

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton Deney Sonuçları Arasındaki İlişkiler

Cengiz ÖZEL*
Kemal Tuşat YÜCEL**

ÖZ

Taze betonların özellikleri eşeksenli viskozimetrelerle belirlenmektedir. Ancak bu cihazların yüksek maliyeti ve yalnızca laboratuvarlarda kullanılabilmesi yaygın kullanımını engellemektedir. Bu çalışmada; farklı bileşimlere sahip (agrega tipi, mineral, kimyasal ve fiber katkı) üç farklı çimento dozajında üretilen betonların taze haldeki özellikleri; Çökme, J ring, K çökme ve İki Nokta İşlenebilirlik Deneyleri (CTPT) ile belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler üzerinde; her deneyin kendi çıktıları arasındaki ilişkiler ve bu çıktılar ile CTPT'den elde edilen verilerin ilişkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre reolojik parametrelerin çimento dozajı ile kullanılan akışkanlaştırıcı katkı tipine göre değiştiği ve en yüksek belirleyicilik katsayısının çökme kombinasyonlu olarak uygulanan J ring deneyinden elde edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Taze beton deneyleri, işlenebilirlik, reolojik parametreler, katkı betonlar

ABSTRACT

Relationships between the Rheological Properties of Fresh Concrete Containing Admixtures and Some Test Results on Fresh Concrete

Properties of fresh concrete are determined by using coaxial viscometers. However, these devices are not widely used since they are very expensive hence can only be used in laboratories. In this study, properties of fresh concrete were determined using Slump, J Ring, K Slump and Two Point Workability tests (CTPT), on concrete mixes having different composition characteristics (types of aggregate, minerals, chemical and fiber admixtures) for three different cement dosages. The results obtained from each test are correlated with each other. In addition, the results obtained from Slump, J Ring, and K Slump tests are also correlated with CTPT test results. According to the obtained results,

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 01.09.2008 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Isparta - cozel@tef.sdu.edu.tr

** Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta - kyucel@mmf.sdu.edu.tr

rheological parameters differ due to cement dosage and type of plasticizer admixture. The highest determination ratios are obtained for J ring tests when used with slump cone.

Keywords: Tests of fresh concrete, workability, rheological parameters, concretes containing admixture

1. GİRİŞ

Betonun taze haldeki özellikleri sertleşme sürecini ve sonrasında kazanacağı özellikleri doğrudan etkilemektedir. Betonun sertleşmesinin tersinmez oluşu, nitelik denetim ve güvence sisteminin sertleşme sürecinden önce, bileşenlerin tedarik edilmesinden başlayarak kurulmasını zorunlu kılmaktadır. Betonun taze haldeki özellikleri bileşenlerine ve karıştırma sürecine bağlı olduğu için, bunlar denetlenerek istenilen sertleşmiş beton özellikleri denetim altına alınabilir.

İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Betonlardan en genel anlamda beklenen üç ana özellik; işlenebilme, dayanım ve dayanıklılıktır. Bu özelliklerden dayanım ve dayanıklılık sertleşmiş beton için, işlenebilme ise taze beton için geçerlidir [1, 2, 3].

Taze betonun özellikleri, başta dayanım ve dayanıklılık olmak üzere, sertleşmiş betonun tüm özelliklerini ve ekonomikliğini etkilemektedir. İşlenebilme taze betonun en önemli özelliğidir. İşlenebilme özelliği betonun yapısından kaynaklanan; taze beton kütleğinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun gösterdiği direnç (kayma dayanımı), yerleştirilme ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık özellikleri (kohezyon) ile ilgilidir. Taze harcın ve betonun reolojik sabitleri; kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (η_{pl}) akış bilimi olarak tanımlayabilen Reoloji bilimi ile açıklanır [4, 5, 6]. Ölçülebilen fiziksel faktörlerle bağlantı olarak işlenebilirlik için üç temel özellik vardır. Bunlar; kararlılık, sıkıştırılabilirlik ve hareket kabiliyeti'dir. Kararlılık, terleme ve segregasyona bağlıdır. Hareket kabiliyeti iç sürtünme açısına, bağ kuvvetine ve viskoziteye bağlıyken, sıkıştırılabilirlik yoğunluğa eşdeğerdir [7].

Genel kabul olarak, işlenebilirlik deneyi (ASTM C143 [8] veya TS EN 12350-2 [9]) betonun çökmesi deneyi (Slump) ile yapılır. Ancak çökme deneyi statik deneydir ve çökmeleri eşit olan betonların akışkanlıkları eşit olmayabilir; aynı çökmeyi gösteren betonlarda η_{pl} değeri küçük olan daha akışkan bir beton olacaktır. Öte yandan τ_0 eşit veya çökmeleri eşit betonlardan η_{pl} değeri yüksek olanın stabilitesi daha iyi olacaktır [10]. Bununla beraber işlenebilirliğin gerekli bileşenlerini belirlemek için bazı dinamik deneyler ile uzun zamandır çalışılmaktadır [11, 12, 13]. Taze betonun özelliklerini belirlemek için birçok deneysel metot geliştirilmiştir. Bu deney metotları birkaç grup altında toplanabilir.

- Kohezyon, kararlılık ve betonun sıkışması için gerekli enerjinin ölçülmesi gibi özellikleri ölçen deneyler,
- Betonun deney esnasında serbest akmasına izin veren ya da serbest akmasını engelleyen deneyler ve

- Deney sonucunda elde edilen verilerle tek ya da iki reolojik parametreyi (kayma eşiği ve/veya plastik viskozite) belirleyen deneylerdir.

Tek noktalı deneyler genellikle basit ve hızlıdır. Bu deneyler sadece bir reolojik değeri (τ_0 veya η_{pl}) veya faktörü ölçer. Ölçülmüş faktörler ile iki temel reolojik parametrelerin herhangi biri arasındaki ilişki açık değildir. Birçok durumda, temel parametreler, ölçülmüş faktörler için hesaplanabilir değildir ancak sadece ilişkili olduğu varsayılabilir [7, 14].

Reolojik sabitler olan; plastik viskozite ve kayma eşiğinin beton ve harçlarda ölçülmesinde, klasik reoloji deneylerindeki benzer olan silindir veya paralel plaka geometrisinde eşeksenli veya eşmerkezli (Couette viskozimetre veya dönel viskozimetre olarak da bilinir) viskozimetreler kullanılır. Betonlarda süspansiyon içindeki tanelerin iriliği nedeniyle daha güçlü, silindirler arası daha açık eşeksenli veya dış silindir içinde eşmerkezli ya da kanatlı olarak dönen bir karıştırıcısı olan viskozimetreler gerekir. Kayma eşiğini de ölçmek için muhtelif dönme hızlarına karşı gelen kayma gerilmelerinin ölçülmesi ve $(d\gamma/dt) \leftrightarrow \tau$ grafiğinin çizilmesi şarttır. $(d\gamma/dt) \leftrightarrow \tau$ doğrusunu çizebilmek için en az iki noktaya ihtiyaç olduğundan bu tür araçlara, iki nokta işlenebilme “Two-point workability apparatus” adı verilmektedir [6, 7, 15, 16].

Banfill [17] bileşenlerindeki boyutlar nedeniyle taze betonun reolojisini belirlemede, bilinen eşeksenli silindir viskozimetrelerin kullanılamayacağını, reolojik ölçümleri sağlayan cihazın aralığı en büyük parçacık boyutunun on katı ve dış silindir çapın iç silindir çapına oranı 1.2 den az olmaması gerektiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada farklı bileşime sahip katkılı betonların Çökme (Slump), J Ring ve K Çökme deneylerinden elde edilen veriler ile her deneyin kendi çıktıları ve İki Nokta İşlenebilirlik (CTPT) cihazından elde edilen Bingham parametreleri ile arasındaki ilişki belirleyicilik (determinasyon) katsayılarına göre araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre reolojik parametreleri tanımlamada kullanılabilecek deney ve/veya deneyden elde edilen parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

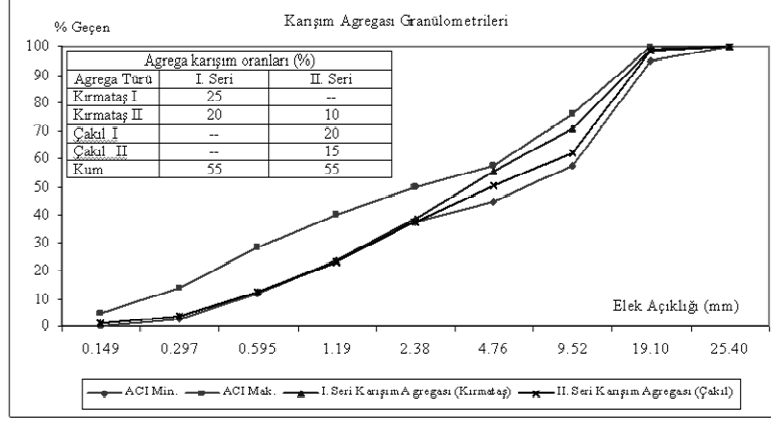
2.1. Materyal

Araştırmada üretilen betonların iri fazı ilk seride kırmataş (çekiçli kırıcılardan elde edilen), ikinci seride kırmataş ve çakıldan (doğal dere çakılı) oluşmaktadır (Şekil 1). İnce faz ise doğal dere kumudur.

Betonların reolojik özellikleri üzerinde çimentonun C_3A içeriğinin, inceliğinin, $CaSO_4$ tipi ve miktarının etkili olduğu belirtildiğinden [2] katkı ve agregası tipinin etkisinin incelenmesi açısından üretilen tüm serilerde TS EN 197-1'e [18] uygun çimento sabit olarak kullanılmıştır (Çizelge 1).

Bağlayıcı ve dolgu malzemesi olarak silis dumanı (S) ve uçucu kül (C tipi “ C_{uk} ” ve F tipi “ F_{uk} ” uçucu küller, ASTM C 618 [19]) mineral katkıları kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan mineral katkılara ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...



Şekil 1. Üretilen betonların karışım granülometrisi ve sınır değerleri

Çizelge 1. Çimento ve mineral katkıların özellikleri

	Çimento	F _{uk}	C _{uk}	S (FeSi)
SiO ₂	17.52	58.33	53.82	35.39
Al ₂ O ₃	4.06	25.92	20.55	0.45
Fe ₂ O ₃	3.45	6.60	12.42	0.52
CaO	56.56	2.58	4.36	1.00
MgO	1.66	2.62	4.14	2.73
SO ₃	2.44	0.32	0.45	0.09
K ₂ O	-	4.03	2.76	2.33
Na ₂ O	-	0.42	0.69	0.49
KK	2.99	0.99	2.25	55.36
Cl-	0.001	-	-	-
Serb. CaO	1.35	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0.08	0.12	2.46
TiO ₂	-	1.58	1.17	0.04
90 μ (elekte kalan)	2.5	18.6	13.8	12.3
200 μ (elekte kalan)	0.1	3.30	4.6	3.5
Blaine (m ² /kg)	311	288	555	-
Yoğunluk (kg/m ³)	3120	2000	2130	2100

Su/Bağlayıcı (S/B) oranı tüm serilerde sabit tutulup (0.38) akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların (polinaftelen “SA” ve polikarboksilat “HA” kökenli akışkanlaştırıcı) farklı oranlarda kullanılmasıyla benzer çökmeli (200± 20 mm) ve farklı reolojik sabitleri olan betonlar üretilmiştir. Polinaftelen kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı (SA); ASTM C

494 Tip G [20], 20°C Bağlı Yoğunluk; 1.21 kg/l ve Katı madde oranı %41.5'dir. Polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı (HA); TS EN 934-2 [21], 20°C Bağlı Yoğunluk; 1.10 kg/l ve Katı madde oranı %22.0'dir.

350 ve 400 kg/m³ çimento dozajında üretilen betonlarda, 0.6 kg/m³ oranı sabit tutulan polipropilen fiber (P) kullanılmıştır. Kullanılan polipropilen fiber lifin boyu 12 mm, çapı 18 mikron, özgül ağırlık 0.91 g/cm³, özgül yüzey alanı 250 m²/kg'dır.

2.2. Metot

Üretilen betonlarda her iki iri seri için, çimento dozajları 300, 350 ve 400 kg/m³ olarak seçilmiş ve her bir çimento dozajında SA ve HA katkıları ayrı ayrı kullanılmıştır. Yine karışımlarda mineral katkı olarak; silis dumanı (S) [16, 22, 23], C ve F tipi uçucu küller (C_{uk} ve F_{uk}) [16, 24, 25], silis dumanı ile uçucu külün beraber kullanıldığı seriler (SC_{uk} ve SF_{uk}) üretilmiştir. Bu katkılar sırasıyla, %10 S, %20 C_{uk} - %20 F_{uk}, %10 S ile %10 C_{uk} (SC_{uk}), %10 S ile %10 F_{uk} (SF_{uk}) çimento ağırlığının oranı olarak karışıma ilave metoduyla katılmıştır. Karışım dizaynları Çizelge 2'de verilmiştir.

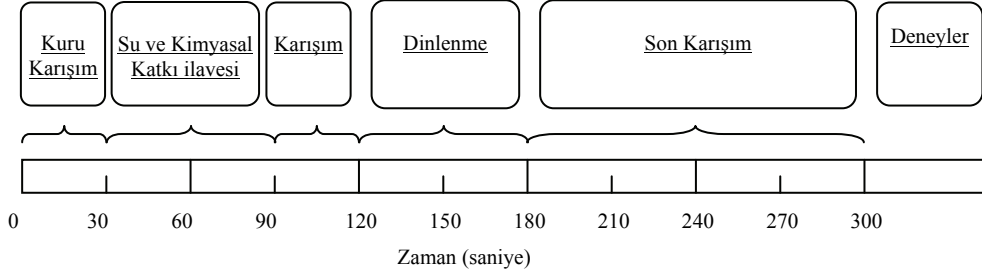
Çizelge 2. Araştırma deneyleri karışım bileşenleri

İri Agrega Fazı	Çimento Dozajı (kg/m ³)	Kimyasal Katkı Tipi	1. grup (Mineral Katkısız)	2. grup % 10 S	3. grup %20F _{uk}	4. grup %20C _{uk}	5. grup %10 S+ %10F _{uk}	6. grup %10 S+ %10C _{uk}	7. grup P
Kırmataş	300	SA	1. Karışım	2. Karışım	3. Karışım	4. Karışım	5. Karışım	6. Karışım	*
		HA	7. Karışım	8. Karışım	9. Karışım	10. Karışım	11. Karışım	12. Karışım	*
	350	SA	13. Karışım	14. Karışım	15. Karışım	16. Karışım	17. Karışım	18. Karışım	19. Karışım
		HA	20. Karışım	21. Karışım	22. Karışım	23. Karışım	24. Karışım	25. Karışım	26. Karışım
	400	SA	27. Karışım	28. Karışım	29. Karışım	30. Karışım	31. Karışım	32. Karışım	33. Karışım
		HA	34. Karışım	35. Karışım	36. Karışım	37. Karışım	38. Karışım	39. Karışım	40. Karışım
Çakıl + Kırmataş	300	SA	41. Karışım	42. Karışım	43. Karışım	44. Karışım	45. Karışım	46. Karışım	*
		HA	47. Karışım	48. Karışım	49. Karışım	50. Karışım	51. Karışım	52. Karışım	*
	350	SA	53. Karışım	54. Karışım	55. Karışım	56. Karışım	57. Karışım	58. Karışım	59. Karışım
		HA	60. Karışım	61. Karışım	62. Karışım	63. Karışım	64. Karışım	65. Karışım	66. Karışım
	400	SA	67. Karışım	68. Karışım	69. Karışım	70. Karışım	71. Karışım	72. Karışım	73. Karışım
		HA	74. Karışım	75. Karışım	76. Karışım	77. Karışım	78. Karışım	79. Karışım	80. Karışım

* Bu karışımlarda hedef çökme üretilenmemiştir.

Karılma işlemi her karışım için Şekil 2'de gösterildiği gibi toplam 300 s'de (5 dk.) düşey eksenli cebri karıştırıcılı beton mikseri ile yapılmıştır.

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...



Şekil 2. Betonun karılma işlem aşamaları

Üretilen her beton karışımı için eş zamanlı olarak Çökme, J Ring, K Çökme ve İki Nokta İşlenebilirlik Deneyleri uygulanmıştır.

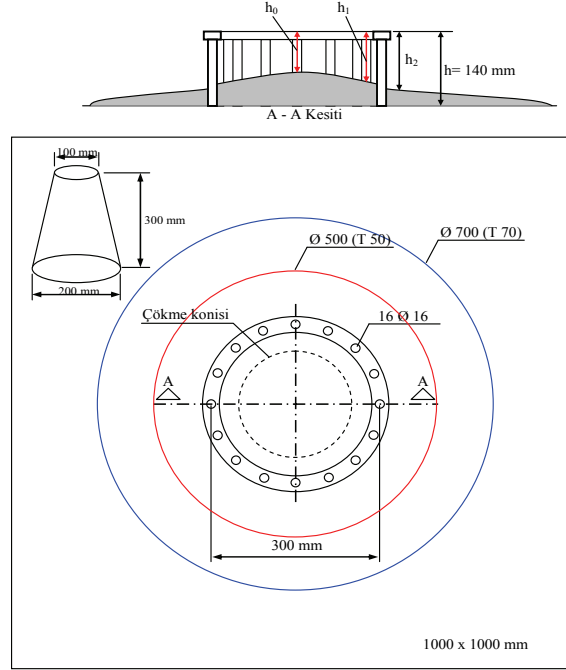
Çökme (Slump) deneyi ASTM C143 [8] ve TS EN 12350-2'e [9] göre yapılmıştır. Yapılan çökme deneyinde, çökme yüksekliği (CCY), toplam yayılma çapı [7] (CTYC) ve toplam yayılma süresi (CTYS) üretilen her beton için ölçülmüştür. Ayrıca deney sonuçlarının analizinde son yayılma çapının, başlangıç çapına oranı olarak tanımlanan [2] "Yayılma Alanı Oranı (CYAO)" da kullanılmıştır.

J ring deneyi, EFNARC'a [26] göre yapılmıştır (Şekil 3). J ring; çökme, orimet deneyi veya V huni ile birlikte kullanılabilir. Bu deney kombinasyonunun nedeni, betonun akma yeteneğinin ve J ring'in yardımıyla betonun geçme yeteneğinin belirlenebilmesidir. Orimet zamanı ve/veya çökme yayılması akış karakteristikleri olarak ölçülür [26].

J ring cihazı çökme konisi, bir kenarı en az 700 mm olan alt tabla (üzerinde çökme konisi için merkezi gösteren daire, 500 ve 700 mm çapında eş merkezli daireler çizilmiş) ile 300 mm çapındaki çelik halka üzerine yerleştirilmiş çelik çubuklardan (100 mm uzunluğunda, 10 mm çapında, 48 ± 2 mm aralıklı) (ring) oluşur. Koninin yukarı kaldırılmasıyla betonun 500 mm (T50) ve 700 mm'ye (T70) serbest akış zamanı ölçülür. Yayılma tamamlandıktan sonra yükseklikler; ring içi, dışı ve çökme yüksekliği olmak üzere Şekil 3'de gösterildiği gibi ölçülür. Hesaplamalarda karşılıklı kenarlardan olmak üzere alınan dört farklı ring içi ve dışı yüksekliğin ortalaması kullanılır [26].

Betonun yayılması deneylerin büyük çoğunluğunda 500 mm çapındaki daireye ulaşmadığı için bu ölçü alınmamış, "Toplam Yayılma Süresi (JTYS)" ölçülmüştür. Ring'in dört ayrı noktasından alınan iç ve dış yüksekliklerin ortalaması h_1 ve h_2 olarak alınmıştır. Dış yüksekliğin iç yüksekliğe oranı olarak (h_2/h_1) JHO değeri hesaplanmıştır. Yine çökme deneyine benzer olarak h_0 "Çökme Yüksekliği (JCY)", "Toplam Yayılma Çapı (JTYS)" ölçümleri de alınmıştır. Bu deneyde de son yayılma çapının, başlangıç çapına oranı "Yayılma Alanı Oranı (JYAO)" olarak belirlenmiş olup analiz ve değerlendirmelerde kullanılmıştır.

K çökme (K Slump) deneyi, ASTM C1362'ye [27] göre yapılmıştır. K çökme ölçümü olarak; sondanın betona sokulmasından sonra ölçülen yükseklik "İlk Yükseklik (KİY)", sondanın çıkarılmasıyla okunan yükseklik "Son Yükseklik (KSY)" ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca ilk yüksekliğin, son yüksekliğe oranı olarak tanımlanan "K Çökme Oranı (KO)" da analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 3. J ring deney cihazı, ölçüleri ve ölçüm noktaları [26]



Şekil 4. CTPT cihazı ve karıştırıcı kanatlar [6].

Araştırma deneylerinde Tattersall'ın geliştirmiş olduğu iki nokta işlenebilirlik cihazı "Two Point Workability Test Apparatus (CTPT)" (Seri No: 05LS201, Supply: 230, FREQ: 50) kullanılmış olup plastik viskozite (η_{pl}) ve kayma eşiği değeri (τ_0) bu cihazdan elde edilmiştir. CTPT cihazı ile betonların işlenebilirliğini belirlemede iki farklı karıştırıcı sistem kullanılabilir (Şekil 4). 75–100 mm'den yüksek çökmeli betonlar için MH sistem ve 50 mm den daha düşük çökmeli betonlar için ise LM sistem kullanılmaktadır.

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...

Üretilen betonlarda hedef çökme 200–220 mm olduğu için, CTPT’de MH sistem kullanılmıştır.

CTPT üç farklı hız modunda kullanılabilir. Bunlar; Sabit Hız Modu (Constant), Basamaklı Hız Modu (Staircase) ve Eğimli Hız Modu’dur (Ramp). Deneysel çalışmalarda Staircase hız modu (başlangıç hızı 120 rpm, bitiş hızı 10 rpm, hız düşüm adımı 10 rpm, her hız basamağında geçen süre 30 s.) kullanılmıştır.

Cihazın kalibrasyonu için Polidimetilsiloksan polimer sıvı kullanılmıştır [28].

Beton örnekleri hazırlanırken mineral katkısız betonda 200±20 mm çökme değeri hedeflendiğinden dolayı katkı tür ve miktarının belirlenmesi aşamaları dahil olmak üzere betonlar beş kez üretilmiş olup çökmeyi ±10 mm doğrulukta sağlayan karışımlarda araştırma deneyleri yapılmıştır. Özellikle CTPT ve taze beton deney çıktıları arasındaki lineer olmayan ilişki gözlemlendiği için aralarındaki ilişkiler en basit parabolik ilişki olan $y = X_1 \cdot x_i^2 + X_2 \cdot x_i + X_3$ fonksiyonu ile araştırılmıştır. Bunun için önce Cramer Kuralına göre çözümden denklem katsayıları bulunmuştur. 300 dozlu, süperakışkanlaştırıcı ve çakıllı seri için CTPT ve J ring deneyinden elde edilen veriler Çizelge 3’de verilmiştir.

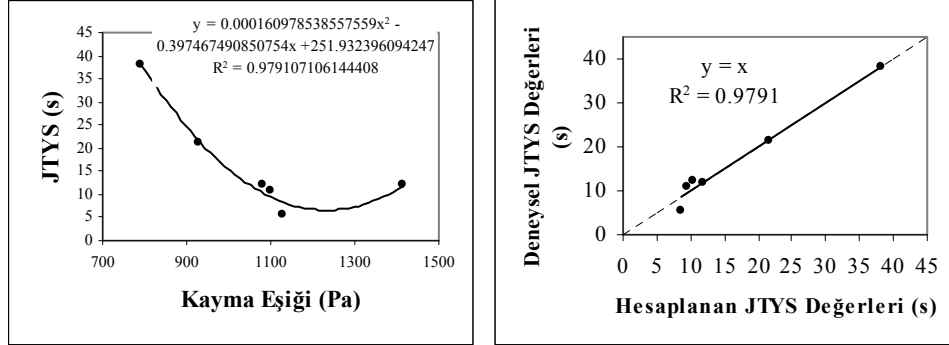
Çizelge 3. Deneylerden elde edilen τ_0 ile JTYS değerleri (300 dozlu, SA’lı ve çakıllı seri)

	Mineral katkısız	S katkılı	F _{uk} katkılı	C _{uk} katkılı	S ve F _{uk} katkılı	S ve C _{uk} katkılı
x_i (τ_0) (Pa)	1126.2	929.1	791.8	1415.4	1099.5	1082.8
y_i (JTYS) (s)	5.5	21.3	38.1	12	10.8	12.2

$$\begin{pmatrix} n & \sum x_i & \sum x_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum (x_i \cdot y_i) \\ \sum (y_i \cdot x_i^2) \end{pmatrix} \begin{matrix} X_1 = 0.000160978538557559 \\ X_2 = -0.397467491 \\ X_3 = 251.9323961 \end{matrix}$$

$y = X_1 \cdot x_i^2 + X_2 \cdot x_i + X_3$ denkleminde katsayılar yerine konulmuş ve τ_0 değerleri x_i değişkeni olarak girilip JTYS değerleri tekrar hesaplanmıştır (y_i). Kurulan modelden elde edilen değerlerin uyumluluğuna, en küçük kareler yönteminden elde edilen belirleyicilik katsayısı (R^2) ile bakılmıştır (Şekil 5).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \Rightarrow R^2 = 0.9791$$

Şekil 5. τ_0 ve JTYS arasındaki belirleyicilik katsayısının belirlenmesi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Aynı karışımda, eş zamanlı deneylerden elde edilen veriler arasında ilk olarak bir deney türünün kendi çıktıkları arasındaki ilişki belirleyicilik katsayıları ile belirlenmiştir.

Çizelge 4'de gösterilen çökme deneyi sonuçlarına göre polikarboksilat kökenli kimyasal katkıli betonların deney çıktılarının kendi aralarındaki belirleyicilik katsayıları genel olarak yüksek olmasına karşılık 300 kg/m^3 çimento dozajlı kırmataşlı seride bu ilişki daha düşüktür. SA'lı betonlarda ise yayılma süresi ile yayılma çapı arasındaki belirleyicilik katsayısı 400 kg/m^3 çimentolu seriler haricinde kabul edilebilirdir. Çökme yüksekliği ile yayılma çapı arasında ise 300 kg/m^3 çimentolu serilerde ilişki düşük diğerlerinde daha yüksektir.

Çizelge 4. Çökme deneyi sonuç parametreleri arasındaki belirleyicilik katsayıları

Çimento dozajı ve Agregat türü	Çökme deney çıktısı	SA serisi			HA serisi		
		CTYC	CTYS	CYAO	CTYC	CTYS	CYAO
300 dozlu Çakıllı	CCY	0.13	0.46	0.13	0.95	0.94	0.95
	CTYC		0.71	1.00		0.82	1.00
	CTYS			0.71			0.82
350 dozlu Çakıllı	CCY	0.78	0.50	0.78	0.92	0.47	0.92
	CTYC		0.69	1.00		0.76	1.00
	CTYS			0.69			0.76
400 dozlu Çakıllı	CCY	0.97	0.13	0.97	0.75	0.48	0.75
	CTYC		0.33	1.00		0.66	1.00
	CTYS			0.33			0.66
300 dozlu Kırmataşlı	CCY	0.55	0.87	0.54	0.55	0.56	0.55
	CTYC		0.71	1.00		0.50	1.00
	CTYS			0.71			0.50

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...

Çizelge 4. Çökme deneyi sonuç parametreleri arasındaki belirleyicilik katsayıları (devam)

350 dozlu Kırmataşlı	CCY	0.34	0.12	0.34	0.77	0.69	0.77
	CTYC		0.57	1.00		0.96	1.00
	CTYS			0.57			0.96
400 dozlu Kırmataşlı	CCY	0.82	0.12	0.82	0.72	0.75	0.72
	CTYC		0.32	1.00		0.70	1.00
	CTYS			0.32			0.70

Çizelge 5’de gösterilen J ring deneyi çıktıları arasında, çökme yüksekliği ile yayılma çapı arasında ilişki tüm karışımlar için kabul edilebilir düzeyde yüksek, toplam yayılma süresi ile çökme yüksekliği arasında ilişki 300 kg/m³ çimento dozajlı betonlarda diğerlerine göre daha yüksek ilişki vardır. H oranı (JHO) ile diğer parametreler arasında ilişki düşük olmasına karşılık SA’lı betonlarda daha yüksektir.

Çizelge 5. J ring deneyi sonuç parametreleri arasındaki belirleyicilik katsayıları

Çimento dozajı ve Agrega türü	J ring çığıtsı	SA serisi				HA serisi			
		JTYC	JTYS	JYAO	JHO	JTYC	JTYS	JYAO	JHO
300 dozlu Çakılı	JCY	0.94	0.98	0.94	0.79	0.93	0.87	0.93	0.36
	JTYC		0.91	1.00	0.58		0.82	1.00	0.52
	JTYS			0.91	0.75			0.82	0.23
	JYAO				0.92				0.38
350 dozlu Çakılı	JCY	0.95	0.57	0.95	0.57	0.99	0.88	0.99	0.29
	JTYC		0.31	1.00	0.52		0.79	1.00	0.54
	JTYS			0.31	0.65			0.79	0.20
	JYAO				0.12				0.52
400 dozlu Çakılı	JCY	0.96	0.86	0.96	0.80	0.90	0.23	0.90	0.50
	JTYC		0.78	1.00	0.91		0.46	1.00	0.26
	JTYS			0.78	0.52			0.46	0.39
	JYAO				0.91				0.24
300 dozlu Kırmataşlı	JCY	0.87	0.92	0.87	0.52	0.63	0.80	0.63	0.19
	JTYC		0.78	1.00	0.58		0.74	1.00	0.47
	JTYS			0.78	0.50			0.74	0.70
	JYAO				0.55				0.49
350 dozlu Kırmataşlı	JCY	0.91	0.21	0.91	0.23	0.58	0.73	0.58	0.29
	JTYC		0.41	1.00	0.73		0.90	1.00	0.44
	JTYS			0.41	0.43			0.90	0.22
	JYAO				0.57				0.54
400 dozlu Kırmataşlı	JCY	0.72	0.32	0.72	0.25	0.64	0.69	0.64	0.30
	JTYC		0.40	1.00	0.04		0.54	1.00	0.75
	JTYS			0.40	0.16			0.54	0.16
	JYAO				0.11				0.96

Çizelge 6'da gösterilen K çökme deney çıktıları arasında, ilk yükseklik (KİY) ile son yükseklik (KSY) arasındaki ilişki SA'lı betonların 400 kg/m³ çimento dozajlı serisinde düşük olmasına karşılık diğer serilerde yüksektir. K çökme oranıyla (KO) ise SA'lı betonlarda ilişki HA'lı betonlara göre daha yüksektir. K çökme oranıyla (KO), ilk (KİY) ve son yükseklik (KSY) arasındaki ilişki, ilk yükseklikte daha yüksektir.

Çizelge 6. K çökme deneyi sonuç parametreleri arasındaki belirleyicilik katsayıları

Çimento dozajı ve Agrega türü	K çökme deney çıktıları	S serisi		H serisi	
		KSY	KO	KSY	KO
300 dozlu Çakıllı	KİY	0.82	0.84	0.89	0.53
	KSY		0.75		0.60
350 dozlu Çakıllı	KİY	0.92	0.43	0.91	0.25
	KSY		0.29		0.18
400 dozlu Çakıllı	KİY	0.65	0.85	0.95	0.48
	KSY		0.26		0.33
300 dozlu Kırmataşlı	KİY	0.90	0.14	0.78	0.65
	KSY		0.38		0.59
350 dozlu Kırmataşlı	KİY	0.94	0.99	0.89	0.23
	KSY		0.99		0.55
400 dozlu Kırmataşlı	KİY	0.34	0.53	0.85	0.25
	KSY		0.05		0.03

Taze beton deneyleri ile CTPT'den elde edilen reolojik parametrelerin değişiminden elde edilen belirleyicilik katsayıları Çizelge 7'de verilmiştir. CTPT sonuçlarına göre plastik viskozite ile kayma eşiği arasında hem kırmataşlı hem de çakıllı 300 kg/m³ çimento dozajlı betonlar arasında ilişki yüksek, 350 kg/m³ çimento dozajlı polikarboksilat kökenli katkı betonlarda yüksek, 400 kg/m³ çimento dozajlı betonlarda ise polinaftelen kökenli katkı çakıllı betonlarda ilişki kabul edilebilir düzeydedir. Diğer karışımlarda ilişki düşüktür.

Taze beton deney çıktıları ile CTPT deney çıktıları arasında ilişki incelendiğinde, taze beton deney çıktıları düşük iken reolojik parametrelerin düşük, taze beton deney çıktıları yüksek iken reolojik parametrelerin yine düşük, ara değerlerde ise deney türü, beton tür ve içerdiği katkı özelliğine göre değişen artış ve/veya azalma olduğu görülmüştür.

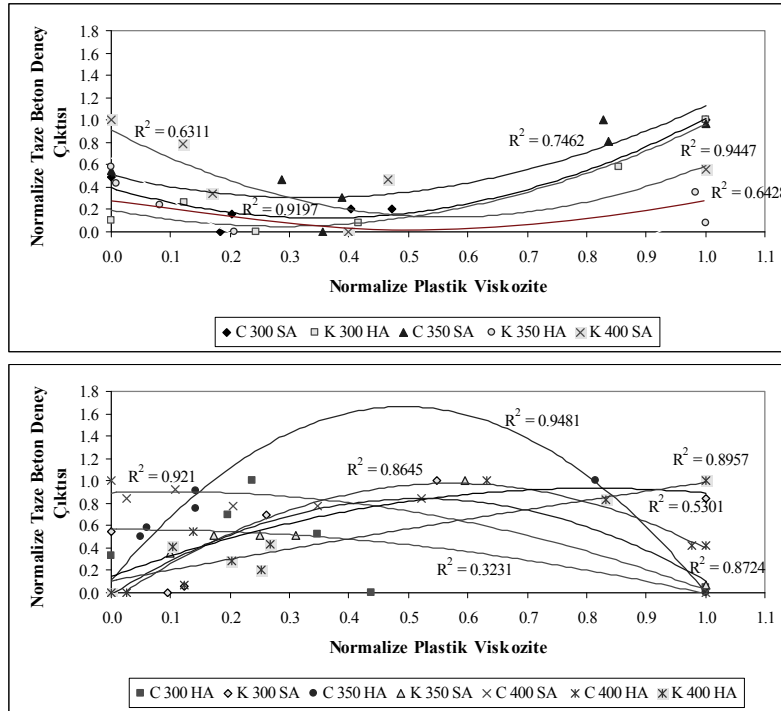
300 kg/m³ çimento dozajlı polinaftelen katkı betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı çakıllı seride her iki reolojik parametre ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (η_{pl} ; 0.920, τ_0 ; 0.979), kırmataşlı seride η_{pl} ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (0.530), τ_0 ile K çökme deneyinin ilk yükseklik (KİY) değeri arasında (0.952) elde edilmiştir. Polikarboksilat kökenli kimyasal katkı betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı ise, çakıllı seride η_{pl} ile K çökme oranı (KO) arasında (0.323), τ_0 ile çökme deneyinin çökme yüksekliği (CCY) arasında (0.973), kırmataşlı seride her iki reolojik parametre ile J ring deneyinin toplam yayılma çapı (JTYC) ve yayılma alanı oranı (JYAO) arasında (η_{pl} ; 0.945, τ_0 ; 0.954) elde edilmiştir.

Çizelge 7. Taze beton deney çıktıları ile CTPT deneyi çıktıları arasındaki belirleyicilik katsayıları

Çimento Dozajı	Kimyasal Katkı Agrega	SA Serisi				HA Serisi			
		Çakıllı Seri		Kırmataşlı Seri		Çakıllı Seri		Kırmataşlı Seri	
	Deney çıktıları	η_{pl}	τ_0	η_{pl}	τ_0	η_{pl}	τ_0	η_{pl}	τ_0
300 Dozlu Karışımlar	η_{pl}		0.582		0.933		0.875		0.925
	CCY	0.147	0.012	0.100	0.527	0.053	0.973	0.639	0.688
	CTYC	0.525	0.111	0.210	0.271	0.110	0.704	0.664	0.948
	CTYS	0.837	0.964	0.344	0.659	0.143	0.786	0.867	0.789
	CYAO	0.525	0.111	0.210	0.271	0.110	0.704	0.664	0.948
	JCY	0.316	0.439	0.056	0.501	0.044	0.849	0.573	0.775
	JTYC	0.600	0.662	0.025	0.788	0.110	0.410	0.945	0.954
	JTYS	0.920	0.979	0.530	0.752	0.069	0.613	0.457	0.602
	JYAO	0.600	0.662	0.025	0.788	0.110	0.410	0.945	0.954
	JHO	0.050	0.166	0.149	0.237	0.128	0.190	0.663	0.541
	KİY	0.421	0.037	0.236	0.952	0.132	0.541	0.240	0.313
	KSY	0.198	0.581	0.195	0.740	0.017	0.919	0.776	0.376
	KO	0.806	0.454	0.480	0.150	0.323	0.679	0.122	0.010
350 Dozlu Karışımlar	η_{pl}		0.221		0.333		0.817		0.832
	CCY	0.282	0.836	0.002	0.020	0.948	0.700	0.327	0.863
	CTYC	0.391	0.574	0.701	0.444	0.781	0.895	0.136	0.710
	CTYS	0.103	0.662	0.522	0.552	0.423	0.883	0.345	0.840
	CYAO	0.391	0.574	0.701	0.444	0.781	0.895	0.136	0.710
	JCY	0.470	0.579	0.390	0.292	0.635	0.925	0.267	0.755
	JTYC	0.313	0.444	0.168	0.324	0.512	0.976	0.112	0.886
	JTYS	0.221	0.861	0.872	0.711	0.289	0.822	0.220	0.965
	JYAO	0.313	0.444	0.168	0.324	0.511	0.976	0.112	0.886
	JHO	0.746	0.143	0.113	0.191	0.800	0.619	0.643	0.594
	KİY	0.318	0.431	0.642	0.145	0.364	0.653	0.240	0.386
	KSY	0.015	0.532	0.637	0.171	0.498	0.771	0.280	0.448
	KO	0.706	0.041	0.195	0.111	0.181	0.273	0.211	0.328
400 Dozlu Karışımlar	η_{pl}		0.790		0.377		0.229		0.442
	CCY	0.921	0.952	0.553	0.207	0.560	0.539	0.654	0.104
	CTYC	0.765	0.630	0.631	0.040	0.537	0.214	0.434	0.106
	CTYS	0.314	0.359	0.163	0.842	0.814	0.015	0.810	0.367
	CYAO	0.765	0.630	0.631	0.040	0.537	0.214	0.434	0.106
	JCY	0.518	0.511	0.611	0.139	0.461	0.677	0.334	0.016
	JTYC	0.655	0.518	0.288	0.023	0.637	0.563	0.452	0.041
	JTYS	0.301	0.250	0.601	0.446	0.865	0.034	0.860	0.387
	JYAO	0.655	0.518	0.288	0.023	0.637	0.563	0.452	0.041
	JHO	0.786	0.499	0.210	0.721	0.721	0.231	0.344	0.079
	KİY	0.583	0.130	0.691	0.279	0.196	0.264	0.133	0.134
	KSY	0.009	0.505	0.270	0.277	0.233	0.176	0.047	0.477
	KO	0.769	0.132	0.737	0.072	0.148	0.634	0.692	0.153

350 kg/m³ çimento dozajlı polinaftelen katkıli betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı, çakıllı seride η_{pl} ile J ring deneyinin H oranı (JHO) arasında (0.746), τ_0 ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (0.861), kırmataşlı seride her iki reolojik parametre ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (η_{pl} ; 0.872, τ_0 ; 0.711) elde edilmiştir. Polikarboksilat kökenli kimyasal katkıli betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı ise, çakıllı seride η_{pl} ile Çökme deneyinin çökme yüksekliği (CCY) arasında (0.948), τ_0 ile J ring deneyinin toplam yayılma çapı (JTYC) ve yayılma alanı oranı (JYAO) arasında (0.976) elde edilmişken, kırmataşlı seride η_{pl} ile J ring deneyinin H oranı (JHO) arasında (0.643), τ_0 ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (0.965) elde edilmiştir.

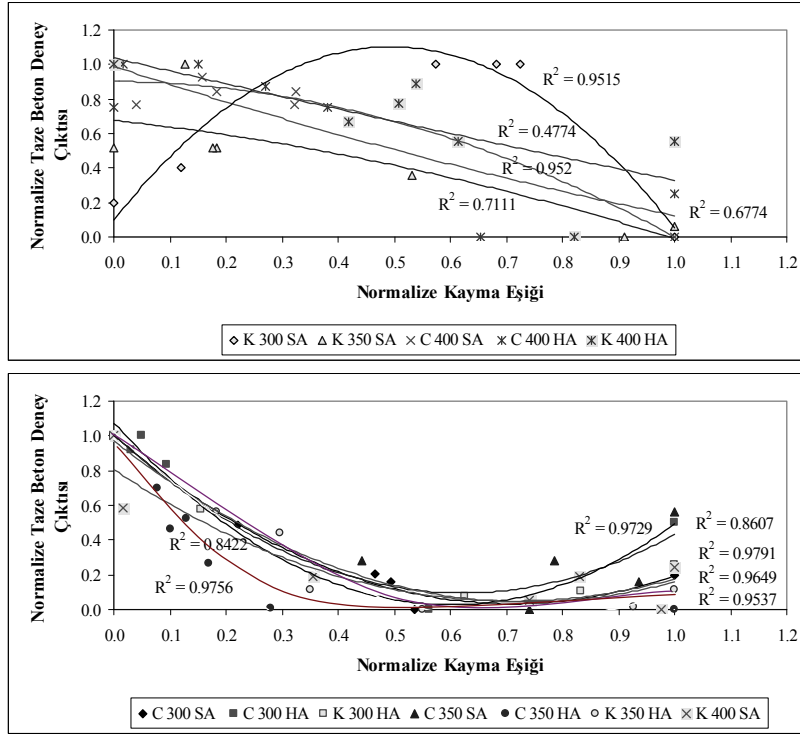
400 kg/m³ çimento dozajlı polinaftelen katkıli betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı, çakıllı seride her iki reolojik parametre ile Çökme deneyinin çökme yüksekliği (CCY) arasında (η_{pl} ; 0.9210, τ_0 ; 0.952), kırmataşlı seride η_{pl} ile Çökme deneyinin toplam yayılma çapı (CTYC) ve yayılma alanı oranı (CYAO) arasında (0.6311), τ_0 ile Çökme deneyinin toplam yayılma süresi (CTYS) arasında (0.8422) elde edilmiştir. Polikarboksilat kökenli kimyasal katkıli betonlarda en yüksek belirleyicilik katsayısı ise, çakıllı seride η_{pl} ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (0.8645), τ_0 ile J ring deneyinin çökme yüksekliği (JCY) arasında (0.6774) elde edilmişken, kırmataşlı seride η_{pl} ile J ring deneyinin toplam yayılma süresi (JTYS) arasında (0.8597), τ_0 ile K çökme deneyinin son yüksekliği (KSY) arasında (0.4774) elde edilmiştir.



Şekil 6. Çökme, J ring ve K çökme deney sonuçları ile CTPT'nin plastik viskozite sonuçlarının ilişkisi (en yüksek belirleyicilik katsayıları)

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...

Çizelge 7’de verilen belirleyicilik katsayılarına göre, plastik viskozite değerleri ile en yüksek ilişkiler Şekil 6’da, kayma eşiği ile en yüksek ilişkiler ise Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çökme, J ring ve K çökme deney sonuçları ile CTPT'nin kayma eşiği sonuçlarının ilişkisi (en yüksek belirleyicilik katsayıları)

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton üretimi betonun taze haldeki özelliklerinin kontrollü takip edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Betonun taşınması, pompalanması, yayılması, kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması betonun reolojik özelliklerine bağlıdır. Betonun taze haldeki özelliklerini tanımlamak için geliştirilen deney metotları eşekslenli cihazlar üzerinde yoğunlaşmakta, teorik yaklaşımlar ise Bingham modeli ile süspansiyon teorilerinin geliştirilmesine yönelik yapılmaktadır. Eşekslenli viskozimetre ve Bingham modeli, Çökme, J ring ve K Çökme deneyleri kullanılarak yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda sunulmuştur.

Yapılan çalışma sonucuna göre, çökme deneyi çıktıları arasında ilişki kabul edilebilirdir. Yani çökme; yayılma çapı ve yayılma süresi ile ilişkili değişmektedir. Ancak bu ilişki katsayısı, agrega tipi, çimento dozajı (veya bağlayıcı oranı) ve kullanılan kimyasal katkıların türüne göre değişmektedir. Düşük çimento dozajlı karışımlarda çökme yüksekliği ile

yayılma çapı ve süresindeki ilişki agreganın hacim oranına bağlı olarak daha düşük olmakta, yüksek çimento dozajlı serilerde ise yine aynı nedenden dolayı yayılma çapı ve zamanı arasındaki ilişki düşük olmaktadır.

J ring deneyi çıktıları arasındaki ilişki çökme deneyine göre daha yüksektir. Temel neden sıkıştırılmadan koniye yerleştirilen betonun, koninin çekilmesiyle daha rahat hareket edebilmesidir. Agreganın kilitletmesinin etkisi bu deneyde daha az olmaktadır. Ayrıca bu deneyde sıkıştırma olmadığı için kohezyonun etkisi de daha az olmaktadır.

K çökme deney çıktıları arasında, ilk yükseklik ile son yükseklik arasındaki ilişki yüksek dozajlı çimentolu karışımlar haricinde yüksektir. Yüksek dozajlı karışımlarda matris malzemesinin çok daha fazla olmasından dolayı mineral ve kimyasal katkı tipinin etkisi daha belirgin olarak değerleri etkilemektedir. K çökme oranıyla ilk ve son yükseklik arasındaki ilişki SA'lı betonlarda HA'lı betonlara göre daha yüksektir. Yine K çökme oranıyla ilk ve son yükseklik arasında ise ilk yükseklik ile arasındaki ilişki daha yüksektir.

CTPT deney sonuçlarına göre reolojik parametreler arasında düşük çimento dozajlı betonlarda ilişki yüksek iken, yüksek çimento dozajlı betonlarda düşüktür. Bunun nedeni bağlayıcı malzemenin artmasıyla betonun kohezyonundaki artış olabilir. Taze beton deney çıktıları ile CTPT deney çıktıları arasındaki ilişki üç çimento dozajı, kimyasal katkı türü ve agreganın türüne göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, CTPT deney çıktıları ile tamamen uyum gösteren veya arasında ilişki bulunan deney bulunmamaktadır. Genel olarak en yüksek ilişkiler J ring deneyinin sonuç parametrelerinden alınmıştır. Özellikle J ring deneyinde yayılma süresi çıktısı birçok karışım için en yüksek ilişkiyi vermiştir. Bununla birlikte çökme deneyi ile kayma eşiği değerleri arasında da ilişki birçok karışımda (300-350 kg/m³ dozlu HA'lı ve 400 kg/m³ dozlu karışımların tümünde) mevcuttur. Ancak bu ilişkide matrisin hacim oranı ve agregaların tipi etken rol oynamaktadır. Düşük çimento dozajına sahip betonlarda agreganın tipi reolojik parametrelerde etkili iken yüksek çimento dozajında akışkanlaştırıcı katkıların etkinliği ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde toplumun ihtiyaç duyduğu nitelikteki yapıların üretimi için beton bileşenlerinin, betonun taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisini kesin olarak açığa çıkaran, betonun sertleşme sürecinde geçirdiği fiziksel ve kimyasal olaylarla bağlantısını ortaya koyan ve maruz kaldığı dış etkenleri doğru modelleyebilen pratik deneysel ve teorik çalışmalara da ihtiyaç bulunmaktadır. Geliştirilecek deneysel metotlarda, özellikle düşük çökmeli betonlarda T50 yayılma süresi ölçülemeyeceğinden; toplam yayılma süresi, yayılma çapı (veya yayılma alanı oranı) ve çökme yüksekliği gibi parametreler ile donatı engellemesinin ölçülmesi beton işlenebilirliğinin tanımlanması için faydalı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılmasında, maddi destek sağlayan 104M568 No.lu Proje ile TÜBİTAK'a ve 1190-D-05 No.lu Proje ile Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

Semboller

τ_0	kayma eşiği (veya akma eşiği, Pa)
η_{pl}	plastik viskozite (Pa.s)
$d\gamma/dt$	açısal şekil değiştirme hızı (1/s)
τ	kayma gerilmesi (Pa)
S	silis dumanı
F_{uk}	F tipi uçucu kül
C_{uk}	C tipi uçucu kül
SA	polinaftelen kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı
HA	polikarboksilat kökenli akışkanlaştırıcı kimyasal katkı
P	polipropilen fiber katkı
SC_{uk}	S ile C_{uk} 'nin beraber kullanıldığı seriler
SF_{uk}	S ile F_{uk} 'nin beraber kullanıldığı seriler
KİY	K çökme deneyi, ilk yükseklik (cm)
KSY	K çökme deneyi, son yükseklik (cm)
KO	K çökme deneyi, K çökme oranı (KİY/KSY)
CTPT	İki Nokta İşlenebilirlik Deney Cihazı “Two Point Workability Test Apparatus”
CCY	çökme deneyi, çökme yüksekliği (mm)
CTYC	çökme deneyi, toplam yayılma çapı (mm)
CTYS	çökme deneyi, toplam yayılma süresi (s)
CYAO	çökme deneyi, yayılma alanı oranı (son /başlangıç yayılma çapı)
JTYC	J ring deneyi, toplam yayılma çapı (mm)
JTYS	J ring deneyi, toplam yayılma süresi (s)
JYAO	J ring deneyi, yayılma alanı oranı (son /başlangıç yayılma çapı)
JHO	J ring deneyi, ring dışındaki beton yüksekliğinin ring içindeki beton yüksekliğine oranı (h_2/h_1)

Kaynaklar

- [1] Akman, M. S., “Yapı Malzemeleri”, İTÜ İnşaat Fakültesi yayını, İstanbul, 1987.
- [2] Özkul, H., Sağlam, A. R., “Süperakışkanlaştırıcı ve Mineral Katkıların Betonun Reolojik Özelliklerine Etkisi”, TÜBİTAK Proje No: İNTAG-655, Ankara, 2002.
- [3] Sağlam A. R., Mutlu, M., “Taze Betonda İşlenebilmenin Ölçülmesi ve Deney Aletlerinin İrdelenmesi”, Sika Yapı Kimyasalları, 8 s., 2001.
- [4] Erdoğan, T. Y., “Beton”, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 2003.

- [5] Banfill, P.F.G., “Rheology of Fresh Cement and Concrete”, E.&F.N. Spon Publisher, London, 1991.
- [6] Tattersall G. H., “Workability and Quality Control of Concrete”, E.&F.N. Spon Publ., London, 1991.
- [7] Ferraris, C. F., “Measurement of The Rheological Properties of High Performance Concrete”, Journal of Research of The National Institute of Standards and Technology, 104 (5), 461-478, 1999.
- [8] ASTM C143, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete”, USA, 2000.
- [9] TS EN 12350-2, “Beton- Taze Beton Deneylemi- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [10] Akman, M.S., “Süperakışkanlaştırıcı Katkıların Taze Beton İşlenebilmesindeki Sorunları”, Dördüncü Ulusal Beton Kongresi, Maya Basın Yayın, İstanbul, 1996.
- [11] Wong G. S., Alexander A. M., Haskins R., Poole T. S., Malone P.G., Wakeley L., “Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report”, Publication No. FHWA-RD-00-025, Performing Organization Report No. ERDC-TR-S-XX-00, Structures Laboratory USAE Research and Development Center (ERDC) Halls Ferry Road, Vicksburg, 2001.
- [12] Banfill, P., Beaupré, D., Chapdelaine, F., Larrard D. F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik, J. E., “Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at LCPC”, (Ed. Ferraris, C. F., Brower, L. E.), Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6819, Gaithersburg, 2000.
- [13] Beaupré, D., Chapdelaine, F., Domone, P., Koehler, E., L., Shen, M., Sonebi, Struble, L., Tepke, D., Wallevik, O., Wallevik, J. E., “Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB”, (Ed. Ferraris, C. F., Brower, L. E.), Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, NISTIR 7154, Gaithersburg, MD 20899, 2003.
- [14] Ferraris, C. F., Obla, K. H., Hill, R., “The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete”, Cement and Concrete Research, 31 (2), 245-255, 2001.
- [15] Tattersall, G. H. ve Banfill P. F. G., “The Rheology of Fresh Concrete”, Pitman Books Limited, London, 1983.
- [16] Yücel, K.T., “Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi”, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [17] Banfill, P.F.G., “The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review”, 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, 2003.
- [18] TS EN 197-1, “Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü", Ankara, 2002.

Katkılı Taze Betonların Reolojik Özellikleri ile Bazı Taze Beton ...

- [19] ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, USA, 2000.
- [20] ASTM C 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. USA, 1999.
- [21] TS EN 934-2, “Kimyasal katkıları - Beton, Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Katkıları - Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [22] Shi, Y., Matsui, I., Feng, N., “Effect of Compound Mineral Powders on Workability and Rheological Property of HPC”, Cement and Concrete Research, 32 (1), 71-78, 2002.
- [23] Duval, R., Kadri E. H., “Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes”, Cement and Concrete Research, 28 (4), 533-547, 1998.
- [24] Haque M. N., Kayali, O., “Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash”, Cement and Concrete Research, 28 (10). 1445-1452, 1998.
- [25] Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S., “Optimum Mix Parameters of High-Strength Self-Compacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash”, Cement and Concrete Research, 32 (3), 477-480, 2002.
- [26] EFNARC, “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete”, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Farnham, UK. 2002.
- [27] ASTM C 1362, “Standard Test Method for Flow of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete”, USA, 2004.
- [28] Özel, C. Yücel, K. T., Yücel, H. G., “Taze Betonun İşlenebilirliğini Belirlemede Kalibrasyon İşlemi ve Kalibrasyon Sıvısı”, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12 (2), 154-159, 2008.