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.5.3 Tiksotropi Deneyi	63
5.5.4 Yanal Kalıp Basıncı Deneyi.....	66
5.5.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	67
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	69
6.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....	69
6.2 Reoloji Deneyi Sonuçları	75
6.3 Tiksotropi Deneyi Sonuçları	80
6.4 Yanal Kalıp Basıncı Deneyi Sonuçları	89
6.4.1 Tiksotropinin Kalıp Basıncına Etkisi.....	98
6.5 Sertleşmiş Beton Sonuçları	101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	107
KAYNAKLAR DİZİNİ	111
ÖZGEÇMİŞ	119
EKLER.....	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Prefabrik Sektöründe KYB Uygulaması	8
2.2 Döşemede KYB ile güçlendirme uygulaması	8
2.3 Yüksek hamur hacmi teorisi	11
3.1 Viskoz akış için Newton modeli.....	23
3.2 Bingham modeli için gerilme-şekil değiştirme hızı ilişkisi.....	25
3.3 Farklı süspansiyonlar için reolojik modeller	25
3.4 Kelly Ball penetrasyon çubuğu	28
3.5 Alman penetrasyon çubuğu	28
3.6 Viskometre tüpü aparatı	29
3.7 Orimet deney düzeneği.....	30
3.8 Tattersall reometresi	31
3.9 BTRHEOM reometresi.....	32
3.10 Modifiye slump deneyinin şematik gösterimi	33
3.11 Eşik kayma gerilmesi-yayılma çapı ilişkisi.....	35
3.12 Plastik viskozite-akış süresi ilişkisi	35
3.13 Molekül yapının tiksotropik davranışı.....	37
3.14 Histeris döngüsü akış eğrisi.....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.15 Denge durumu akış eğrisi	38
4.1 Boşluk suyu basıncının zamanla değişimi	42
4.2 Beton kıvamı ve döküm hızının maksimum kalıp basıncı ile ilişkisi	44
4.3 Farklı kum/toplam agrega oranındaki karışımlarda yanıl basıncın ve boşluk suyu basıncının zamana bağılı değişimi	46
4.4 Beton kıvamının zamanla yanıl basınca etkisi	48
4.5 Kayma gerilmesinde zamanla meydana gelen değişiklik	50
4.6 Yapısal çökme alanı.....	50
4.7 KYB’de tiksotropi ile kalıp basıncı arasındaki ilişki.....	51
5.1 Çimento ve uçucu külün tane boyutu dağılımları	54
5.2 Yayılma çapı deneyinde kullanılan aparatlar.....	59
5.3 L-kutusu deney aparatı.....	60
5.4 L-kutusu deneyinin yapılışı	60
5.5 V-hunisi deney aparatı	61
5.6 V-hunisi deneyinin yapılışı.....	61
5.7a Reometre test ünitesi.....	63
5.7b Reometre test ünitesi.....	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7c Reometre ölçüm ünitesi.....	63
5.7d Reometre bilgisayar bağlantısı	63
5.8 Dört farklı hızda torkun zamana bağlı değişimi	64
5.9 Yapısal çökme alanının hesaplanmasına örnek.....	65
5.10 Dinlenmede eşik değeri için torkun zamana bağlı değişimi.....	66
5.11 Basınç kalıbı	67
6.1 T_{50} süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi	69
6.2 V-hunisi akış süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi	71
6.3 T_{50} süresi ile V-hunisi akış süresi arasındaki ilişki	72
6.4 V-hunisi akış süresinin zamanla değişimi	72
6.5 L-kutusu oranının s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi	73
6.6 Akışkanlaştırıcı miktarının s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi	74
6.7 35/50/65 karışımına ait reogram (0. dakika)	76
6.8 Yayılma çapı ve s/b oranı ile görünen akma gerilmesine karşı tork (g) ilişkisi	77
6.9 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tork plastik viskozite (h) arasındaki ilişki	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.10	İA/TA oranı ile görünen akma gerilmesine karşı tork (g) ilişkisi..... 78
6.11	İA/TA oranı ile tork plastik viskozite (h) arasındaki ilişki 79
6.12	Görünen akma gerilmesine karşı torkun zamanla değişimi..... 80
6.13	Tork plastik viskozitenin zamanla değişimi 80
6.14	Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Yapısal çökme alanı) . 82
6.15	Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Relatif tork farkı)..... 83
6.16	Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Görünen viskozite düşüşü) 83
6.17	Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Dinlen. eşik değeri) ... 84
6.18	İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (Yapısal çökme alanı) 85
6.19	İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (Relatif tork farkı) 85
6.20	İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (Görünen viskozite düşüşü)86
6.21	İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (Dinlenmede eşik değeri) .. 86
6.22	Tiksotropinin zamanla değişimi (Yapısal çökme alanı) 87
6.23	Tiksotropinin zamanla değişimi (Relatif tork farkı) 88
6.24	Tiksotropinin zamanla değişimi (Görünen viskozite düşüşü) 88
6.25	Tiksotropinin zamanla değişimi (Dinlenmede eşik değeri) 89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.26 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (YÇ: 55 cm).....	92
6.27 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (YÇ: 65 cm).....	93
6.28 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (YÇ: 72 cm).....	93
6.29 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.35) ...	94
6.30 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.42) ..	95
6.31 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.50) ...	95
6.32 İA/TA oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.35).....	96
6.33 İA/TA oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.42).....	96
6.34 İA/TA oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b: 0.50).....	97
6.35 İki farklı döküm hızında taze betonda zamanla oluşan maksimum yanal basınç	98
6.36 Üç farklı zamanda ölçülen tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasındaki ilişki	99
6.37 Yapısal çökme alanı yöntemiyle belirlenen tiksotropi ile kalıp basıncı ilişkisi	99
6.38 Relatif tork farkı yöntemiyle belirlenen tiksotropi ile yanal kalıp basıncı ilişkisi	100
6.39 Görünen viskozite düşüşü yöntemiyle belirlenen tiksotropi ile yanal kalıp basıncı ilişkisi	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.40 Farklı s/b oranındaki karışımlarda tiksotropinin yanıl kalıp basıncına etkisi	101
6.41 Basıncı dayanımının zamanla değışimi	102
6.42 Yarmada çekme dayanımının zamanla değışimi	104
6.43 Basıncı dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	105

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 KYB için kullanılan malzemelerin sınır değerleri	15
3.1 Farklı süspansiyonların viskozite denklemleri	24
3.2 Kayma gerilmesi ve deformasyon hızı ilişkisini sunan denklemler	24
5.1 Çimento ve UK'nın kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri	54
5.2 Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları	55
5.3 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	55
5.4 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri	55
5.5 Üretilen betonların değişken parametreleri	56
5.6 Üretilen KYB'lerin karışım oranları.....	57
5.7 Görünür stabilite indeksinin belirlenmesi.....	62
6.1 Taze beton deney sonuçları	70
6.2 KYB işlenebilirlik deney sonuçlarına göre sınıflandırma (EFNARC, 2005).....	74
6.3 15 KYB karışımı için yapılan deneylere göre sınıflandırma	75
6.4 KYB karışımlarının 0, 90 ve 150 dakika sonundaki reolojik parametreleri.....	76
6.5 Dört farklı yöntemle hesaplanan tiksotropi değerleri	81
6.6 10 m/saat döküm hızıyla elde edilen yanal kalıp basıncı sonuçları.....	90
6.7 5 m/saat döküm hızıyla elde edilen yanal kalıp basıncı sonuçları.....	91

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
6.7 Basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık sonuçları.....	102
6.9 Yarmada çekme dayanım sonuçları	103

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün dünyada gelişmesiyle yüksek dayanımlı yapılar yapılmaya başlanmıştır. Yüksek dayanımlı yapılarda yoğun donatılı elemanlar kullanılmakta ve bunun sonucu betonu kalıplara tamamen yerleştirmek oldukça zorlaşmaktadır. Bunun dışında beton teknolojisinin gelişmesiyle betonun durabilitesi yıllar içinde çok daha önemli bir konu haline gelmiştir. 1980’li yılların başında hem kalıba kolaylıkla yerleşebilen hem de durabilitesi yüksek beton üretmek için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Japonya başta olmak üzere dünyada birçok ülke “Kendiliğinden Yerleşen Beton” (KYB) üzerinde çalışmalar yapmıştır (Mehta ve Monteiro, 2006; Okamura ve Ouchi, 1999). Yıllar içinde tüm dünyada yaygınlaşan KYB, son yıllarda uygulamada kullanılan bir beton haline gelmiştir. KYB’nin normal betona göre pek çok avantajı bulunmaktadır. Beton dökümü sırasında vibratör kullanılmaması, gürültü kirliliğinin azalması, işçilik masraflarının azalması, beton döküm süresinin azalması normal betona göre KYB’nin avantajlarıdır. Bunların yanı sıra, KYB’nin uluslararası düzeyde bir standardının bulunmaması, betonun kalite kontrolündeki zorluklar, malzeme maliyeti gibi konular da KYB’nin dezavantajlarıdır. Bir başka dezavantaj ise, KYB çok akıcı bir beton olduğu için döküm sırasında kalıba yaptığı yanal basınç hidrostatik basınca çok yakın olduğu düşünülmektedir. Bunun sonucu kalıp maliyetleri artmaktadır.

KYB akıcı kıvamlı bir beton olduğu için taze beton ve akış özelliklerinin bilinmesi tasarım ve uygulama aşamasında önem kazanmaktadır. Bu özellikleri belirlemek için standartlaşan deney yöntemlerinin dışında standartlara girmemiş ve üzerinde çalışmalara devam edilen deney yöntemleri kullanılmaktadır. KYB’nin akış özelliklerinden olan akış süresi betonun viskozitesi ile ilgilidir. KYB’nin akış süresi V-hunisi, T_{50} süresi gibi deneylerle belirlenmektedir. Ancak betonun viskozitesini nicel olarak belirlemek pratikte imkansızdır. Taze betonun reolojik parametreleri (plastik viskozite, eşik kayma gerilmesi) beton reometresi olarak adlandırılan gelişmiş cihazlarla ölçülebilmektedir. İşlenebilirlik deneyleri betonun reolojik parametrelerini belirleyememektedir. Bu deneyler sadece reolojik parametrelerin mertebesinin bilinmesini sağlamaktadırlar (Ferraris, 1999).

Tiksotropi, malzemenin sabit bir kayma gerilmesi veya deformasyon hızı etkisinde zaman içinde viskozitesinin azalması, kayma gerilmesi veya deformasyon hızının etkisi ortadan kalktığında ise malzemenin eski durumuna kademeli şekilde geri dönmesi olarak tanımlanmaktadır (Barnes vd.,1989). KYB

taze beton özellikleri açısından tiksotropik davranış göstermektedir. KYB'nin tiksotropisini belirlemek için beton reometresi kullanılmaktadır. Tiksotropinin nicel olarak ifade edilebilmesi için araştırmacılar birçok yöntem belirlemiştir.

Tez kapsamında incelenen bir diğer konu ise betonun kalıba yaptığı basınçtır. Bilindiği gibi, betonarme yapılarda kaba inşaat maliyetinin %40–60 arasını kalıp maliyeti oluşturmaktadır. Bu açıdan kalıp maliyetinin azaltılması yapının maliyetini azaltmada önemli etkisi vardır. Betonun kalıba yaptığı basıncı azaltmak kalıp maliyetini azaltmak için önemli bir yöntemdir. Taze betonun kalıplara yaptığı yanal basınç, boşluk suyu basıncı, iri agrega miktarı, çimento ve bağlayıcı miktarı, su içeriği, kimyasal katkıları, döküm hızı, betonun kıvamı, betonu yerleştirme yöntemi, ortam ve beton sıcaklığı, kalıp boyutları ve yanal basınç ölçme yöntemleri gibi parametrelerden etkilenmektedir (Assaad, 2004).

KYB'nin dezavantajlarından bahsederken kalıba yaptığı yanal basıncın hidrostatik basınca yakın olduğu belirtilmiştir. KYB'nin kalıba yaptığı basıncı belirlemek için yapılan çalışmalar sonucu basıncın hidrostatik basınçtan az olduğu sonucuna varılmıştır. KYB'nin tiksotropik davranış göstermesiyle bu sonucun meydana geldiği yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır (Billberg, 2003).

KYB'nin tiksotropisi ile kalıp basıncında ilişki olması, kalıp basıncının önceden tahmin edilmesine ve kalıp maliyetlerinin azalmasına olanak sağlamaktadır.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tezin amacı, değişik kompozisyonlarda üretilen kendiliğinden yerleşen betonların tiksotropisinin kalıp basıncına etkisini araştırmaktır. Bu kapsamda üç farklı su/bağlayıcı oranı (0.35, 0.42, 0.50), üç farklı yayılma çapı (550 mm, 650 mm, 720 mm) ve üç farklı iri agrega/toplam agrega (İA/TA) oranı (0.45, 0.50, 0.53) kullanılarak toplam 15 farklı KYB karışımı üretilmiştir.

Deneyel çalışmanın birinci bölümünde 15 farklı KYB karışımının karışım oranları belirlenip deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. Deneme dökümlerinden sonra bütün KYB karışımlarının reolojik parametrelerini ve tiksotropik özelliklerini belirlemek için beton reometresi ile deneyler yapılmış, aynı anda betonların kalıp basıncını belirlemek için deneyler gerçekleştirilmiştir.

İkinci bölümde ise 15 farklı KYB'nin taze beton deneyleri yapılmıştır. Yayılma çapı deneyi, T_{50} süresi tayini, V-hunisi deneyi, L-kutusu deneyi yapılan taze beton deneyleridir. Ayrıca karışımların birim hacim ağırlıkları ve beton sıcaklıkları belirlenmiştir. Daha sonra bu karışımlar 100 mm ayrıtlı küp kalıplara yerleştirilmiş, 7 ve 28 günlük basınç ile yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)

2.1 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tanımı ve Tarihçesi

Beton; suya karşı direnci, taze halde kolay şekil verilebilmesi ve bileşenlerinin ucuz ve doğada bol bulunması nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesi konumundadır. Beton teknolojisinin gelişmesiyle yüksek dayanımlı betonlar üretilmekte ve yoğun donatılı betonarme elemanlarla yüksek dayanım ve sünekliğe sahip yapılar yapılmaktadır. Ancak sık donatılı betonarme elemanlarda taze beton karışımının donatıların arasını doldurabilmesi için yüksek akışkanlıkta olması gerekmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri geliştirilip betonda kullanılmaya başlanmıştır. Böylece betonun çökme (slump) değeri 200–250 mm’ye ulaşmıştır. Ancak bu çökme değerlerinde betonda ayrışma ve terleme riski ortaya çıkmakta ve iri agregâ ile çimento hamuru arasında zayıf ara yüzey oluşumuyla betonun hem mekanik hem de durabilite özellikleri olumsuz etkilenmektedir. 1980’li yılların başında beton üzerine çalışan araştırmacılar “yüksek işlenebilirlikte bir beton nasıl yapılır?” sorusuna yanıt bulmak için çalışmalarını sürdürmüş ve Türkçe’de en yaygın adıyla “Kendiliğinden Yerleşen Beton” olarak adlandırılan bir beton üretmeye başlamışlardır (Mehta ve Monteiro, 2006).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), yoğun donatılı elemanlarda bile yerleştirme ve sıkıştırma işleminde vibratöre gerek kalmayan, kendi ağırlığı ile akıp kalıba doldurabilen ve tamamen sıkışabilen çok akıcı kıvamlı özel bir betondur (EFNARC, 2005). Kendiliğinden yerleşen beton, İngilizce’de “Self-Compacting Concrete”, “Self-Consolidating Concrete” ve “Self-Levelling Concrete” şeklinde isimlendirilmektedir. Türkçe kaynaklarda “Kendiliğinden Sıkışan Beton” olarak da adlandırılmaktadır.

1980’li yılların başında betonarme yapıların durabilite problemleri Japonya’da önemli bir konu haline gelmiştir. Kalıcı bir beton üretmek için betonu kalıplara yerleştirebilecek yetenekli işçilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, Japon yapı sektöründe zamanla yetenekli işçi sayısındaki azalma, kaliteli bina yapımını da azaltmıştır. Bu duruma bir çözüm olması amacıyla Profesör Hajime Okamura, 1986 yılında vibrasyona gerek kalmadan kendi ağırlığıyla kalıplara yerleşebilen bir beton tasarlamıştır. İlerleyen yıllarda Tokyo Üniversitesi’nden Ozawa ve Maekawa, kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliği üzerine çalışmalar yürütmüştür (Okamura ve Ouchi, 1999).

1980 yılında İtalya Trieste’de San Marco Tersanesi’nin yapımında su altında 40000 m³ beton dökülmüştür. Kullanılan beton, reoplastik beton olarak adlandırılmıştır. Yüksek akışkanlığa ve kohezifliğe sahip bir beton olması için naftalin sülfonat tipi süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, yüksek oranda kum ve yüksek dozajda çimento (400 kg/m³) kullanılmıştır (Collepari vd., 1989). Karışım oranları ve taze hal özellikleri açısından reoplastik beton, kendiliğinden yerleşen betona benzer özellikler göstermektedir.

Kendiliğinden yerleşen beton ile ilgili ilk makale, 1989 yılında düzenlenen 2. Doğu Asya ve Pasifik Konferansı’nda (EASEC-2) Ozawa tarafından sunulmuştur. 1992 yılında İstanbul’da düzenlenen Uluslararası CANMET & ACI Konferansı’nda Ozawa’nın sunumu, kendiliğinden yerleşen beton kavramının dünyada yayılmasını hızlandırmıştır. 1997 yılında RILEM tarafından kendiliğinden yerleşen beton konusunda çalışan bir komite kurulmuştur (Okamura ve Ouchi, 1999).

EFNARC Komitesi 2002 yılında kendiliğinden yerleşen beton ile ilgili bir teknik şartname yayınlamıştır. 2005 yılında bu şartname güncellenmiştir. Şartnamede, KYB’nin tasarımı, taze hal deney yöntemleri, mekanik ve durabilite özellikleri konusunda öneriler yer almaktadır (Shah vd., 2007).

ABD’de bulunan ACBM Merkezi’nin (Center for Advanced Cement-Based Materials) 2003 yılında inşaat yüklenicileri ve malzeme tedarikçileri arasında yaptığı bir araştırmada, KYB kullanımında ne gibi sorunlar yaşandığı sorulmuş ve aşağıda belirtilen soruların yanıtları belirsiz kalmıştır.

1. KYB özelliklerinin değişkenliğini hangi koşullar etkilemektedir ve bu konu nasıl kontrol altına alınabilir?
2. KYB’nin kalıplara yaptığı basıncın yüksek değerlere ulaşmasını engellemek için tasarımda hangi konulara dikkat edilmelidir?
3. Kalıp basıncı ile KYB reolojisi arasında nasıl bir ilişki vardır?
4. Şantiye ortamında KYB’nin taze hal özelliklerini incelemek için hangi yöntemler gerekmektedir?

KYB’nin prefabrik sektöründe kullanımının yıllar içinde artmasına rağmen, KYB’nin şantiyede yerinde döküm beton olarak kullanımı, kalıplara yapacağı basıncın tam olarak bilinmemesinden dolayı, kısıtlı kalmıştır. Son yıllarda birçok

araştırmacı KYB'nin kalıp basıncına etkisini incelemek amacıyla çalışmaya başlamıştır (Shah vd., 2009).

2.2 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Uygulama Alanları

Beton teknolojisinin gelişmesi ve geleneksel betonun bazı durumlarda istenilen performansı gerçekleştirememesi üzerine ortaya çıkan kendiliğinden yerleşen beton, günümüzde çok geniş kullanım alanına sahiptir. KYB, geleneksel betona göre çok akıcı kıvamlı bir beton olduğu için özellikle yoğun donatılı ve dar kesitli elemanlarda tercih edilmektedir. Son yıllarda kimyasal katkıların ucuzlaması, KYB'nin kullanım alanının yaygınlaşmasına neden olmuştur.

1988 yılında Japonya'da KYB prototipi geliştirilmesiyle, yapılarda KYB kullanımı artmıştır. Bu tip betonların kullanımının ana nedenleri inşaat süresini kısaltması, özellikle vibrasyon işleminin uygulanmasının zor olduğu yerlerde betonun tamamen sıkışması ve prefabrik üretimlerde vibrasyondan dolayı oluşan gürültü kirliliğini ortadan kaldırması şeklinde özetlenebilir. 1998 yılında Japonya'da hazır beton üretiminin %0.1'ini, üretilen beton elemanların ise %0.5'ini KYB oluşturmuştur (Ozawa ve Ouchi, 1999).

1998 yılında Japonya'da açılan dünyanın en uzun asma köprüsünün (Akashi-Kaikyo Köprüsü) ankraj blokları KYB ile gerçekleştirilmiştir. Şantiye yakınına kurulan beton santralinde üretilen KYB, borular yardımıyla şantiye sahasına pompalanmıştır. 2.5 senede yapılması planlanan köprü ankrajları, KYB kullanımıyla 2 senede tamamlanmıştır (Hayakawa vd., 1993).

Tünel inşaatı uygulamalarında betonu kalıplara doldurma işleminde vibratör kullanılması, yoğun donatı bulunması ve ağır çalışma koşulları nedeniyle çok zor ya da imkânsız hale gelmektedir. Tünel inşaatlarında KYB kullanımıyla vibrasyona gerek kalmadan döküm işlemi yapılabilir. Ayrıca vibrasyon kullanılmaması zaman ve maliyet açısından da avantaj sağlamaktadır. Bunlara ilaveten, KYB'nin kalıplara iyi yerleşmesiyle betonun ömrü uzamakta ve bakım onarım maliyeti azalmaktadır (Botte vd., 1999).

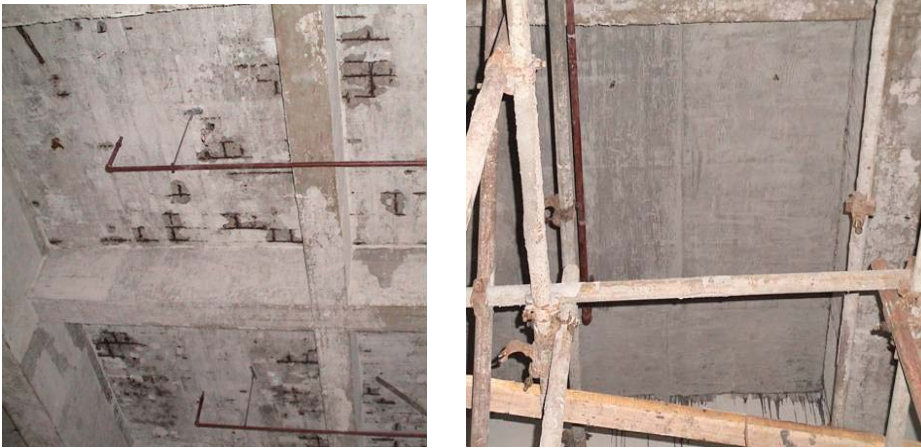
Prefabrik sektöründe sürekli beton üretimi gerçekleştirildiğinden betonların kalıplara doldurulması ve yerleştirilmesi esnasında çok fazla işçi çalışması gerekmektedir. Prefabrik uygulamalarında KYB kullanımı ile, insan gücünün daha verimli kullanılması sağlanmakta, vibrasyon ekipmanı ve kalıp bakımı gibi

masraflar azalmakta, gürültü kirliliği ortadan kalkmakta ve betonu kalıba yerleştirme zamanı azaldığı için daha fazla döküm yapılabilmektedir (Steigenberger, 1999). KYB sağladığı avantajlar nedeniyle, yerinde döküm uygulamalara göre prefabrik sektöründe çok daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de KYB’nin prefabrik elemanlarda uygulama örneği görülmektedir.



Şekil 2.1 Prefabrik sektöründe KYB uygulaması

Güçlendirme uygulamalarında genişletilen kesit küçük ve donatılar çok sık olmaktadır. Bu yüzden betonun yeni kesite tamamen yerleştirilmesi oldukça zorlaşır. KYB yüksek akışkanlık kabiliyeti ve ayrılmaya karşı direnci sayesinde güçlendirme uygulamalarında kullanılabilir. KYB kullanımıyla betonun mekanik ve durabilite özellikleri de iyileşmektedir (Luo ve Zheng, 2005). Şekil 2.2’de KYB ile döşemenin güçlendirme uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.2 Döşemede KYB ile güçlendirme uygulaması

2.3 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantaj ve Dezavantajları

KYB'nin geleneksel betona göre birçok üstün ve zayıf yönü bulunmaktadır. Bu üstün ve zayıf yönler KYB'nin tercih edilip edilmemesinde önemli rol oynamaktadır.

2.3.1 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları

KYB kullanımının ekonomik ve teknik açıdan birçok yararı vardır. KYB'nin kalıplara yerleşmesi sırasında sıkıştırma işlemi yapılmadığından vibratöre ihtiyaç duyulmamaktadır. Yüzey perdelama işlemi de normal betona göre daha kolay yapılabildiği için işçilik masrafları düşmektedir. İşçilik masraflarının yanı sıra vibratör kullanılmaması ve betonun kolay pompalanması döküm işlemindeki süreyi kısaltmakta ve yapım süresi de azalmaktadır. Vibratör ihtiyacının ortadan kalkmasıyla beton dökümü sırasında oluşan gürültünün azalması, özellikle kapalı ortamda çalışılan prefabrik sektöründe ve kent içi şantiyelerde büyük avantaj sağlamaktadır (Khayat vd., 1999).

KYB, taze hal özellikleri açısından normal betona göre uygulamada pek çok kolaylık sağlamaktadır. KYB'nin akış ve kendiliğinden yayılma özeliği, normal betonla dökümün mümkün olmadığı yerlerde oldukça avantaj sağlamaktadır. Ayrıca KYB'nin kohezif özeliği tünel kaplamalarının yapımında büyük kolaylık sunmaktadır. KYB'nin taşınma ve pompalanma işlemi normal betona göre çok daha kolay olmaktadır. KYB akışkan kıvamda olduğu için hem pompanın tıkanma riski azalmakta hem de pompanın içinde düşük sürtünmeler olmakta ve beton yüksek hızda pompalanmaktadır (Cussigh, 2007).

KYB'nin hamur hacminin fazla olması, normal betona göre daha kaliteli beton yüzeyler elde edilmesini sağlamaktadır. Düzgün yüzeyler gerektiren yapılarda KYB kullanımı oldukça avantajlıdır (Cussigh, 2007).

KYB'nin taze beton özelliklerinde sağladığı avantajların yanında sertleşmiş beton özelliklerinde de avantajlar sağladığı görülmüştür. Uygulamada elde edilen tecrübe, KYB'nin normal betona kıyasla daha geçirimsiz bir beton olduğunu ve aynı su/çimento oranında normal betona göre daha yüksek dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. Mekanik özelliklerde olduğu gibi betonun durabilitesi de KYB kullanımıyla gelişmektedir. Aynı su/çimento oranındaki betonlardan KYB, yüksek geçirimsizliğe sahip olduğu için klor iyon geçirgenliği daha düşük

çıkılmaktadır (Skarendahl, 2005). Kendiliğinden yerleşen betonun mekanik ve durabilite özellikleri ilerleyen bölümlerde daha detaylı incelenecektir.

2.3.2 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları

Kendiliğinden yerleşen beton üzerine yapılan çalışmalar ve uygulamaların son yıllarda oldukça artmasına rağmen uluslar arası düzeyde KYB ile ilgili standartların olmaması ve kullanılan malzemelere göre KYB özelliklerinde değişkenlik oluşması, kalite kontrolünün zorlaşmasına yol açmaktadır. Bu da KYB'nin en büyük dezavantajlarından bir tanesini oluşturmaktadır.

KYB'nin dezavantajlarından bir tanesi de malzeme maliyetidir. Normal betona göre KYB daha pahalı bir betondur. Kullanılan kimyasal katkıları ve yüksek oranda çimento, KYB'nin maliyetini artırmaktadır. Ancak, çimentonun yerine endüstri atığı niteliğindeki mineral katkıların kullanılması KYB maliyetini azaltmaktadır (Şahmaran vd., 2006).

Betonda büzülme, çoğunlukla betonun hamur hacmine bağlı bir olaydır. Normal betona göre hamur hacmi daha fazla olan KYB karışımlarında büzülme de daha fazla olmaktadır. Betonda büzülme çatlağı riskini azaltmak için yapılacak en önemli tedbir büzülme hızını azaltmaktır. Uygun kür koşulu ve betonun yavaş kurummasını sağlamak, büzülme hızını azaltmak için yapılabilecek yararlı önlemlerdendir (Loser ve Leeman, 2008). Normal betona kıyasla KYB üretiminde kuruma büzülmesini önlemek için kür koşullarını iyileştirmek gerekmektedir.

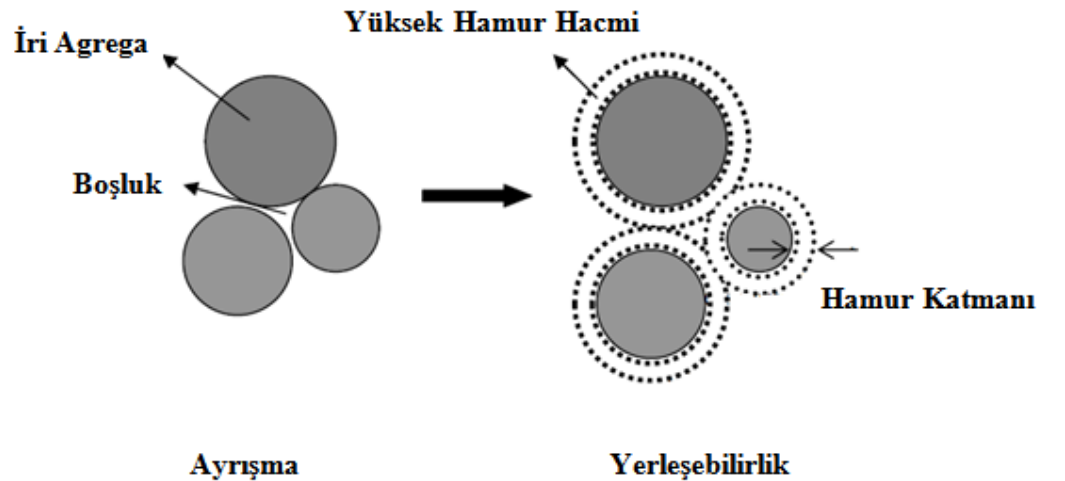
Çok akıcı kıvamdaki KYB'nin işlenebilirlik açısından birçok avantajı bulunmaktadır. Ancak KYB'nin reolojik özelliklerinden olan düşük eşik kayma gerilmesi nedeniyle kalıplara yaptığı yanal basınç normal betona göre çok daha fazla olmaktadır. Bunun sonucunda daha güçlü kalıplar hazırlama ihtiyacı doğmakta ve kalıp maliyetleri artmaktadır. Ayrıca betonun kalıba yaptığı yanal basıncın süresi normal betona göre daha uzun sürmektedir. Maksimum yanal basıncı ve etki süresini azaltmak için zamanla oluşan yanal basınçtaki değişiklikleri anlamak gerekmektedir. Son yıllarda yanal kalıp basıncı üzerine yapılan çalışmalar, tiksotropik davranışın kalıp basıncı üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir (Kwon vd., 2011).

2.4 Kendiliğinden Yerleşen Beton Tasarımı

2.4.1 KYB'nin Kendiliğinden Yerleşebilirlik Mekanizması

KYB tasarımı yapmadan önce KYB'nin kendiliğinden yerleşebilirlik mekanizmasını bilmek iyi bir tasarım yapmak için oldukça önemlidir. Okamura ve Ozawa (1995), KYB bileşenlerini harç ve iri agrega olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Kendiliğinden yerleşebilirlik için hem betonun harç fazının yüksek akıcılıkta olması hem de harç fazının iri agrega ile ayrıışmadan donatılar arasından akması ve kalıplara yerleşmesi gerekmektedir. Bu mekanizmanın gerçekleşmesi için üç temel kriter belirlenmiştir. Bunlar; agrega miktarının sınırlanması, su/toz oranının düşük olması ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmasıdır.

Kennedy (1940) tarafından ortaya atılan teoride betonun işlenebilirliği için iri agregalar arasındaki boşlukları hamur fazıyla doldurma ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Birçok araştırmacı KYB tasarımında bu teoriyi esas alarak çalışmalar yapmıştır. KYB'de kendiliğinden yerleşebilirliği sağlamak için agregalar arasındaki sürtünmeyi minimuma indirmek gerekmektedir. Bunun için de betonda yüksek hamur hacmi sağlanmalıdır (Oh vd., 1999). Yüksek hamur hacmi teorisinin mekanizması Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Sol tarafta hamur hacmi fazla olmadığı zaman iri agrega arasında boşluk kalarak ayrışma meydana gelmektedir. Sağ tarafta ise yüksek hamur hacmi sayesinde iri agregalar birbirleri üzerinden hareket ederek yerleşebilirliği sağlamaktadır.



Şekil 2.3 Yüksek hamur hacmi teorisi

2.4.2 KYB Tasarımında Kullanılan Malzeme

EFNARC Komitesi (2005), EN 206-1 standardında normal beton için belirlenen betonda kullanılacak malzemenin KYB için de kullanılabileceğini belirtmiştir. Ancak KYB'nin kalite kontrolünün zor olması nedeniyle her üretimde istikrarı sağlamak ve üniform bir beton üretebilmek için malzeme seçimine daha fazla dikkat etmek gereklidir. Bu açıdan malzeme seçiminde bazı sınırlamalar getirilmiştir.

2.4.2.1 Çimento

EN 197-1 standardına uygun bütün çimentolar KYB üretiminde kullanılabilir. KYB'nin kullanım amacına göre doğru çimento tipinin seçilmesi gerekmektedir (EFNARC, 2005).

2.4.2.2 Agregalar

Agregaların nem içeriği, su emme oranı, granülometri gibi özelliklerinin kaliteli bir KYB üretimi için denetlenmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılan agregaların kaynağının değişmesi beton özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabilir. Agreganın şekli ve tane büyüklüğü dağılımı boşluk içeriğini etkilediğinden beton tasarımında dikkat edilmesi gereken bir durumdur.

En büyük agrega çapının belirlenmesinde donatılar arasındaki uzaklık en önemli parametrelerdendir. KYB'nin donatılar arası geçiş özeliğinin iyi olabilmesi için tasarımında en büyük tane çapına dikkat edilmesi gerekmektedir. Genellikle en büyük tane çapı 12–20 mm arasında sınırlandırılmaktadır. İri agreganın tane büyüklüğü dağılımı ve şekli doğrudan KYB'nin akış ve geçiş özelliklerine, ayrıca hamur ihtiyacına etki etmektedir. Yuvarlak agregaların kullanılması içsel sürtünmeyi azaltacağından betonun akışının artmasına neden olmaktadır.

KYB tasarımında ince agreganın taze beton özelliklerine etkisi iri agreganınkinden çok daha fazladır. Tane boyutu 0.125 mm'den küçük agrega betonun hamur kısmına dâhil edilmekte ve hesaplamalarda toz malzeme olarak hesaba katılmaktadır. KYB'de hamur içeriğinin fazla olması kum taneciklerinin arasındaki sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olmaktadır ancak iyi bir granülometri elde etmek çok daha önemlidir. Bazı KYB tasarımlarında optimum granülometriyi

sağlamak için farklı kumların birleştirilmesiyle oluşan karışık kum kullanılmakta ve bu da hamur ihtiyacını azaltmaktadır (EFNARC, 2005).

2.4.2.3 Mineral Katkılar

Uçucu kül, KYB için kohezyonunu arttırması ve su ihtiyacını azaltması nedeniyle etkin bir mineral katkıdır. Ancak, yüksek oranda uçucu kül kullanımı yüksek kohezyon oluşturacağından KYB'nin akış özelliklerini sınırlandırabilmektedir.

Çok ince ve küresel şekilli olan silis dumanı, uçucu külün gösterdiği benzer etkiyi göstermekte ve KYB için iyi bir kohezyon sağlamaktadır. Ayrıca silis dumanının ayrışmaya karşı da olumlu etkisi bulunmaktadır. Silis dumanı betonda terleme riskini de azaltmaktadır. Ancak bunun sonucu olarak hızlı bir şekilde beton yüzeyin kabuklanması problemini ortaya çıkarmaktadır. Beton yüzeyindeki bu kabuklanma soğuk derz ve yüzey kusurları oluşturmaktadır.

Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) betonda düşük hidrasyon ısıyı sağlamaktadır. GYFC, çimento üretimi sırasında ya da betonu karıştırma esnasında betona eklenebilmektedir. GYFC'nin yüksek oranda kullanımı KYB'nin yavaş priz almasına ve ayrışma riskinin artmasına neden olmaktadır (EFNARC, 2005).

2.4.2.4 Kimyasal Katkılar

Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları KYB için temel bileşenlerden bir tanesi konumundadır. Kullanılacak akışkanlaştırıcı katkının seçimi bağlayıcı maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre yapılmalıdır. Süperakışkanlaştırıcı katkıları betonda hem su azaltıcı etkiye hem de akıcılığa neden olmaktadır. Ayrıca taşıma ve yerleştirme için gereken zaman sürecinde taze betonun özelliklerini korumayı sağlamaktadır.

Viskozite düzenleyici kimyasal katkıları, KYB'nin akış özelliklerinde önemli değişiklikler olmayacak şekilde kohezyonunu düzenleyen katkılardır. Viskozite düzenleyici katkıları, beton bileşenlerinde çevresel koşullar sonucu oluşabilecek değişikliklerin etkisini azaltmak için kullanılmaktadır. Ancak bu katkıları kötü bir KYB tasarımını iyileştirmek için kullanılmamalı ve beton bileşenlerinin seçimine özen gösterilmelidir (EFNARC, 2005).

2.4.3 KYB'nin Tasarım Yöntemleri

Okamura ve Ozawa (1995) KYB için bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemin ana ilkesi, betondaki ince ve iri agrega miktarı belirli sınırlar arasında sabitlenecek şekilde su/toz oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dozajının ayarlanması ile KYB'nin akıcılık ve kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerinin elde edilmesidir. Normal betonun karışım tasarımında dayanım ihtiyacına göre öncelikle su/çimento oranı belirlenmektedir. KYB'de ise su/toz oranı öncelikle belirlenmesi gereken parametredir. Çünkü kendiliğinden yerleşebilirlik için bu oran çok önemlidir. Bu yöntemde iri agrega oranı katı hacminin %50'si, ince agrega oranı ise harç hacminin %40'ı olacak şekilde sabitlenmiştir. Su/toz oranı toz malzemenin özelliklerine göre hacimce 0.9 ila 1.0 arasında değişmektedir. Bu yöntemde KYB'nin karışım oranları deneme karışımı yapılmadan tam olarak belirlenemez. Öncelikle karar verilen bir karışım oranı ile deneme karışımı hazırlanır. Bu karışım üzerinde KYB için özel taze beton deneyleri (yayılma çapı deneyi, V kutusu deneyi vb.) yapılır. Bu deneylerin sonucunda su/toz oranı veya akışkanlaştırıcı katkı dozajında düzeltmeye gidilir ve uygun değerlere ulaşılmaya çalışılır.

CBI yöntemi, İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsü tarafından önerilen bir KYB tasarım yöntemidir. Bu yöntemde, betonun donatılar arasından bloke olmadan geçebilmesi için gerekli minimum hamur hacmi belirlenir. Minimum hamur hacmi, agrega özelliklerinden boşluk içeriği ve yapı koşullarından bloke olma kriterine (sık donatı, dar kesit vb.) bağlıdır. Öncelikle bu yöntemde minimum hamur hacmi ve agreganın en büyük tane boyutu belirlenir. Deneme karışımlarından elde edilen sonuçlara göre akışkanlaştırıcı katkı dozajı ve su/toz oranında düzenleme yapılır (Billberg, 1999).

EFNARC Komitesi (2005), karışım oranı için bazı temel ilkeleri şu şekilde açıklamıştır: KYB'de istenilen akıcılık ve viskoziteyi sağlamak için su/toz oranını belirli bir oranda sınırlamak ve mutlaka akışkanlaştırıcı katkı eklemek gerekmektedir. Hedeflenen taze beton özelliklerine ulaşmak için bu iki unsurun kontrol edilmesi çok önemlidir. İri agregaların tamamen harç tabakası ile kaplanabilmesi için iri agrega/ince agrega oranının azaltılması gerekmektedir. Bu da donatılar arasında geçerken agregaların birbirine kenetlenmesini azaltır ve betonun geçiş yeteneğini artırır. Betonun hamur fazının agregaları sürükleyebilmesi için hamur hacminin agreganın boşluk hacminden fazla olması gerekmektedir. Bu sayede agreganın hamur fazıyla birlikte akması sağlanmış olur.

KYB tasarımı için malzeme miktarlarında belirli sınırlamalar getirmiştir. Malzeme miktarları için belirlenen sınır değerler Tablo 2.1’de belirtilmiştir.

Tablo 2.1 KYB için kullanılan malzemelerin sınır değerleri (EFNARC, 2005)

Bileşen	Ağırlıkça Miktar	Hacimce Miktar
Toz malzeme	380–600 kg/m ³	-
Hamur	-	300–380 L/m ³
Su	150–210 kg/m ³	150–210 L/m ³
İri agreg	750–1000 kg/m ³	270–360 L/m ³
İnce Agreg	Diğer bileşenlerin hacmine göre dengelenir.	
Su/Toz oranı (Hacimce)	-	0.85–1.1

Yukarıda belirtilen sınır değerler dikkate alınarak öncelikle laboratuvar da deneme karışımı yapılması gerekmektedir. İstenilen karışımın elde edilememesi durumunda çimento/toz oranı ve su/toz oranında düzeltmeye gidilebilir. Farklı tip mineral katkı ya da toz malzeme kullanılabilir. İnce agreg oranı ve akışkanlaştırıcı katkı dozajı değiştirilebilir. Tam olarak istenilen karışım elde edilinceye kadar kullanılan malzemelerin tipinde veya oranlarında düzenleme yapılmalıdır.

2.5 KYB’nin Taze Beton Özellikleri ve Deney Yöntemleri

Taze KYB’de aranan özellikler, doldurma yeteneği, geçiş yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve betonda kıvamın korunması şeklinde sıralanabilir. Bu özelliklerin betonun taşınma ve yerleştirme sırasında da devam etmesi istenmektedir.

5.1 KYB'nin Doldurma Yeteneği

Doldurma yeteneđi, KYB'nin řekil deđiřtirebilme özeliđini yansıtmaktadır. Bir bařka deyiřle, taze betonun kendi ađırlı altında řekil deđiřtirme yeteneđidir. KYB'nin doldurma yeteneđinin olabilmesi için betonun akıřı sırasında ayrıřmaya neden olmaması gerekir. Bu özeliđi sađlamak için akıřkanlařtırıcı katkı maddesi ve dūřuk iri agreg a miktarı ile katı taneler (iri agreg a, kum, toz malzeme) arasındaki sūrtūnmeyi azaltmak gerekmektedir. Betonda fazla su miktarı, taneler arası sūrtūnmeyi azaltacađından doldurma yeteneđini arttırır, ancak, viskoziteyi dūřūreceđinden betonda ayrıřmaya neden olabilir. Ayrıca betonda yūsek su miktarı sertleřmiř beton özelliklerini de olumsuz etkiler. Akıřkanlařtırıcı katkı maddesi, hem imento taneleri yayılarak taneler arası sūrtūnmeyi azaltmakta hem de betona akıř özeliđi sađlamaktadır. Akıřkanlařtırıcı katkı maddelerinin su azaltıcı etkisiyle sertleřmiř beton özelliklerinde de olumlu etkiler gōrūlmektedir. Agreganın gradasyonu da KYB'nin doldurma yeteneđini etkilemektedir. İyi gradasyona sahip bir betonda katı parçacıklar arasındaki sūrtūnme azaltmakta ve betonun doldurma yeteneđi iyileřmektedir (Khayat, 1999).

2.5.1.1 Doldurma Yeteneğini Őlen Deney Yōntemleri

Yayılma apı ve T_{50} Sūresi Deneyi

Yayılma apı deneyi normal betonda uygulanan ōkme deneyi gibi yapılmaktadır. Ancak ōkme hunisini doldururken KYB'de sıkıştırma yapılmamaktadır. Yayılma apı deneyi betonun akıcılık özeliğini belirlemek için yapılmaktadır (EFNARC, 2005).

Bouzoubaā ve Lachemi (2001), Őncelikle akışkanlaştırıcı katkı dozajının daha sonra su/toz oranı ve uçucu kūl ikamesinin yayılma çapının değişmesinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Sonebi (2004), su/bağlayıcı oranının KYB'nin yayılma çapı üzerinde Őnemli bir etkisi olduğunu rapor etmiştir.

T_{50} sūresi deneyi ise yayılma çapı deneyi sırasında KYB'nin yayılmasının 50 cm'ye ulaşma zamanını Őlen bir deney yōntemidir. Bu deneyde betonun akış hızı belirlenmektedir. Bu da betonun viskozitesinin belirlenmesinde Őnemli bir parametredir (EFNARC, 2005).

V-Hunisi Deneyi

V-hunisi deneyi KYB'nin viskozitesi ve akıcılık özelliklerini belirlemek için yapılan bir deneydir. Ayrıca deneyde daralan kesitte akış süresinin ve betonun bloke olup olmamasının gözlemi yapılmaktadır. V-hunisi deneyinin 5 dakika gecikmeli olarak da yapılmakta, aradaki süre farkından KYB'nin ayrışma direnci hakkında fikir sahibi olunmaktadır (Bartos, 2005).

Orimet Deneyi

Orimet deneyi, V-hunisi deneyi ile aynı prensipte olup, betonun akıcılık özelliklerini belirlemek ve sahada hızlı değerlendirme yapmak için geliştirilen bir deney yöntemidir. KYB üzerinde gerçekleştirilen diğer taze beton deneylerine göre çok daha pratik bir deneydir (Bartos, 2005).

2.5.2 KYB'nin Geçiş Yeteneği

KYB'nin sık donatılı ve dar kesitli elemanlar arasından bloke olmadan geçerek kalıplara yerleşmesi gerekmektedir. Bloke olma durumu iri agregalar arasında veya agrega ile donatı arasında meydana gelmektedir. Bu nedenle, betonun bloke olması iri agreganın boyutu, şekli ve miktarına bağlıdır (Okamura, 1997). İri agrega özelliklerinin yanında betonun geçiş yeteneği için önemli faktörlerden birisi de betonun hamur hacmidir (Billberg vd., 2004).

2.5.2.1 Geçiş Yeteneğini Ölçen Deney Yöntemleri

L-Kutusu Deneyi

L-kutusu deneyi, KYB'nin donatı çubuklarının arasından geçiş yeteneğini belirlemek için yapılan bir deneydir. Geçiş yeteneği için iki parametre ölçülmektedir. Birincisi taze betonun donatılar arasından geçiş oranı, ikincisi ise betonun donatılar arasından geçiş hızıdır. Geçiş hızının belirlenmesiyle betonun viskozitesi hakkında da bilgi sahibi olunur. Ayrıca geçiş esnasında bloke olma ve betonun ayrışma riski de gözlemlenmiş olmaktadır (Bartos, 2005).

J-Halkası Deneyi

Bu deney, donatı çubuklarının taze betonun serbest hareketi üzerinde etkisini belirlemek için tasarlanmıştır. 16–18 adet donatı çubuğu ile 300 mm çapında bir halka oluşturacak şekilde hazırlanan bir aparat yayılma tablasının üstüne konulup yayılma deneyi yapılmaktadır. KYB'nin donatılar arasından geçiş yeteneği halkanın ortasında biriken betonun miktarına göre belirlenmektedir (Bartos, 2005).

2.5.3 KYB'nin Ayırışmaya Karşı Direnci

Beton içinde katı taneciklerden ayrı serbestçe hareket eden su betonda oluşan ayırışmanın ana nedenidir. Ayırışma betonu kalıplara doldururken oluyorsa buna dinamik ayırışma denilmektedir. Kalıplara yerleştirmeden sonra iri agregalar kalıbın altına çöküyorsa ve serbest su yukarı doğru çıkarak terlemeye neden oluyorsa bu gibi ayırışmaya statik ayırışma denilmektedir. Terleme sonucu oluşan su beton yüzeyinde ya da iri agrega veya donatı altlarında su cepleri oluşturarak betonun ara yüzeyini zayıflatmakta ve betonun hem mekanik hem de durabilite özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Liu, 2009).

2.5.3.1 Ayırışmaya Karşı Direnci Ölçen Deney Yöntemleri

Penetrasyon Deneyi

Bu deney, KYB'nin statik ayırışma direncini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Şantiye ortamında kolaylıkla uygulanabilmekte ve sonuçlar hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Belirli bir ağırlığa sahip piston betonun üzerinden bırakılarak kendi ağırlığında dalma miktarı ölçülmektedir. Dalma miktarı betonun ayırışmaya karşı direnci hakkında fikir vermektedir (Bartos, 2005)

Görünür Stabilite İndeksi

Bu yöntem, yayılma deneyinden sonra betonda oluşan terleme, hava kabarcığı, agrega kümelenmesi gibi ayırışma belirtilerinin gözlemlenmesine dayanır. Gözlem sonucu çok kötü, kötü, normal ve iyi olmak üzere dört seviyeden biri seçilerek KYB'nin ayırışmaya karşı direnci belirlenmiş olur. Khayat vd. (2004), stabilite açısından bu deney yönteminin diğer deneylerle bağlantılı olarak değerlendirilmesini önermişlerdir.

2.5.4 KYB’de Kıvamın Korunması

KYB’nin taze beton özellikleri, karıştırma işleminden 60-90 dakika sonra da ilk karıştırma sırasındaki gibi olmalıdır (RILEM TC 174 SCC, 2000). Taze betonda kıvam kaybı toz malzeme ile akışkanlaştırıcı katkı maddesi arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir (Khayat, 1999). Çimentonun kimyasal kompozisyonu, su/toz oranı, akışkanlaştırıcı katkı maddesinin kimyasal yapısı KYB’nin zaman içinde kıvam değişimini etkilemektedir. Ayrıca polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı katkıları zaman içinde kıvam kaybını azaltabilmektedir (Yamada vd., 2000).

2.6 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mekanik Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Normal betonda vibrasyon sonucu iri agregalar yüzeyinde biriken su, boşluklu bir matris ve zayıf ara yüzey oluşumuna neden olmaktadır. Bu da betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. KYB’de ise vibrasyon uygulanmaması ve toz malzeme eklenmesi daha yoğun bir çimento matrisi oluşmasına neden olmaktadır ve iri agregalar ile çimento hamuru arasındaki ara yüzeyin iyileşmesini sağlamaktadır (Tragardh, 2000).

Aynı su/toz oranında KYB’nin dayanım gelişmesi ve basınç dayanımı normal betonunkine benzerdir (Domone, 2007; RILEM TC 174 SCC, 2000).

KYB’nin 28 günlük basınç dayanımı, karışım oranı ve kullanılan malzemeye göre 20 MPa ila 100 MPa arasında değişmektedir. Bu da KYB’nin çok çeşitli alanlarda kullanılabilecek bir beton olduğunu göstermektedir (Domone, 2006).

Aynı su/toz oranında KYB’nin yarmada çekme dayanımı normal betonunkine göre daha yüksektir. Çekme/basınç dayanımı oranı ise KYB’de normal betona göre %10–30 arasında daha yüksektir (Gibbs ve Zhu, 1999). Büyük bir olasılıkla KYB’de çimento hamuru ile agregalar arasındaki ara yüzeyin özelliklerinin daha iyi olması bu sonuçlara neden olmaktadır.

KYB'nin normal betona göre iri agrega miktarının düşük olması ve hamur hacminin fazla olmasından dolayı elastisite modülünün de düşük olması beklenmektedir. Domone (2007), düşük basınç dayanımına sahip KYB'lerde normal betona göre elastisite modülünde %40'a varan bir azalma olduğunu belirtmiştir. Yüksek basınç dayanımına (90–100 MPa) sahip betonlarda ise bu oran %5'e düşmektedir.

Beton ile donatı arasındaki aderans, betonarme yapılar için önemli bir unsurdur. Beton ile donatı arasında oluşan ara yüzey yapısının donatı ile beton arasında oluşan aderansa doğrudan etkisi olmaktadır. Bu ara yüzeyin zayıf olması betonun terleme ve ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Betonda oluşan terleme sonucu donatının alt kısmında donatı boyunca su cepleri oluşmaktadır. KYB'de oluşacak terleme ve ayrışma, normal betona göre daha az olduğu için aderansın da daha iyi olması beklenmektedir. Yapılan birçok çalışmada bu kanıtlanmıştır (Valcuende ve Para, 2009).

KYB'nin yüksek hamur hacminden dolayı, normal betona kıyasla büzülmesinin daha fazla olması beklenmektedir. Çimentonun yerine kireçtaşı tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi katkıların kullanılması betonda oluşacak büzülmeyi azaltmaktadır. Sünme ve sünme katsayısı, büzülmeğe göre hamur hacminden çok daha az etkilenebilir. Sünme üzerine yapılan çalışmalarda sünme değerlerinin normal beton ve KYB'de birbirine yakın çıktığı gözlenmiştir. KYB'de kireçtaşı tozunun kullanılmasının sünmeyi arttırdığı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımının ise sünmeyi azalttığı belirtilmiştir (Leeman vd., 2011).

2.7 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Durabilite Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen betonun durabilite özellikleri konusunda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Betonun geçirimsizliği, durabilite açısından oldukça önemli bir özelliktir. KYB'nin geçirimsizlik özelliği konusunda yapılan çalışmalarda normal betona göre geçirimsizliğin daha az olduğu saptanmıştır. KYB yüksek toz malzeme içeriği, düşük su/toz oranı ve mikro yapısının daha gelişmiş olması nedeniyle normal betona göre daha geçirimsiz bir betondur (Zhu ve Bartos, 2003).

KYB'nin donma-çözünme direnci normal betona göre daha düşük olmaktadır. Khayat (2000), KYB'nin donma çözünme direnci ile ilgili yaptığı

Çalışmada hava sürükleyici katkı miktarının artmasıyla donma çözünme direncinin arttığını belirtmiştir. Ayrıca KYB karışımalarında silis dumanı kullanılması donma çözünme direncinde olumlu etki yapmıştır. Hatta hava sürükleyici kullanılmadan düşük su/imento oranında oluşturulan silis dumanlı karışımarda donma çözünme direncinin arttığı gözlenmiştir. Çimento ağırlığınca %3 silis dumanı ilavesi ve imento ağırlığınca %20 uçucu kül ikamesiyle oluşturulan KYB karışımının donma çözünme direncinin normal betona göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür.

Mekanik ve durabilite özelikleri açısından KYB ile normal betonu kıyaslarken genellikle aynı su/imento oranında ya da aynı dayanım sınıflarında karşılaştırma yapılmaktadır. Ancak bu karşılaştırma yapılırken KYB ile normal betonda kullanılan malzemelerin karışım oranlarının farklı olması dikkate alınmalıdır. KYB tasarımı yaparken taze beton özelikleri çok daha önemli olmaktadır. KYB'nin istenilen taze hal özeliklerine sahip olması için oluşturulan oranlar çoğu zaman betonun mekanik ve durabilite özeliklerine de olumlu etkisi olmaktadır. Örneğin, toz malzeme ve mineral katkı kullanımı KYB'nin birçok durabilite özeliğini iyileştirmektedir.

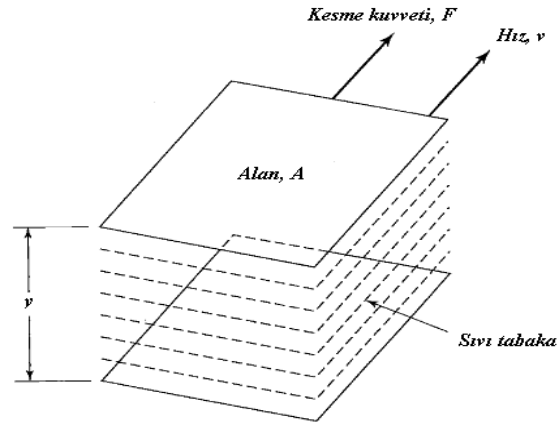
3. KYB'NİN REOLOJİK VE TİKSOTROPİK ÖZELİKLERİ

3.1 Reolojinin Tanımı ve Taze Beton Reolojisi

Reoloji, malzemelerin gerilme altında zamana bağlı olarak şekil değişimini inceleyen bir bilim dalıdır. Genellikle, katıların kayma gerilmesi altında deformasyonunu ve sıvıların akış özelliklerini belirlemek için reolojiden faydalanılır. Bir malzemenin deformasyon miktarı, malzemenin maruz kaldığı gerilmenin şiddetine, uygulama hızı ve doğrultusuna ve malzemenin viskozitesine bağlıdır. Viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Baradan, 2003).

Ana bileşenleri su, çimento ve agrega olan beton kompozit bir malzemedir. Taze beton, viskoz bir sıvı (çimento hamuru) içinde katı parçacıkların (agrega) bulunduğu yoğun bir süspansiyon olarak kabul edilmektedir. Çimento hamuru, su içinde dağılan çimento tanelerinden oluşan ve homojen olmayan bir akışkandır (Ferraris, 1999).

Viskoz bir sıvıya Şekil 3.1'de olduğu gibi F kesme kuvveti uygulanması sonucu, sıvıda bir hız gradyanı oluşur. Kesme kuvveti ile hız gradyanı arasındaki orantılılık faktörüne viskozite denilmektedir. Hız gradyanı, deformasyon oluşma hızına ($\dot{\gamma}$) eşittir. Denklem (3.1)'deki eşitliğe uygun davranış gösteren sıvılar Newton sıvısı olarak kabul edilmektedir (Bartos, 1992).



Şekil 3.1 Viskoz akış için Newton modeli

$$F/A = \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

Burada, η : viskozite, $\dot{\gamma}$: deformasyon hızı = dy/dv , τ : kayma gerilmesi, F : kesme kuvveti, A : kuvvete paralel düzlemsel alandır.

Taze beton gibi yoğun süspansiyonlar için kullanılan çoğu denklemde kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmaktadır. Denklemlerde viskozitenin sabit olduğu kabul edilmektedir. Tablo 3.1 ve 3.2’de yoğun süspansiyonlar için en çok kullanılan denklemler verilmiştir. Tablo 3.1’de verilen denklemler çimento hamurunun reolojisini açıklayan denklemlerdir. Bu denklemlerin taze beton için kullanılamamasının nedeni, hamura eklenen agreganın, süspansiyonun akış özelliklerini karmaşıklaştırmasıdır. Tablo 3.2’de verilen denklemler ise taze beton için kullanılmaktadır (Struble ve Sun, 1994).

Tablo 3.1 Farklı süspansiyonların viskozite denklemleri (Struble ve Sun, 1994)

Denklem Adı	Denklem	Açıklama
Einstein	$\eta = \eta_0 (1 + [\eta]\Phi)$	Parçacıklar arası etkileşim yok. Seyreltik süspansiyon durumu mevcut
Roscoe	$\eta = \eta_0 (1 - 1.35\Phi)^K$	Parçacıklar arası etkileşim mevcut.

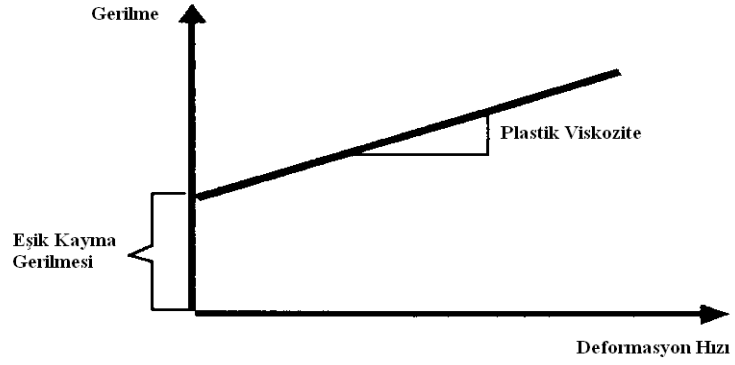
η : süspansiyonun viskozitesi, η_0 : sıvının viskozitesi, Φ : katı maddenin hacimsel oranı, K : sabit

Tablo 3.2 Kayma gerilmesi ve deformasyon hızı ilişkisi denklemleri (Struble ve Sun, 1994)

Denklem Adı	Denklem
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel ve Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Power	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$, Newtonyen sıvısı; $n < 1$, Kayma incelmesi; $n > 1$, Kayma kalınlaşması

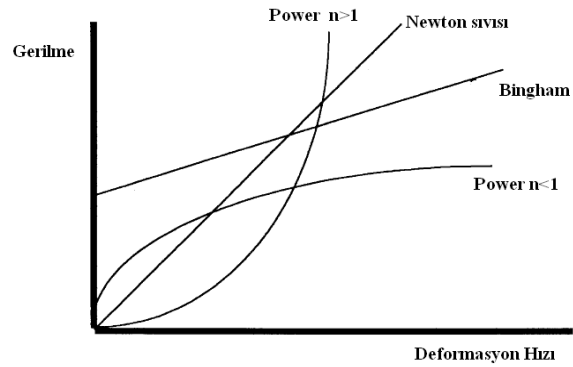
τ : kayma gerilmesi, τ_0 : eşik kayma gerilmesi, η : viskozite, $\dot{\gamma}$: deformasyon oluşma hızı, K = sabit

Akışkanlar için eşik kayma gerilmesi, kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğinde doğrunun gerilme eksenini kestiği noktadır. Bu doğrunun eğimi ise plastik viskoziteye eşittir. Bu doğrunun ifade ettiği akışkanlar Bingham sıvısı olarak adlandırmakta olup Şekil 3.2’de bu ilişki görülmektedir (Ferraris, 1999).



Şekil 3.2 Bingham modeli için gerilme-deformasyon hızı ilişkisi

Şekil 3.3'te Tablo 3.2'de verilen bazı denklemlerin gerilme-deformasyon hızı grafiğindeki eğrileri görülmektedir. Power kanununa uyan sıvılar psödoplastik davranış gösteren sıvılar olarak kabul edilmektedir. Tablo 3.1 ve 3.2'de verilen denklemlerden çıkacak sonuç, reolojinin tanımlanması için Newton sıvısı hariç bütün denklemlerde en az iki parametreye ihtiyaç duyulmasıdır (Ferraris, 1999).



Şekil 3.3 Farklı süspansiyonlar için reolojik modeller

Taze beton için en çok kullanılan denklemler Bingham ve Herschel-Bulkey denklemleridir. Herschel-Bulkey denklemi üç parametrelidir ve eşik kayma gerilmesi dışında diğer ikisinin fiziksel anlamı yoktur, plastik viskozite ise sabit değildir. Bu denklem KYB'nin reolojik davranışını tanımlamak için en uygun denklemdir. Ancak, reolojik parametrelerin ölçülebilir olması nedeniyle Bingham modeli taze betonun akış özelliklerini belirlemek için en yaygın modeldir (De Larrard vd., 1998).

Betonun akış kabiliyetini ifade edebilmek amacıyla reolojik parametrelerin yanı sıra daha uygulanabilir nitelikte olan işlenebilirlik, akıcılık ve kohezyon

kavramları da kullanılabilmektedir. Ancak bu tanımlar kişiye göre değişebilmektedir. Amerikan Beton Enstitüsü'nün işlenebilirlik tanımı şu şekildedir: İşlenebilirlik, taze haldeki betonun veya harcın ne kadar kolaylıkla ve homojenliği bozulmadan karıştırılacağını, yerleştirileceğini, sıkıştırılacağını ve perdahlanacağını belirleyen özelliktir. İngiliz Standartları Enstitüsü ise işlenebilirliği, taze haldeki beton, harç vb. malzemenin ne kadar kolaylıkla yerleştirileceğini ve sıkıştırılacağını belirleyen özellik olarak tanımlamaktadır. Japon Beton Mühendisleri Birliği'nin işlenebilirlik tanımı ise Amerikan Beton Enstitüsü'nün tanımına benzemekte olup, ek olarak betonu oluşturan bileşenlerin ayrışmaya karşı direncinin de işlenebilirliğin bir ölçütü olduğu ifade edilmiştir (Ferraris, 1999).

Kosmatka vd. (1994), taze beton reolojisinden söz ederken işlenebilirlik, kıvam ve plastisite kavramlarının tanımlarını sunmuştur. İşlenebilirlik, betonun ne kadar kolay veya zorlukla yerleşebildiği, sıkışabildiği ve perdahlanabildiğinin bir ölçütüdür. Kıvam, taze betonun akma kabiliyetidir. Plastisite ise betonun kolaylıkla kalıplara yerleşmesini tanımlamaktadır. Richtie (1962), betonun akış davranışını farklı etkilerle bağlantı kurarak ifade etmeye çalışmıştır. Bunlar, betonda terleme, ayrışma ve betonun yoğunluğudur. Taze beton özellikleri stabilite, sıkışabilirlik ve akış kabiliyeti (mobilité) olarak düşünülmüştür. Betonun stabilitesi betonda terleme ve ayrışmayla, sıkışabilirliği betonun yoğunluğuyla, akışkanlığı ise betonun içsel sürtünmesi ve viskozitesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu bağlantılar her durumda kurulamamaktadır. Örneğin, yüksek viskoziteli bir beton düşük işlenebilirlikte olabilir. Tattersall (1976), işlenebilirlik ölçümlerini üç gruba ayırmıştır: İlk grup, nitel yollarla yapılan, miktar belirleme gerektirmeden reolojik özellikleri genel olarak tanımlamaktadır. Örnek olarak akıcılık, kıvam, yerleşebilirlik gibi kavramlar bu gruptadır. İkinci grup, basit nicel tanımlamalarla yapılan işlenebilirlik deney yöntemlerini (Çökme deneyi, Sıkıştırma Faktörü Deneyi, Ve-Be Deneyi vb.) kapsamaktadır. Üçüncü grup ise, temel reolojik parametrelerin (eşik kayma gerilmesi, plastik viskozite) beton reometresi ile belirlenmesidir.

Betonun akış özelliklerini ölçmekten başka, beton bileşenlerinin özelliklerinden ve karışım oranlarından akış özelliklerinin tahmini de reolojiyi ilgilendirmektedir. Ancak bu tahminin modellenmesi ile ilgili hiçbir girişim başarılı olamamıştır. Bunun en büyük nedeni ise betonu oluşturan bileşenlerin çok geniş bir tane boyutu aralığında olmasıdır. Ayrıca betonun akış özelliklerini

etkileyen faktörler, betonun reolojisini etkileyen faktörlerden çok daha fazladır (Ferraris, 1999).

Taze beton reolojisini etkileyen faktörlerin başında betonu oluşturan malzemelerin özellikleri ve karışım oranları gelmektedir. Çimento içeriği ve özellikleri, su içeriği, mineral katkının tipi ile miktarı, kimyasal katkının tipi ve dozajı, agreganın tipi, gradasyonu ve şekli taze betonun reolojisini etkileyen özelliklerdir. Aynı karışım oranlarıyla oluşturulan betonların akış özellikleri birbirinden farklı olabilir. Bunun nedeni, taze betonu karıştırma işlemlerinin birbirinden farklı olabilmesidir. Farklı karıştırıcıda karıştırma, malzemelerin farklı sırada karıştırıcıya atılması ve karıştırma süresi betonun akış özelliklerini etkilemektedir. Ayrıca hem ortam sıcaklığı hem de beton sıcaklığı taze betonun reolojik özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Taze betonun karıştırma işleminden sonra taşıma, yerleştirme ve perdelama işleminde oluşacak farklılıklar betonun akış özelliklerini etkilemektedir. Betonun reolojik özelliklerinde zamana bağlı değişimler gözlenmektedir. Taze betonda zaman içinde kıvam kaybı yaşanmaktadır. Bu da betonun kalıplara yerleşmesini zorlaştırmaktadır (Ferraris ve Gaidis, 2001).

3.2 Taze Betonda Reolojik Parametreleri Ölçme Yöntemleri

Taze betonun reolojik özelliklerini belirlemek için yapılan deney yöntemleri, deney sonucunda tek ya da iki parametre belirleyen deneyler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

3.2.1 Tek Parametre Belirleyen Deney Yöntemleri

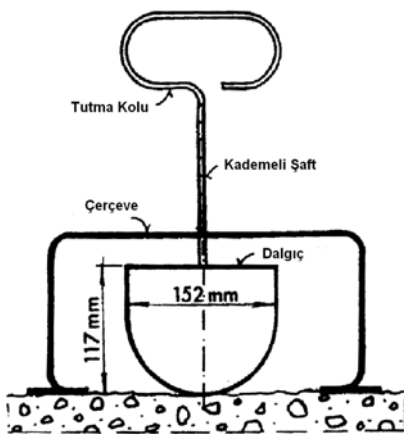
Bu başlık altındaki deney yöntemleri reoloji parametrelerinden sadece bir tanesini belirlemektedir. Tek parametrenin belirlenmesiyle diğer reolojik parametre ile ilişki kurulması imkansızdır. Bu deney yöntemleriyle reolojik parametrenin kesin değeri bulunamaz. Sadece yapılan deney sonuçları arasında karşılaştırma yapılabilir. Çökme deneyi, penetrasyon deneyi, Ve-Be deneyi, viskometre tüpü deneyi, LCL deneyi ve Orimet deneyi tek parametre belirleyen deney yöntemlerindendir. Bu yöntemlerin bazıları henüz standartlaşmamış olup, deneyler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Deney yöntemlerinin detayları aşağıda verilmiştir (Ferraris, 1999).

3.2.1.1 Çökme Deneyi

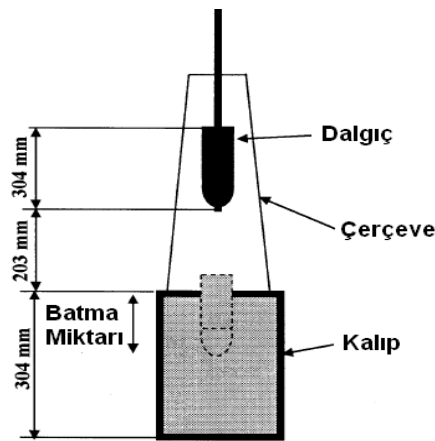
Bu deney yöntemi betonda kolaylıkla uygulanabildiği için yaygınca kullanılmaktadır. Deneyde betonun kendi ağırlığı ile bir gerilme oluşmaktadır. Taze beton ancak eşik kayma gerilmesini aşıyorsa çökebilir ya da hareket edebilir. Oluşan gerilme eşik kayma gerilmesinin altında olduğunda çökme ya da hareket durur. Bu yüzden çökme testi eşik kayma gerilmesi ile ilişkilendirilebilir. Yapılan bazı çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çökme deneyi temsil edilmeye çalışılmıştır. Beton karışımındaki değişiklikleri belirlemeye yardımcı olduğundan çökme deneyi kalite kontrol aracı olarak kullanılmaktadır. ASTM C147 standardında çökme deneyinden bahsedilmektedir ve birçok ülkede bu deney standartlarda mevcuttur (Ferraris, 1999).

3.2.1.2 Penetrasyon Çubuğu Deneyi

Bu deneyin amacı, deneyde kullanılan penetrasyon topu/çubuğunun betona batma miktarı ile betonun eşik kayma gerilmesinin belirlenmesidir. Deneyde kullanılan penetrasyon topu/çubuğunun batma esnasında uyguladığı gerilmenin betonun eşik kayma gerilmesinden büyük ya da küçük olduğu belirlenir. Çökme deneyinde olduğu gibi kullanımı oldukça kolay olup sahada kalite kontrol amaçlı uygulanacak bir deneydir. Bu deney betonun priz süresini belirlemek için de nadiren kullanılmaktadır. Şekil 3.4 ve 3.5'te iki farklı penetrasyon aparatı gösterilmiştir. Şekil 3.4'te görülen Kelly Ball aparatı ASTM C 360 standardında yer almaktadır.



Şekil 3.4 Kelly Ball penetrasyon çubuğu



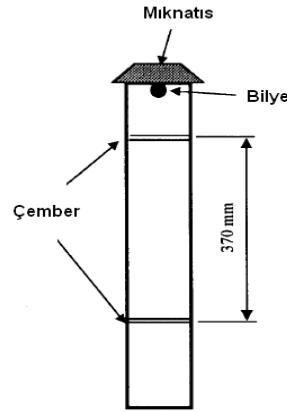
Şekil 3.5 Alman penetrasyon çubuğu

3.2.1.3 Ve-Be Deneyi

Ve-Be süresi tayini, taze betonun titreşim sırasında şekil değiştirme kapasitesini ölçen bir deneydir. Genellikle, koyu kıvama sahip betonlar için kullanılan bu deneyde, daha geniş bir kap içindeki standart çökme konisi kaldırıldıktan sonra titreşim uygulanarak kabın tam olarak beton ile doldurulma süresi şeffaf bir plâka üzerinden gözlemlenir ve bu süre ölçülür. Titreşim yüzünden taze betonun eşik kayma gerilmesi aşılır ve beton akmaya başlar. Bu yüzden, bu deney plastik viskozite ile ilişkilendirilebilir. Ancak plastik viskozitenin belirlenmesi için sadece bu deney yöntemi yeterli olmayabilir (Ferraris, 1999).

3.2.1.4 Viskometre Tüpü Deneyi

Bu deney yönteminde, 60 mm çapında ve 800 mm uzunluğundaki bir tüpün içine deney yapılacak malzeme doldurulur. Farklı çaptaki üç çelik bilye tüpün içinde serbest düşüşe bırakılır. Çelik bilyelerin, uzaklığı 370 mm olan iki nokta arasından geçiş hızı ölçülür. Daha sonra Stoke denklemi ile malzemenin viskozitesi hesaplanır. Bu deney yöntemi çimento hamurunun viskozitesini ölçmek için kullanılır. Betondaki iri agregaların bilyelerin geçişini engelleyeceği için bu deney betonda önerilmez. Ancak tüpün çapı iri agreganın boyutuna göre düzenlenirse deney taze betona uygulanabilir (Ferraris, 1999).



Şekil 3.6 Viskometre tüpü aparatı

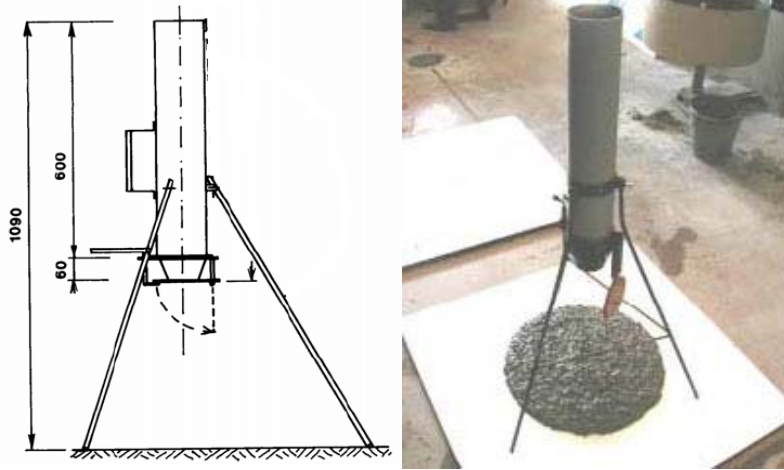
3.2.1.5 LCL Deneyi

LCL deneyi Fransa'da geliştirilen bir deney yöntemidir. Ve-Be deneyi gibi betonda belirli bir şekil değiştirmenin ne kadar sürede olduğu bulunmaktadır.

Ve-be süresi deneyi ile arasındaki en önemli fark kullanılan deney aparatının geometrisidir. Beton prizmatik bir kalıba doldurulur ve kalıbın kapağı açılarak alttaki kalıba titreşim uygulanır. Betonun tamamen akışı için geçen süre işlenebilirliğin bir ölçütüdür. Betona titreşim uygulandığında eşik kayma gerilmesini aştığı için bu deneyde taze betonun plastik viskozitesi belirlenebilir. Eğer beton akmaya başlayana kadar titreşimin genliği yavaş bir şekilde arttırılırsa, eşik kayma gerilmesi hakkında da fikir sahibi olunabilir (Ferraris, 1999).

3.2.1.6 Orimet Deneyi

Orimet aparatı 600 mm uzunluğunda ve 70–80 mm çapında bir tüpten oluşmaktadır. Tüpün alt kısmında bir kapak bulunmaktadır. Tüp tamamen taze beton ile doldurulur ve alttaki kapak açılarak betonun tüpten akış süresi kaydedilir. Bu deney V-hunisi deneyi ile benzerlikler göstermektedir. Orimet aparatı genellikle su altında dökülen betonlarda kullanılır. Deneyde kullanılacak betonun iri agregâ çapına göre deney düzeneğinin çapı ayarlanmaktadır. Taze betonun akış süresi ile plastik viskozite ilişkilendirilebilir. Şekil 3.7’de Orimet aparatı gösterilmiştir (Ferraris, 1999).



Şekil 3.7 Orimet deney düzeneği

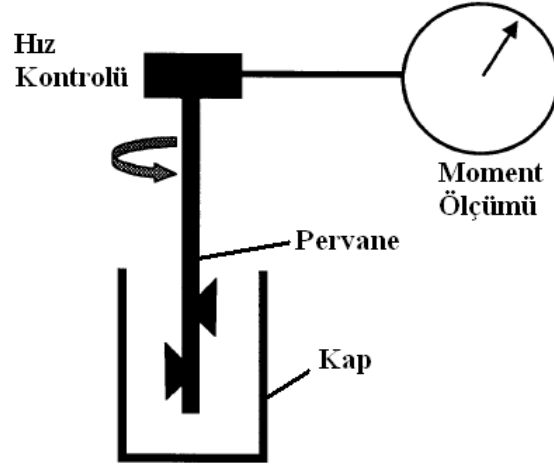
3.2.2 İki Parametre Belirleyen Deney Yöntemleri

İki parametre belirleyen deney yöntemleri betonun reolojik parametrelerinden eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin beraber belirlenmesi için tasarlanmıştır. Ancak bu deney yöntemlerinde bu iki parametrenin gerçek değerleri tam olarak ölçülememektedir. Bunun da ana

nedenleri, taze betonda iri agreganın etkisi, ayrışma eğilimi ve zaman etkisidir. Reolojik parametrelerin belirlenmesinde iri agreganın etkisini ortadan kaldırmak için oldukça büyük boyutlarda deney düzenekleri oluşturulmalıdır. Bu da pratikte pek mümkün değildir. İki parametre belirleyen deney yöntemlerinden Tattersall deneyi, BTREOM reometresi ve modifiye slump deneyleri hakkında aşağıda bilgi verilmiştir.

3.2.2.1 Tattersall Deneyi

Bu deney yöntemi betonun akış özelliklerini belirlemek için kullanılan ilk ve en çok bilinen yöntemdir. Bir kap içine taze beton konularak pervane yardımıyla karıştırılır ve pervanenin dönüş sırasındaki direnci yani tork (moment) ölçülür (Şekil 3.8). Pervanenin dönüş hızı artırılarak hız-moment eğrisi kaydedilir. Ortaya çıkan eğri doğrusal kabul edilerek hızın sıfır olduğu noktadaki moment değeri ekstrapolasyon yoluyla eşik kayma gerilmesi değeri ile ilişkilendirilir. Doğrunun eğimi de plastik viskozite olarak kabul edilir .



Şekil 3.8 Tattersall reometresi

Tattersall'ın bu deney düzeneği ilerleyen yıllarda başka araştırmacılar [Gjorv (1988), Wallevik (1988) ve Beaupré (1994)] tarafından geliştirilmiştir. Bilgisayar kullanılarak moment ve dönme hızı değerleri otomatik olarak kaydedilmektedir. Bu deney aletleri BML viskometresi ya da IBB reometresi olarak adlandırılmaktadır. Bu iki deney aletinin pervanesi farklı geometrilerdedir. Her iki alette de dönme hızına karşılık gelen tork değerleri kaydedilir ve doğrusal bir ilişki sağlanır. Doğrunun eğimi (h), dönme hızının sıfır olduğu noktadaki gerilme ise (g) olur. h ve g belirli katsayılarla plastik viskozite ve eşik kayma

gerilmesine çevrilir. Ölçümlerde deformasyon hızının pervanenin hızı ile orantılı olduğu kabul edilmektedir. Tattersall, (3.2) ve (3.3) nolu denklemler yardımıyla eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin hesaplanacağını belirtmiştir.

$$T = (G/K)\tau_0 + (G\eta)N \quad (3.2)$$

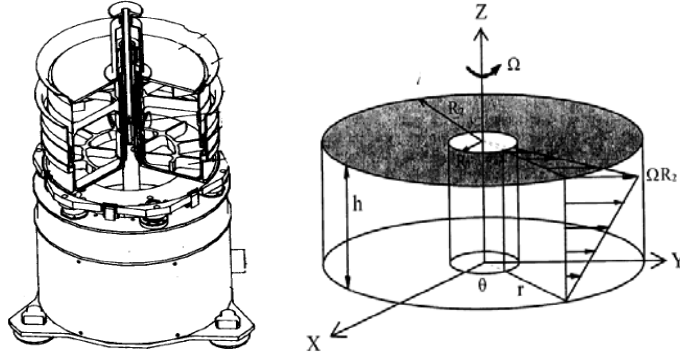
$$\tau_0 = g/(G/K); \eta = h/G \quad (3.3)$$

Burada, T : tork, G : sabit (Newton sıvısıyla kalibrasyonu yapılır), K : sabit (Newton sıvısı olmayan bir sıvıyla kalibrasyon yapılır), N : pervanenin hızı, τ_0 : eşik kayma gerilmesi, η : plastik viskozitedir

Bu deney aleti için G ve K sabitlerini bulmak, kap içindeki beton akışının karmaşıklığı ve doğrusal olmayışı nedeniyle neredeyse imkânsızdır. Ayrıca aletin kalibrasyonu için standart bir malzeme bulunmamaktadır (Tattersall, 1976).

3.2.2.2 BTREOM Reometresi

BTREOM reometresi De Larrard vd. (1995) tarafından Fransa'da geliştirilmiştir. Deney aletinin alt kısmı betonun konulduğu kaptan, üst kısmı ise dönen çarkın bulunduğu bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 BTREOM reometresi

Taze betonun reolojik parametreleri Bingham modeline uygun olarak aşağıda belirtilen denklemlerle doğrudan hesaplanabilmektedir. BTREOM reometresinin geometresinden dolayı akış gradyanı doğrusal olmaktadır ve kayma gerilmesi ile deformasyon hızı analitik yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Denklem (3.4) ve (3.5)'te eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite hesaplamaları verilmiştir.

$$\tau_0 = \frac{3 \Gamma_0}{2 \pi (R_2^3 - R_1^3)} \quad (3.4)$$

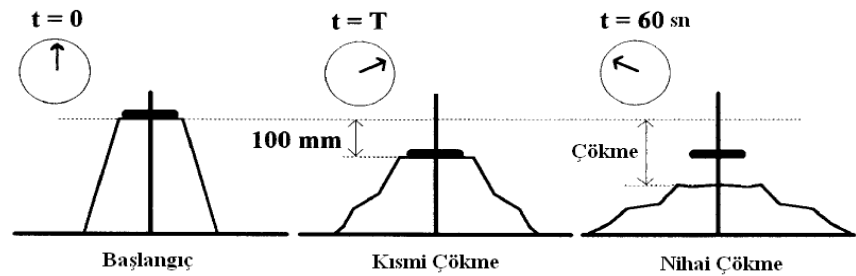
$$\eta = \frac{2 h (\partial \Gamma / \partial \Omega)}{\pi (R_2^4 - R_1^4)} \quad (3.5)$$

Burada, τ_0 : eşik kayma gerilmesi, η : plastik viskozite, Γ : moment, Ω : dönen çarkın açısal hızı, R_1 ve R_2 : iç ve dış silindir çapı, h : gerilme uygulanan kısmın yüksekliği, Γ_0 : başlangıç ordinatı, $\partial \Gamma / \partial \Omega$: doğrunun eğimidir.

Bu deney aleti kayma gerilmesi ve deformasyon hızı verilerini toplamaktadır. Yapılan ölçümler sonucu betonun Bingham modeli gibi davrandığı doğrulanmıştır. Özellikle çok akıcı kıvamlı betonlarda 0.5 s^{-1} ile 0.8 s^{-1} arasındaki deformasyon hızları bu modele uygun sonuçlar vermektedir. BTREOM reometresi plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi belirli sınırlarda kalan betonlar için uygundur. Örneğin, yüksek plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesine sahip betonlarda karıştırma yapılamamaktadır. De Larrard vd. (1998), daha yüksek deformasyon hızlarında betonun iri taneli süspansiyon gibi davrandığını ve Herschel-Bulkley denklemine uyduğunu belirtmiştir.

3.2.2.3 Modifiye Slump Deneyi

Bu deney standart çökme deneyinin modifiye edilmiş halidir. Standart çökme deneyinin sadece betonun eşik kayma gerilmesi ile ilişkili olduğundan önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Modifiye slump deneyinde betonun çökme hızı da belirlenerek betonun viskozitesi ile ilişkilendirilmektedir. Şekil 3.10'da deneyin şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Modifiye slump deneyinin şematik gösterimi

Taze betonun üzerine bir plaka konularak çökme deneyi sırasında betonun ilk 100 mm çökme süresi ölçülmektedir. Ayrıca deney sonunda (t : 60 sn) betonun nihai çökme değeri bulunmaktadır. Bu iki değer kullanılarak aşağıda verilen formüller yardımıyla reolojik parametreler belirlenmektedir (Ferraris, 1999).

$$\tau_0 = (\rho/347) * (300 - S) + 212 \quad (3.6)$$

Burada, τ_0 : eşik kayma gerilmesi (Pa), ρ : betonun yoğunluğu (kg/m^3), S : nihai çökme değeri (mm)

$$\mu = \rho T 1.08 \times 10^{-3} (S - 175) \quad 200 \text{ mm} < S < 260 \text{ mm} \quad (3.7)$$

$$\mu = 25 \times 10^{-3} \rho T \quad S < 200 \text{ mm} \quad (3.8)$$

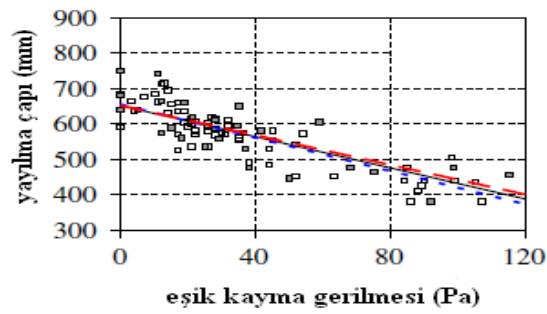
Burada, μ : viskozite (Pa.s), T : 100 mm çökme süresidir.

3.3 KYB'nin Reolojik Özellikleri

KYB normal betona göre çok daha akıcı kıvamlı bir beton olduğu için akış özellikleri de normal betona göre daha fazla önem kazanmaktadır. Taze betonun reolojik parametrelerini belirleyen ve bir önceki bölümde açıklanan deney yöntemlerinin tamamı KYB için uygulanamaz. Beton reometreleri KYB'nin reolojik parametrelerini belirlemek için uygundur ancak pratikte bu deneyi yapmak neredeyse imkansızdır. Bu yüzden daha basit ve uygulanabilir olan yayılma çapı deneyi, T_{50} süresi deneyi, V-hunisi deneyi gibi işlenebilirlik deneyleri KYB'nin reolojik özelliklerini belirlemede kullanılmaktadır. KYB'nin reolojik özellikleri, karışım oranı, akışkanlaştırıcı katkı miktarı, karıştırma süresi, dış etkenler gibi birçok parametre ile değişebilmektedir.

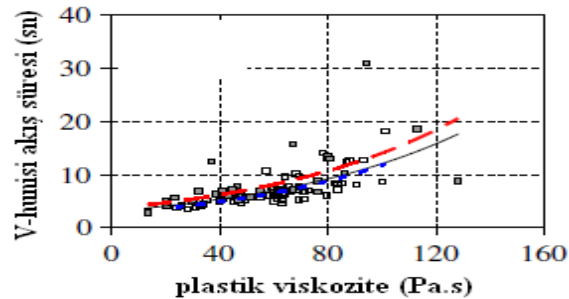
Zerbino vd. (2009) yaptığı çalışmada farklı KYB karışımlarının reolojik parametrelerini BML viskometresi, yayılma çapı deneyi ve V-hunisi deneyi ile karşılaştırmıştır. Aynı karışımlarda yayılma çapı ile eşik kayma gerilmesi ve akış süresi ile de plastik viskozite değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca her bir KYB karışımının eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitesinin değer aralıkları belirlenmiştir. KYB karışımlarının eşik kayma gerilmesi sıfıra yakındır. Nielsson ve Wallevik (2003) KYB'nin eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri için sınır değerler belirlemiştir. Bu sınır değerler eşik kayma gerilmesi için 0-60 Pa ve plastik viskozite için 20-120 Pa.s'dir. Yapılan çalışmada akıcılığı

düşük ve bloklanmaya karşı direnci az olan karışımlarda eşik kayma gerilmesi 40 Pa civarı, plastik viskozite ise 40-100 Pa.s arasında çıkmıştır. Öte yandan düşük eşik kayma gerilmesi ve plastik viskoziteye sahip KYB'lerin saha uygulamalarında yeterli performans gösterdiği görülmüştür. Şekil 3.11'de iki farklı KYB karışımının eşik kayma gerilmesi ile yayılma çapı arasındaki ilişki görülmektedir. Yazarlar, her iki karışım için kurulan ilişkide korelasyon katsayısı (R) değerini 0.88 hesaplamıştır. Yayılma çapının artışıyla akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı artmakta ve çimento taneciklerinin topaklaşması engellendiğinden akmayı başlatacak minimum kuvvet azaltmakta ve taze betonun hareketi kolaylaşmaktadır.



Şekil 3.11 Eşik kayma gerilmesi-yayılma çapı ilişkisi (Zerbino vd., 2009)

Şekil 3.12'de iki farklı KYB karışımının akış süresi ile plastik viskozitesi arasındaki ilişki görülmektedir. Yazarlar her iki karışım için kurulan ilişkide R değerini 0.85 ve 0.83 olarak hesaplamıştır. Akış süresini etkileyen bir parametre de taze betonda bulunan iri agrega miktarıdır. İri agrega miktarının artması betonda bloklanma riskini arttırmaktadır. Bu da betonun akış süresi ile plastik viskozitesinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.12 Plastik viskozite-akış süresi ilişkisi (Zerbino vd., 2009)

İşlenebilirlik deneylerinin betonun reolojik parametrelerini belirlemede sınırlı kaldığı belirtilmektedir. Ancak, yayılma çapı deneyi ile V-hunisi deneyinin beraber değerlendirilmesi reolojik parametrelerin mertebelerinin bilinmesini sağlamaktadır.

KYB karışımlarında çimento dozajının artmasıyla eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite azalmaktadır. Bu durum iki nedenle açıklanabilir. Birinci nedeni, çimento miktarının azalmasıyla iri agrega hacmi artar ve agregalar arasındaki sürtünme daha fazla olacağından viskozite artar. İkinci nedeni ise, aynı yayılma çapına sahip farklı çimento dozajlı betonlarda düşük çimento miktarı için daha çok akışkanlaştırıcı kullanılır. Karışıma yüksek oranda akışkanlaştırıcı eklenmesiyle akışkanlaştırıcının bir kısmı çözeltide kalır ve böylece betonun viskozitesinin artmasına neden olur (Assaad, 2004).

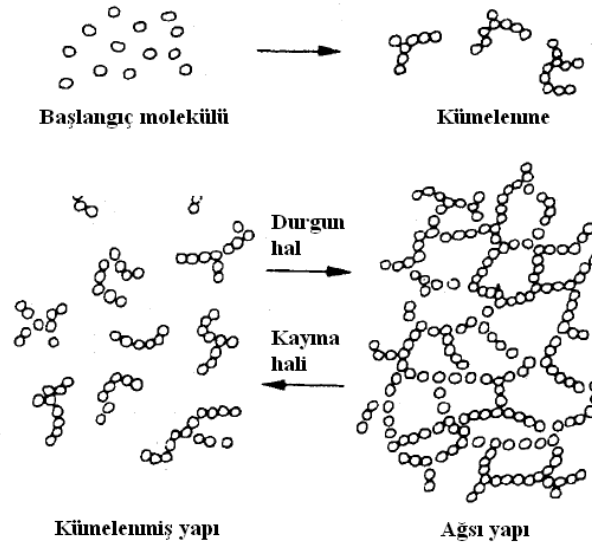
Aynı yayılma çapına sahip betonlarda su/çimento oranının artmasıyla eşik kayma gerilmesi artar, plastik viskozite değeri azalır. Betondaki fazla su miktarı akış direncini ve viskoziteyi azaltmaktadır. Ayrıca su/çimento oranının artmasıyla taze betonda katı madde miktarı azalır ve bu da viskozitenin azalmasına neden olur (Assaad, 2004).

3.4 Tiksotropinin Tanımı

Schaleck vd. (1923) (Barnes'den, 1997) sulu demir oksit bileşiğinin dikkat çekici bir özeliğini bulmuştur. Oksitin hafif bir titreşim ile tamamen sıvı gibi davrandığı, durgun halde ise katılaştığı gözlenmiştir. Freundlich, 1935 yılında alüminyum hidroksit jelinin akış özellikleri ile ilgili "Thixotropie" adlı bir kitap yayınlamıştır. Freundlich ve arkadaşları kısa süre içinde tiksotropik etkinin çimento hamuru, nişasta kolası ve jelatin jeli gibi değişik sistemlerde de ortaya çıktığını bulmuştur. Şekil 3.13'te bir malzemenin molekül yapısının durgun halden hareketli hale ve hareketli halden durgun hale geçişi gösterilmiştir.

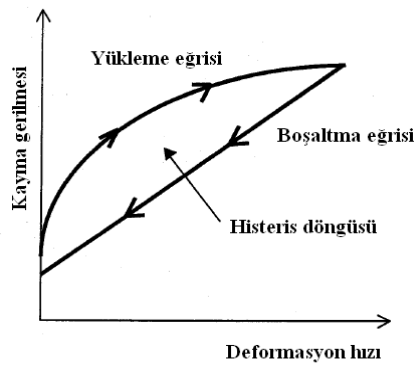
Literatürde tiksotropinin birçok tanımı bulunmaktadır. Pryce-Jones (1943) (Barnes'den, 1997) tiksotropinin tanımını şu şekilde yapmıştır: Tiksotropi, malzemenin durgun halde viskozitesinin artması, sabit bir kayma gerilmesi etkisinde ise viskozitesinin azalmasıdır. Yakın zamanda ise Barnes vd. (1989) tiksotropiyi şu şekilde tanımlamıştır: Tiksotropi, malzemenin sabit bir kayma gerilmesi veya deformasyon hızı etkisinde zaman içinde viskozitesinin azalması,

kayma gerilmesi veya deformasyon hızının etkisi ortadan kalktığında ise malzemenin eski durumuna kademeli olarak geri dönmesidir.



3.13 Molekül yapının tiksotropik davranışı

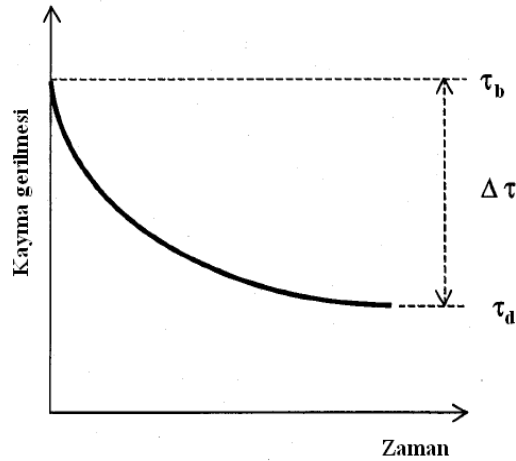
Çimento hamurunun tiksotropisini karakterize etmek için “Histeris döngüsü” olarak adlandırılan alanın ölçümü yapılır. Histeris döngüsü, kayma gerilmesi-deformasyon hızı grafiğinde bir malzemenin deformasyon hızının sıfırdan maksimum değere kadar çıkıp, tekrardan sıfıra inmesiyle oluşacak eğrilerin arasında kalan alan olarak tanımlanır. Kayma gerilmesi-deformasyon hızı arasındaki ilişki Şekil 3.14’te gösterilmiştir. Sabit bir deformasyon hızı değeri için, yükleme eğrisinin kayma gerilmesi boşaltma eğrisinin kayma gerilmesinden büyük olmaktadır. Yükleme ve boşaltma eğrisi arasında kalan alan tiksotropinin derecesini belirlemektedir. Boşaltma eğrisi genelde doğrusaldır ve kolaylıkla Bingham modeline uyabilmektedir (Tattersall vd, 1979).



Şekil 3.14 Histeris döngüsü akış eğrisi

Histeris döngüsü çimento hamurunun akış özelliklerini ölçmede kullanılmasına rağmen, bazı araştırmacılar bu modeli eleştirmektedir. Cheng vd. (1965), değişik deformasyon hızları altında reolojik model oluşturmanın imkansız olduğu sonucuna varmıştır. Çünkü çimento hamurunun davranışı Bingham modelinin dışında psödo-plastik modelle de ifade edilebilmektedir. Worral vd. (Banfill vd.'den, 1981) yaptığı deneysel çalışma sonucunda tiksotropik davranışları bütünüyle farklı iki süspansiyonun histeris döngülerinin birbirine benzer olduğunu görmüştür.

Çimento hamurunun tiksotropisini karakterize etmek için kullanılan bir diğer yöntem “Denge Durumu” analizidir. Denge durumu yöntemi malzemenin sabit bir deformasyon hızında zamana karşı kayma gerilmesinin değişimini ölçen bir yöntemdir. Sabit bir deformasyon hızında malzemenin harekete geçmesi için gerekli kayma gerilmesi başlangıç gerilmesi (τ_b) olarak ifade edilir. Zamanla malzemenin hareketli hale geçmesiyle kayma gerilmesinde azalma görülmektedir. Belirli bir zamandan sonra kayma gerilmesi sabit kalır ve bu gerilme değeri de denge gerilmesi (τ_d) olarak ifade edilir (Assaad, 2004). Şekil 3.15’te denge durumu akış eğrisi görülmektedir. Lapasin vd. (1983) başlangıç ile denge gerilmesi değerleri arasındaki farkın tiksotropinin bir ölçütü olabileceğini önermiştir.



3.15 Denge durumu akış eğrisi

Denge durumu yöntemi, kimyasal katkıların çimento esaslı malzemelerin akış özellikleri üzerindeki etkisini yorumlamak için kullanılmaktadır (Tattersall vd., 1983). Bu yöntem, belirli bir deformasyon hızında zamanın fonksiyonu olarak tüm kayma gerilmesi aralıklarını ölçme imkanı sağladığından, histeris döngüsüne göre önemli bir avantaj sağlamaktadır. Histeris döngüsünde ise belirli bir

deformasyon hızında başlangıç ve denge gerilmeleri arasında bir aralık belirlenmekte ve malzemenin akış özellikleri kısa süreli ölçülmektedir (Saak vd., 2001). Çimento hamurunun tiksotropik özelliklerinin zamana bağlı olduğu düşünüldüğünde denge durumu yönteminin çimento hamurunun tiksotropisini daha iyi ifade ettiği söylenebilir.

3.5 KYB'nin Tiksotropik Özellikleri

Genel olarak taze betonda tiksotropiyi etkileyen faktörlerin en başında betonu oluşturan malzemenin özellikleri gelmektedir. Karıştırma, vibrasyon gibi dış etkenler de tiksotropiyi etkileyen faktörlerdendir. Betonda kullanılan çimentonun kimyasal kompozisyonu, inceliği, priz süresi gibi özellikleri tiksotropiyi etkileyebilmektedir. Ayrıca, bağlayıcı olarak kullanılan ve çimento yerine ikame edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi mineral katkıların da taze betonun tiksotropisini etkilediği rapor edilmiştir.

Kimyasal katkıların tiksotropi üzerindeki etkisine bir önceki bölümde kısaca değinilmişti. KYB'de kullanılan kimyasal katkıların da tiksotropiye etkisi olduğu yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Ghezal vd. (2002)'nin yaptığı çalışmada polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcıların naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcılara göre KYB'nin tiksotropisini daha çok arttırdığı görülmüştür. Viskozite düzenleyici katkılar (VDK) arasında yapılan karşılaştırmada ise, başlangıç gerilmesinin polisakkarit bazlı VDK'ların selüloz bazlı VDK'lara göre daha büyük değerler aldığı yani tiksotropilerinin daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı/VDK oranı yüksek karışımlarda tiksotropi değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

KYB'nin su/çimento oranının değişmesiyle tiksotropisi de değişmektedir. Assaad (2004)'in yaptığı çalışmada su/çimento oranı 0.36, 0.40 ve 0.46 olan üç farklı KYB karışımı kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.46 olan karışımın başlangıç ve denge gerilmeleri diğer iki karışıma göre daha düşük ölçülmüştür. KYB'de su/çimento oranının artmasıyla tiksotropinin azaldığı görülmüştür. Su/çimento oranı yüksek karışımlarda süperakışkanlaştırıcı ihtiyacı azaldığı için tiksotropi değerlerinde azalma olmasının beklenen bir durum olduğu belirtilmiştir.

Assaad vd. (2003) KYB karışımlarında mineral katkı kullanımının tiksotropi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çimento ağırlığının %4'ü kadar silis dumanı ikamesi ile oluşturulan KYB karışımına göre çimento ağırlığının %6'si silis

dumanı ve %22'si uçucu kül ikame edilerek hazırlanan karışım, daha yüksek tiksotropi değerleri göstermiştir. %22 uçucu kül kullanılmasıyla özgül yüzey alanı daha büyük olan uçucu kül ($410\text{m}^2/\text{kg}$, çimentonun özgül yüzeyi: $325\text{m}^2/\text{kg}$) sayesinde bağlayıcı maddenin inceliği artmıştır. Bu da betonun reolojik özelliklerini etkilemektedir. Özgül yüzey alanının artması partiküller arası bağlantıyı ve çekim gücünü arttırmakta ve başlangıç gerilmesinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca inceliğin artmasıyla iri agrega miktarı artmaktadır. İri agrega miktarının artması içsel sürtünmeyi arttırmaktadır. Bu da betonun kayma gerilmesi değerini artırır ve başlangıç gerilmesinde bir artış meydana gelir.

Assaad (2004) beton kıvamı ve sıcaklığının tiksotropiye etkisini incelemiştir. Beton kıvamının tiksotropiye etkisini belirlemek için üç farklı yayılma çapına (550mm, 650mm, 750 mm) sahip KYB karışımı ile 220 mm çökme değerine sahip normal beton hazırlanmıştır. Düşük yayılma çapındaki KYB karışımlarında kayma gerilmesi artmaktadır ve bu da başlangıç gerilmesi değerini yüksek yayılma çapındaki karışımlara göre arttırmaktadır. Düşük yayılma çapındaki karışımlarda daha az akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı olduğundan başlangıç gerilmelerinin daha yüksek olması beklenebilir. Bu da tiksotropinin artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Normal betonla KYB karışımları kıyaslandığında, aralarında kıvam farkı olmasına rağmen tiksotropi açısından çok fark yoktur. Tiksotropinin ölçütü olarak başlangıç gerilmesi ile denge gerilmesi arasındaki fark alınmaktadır. Normal betonun başlangıç gerilmesi KYB'ye göre çok daha fazla olmasına rağmen, başlangıç gerilmesi ile denge gerilme arasındaki fark her iki betonda da birbirine benzerdir. Buradan tiksotropilerinin de birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, normal beton ile KYB'nin birbiriyle karşılaştırılmasının çok doğru olmadığı ve her betonun kendi tipindeki karışımlarla kıyaslanmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Beton sıcaklığının tiksotropiye etkisini belirlemek için ise üç farklı beton sıcaklığında (10°C , 20°C , 30°C) karışımlar hazırlanmıştır. Yapılan tiksotropi ölçümleri sonucunda beton sıcaklığının artmasıyla tiksotropinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Sıcaklık arttıkça çimentonun hidrasyonunda artış meydana geldiği, bu artış sayesinde betona uygulanan kayma gerilmesinin arttığı ve dolayısıyla başlangıç gerilmesinde de artış olduğu öne sürülmüştür.

4. KYB'DE KALIP BASINCI

4.1 Betonda Kalıp Basıncının Önemi

İnşaat sektöründe kalıbın önemi özellikle betonarme yapıların inşaatında oldukça fazladır. Betonarme yapılarda kaba inşaat maliyetinin %40-60 arasını kalıp maliyeti oluşturmaktadır. Ayrıca toplam inşaat maliyetinin ise yaklaşık %10'u kalıp maliyetidir. Kalıp maliyetinin önemli bir kısmını işçilik maliyeti oluşturmaktadır. Bir yapının inşaatında ekonomik açıdan kalıp önemli bir yer tutmaktadır. Bunun dışında kalıpların hazırlanma ve sökölme hızı, kalitesi ve güvenilirliği de diğer önemli konulardır (Hanna, 1999). Kalıp maliyetlerini azaltmak için taze betonun kalıplara yaptığı yanıl basıncı azaltmak çok eski yıllardan beri bilinen bir gerçektir. Taze betonun kalıp basıncına etki eden faktörleri belirlemek için hem laboratuvar hem de saha çalışmaları uzun yıllardır devam etmektedir (Assaad, 2004).

4.1.1 Kalıp Basıncına Etki Eden Faktörler

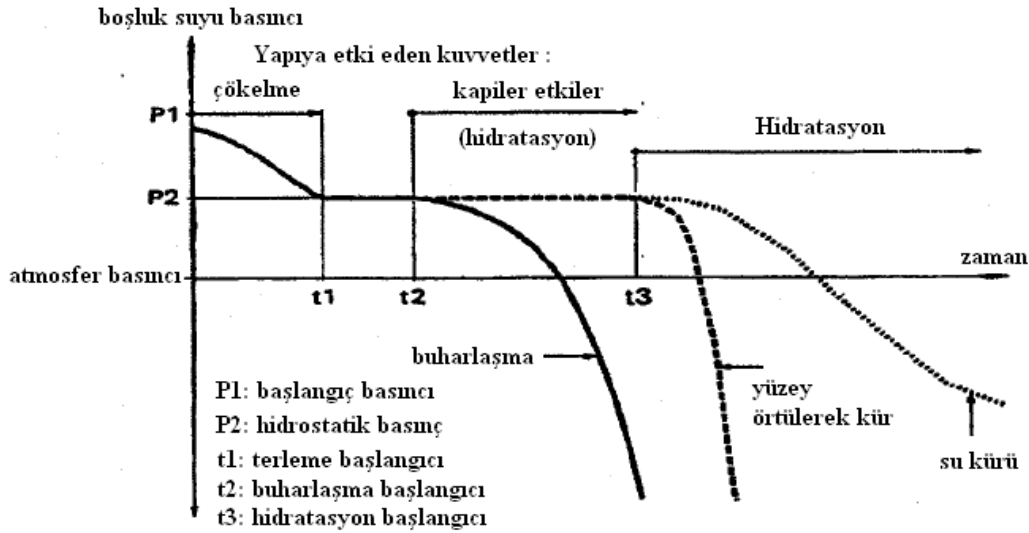
1958 yılında Amerikan Beton Enstitüsü'nün bünyesinde oluşan bir komite, taze betonun kalıplara yaptığı yanıl basıncın gelişimini konu alan laboratuvar ve saha çalışmaları yapmıştır. Taze betonun kalıplara yaptığı yanıl basınç, boşluk suyu basıncı, iri agrega miktarı, çimento ve bağlayıcı miktarı, su içeriği, kimyasal katkıları, döküm hızı, betonun kıvamı, betonu yerleştirme yöntemi, ortam ve beton sıcaklığı, kalıp boyutları ve yanıl basıncı ölçme yöntemleri gibi parametrelerden etkilenmektedir (Assaad, 2004). Bu faktörlerin etkisi detaylı olarak incelenecektir.

Zemin mekaniği ilkelerinde belirtildiği gibi yanıl basınç, boşluk suyu basıncı ile sıvı içine batırılmış katı parçacıkların basıncının toplamına eşittir. Bu tanım, Denklem (4.1)'de şöyle ifade edilmektedir.

$$\sigma = \sigma' + U \quad (4.1)$$

Burada, σ : toplam yanıl basınç, σ' : katı parçacıkların oluşturduğu efektif basınç, U : boşluk suyu basıncıdır.

Radocea (1994) zamanla çimento hamurunda meydana gelen boşluk suyu basıncının değişimini incelemiştir. Şekil 4.1'de bu değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Boşluk suyu basıncının zamanla değişimi (Radocea, 1994)

Boşluk suyu basıncının taze betonu kalıba yerleştirdikten sonra çimento tanelerinin çökmesi sonucu P1'den P2'ye azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda beton yüzeyinde terleme meydana gelmektedir. Başlangıçtaki basınç (P1) hamurun yoğunluğuna ve ölçüm derinliğine bağlıdır. t_1 - t_2 zaman aralığında terleme nedeniyle oluşan su yüzeyde bulunmaktadır ve bu sürede boşluk suyu basıncı sabit kalır. t_2 zamanında hamur yüzeyi buharlaşma sonucu kurumaya başlar ve boşluk suyu basıncı azalır. t_3 zamanından sonra yüzeyi örtülerek kür edilmiş numunelerin çimentonun hidratasyonu sonucu boşluk suyu basıncının azaldığı görülmüştür. Su kürü uygulandığı takdirde, dışarıdan gelen suyun numuneye girmesiyle boşluk suyu basıncının azalma hızı düşmektedir.

Beton, çimento hamuru ve iri agrega fazından oluşan heterojen bir malzeme olarak düşünülmektedir. Çimento hamuru özellikle viskoz bir davranış göstermesine rağmen, betonun taneli fazı tanelerin sürtünmesinden dolayı akmayı engellemektedir. Amziane vd. (2000) su/çimento oranı 0.5 olan farklı iri agrega miktarındaki betonlar üzerinde kalıp basıncı deneyleri gerçekleştirmiştir. Çimento hamurunun kalıba yaptığı basınç ilk başta hidrostatik basınca eşit olduğu rapor edilmiştir. Hacimce hamur/iri agrega oranı 1'den büyük olduğu zaman betonun kalıba yaptığı yanal basınç hidrostatik basınca eşit olduğu belirtilmiştir. Yazarlar, betonda hamur hacminin baskın olduğu durumda agregaların içsel sürtünme değerinin kısıtlı kaldığını ve oldukça yüksek yanal basınç oluştuğunu söylemiştir. Gardner vd. (1979) maksimum agrega boyutunu 10 mm'den 20 mm'ye çıkartınca betonun kalıba yaptığı yanal basınçta önemli bir değişikliğin olmadığını gözlemlemiştir.

Roby (1935) çimento dozajının betonun kalıba yaptığı yanal basınca etkisini incelemiştir. Çalışmada yüksek, normal ve düşük dozajlı üç farklı karışım hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çimento dozajının kalıp basıncı üzerinde önemli bir parametre olduğu gözlenmiştir. Yüksek çimento dozajlı karışımda normal dozajlı karışıma göre %40 daha büyük yanal basınç oluşmuştur. Aynı şekilde normal çimento dozajlı karışımda düşük dozajlı karışıma göre %15 daha büyük yanal basınç oluşmuştur. Benzer şekilde Ritchie (1962), çimento dozajı 200 ile 640 kg/m³ arasında değişen beton karışımlar üzerinde yanal kalıp basıncı deneyleri yapmıştır. Yüksek çimento içeriğinin daha fazla basınç meydana getirdiğini belirtmiştir. Yazarlar, çimento dozajının dolaylı olarak iri agrega hacmi ile de ilişkili olduğu ve yüksek çimento içerikli karışımlarda iri agrega miktarının az olmasıyla kalıba yapacağı yanal basıncın artacağından bahsetmiştir.

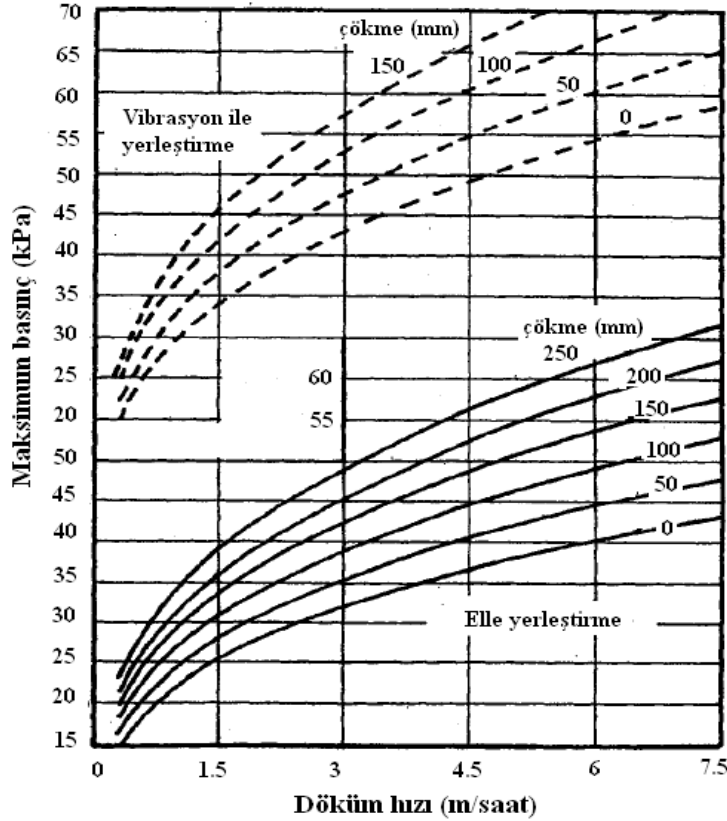
Gardner (1984), çimento yerine uçucu kül kullanılarak elde edilen betonlarda yanal kalıp basıncını incelemek için çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmada, çimento yerine %0 ile %50 arasında değişen uçucu kül ikame edilmiştir. Betonların çökme değeri 65 ile 115 mm arasında değişmiştir. Deney sonuçlarına göre betonda uçucu kül miktarı arttıkça daha fazla yanal basınç oluşmuştur. Yazar, çimento yerine uçucu kül kullanılmasıyla taze betonun hareketliliğinin arttığını ve dayanım kazanma hızının azaldığını belirtmiştir. Bunun sonucu, normal betona göre daha fazla yanal basınç meydana gelmiştir.

Roby (1935), betonda su içeriğinin yanal kalıp basıncına etkisini incelemek için yüksek su/çimento oranında (0.86-0.91) betonlar hazırlamıştır. Yüksek su/çimento oranındaki betonların kalıplara yaptığı yanal basınç, düşük su/çimento oranındaki betonlara göre çok daha fazla çıkmıştır. Yüksek su içeriğine sahip betonlarda çimento hamurunda yağlanma etkisi artmakta ve agregalar arasındaki sürtünme azalmaktadır. Bunun sonucu yüksek yanal basınç meydana gelmektedir.

Kimyasal katkı kullanılarak oluşturulan beton karışımlarının kalıba yaptığı yanal basınç konusunda sınırlı bilgi mevcuttur ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda aynı sonuçlara ulaşılmamıştır. Gardner (1984), yaptığı çalışmada betonun işlenebilirliğini iyileştirmek için su azaltıcı kimyasal katkı kullanımının betonun kalıba yaptığı yanal basıncı arttırdığı görmüştür. Ore vd. (1968), yaptığı çalışmada ise su/çimento oranını düşürmek için su azaltıcı katkı kullanılan betonla aynı kıvamdaki katkısız betonun kalıba yaptığı basınç birbirine benzer çıkmıştır.

Betonun döküm hızının kalıba yapacağı yanal basınca etkisini incelemek amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Ritchie (1962), kalıp basıncını belirlemek için hazırlanan özel kalıp ile 1 ile 20 m/saat arasında değişen döküm hızlarında beton dökümleri gerçekleştirmiş ve kalıp basıncını belirlemiştir. Maksimum kalıp basıncı 1 m/saat döküm hızında 10 kPa iken, döküm hızı 20 m/saat olduğunda maksimum kalıp basıncı 38 kPa'a çıkmıştır. Taze betonun kalıba yaptığı yanal basınç zamanla azaldığı, düşük döküm hızlarında döküm süresi daha fazla olduğu için maksimum yanal basınç yüksek döküm hızlarına göre daha az olduğu belirtilmiştir.

Rodin (1952), 0 ile 250 mm çökme değeri olan karışımlarda beton kıvamı ve döküm hızının kalıp basıncına etkisini beraber incelemiştir. Betonlar elle ve vibratörle olmak üzere iki farklı şekilde yerleştirilmiştir. Beton kıvamı ve döküm hızının maksimum kalıp basıncı ile ilişkisi Şekil 4.2'de verilmiştir. Aynı döküm hızında beton kıvamı arttıkça maksimum basınç da artmaktadır. Aynı döküm hızı ve beton kıvamında vibrasyon ile yerleştirme elle yerleştirmeden daha fazla kalıp basıncı oluşturmaktadır. Betonun döküm hızı arttıkça kalıba yapılan maksimum basınç artmaktadır.



Şekil 4.2 Beton kıvamı ve döküm hızının maksimum kalıp basıncı ile ilişkisi (Rodin, 1952)

Taze betonu yerleştirme esnasında vibratör kullanımı betonun sıvı gibi davranmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda betonun kalıba yapacağı yanal basınç hidrostatik basınca yaklaşmaktadır. Beton yüksekliği 2 m'den fazla olursa vibratörün etkisi azalmaktadır. Beton yüksekliği arttıkça sıkıştırma sonucu oluşan sıvılaşma kalıbın az bir kısmına etki etmektedir (Gardner, 1984).

Gardner (1980), çökme değeri 170 mm olan ve 6 m/saat döküm hızıyla yerleştirilen betonda oluşan yanal basıncın, çökme değeri 50 mm olan ve 46 m/saat döküm hızıyla yerleştirilen betonda oluşan yanal basınçtan %35 daha fazla olduğunu belirtmiştir. Beton kıvamının kalıp basıncına etkisi en az döküm hızı kadar önemlidir.

Roby (1935), sıcaklığın kalıp basıncına etkisini incelemek için çalışmalar yapmıştır. Deney sonucunda ortam sıcaklığı 38°C'de dökülen betonda oluşan yanal kalıp basıncı, 16°C'de dökülen betonda oluşan yanal kalıp basınca göre %60-75 arası daha azdır. Gardner (1984)'ın yaptığı çalışmada ise beton sıcaklığı 2°C ile 27 °C arasında değişen dökümler yapılmıştır. Deneyler sonucu beton sıcaklığının düşmesiyle yanal kalıp basıncının arttığı gözlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda çimentonun hidrasyonu da yavaşlamaktadır. Hidrasyonun yavaş gelişmesi sonucu betonun kalıba yaptığı yanal basınç daha çok olmaktadır. Ayrıca yazar, yanal kalıp basıncının esas olarak beton sıcaklığı tarafından kontrol edildiğini, ortam sıcaklığı tarafından kontrol edilmediğini belirtmiştir.

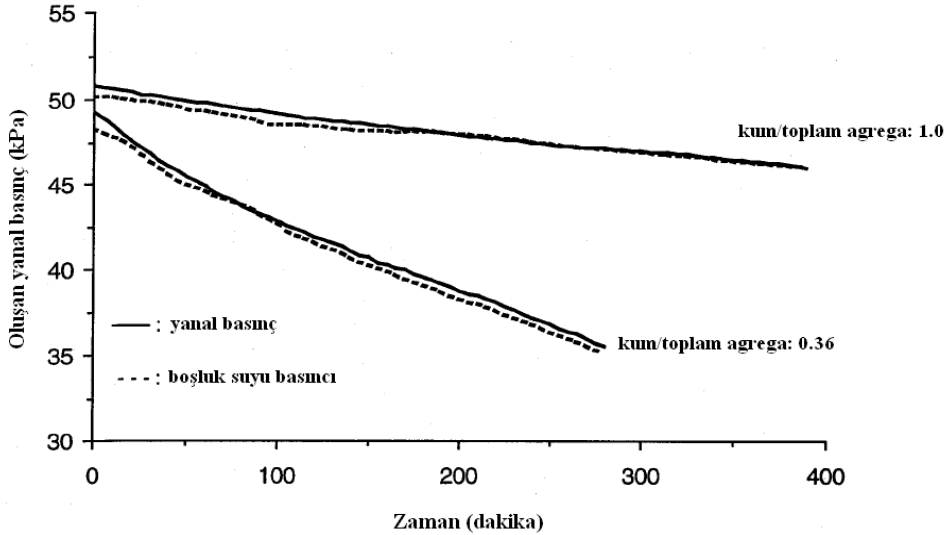
Kalıp basıncına etki eden faktörlerden birisi de kalıp boyutlarıdır. Kalıp boyutlarının artmasıyla kalıp basıncının da arttığı belirtilmiştir (Rodin, 1952; Gardner, 1980). Kalıp basıncıyla ilgili bir diğer önemli konu da kalıptaki donatı yoğunluğudur. Donatıların, kalıptaki beton yükünün bir kısmını taşıdıklarından dolayı kalıp basıncına olumlu etkisi bulunmaktadır. Bu olumlu etkinin yanında yoğun donatılı elemanlarda betonu yerleştirmek çok zordur (Rodin, 1952). Bu durumlarda KYB kullanımı bu olumsuzluğu büyük ölçüde gidermektedir.

4.2 KYB'de Kalıp Basıncı

KYB'de işçilik masraflarının azalması ve vibrasyon kullanılmamasının getirdiği avantajlar önceki bölümlerde değinilmişti. Normal betona göre KYB çok daha akıcı bir beton olmasından dolayı kalıplarda hidrostatik basınç etkisinin bir dezavantaj oluşturacağı düşünülüyordu. Bu açıdan KYB'de kalıp basıncı üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1998 yılında İsveç'te bir betonarme köprünün

inşaasında KYB kullanılmıştır. Köprü yapımında beton dökümleri sırasında KYB'nin kalıba yaptığı basınç ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda kalıp basıncının hidrostatik basınçtan daha az olduğu gözlemlenmiştir. KYB'nin tiksotropik davranış göstermesiyle bu sonucun meydana geldiği tahmin edilmektedir. KYB, kalıplara yerleştirme işleminden sonra durağan halde olduğunda katı gibi davrandığı ve böylece kalıba yapacağı yanal basıncın azaldığı öne sürülmüştür (Billberg, 2003).

KYB'nin iri agregâ özellikleri tasarım aşamasında önemli bir konudur. Normal betona göre KYB'de hamur hacminin artmasıyla iri agregâ miktarında azalma olmaktadır. Ayrıca maksimum agregâ boyutu da belirli bir sınırdâ tutulmaktadır. İri agregânın tüm bu özellikleri KYB'nin kalıba yapacağı yanal basıncı etkilemektedir. Assaad ve Khayat (2005a), iri agregâ özelliklerinin kalıp basıncına etkisini incelemek için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışma kapsamında kum/toplam agregâ oranı 0.3 ile 1 arasında değişen KYB karışımları hazırlanmıştır. Bütün karışımların yayılma çapları 650 ± 150 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Şekil 4.3'te kum/toplam agregâ oranı 0.36 ve 1.0 olan karışımlarda oluşan yanal basınç ve boşluk suyu basıncının zamana bağlı grafiğı gösterilmiştir. İri agregâ hacminin artmasıyla betonun kalıba yaptığı yanal basınç azalmaktadır.



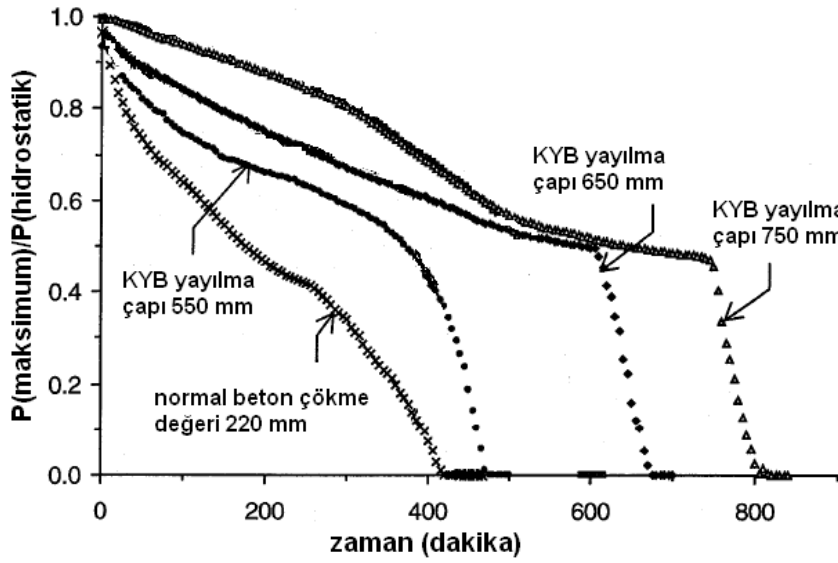
Şekil 4.3 Farklı kum/toplam agregâ oranındaki karışımlarda yanal basıncın ve boşluk suyu basıncının zamana bağlı değişimi (Assaad ve Khayat, 2005a)

Dökümden 80 dakika sonra kum/toplam agrega oranı 0.30 olan karışımın yanal basıncı hidrostatik basınca göre %10 azalmıştır. Bu süre kum/toplam agrega oranı 1.0 olan karışımda 410 dakika olmuştur. Yapılan çalışmada ayrıca maksimum tane boyutunun kalıp basıncını etkisi incelenmiştir. Maksimum tane boyutu 14 mm olan karışımın kalıba yaptığı yanal basınç, maksimum tane boyutu 10 mm olan karışıma göre daha büyük çıkmıştır. Araştırmada, boşluk suyu basıncının kalıp basıncına etki eden önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. KYB’de oluşan yanal kalıp basıncının agregaların içsel sürtünmesinin mertebesine bağlı olduğu ifade edilmiştir. İri agrega miktarının azalmasıyla içsel sürtünmenin azaldığı ve yanal kalıp basıncının arttığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, KYB karışımlarında akış özelliklerini iyileştirmek için iri agrega miktarının azaltıldığı, böylece normal betona göre daha fazla yanal kalıp basıncı oluştuğunu bildirmiştir.

Betonda çimento dozajının artmasıyla oluşacak yanal basıncın daha fazla olacağından önceki bölümde bahsedilmiştir. Assaad ve Khayat (2005b), dökümden hemen sonra çimento dozajı fazla olan karışımlarda oluşacak yanal basıncın daha fazla olacağını ifade etmiştir. Ancak zaman geçtikçe çimento dozajı yüksek olan karışımın yanal basınçtaki düşüş hızının arttığını belirtmiştir. Dökümden 42 dakika sonra çimento miktarı 550 kg/m^3 olan karışımın basıncı hidrostatik basınca göre %10 azalmıştır. Bu süre çimento miktarı 400 kg/m^3 olan karışımda 125 dakika ölçülmüştür. Yüksek çimento dozajlı karışımın kohezyonu daha fazla olmaktadır. Kohezyonu yüksek olan karışımın yanal basıncında zamanla hızlı bir düşüş olmaktadır. Ayrıca karışımlarda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı, dolaylı olarak yanal basıncın zamanla azalmasını etkilemektedir. Düşük çimento dozajı ile hazırlanan karışımlarda daha fazla akışkanlaştırıcı ihtiyacı olmaktadır. Bu da yanal basınç düşüşünü yavaşlatmaktadır. Araştırmada, çimento dozajı 400 kg/m^3 olan karışımda 400 mm yayılma çapı 4 saatte sağlanmıştır. Çimento dozajı 550 kg/m^3 olan karışımda ise aynı yayılma çapı 1.5 saatte sağlanmıştır. KYB karışımlarında genellikle yüksek çimento dozajı kullanıldığı için yanal kalıp basıncın da normal betona göre daha az olacağı ifade edilmiştir.

KYB normal betona göre çok daha akıcı kıvamlı bir beton olduğu için beton kıvamının yanal basınca etkisi de önem kazanmaktadır. Assaad (2004) yaptığı çalışmada, 550, 650 ve 750 mm yayılma çapına sahip üç farklı KYB karışımı ile 220 mm çökme değerine sahip normal beton üzerinde kalıp basıncı deneyi gerçekleştirmiştir. Şekil 4.4’te farklı kıvama sahip betonların zamanla kalıba yaptığı basınç gösterilmiştir. Beton kalıba yerleştirildikten hemen sonra bütün

karışımlarda ölçülen basınç değeri hidrostatik basınç değerine eşittir ($P(\text{maksimum})/P(\text{hidrostatik})$ oranı 1.0'dır). Yanal basınçta zamanla en hızlı düşüş olan beton 220 mm çökme değerine sahip normal betondur. 750 mm yayılma çapına sahip KYB karışımı ise zamanla basıncın en yavaş azaldığı betondur. Yazara göre, yayılma çapı yüksek olan karışımlarda akışkanlaştırıcı ihtiyacı daha fazla olmaktadır. Akışkanlaştırıcının artması taze betonun sertleşmesini geciktirmektedir. Bunun sonucu kalıba yapılan yanal basınç düşüşü zamanla daha yavaş olmaktadır. Sonuç olarak, taze betonda yayılma çapının artmasıyla zamanla basınç düşüşü daha yavaş olmaktadır.



Şekil 4.4 Beton kıvamının zamanla yanal basınca etkisi (Assaad, 2004)

Assaad (2004), KYB karışımlarında döküm hızının yanal kalıp basıncına etkisini araştırmak için çalışmalar yapmıştır. Çalışmada 665 mm yayılma çapına sahip KYB karışımı kullanılmıştır ve 10 m/saat ile 25 m/saat olacak şekilde iki farklı döküm hızı belirlenmiştir. 10 m/saat döküm hızıyla beton kalıba yerleştirildikten sonra ölçülen basıncın hidrostatik basınca oranı 0.94 olmuştur. 25 m/saat döküm hızıyla kalıba yerleştirilen betonun basınç değerinin hidrostatik basınca oranı ise 0.99 ölçülmüştür. İki betonun da zamanla basınç düşüşündeki hızı birbirine benzer olmuştur. Düşük döküm hızında kalıbı doldurmak için geçen zaman arttığı için bu sürede kalıp basıncı diğer döküm hızına göre daha fazla azalmıştır. Yani, döküm hızının azalmasıyla yanal basınç da azalmıştır. Aynı çalışmada beton sıcaklığının yanal kalıp basıncına etkisi de incelenmiştir. Sıcaklığı 10, 20 ve 30°C olacak şekilde üç farklı KYB karışımı üstünde deneyler yapılmıştır. Üç betonun da dökümden hemen sonra oluşan yanal basınçları

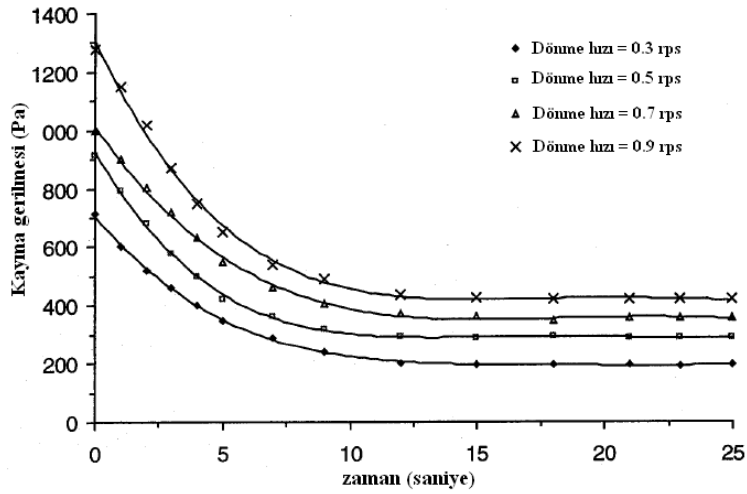
birbirine benzer çıkmıştır. Zamanla yanal basınçtaki düşüş 30°C sıcaklığındaki betonda 10°C sıcaklığındaki betona göre daha fazla olmuştur. Sonuçta, beton sıcaklığı arttıkça çimentonun hidratasyon hızı artacağından kalıba yaptığı yanal basınçtaki düşüşün daha hızlı olduğu, buna göre beton sıcaklığı arttıkça karışımın kalıba yapacağı yanal basıncın azaldığı bildirilmiştir.

4.3 KYB’de Tiksotropinin Kalıp Basıncına Etkisi

Bir önceki bölümde betonda kalıp basıncını etkileyen faktörler detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu faktörler hem normal beton için hem de KYB için geçerlidir. Akış özellikleri açısından normal betonla KYB arasındaki en önemli fark KYB karışımlarının tiksotropik davranış göstermesidir. Yani KYB hareketli durumdayken bir sıvı gibi, hareketsiz hale geçtiğinde ise bir katı gibi davranmaktadır. Beton dökümü sırasında KYB karışımı akıcı kıvamlı bir sıvı gibidir. Beton dökümü tamamlandıktan sonra ise betonun kohezyonu artmakta ve katı bir malzeme gibi davranmaktadır. Betonun kalıba yerleşmesinden sonra kohezyonun artmasıyla kalıba yapacağı yanal basınç hidrostatik basınçtan daha az olmaktadır (Assaad, 2004).

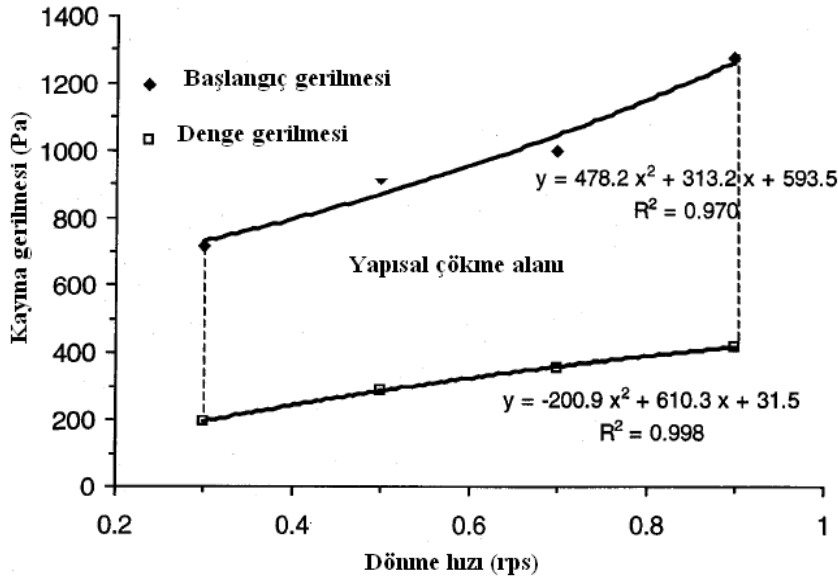
KYB’de tiksotropinin kalıp basıncına etkisinin bilinmesi, betonun tiksotropisini ölçerek kalıba yapacağı potansiyel yanal basıncı tahmin etmek açısından önemlidir. Bu da bir yapının inşasında düşük kalıp basıncı yaratan uygun KYB karışımları yapılmasına olanak sağlar (Assaad, 2004). Bu konuda yapılan çalışmalar kısıtlı olup, mevcut çalışmalar bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

KYB’de tiksotropinin kalıp basıncına etkisini incelemek amacıyla Assaad (2004), farklı çimento tipi ve kıvama sahip normal beton ve KYB karışımları üzerinde çalışmalar yapmıştır. 220 mm çökme değerine sahip iki farklı çimento tipi ile oluşturulan iki normal beton, 550, 650 ve 750 mm yayılma çapına sahip üç KYB karışımı ve farklı çimento tipine sahip 650 mm yayılma çapında bir KYB karışımı olmak üzere toplam altı farklı beton üretilmiştir. Her karışım ayrı ayrı tiksotropi deneyine tabi tutulmuştur. Bunun için de beton reometresi kullanılmıştır. Her bir betona 25 saniye boyunca 4 farklı sabit dönme hızında kesme kuvveti uygulanmıştır. Şekil 4.5’te 550 mm yayılma çapına sahip KYB karışımının zamanla kayma gerilmesinde meydana gelen değişikliği gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.5 Kayma gerilmesinde zamanla meydana gelen değişiklik (Assaad, 2004)

Taze betonda tiksotropinin belirlenmesi için her dönme hızında betona uygulanan gerilmenin başlangıç (maksimum) ve denge gerilmeleri belirlenmiştir. Şekil 4.6’da farklı dönme hızlarında başlangıç ve denge gerilmelerinde meydana gelen değişiklik gösterilmiştir. Başlangıç ve denge gerilmeleri arasında kalan alan hesaplanmış ve bu alan “yapısal çökme alanı” olarak ifade edilmiştir.

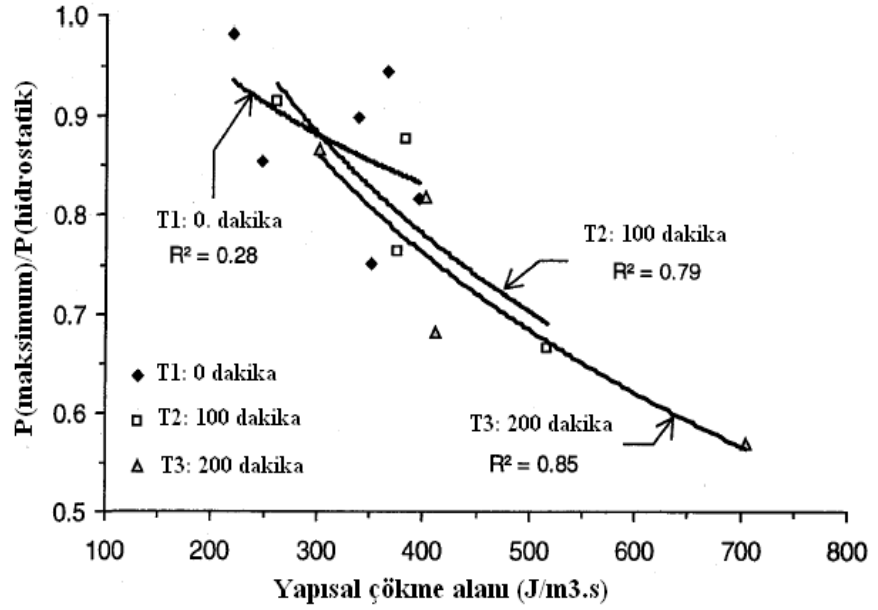


Şekil 4.6 Yapısal çökme alanı (Assaad, 2004)

Yapısal çökme alanını belirlemek için yapılan ölçümler KYB karışımı hazırlandıktan hemen sonra ($T = 0$), 60 dakika sonra ve 120 dakika sonra olmak üzere üç defa yapılmıştır. Karışımların yayılma çapı arttıkça yapısal çökme

alanının da azaldığı belirlenmiştir. Yani, betonda yayılma çapının artmasıyla tiksotropi azalmıştır. Ayrıca bütün karışımlarda zaman geçtikçe tiksotropi değerleri artmıştır.

Tiksotropisi belirlenen betonların aynı zamanda yanal kalıp basınçları da belirlenmiştir. Tiksotropinin kalıp basıncına etkisini belirlemek için her bir karışımın tiksotropi (yapısal çökme alanı) değerine karşılık gelen yanal kalıp basıncı değeri bulunmuştur. Şekil 4.7’de tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 4.7 KYB’de tiksotropi ile kalıp basıncı arasındaki ilişki (Assaad, 2004)

Zaman geçtikçe tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasındaki ilişkinin daha anlamlı olduğu belirtilmiştir. Tiksotropisi büyük olan karışımların kalıba yaptıkları yanal basınç daha düşük olmuştur. Sonuç olarak, tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasında bir ilişki olduğundan ve betonun tiksotropisinin artmasıyla kalıpta oluşan yanal basıncın azaldığından bahsedilmiştir. Yazar, tiksotropisi büyük olan betonların kohezyonunun fazla olduğunu ve betonda oluşan kayma gerilmesinin zamanla daha çok gelişmesiyle betonun kalıba yapacağı yanal basıncın azaldığını belirtmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmanın programı, KYB üretiminde kullanılan malzemenin özellikleri, değişik kompozisyonlarda üretilen 15 farklı KYB'nin karışım oranları, karışımların hazırlanması ve üretilen KYB'ler üzerinde yapılan deneyler detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

5.1 Çalışma Programı

Deneysel çalışmanın birinci kısmında 15 farklı KYB'nin karışım oranları belirlenip deneme dökümleri yapılmıştır. Deneme dökümlerinden sonra bütün KYB karışımlarının reolojik parametrelerini ve tiksotropik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmış, aynı anda betonların kalıp basıncı deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

İkinci kısımda ise 15 farklı KYB'nin taze beton deneyleri yapılmıştır. Yayılma çapı deneyi, T_{50} süresi tayini, V-hunisi deneyi, L-kutusu deneyi yapılan taze beton deneyleridir. Ayrıca karışımların birim hacim ağırlıkları ve beton sıcaklıkları belirlenmiştir. Daha sonra bu karışımlar 100 mm ayrıtlı küp kalıplara yerleştirilmiş, 7 ve 28 günlük basınç ile yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

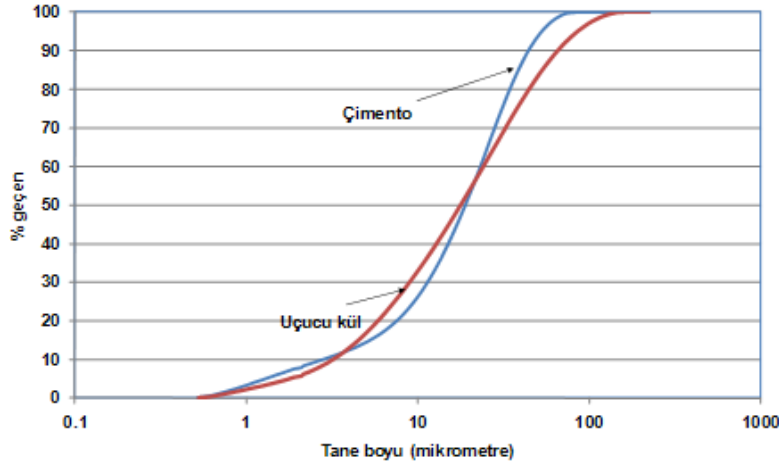
5.2 Kullanılan Malzeme

5.2.1 Çimento ve Uçucu Kül

Tez çalışmasının bütün aşamalarında Batıçim Batı Anadolu Çimento Sanayii A.Ş.'den temin edilen CEM-I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimento tek seferde temin edilip, rutubet almaması için kapalı varillerde muhafaza edilmiştir. Üretilen KYB'lerin tamamında mineral katkı olarak Sugözü Termik Santrali'ne ait uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu külün $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70'den fazla ve CaO miktarı %10'un altındadır. Dolayısıyla bu uçucu kül, ASTM C 618 standardına göre F tipi olarak sınıflandırılabilir. Uçucu kül de tek seferde temin edilmiş olup, rutubet almaması için kapalı varillerde muhafaza edilmiştir. Çimento üreticisi firmadan elde edilen çimento ve uçucu külün kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Ayrıca çimento ve uçucu külün tane boyutu dağılımları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Çimento ve UK'nın kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	Çimento	Uçucu Kül
SiO ₂	21.72	56.20
Al ₂ O ₃	5.96	25.34
Fe ₂ O ₃	3.60	7.65
CaO	60.78	1.64
MgO	2.64	1.80
K ₂ O	0.75	1.88
Na ₂ O	0.17	1.13
SO ₃	2.17	0.32
Kızdırma Kaybı	2.01	2.10
Özgül ağırlık	3.07	2.31
Priz başlangıç. süresi (dk.)	70	-
Priz bitiş süresi (dk.)	205	-



Şekil 5.1 Çimento ve uçucu külün tane boyutu dağılımları

5.2.2 Agrega

Deneysel çalışmada Dere Madencilik A.Ş.'den temin edilen iki farklı tane boyutunda kalker esaslı agregalar kullanılmıştır. İnce agregalar olarak 0–3 mm tane boyutunda kırma kum, iri agregalar olarak ise 5–15 mm tane boyutunda kırma taş kullanılmıştır. Agregalar kapalı ortamda muhafaza edilmiş ve nem içerikleri kontrol edilerek üretilen betonların nem düzeltilmesi yapılmıştır. KYB karışımlarında kum içindeki 125 µm'nin altında kalan malzemenin miktarı toz malzeme olarak belirlenmiştir. Agregaların elek analizi sonuçları Tablo 5.2'de ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.2 Kullanılan agregaların elek analizi sonuçları

Elek göz açıklığı, (mm)	Geçen, (%)	
	0-3 mm	5-15 mm
16	100	100
8	100	42
4	100	2
2	75	0
1	53	0
0.5	27	0
0.25	14	0
63µm elekten geçen malzeme yüzdesi	17.3	2.65
125 µm elekten geçen malzeme yüzdesi	18.0	-

Tablo 5.3 Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellik	0-3 mm	5-15 mm
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	1793	1504
Görünür Özgül Ağırlık	2.63	2.69
Kuru Özgül Ağırlık	2.58	2.62
Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlık	2.61	2.64
Su emme (%)	0.67	0.21
Boşluk yüzdesi (%)	30.53	42.53

5.2.3 Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

BASF firmasından temin edilen Glenium SKY 608 isimli polikarbosilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı ikinci nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı deneysel çalışmada kullanılmıştır. Bu katkının bazı özellikleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri

Kimyasal yapısı	Polikarbosilik eter esaslı
Yoğunluğu (kg/m ³)	1.063 – 1.103
Klor içeriği (%)	< 0.1
Alkali içeriği (%)	< 3
Üretici firmanın dozaj önerisi	Bağlayıcı miktarının ağırlıkça % 0.8 - 1.5'i arasında

5.2.4 Su

Üretilen KYB karışımlarında şehir şebekesinden sağlanan musluk suyu kullanılmıştır.

5.3 Karışım Oranları

KYB'nin reolojik ve tiksotropik özelliklerini, kalıp basıncına etkisini, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için su/bağlayıcı oranı, yayılma çapı ve iri agrega/toplam agrega (İA/TA) oranı değişken olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, KYB'ler 0.35, 0.42 ve 0.50 olmak üzere üç farklı su/bağlayıcı (s/b) oranı ile üretilmiştir. Her bir s/b oranı için ağırlıkça İA/TA oranı 0.45, 0.50 ve 0.53 olarak belirlenmiştir. Bu karışımlarda, yayılma çapı 650 mm olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca, İA/TA oranı 0.50 olan karışımlarda iki tane daha farklı yayılma çapına (550 mm ve 720 mm) sahip olacak şekilde betonlar da üretilmiştir. Üretilen betonların değişken parametreleri Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.5 Üretilen betonların değişken parametreleri

s/b	İA/TA	Yayılma Çapı (mm)
0.35	0.45	650
	0.50	550, 650, 720
	0.53	650
0.42	0.45	650
	0.50	550, 650, 720
	0.53	650
0.50	0.45	650
	0.50	550, 650, 720
	0.53	650

Bütün karışımlarda çimento (400 kg/m^3) ve uçucu kül (120 kg/m^3) miktarları sabit tutulmuştur. Betonların su içeriği s/b oranlarına göre belirlenmiştir. Bağlayıcı ve su miktarı belirlendikten sonra kum ve iri agrega miktarı, bağlayıcı ve su hacmi ile İA/TA oranına bağlı olarak hesaplanmıştır. Elek analizi sonucu kumda $125 \mu\text{m}$ 'nin altında kalan malzeme toz malzeme olarak belirlenmiş ve karışım hesaplarında toz malzeme ayrı gösterilmiştir. Karışım oranları hesabında karışımların hava içeriği %1.5 olarak alınmıştır. Her bir karışımda kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı hedeflenen yayılma çapına (550 mm, 650 mm, 720 mm) göre döküm esnasında belirlenmiştir.

Tablo 5.6 Üretilen KYB'lerin karışım oranları

Bileşen (kg/m ³)	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
Çimento	415	413	412	414	415	415	414	414	416	414	417	419	418	416	415
Uçucu Kül	125	124	124	124	125	125	124	124	125	124	125	126	125	125	125
Su	189	188	187	189	189	228	228	228	229	228	271	272	271	270	270
0-3 Kum	752	680	677	682	641	711	646	646	649	609	663	606	604	602	565
Toz Malzeme	165	149	148	149	141	156	144	144	145	132	146	133	133	132	124
5-15 İri Agreg	758	836	834	839	893	716	789	789	792	837	670	748	745	742	786
Akışkanlaştırıcı Katkı	7,6	6,4	7,1	7,9	7,1	4,2	3,5	4,1	4,7	4,0	3,0	2,5	3,1	3,2	3,1
TOPLAM	2412	2396	2390	2405	2411	2356	2348	2349	2359	2349	2294	2306	2300	2290	2288
Dizayn Parametreleri															
Su/Bağlayıcı oranı	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
İA/TA oranı	0.45	0.50	0.50	0.50	0.53	0.45	0.50	0.50	0.50	0.53	0.45	0.50	0.50	0.50	0.53
Yayılma çapı (mm)	650	550	650	720	650	650	550	650	720	650	650	550	650	720	650
Toplam Toz Miktarı* (kg/m³)	705	686	684	688	681	696	682	682	685	671	687	678	675	673	664
Su/Toz oranı (ağırlıkça)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41
Su/Toz oranı (hacimce)	0.75	0.77	0.77	0.77	0.78	0.92	0.93	0.93	0.93	0.95	1.10	1.13	1.13	1.13	1.14

Tabloda verilen değerler karışım oranları birim ağırlıklara göre düzeltilmiş değerlerdir. * Toplam Toz Miktarı: Çimento + Uçucu kül + Toz malzeme

Üretilen 15 farklı KYB'nin karışım oranları Tablo 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.6'da karışımların isimlendirilmesinde önce s/b oranı % olarak yazılmış, ardından İA/TA oranı % olarak gösterilmiş ve son olarak hedeflenen yayılma çapı cm olarak verilmiştir. Örneğin, 35/50/65 olarak isimlendirilen karışım, 0.35 s/b oranı, 0.50 İA/TA oranı ve 650 mm yayılma çapına sahip olan karışımdır.

5.4 Karışımların Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen beton döküm işlemleri ve yapılan deneyler için bütün karışımlarda aynı sıra izlenmiştir. Hem döküm işlemleri hem de gerçekleştirilen deneylerde farklılık olmamasına özen gösterilmiştir.

Beton dökümü için öncelikle beton bileşenleri 50 g hassasiyetli tartıda tartılmıştır. İri agreg ve kum öncelikle beton karıştırıcısına konulup karıştırılmış, ardından suyun yaklaşık 1/4'ü agregaları ıslatması amacıyla karışıma ilave edilip karıştırılmıştır. Çimento ve uçucu kül karışıma katılmadan önce kendi içinde karıştırılmış ve çimento+uçucu kül karışıma eklenmiştir. Daha sonra kalan suyun yarısı karışıma ilave edilmiştir. 0.1 g hassasiyetli tartıda tartılan akışkanlaştırıcı geriye kalan suya katılıp su+akışkanlaştırıcı karışıma ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Akışkanlaştırıcının, suyla karıştırılmadan tek başına karışıma ilave edildiğinde, çimento ile etkileşiminin azalması sonucu etkisinin çok azaldığı gözlenmiştir. Karıştırma işlemi yaklaşık 3 dakika kadar sürdürülüp daha sonra taze betonun yayılma çapı tayini yapılmıştır. Hedeflenen yayılma çapına ulaşıldığında deneylere başlanmıştır. Hedeflenen yayılma çapına ulaşılmadıysa karışıma ilave katkı eklenerek istenilen yayılma çapına ulaşılmıştır. Karışımlar, hedeflenen yayılma çapları ± 20 mm toleranslı olacak şekilde hazırlanmıştır.

Üretilen KYB'lerin reolojik, tiksotropik özelliklerini ve kalıp basıncına etkisini belirlemek amacıyla her karışım için 30 dm³ beton hazırlanmıştır. Taze beton hedeflenen yayılma çapına ulaştığında 10 dm³'ü beton reometresine konulmuş, 20 dm³'ü ise kalıp basıncı ölçümleri için kullanılmıştır. Ayrıca KYB'lerin taze ve sertleşmiş beton deneyleri için her karışımdan 20 dm³ beton hazırlanmıştır. Öncelikle KYB'nin taze beton deneyleri gerçekleştirilmiş, daha sonra KYB karışımı 12 adet 100 mm ayrıtlı küp kalıplara sıkıştırma işlemi yapmadan yerleştirilmiştir. Yüzey perdah işlemi yapıldıktan sonra kalıpların üstü ıslak örtülerle kapatılmıştır. Bir gün sonra kalıptan alınan numunelere kür odasında su içinde kürleme yapılmıştır.

5.5 Deneylerin Yapılışı

Bu bölümde tez kapsamında üretilen KYB'ler üzerinde yapılan deneylerden ve deneylerde kullanılan makina, teçhizat ve aparatlardan detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

5.5.1 Taze Beton Deneyleri

Üretilen KYB'ler üzerinde sırasıyla yayılma çapı deneyi, T_{50} süresi tayini, L-kutusu deneyi, V-hunisi deneyi, 5 dakika gecikmeli V-hunisi deneyi, birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. Yayılma çapı deneyinden sonra karışımın görünür stabilite indeksi belirlenmiştir. Ayrıca ortam sıcaklığı oda termometresi, beton sıcaklığı da beton termometresi ile ölçülmüştür.

5.5.1.1 Yayılma Çapı Deneyi ve T_{50} Süresi Tayini

EFNARC (2005) kriterine uygun olarak Şekil 5.2'de görülen standart çökme hunisi ve yayılma tablası kullanılarak yayılma çapı deneyi yapılmıştır. Taze beton sıkıştırma yapılmadan çökme hunisine doldurulmuş ve kaldırılarak betonun nihai yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek belirlenmiştir. T_{50} süresi tayini ise yayılma tablasının üstünde bulunan 50 cm'lik çapa betonun gelme süresi ölçülerek yapılmıştır.

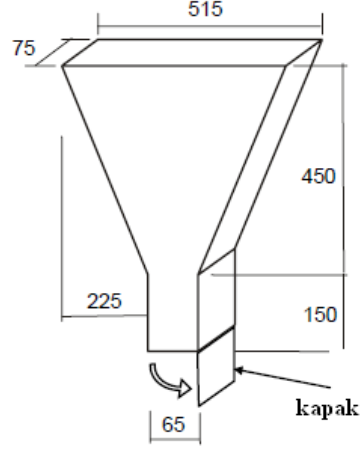


Şekil 5.2 Yayılma çapı deneyinde kullanılan aparatlar

5.5.1.2 L-kutusu Deneyi

L-kutusu deneyi, EFNARC (2005) kriterinde belirtilmiş olup betonun geçiş yeteneğini belirleyen bir deneydir. 70 cm uzunluk ve 60 cm yüksekliğinde L şeklinde tahtadan yapılmış deney aparatı Şekil 5.3'de görülmektedir. Taze beton

Betonun akış süresi tespit edildikten sonra taze beton tekrar huninin içine doldurulmuş ve beton 5 dakika huninin içinde bekledikten sonra kapak açılarak 5 dakika gecikmeli akış süresi tespit edilmiştir. Şekil 5.6'te V-hunisi deneyinin yapılışı görülmektedir.



Şekil 5.5 V-hunisi deney aparatı (Ölçüler mm'dir)



Şekil 5.6 V-hunisi deneyinin yapılışı

5.5.1.4 Görünür Stabilite İndeksi

Görünür stabilite indeksi, yayılma çapı deneyinden sonra taze betonun stabilitesini tayin etmek için yapılan bir deneydir. Taze beton yayıldıktan sonra ayrışma, terleme, yüzeyde hava kabarcığı oluşumu, merkezde agrega

kümelenmesi, merkezde hamur birikimi, beton çevresinde harç birikimi gibi durumların olup olmadığı gözlenmiştir. Bu gözlem sonucu Tablo 5.7 yardımıyla gözlemlenen betonun hangi indeks aralığında olduğuna karar verilir. İndeks aralığı 0 ile 3 arasındadır. Genellikle stabilitesi uygun bir KYB'nin görünür stabilite indeksinin 0 ve 1 olduğu belirtilmektedir.

Tablo 5.7 Görünür stabilite indeksinin belirlenmesi

Seviye	Kriter
0	Ayrışma belirtisi yok, agregada dağılımı üniform, terleme ve harç birikimi yok, yüzeyde hava kabarcığı yok.
1	Ayrışma belirtisi yok, agregada dağılımı üniform, hafif terleme ve yüzeyde hava kabarcığı var.
2	Ayrışma belirtisi var, merkezde hafif agregada kümelenmesi var, belirgin terleme var, beton çevresinde harç birikimi var.
3	Belirgin bir ayrışma var, merkezde yoğun agregada kümelenmesi var, beton çevresinde yoğun harç birikimi var.

5.5.1.5 Diğer Taze Beton Deneyleri

Yukarıda bahsedilen taze beton deneylerinin yanı sıra taze betonun birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Taze beton 7 litrelik bir kaba sıkıştırma işlemi uygulamadan doldurulmuş ve tartılmıştır. Beton ağırlığının kabın hacmine bölünmesiyle taze haldeki birim hacim ağırlık belirlenmiştir. Ayrıca tüm karışımlar için ortam sıcaklığı ve beton sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır.

5.5.2 Reoloji Deneyi

Reolojik parametrelerin belirlenmesi Şekil 5.7'da gösterilen ConTec 4SCC adlı beton reometresi ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Tattersall tipi palet kullanılmıştır. Reolojik parametrelerin belirlenmesi için en uygun ölçüm parametreleri deneme deneyleri yapılarak tespit edilmiştir. Denemeler ve literatür araştırması (Assaad, 2004) sonucu palet 5 farklı hızda (0.70, 0.55, 0.40, 0.25, 0.10 rps) dönecek şekilde ölçümler alınmıştır. Taze betonu karıştırma işlemi en yüksek hızdan en düşük hıza doğru olacak şekilde yapılmıştır. Ölçümler, her hız için 8 saniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Ancak, her hız için son 6 saniyenin ortalama

değeri hesaba katılmış, ortalamaya tüm veriler dahil edilmemiştir. Ayrıca, her saniye için dört adet tork değeri alınmıştır. Her hız değerine karşılık gelen tork değeri kaydedilmiş ve elde edilen tork-hız grafiğine doğrusal eğilim çizgisi eklenerek Bingham modeli oluşturulmuştur. Bu grafikte doğrunun, tork eksenini kestiği nokta, görünen akma gerilmesi (g) olarak belirlenmiş ve doğrunun eğimi ise tork plastik viskozite (h) olarak belirlenmiştir. Reoloji deneylerinde belirlenen parametreler, ayrıca, karıştırma işleminden 90 dakika ve 150 dakika sonra da ölçülmüştür.



(a)



(b)



(c)



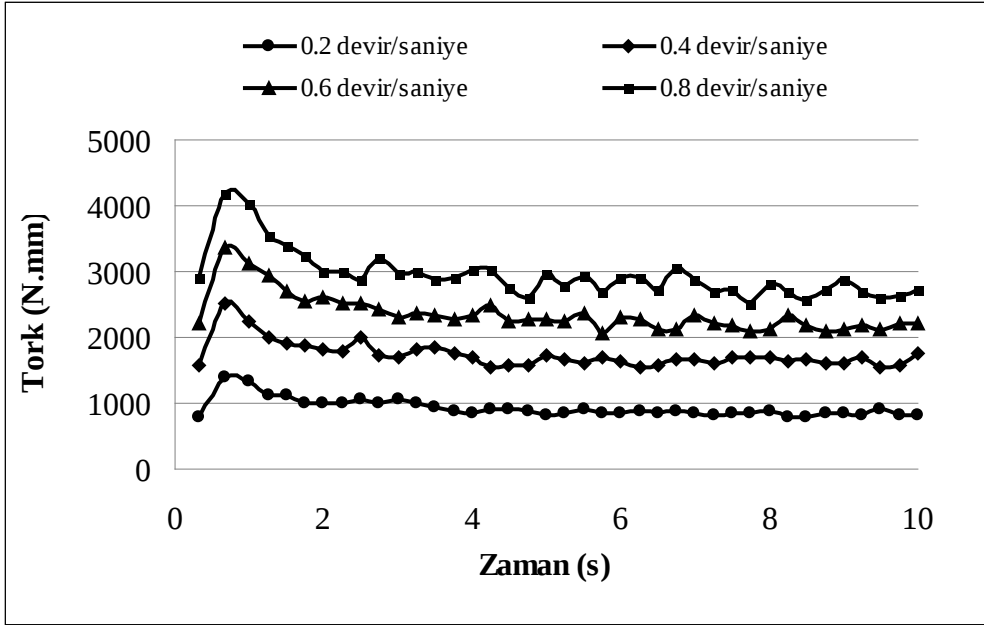
(d)

Şekil 5.7 a ve b) Reometre test ünitesi, c) ölçüm ünitesi, d) bilgisayar bağlantısı

5.5.3 Tiksotropi Deneyi

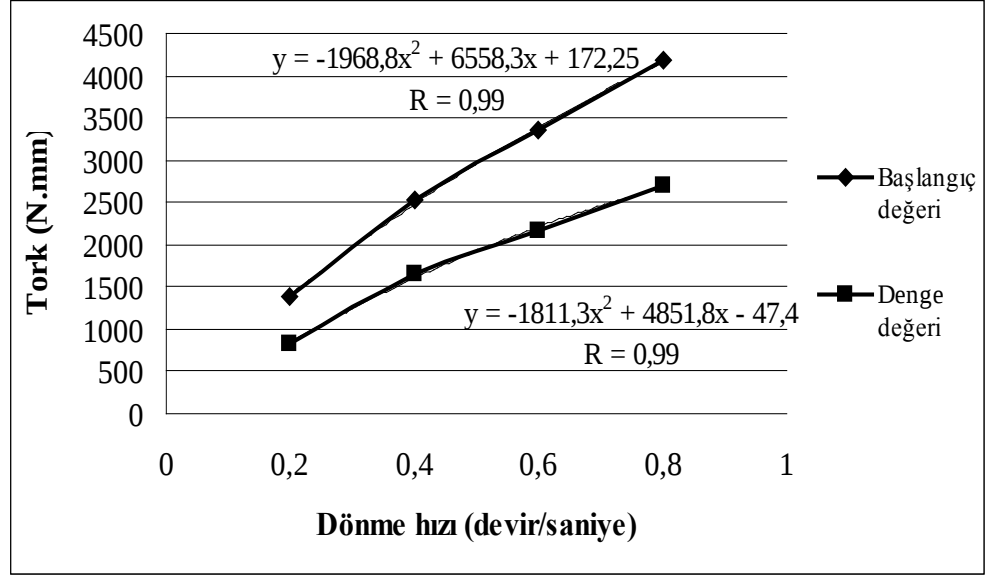
Tiksotropi deneyleri de ConTec 4SCC reometresi kullanılarak yapılmıştır. Reolojik parametrelerin ölçümü sırasında tiksotropi ölçümleri de yapılmıştır. Tiksotropi dört farklı yöntemle belirlenmiştir. Birinci yöntem, Lapasin vd. (1983)

tarafından önerilen “Yapısal Çökme Alanı” yöntemidir. Reometre kabına konulan taze KYB karışımı, belirli bir dinlenme süresi sonunda (5 dakika) sonunda, sabit bir dönme hızı (0.2 devir/saniye) ile kesmeye maruz bırakılmıştır. Aynı şekilde her seferinde 5 dakika bekleme süresinin ardından betonlar 0.4, 0.6 ve 0.8 devir/saniye sabit hızlarda kesmeye maruz bırakılmıştır. Tüm hızlar için kesme uygulama süresi 10 saniye olmuştur. Bu hızlar ve süre reometre kapasitesi ve literatürdeki çalışmalara göre seçilmiştir. Ölçümler sonunda betonun denge değerinin yaklaşık 6 saniyeden sonra sağlandığı görülmüş ancak güvenli tarafta kalmak için deneyler 4 saniye daha uzatılmış, tüm hızlar için kesme uygulama süresi 10 saniye olmuştur. Her hızda, torkun zamana bağlı değişimi gözlenmiş, her hız için hareketi başlatacak başlangıç (maksimum) ve denge değerleri tespit edilmiştir. Denge değerleri, son 3 saniyedeki 12 verinin ortalamasıdır. Elde edilen sonuçlar, tork-hız grafiğinde toplanıp, başlangıç değerleri için elde edilen eğri ile denge değerleri için elde edilen eğri arasında kalan alan hesaplanmıştır. Şekil 5.8’de dört hız için kesme sonucu zaman içinde tork değişimi verilmiştir.



Şekil 5.8 Dört farklı hızda torkun zamana bağlı değişimi

Şekil 5.9’da dört farklı dönme hızı için başlangıç (maksimum) ve denge değerlerini gösteren grafik verilmiştir. Başlangıç tork değerlerinin oluşturduğu eğri ile denge tork değerlerinin oluşturduğu eğri arasında kalan alan eğrilerin denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır.



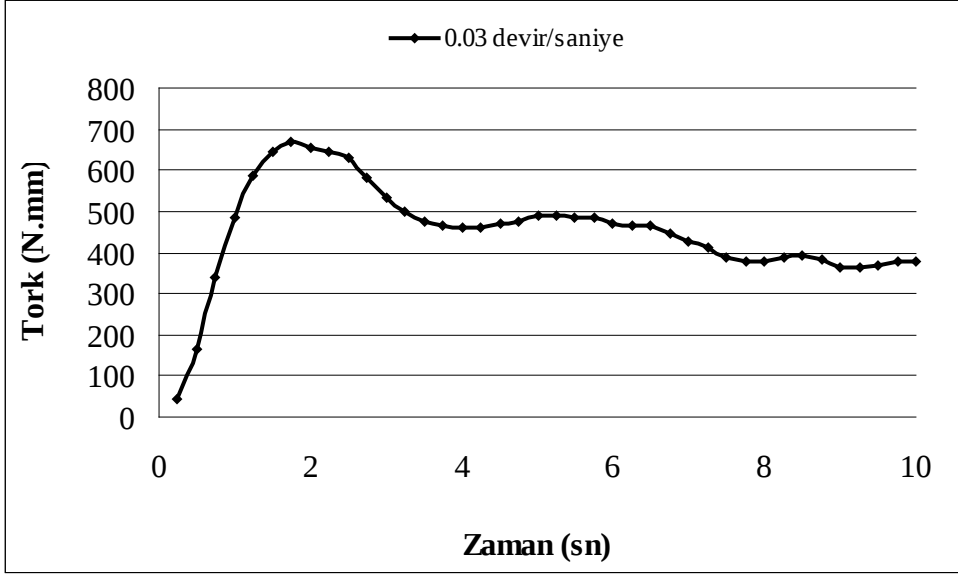
Şekil 5.9 Yapısal çökme alanının hesaplanmasına örnek

Tiksotropi belirleme yöntemlerinden ikincisi “Relatif Tork Farkı” yöntemidir. Bu yöntemde taze betona belirli bir dinlenme (5 dakika) sonunda, sabit bir dönme hızı (0.4 devir/saniye) ile kesme uygulanmış, başlangıç ve denge değerleri bulunmuştur. Bu değerler arasındaki fark denge değerine bölünerek sonuçlar yüzde olarak ifade edilmiştir.

Üçüncü yöntem, “Görünen Viskozite Düşüşü” yöntemi olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemde, relatif tork farkı yönteminde uygulanan işlemler uygulanmıştır. Torkun başlangıç ve denge değerleri arasındaki fark dönme hızına bölünmüştür.

Dördüncü yöntem ise, “Dinlenmede eşik değeri” yöntemidir. Bu yöntemde taze betona belirli bir dinlenme süresi (5 dakika) sonunda, sabit bir dönme hızı (0.03 devir/saniye) ile 10 saniye boyunca kesme uygulanmıştır. Bu yöntemde dönme hızı oldukça düşüktür. Deney sırasında, uygulanan tork miktarının, zamana bağlı olarak değişimi kaydedilmiştir. Kaydedilen maksimum tork değeri dinlenmede eşik değeri olarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.10’da dinlenmede eşik değeri yöntemi ile elde edilen tork-zaman grafiği gösterilmiştir.

Dinlenmede eşik değeri yöntemi için alınacak ölçümler, taze betonun reolojik parametrelerini belirlemek için yapılan ölçümlerden sonra alınmıştır. Daha sonra yapısal çökme alanı, relatif tork farkı ve görünen viskozite düşüşü yöntemleri için ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.10 Dinlenmede eşik değeri için torkun zamana bağlı değişimi

Üretilen KYB karışımlarının tiksotropik özelliklerini belirlemek amacıyla yukarıda bahsedilen dört yöntem için yukarıda belirtilen hesaplamalar yapılmıştır. Dört yöntemde hesaplanan yapısal çökme alanı, relatif tork farkı, görünen viskozite düşüşü ve dinlenmede eşik değeri tiksotropinin bir büyüklüğü olarak dikkate alınmıştır. Tiksotropi ölçümleri beton karıştırma işleminden 90 ve 150 dakika sonra da gerçekleştirilmiştir.

5.5.4 Yanal Kalıp Basıncı Deneyi

Taze betonun kalıba yaptığı yanal kalıp basıncı belirlemek amacıyla Şekil 5.11’de görülen çelik basınç kalıbı kullanılmıştır. Kalıp, 20x20 cm kare kesitli olup, 70 cm yüksekliğindedir. Kalıbın üst kısmında hava geçirmez bir kapak bulunmaktadır. Basınç, kalıba yerleştirilen basınç sensörleri ile ölçülmüştür. Ölçülen veriler veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmıştır. Basınç sensörleri kalıbın tabanından 5 cm, 20 cm ve 35 cm yükseklikte bulunmaktadır. Bütün karışımlar için iki farklı döküm hızında (5 m/saat ve 10 m/saat) yerleştirme yapılmıştır. Beton kalıbın 50 cm yüksekliğine kadar doldurulmuştur. Tez kapsamında 10 m yüksekliğinde bir betonun yaptığı yanal basıncı belirlemek için kalıbın üstü kapakla kapatılmış ve kompresör yardımıyla kalıbın içine hava basıncı uygulanmıştır. Uygulanan hava basıncının miktarı, 10 m yüksekliğinde bir kolonu dolduracak beton ağırlığını temsil edecek kadardır. Deney, beton sertleşmeden önce sonra erdirilmiştir.



Şekil 5.11 Basınç kalıbı

5.5.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

5.5.5.1 Tek Eksenli Basınç Deneyi

Tek eksenli basınç deneyleri 200 ton kapasiteli hidrolik beton presi ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 3 kN/s olarak ayarlanmıştır. Her karışım için üçer adet 100 mm ayrıtlı küp numune 7 ve 28. günlerde deneye tabi tutulmuştur.

5.5.5.2 Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyleri 200 ton kapasiteli hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 3 kN/s olarak ayarlanmıştır. Yarılmanın gerçekleşmesi için numunenin alt ve üstüne çentikli çelik plaka yerleştirilmiştir. Çelik plakanın betonu ezmemesi için ve deney sonuçlarının sağlıklı olması amacıyla çelik plaka ile beton numune arasına ahşap kontrplak konulmuştur. Her karışım için üçer adet 100 mm ayrıtlı küp numune 7 ve 28. günlerde deneye tabi tutulmuştur.

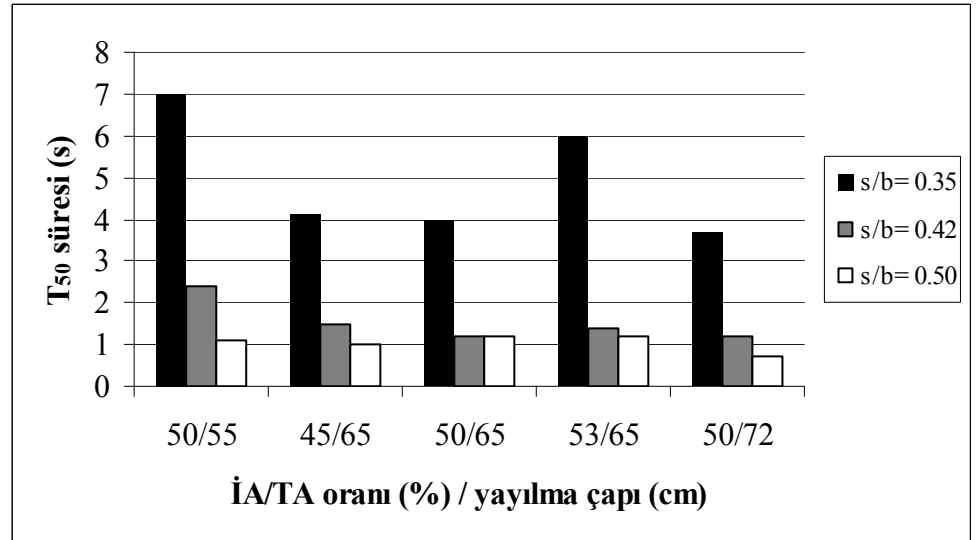
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde taze beton, reoloji, tiksotropi, kalıp basıncı ve sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar tablo ve şekillerle detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

6.1 Taze Beton Deney Sonuçları

15 farklı kompozisyonda üretilen KYB karışımlarının yayılma çapı, T_{50} süresi, V-hunisi akış süresi, 5 dakika gecikmeli V-hunisi akış süresi, L-kutusu oranı (H2/H1), L-kutusu $T_{20\text{ cm}}$ ve $T_{40\text{ cm}}$ süreleri, birim hacim ağırlığı, ortam ve beton sıcaklığı, görünür stabilite indeksi değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

15 farklı karışımın T_{50} süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranı ile değişimi Şekil 6.1’de verilmiştir. Aynı s/b oranı için yayılma çapı arttıkça T_{50} süreleri azalmıştır. Karışımlarda viskozitenin azalması, yayılma çapının artmasına neden olmuştur. Aynı yayılma çapı için s/b oranı arttıkça T_{50} süreleri azalmıştır. Karışımların s/b oranındaki artış yine plastik viskozitelerinin düşmesine neden olmuştur. Aynı yayılma çapına sahip 45/65, 50/65 ve 53/65 karışımlarında s/b oranı 0.35 için en yüksek T_{50} süresi İA/TA oranı 0.53 olan karışıma aittir. İri agrega miktarı arttıkça karışımda içsel sürtünme arttığından akış süresi de artmıştır. 0.42 ve 0.50 s/b oranında yayılma çapı ve İA/TA oranının etkisi 0.35 s/b oranı kadar belirgin değildir.



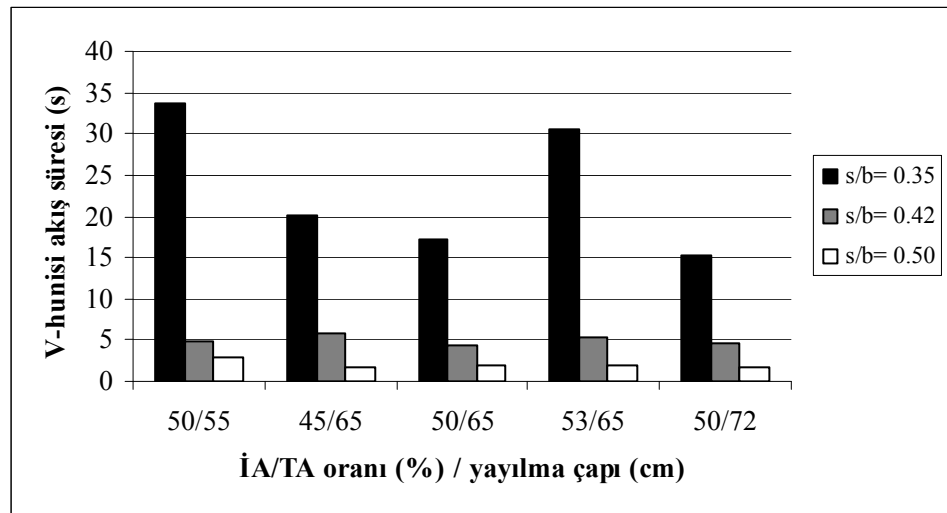
Şekil 6.1 T_{50} süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranı ile değişimi

Tablo 6.1 Taze beton deney sonuçları

Karışım Adı	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
Yayılma çapı (cm)	67	55	67	72	67	65	55	63	73	65	64	55	65	71	65
T ₅₀ süresi (s)	4.1	7.0	4.0	3.7	6.0	1.5	2.4	1.2	1.2	1.4	1.0	1.1	1.2	0.7	0.8
V-hunisi süresi (s)	20,1	33.7	17.2	15,2	30.6	5.7	4.8	4.3	4.5	5.4	1.7	2.8	1.9	1.8	1.9
Gecikmeli V-hunisi süresi (s)	30,2	48,8	20.6	18.5	45.6	7.2	6.4	5.8	4.9	6.3	1.9	4.1	2.3	2.1	2.9
L-kutusu oranı (H2/H1)	0.78	0.20	0.55	0.91	0.64	0.52	0.31	0.40	0.90	0.43	0.49	0.43	0.60	0.90	0.60
L-kutusu T _{20 cm} (s)	3.6	6.2	6.2	2.6	6.6	<1	<1	<1	<1	1.3	<1	<1	<1	<1	<1
L-kutusu T _{40 cm} (s)	9.9	13.9	14.4	7.3	15.4	2.6	2.5	3.7	2.8	7	<1	<1	<1	<1	<1
Birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	2414	2400	2393	2407	2414	2357	2350	2350	2360	2350	2296	2309	2302	2292	2290
Ortam sıcaklığı (°C)	19	18	18	19	19	20	18	18	19	21	24	23	22	20	24
Beton sıcaklığı (°C)	19.6	19.1	19.5	20.3	20.4	22	19.5	19.8	20	22.5	23.9	22.6	22.5	20.6	24.4
Görünür stabilite indeksi	1	2	1	2	2	1	1	1	2	1	1	2	1	3	2
Akışkanlaştırıcı (Bağlayıcı miktarının ağırlıkça %'si)	1.46	1.23	1.37	1.52	1.37	0.81	0.67	0.79	0.90	0.77	0.60	0.48	0.60	0.62	0.58

Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımın yayılma çapı 55 cm'den 72 cm'ye çıkınca, T_{50} süresi 7 saniyeden 3.7 saniyeye düşmüştür. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımda ise yayılma çapı 55 cm'den 72 cm'ye çıkınca, T_{50} süresi 1.1 saniyeden 0.7 saniyeye düşmüştür. Su/bağlayıcı oranı arttıkça karışımların viskoziteleri azaldığı için yayılma çapı değişimi ile T_{50} süresindeki değişim azalmaktadır.

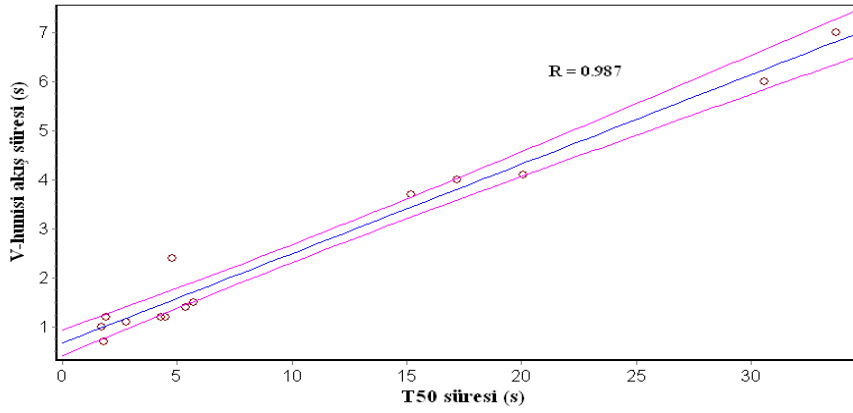
V-hunisi akış süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranı ile değişimi Şekil 6.2'de gösterilmiştir. 55 cm yayılma çapına sahip karışımlarda s/b oranı 0.35 olan karışımın akış süresi 33.7 saniye iken, s/b oranı 0.50'ye yükselince akış süresi 2.8 saniyeye düşmüştür. Benzer düşüş, 65 ve 72 cm yayılma çapına sahip karışımlarda da olmaktadır. V-hunisi akış süresi karışımların viskoziteleri ile ilişkilendirilebilir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça karışımın viskozitesi düştüğü için akış daha kolay olmakta ve akış süresi azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda İA/TA oranı 0.53 olan karışımın akış süresi 0.45 ve 0.50 olan karışımlara göre daha fazla olmuştur. İri agrega miktarındaki artış akış süresini arttırmıştır. Viskozitesi daha düşük olan s/b oranı 0.42 ve 0.50 olan karışımlarda ise iri agrega miktarındaki değişim akış sürelerini pek etkilememiştir.



Şekil 6.2 V-hunisi akış süresinin s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranı ile değişimi

T_{50} süresi ile V-hunisi akış süresi arasındaki ilişki Şekil 6.3'te verilmiştir. Bu iki parametre arasında yakın bir ilişki olduğu gözlenmektedir. 15 karışım arasından bir tanesi %95 güven aralığının dışında kalmaktadır. Karışımların T_{50} süreleri arttıkça V-hunisi akış sürelerinde de artış meydana gelmiştir. Düşük

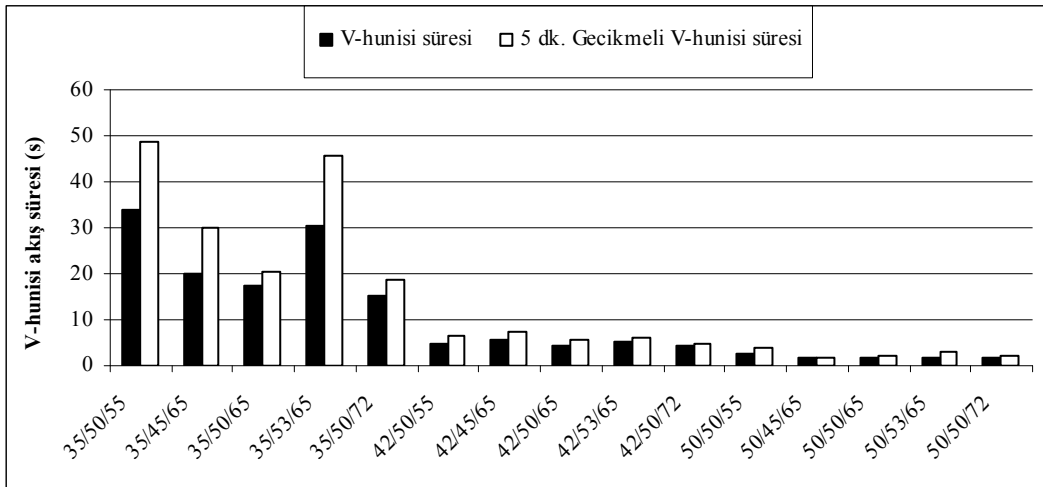
viskoziteli karışımlarda hem T_{50} süresi hem de V-hunisi akış süresi düşük çıkmıştır.



Şekil 6.3 T_{50} süresi ile V-hunisi akış süresi arasındaki ilişki

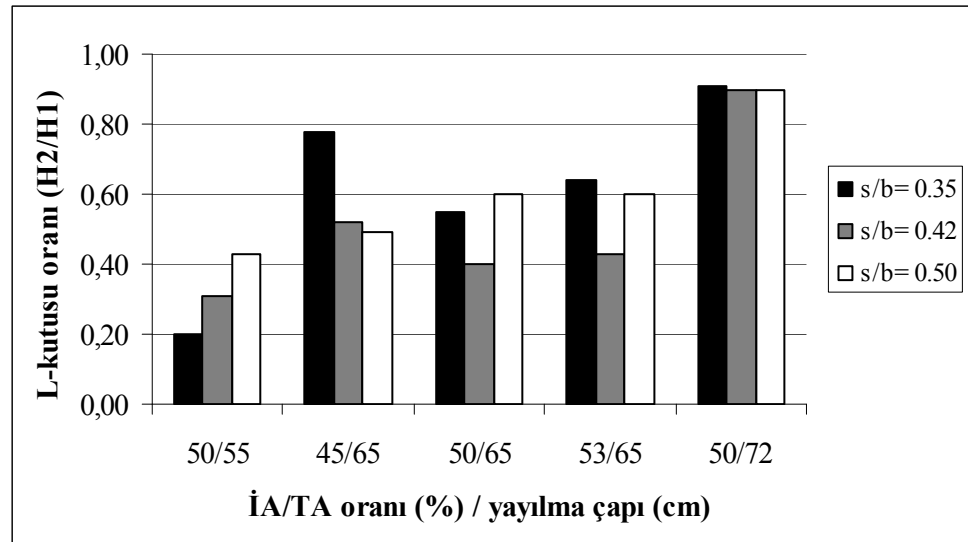
Her iki deneyin sonucunun taze betonun plastik viskozitesine bağlı olduğu literatürde belirtilmektedir. Tez kapsamında hazırlanan KYB karışımlarında literatürde bahsedilen bu duruma uygun sonuçlar çıkmıştır.

V-hunisi akış süresinin zamanla değişimi Şekil 6.4'te verilmiştir. Karışım hazırlandıktan hemen sonra ölçülen V-hunisi süresi ile 5 dakika gecikmeli V-hunisi her karışım için karşılaştırılmıştır. Viskozitesi düşük olan karışımlarda (s/b oranı 0.50) zamanla akış süresinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımların viskozitesi yüksek olduğu için gecikmeli akış süresi viskozitesi düşük olan karışımlara oranla daha çok artmıştır.



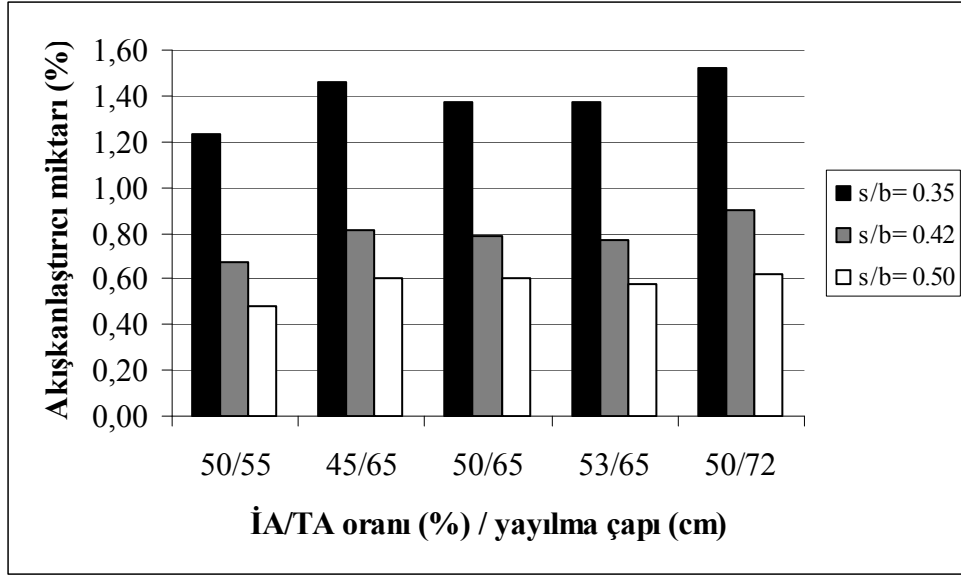
Şekil 6.4 V-hunisi akış süresinin zamanla değişimi

L-kutusu deneyi sonucu elde edilen H_2/H_1 oranının s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi Şekil 6.5'te gösterilmiştir. KYB'nin geçiş yeteneğinin s/b oranına bağlı olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca karışımların yayılma çapı arttıkça L-kutusu oranı da artmıştır. Karışımların $\dot{I}A/TA$ oranındaki değişimi ile L-kutusu oranı arasında sağlıklı bir ilişki kurulamamaktadır. L-kutusu deneyinde betonun 20 cm ve 40 cm'den geçiş süresi ise taze betonun viskozitesi ile ilişkilendirilebilir. Tablo 6.1'de görüldüğü gibi karışımın s/b oranı arttıkça geçiş süresi azalmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 ve $\dot{I}A/TA$ oranı 0.53 olan karışım 20 cm ve 40 cm'den geçiş süresi sırasıyla 6.6 ve 15.4 saniyedir. 0.35 s/b oranı ve 0.45 $\dot{I}A/TA$ oranına sahip karışım ise geçiş süreleri 3.6 ve 9.9 saniyedir. Karışımın iri agrega miktarının artmasıyla donatılar arasından geçiş zorlaşmakta ve geçiş süresinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.5 L-kutusu oranının s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi

Karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcı miktarının s/b oranı, yayılma çapı ve $\dot{I}A/TA$ oranı ile değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir. Su/bağlayıcı oranının artmasıyla karışımların akışkanlaştırıcı ihtiyacı azalmaktadır. Aynı s/b oranında ise yayılma çapını arttırmak için akışkanlaştırıcı dozajını arttırmak gerekmektedir. Akışkanlaştırıcı katkılar çimento ile etkileşimde olduğu için $\dot{I}A/TA$ oranı ile akışkanlaştırıcı miktarı arasında doğrudan ilişki kurmak doğru değildir.



Şekil 6.6 Akışkanlaştırıcı miktarının s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranı ile değişimi

Taze betonların birim hacim ağırlıkları s/b oranı arttıkça azalmıştır. Üretilen 15 farklı karışımın 14 tanesinin görünür stabilite indeksi 1 ve 2 olarak belirlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda yüksek akışkanlaştırıcı dozajı kullanıldığı için betonların yüzeyinde hava kabarcığı gözlenmiştir. 50/50/72 karışımında diğer karışımlara göre daha çok ayrışma gözlenmiş ve görünür stabilite indeksi 3 olarak belirlenmiştir.

EFNARC (2005), KYB işlenebilirlik deney sonuçları için bazı sınıflandırmalar yapmıştır. Tablo 6.2’de yapılan deneylere göre sınıflandırmalar verilmiştir.

Tablo 6.2 KYB işlenebilirlik deney sonuçlarına göre sınıflandırma (EFNARC, 2005)

Deney	Sınıf	Aralık
Yayılma çapı	SF1	550–650 mm
	SF2	660–750 mm
	SF3	760–850 mm
T_{50} süresi	VS1	≤ 2 saniye
	VS2	> 2 saniye
V-hunisi akış süresi	VF1	≤ 8 saniye
	VF2	$> 9-25$ saniye
Geçiş kabiliyeti	PA2	$\geq 0,80$

Tablo 6.3’te üretilen 15 farklı KYB için yayılma çapı, T_{50} süresi, V-hunisi ve L-kutusu deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlara göre sınıflandırma

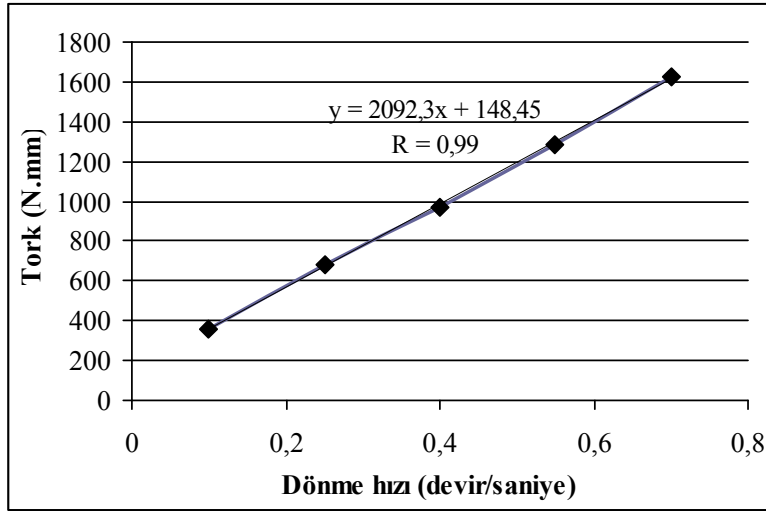
yapılmıştır. 72 cm yayılma çapına sahip karışımlar SF2 ve PA2 sınıfında yer almıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlar VS2 ve VF2 sınıfında, 0.42 ve 0.50 s/b oranına sahip karışımlar ise VS1 ve VF1 sınıfında bulunmaktadır.

Tablo 6.3 15 KYB karışımı için yapılan deneylere göre sınıflandırma

Karışım	Yayılma çapı	T ₅₀ süresi	V-hunisi akış süresi	Geçiş kabiliyeti
35/45/65	SF1	VS2	-	-
35/50/55	SF1	VS2	-	-
35/50/65	SF1	VS2	VF2	-
35/50/72	SF2	VS2	VF2	PA2
35/53/65	SF1	VS2	-	-
42/45/65	SF1	VS1	VF1	-
42/50/55	SF1	VS2	VF1	-
42/50/65	SF1	VS1	VF1	-
42/50/72	SF2	VS1	VF1	PA2
42/53/65	SF1	VS1	VF1	-
50/45/65	SF1	VS1	VF1	-
50/50/55	SF1	VS1	VF1	-
50/50/65	SF1	VS1	VF1	-
50/50/72	SF2	VS1	VF1	PA2
50/53/65	SF1	VS1	VF1	-

6.2 Reoloji Deneyi Sonuçları

Reometre ile yapılan deneylerde, 5.5.2 bölümünde belirtildiği gibi 0.70, 0.55, 0.40, 0.25 ve 0.10 devir/saniye hızlarında 6'şar saniye boyunca kesmeye maruz bırakılan betonlardan bir tanesine ait örnek bir reogram Şekil 6.7'de verilmiştir. Bu grafikte, her bir hız değerine karşılık gelen tork değeri gözükmemektedir. Alınan verilere doğrusal eğilim çizgisi eklenmiş ve Bingham modeline uygun olduğu anlaşılmıştır. Doğrusal eğilim çizgisinin R değeri 0.99 olarak hesaplanmıştır. Bütün karışımlarda R değeri 0.99 mertebesinde çıkmıştır. Eğilim çizgisinin, tork eksenini kesen nokta, görünen akma gerilmesine karşı tork değeri (g) olarak belirlenmiş ve doğrunun dönme hızı eksenine göre eğimi ise tork plastik viskozite (h) olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde elde edilen g ve h değerleri ile ayrıca, reoloji deneyleri beton karışımı hazırlandıktan 90 ve 150 dakika sonra da tekrarlanmıştır. Bütün karışımlar için belirlenen reoloji parametreleri Tablo 6.4'te sunulmuştur.

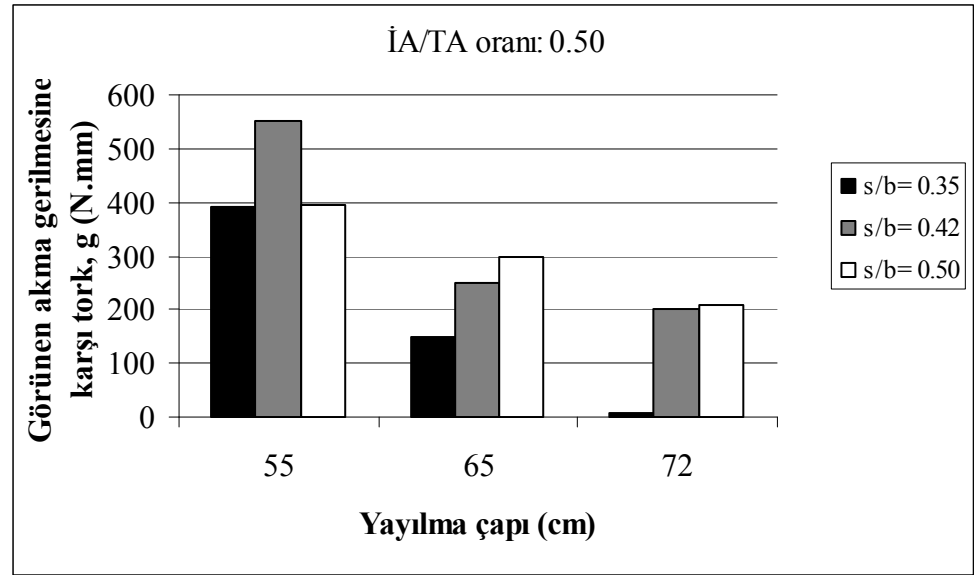


Şekil 6.7 35/50/55 karışımına ait reogram (0. dakika)

Tablo 6.4 KYB karışımlarının 0, 90 ve 150 dakika sonundaki reolojik parametreleri

Karışım	Görünen akma gerilmesine karşı tork (g) (N.mm)			Tork plastik viskozite (h) (N.mm.s)		
	0'	90'	150'	0'	90'	150'
35/45/65	157.6	428.4	1000.0	2541.0	3383.0	3451.0
35/50/55	391.0	1055.0	2054.0	2361.5	2729.0	2839.0
35/50/65	148.5	272.1	449.1	2092.3	2576.0	2533.0
35/50/72	9.3	70.7	125.0	2050.0	2297.0	2104.0
35/53/65	168.0	401.7	699.7	2157.0	2667.0	2621.0
42/45/65	347.7	885.6	1218.0	863.2	1009.0	1090.0
42/50/55	552.0	1366.0	1874.0	798.4	882.6	1044.0
42/50/65	250.3	611.9	1012.0	726.9	844.0	848.3
42/50/72	199.8	485.2	895.3	721.1	763.5	771.6
42/53/65	182.5	300.9	508.4	708.4	806.4	767.7
50/45/65	338.8	460.4	531.7	252.6	363.0	415.1
50/50/55	396.8	600.5	703.9	413.7	597.6	573.3
50/50/65	299.7	444.9	542.1	298.2	381.3	408.4
50/50/72	210.0	383.8	477.9	174.4	277.8	318.3
50/53/65	261.3	439.0	541.3	279.8	394.5	370.2

Üretilen KYB karışımlarının yayılma çapı ile görünen akma gerilmesine karşı tork değeri (g) arasındaki ilişki Şekil 6.8'de verilmiştir.

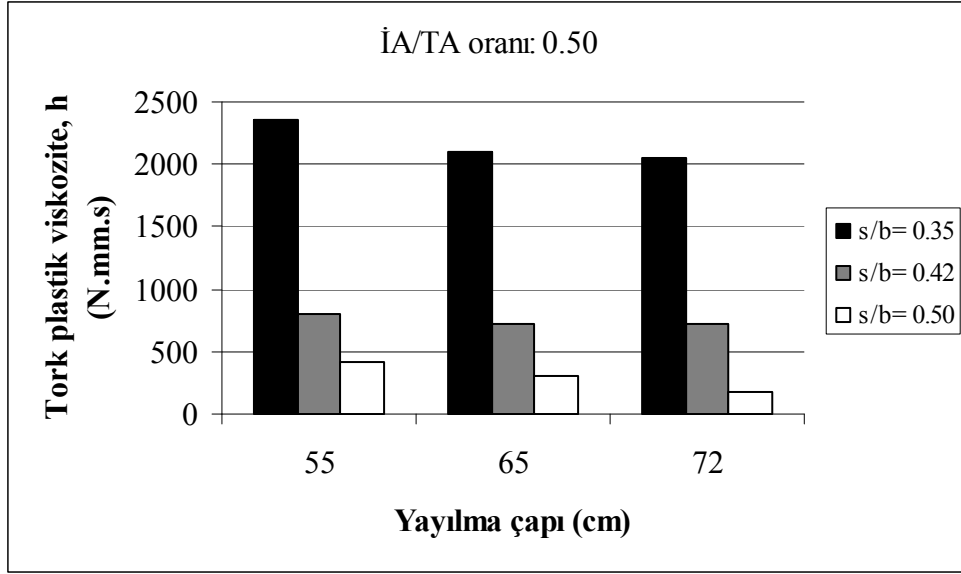


Şekil 6.8 Yayılma çapı ve s/b oranı ile görünen akma gerilmesine karşı tork (g) ilişkisi

Aynı s/b oranına sahip KYB karışımlarında yayılma çapının arttırılması için gerekli akışkanlaştırıcı ihtiyacı artmıştır. Akışkanlaştırıcının artması çimento tanelerinin birbirinden uzaklaşmasına neden olmuş ve betonların akışı kolaylaşmıştır. Akışın kolaylaşmasıyla görünen akma gerilmesine karşı tork azalmıştır. Aynı yayılma çapına sahip karışımlarda ise s/b oranının artmasıyla görünen akma gerilmesine karşı tork azalmıştır. Düşük s/b oranındaki karışımlarda akışkanlaştırıcı ihtiyacı arttığı için akma hareketini başlatmak kolaylaşmış ve görünen akma gerilmesine karşı tork azalmıştır.

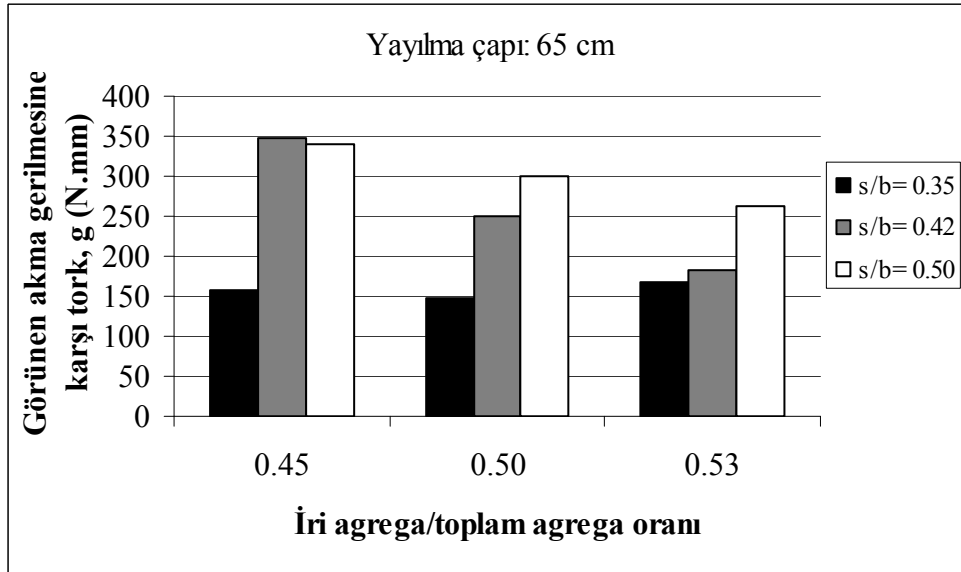
Yayılma çapı ile tork plastik viskozite (h) arasındaki ilişki Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Aynı s/b oranında yayılma çapının artışıyla tork plastik viskozite değerleri düşmüştür. Yayılma çapı arttıkça karışımda akışkanlaştırıcı miktarı artmıştır. Akışkanlaştırıcı miktarının artışıyla çimento tanelerinin arası açılmış ve akış kolaylaşmıştır. Akışın kolaylaşmasıyla görünen akma gerilmesi gibi tork plastik viskozite de azalmıştır. Aynı yayılma çapına sahip karışımlarda s/b oranının artmasıyla tork plastik viskozite azalmıştır. Su/bağlayıcı oranı yüksek olan karışımlarda katı malzeme miktarı azalmaktadır. Bu da karışımın viskozitesini azaltmaktadır.

Aynı yayılma çapına sahip karışımlarda s/b oranı arttıkça akma hareketini başlatmak daha zor (yüksek g değeri), hareket başladıktan sonra ise akmanın ilerlemesi daha kolaydır (düşük h değeri).



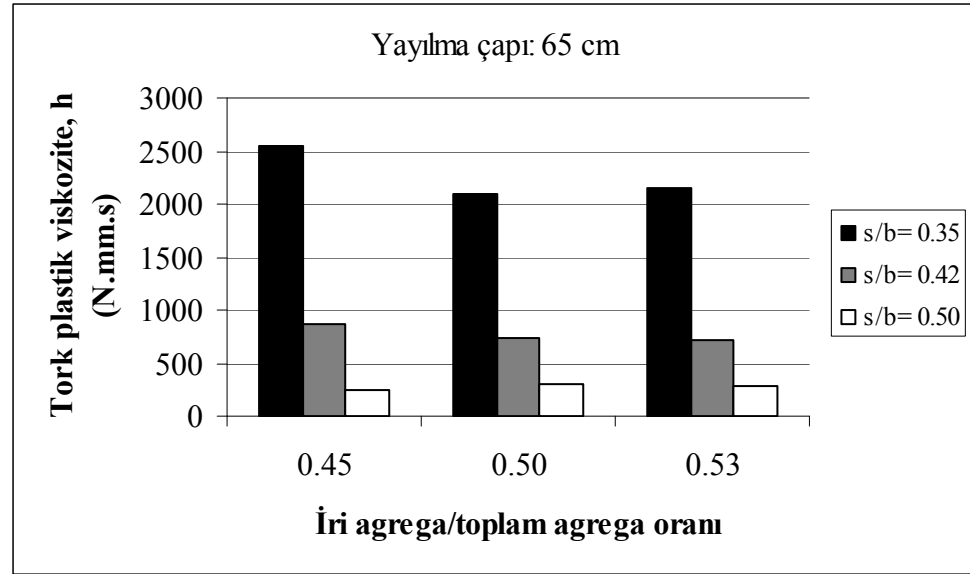
Şekil 6.9 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tork plastik viskozite (h) arasındaki ilişki

Karışımların iri agrega/toplam agrega (İA/TA) ile görünen akma gerilmesi arasındaki ilişki Şekil 6.10'da verilmiştir. Karışımların yayılma çapları 65 cm'de sabit tutulmuştur. Genel olarak, İA/TA oranının artmasıyla görünen akma gerilmesinin azaldığı görülmüştür. Karışımın İA/TA oranının artmasıyla iri agrega miktarı artmakta ve betondaki toz malzeme miktarı azalmaktadır. Toz malzeme miktarının azalmasıyla karışımdaki serbest su artmakta ve taze betonun akmasını başlatacak gerilme (g) azalmaktadır.



Şekil 6.10 İA/TA oranı ile görünen akma gerilmesine karşı tork (g) arasındaki ilişki

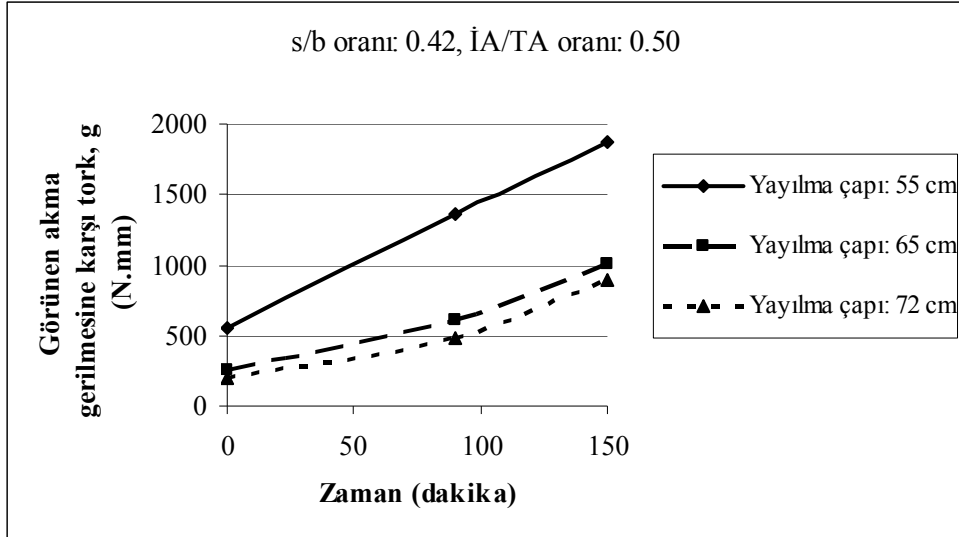
İri agrega/toplam agrega oranı ile tork plastik viskozite arasındaki ilişki Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda İA/TA oranı 0.45’ten 0.50’ye düştüğünde tork plastik viskozite de azalmıştır. İA/TA oranı 0.50 ile 0.53 arasında tork plastik viskozite değişmemiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.42 ve 0.50 olan karışımlarda ise iri agrega artışıyla tork plastik viskozitede belirgin bir değişim gözlenmemiştir.



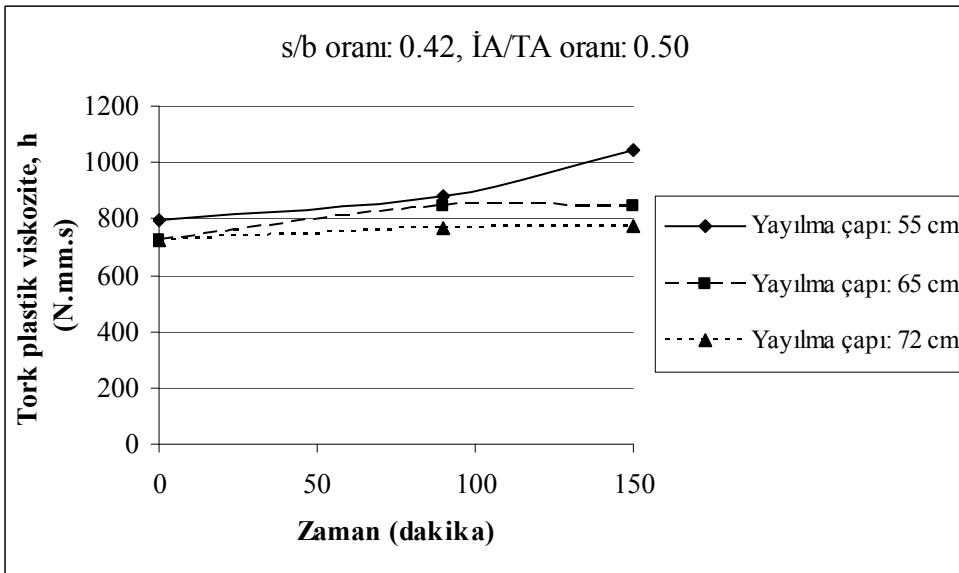
Şekil 6.11 İA/TA oranı ile tork plastik viskozite (h) arasındaki ilişki

Görünen akma gerilmesine karşı tork değerlerinin zamanla değişimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Şekildeki grafikler s/b oranı 0.42 ve İA/TA oranı 0.50 olan karışımlar içindir. Görünen akma gerilmesine karşı tork değerinin zamanla arttığı Şekil 6.12’de görülmektedir. Bu durum diğer karışımlar için de geçerlidir. Zamanla hidratasyonun gelişmesiyle karışım suyunun azalması, karışımın katılaşması ve karışımda kullanılan akışkanlaştırıcının etkisinin azalması görünen akma gerilmesine karşı tork değerinde artışa neden olmuştur. Üç farklı yayılma çapı için (55 cm, 65 cm ve 72 cm) zamanla görünen akma gerilmesine karşı torkta artış birbirine benzerdir.

Zamanın tork plastik viskozite üzerindeki etkisi Şekil 6.13’te gösterilmiştir. Şekil deki grafikler s/b oranı 0.42 ve İA/TA oranı 0.50 olan karışımlar içindir. Tork plastik viskozite değerleri zamanla artmıştır. Ancak bu artış görünen akma gerilmesine karşı tork kadar belirgin değildir. Zamanla viskozitenin artmasındaki nedenler, görünen akma gerilmesine karşı torkta olduğu gibi hidratasyon gelişimi, serbest suyun azalması ve akışkanlaştırıcı etkisinin azalmasıdır.



Şekil 6.12 Görünen akma gerilmesinin zamanla değişimi



Şekil 6.13 Tork plastik viskozitenin zamanla değişimi

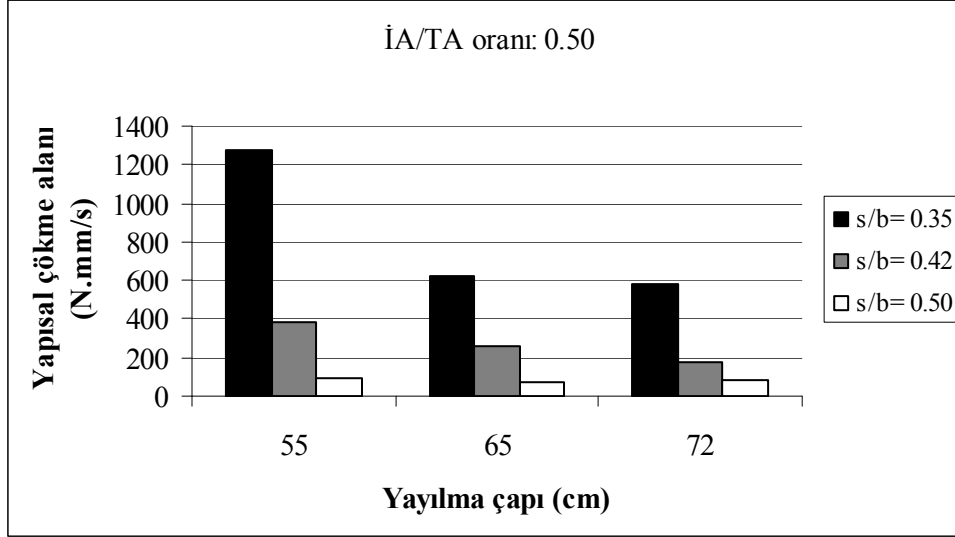
6.3 Tiksotropi Deneyi Sonuçları

Tiksotropi deneyi sonuçları, 5.5.3. bölümde anlatıldığı gibi dört farklı yöntemle belirlenmiştir. Bu dört farklı yöntemle hesaplanan yapısal çökme alanı, relatif tork farkı, görünen viskozite düşüşü ve dinlenmede eşik değeri tiksotropinin bir büyüklüğü olarak dikkate alınmıştır. Bu yöntemler ile elde edilen sonuçların birimleri farklı olduğu için yöntemler kendi içinde değerlendirilmiştir. Tablo 6.5'te 4 farklı yöntemle hesaplanan tiksotropi değerleri verilmiştir.

Tablo 6.5 Dört farklı yöntemle hesaplanan tiksotropi değerleri

	Yapısal çökme alanı (N.mm/s)			Relatif tork farkı (%)			Görünen viskozite düşüşü (N.mm.s)			Dinlenmede eşik değeri (N.mm)		
Karışım	0'	90'	150'	0'	90'	150'	0'	90'	150'	0'	90'	150'
35/45/65	598.6	593.8	678.5	37.2	32.9	45.4	1830.3	1412.5	1762.3	582	550	594
35/50/55	1276.4	1081.7	1370.1	45.6	50.2	43.6	4016.5	4791.5	4655.0	2051	2134	2896
35/50/65	617.3	668.6	633.8	53.2	58.8	56.3	2193.0	2764.8	2881.5	671	898	1227
35/50/72	581.5	516.3	486.6	58.8	48.3	54.2	2306.5	1744.0	1838.5	573	562	567
35/53/65	896.4	596.3	716.0	52.2	32.8	49.8	3725.3	2117.0	3285.0	1728	1529	1600
42/45/65	277.7	354.9	347.2	30.8	31.1	18.3	723.0	1225.5	961.5	523	1219	1668
42/50/55	381.6	425.8	568.9	41.8	32.9	38.6	1390.3	1718.5	2518.0	1174	2158	3500
42/50/65	259.7	260.5	391.3	28.3	26.6	31.8	750.0	797.5	1228.5	370	996	1450
42/50/72	176.0	290.7	338.1	39.1	47.1	34.0	670.5	1244.8	1267.5	371	791	1237
42/53/65	641.7	160.7	738.6	51.3	34.5	40.2	817.3	655.5	1040.8	504	518	814
50/45/65	51.6	61.6	78.9	15.7	10.4	10.0	200.8	180.0	198.0	368	671	735
50/50/55	98.3	183.6	153.1	14.0	35.4	20.5	252.3	900.8	579.3	537	1056	1383
50/50/65	74.6	54.5	97.4	19.0	8.0	13.8	282.8	142.8	294.5	350	719	803
50/50/72	80.4	77.5	66.1	43.7	24.8	16.4	270.0	363.3	275.8	250	465	698
50/53/65	58.4	74.6	130.7	17.8	17.3	29.8	230.5	317.3	621.0	344	733	751

Karışımların s/b oranı ve yayılma çapı ile yapısal çökme alanı arasındaki ilişki Şekil 6.14'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, karışımların aynı s/b oranı için yayılma çapı arttıkça tiksotropi değeri azalmıştır. Karışımında kullanılan akışkanlaştırıcı miktarının artmasıyla kesme kuvveti sonucu oluşan başlangıç ve denge değerleri birbirine yakınlaşmakta ve tiksotropi azalmaktadır.

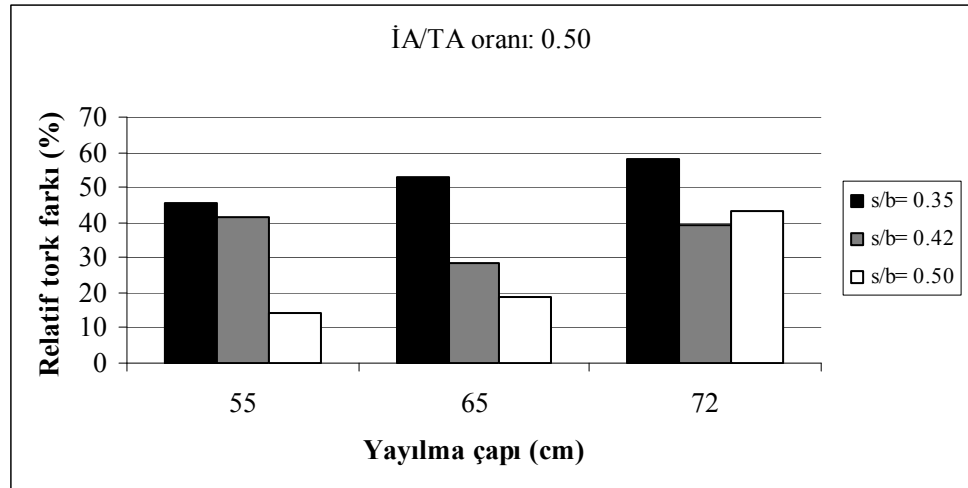


Şekil 6.14 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Yapısal çökme alanı)

Aynı yayılma çapına sahip karışımlarda s/b oranı arttıkça tiksotropi artmıştır. Su/bağlayıcı oranının artmasıyla karışımında daha çok su bulunduğu için başlangıç ve denge değerleri arasındaki fark azalmaktadır. Bunun sonucu tiksotropi azalmaktadır.

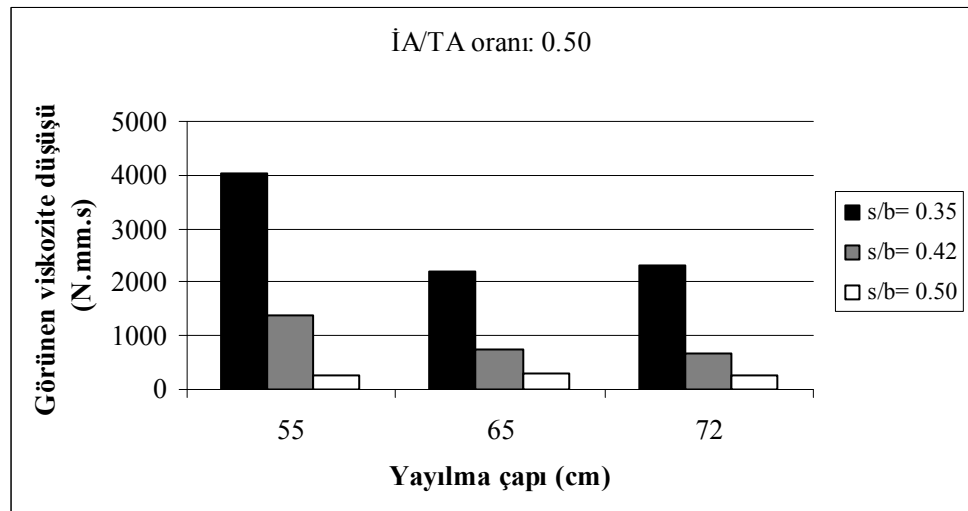
Assaad (2004) yaptığı çalışmada, yapısal çökme alanı yöntemi ile belirlenen tiksotropi değerlerinin düşük yayılma çapında daha yüksek değerler verdiğini belirtmiştir. Ayrıca s/b oranının artmasıyla KYB'lerin tiksotropik özelliklerinin azaldığını rapor etmiştir.

Karışımların s/b oranı ve yayılma çapı ile relatif tork farkı arasındaki ilişki Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır. Aynı dönme hızında başlangıç ve denge gerilmesi arasındaki relatif fark tiksotropinin bir ölçütü olabileceği belirtilse de, sonuçlardan da görüldüğü üzere karışımların tiksotropisi hakkında fikir vermemektedir.



Şekil 6.15 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Relatif tork farkı)

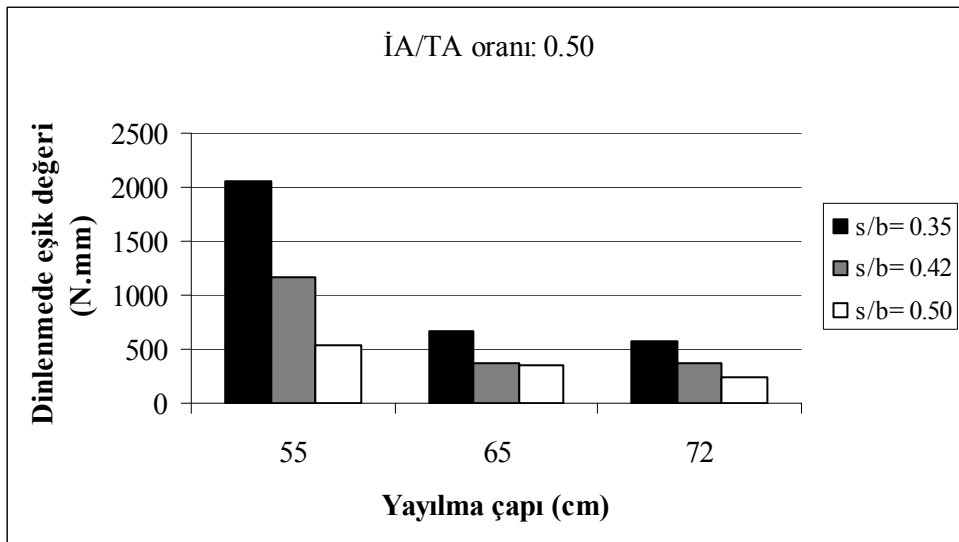
Karışımların s/b oranı ve yayılma çapı ile görünen viskozite düşüşü arasındaki ilişki Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar yapısal çökme alanı yöntemi sonuçlarına benzer çıkmıştır. Aynı s/b oranında yayılma çapı arttıkça tiksotropik özeliği düşmüştür. Yine benzer biçimde s/b oranı arttıkça tiksotropide azalma gözlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda yayılma çapı değişimi tiksotropide önemli ölçüde değişikliğe neden olmaktadır. Ancak s/b oranı 0.50 olan karışımlarda yayılma çapı değişimiyle tiksotropide önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir. Düşük s/b oranındaki karışımlarda katı malzeme miktarı daha yüksektir. Bu karışımlarda hareketi başlatmak için gerekli tork değeri daha yüksek olduğundan tiksotropi de daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.16 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Görünen viskozite düşüşü)

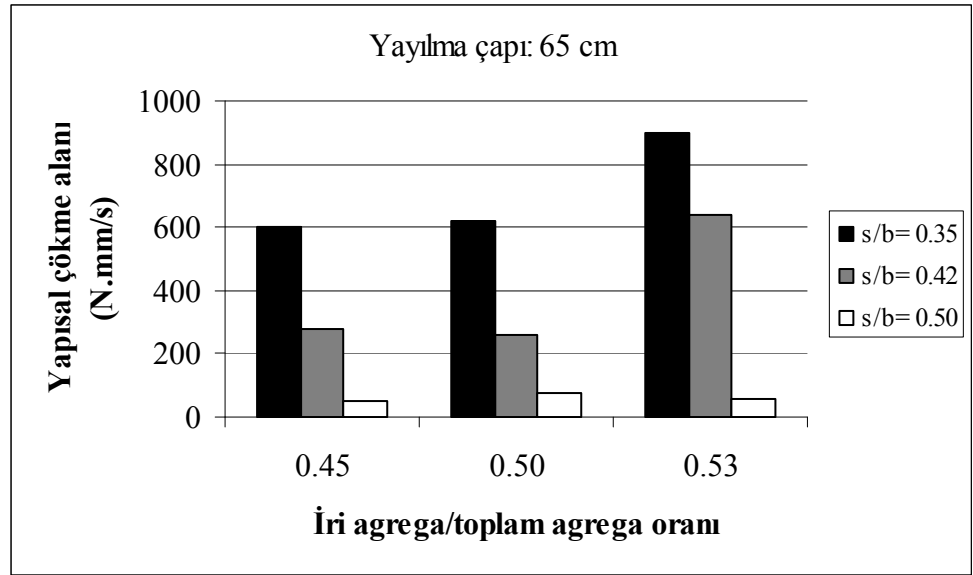
Karışımların s/b oranı ve yayılma çapı ile dinlenmede eşik değeri arasındaki ilişki Şekil 6.17’de verilmiştir. Bu yöntemde elde edilen sonuçlar da yapısal çökme alanı ve görünen viskozite düşüşü yöntemlerinde elde edilen sonuçlara benzer çıkmıştır.

Relatif tork farkı yöntemi dışındaki yöntemlerle elde edilen sonuçlara göre 55 cm yayılma çapına sahip karışımlarda 65 ve 72 cm yayılma çapına göre tiksotropide önemli ölçüde değişim olmaktadır. Düşük s/b oranına sahip karışımlarda s/b oranı yüksek olanlara göre yayılma çapının değişimiyle tiksotropi önemli ölçüde değişmektedir.



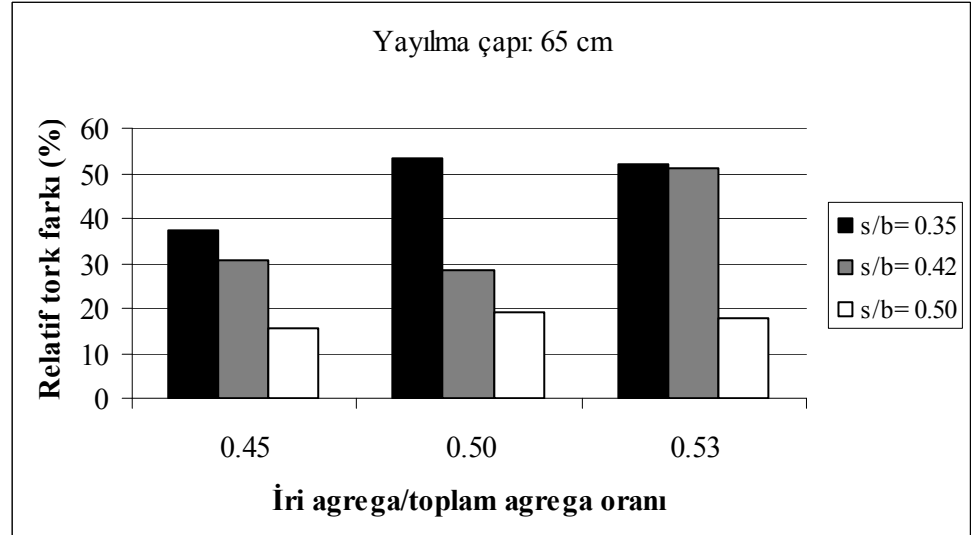
Şekil 6.17 Yayılma çapı ve s/b oranı ile tiksotropi ilişkisi (Dinlenmede eşik değeri)

Üretilen KYB karışımlarının iri agrega/toplam agrega oranı ile yapısal çökme alanı arasındaki ilişki Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Bu yöntemle, s/b oranı 0.35 ve 0.42 olan karışımlarda İA/TA oranı 0.45 ve 0.50 olan karışımlarda tiksotropi değişmezken İA/TA oranı 0.53’e çıktığında tiksotropi artmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımlarda İA/TA oranındaki değişim tiksotropiyi etkilememiştir.



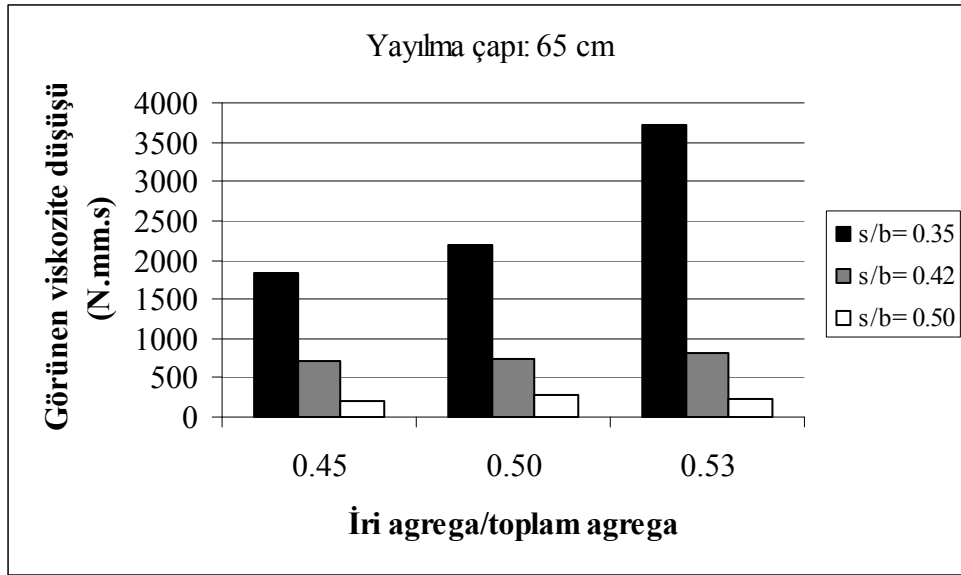
Şekil 6.18 İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (yapısal çökme alanı)

Karışımların İA/TA oranı ile relatif tork farkı arasındaki ilişki Şekil 6.19’da verilmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar hakkında sağlıklı yorum yapılamamaktadır.



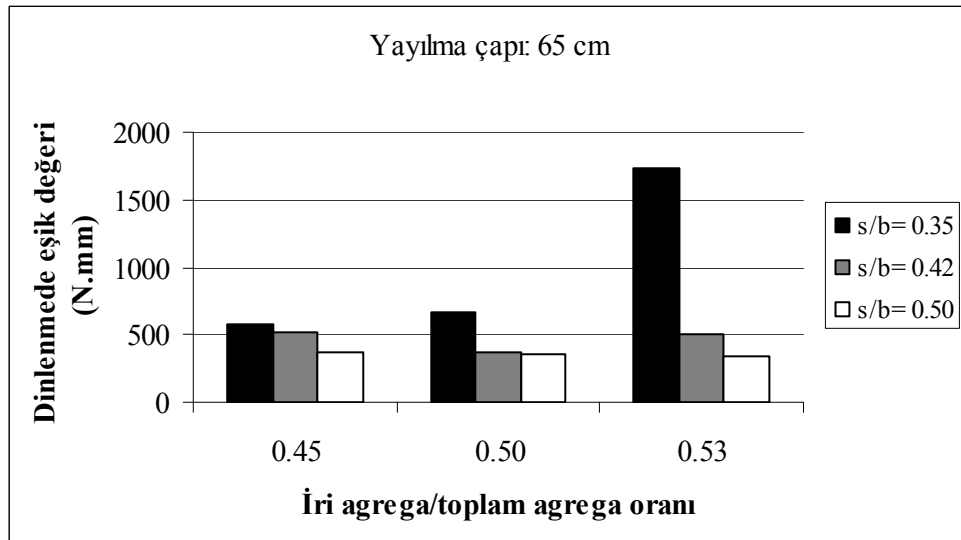
Şekil 6.19 İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (relatif tork farkı)

Karışımların İA/TA oranı ile görünen viskozite düşüşü arasındaki ilişki Şekil 6.20’de verilmiştir. Bu yöntemle, s/b oranı 0.35 olan karışımlarda İA/TA oranının artmasıyla tiksotropi artmıştır. 0.42 ve 0.50 s/b oranındaki karışımlarda ise önemli bir değişim olmamıştır.



Şekil 6.20 İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (görünen viskozite düşüşü)

Karışımların İA/TA oranı ile dinlenmede eşik değeri arasındaki ilişki Şekil 6.21’de verilmiştir. Bu yöntemde, İA/TA oranının tiksotropiye etkisi sadece s/b oranı 0.35 olan karışımlarda olmuştur. Diğer karışımlarda İA/TA oranının değişimiyle tiksotropide önemli bir değişim olmamıştır.

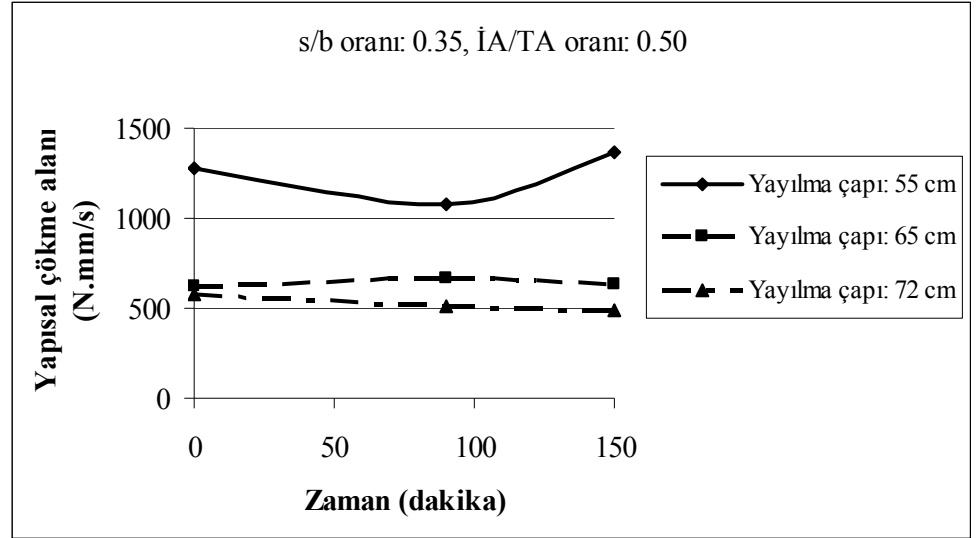


Şekil 6.21 İA/TA oranı ile tiksotropi arasındaki ilişki (dinlenmede eşik değeri)

İA/TA oranının tiksotropiye etkisi dört yöntemde de düşük s/b oranına (0.35) sahip karışımlarda birbirine benzer sonuçlar vermektedir. Düşük s/b karışımlarda katı malzeme miktarının fazla olması ve İA/TA oranı arttıkça iri agrega miktarının daha da artması, taze betonun tiksotropisinin artmasına neden

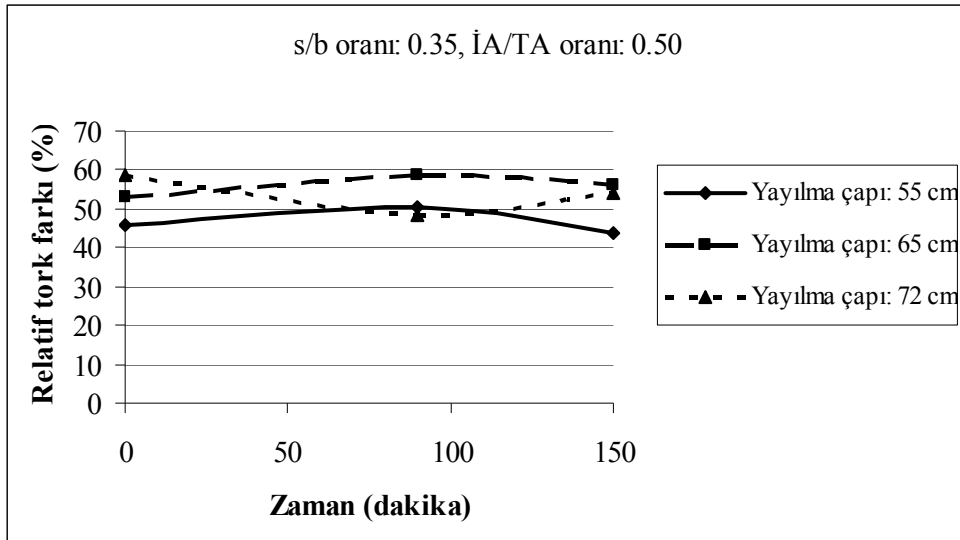
olmaktadır. Yüksek s/b oranına (0.50) sahip karışımlarda karışımda bulunan suyun artmasıyla İA/TA oranının tiksotropiye etkisi azalmaktadır.

Yapısal çökme alanı yöntemiyle ölçülen tiksotropinin zamanla değişimi Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Grafikte verilen karışımlar 0.35 s/b oranı ve 0.50 İA/TA oranına sahip karışımlardır. Bu yöntemde karışımlarda zamanla tiksotropinin değişimi değişkendir. Normalde zamanla hidrasyon gelişimi, karışım suyunun azalması ve taze betonun katılaşması sonucu tiksotropinin artması beklenmektedir. Bu yöntemde tiksotropi, momentin başlangıç ve denge değerleri tarafından belirlendiği için zaman içinde başlangıç ve denge değerleri arasındaki fark her zaman artmamaktadır. Bu yöntemle tiksotropinin zamanla değişimini belirlemek doğru değildir.



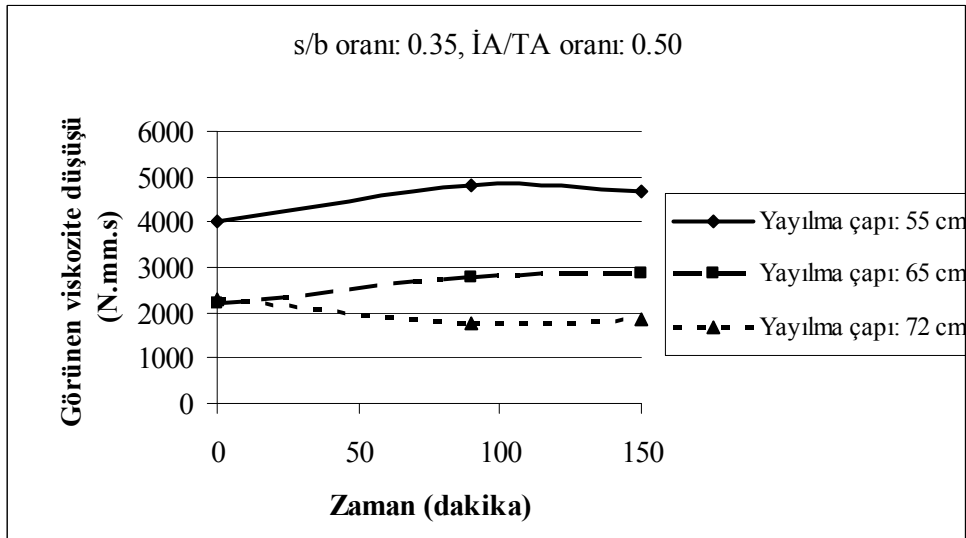
Şekil 6.22 Tiksotropinin zamanla değişimi (yapısal çökme alanı yöntemi)

Relatif tork farkı yöntemiyle ölçülen tiksotropinin zamanla değişimi Şekil 6.23’te verilmiştir. Grafikte verilen karışımlar 0.35 s/b oranı ve 0.50 İA/TA oranına sahip karışımlardır. Bu yöntemde de tiksotropinin zamanla değişimi tam olarak belirgin değildir. Ayrıca aynı s/b oranına sahip karışımlarda yayılma çapı değişiminin tiksotropiye etkisinde de beklenen durum gözlenmemiştir. Bu yöntemle tiksotropinin zamanla değişimini belirlemek doğru değildir.



Şekil 6.23 Tikсотropinin zamanla değişimi (relatif tork farkı yöntemi)

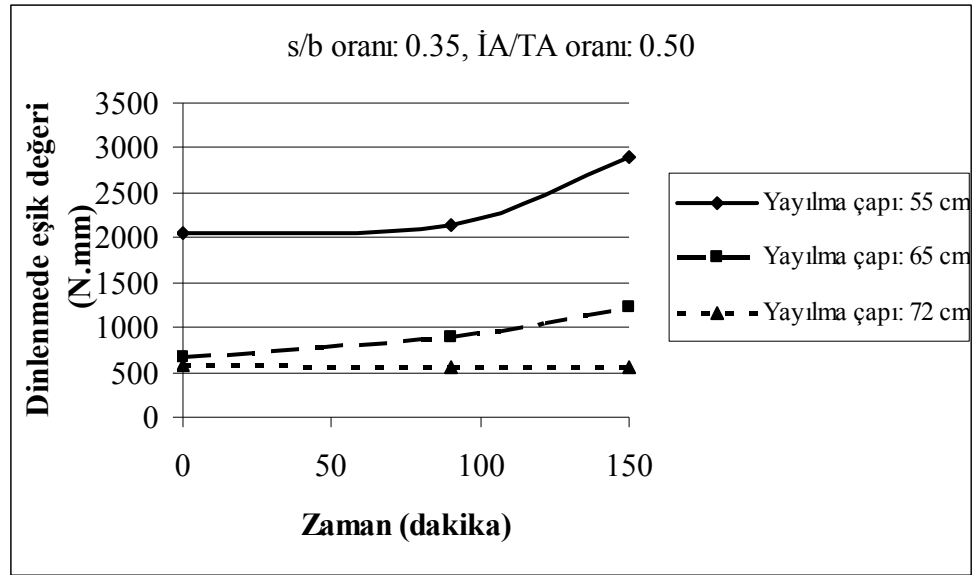
Görünen viskozite düşüşü yöntemiyle ölçülen tiksotropinin zamanla değişimi Şekil 6.24'te verilmiştir. Grafikte verilen karışımlar 0.35 s/b oranı ve 0.50 İA/TA oranına sahip karışımlardır. Bu yöntemde yayılma çapı 55 cm ve 65 cm olan karışımlarda zamanla tiksotropilerde artış gözlenmiştir. Ancak 72 cm yayılma çapına sahip karışımında tiksotropi zamanla düşmüştür. Diğer karışımlar için hesaplanan tiksotropi değerlerine bakıldığında bazı karışımlarda zamanla tiksotropinin arttığı, bazılarının ise azaldığı gözlenmektedir. Dolayısıyla bu yöntemle tiksotropinin zamanla değişimini belirlemek doğru değildir.



Şekil 6.24 Tikсотropinin zamanla değişimi (görünen viskozite düşüşü yöntemi)

Yukarıda verilen üç yöntemde de tiksotropinin zamana bağlı değişimi anlamlı sonuçlar vermemiştir. Üç yöntemde de tiksotropi, taze betonların kesmeye karşı başlangıç ve denge moment değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler arasındaki farkın zamanla artmaması beklenen sonucu vermemektedir.

Dinlenmede eşik değeri yöntemiyle ölçülen tiksotropinin zamanla değişimi Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Bu yöntemde çok düşük hızda kesme kuvveti uygulandığı için zamanla tiksotropinin arttığını görmek mümkün olmaktadır. Tablo 6.5'te görüldüğü gibi çoğu karışımda tiksotropi zamanla artmaktadır. Ancak tiksotropinin zamanla artış hızıyla betonun yayılma çapı ve İA/TA oranı arasında bir ilişki kurulamamaktadır.



Şekil 6.25 Tiksotropinin zamanla değişimi (dinlenmede eşik değeri yöntemi)

6.4 Yanal Kalıp Basıncı Deneyi Sonuçları

Tez çalışması kapsamında üretilen 15 farklı KYB karışımı üzerinde yapılan kalıp basıncı deneylerinin sonuçları Tablo 6.6 ve 6.7'de verilmiştir. Tablo 6.6'da 10 m/saat döküm hızıyla elde edilen sonuçlar, Tablo 6.7'de ise 5 m/saat döküm hızıyla elde edilen kalıp basıncı sonuçları mevcuttur. Deney sonuçları, zaman içinde kalıpta oluşan maksimum yanal basınç değerinin beton ağırlığına karşılık gelen hidrostatik basınca oranı ile ifade edilmiştir. Kalıp basıncı deneyinde üç adet basınç sensörü kullanılmasına rağmen, sensörlerin ölçtüğü değerler hidrostatik basınca göre birbirlerine yakın olduğundan tablolarda verilen deney sonuçları kalıbın en altındaki sensörden elde edilen değerlerdir.

Tablo 6.6 10 m/saat döküm hızıyla elde edilen yanal kalıp basıncı sonuçları

P(maksimum) / P(hidrostatik)											
Karışım	0 dk.	30 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.	150 dk.	180 dk.	210 dk.	240 dk.	270 dk.	300 dk.
35/45/65	0.95	0.91	0.87	0.84	0.82	0.78	0.73	0.67	0.56	*	*
35/50/55	1.00	0.81	0.68	0.56	0.34	0.22	0.17	0.14	0.12	0.10	*
35/50/65	0.99	0.85	0.75	0.70	0.63	0.59	0.58	0.56	0.52	*	*
35/50/72	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.84	0.78	0.72	0.64	*	*
35/53/65	0.95	0.89	0.83	0.79	0.67	0.57	0.47	0.39	0.29	*	*
42/45/65	0.99	0.92	0.87	0.81	0.70	0.58	0.50	0.36	0.24	*	*
42/50/55	0.96	0.90	0.79	0.72	0.58	0.46	0.36	0.25	0.17	0.09	*
42/50/65	0.98	0.91	0.86	0.79	0.74	0.58	0.52	0.34	0.27	0.16	*
42/50/72	0.99	0.95	0.93	0.89	0.84	0.77	0.73	0.62	0.57	0.54	0.49
42/53/65	0.96	0.89	0.80	0.75	0.59	0.48	0.41	0.33	0.31	0.30	0.22
50/45/65	0.99	0.96	0.92	0.89	0.81	0.73	0.64	0.55	0.43	0.34	0.28
50/50/55	1.00	0.94	0.90	0.85	0.75	0.66	0.57	0.44	0.30	0.17	0.06
50/50/65	0.99	0.95	0.89	0.87	0.78	0.70	0.63	0.49	0.37	0.23	0.15
50/50/72	0.99	0.97	0.95	0.94	0.89	0.84	0.79	0.70	0.58	0.46	0.38
50/53/65	0.98	0.93	0.86	0.81	0.79	0.75	0.62	0.50	0.39	0.26	0.16

* Deney sonlandı.

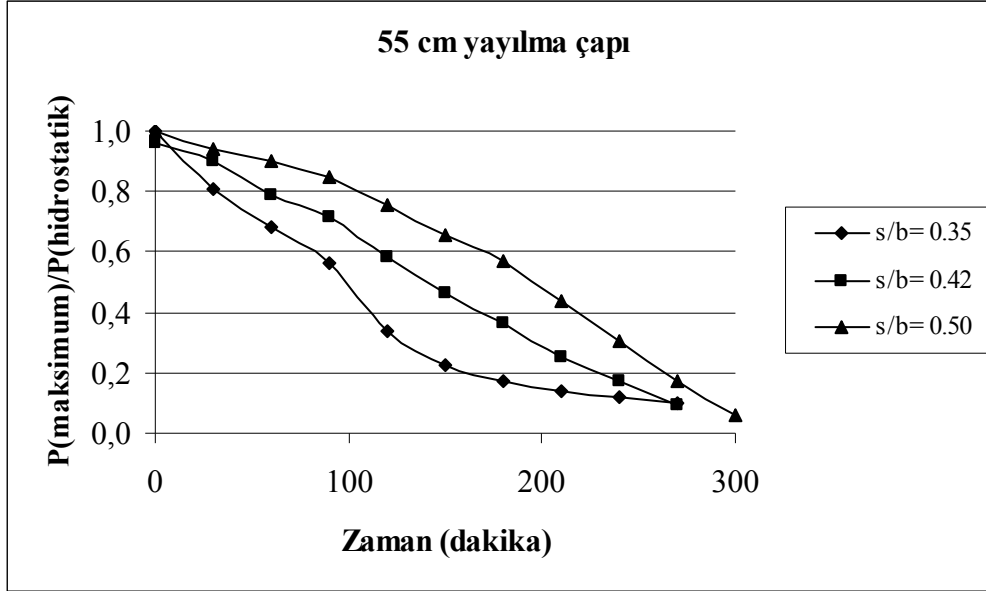
Tablo 6.7 5 m/saat döküm hızıyla elde edilen yanal kalıp basıncı sonuçları

P(maksimum) / P(hidrostatik)											
Karışım	0 dk.	30 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.	150 dk.	180 dk.	210 dk.	240 dk.	270 dk.	300 dk.
35/45/65	0.98	0.91	0.88	0.81	0.76	0.69	0.59	0.49	0.35	*	*
35/50/55	0.99	0.86	0.74	0.62	0.52	0.42	0.31	0.22	0.19	0.15	0.11
35/50/65	0.96	0.95	0.93	0.92	0.80	0.69	0.60	0.50	0.44	*	*
35/50/72	0.98	0.94	0.90	0.86	0.83	0.79	0.73	0.69	0.61	*	*
35/53/65	1.00	0.87	0.80	0.75	0.68	0.59	0.52	0.44	0.32	*	*
42/45/65	0.99	0.88	0.80	0.72	0.61	0.54	0.46	0.37	0.30	*	*
42/50/55	0.99	0.85	0.75	0.67	0.55	0.40	0.36	0.28	0.22	0.17	0.14
42/50/65	0.99	0.90	0.86	0.79	0.74	0.67	0.61	0.54	0.45	*	*
42/50/72	1.00	0.93	0.89	0.81	0.76	0.69	0.60	0.52	0.44	0.37	0.32
42/53/65	0.99	0.89	0.86	0.80	0.73	0.62	0.52	0.38	0.30	0.26	0.22
50/45/65	0.97	0.91	0.84	0.76	0.72	0.66	0.54	0.39	0.30	0.21	0.18
50/50/55	1.00	0.90	0.84	0.73	0.61	0.50	0.41	0.37	0.36	*	*
50/50/65	0.98	0.95	0.87	0.74	0.62	0.50	0.39	0.34	0.31	*	*
50/50/72	1.00	0.99	0.98	0.88	0.79	0.70	0.60	0.55	0.39	0.30	*
50/53/65	0.98	0.92	0.85	0.72	0.67	0.60	0.47	0.35	0.23	0.18	0.15

* Deney sonlandı.

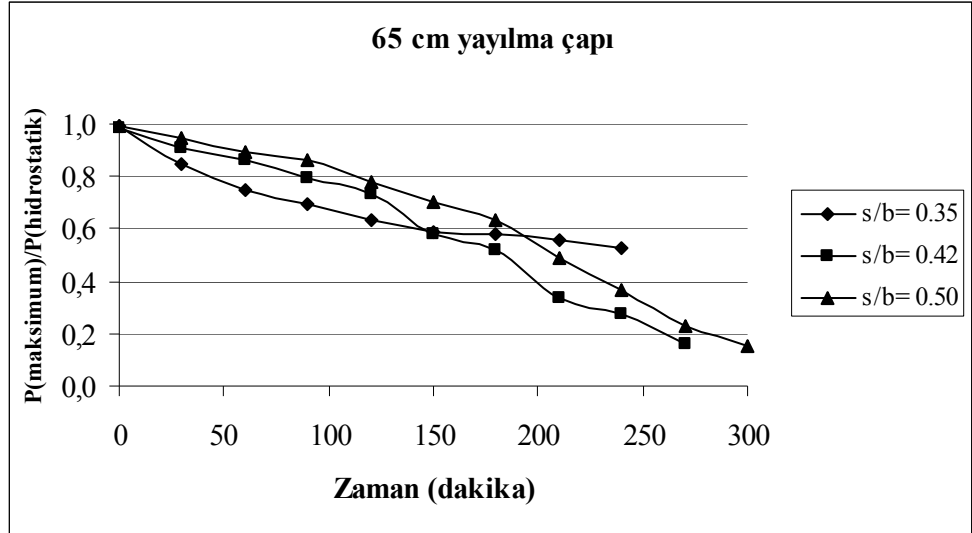
Hazırlanan 15 farklı KYB karışımı için s/b oranı, yayılma çapı ve İA/TA oranındaki değişimin yanal kalıp basıncına etkisini incelemek amacıyla 10 m/saat döküm hızıyla elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

KYB'nin 55 cm yayılma çapı ve farklı s/b oranındaki karışımlarda zaman içinde kalıp basıncındaki düşüşü Şekil 6.26'da gösterilmiştir. 55 cm yayılma çapında s/b oranı 0.50 olan karışımın zaman içindeki yanal basınç düşüşü en yavaş olmuştur. Yani, karışımların s/b oranı arttıkça zamanla yanal basınçtaki düşüş daha az olmaktadır. Bunun nedeni, s/b oranı arttıkça sabit bağlayıcı miktarında su içeriği arttığından taze betonun kalıplara yaptığı yanal basınç boşluk suyu basıncının da artmasıyla artmaktadır.



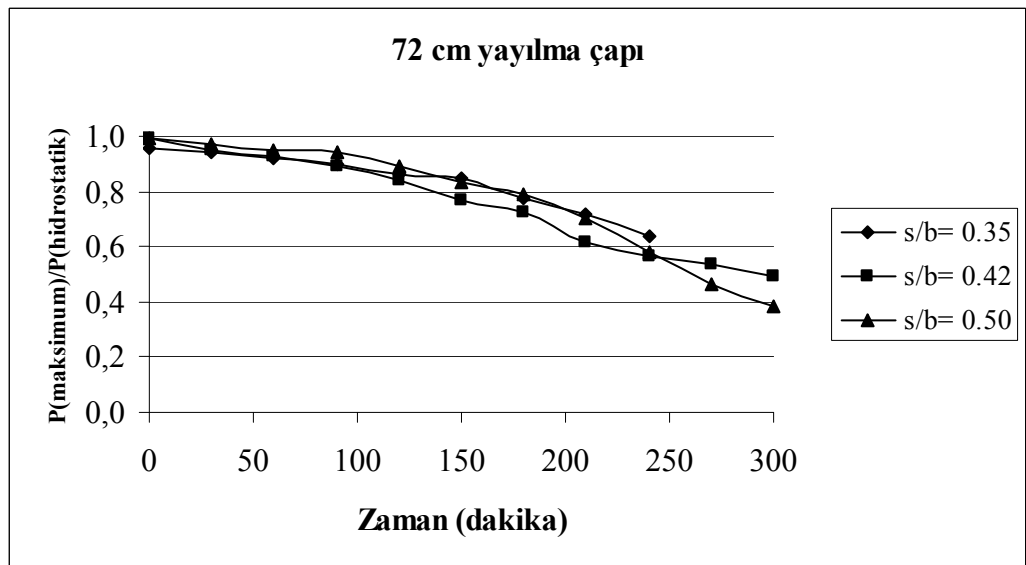
Şekil 6.26 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (yayılma çapı: 55 cm)

65 cm yayılma çapına sahip üç farklı s/b oranındaki karışımların zaman içinde yanal kalıp basınçlarındaki değişim Şekil 6.27'de verilmiştir. Sonuçlara göre, ilk 200 dakika içinde s/b oranı 0.50 olan karışımın kalıba yaptığı yanal basınç s/b oranı 0.35 ve 0.42 olan karışımlara göre daha fazladır. 200 dakikadan sonra 0.42 ve 0.50 s/b oranındaki karışımların yanal basınçtaki düşüş hızları artmaktadır. İlk dakikalarda karışımın s/b oranının artması kalıptaki yanal basıncın fazla olmasına neden olmaktadır. Ancak s/b oranı yüksek karışımlarda hidratasyon hızı akışkanlaştırıcı katkının etkisiyle daha fazla olduğu için taze beton daha hızlı sertleşmekte ve kalıba yaptığı yanal basınç azalmaktadır. Bu etki, 65 cm yayılma çapına sahip karışımlarda 55 cm'ye göre daha fazla görülmüştür.



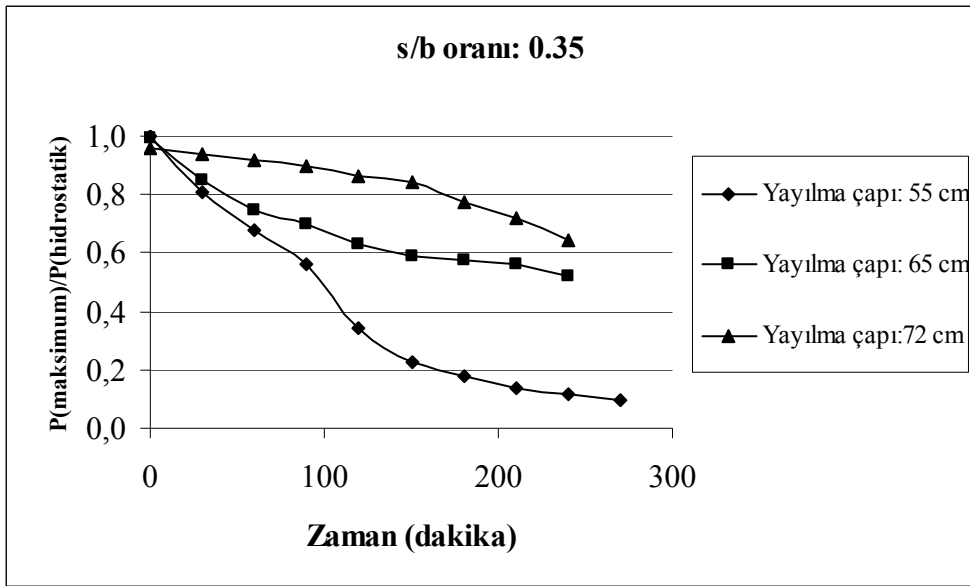
Şekil 6.27 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (yayılma çapı: 65 cm)

Yayılma çapı 72 cm olan ve üç farklı s/b oranındaki karışımların zaman içinde yanal kalıp basınçlarındaki değişim Şekil 6.28’de verilmiştir. 72 cm yayılma çapında s/b oranının etkisi daha düşük yayılma çapına sahip karışımlara göre daha az olmuştur. Şekil 6.26-28’de görüldüğü gibi KYB karışımlarının yayılma çapının artmasıyla s/b oranındaki değişimin yanal kalıp basıncına etkisi giderek azalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, düşük s/b oranındaki karışımların yayılma çapı arttıkça gerekli akışkanlaştırıcı miktarı artmakta ve bunun sonucu zaman içinde yanal kalıp basıncındaki düşüş, yüksek s/b oranındaki karışımların kalıp basıncındaki düşüşe yaklaşmaktadır.



Şekil 6.28 s/b oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (yayılma çapı: 72 cm)

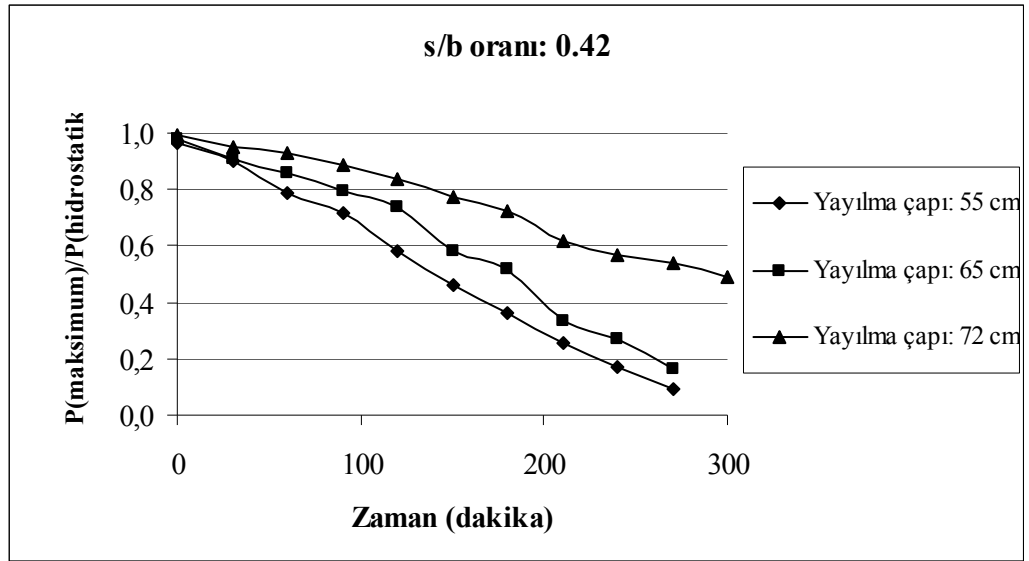
Şekil 6.29’da s/b oranı 0.35 olan farklı yayılma çapına sahip karışımların yanal kalıp basınçlarının zamanla değişimi verilmiştir. Dökümden 100 dakika sonra yayılma çapı 72 cm olan karışımın yanal basınç düşüşü %10 olurken, 55 cm yayılma çapına sahip karışımında bu düşüş % 50 olmuştur. Karışımların yayılma çapı arttıkça kalıba yaptığı yanal basınçtaki düşüşün zamanla azaldığı gözlenmiştir. Karışımların yayılma çaplarının artması için gerekli akışkanlaştırıcı ihtiyacı artmaktadır. Akışkanlaştırıcı miktarının artması taze betonda yüksek kalıp basıncı oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.29 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.35)

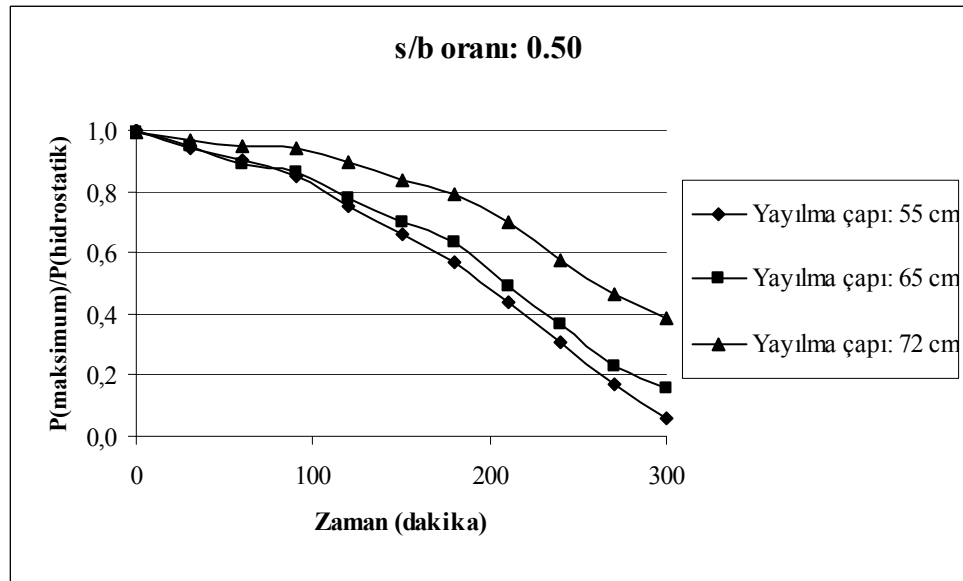
Su/bağlayıcı oranı 0.42 olan ve üç farklı yayılma çapına sahip karışımın zaman içinde yanal kalıp basıncındaki değişimi Şekil 6.30’da verilmiştir. 6.32’de olduğu gibi karışımların yayılma çapı arttıkça kalıba yaptığı yanal basınçtaki düşüş zamanla azalmıştır. Dökümden sonra 100. dakikada 55 cm yayılma çapına sahip karışımında yanal basınç düşüşü %70 olmuştur. Aynı dakikada 72 cm yayılma çapına sahip karışımında ise bu düşüş %87’dir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarla kıyaslandığında, yayılma çapının etkisi, s/b oranı 0.42 olan karışımlarda azalmaktadır. Bu azalma, karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcı miktarının azalması ve su miktarının artarak boşluk suyu basıncının artmasıyla açıklanabilir.

Assaad (2004) yaptığı çalışmada, düşük yayılma çapına sahip KYB karışımlarında zaman içinde yanal kalıp basıncındaki düşüş daha fazla olduğunu belirtmiştir.



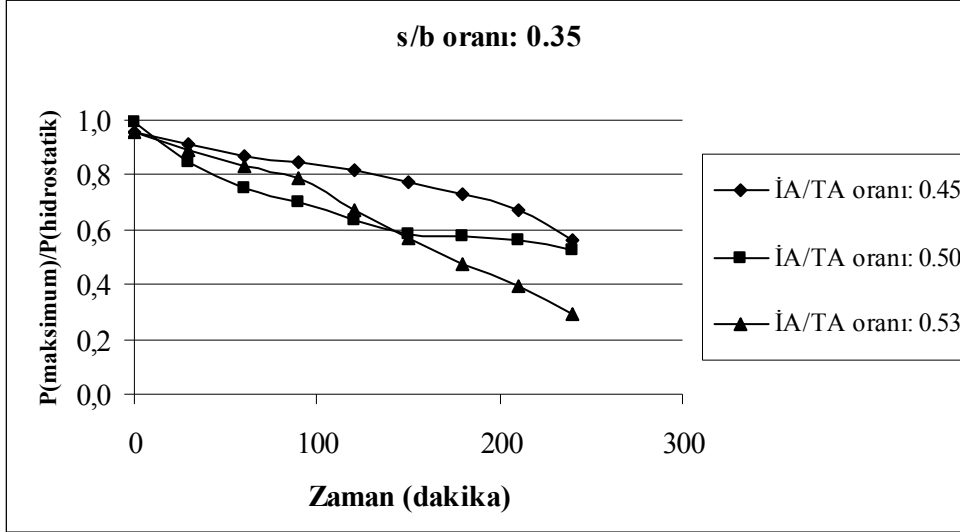
Şekil 6.30 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.42)

Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımlarda yayılma çapının değişimiyle kalıpta oluşan yanal basıncın değişimi Şekil 6.31’de verilmiştir. Diğer s/b oranlarında olduğu gibi karışımların yayılma çapının artmasıyla yanal kalıp basıncındaki zamanla düşüş azalmıştır. Şekil 6.32-34’te görüldüğü gibi s/b oranının artmasıyla yayılma çapındaki değişimin yanal kalıp basıncına etkisi giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, s/b oranı arttıkça akışkanlaştırıcı ihtiyacının azalması ve boşluk suyu basıncının artmasıdır.



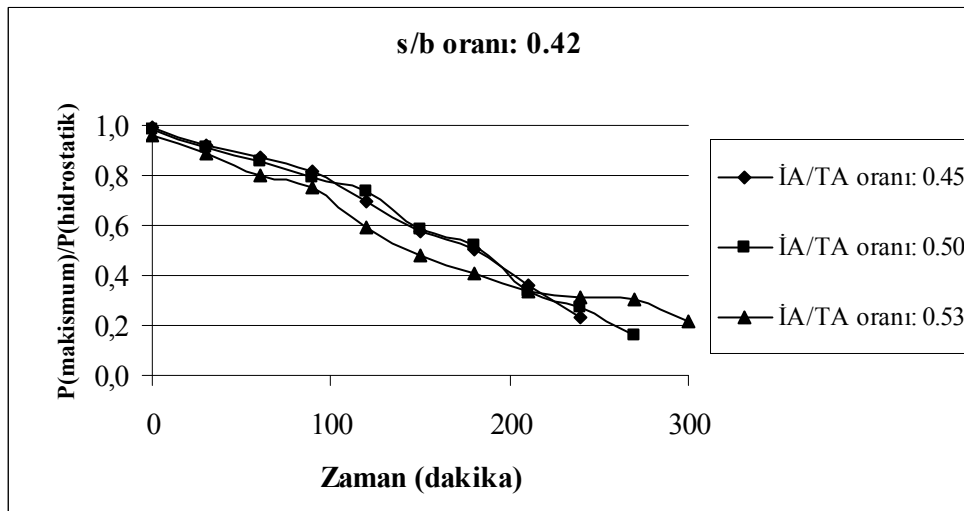
Şekil 6.31 Yayılma çapı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.50)

Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda iri agrega/toplam agrega ($\dot{A}/TA$) oranının zaman içinde taze betonun kalıba yaptığı yanal basınca etkisi Şekil 6.32’de gösterilmiştir. $\dot{A}/TA$ oranı 0.45 olan karışımda 0.50 ve 0.53 olan karışımlara göre zaman içinde yanal basıncındaki düşüş daha yavaş olmuştur. Karışımlarda iri agrega miktarının artmasıyla yanal kalıp basıncı azalmıştır.



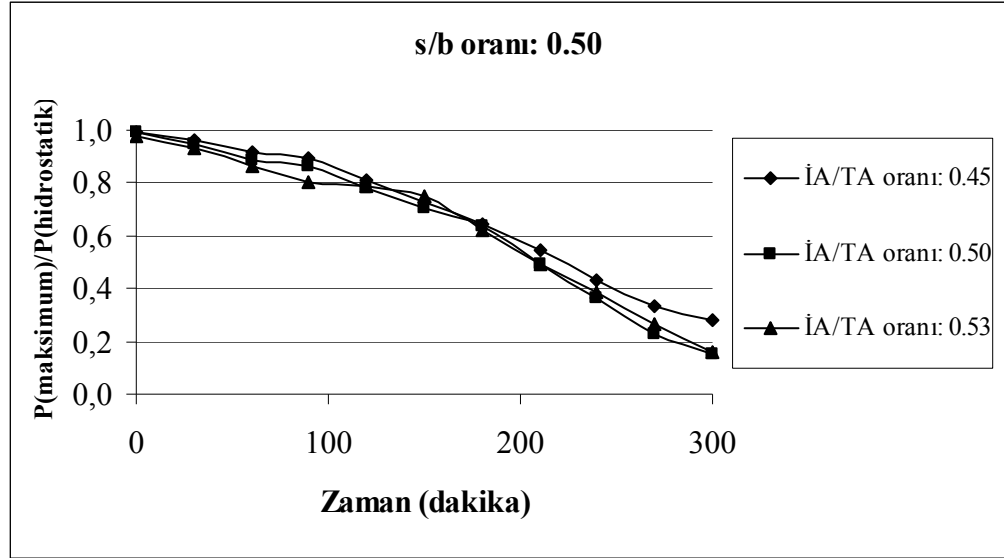
Şekil 6.32 $\dot{A}/TA$ oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.35)

Şekil 6.33’te s/b oranı 0.42 olan karışımlarda $\dot{A}/TA$ oranının değişimiyle zamanla yanal kalıp basıncındaki değişim gösterilmiştir. Şekil 6.35-37 incelendiğinde, s/b oranının artmasıyla $\dot{A}/TA$ oranındaki değişiminin $P(\text{maksimum})/P(\text{hidrostatik})$ oranına etkisinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 6.33 $\dot{A}/TA$ oranı ile yanal kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.42)

Benzer şekilde, s/b oranı 0.50 olan karışımlarda İA/TA oranı değişimiyle zamanla yanıl kalıp basıncındaki değişimi Şekil 6.34'te verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımlarda İA/TA oranının değişmesi taze betonun kalıba yaptığı yanıl basınçta önemli bir değişime yol açmamıştır. Yanıl kalıp basıncı açısında s/b oranının artmasıyla karışımda iri agrega miktarının etkisi büyük ölçüde azalmaktadır. Bunun nedeni, s/b oranının artmasıyla yanıl kalıp basıncını en çok etkileyen faktörün boşluk suyu basıncı olmasından kaynaklanmaktadır.

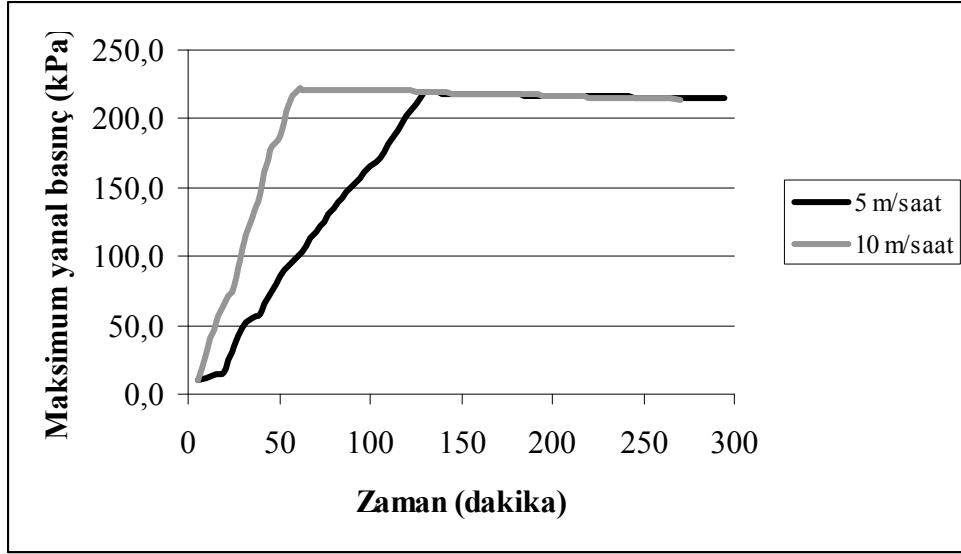


Şekil 6.34 İA/TA oranı ile yanıl kalıp basıncının zamanla değişimi (s/b oranı: 0.50)

Döküm hızının taze betonun kalıba yaptığı yanıl basınca etkisini incelemek amacıyla bütün karışımlar üzerinde iki farklı döküm hızında (5 m/saat ve 10 m/saat) kalıp basıncı deneyi yapılmıştır. İki farklı döküm hızında gerçekleştirilen kalıp basıncı deney sonuçlarını değerlendirirken, yanıl kalıp basıncını maksimum basıncın hidrostatik basınca oranı ile değerlendirmenin anlamlı sonuçlar vermediği görülmüştür. Çünkü hidrostatik basınç beton yüksekliği ile değişmektedir ve zamana bağlı değildir. Bu açıdan döküm hızının kalıp basıncına etkisini değerlendirirken betonların sadece yanıl kalıp basıncı değerleri karşılaştırılmıştır.

Döküm hızının yanıl kalıp basıncı üzerindeki etkisi Şekil 6.35'te verilmiştir. Kalıbın dolum süresi arttıkça maksimum yanıl basınç azalmaktadır. Düşük döküm hızında kalıbı doldurmak için geçen zaman artmaktadır ve bu sürede içinde kalıp basıncı yüksek döküm hızına göre daha fazla azalmaktadır. Bu yüzden taze betonun düşük hızda yaptığı yanıl basınç daha azdır. Döküm işlemi

bittikten sonra yanal basınçlardaki düşüş her iki döküm hızında da birbirine benzer olmuştur. İki döküm hızı arasındaki maksimum basınç farkı çok az çıkmaktadır. Döküm hızının etkisini daha iyi görebilmek için daha büyük boyutlarda kalıp kullanılmalıdır. Hatta tam ölçekli kalıp üzerinde döküm hızının etkisi çok daha iyi anlaşılabilir. Tez kapsamında laboratuvar koşullarına uygun küçük boyutta bir kalıp kullanıldığı için bu etkinin derecesi çok iyi gözükmemektedir.

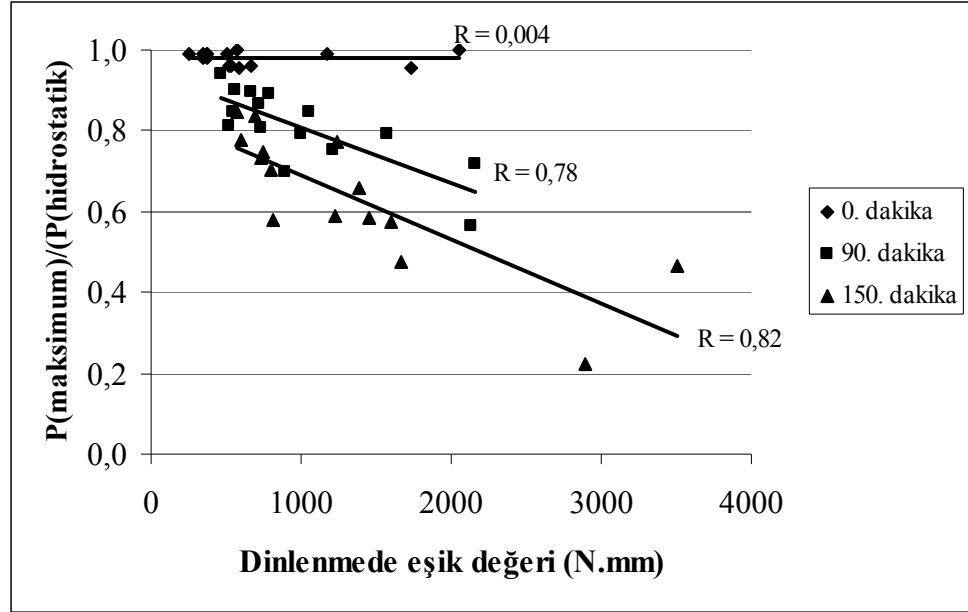


Şekil 6.35 İki farklı döküm hızında taze betonda zamanla oluşan maksimum yanal basınç

6.4.1 Tikсотropinin Kalıp Basıncına Etkisi

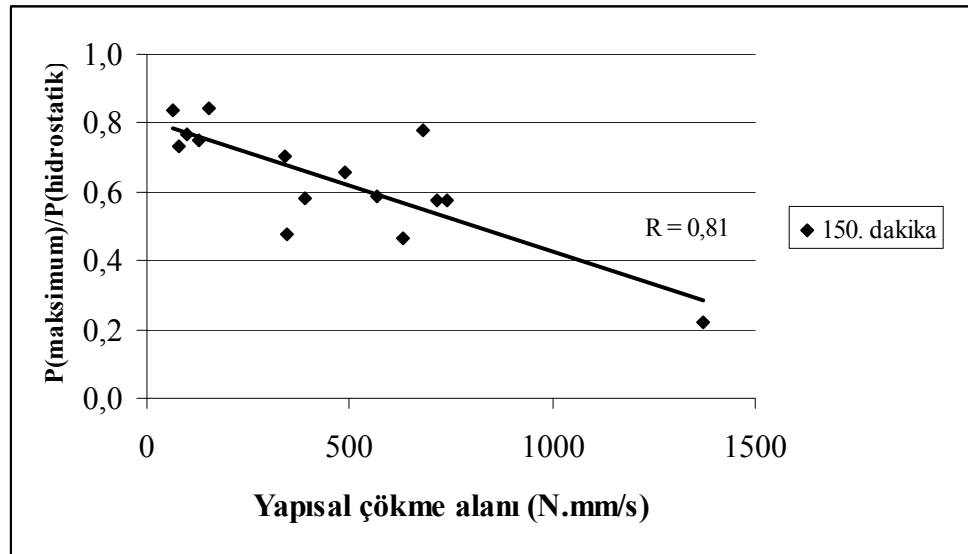
Taze betonda tiksotropinin kalıp basıncına etkisini incelemek için tiksotropi sonuçları ile yanal kalıp basıncı sonuçları arasında bir ilişki kurulmuştur. Şekil 6.36'da üç farklı zamanda tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Tikсотropi değerleri dinlenmede eşik değeri yönteminde elde edilen sonuçlardır. Kalıp basıncı değerleri ise hidrostatik basınca göre yanal basınçtaki düşüşü gösteren değerlerdir. Üretilen 15 farklı KYB karışımının karıştırma işleminden hemen sonra (0. dakika), 90. dakikada ve 150. dakikada belirlenen tiksotropi ve kalıp basıncı değerleri üç eğri oluşturacak şekilde grafik çizilmiştir. 0. dakikada tiksotropi ile kalıp basıncı arasında anlamlı bir ilişki kurulamamaktadır. Bunun nedeni, bu zamanda bütün karışımlarda neredeyse kalıp basıncı hidrostatik basınca eşittir ve bir azalma yoktur. Oysa tiksotropi değerleri farklı karışımlar için farklı değerler almaktadır. 90. dakikada tiksotropi ile yanal kalıp basıncı değerleri için çizilen doğrusal eğilim çizgisinin korelasyon katsayısı (R değeri) 0.78 olmuştur. Bu değer 150. dakika için 0.82'dir. Tikсотropi değeri

yüksek olan karışımlarda zaman içinde yanal kalıp basıncındaki düşüş daha fazla olmaktadır. Tiksotropisi yüksek olan betonlar durgun halde daha çok katı gibi davrandığı için zaman içinde kalıba yaptığı yanal basınçtaki azalma da daha hızlı olmaktadır.



Şekil 6.36 Üç farklı zamanda ölçülen tiksotropi ile yanal kalıp basıncı arasındaki ilişki

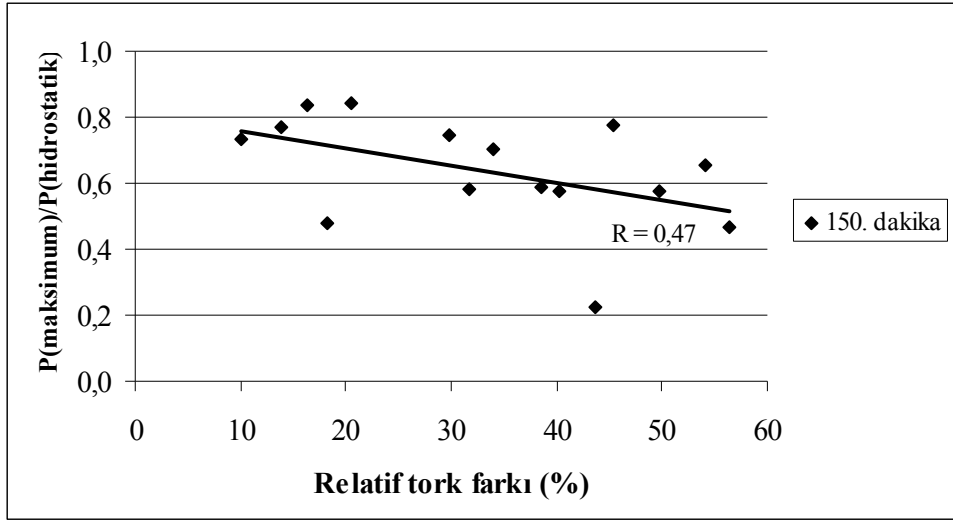
Şekil 6.37'de yapısal çökme alanı yöntemi ile belirlenen tiksotropinin yanal kalıp basıncı ilişkisi gösterilmiştir. Tiksotropi ve kalıp basıncı değerleri dökümden



Şekil 6.37 Yapısal çökme alanı yöntemiyle belirlenen tiksotropi ile kalıp basıncı ilişkisi

150 dakika sonra ölçülen değerlerdir. Tikсотropi ve kalıp basıncı verilerinden oluşan doğrusal eğilim çizgisinin korelasyon katsayısı 0.81'dir. Yapısal çökme alanı yöntemi ile belirlenen tikсотropi ile kalıp basıncı arasında dinlenmede eşik değeri yönteminde olduğu gibi negatif ve doğrusala yakın bir ilişki vardır.

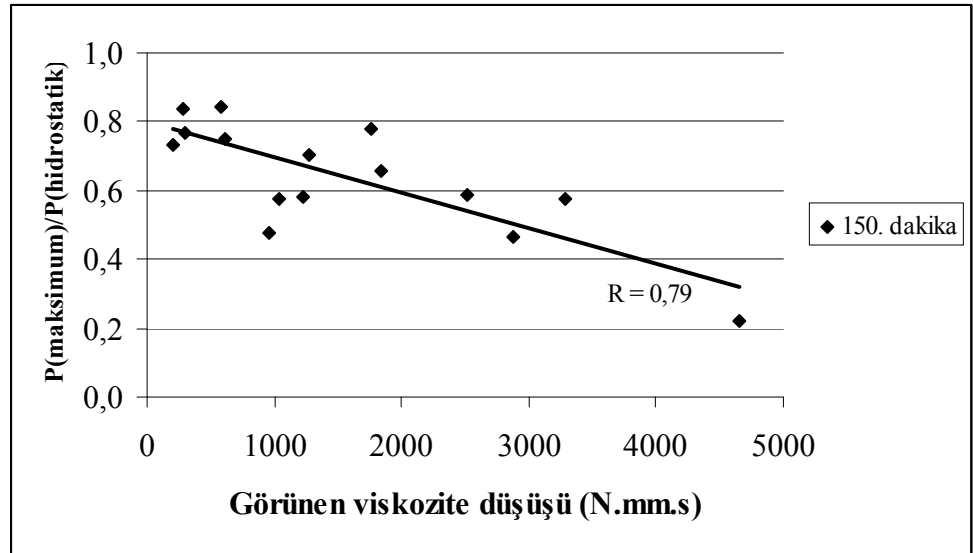
Relatif tork farkı yöntemi ile belirlenen tikсотropinin yanal kalıp basıncı ilişkisi Şekil 6.38'de verilmiştir. Bu yöntemde tikсотropi ile kalıp basıncı arasında doğrusal birilişki kurmak mümkün değildir ($R = 0.47$).



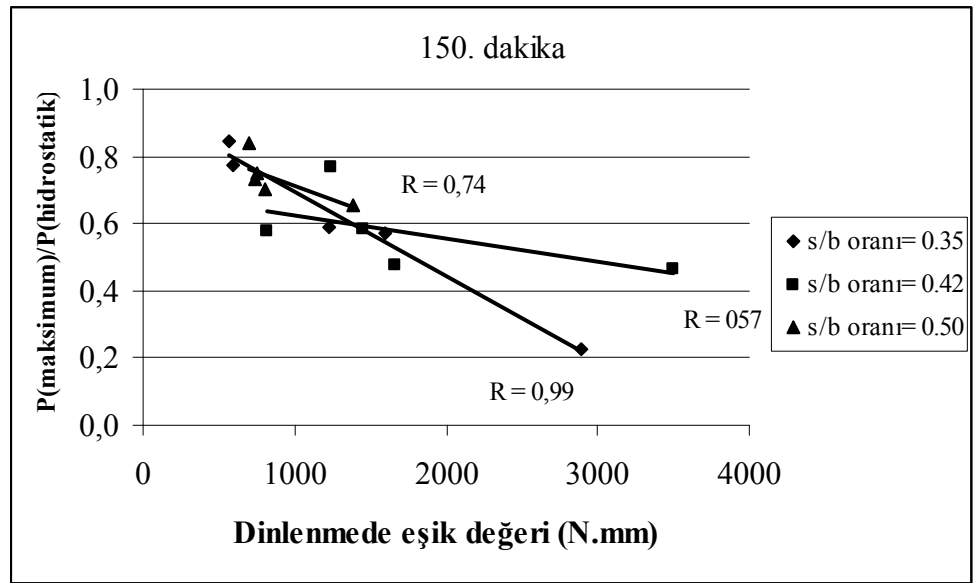
Şekil 6.38 Relatif tork farkı yöntemiyle belirlenen tikсотropi ile yanal kalıp basıncı ilişkisi

Şekil 6.39'da görünen viskozite düşüşü yöntemi ile belirlenen tikсотropinin yanal kalıp basıncı ilişkisi verilmiştir. Dökümden 150 dakika sonra ölçülen değerler kullanılarak bu yöntemde belirlenen tikсотropi ile yanal kalıp basıncı arasında doğrusala yakın ve negatif bir ilişki vardır.

Farklı s/b oranındaki KYB karışımlarında tikсотropinin kalıp basıncına etkisi Şekil 6.40'ta gösterilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda tikсотropi ile kalıp basıncı arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlenmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0.42 olan karışımlarda tikсотropinin kalıp basıncına etkisi s/b oranı 0.35 ve 0.50 olan karışımlar kadar doğrusal değildir.



Şekil 6.39 Görünen viskozite düşüşü yöntemi ile belirlenen tiksotropi ile yanal kalıp basıncı ilişkisi



Şekil 6.40 Farklı s/b oranındaki karışımlarda tiksotropinin yanal kalıp basıncına etkisi

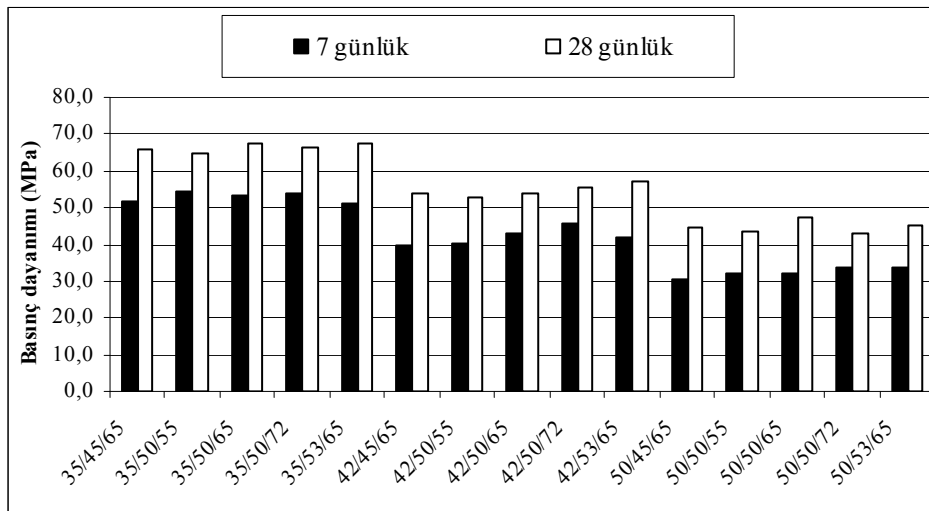
6.5 Sertleşmiş Beton Sonuçları

Tez çalışması kapsamında üretilen 15 farklı KYB karışımının 7 ve 28 günlük basınç dayanım sonuçları Tablo 6.8’de verilmiştir. Tabloda dayanım sonuçları için üç numunenin ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayısı bulunmaktadır. Karışımların standart sapmaları 5 MPa’ın, varyasyon katsayıları da %10’un (bir karışım hariç) altında çıkmıştır.

Üretilen 15 KYB karışımının 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 6.41’de verilmiştir.

Tablo 6.8 Basınç dayanımı sonuçları

Karışım	7 Günlük Basınç Dayanımı			28 Günlük Basınç Dayanımı		
	Ortalama (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Varyasyon Katsayısı (%)
35/45/65	51.9	0.6	1.2	66.1	4.3	6.5
35/50/55	54.4	0.5	0.9	64.6	2.4	3.6
35/50/65	53.2	3.1	5.9	67.6	5.5	8.1
35/50/72	54.1	4.2	7.8	66.4	3.0	4.5
35/53/65	51.4	1.9	3.7	67.4	5.3	7.8
42/45/65	39.6	2.2	5.5	54.0	1.4	2.6
42/50/55	40.4	2.3	5.6	52.6	2.1	4.0
42/50/65	43.1	0.7	1.5	53.8	3.4	6.4
42/50/72	45.9	1.0	2.1	55.4	2.9	5.2
42/53/65	41.9	0.6	1.4	57.2	1.8	3.2
50/45/65	30.7	1.6	5.1	44.8	1.5	3.3
50/50/55	31.8	1.3	3.9	43.7	2.3	5.2
50/50/65	32.0	2.1	6.6	47.1	2.3	4.9
50/50/72	33.9	0.9	2.7	43.0	4.6	10.7
50/53/65	33.8	0.7	1.9	44.9	0.4	0.9



Şekil 6.41 Basınç dayanımının zamanla değişimi

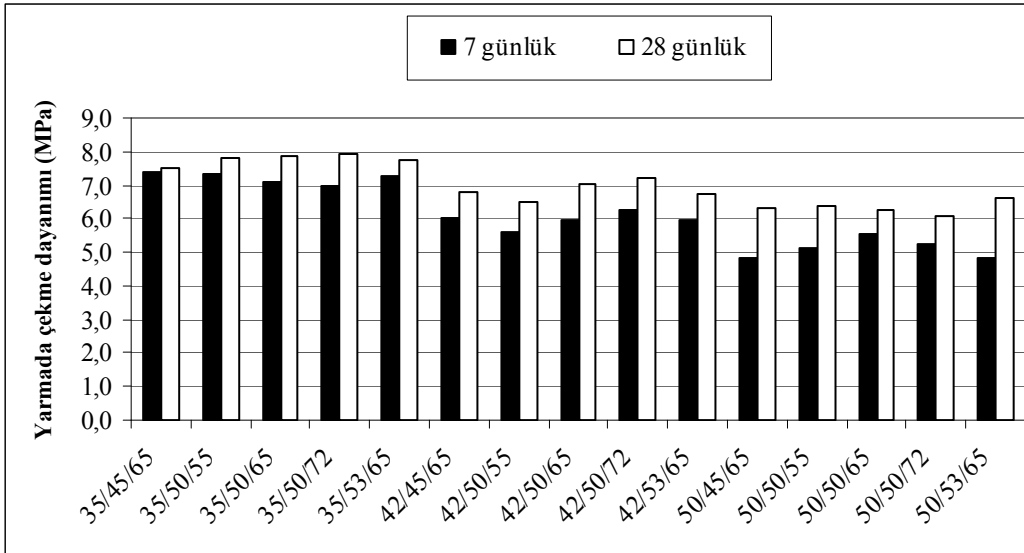
Karışımların s/b oranı arttıkça hem 7 günlük hem de 28 günlük basınç dayanımlarında azalma olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan 35/50/65 karışımının 28 günlük basınç dayanımı 67.6 MPa iken, s/b oranı 0.50 olan aynı karışımın dayanımı 47.1 MPa'a düşmüştür. Aynı s/b oranında yayılma çapı ve İA/TA oranındaki değişim ile basınç dayanımlarında dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Karışımlar 28 günlük basınç dayanımlarının %68-84'ünü 7 günde kazanmışlardır.

Üretilen 15 farklı KYB karışımının 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanım sonuçları Tablo 6.9'da verilmiştir. Tabloda dayanım sonuçları için üç numunenin ortalama, standart sapma ve varyasyon katsayısı bulunmaktadır. Karışımların standart sapmaları 1 MPa'ın, varyasyon katsayıları da %15'in (bir karışım hariç) altında çıkmıştır.

Tablo 6.9 Yarmada çekme dayanım sonuçları

Karışım	7 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı			28 Günlük Yarmada Çekme Dayanımı		
	Ortalama (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Varyasyon Katsayısı (%)
35/45/65	7.4	0.2	3.2	7.5	0.3	3.4
35/50/55	7.3	0.5	6.4	7.8	0.1	1.0
35/50/65	7.1	0.1	2.0	7.8	0.3	4.1
35/50/72	7.0	1.1	16.3	7.9	0.3	3.7
35/53/65	7.3	0.2	2.1	7.8	0.3	3.6
42/45/65	6.0	0.1	2.4	6.8	0.6	8.9
42/50/55	5.6	0.2	3.0	6.5	0.3	5.3
42/50/65	6.0	0.7	11.1	7.0	0.3	4.3
42/50/72	6.2	0.4	7.2	7.2	0.4	5.2
42/53/65	5.9	0.4	6.4	6.7	0.2	2.6
50/45/65	4.8	0.2	4.1	6.3	0.3	3.2
50/50/55	5.1	0.1	2.8	6.4	0.4	5.5
50/50/65	5.5	0.4	7.2	6.3	0.6	8.8
50/50/72	5.2	0.3	5.6	6.1	0.4	6.1
50/53/65	4.8	0.5	10.5	6.6	0.1	1.3

Karışımların 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 6.42’de gösterilmiştir. Basınç dayanımlarında olduğu gibi, s/b oranının artmasıyla yarmada çekme dayanımları azalmıştır. Aynı s/b oranında yayılma çapı ve İA/TA oranındaki değişim ile yarmada çekme dayanımlarında dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Karışımlar, 28 günlük yarmada çekme dayanımlarının %73-94’ünü 7 günde kazanmışlardır.



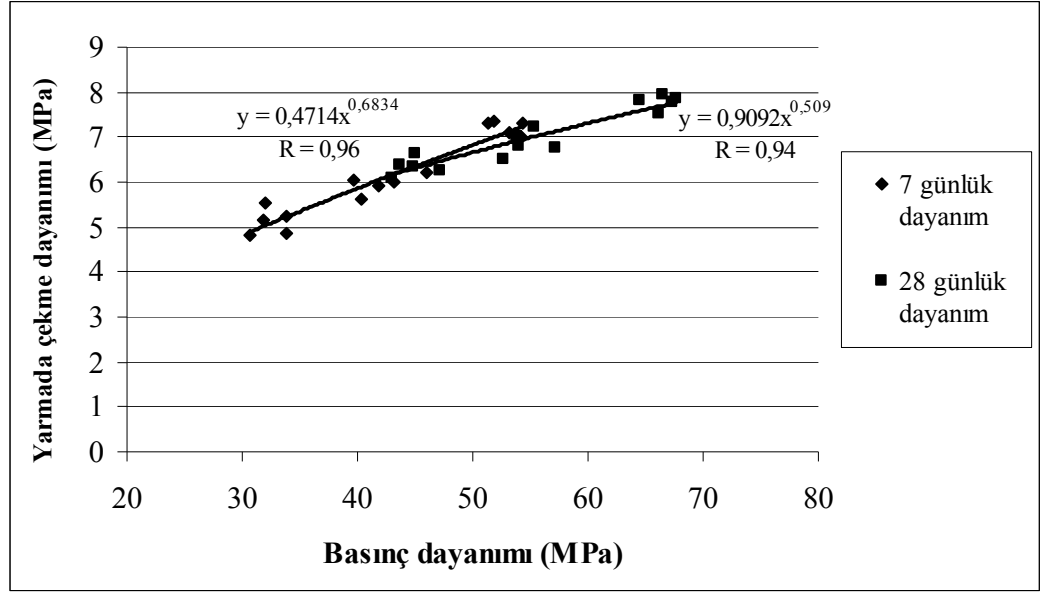
Şekil 6.42 Yarmada çekme dayanımının zamanla değişimi

7 ve 28 günlük basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 6.43’te verilmiştir. Basınç dayanımının artmasıyla hem 7 günlük hem de 28 günlük yarmada çekme dayanımlarında doğrusal bir artış gözlenmiştir. 7 günlük dayanımlarda basınç dayanımı yarmada çekme dayanımının 5.8 ile 7.7 katı arasındadır. Bu değer 28 günlük dayanımlarda 6.8 ile 8.7 kat arasında değişmektedir.

KYB ve normal betonun basınç dayanımı ile yarmada çekme arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Ahmad ve Shah, (1985) tarafından yapılan çalışmada normal betonda 28 günlük basınç dayanımı ile silindir yarmada çekme dayanımı ilişkisi aşağıda verilen formülle ifade edilmiştir.

$$f_{syç} = 0.59 \times f_b^{0.5} \quad (6.1)$$

Burada, $f_{syç}$ = 28 günlük silindir yarmada çekme dayanımı (MPa), f_b = 28 günlük basınç dayanımı (MPa)’dır.



Şekil 6.43 Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Denklem (6.1) ile Şekil 6.44'teki 28 günlük dayanım sonuçlarına göre ortaya çıkan denklemde aynı basınç dayanımı için KYB numunelerinin yarmada çekme dayanımı daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni, KYB karışımlarında uçucu kül kullanımıyla betonun ara yüzeyini geliştirmesi olabilir. Çünkü betonun ara yüzeyinin gelişmesiyle çekme dayanımında artış meydana gelmektedir.

Brouwers ve Radix (2005), yaptıkları çalışmada normal betona kıyasla KYB'nin yarmada çekme dayanımının aynı basınç dayanımı için daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Değişik kompozisyonlarda üretilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımları üzerinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. KYB'nin taze beton özellikleri birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu açıdan KYB üzerinde gerçekleştirilen taze beton deneyleri sırasında bu değişkenler kontrol edilerek gerekli hassasiyetin gösterilmesi gerekmektedir.

2. T_{50} süresi ve V-hunisi deneylerinde düşük viskoziteli betonlarda akış süresi daha düşük olmaktadır. Aynı s/b oranında yayılma çapının artmasıyla viskozite azalmakta, bunun sonucu akış süresi de azalmaktadır. T_{50} süresi ve V-hunisi akış süresi arasında yakın bir ilişki vardır. Karışımların T_{50} süresi arttıkça V-hunisi akış süresi de artmaktadır.

3. Taze betonda görünen akma gerilmesine karşı gelen tork değeri karışımın yayılma çapının artmasıyla azalmaktadır. Karışımın s/b oranı arttıkça akma gerilmesine karşı tork değeri artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.42 ve 0.50 olan karışımlarda iri agrega miktarının artmasıyla taze betonun akmasını başlatacak tork değeri azatmaktadır. Zaman geçtikçe hidrasyonun etkisi, akışkanlaştırıcının etkisinin azalması ve betonun katılaşması nedeniyle görünen akma gerilmesine karşı tork değeri artmaktadır.

4. Taze betonun tork plastik viskozite değeri, s/b oranının artmasıyla azalmaktadır. Karışımın iri agrega miktarındaki değişim tork plastik viskoziteyi çok fazla etkilememektedir. Zaman içinde hidrasyonun etkisi, akışkanlaştırıcının etkisinin azalması ve betonun katılaşması nedeniyle görünen akma gerilmesine karşı tork değeri artmaktadır.

5. Dört farklı tiksotropi ölçme yöntemi arasında relatif tork farkı yönteminde diğer üç yöntemle göre sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir.

6. Yapısal çökme alanı, görünen viskozite düşüşü ve dinlenmede eşik değeri yöntemleri kullanılarak yapılan tiksotropi ölçümlerinde karışımın s/b oranı arttıkça tiksotropik özeliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu üç yöntem kullanılarak yapılan tiksotropi ölçümlerinde yayılma çapı 55 cm olan karışımların tiksotropisi 65 ve 72 cm'ye göre çok daha yüksektir. Düşük s/b oranlarında İA/TA

oranı 0.53 olan karışımlarda tiksotropik özellik 0.45 ve 0.50 olan karışımlara göre çok daha fazla çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek s/b oranlarında İA/TA oranının etkisi azalmaktadır.

7. Tiksotropinin zaman içindeki etkisini belirlemek için kullanılan yapısal çökme alanı, relatif tork farkı ve görünen viskozite düşüşü yöntemleri sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Dinlenmede eşik değeri yöntemi ile yapılan hesaplamalarda zaman içinde karışımların tiksotropilerinde artış olduğu belirlenmiştir.

8. Kalıp basıncı deney sonuçları maksimum yanal basıncın hidrostatik basınca oranının zaman içinde değişimiyle ifade edilmiştir. 55 cm yayılma çapına sahip karışımlarda s/b oranı arttıkça yanal basınçta zaman içindeki düşüş yavaşlamaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 ve 0.42 olan karışımlarda yayılma çapı arttıkça yanal kalıp basıncının zaman içindeki düşüşü azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda İA/TA oranı arttıkça yanal kalıp basıncının zaman içindeki düşüşü artmaktadır. Kısaca, taze betonun kalıba yaptığı yanal basıncın zaman içinde daha az olması için düşük s/b oranı, düşük yayılma çapı ve yüksek İA/TA oranına sahip bir karışım oluşturmak gerekmektedir.

9. 5 m/saat ve 10 m/saat döküm hızında gerçekleştirilen kalıp basıncı deneylerinde döküm hızı düşük olan karışımlarda maksimum yanal basınç azalmaktadır. Yüksek döküm hızında kalıbı doldurmak için geçen zaman kısaltmakta ve sabit süre içinde maksimum kalıp basıncı düşük döküm hızına göre daha az olmaktadır.

10. KYB karışımlarının tiksotropisi ile kalıp basıncı arasında negatif bir ilişki vardır. Tiksotropisi büyük olan karışımların kalıba yaptığı yanal basınçtaki düşüş zaman içinde daha fazladır. Bu ilişkinin bilinmesiyle taze betonun kalıba yapacağı yanal basınç, karışımın tiksotropisinin bilinmesiyle önceden tahmin edilebilir.

11. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan karışımlarda 28 günlük basınç dayanımı 65 MPa, s/b oranı 0.50 olan karışımlarda ise 28 günlük basınç dayanımı 45 MPa mertebesinde çıkmıştır. Karışımların yayılma çapı ve İA/TA oranındaki değişim basınç ve yarmada çekme dayanımlarını etkilememektedir.

12. Karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Basınç dayanımı arttıkça yarmada çekme dayanımı da artmaktadır. Normal betona göre sabit basınç dayanımı için yarmada çekme dayanımı daha yüksek çıkmaktadır.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışma sonucu verilen öneriler aşağıda özetlenmiştir:

1. KYB'nin kalıba yaptığı yanal basıncı tam ölçekli kalıpta ölçülebilir ve küçük boyuttaki kalıp ile arasındaki ilişki modellenenbilir.
2. Tez çalışmasında kullanılan 50 cm yüksekliğindeki basınç kalıbı farklı döküm hızlarında oluşan yanal kalıp basıncın etkisini görmek için yeterli değildir. Daha büyük boyutlardaki kalıplarda döküm hızının yanal basınca etkisi daha çok görülebilir.
3. Yapısal çökme alanı ve dinlenmede eşik değeri yöntemleri taze betonun tiksotropisinin belirlenmesi için kullanılabilir.
4. İri agrega/toplam agrega oranının reoloji, tiksotropi ve kalıp basıncı üzerindeki etkisini daha iyi görmek için daha çok İA/TA oranı ile deneyler yapılması gerekmektedir.
5. Akışkanlaştırıcı tipi ve kimyasal katkı tipindeki değişimin tiksotropi ve yanal kalıp basıncına etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmad, S.H., Shah, S.P.**, 1985, Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete, PCI Journal, Vol. 30, No. 6, pp. 92-119.
- Amziane, S., Baudeau, P.**, 2000, Effect of Aggregate Concentration and Size in Fresh Concrete Pressure on Formwork Walls, Materials and Structure, Vol. 33, pp. 50-58.
- Assaad, J., Khayat, K.H., Mesbah, H.**, 2003, Assessment of Thixotropy of Flowable and Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 2, pp. 99-107.
- Assaad, J.**, 2004, Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete – Influence of Thixotropy, Sherbrooke Üniversitesi, Kanada, Doktora Tezi.
- Assaad, J., Khayat, K.H.**, 2005a, Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 3, pp. 145-153.
- Assaad, J., Khayat, K.H.**, 2005b, Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete Made with Various Binder Types and Contents, ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 4, pp. 215-223.
- Baradan, B.**, 2003, İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Banfill, P.F.G., Saunders, D.C.**, 1981, On the Viscometric Examination of Cement Pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 11, pp. 363-370.
- Barnes, H.A.**, 1997, Thixotropy – A Review, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, No. 70, pp. 1-33.
- Bartos, P.**, 1992, Fresh Concrete: Properties and Tests, Elsevier.
- Bartos, P.J.M.**, 2005, Testing – SCC: Towards New European Standards For Fresh SCC, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete SCC', Changsha, Hunan, China
- Billberg, P.**, 1999, Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
- Billberg, P.**, 2003, Form Pressure Generated by Self Compacting Concrete, Third international RILEM symposium, RILEM Publication, PRO 33. pp. 271-280.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Billberg, P., Petersson, O., Westerholm, M., Wustholz, T., Reinhardt, H.W.,** 2004, Test methods for passing ability, Summary report on work package 3.2.
- Botte, J., Burdin, J., Zermatten, M.,** 1999, SCC tunnel applications: Cleuson Dixence project and Loetschberg basis tunnel, Switzerland, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, Sweden pp. 681 – 693.
- Bouzoubaa, N., Lachemi, M.,** 2001, Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results, Cement and Concrete Research, 31(3): 413-420.
- Brouwers, H.J.H., Radix, H.J.,** 2005, Self Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 2116-2136
- Collepardi, M., Khurana, R., Valente, M.,** 1989, Construction of a Dry Dock Using Tremie Superplasticized Concrete, Proceedings of the ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Editor V.M. Malhotra, pp. 471-492, ACI SP-119.
- Cussigh, F.,** 2007, SCC in practice: opportunities and bottlenecks, Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 21 – 27.
- De Larrard, F., Hu, C., Sztikar, J. C., Joly, M., Claux, F., Sedran, T.,** 1995, A new Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete, LCPC Internal Report.
- De Larrard, F., Ferraris, C.F., Sedran, T.,** 1998, Fresh Concrete: A Herschel-Bulkley Material, Materials and Structures, 31, 494-498.
- Domone, P.L.J.,** 2006, Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, Cement and Concrete Composites, 28(2):197-208.
- Domone, P.L.J.,** 2007, A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting concrete, Cement and Concrete Composites, 29(1):1-12.
- EFNARC,** 2005, Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK, www.efnarc.org
- Ferraris, C.F.,** 1999, Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ferraris, C.F., Gaidis, J.**, 1992, Connection between the rheology of concrete and the rheology of cement paste, *ACI Materials Journal*, 88, 388-393.
- Gardner, N.J., Ho, P.T.-J.**, 1979, Lateral Pressure of Fresh Concrete, *ACI Journal*, Technical Paper, Title No. 76-35, pp. 809-820.
- Gardner, N. J.**, 1980, Pressure of Concrete Against Formwork, *ACI Journal*, Technical Paper, Title No. 77-31, pp. 279-286.
- Gardner, N.J.**, 1984, Formwork Pressures and Cement Replacement by Fly Ash, *Concrete International*, pp. 50-55.
- Ghezal, A., Khayat, K.H., Beaupré, D.**, 2002, Effect of High-Range Water-Reducer – Equivalent Mortar, *Proceeding of the First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, U.S.A, pp. 159-165.
- Hanna, A.S.**, 1999, *Concrete Formwork Systems*, Marcel Dekker, USA.
- Hayakawa, M.**, et. al., 1993, Development & Application of Super Workable Concrete, *RILEM International Workshop on Special Concretes: Workability and Mixing*, Paisley.
- Kennedy, C.T.**, 1940, The Design of Concrete Mixes, *Proceeding of American Concrete Institute*, Vol. 36, pp. 373-400.
- Khayat, K.H., Hu, C., Monty, H.**, 1999, Stability of self compacting concrete, advantages, and potential applications, *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, Sweden* pp. 143 – 152.
- Khayat, K.H.**, 1999, Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal* 96(3):-346.
- Khayat, K.H.**, 2000, Optimization and Performance of Air-Entrained SCC, *ACI Materials Journal*, pp. 526-535.
- Khayat, K.H., Assaad, J., and Daczko, J.**, 2004, Comparison of Field-Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, 101(2), 168- 176.
- Kosmatka, S.H.**, Panarese, W.C., 1994, *Design and Control of Concrete Mixtures*, PCA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lapasin, R., Rapo, A., Rajgelj, S.**, 1983, Flow Behavior of Fresh Cement Pastes. A Comparison of Different Rheological Instruments and Techniques, Cement and Concrete Research, Vol. 9, pp. 235-261.
- Leeman, A., Lura, P., Loser, R.**, 2011, Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2283–2289.
- Liu, M.**, 2009, Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete, PhD Thesis. Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London.
- Loser, R., Leemann, A.**, 2009, Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete, Materials and Structures, 42, pp. 71–82.
- Luo, S.**, 2005, Study on the application of self-compacting concrete in strengthening engineering, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 633 – 640
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.**, 2006, Concrete Microstructure, Properties and Materials, McGraw-Hill, 659p.
- Nielsson, I., Wallevik, O.H.**, 2003, Rheological evaluation of some empirical test methods preliminary results, In: Wallevik O, Nielsson I (eds) Third international RILEM symposium, RILEM Publication PRO 33. Reykjavik, Iceland, pp 59–68.
- Oh, S.G., Noguchi, T., Tomosawa, F.**, 1999, Toward mix design for rheology of self-compacting concrete, First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, Sweden pp. 361-372.
- Okamura, H.**, 1997, Self-compacting high-performance Concrete, Concrete International 19(7):50-54.
- Okamura, H., Ouchi, M.**, 1999, Self-compacting concrete. Development, present use and future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, pp. 3-14.
- Okamura, H., Ozawa, K.**, 2005, Mix design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE, No. 25, pp. 107-120.
- Ore, E. L., Straughan, J.J.**, 1968, Effect of Cement Hydration on Concrete Form Pressure, ACI Journal, Title No. 65-9 pp. 111-120.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ozawa, K., Ouchi, M.**, (editor) 1999, Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi.
- Ozawa, K., Maekawa, K., Okamura H.**, 1990, High performance concrete with high filling capacity, In: RILEM Symposium on Admixture for Concrete, pp.51-62.
- Radocea, A.**, 1994, A Model of Plastic Shrinkage, Magazine of Concrete Research, Vol. 46, No. 167, pp. 125-132.
- RILEM TC 174 SCC.** (2000). "Self compacting concrete State-of-the-art report of RILEM technical committee 174-SCC". Skarendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France.
- Ritchie, A.G.B.**, 1962, The Triaxial Testing of Fresh Concrete, Magazine of Concrete Research, 14 (40), pp. 37-41.
- Ritchie, A.G.B.**, 1962, The Pressures Developed by Concrete on Formwork, Civil Engineering and Public Works Review, Part 1, V. 57, No. 672; Part 2, V. 57, No. 673, 10 pp.
- Roby, H.G.**, 1935, Pressure of Concrete on Forms, Civil Engineering, Vol. 5, 162 pp.
- Rodin, S.**, 1952, Pressure of Concrete on Formwork, Proceedings, Institute of Civil Engineers (London), V. 1, Part 1, No. 6, pp. 709-746.
- Saak A.W., Jennings H.W., Shah S.P.**, (2001). "New Methodology for Designing Self Compacting Concrete" ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 6, pp. 429-439.
- Kwon S.H., Phung O.T., Park, H.Y., Kim J.H., Shah S.P.**, 2011, "Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete" Cement and Concrete Research Vol. 41 pp. 90-101.
- Shah S.P., Ferron R.P., Ferrara L., Tregger N., Kwon S.H.**, 2007, Research on SCC: Some emerging themes, Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp. 3-14.
- Shah S.P., Ferron, R.P., Tregger N., A., Ferrara L., Beacraft M.W.**, 2009, Self-Consolidating concrete: now and future, 2nd International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 3-15.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Skarendahl A.**, 2005, Changing construction technologies through the use of self-compacting concrete, First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, pp. 17 – 24.
- Sonebi, M.**, 2004, “Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans”. Cement and Concrete Research 34(7):1199-1208.
- Steigenberger J.**, (1999), “The use of SCC for precast elements” First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, Sweden pp. 717 – 721.
- Struble L.J., Sun G.K.**, 1994, Viscosity of Portland Cement Paste as a Function of Concentration”, Advanced Cement Based Materials.
- Şahmaran M., Christianto H.A., ve Yaman İ.Ö.**, 2006, The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars” Cement and Concrete Composites Volume 28, Issue 5, Pages 432-440.
- Tattersall, G.H.**, 1976, The workability of concrete, A viewpoint Publication, PCA.
- Tattersall, G.H., Bloomer S.J.**, 1979, Further Development of the Two Point Test for Workability and Extension of its Range.” Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 109, pp. 202-210.
- Tattersall, G.H., Banfill P.F.G.**, 1983, The Rheology of Fresh Concrete Pitman Advanced Publishing Program, London, 350 p.
- Tragardh, J.**, 1999, Microstructural features and related properties of selfcompacting concrete, In: The 1st International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete. Skarendahl.A., Petersson.O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France. 175-186.
- Valcuende, M, Parra, C.** 2009, Bond behaviour of reinforcement in self-compacting concretes, Construction and Building Materials, Vol.23, pp.162–170.
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa, M.**, 2000, Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer, Cement and Concrete Research, 30(2):197-207.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zerbino, R., Barragan, B., Garcia, T., Agullo, L., Gettu, R., 2009,** Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete, Materials and Structures, Vol. 42, pp. 947-960.
- Zhu, W., Bartos, P.J.M., 2003,** Permeation properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 33(6):921-926.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Tuyan, 09.09.1985 yılında Balıkesir’de doğdu. İlköğrenimini Balıkesir Atatürk İlköğretim Okulu’nda, orta öğrenimini Balıkesir Rahmi Kula Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2003 yılında başladığı Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2007 yılında mezun oldu. 2007 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılında yatay geçiş ile geçtiği Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim dalından 08.08.2011 tarihinde mezun oldu. 2010 yılından itibaren Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

EKLER

Ek 1 10 m/saat Döküm Hızı için Üretilen KYB Karışımlarının Maksimum Yanal Basınç Değerleri

Ek 2 5 m/saat Döküm Hızı için Üretilen KYB Karışımlarının Maksimum Yanal Basınç Değerleri

Ek 1

	10 m/saat Döküm Hızı İçin Maksimum Yanal Kalıp Basıncı (kPa)														
Zaman (dk)	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
5	10,3	10,8	10,7	10,4	10,3	10,5	10,2	10,4	10,5	10,2	10,4	10,5	10,4	10,4	10,3
10	20,4	25,2	32,8	28,6	26,3	34,5	30,2	28,4	33,1	26,0	29,7	25,8	33,3	29,6	27,6
15	32,8	50,1	53,0	44,7	42,0	53,7	54,3	52,0	52,2	45,6	47,6	46,5	48,1	45,6	55,1
20	52,6	65,8	71,7	65,5	59,1	75,5	60,8	65,7	65,8	69,1	67,1	65,0	65,8	71,8	73,6
25	76,4	80,8	85,5	86,1	78,5	97,7	77,0	79,0	87,2	88,2	82,5	84,9	82,5	88,8	85,8
30	99,9	102,9	100,1	104,8	98,2	111,1	106,1	105,0	106,1	107,8	101,7	106,3	109,6	106,6	100,2
35	126,7	125,7	117,7	121,2	125,7	126,7	130,1	128,9	123,2	126,9	119,3	126,5	130,4	126,8	119,6
40	144,0	144	135,0	138,6	145,6	142,8	144,4	145,0	139,9	144,5	137,6	140,2	148,0	141,9	140,8
45	170,3	168,9	158,9	160,0	163,1	161,9	177,7	178,2	161,6	160,1	157,0	163,9	170,2	164,5	162,5
50	188,3	189,1	177,6	182,9	181,7	180,6	189,2	188,6	179,5	175,8	180,1	188,1	187,5	178,0	188,9
55	200,1	205,7	197,5	204,8	201,9	203,5	205,6	209,0	200,6	194,3	202,5	205,5	209,8	200,6	206,7
60	225,2	221,2	223,6	227,7	219,3	218,8	221,7	221,5	226,6	221,8	222,6	223,0	226,1	222,6	224,8
65	225,2	220,8	223,5	227,7	219,2	218,7	221,6	221,4	226,5	221,8	222,5	223,0	226,1	222,6	224,7
70	225,1	220,5	223,4	227,7	219,1	218,6	221,4	221,4	226,4	221,6	222,4	222,9	226,0	222,6	224,7
75	225,0	220,4	223,3	227,6	219,0	218,4	221,2	221,3	226,3	221,6	222,4	222,7	225,9	222,5	224,6
80	225,0	220,1	223,2	227,6	219,0	218,3	221,0	221,1	226,3	221,5	222,3	222,6	225,9	222,5	224,4
85	224,9	220	223,0	227,5	218,9	218,2	220,9	221,0	226,2	221,4	222,3	222,6	225,8	222,5	224,3
90	224,9	219,9	223,0	227,5	218,9	218,2	220,9	220,8	226,2	221,3	222,3	222,5	225,8	222,5	224,2
95	224,8	219,7	222,8	227,5	218,7	218,0	220,7	220,8	226,1	221,0	222,2	222,4	225,6	222,4	224,2
100	224,8	219,3	222,8	227,4	218,6	217,9	220,4	220,7	226,0	220,7	222,0	222,2	225,5	222,3	224,2
105	224,7	219,2	222,7	227,3	218,4	217,6	220,1	220,6	225,8	220,4	221,9	222,0	225,3	222,3	224,1
110	224,6	218,9	222,5	227,2	218,1	217,4	219,7	220,5	225,7	220,1	221,7	221,8	225,1	222,2	224,1
115	224,6	218,1	222,4	227,2	217,8	217,3	219,6	220,4	225,7	219,9	221,5	221,6	225,0	222,2	224,0
120	224,6	217,5	222,3	227,1	217,6	217,0	219,5	220,2	225,6	219,6	221,4	221,5	224,9	222,0	224,0
125	224,5	217,3	222,2	227,1	217,5	216,7	219,2	220,1	225,5	219,4	221,3	221,4	224,8	221,8	223,9
130	224,5	217,2	222,0	227,0	217,2	216,4	219,0	220,0	225,3	219,1	221,1	221,2	224,7	221,7	223,8
135	224,4	217	221,9	227,0	217,0	216,1	218,8	218,9	225,1	219,0	220,9	221,1	224,6	221,7	223,8
140	224,3	216,6	221,9	227,0	216,8	215,9	218,5	218,8	225,0	218,8	220,8	220,8	224,4	221,6	223,7
145	224,3	216,4	221,8	226,9	216,6	215,8	218,3	218,7	224,9	218,5	220,7	220,7	224,3	221,5	223,7
150	224,2	216,3	221,8	226,9	216,5	215,7	218,2	218,6	224,9	218,4	220,6	220,5	224,1	221,4	223,6
155	224,1	216,1	221,8	226,9	216,4	215,5	218,0	218,5	224,8	218,2	220,4	220,4	224,1	221,4	223,4
160	224,0	215,9	221,8	226,8	216,2	215,2	217,9	218,3	224,7	218,0	220,3	220,3	224,0	221,2	223,1

Ek 1 (devam)

Zaman (dk)	10 m/saat Döküm Hızı İçin Maksimum Yanal Kalıp Basıncı (kPa)														
	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
165	223,9	215,8	221,7	226,6	216,0	215,0	217,7	218,2	224,6	217,9	220,1	220,1	223,8	221,1	222,9
170	223,8	215,8	221,7	226,5	215,8	214,9	217,4	218,1	224,5	217,9	220,0	220,0	223,6	221,0	222,6
175	223,8	215,7	221,7	226,3	215,5	214,9	217,3	218,0	224,5	217,8	219,9	219,7	223,5	221,0	222,4
180	223,7	215,7	221,7	226,2	215,4	214,9	217,2	217,9	224,4	217,7	219,7	219,6	223,4	220,9	222,3
185	223,6	215,6	221,6	226,1	215,4	214,7	217,0	217,6	224,2	217,6	219,6	219,7	223,0	220,7	222,2
190	223,5	215,5	221,6	226,0	215,3	214,4	216,9	217,3	224,0	217,3	219,4	219,4	222,7	220,6	222,0
195	223,5	215,5	221,5	225,8	215,1	214,0	216,6	216,9	223,8	217,2	219,1	219,1	222,4	220,4	221,8
200	223,3	215,4	221,5	225,7	214,9	213,7	216,4	216,8	223,5	217,0	218,9	218,8	222,2	220,3	221,6
205	223,1	215,3	221,5	225,6	214,8	213,5	216,2	216,5	223,4	216,9	218,8	218,5	222,0	220,1	221,3
210	223,0	215,3	221,5	225,5	214,6	213,4	216,0	216,2	223,3	216,9	218,7	218,2	221,9	220,0	221,0
215	222,9	215,3	221,4	225,3	214,5	213,1	215,9	216,0	223,3	216,9	218,5	217,9	221,5	219,8	220,8
220	222,7	215,3	221,4	225,2	214,3	212,8	215,7	215,8	223,3	216,8	218,3	217,6	221,3	219,6	220,5
225	222,5	215,2	221,3	225,0	214,3	212,6	215,5	215,7	223,2	216,8	218,0	217,5	221,0	219,3	220,2
230	222,1	215,2	221,3	224,9	213,8	212,5	215,4	215,6	223,0	216,8	217,9	217,1	220,8	219,0	220,0
235	222,0	215,1	221,2	224,8	213,6	212,3	215,3	215,4	222,9	216,7	217,7	216,9	220,7	218,8	219,9
240	221,9	215,1	221,1	224,7	213,5	212,1	215,2	215,5	222,8	216,7	217,5	216,8	220,6	218,7	219,8
245		215,1					215,0	215,1	222,7	216,7	217,4	216,7	220,5	218,5	219,6
250		215,0					214,9	214,9	222,7	216,7	217,3	216,5	220,4	218,2	219,3
255		215,0					214,7	214,7	222,6	216,7	217,1	216,3	220,0	217,9	219,1
260		214,9					214,5	214,6	222,6	216,6	216,8	216,0	219,7	217,7	218,8
265		214,9					214,4	214,4	222,5	216,6	217,6	215,8	219,4	217,6	218,6
270		214,9					214,3	214,4	222,5	216,6	216,5	215,4	219,2	217,5	218,5
275									222,4	216,5	216,4	215,2	219,0	217,5	218,3
280									222,3	216,2	216,2	215,0	218,9	217,4	218,1
285									222,1	216,0	216,1	214,9	218,7	217,2	217,8
290									222,0	215,9	216,0	214,6	217,6	217,0	217,5
295									221,9	215,7	216,0	214,4	217,6	216,8	217,4
300									221,9	215,6	215,9	214,2	218,4	216,7	217,4

Ek 2

	5 m/saat Döküm Hızı İçin Maksimum Yanal Kalıp Basıncı (kPa)														
Zaman (dk)	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
5	10,6	10,7	10,4	10,7	10,8	10,5	10,5	10,5	10,6	10,5	10,3	10,5	10,3	10,5	10,3
10	15,4	13,4	14,8	12,7	13,1	20,4	18,4	11,0	15,4	19,6	19,1	15,4	18,5	17,6	20,1
15	24,8	22,8	19,6	21,6	23,6	28,6	25,9	14,6	20,6	27,3	24,8	25,6	28,6	26,5	25,3
20	31,5	28,6	27,6	29,1	34,8	37,5	34,9	25,6	30,7	38,1	35,4	36,9	35,5	39,1	33,8
25	39,8	36,1	33,1	37,6	43,7	45,1	46,1	34,6	38,4	43,4	42,8	45,1	44,6	46,9	42,2
30	48,7	45,0	41,8	45,4	51,5	53,8	55,2	47,6	47,5	52,4	55,7	54,7	54,3	55,8	50,5
35	58,2	54,3	49,6	55,8	58,8	63,2	68,8	54,9	55,3	60,8	61,1	65,7	61,8	63,2	61,7
40	66,3	64,8	57,3	66,7	65,4	70,5	76,5	58,7	63,4	68,4	70,5	76,2	70,7	71,5	70,3
45	74,5	73,6	67,6	79,3	74,5	77,4	84,0	72,3	71,8	75,3	76,0	85,5	79,2	80,4	78,4
50	83,0	82,5	76,2	87,9	84,1	86,4	92,7	86,0	81,8	86,1	85,4	92,1	88,1	88,0	88,4
55	91,6	93,8	85,5	95,1	91,2	95,3	100,5	92,4	90,2	95,5	96,9	100,8	99,6	97,6	93,9
60	98,5	101,2	96,1	104,6	100,9	103,7	108,6	99,7	99,1	103,2	104,2	107,6	106,8	108,9	104,2
65	106,8	109,5	105,0	112,8	109,7	113,0	116,8	107,5	107,5	112,8	112,9	115,3	115,5	118,1	115,6
70	115,4	117,7	114,3	121,2	117,6	121,7	124,4	118,1	115,0	122,8	120,5	124,9	123,7	126,5	123,9
75	125,8	127,3	124,8	130,0	125,5	129,8	132,2	124,6	123,9	131,5	127,6	131,4	135,9	135,7	133,8
80	134,6	135,9	133,4	138,4	135,8	137,9	142,5	135,4	135,3	140,9	135,8	141,6	143,2	143,6	140,5
85	142,8	144,6	144,8	145,9	144,6	147,4	153,7	142,0	142,9	149,4	145,5	150,8	151,6	155,7	149,6
90	151,9	154,3	152,9	155,1	151,9	155,1	162,6	150,8	152,7	159,6	156,1	157,7	160,4	162,2	156,4
95	160,0	162,2	161,7	163,8	162,4	163,8	170,5	157,7	160,5	172,1	162,7	168,5	169,0	171,3	165,1
100	171,2	173,0	172,5	171,3	170,7	173,5	177,6	165,0	172,4	183,8	170,8	175,9	171,9	185,9	176,3
105	180,6	181,5	180,9	180,6	178,6	184,8	184,2	171,8	186,2	193,7	179,3	184,3	180,5	192,4	185,7
110	192,3	190,6	192,6	191,7	186,9	192,3	193,1	181,7	193,7	201,4	188,2	195,8	191,3	203,9	197,2
115	203,8	200,8	205,4	202,4	199,4	204,5	203,7	192,0	204,9	210,6	200,9	210,1	206,8	213,7	209,9
120	224,8	214,9	221,2	220,1	217,5	215,1	215,6	219,5	221,2	223,2	226,6	220,5	224,5	221,2	224,7
125	224,7	214,7	221,0	220,0	217,4	215,0	215,4	219,4	221,1	223,0	226,5	220,5	224,4	221,1	224,6
130	224,6	214,3	220,9	219,9	217,2	214,9	215,3	219,3	220,9	222,9	226,4	220,3	224,0	221,0	224,5
135	224,5	214,0	220,7	219,9	217,0	214,6	215,1	219,1	220,7	222,6	226,2	220,0	223,9	220,7	224,3
140	224,2	213,9	220,5	219,8	216,9	214,5	214,8	218,9	220,6	222,4	226,0	219,8	223,6	220,5	224,2
145	224,1	213,9	220,4	219,8	216,8	214,4	214,3	218,8	220,5	222,1	226,0	219,5	223,3	220,4	224,1
150	224,1	213,8	220,1	219,7	216,6	214,4	214,0	218,7	220,5	222,0	225,9	219,3	223,2	220,2	224,0
155	224,0	213,6	220,0	219,7	216,5	214,3	213,8	217,9	220,3	221,8	225,7	219,1	223,0	220,1	223,7
160	223,9	213,3	219,7	219,6	216,3	214,1	213,7	217,8	220,2	221,7	225,3	218,7	222,9	220,0	223,5

Ek 2 (devam)

Zaman (dk)	5 m/saat Döküm Hızı İçin Maksimum Yanal Kalıp Basıncı (kPa)														
	35/45/65	35/50/55	35/50/65	35/50/72	35/53/65	42/45/65	42/50/55	42/50/65	42/50/72	42/53/65	50/45/65	50/50/55	50/50/65	50/50/72	50/53/65
165	223,7	213,1	219,6	219,5	216,1	213,8	213,7	217,7	220,0	221,4	225,0	218,6	222,6	219,9	223,1
170	223,6	212,9	219,5	219,4	215,9	213,7	213,7	217,5	219,7	221,3	224,9	218,5	222,2	219,8	222,9
175	223,3	212,8	219,3	219,2	215,8	213,6	213,6	217,4	219,6	221,1	224,8	218,4	222,1	219,7	222,7
180	223,0	212,7	219,0	219,0	215,8	213,5	213,6	217,3	219,5	221,0	224,7	218,4	222,1	219,6	222,6
185	222,7	212,6	218,9	219,0	215,7	213,4	213,4	217,2	219,4	220,9	224,6	218,3	222,0	219,4	222,5
190	222,5	212,4	218,8	218,9	215,6	213,1	213,3	217,1	219,1	220,0	224,4	218,3	221,9	219,1	222,2
195	222,2	212,0	218,6	219,8	215,4	212,9	213,1	217,0	219,0	219,9	224,0	218,2	221,8	218,7	222,0
200	222,0	212,0	218,4	219,8	215,3	212,8	213,0	217,0	218,9	219,8	223,7	218,1	221,7	218,3	221,9
205	221,9	211,9	218,2	219,7	215,1	212,7	212,8	216,9	218,8	219,6	223,4	218,1	221,6	218,0	221,5
210	221,9	211,7	218,0	218,6	215,0	212,6	212,7	216,9	218,7	219,5	223,1	218,0	221,5	217,9	221,3
215	221,7	211,6	218,0	218,6	214,8	212,5	212,6	216,8	218,5	219,3	223,0	218,0	221,4	217,9	221,0
220	221,5	211,5	217,9	218,5	214,6	212,2	212,5	216,6	218,3	219,0	222,8	217,9	221,4	217,8	220,9
225	221,2	211,4	217,8	218,2	214,1	212,0	212,4	216,4	218,0	218,9	222,6	217,9	221,3	217,6	220,6
230	221,0	211,4	217,6	218,0	213,9	211,9	212,3	216,3	218,0	218,7	222,4	217,9	221,3	217,4	220,4
235	220,8	211,3	217,5	217,9	213,7	211,9	212,2	216,2	217,9	218,6	222,3	217,8	221,2	217,3	220,2
240	220,4	211,3	217,4	217,7	213,6	211,8	212,1	215,9	217,8	218,6	222,2	217,8	221,2	217,0	220,1
245		211,2					212,0		217,8	218,5	222,0				220,1
250		211,0					211,9		217,7	218,4	221,9				220,0
255		210,9					211,8		217,6	218,3	221,7				219,9
260		210,9					211,7		217,4	218,2	221,4				219,8
265		210,9					211,7		217,1	218,2	221,3				219,7
270		210,9					211,6		217,1	218,2	221,2				219,6
275		210,8							217,0	218,2	221,1				219,6
280		210,7							216,9	218,1	221,1				219,3
285		210,6							216,8	218,0	221,0				219,3
290		210,5							216,6	217,9	221,0				219,2
295		210,5							216,5	217,9	220,9				219,2
300		210,5							216,5	217,8	220,9				219,2