

TAZE BETON BÜNYESİNDEKİ İNCE MALZEME HAMURU REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Alev ÇANKAYALI

Kimya Müh.
Ar-Ge ve Ür. Gel. Md.
İKSA İnşaat Katkıları
Ankara, Türkiye

Murat GÖKÇE

Beton Lab. Kal. Kont. Md.
İKSA İnşaat Katkıları
Ankara, Türkiye

K.Yaşar LEVENT

Kimya Yük. Müh.
Fab. Müd.
İKSA İnşaat Katkıları
Ankara, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada iki nokta deney yöntemi kullanılarak, yayılma ile kayma eşiği ve akıcılık ile plastik viskozite parametreleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bunun için betondaki ince malzeme hamurunun (0,125 mm elek altı kalker tozu, çimento, su ve polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı karışımı) reolojik özellikleri ile betonun reolojik özellikleri incelenmiştir. Polikarboksilat esaslı katkıları kullanılarak üretilen betonlarda amaç plastik viskozitenin yüksek, kayma eşiğinin düşük olmasıdır. İnce malzeme hamurunun reolojik özellikleri kullanılarak, plastik viskozitesi yüksek aynı zamanda düşük kayma eşiği için gerekli olan en uygun ince malzeme miktarı saptanmak suretiyle, beton tasarımı ve agrega gradasyonu belirlenmeye çalışılmıştır. İnce malzeme hamurunun plastik viskozitesinin ve kayma eşiğinin ayarlanması için ince malzeme hamuruna değişik oranlarda filler (0,125 mm elek altı kalker tozu) ikamesi yapılarak, farklı

su / çimento oranlarındaki plastik viskozite ve kayma eşikleri tespit edilmiştir. Elde edilen ince malzeme hamuru reoloji sonuçlarına göre üretilen betonların reolojik özellikleri ile beraber yaş ve sertleşmiş beton performansı da saptanmıştır. İnce malzeme hamuru ile betonun reolojik özellikleri arasındaki ilişki farklı yapıdaki polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak da geliştirilmeye çalışılmıştır.

GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) sıkıştırma ve yerleştirme için vibrasyon gerektirmeyen bir betondur. Kendi ağırlığıyla akabilen, kalıbı tamamen doldurabilen ve yoğun bir donatı olması durumunda da tam bir sıkışma sağlayabilen bir beton çeşididir. Sertleşmiş beton yoğun ve homojen bir yapıya ve geleneksel vibrasyonlu betonla aynı mühendislik özelliklerine ve dayanıklılığına sahiptir [1].

KYB hem prefabrik olarak üretilen betonlarda hem de hazır beton sektöründe kullanılabilir. KYB' nin düşük su /çimento oranlarında üretilmesine rağmen akışkanlık, ayrışma direnci ve dayanıklılık performansları yüksektir. Erken yüksek dayanım sağlayarak, kalıba gelen yükü azaltır ve erken kalıp almayı mümkün kılar. Üstün akışkanlık ve kendi kendine sıkışma özelliği sayesinde ayrışma olmaksızın, vibrasyon uygulamadan hava boşluğunu dışarı atarak ve sıkışarak yerleşir. KYB' lerin bu üstün özelliklerinde en etkin yapı taşı kimyasal katkıdır. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları KYB üretiminde kullanılmaktadır. Bu katkıları yüksek oranda su azaltma ve vibrasyon gerekmeden kalıplara yerleşme gibi özelliklerinden ötürü kullanım alanı gittikçe artarak prefabrik betonların üretiminden sonra, hazır beton üretiminde de tercih edilmeye başlanmıştır. Geleneksel hazır beton karışımından farklı olarak KYB tasarımında ince malzeme hamurunun reolojik özellikleri daha da önem kazanmaktadır. Bu şekilde üretilen betonlar, KYB özelliklerine benzer performansta betonların hazır beton sektöründe kullanılmasını sağlamaktadır. Bu özellikteki betonlar, bu çalışmada "Kendiliğinden Yerleşen Hazır Beton" olarak adlandırılacaktır (KYHB) [2]. Bu amaçla kullanılan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları, yüksek akışkanlık ve

ayırışma direnci yanında, beton yapısında su/ince malzeme oranını dengeleyerek mühendislik özellikleri yüksek bir beton eldesini kolaylaştırmaktadır.

Reoloji

KYHB' lerin dayanımı ve dayanıklılığı, betonun yaş haldeki performansı ile doğrudan ilgilidir. Bu yüzden taze haldeki çimento pastası ve betonun reolojik özellikleriyle ilgili reoloji, kayma gerilimi, plastik viskozite gibi temel kavramları bilmekte fayda vardır.

Reoloji, malzemenin deformasyon ve akış özelliklerini inceleyen bilim dalıdır [3]. Reoloji kavramları ile KYB' nin geliştirilmesi ve yaş performansının daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Taze harç ve beton, denklem (1)'e göre Bingham viskoplastik davranışı gösterdiği kanıtlanmıştır. Burada τ (Pa), γ (1/s) kayma hızındaki kayma gerilimini, τ_0 (Pa) ve μ (Pa.s) ise kayma eşiği ve plastik viskoziteyi tanımlamaktadır.

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (1)$$

Kayma eşiğinin (τ_0) fiziksel tanımı, bir maddeye uygulanan akmanın başlaması için gereken kayma gerilimidir. Kayma gerilimi, kayma eşiğinden büyük olduğu zaman madde akmaya başlar ve akmaya karşı olan direnç plastik viskoziteye bağlıdır [4]. Viskozite ve kayma eşiği gibi reolojik özellikler Bingham modeli kullanılarak çimento hamuru, harç ve betonda reometre aleti ile ölçülebilir [5]. Plastik viskozite, maddenin kayma eşiğini aştıktan sonra, akmaya karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir. Reolojik çalışmalar kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Elde edilen bu ilişkiden de kayma eşiği ve plastik viskozite bulunmaktadır.

Bu çalışmada reolojik ölçümler için iki nokta tipi reometreler (Şekil 1 ve 2) kullanılmıştır. Bu tip reometrelerde, farklı dönme hızlarına karşılık gelen dönme momentleri T (N.mm) ölçülmüştür. Dönme momenti ile dönme hızı N (1/s) verileri grafiğe geçirildiği zaman oluşan doğrunun eğimi viskoziteyi h (N.mm.s), bu doğrunun moment eksenini kesitiği nokta da kayma eşiğini g (N.mm) vermektedir (Şekil 3). Bu ilişki (2) nolu denklemde de görülmektedir.

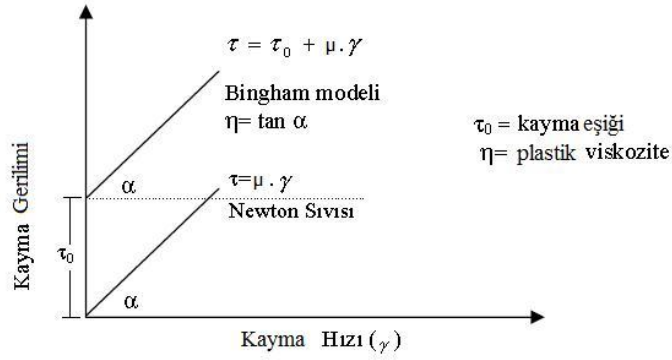


Şekil 1. İnce hamur pastası reometresi



Şekil 2. Beton reometresi

$$T = g + N.h \quad (2)$$



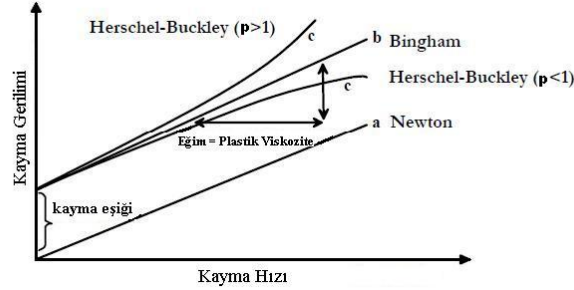
Şekil 3. Bingham ve Newtonyen davranışa ait Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı ilişkisi

Reolojik özellikler s/ç oranı, çimento tipi, çimentonun özgül yüzey alanı, karıştırma prosedürü, karıştırmadan sonra geçen süre ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilir [6]. Bingham modeli viskoplastik davranışı temsil eden bir model olarak öngörülebilir. Çimento hamuru, harç ve beton, viskoplastik davranış gösteren akışkanlardır. Şekil 4'de farklı akış davranışları görülebilir.

Reolojik Modeller

Reolojik incelemede çimento pastası, harç ve beton, en iyi şekilde Bingham modeli ile temsil edilir [8]. KYB gibi özel betonlar ise genel olarak daha kompleks modeller gerektirmektedir [7]. Bingham modeli uygulandığında KYB' de düşük kayma eşiği, bazı durumlarda da sıfır hatta negatif kayma eşiği elde edilebilir. Negatif kayma eşiği değeri fiziksel olarak imkânsızdır. Negatif kayma eşiğinin meydana gelmesinden kaçınmak için

doğrusal olmayan başka bir model reolojik verilere uygulanmalıdır [12]. Bingham modeli, Herschel-Bulkley modeli ile geliştirilerek negatif kayma eşiğinin olduğu durumlarda kullanılabilir. Bu durumda yeni denklem (3) şu şekilde olur:



Şekil 4. Farklı akış davranışları: a) Newtonyan modeli, b) Bingham modeli (doğrusal), c) Herschel-Bulkley modeli (doğrusal olmayan) [11].

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma^p \quad (3)$$

Bu denklemde;

$p = 1$ Bingham davranışı için

$p < 1$ Kayma incelmesi davranışı için

$p > 1$ Kayma kalınlaşması davranışı için

Kayma Kalınlaşması

Kayma hızının artmasıyla viskozitenin artması olarak açıklanabilir. Kayma kalınlaşması akışı, dallanmış molekül zincirleri arasındaki mekanik engellemeden ötürü kimyasal olarak bağlanmamış yoğun polimerlerde olur. Kayma yükü arttıkça molekül zincirleri birbirlerinin hareketine engel olur. Yüksek yoğunluktaki süspansiyonların kayma davranışında, partiküllerin birbirine temas ettikçe akmaya karşı direnç artar. Çimento pastalarında, çimento tanelerinin topaklanması ve taze haldeyken iğne biçimli etrinjit oluşumundan dolayı kayma kalınlaşması özelliği vardır [13]. Kayma kalınlaşması süper akışkanlaştırıcının ve ince malzemenin tipine ayrıca agrega boyut dağılımına bağlıdır [12]. Reoloji ölçümlerinde, kayma eşiği, plastik viskozitenin yanında akışkanın tiksotropik davranışı hakkında da bilgi sahibi olmak önemlidir.

Tiksotropi, zamana bağlı olarak sabit kayma hızında plastik viskozitenin azalması olarak tanımlanır. Newtonyan olmayan akışkanlar için sabit plastik viskozite değeri, kayma gerilimi uygulandıktan belli bir zaman sonra geçerli olur. Bu tip davranışa tiksotropi denir. Enerjiye maruz kalmayan hareketsiz, taze haldeki çimento hamurunda bir yapının oluşması tiksotropik davranışa sebep olur. Şekil değiştirmeye ilk direnci oluşturan bu yapı, hamura uygulanan yeterli şekil değiştirme enerjisiyle yıkılır.

İşlenebilme ve Reolojik Ölçümler

Taze betonun “kolayca karılabilmesi, ayrışma yapmadan taşınabilmesi, yerleştirebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin düzeltilebilmesi”, betonun ne ölçüde işlenebilir olduğunun bir göstergesidir. Bu nedenle, bu özelliklerin tümü “işlenebilme” adı altında tek bir özellik olarak ifade edilmektedir. İşlenebilme, taze betonun en önemli özelliğidir. Yeterli işlenebilmeye sahip olmayan beton, sertleştğinde yeterli dayanımı ve dayanıklılığı gösteremez. Basit ve kolayca uygulanabilir bir deney yöntemi olmasından dolayı, çökme deneyi taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla kullanılan deney yöntemleri arasında en popüler olanıdır [9]. Çökme deneyi asıl olarak betonun tek bir reolojik parametresiyle (kayma gerilmesi) korelasyon gösterir. Ancak çökme deneyi, beton için diğer önemli reolojik parametre olan plastik viskozite hakkında bir fikir vermez [10]. Tek parametreye bağlı olarak gerçekleştirilen bu deney “tek parametrelili” ya da “ tek noktali” deney olarak ifade edilmektedir. Tek noktali deneyler betonun akışkanlık özelliğini tam olarak yansıtmaz [11]. Çökme deneyi statik bir deneydir ve işlenebilmeyi ölçmez. Ancak bu deney yöntemiyle işlenebilme hakkında önemli bir fikir elde edilebilir [10]. Reometreler betonun akma davranışı hakkında daha iyi fikir vermektedir. Bunlar hem eşik kayma gerilmesi hem de plastik viskoziteyi ölçmede kullanıldıkları için “iki noktali” ya da “iki parametrelili” deneyler olarak bilinir. Beton karışımlarının optimizasyonu için reometreler oldukça önemli bilgiler sağlar [11].

Beton Kararlılığı ve İnce Malzeme Hamuru Hacmi

KYHB’ de kullanılan katkı tipine de bağlı olarak kayma eşiği, geleneksel betonlara göre çok düşüktür. Bu durum betonun kararlılığını olumsuz olarak etkileyebilir ve ayrışmaya sebebiyet verebilir. Ayrışmanın olmaması için plastik viskozitenin daha yüksek olması

gerekir. İdeal bir KYHB' nin yaş performansında aranan özellikler, düşük kayma eşiği ve ayrışmaya yola açmayacak uygun plastik viskozitedir. KYHB, geleneksel betondan hacimce daha fazla hamur içermelidir. Bu durum, agregalar arasındaki sürtünmelerin azalmasını sağlayarak KYHB' nin kendi ağırlığıyla akması ve yerleşmesini mümkün kılar. Pasta hacmini artırmak için sadece çimento miktarını artırmak beton maliyetini artıracığı gibi aynı zamanda yüksek büzülme ve hidrasyon ısı oluşumu ile ilgili problemleri de başlatabilir. Bu nedenle pasta hacminin artırılması için beton yapısında bulunan ince agrega (0-4 mm) miktarının artırılması ve bunun sonucu olarak uygun ince malzeme (0,125 mm elek altı) miktarı ile KYHB üretmek daha uygun olabilir. Gerek KYB, gerekse KYHB karışım hesaplarının iyileştirilmesi için hem çimento pastasının hem de betonun reolojisi üzerine yapılan araştırmalar büyük önem taşımaktadır. Özellikle KYB ve KYHB tasarımında ince malzeme hamurunun (0,125 mm elek altı kalker tozu, çimento, su ve polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı karışımı) reolojik özelliklerinin araştırılması ve iyi anlaşılması, KYB ve KYHB üretiminde hedeflenen performans özelliklerine ulaşmak için çok faydalı olacaktır.

Süper Akışkanlaştırıcı Yapısı ve Etki Mekanizması

Polimer tipinin temel davranışı, gerek KYB tasarımında gerekse KYHB tasarımında çok önemli bir yer tutar. Bu tip betonlarda süper akışkanlaştırıcılardan beklenen en önemli etki yüksek su azaltma ve katkının çimento taneciklerine hızlı adsorbe olmasıdır. Betonda istenilen işlenebilirlik özelliği ise beton uygulamasının yapılacağı projenin içeriğine bağlıdır. Prekast beton uygulamalarında daha kısa işlenebilirlik tercih edilirken, KYHB üretiminde işlenebilirliğin göreceli olarak uzun olması istenebilir. Betonun akıcılığı ve karışma süresi ile ilgili olarak, farklı polimerler farklı davranışlar gösterirler ve bu durum polimerin dispersiyon etkisi ile ilgilidir. Süper akışkanlaştırıcıların dispersiyon etkisini anlayabilmek için adsorpsiyon davranışını ve adsorbe olmuş polimerin şeklini araştırmak gerekir. Bilindiği üzere adsorplanma şekli, sıvı fazın iyonik dayanıklılığından etkilendiği kadar polimerin moleküler kütesinden, yan zincir yoğunluğundan ve anyonik yük yoğunluğundan da etkilenir [14]. Bu çalışmada polikarboksilat adı altında farklı kaynaklardan temin edilen fakat değişik kimyasal yapıda ve dolayısıyla etkide polimerler ile çalışılmıştır.

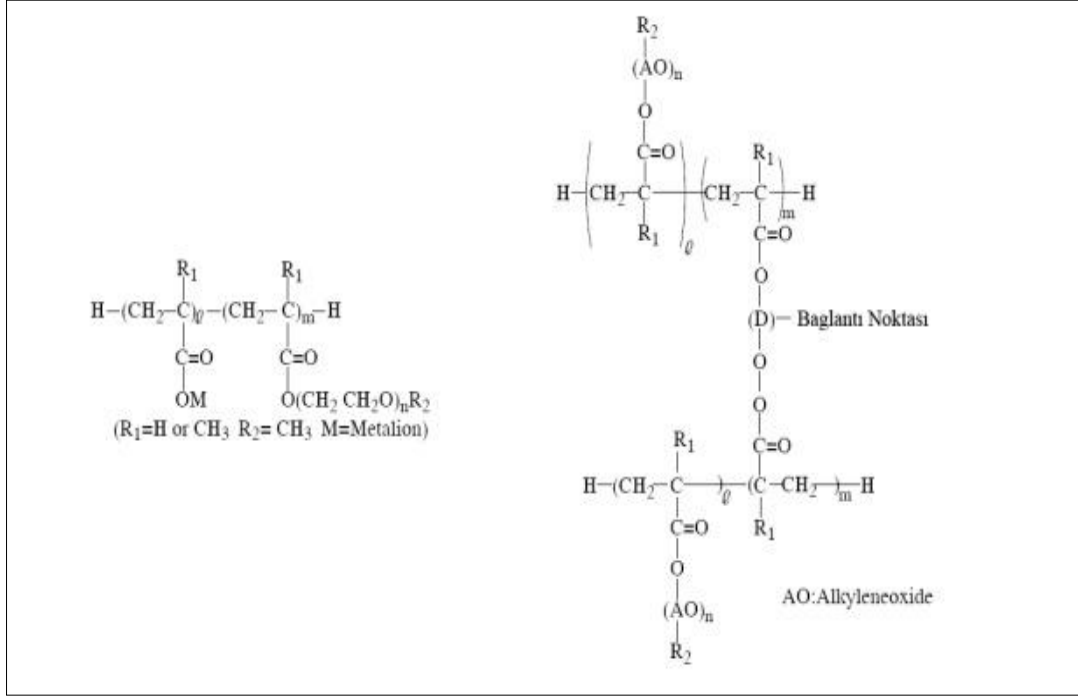
Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkılara makro moleküler yapısından dolayı bazı kaynaklarda tarak tipi süper akışkanlaştırıcı denir (Şekil 5) [15]. Her ne kadar makro moleküler yapıları yaklaşık olarak aynı da olsa, betonda tamamen farklı performans gösterirler. Bu farklılıkları anlayabilmek için polimerlerin yapıları gözden geçirilmelidir. Çalışılan bütün polimerler karboksilat ve polioksietilen grupları içerirler. Karboksilat ve polioksietilen gruplarının varlığı iyonik itme ve sterik engelleme olaylarını yaratır. Sterik engelleme, polimerlerin dispersiyon mekanizmasında önemli bir rol oynar. Dispersiyon etkisi, bir makro molekülün ince malzemelere adsorpsiyonu ile başlar ve karboksil gruplarının sayısı ile adsorpsiyon olayı arasında bir ilişki vardır. Ana zincirde yüksek karboksil grup olması hızlı adsorpsiyonu mümkün kılar. Esasında bu durum temel fizik kuralları ile de açıklanabilir. Karboksil grup sebebiyle bütün polikarboksilat esaslı polimerler anyoniktir ve kuşkusuz oluşan çimento partikülleri pozitif yüklenirler. Her ne kadar bütün karboksil iyonlarının ters iyonu olması muhtemelse de, bu iyonlar çimento pastasında çimento yüzeyindeki özellikle kalsiyum iyonu ile yer değiştirecektir. Bu etkileşim sonucunda, makro molekülün omurgası yüzeye adsorbe olur ve yan zincir su fazına doğru gider. Bu yapı çimento partikülünün disperse olmasını sağlar. Kopolimer üzerindeki karboksil biriminin molar oranını artırmaya yönelik her girişim, polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcının çimento partikülleri üzerine adsorpsiyon hızını artırmakla sonuçlanacaktır [16].

Çalışmada kullanılan polikarboksilat tipleri;

PC1 : Poliakrilik Asit Esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)

PC2 : Polimetakrilik Asit Esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)

PC3 : Modifiye Edilmiş Polimetakrilik asit esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)



Şekil 5. Tarak tipi (comb type) süper akışkanlaştırıcı moleküler yapısı

Polikarboksilat tipinin, su azaltma, kıvam koruma, ayrışmaya karşı direnç gibi çimento pastası özelliklerine etkilerini iyileştirmek için ıslatıcı özelliği olan kimyasallar kullanılarak modifiye polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı geliştirilmiştir. Bu yöntem farklı kimyasal yapıdaki polimer arayışından hem daha kolay hem de daha ekonomik bir yöntemdir. Burada amaç yardımcı ıslatıcıların, çimento pastası yapısındaki taneciklere absorbe olmasını sağlayarak, polikarboksilat yapısının adsorpsiyon kabiliyetini etkinleştirmek suretiyle, iyonik itme ve sterik engelleme olaylarının devamını sağlamaktır. Mevcut çimento pastası ile en uyumlu polikarboksilat yapısı, farklı ıslatıcılar ile modifiye edilmek suretiyle en iyi reolojik özellikleri veren polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı oluşturulmaya çalışılmıştır.

AMAÇ

Bu çalışmanın amacı, laboratuvar şartlarında beton üretimi ve testleri yapmadan önce beton üretiminde kullanılacak girdileri içeren ince malzeme hamurunun reolojik özelliklerinin, 2 noktalı bir reometre ile incelenmesi sonucunda katkı uyumu ve betonun reolojik özellikleri ile beton tasarımı konusunda bir yöntem oluşturmaya çalışmaktır. KYHB' nin kararlılığını sağlamak açısından ince malzeme miktarı önemlidir. Farklı ince

malzeme/çimento oranlarının ince malzeme hamurunun reolojik özelliklerine etkisi incelenerek, bu verilere göre yüksek akışkanlıkta, ayrışma yapmayan, aynı su/çimento oranlarında betonlar üretilmesi, bu betonların yaş ve sertleşmiş haldeki performanslarının incelenmesi hedeflenmiştir.

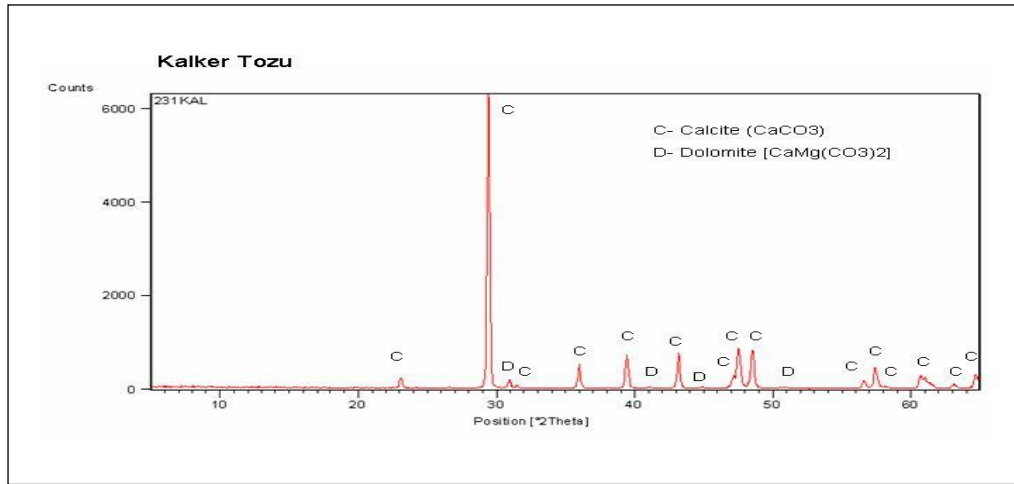
Çalışmanın başlangıcında, kullanılan çimento ile en uyumlu olan polikarboksilat molekülünün yapısı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, polimer tipi saptandıktan sonra çeşitli kimyasallarla modifikasyonlar yapılmış, hazırlanan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcılar reolojik testlerde kullanılmıştır.

DENEY ve METOD

Deneyde Kullanılan Malzemeler

İnce malzeme özellikleri

Çalışmada kullanılan 0,125 mm elek altı kalker tozunun XRD difraktogramı Şekil 6' de ve kimyasal özellikleri Tablo 1' de gösterilmiştir.



Şekil 6. Kalkerin XRD difraktogramı

Tablo 1. Kalkerin kimyasal özellikleri

KK	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Toplam
43,24	0,21	0,16	0,12	54,57	1,19	0,01	0,03	0,12	99,65

Kalkerin kimyasal özellikleri incelendiğinde % 95 kalsit ve % 5 dolomit bulunduğu tespit edilmiştir (Tablo 1).

Beton çalışmalarında TS 706 EN 12620' ye uygun agregalar kullanılmıştır.

Kimyasal Katkı Özellikleri

Çalışmada kullanılan polikarboksilat tipleri:

PC1 : Poliakrilik Asit Esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)

PC2 : Polimetakrilik Asit Esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)

PC3 : Modifiye Edilmiş Polimetakrilik asit esaslı (Orta uzunlukta yan zincir)

Tablo 2. Polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıların fiziksel özellikleri

Özellikler	PC1	PC2	PC3
Yoğunluk(kg/L)	1,092	1,064	1,112
pH	5,48	5,49	7,63
Katı Madde	%27,88	%22,70	%28,02

Çimento

Çalışmada CEM I PÇ 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel özellikler		Kimyasal özellikler	
		İçerik	(%)
Yoğunluk (g/cm ³)	3,1	SO ₃	2,81
Blaine (cm ² /g)	3299	Cl	0,01021
2 günlük dayanım (MPa)	27,33	SiO ₂	20,04
7 günlük dayanım (MPa)	40,82	Al ₂ O ₃	5,27
28 günlük dayanım (MPa)	51,74	Fe ₂ O ₃	3,38
Priz başı (dakika)	162	CaO	62,23
Priz sonu(dakika)	232	MgO	1,89
Hacim genişmesi(mm)	1	Na ₂ O	0,04
Kızdırma kaybı	2,5	K ₂ O	0,78
Çözünmeyen kalıntı	0,44	C ₃ S	52,08
		C ₂ S	17,67
		C ₃ A	7,56
		C ₄ AF	10,28

Deney Metodu

Katkı-İnce Malzeme Hamuru Uyum Testleri

Deneyisel çalışmaya başlarken ilk etapta ince malzeme hamuru ile en uyumlu çalışan polikarboksilat yapısı belirlenmiştir. Belirlenen polikarboksilat yapısı, mevcut ince malzeme hamurunun reolojik özelliklerini geliştirmesine göre modifiye edilerek en uygun süper akışkanlaştırıcı katkı seçimi yapılmaya çalışılmıştır. Yapılan reolojik testler sonucunda plastik viskozite, kayma eşiği ile mini yayılma değerleri tespit edildikten sonra, ayrışma, tiksotropik davranış ve yerleşme özellikleri gözlem olarak değerlendirilmiştir. Elek analizi sonucunda tasarlanan beton karışım hesabında kullanılan agregalardan gelen kalker tozu (<0,125 mm elek altı) oranı % 9 olarak bulunmuştur. Bu, referans beton olarak kabul edilmiş ve ince/çimento (toplam agregadan gelen 0,125 mm elek altı / çimento) oranı 0,33 olarak tespit edilmiştir. Tasarlanan referans beton karışımındaki ince/çimento oranı esas

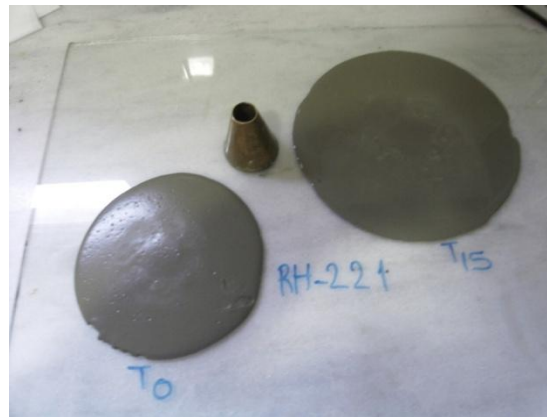
alınarak, bu oranda ince malzeme hamuru hazırlanmıştır. Katkı seçimi aşamasında bütün ince malzeme hamurlarında su/çimento oranı 0,40 olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Bütün bu parametreler ışığında en uygun sonucu veren katkı seçilerek deney programına bu katkı ile devam edilmiştir.

İnce Malzeme Hamuru Testleri

İnce malzeme hamuru hazırlanırken TS EN 197-1' e göre karıştırma işlemi yapılmıştır. Reometre hız profili 3' er dakika arayla olacak şekilde sırasıyla 120, 100, 80, 60 ve 40 rpm' e (dakikada devir sayısı) ayarlanmıştır. Kıvam kaybı göz önüne alınarak, artan hamur 30 saniye yüksek hızda karıştırıldıktan sonra mini yayılma deneyi yapılmıştır. İnce malzeme hamuru reolojik ölçümleri için iki nokta tipi Viskomat NT reometresi kullanılmıştır. Yayılma çapları ölçülerek t_0 anındaki mini yayılma değeri olarak kaydedilmiştir. Reoloji testine tabi tutulan hamur ile 15. dakikada mini yayılma testi yapılmıştır. Şekil 7' de ince malzeme hamurunun t_0 ve t_{15} dakikalarındaki yayılma durumu görülmektedir. İnce malzeme hamurunun karışım oranları Tablo 4' de verilmiştir. İnce/çimento oranı 0,33, 0,40, 0,48 ve 0,55 olacak şekilde ve üç değişik su/çimento oranında hazırlanan ince malzeme hamurlarının plastik viskozite, kayma eşiği ile mini yayılma (t_0 ve t_{15} için) değerleri ve yapılan gözlemler Tablo 5' de verilmiştir.

Bütün hamurlar ve beton karışımlarında katkı dozajı çimento miktarının % 1 olarak alınmıştır.



Şekil 7. İnce malzeme hamurunda t_0 ve t_{15} zamanlarındaki mini yayılma testi görünümü.

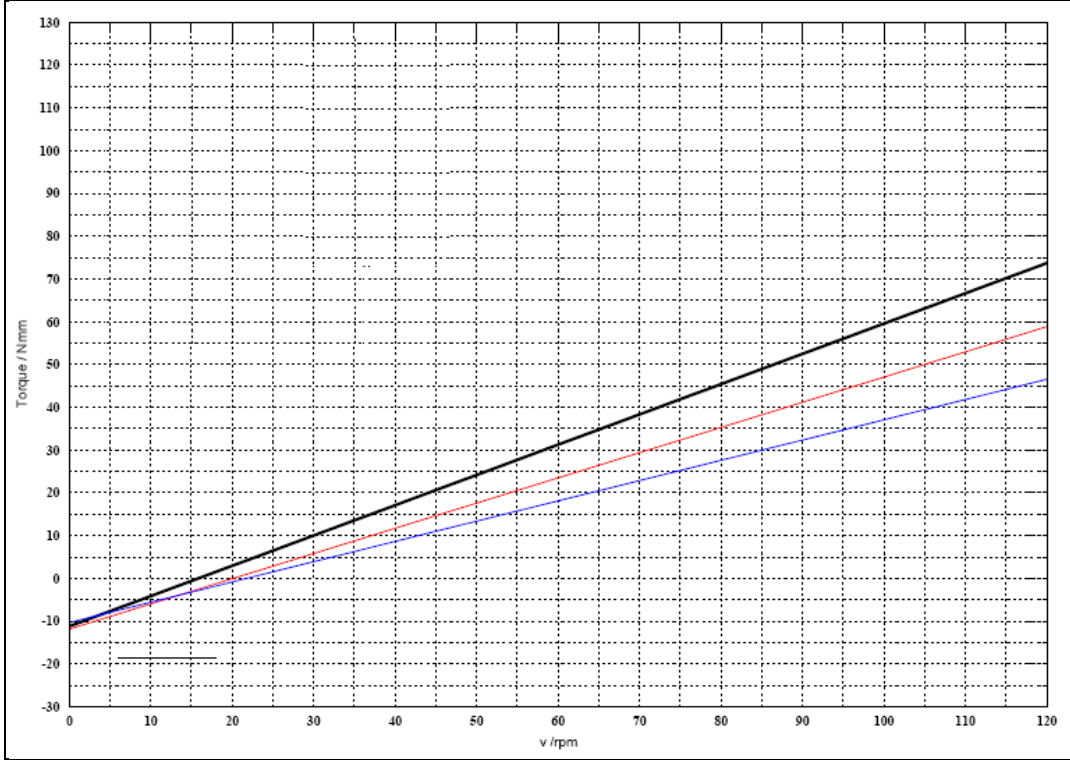
Tablo 4. Çimento pastasında kullanılan karışım oranları

Malzemeler	% 9 kalker tozu (gr)			% 11 kalker tozu (gr)			% 13 kalker tozu (gr)			% 15 kalker tozu (gr)		
Çimento	1000			1000			1000			1000		
Kalker Tozu	330			400			480			550		
Su	400	420	440	400	420	440	440	460	480	460	480	500
Katkı (%1)	10			10			10			10		

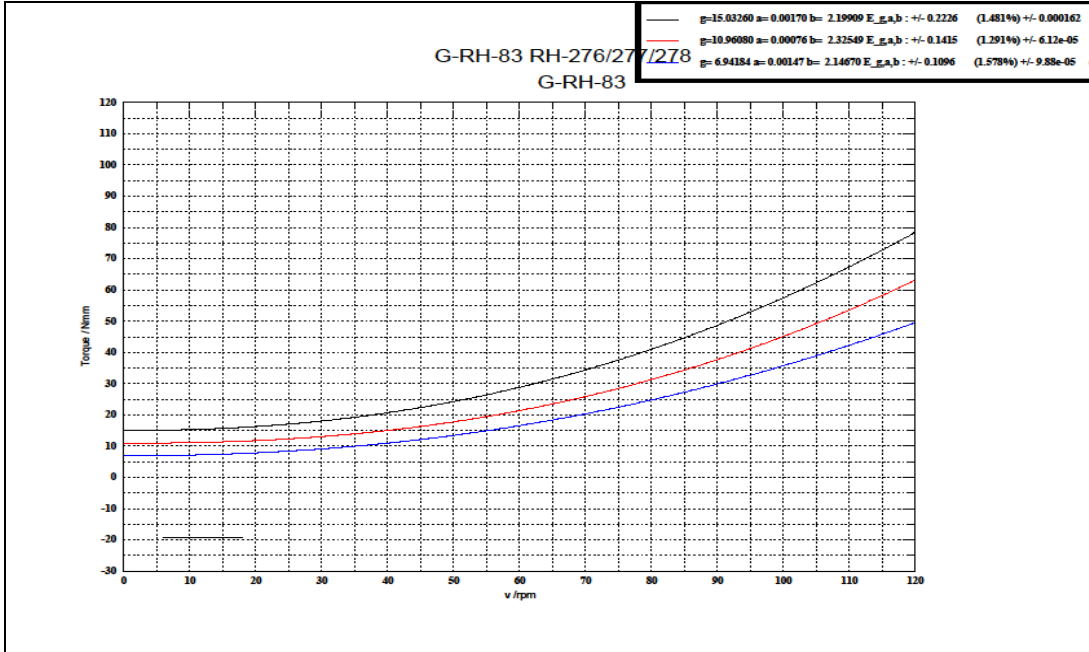
Tablo 5. İnce malzeme hamuru deneyleri ve sonuçlar

0,125 altı oranı	%9			%11			%13			%15		
W/C	0,4	0,42	0,44	0,4	0,42	0,44	0,44	0,46	0,48	0,46	0,48	0,50
İnce/Çimento	0,33	0,33	0,33	0,40	0,40	0,40	0,48	0,48	0,48	0,55	0,55	0,55
Mini Yayılma (t_0)	14,1	15,4	16,8	12,5	14,5	15,5	13,4	15,8	16,8	13,5	14,5	16,6
Mini Yayılma (t_{30})	16,8	19,5	22	15,2	17,5	19,7	16,5	19,5	21,6	16,4	19,3	21,5
Pl. Vis. (Pa.s)	0,706	0,589	0,474	0,993	0,762	0,622	0,978	0,660	0,586	1,048	0,845	0,660
Kayma eşiği Nmm Bingham modeli	-11,2	-11,9	-10,3	-17,4	-15,9	-14,2	-24,9	-15,6	-15,1	-27,7	-22,6	-18,2
Kayma eşiği Nmm Herschel-Bulkley	15	10,9	6,9	24,4	15,3	10,2	19,9	10,7	9,3	21	14,7	10,1
Sıcaklık (t_0)	20,5	19,8	19,2	19,8	19,1	18,4	18,7	20,1	19,9	20,3	19,7	19,6
Sıcaklık (t_{15})	21	20,6	20,3	20,8	20,3	19,8	20,2	21,2	21,2	21,4	21,2	21
GÖZLEMLER												
Ayrışma (t_0)	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok
Ayrışma (t_{15})	yok	az	var	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok	yok
Yerleşme ve Tiksotropik davranış	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var

Şekil 8' de ince malzeme hamurunun Bingham modeline göre çizilmiş doğrusal grafiği görülmektedir. plastik viskozite değerleri Bingham modelinin doğrusal grafiğin eğiminden elde edilmiştir. Şekil 9' da ise Herschel-Bulkley modeline göre parabol çizim görülmektedir. Bu parabolün başlangıç noktasından ise kayma eşiği değerleri alınmıştır.



Şekil 8. İnce malzeme hamurunun reolojik parametrelerin Bingham modeline göre doğrusal grafi



Şekil 9. İnce malzeme hamurunun reolojik parametrelerin Herschel-Bulkley modeline göre parabolik grafiği

İnce malzeme hamuru deneyleri tamamlandıktan sonra beton deneylerine geçilmiştir.

Beton DeneYleri

Elek analizi sonucunda tasarlanan beton karışım hesabında kullanılan agregalardan gelen kalker tozu oranı % 9 olarak bulunmuştur. Bu beton referans beton olarak kabul edilmiş ve ince/çimento oranı 0,33 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla % 2, 4 ve 6 oranlarında kalker tozu ikameleri referans betondaki ince/çimento oranında bulunan ince malzeme miktarına yapılmıştır. İkame edilen kalker tozları hacimce 0–4 ince agregadan azaltılarak yapılmış ve betondaki iri agreganın hacmi sabit tutulmuştur. Betonlar üç farklı su/çimento oranında hazırlanmıştır. Bu betonlarda taze halde hava miktarı, birim ağırlık, t_0 ve t_{30} yayılma değerleri ölçülmüş, beton reometresi ile plastik viskozite ve kayma eşikleri tespit edilmiştir. Betonların reolojik ölçümleri için iki nokta tipi Viskomat BT2 reometresi kullanılmıştır. Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde 3,7 ve 28 günlük basınç dayanım testleri yapılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR

Tablo 6. İnce malzeme hamuru-katkı uyum test sonuçları

Deney No	RH-179	RH-185	RH-221
Katkı No	PC1	PC2	PC3
W/C	0,4	0,4	0,4
İnce/Çimento	0,33	0,33	0,33
Mini yayılma (cm); t=0	9,5	19,2	14,3
Mini yayılma (cm); t=15	19,2	11,2	17,8
Plastik Viskozite (Pa.s)	1,271	0,820	0,767
Kayma Eşiği (N.mm)	16,17	12,12	8,80
Sıcaklık (°C); t=0	21,8	16	20,6
Sıcaklık (°C); t=15	22,6	20,5	22,1
Yerleşme ve Tiksotropik Davranış	Yok	Var	Var
Ayrışma; t=0	Yok	Var	Yok
Ayrışma; t=15	Var	Yok	Yok

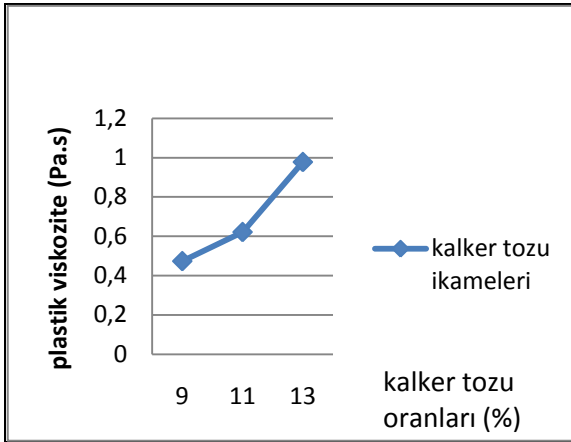


Şekil 10. W/C oranı 0,67 ve kalker tozu oranının % 15 taze betonda homojen ve ayrışma olmadan yayılma

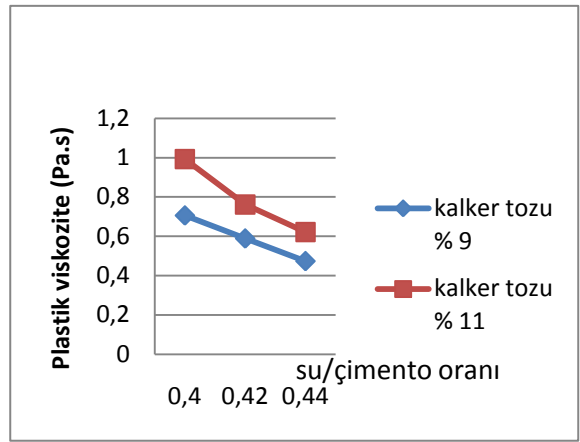


Şekil 11. W/C oranı 0,67 ve kalker tozu oranının % 9 taze betonda ince agreganın iri agregadan ayrışma durumu

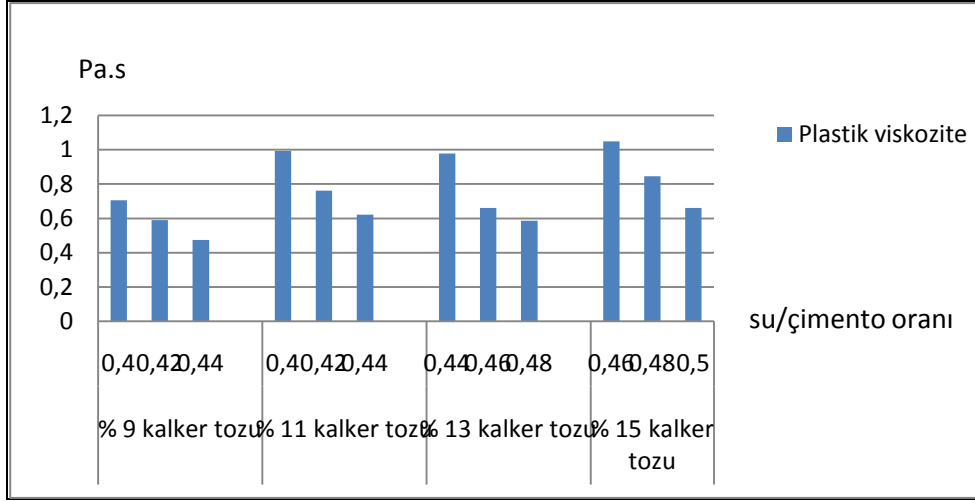
Kalker tozu ikamelerinin artmasıyla betonda viskozitenin arttığı ve daha homojen bir yapı oluştuğu Şekil 10' da görülmektedir. Eşit su/çimento oranında olmalarına rağmen, % 15 kalker tozu olan betonlarda viskozitenin yüksek ve ayrışmanın olmadığı görülmektedir. Şekil 11' de ise % 9 kalker tozu olan betonda ince malzemenin yetersiz kalmasından dolayı ayrışma durumu oluşmuştur.



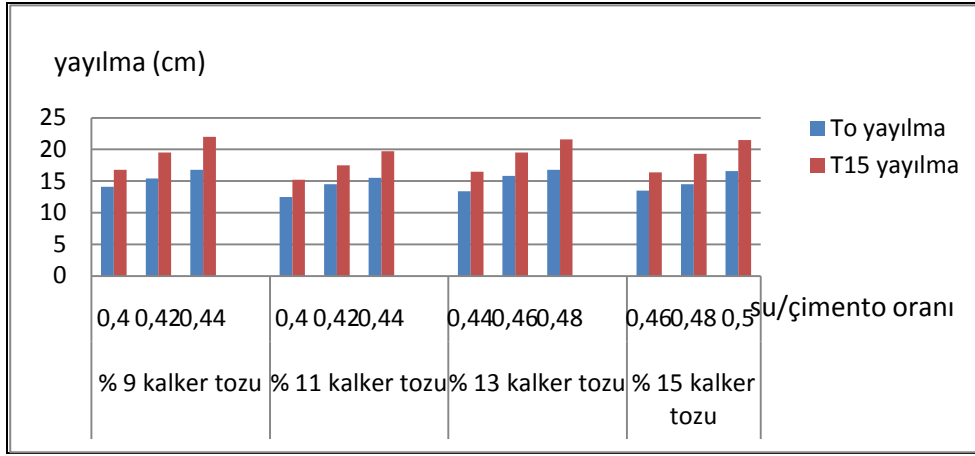
Şekil 12. W/C oranı sabit (0,44) olan hamurun, kalker tozu ilavesiyle plastik viskozite değişimleri



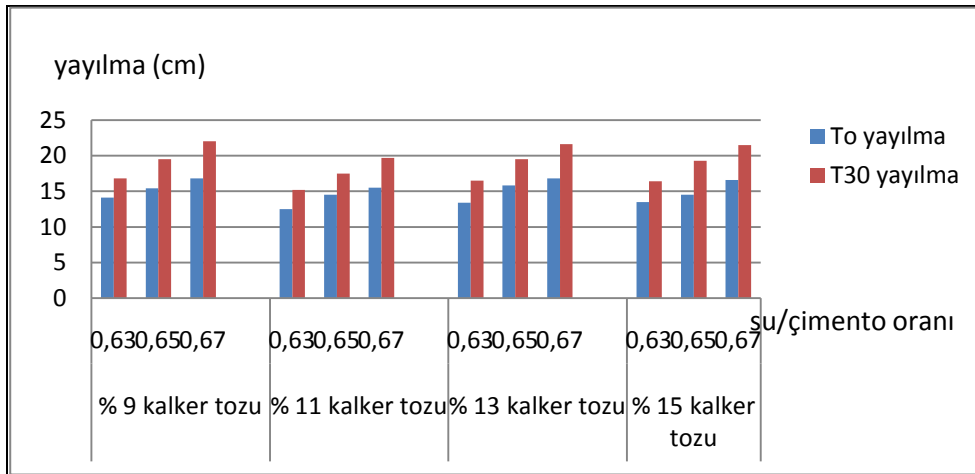
Şekil 13. % 9 ve % 11 kalker tozu içeren hamurun üç değişik W/C oranlarında plastik viskozite değişimleri



Şekil 14. Su/ çimento oranı belirlenen hamurun kalker tozu ikameleri ile plastik viskozite değışimleri



Şekil 15. Kalker tozu ikameleri ile su/çimento oranlarına göre hamurun to ve t₁₅ yayılma değeri değışimi



Şekil 16. Kalker tozu ikameleri ile su/çimento oranlarına göre betonda to ve t₃₀ yayılma değeri değışimi

Tablo 7. Beton karışım oranları

Malzemeler	%9 kalker tozu (kg/m ³)			%11 kalker tozu (kg/m ³)			%13 kalker tozu (kg/m ³)			%15 kalker tozu (kg/m ³)		
Çimento	310			310			310			310		
Su	195	201,5	207,7	195	201,5	207,7	195	201,5	207,7	195	201,5	207,7
0-4 agrega	1141			1118			1096			1073		
4-12 agrega	299			299			299			299		
12-22 agrega	416			416			416			416		
Katkı	3,1			3,1			3,1			3,1		
Kalker tozu ikamesi	-			23			45			68		

Tablo 8. Taze ve sertleşmiş beton deneyleri sonuçları

BETON DENEYİ SONUÇLARI												
W/C	0,63	0,65	0,67	0,63	0,65	0,67	0,63	0,65	0,67	0,63	0,65	0,67
İnce/Çim	0,33	0,33	0,33	0,4	0,4	0,4	0,48	0,48	0,48	0,55	0,55	0,55
t=0 Yayılma	35	42	48	34	34	40	32	37	39	35	38	43
t=30 Yayılma	36	45	48	29	29	39	27	32	34	33	39	43
t=0 Slump	21	23	25	20	21	23	19,5	21	22	21	23,5	24
t=30 Slump	21,5	24	25	17	20	23	18	20,5	22	20	23	24
Hava miktarı (%)	3,2	2,3	1,2	3	2,9	2	3,2	2,8	2,8	3,3	2,9	2,8
Taze birim ağırlık	2364	2373	2360	2362	2369	2370	2357	2354	2343	2350	2353	2360
3 günlük	24,96	24,71	18,27	22,68	18,78	21,81	28,32	26,07	18,53	28,13	25,42	23,96
7 günlük	29,27	32,03	26,28	32,11	30,66	32,05	32,82	30,56	29,84	34,78	31,48	29,72
28 günlük	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı	çıkmadı
VİSKOMAT BT-2												
t=0 Ayrışma	Yok	Az	Çok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	yok	Yok	Yok
t=30 Ayrışma	Yok	Yok	Çok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	yok	Yok	Yok
Plastik Viskozite	9360	-4988	11305	12533	1510	7919	11580	10927	12358	13538	10114	7140
Kayma Eşiği	114	2204	276	60	59	309	672	134	85	404	130	166

Deney Bulguları ve Tartışma

İnce malzeme hamuru ve betonun reolojik özellikleri incelendiğinde yüksek plastik viskozite ve düşük kayma eşiği parametrelerinin değerlendirilmesinde tek başına yeterli olmadığı belirlenmiştir. Bu parametrelerin yanında ayrışma, yerleşme ve tiksotropik davranış gibi gözlemsel değerlendirmelerin de yapılmasının önemli olduğu görülmüştür.

İnce malzeme hamuru testlerinde elde edilen gözlemler ve reolojik değerler ile beton testlerindeki geleneksel ölçme metodları ve gözlem sonuçları arasında uyumlu bir ilişki görülmüştür.

Bingham Modeli'ne göre ince malzeme hamuru kayma eşiği değerleri yapılan bütün reoloji testlerinde negatif değerler olarak ölçülmüştür. Negatif kayma eşiği değerleri fiziksel olarak imkânsız olduğu bilinmektedir. Bu durum genel KYB davranışından kaynaklanmaktadır ve bu duruma kayma kalınlaşması (shear thickening) denir. Negatif kayma eşiği değerleri veren hamurlar Bingham modeli yerine Herschel-Bulkley modeli ile tanımlanması doğru olacaktır. Böylece kayma eşiği değerleri elde edilebilir.

Kalker tozunun ikamesinin artmasıyla basınç dayanımlarında artış olduğu saptanmıştır. Bu durum kalker tozunun betondaki mikro gözenekleri doldurması ve boşluksuz bir yapı oluşturmasına bağlanabilir.

SONUÇLAR

1. İnce malzeme hamurundaki 0,125 mm elek altı malzemelerin artması ile plastik viskozitelerin arttığı saptanmıştır.
2. İnce malzeme hamurunda su/çimento oranının artmasıyla plastik viskozitelerin ve kayma eşiklerinin düştüğü tespit edilmiştir.
3. Ağırlıkça % 15 0,125 mm elek altı malzeme içeren betonlarda, işlenebilirliğin arttığı ve 0,67 su/çimento oranında tiksotropik davranışın devam ettiği gözlenmiştir.
4. Katkı uyum testlerinde 1,217 Pa.s ile en yüksek plastik viskoziteyi poliakrilik asit esaslı (orta uzunlukta yan zincir) polimer sağlamıştır. En düşük plastik viskozite ise 0,767 Pa.s ile polimetakrilik asit esaslı (orta uzunlukta yan zincir) polimer sağlamıştır.
5. % 9 0,125 mm elek altı malzeme içeren betonlarda, su/çimento oranı artıkça ayrışma gözlemlenmiştir. % 15 0,125 mm elek altı malzeme içeren betonlarda, su/çimento oranı artıkça ayrışma gözlenmemiştir.
6. Beton reometresi BT2 ile değerlerin hamur reolojisinden farklı olarak kendi içinde değerlendirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

- [1]. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specifications, Production and Use, May 2005, 1 p.
- [2]. S. Kordts, W. Breit, Controlling The Workability Properties of Self-Compacting Concrete Used As Ready-Mixed Concrete. 3rd Int. Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
- [3]. Hackley, V.A.Ferraris, C.F. "The use of nomenclature in dispersion science and technology". NIST recommended practice guide, special publication (960-3). 2001, Washington: National Institute of Standards and Technology. 72 pages.
- [4]. Gołaszewski J.: The influence of cement paste volume in mortar on the rheological effects of the addition of superplasticizer. Proceeding of 8th International Conference Brittle Matrix Composites. Ed. A.M. Brandt, Warszawa, Poland, 2006
- [5]. Nornberg, J., Peterson, Ö., ve Billberg, P., (1997). Effect of new generation superplasticizers on the properties of fresh concrete, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, *Proceedings*, Fifth CANMET/ACI Int. Conf. Ed. By V.M. Malhotra, Rome,SP-173, 583-98.
- [6]. Ramachandran, V.S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook*, Noyes Publications, New Jersey.
- [7]. Ferraris, C. (1999) *Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 5, (104), pp. 461-478.
- [8]. Akman, S. (1999). *Yüksek Performanslı Betonların Taze Haldeki Özellikleri Üzerine Katkı Maddelerinin Etkisi*, (Mutlu, M., çev., bt), Role of Admixtures on High Performance Concrete, RILEM Symposium, Mexico.
- [9]. Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*, METU Press, Ankara.

- [10]. Wong, G. S., Alexander, M. A., Haskins, R., Poole, T., Malone, P. G. & Wakeley, L. (2001). *Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report*, USAE Research and Development Center.
- [11]. Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*, Thesis of Doctor of Philosophy, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- [12]. Feys, D., Verhoeven R., Schutter G., (2008). Steady-state Rheological Properties of Fresh Self Compacting Concrete and Their Evolution in Time. Annual Transactions of The Nordic Rheology Society, Vol.15, 2007
- [13]. H. Justnes, D. Van Gemert, K. Weerdt, D.Reynders, (2006). Combining Plasticizers/Retarders And Accelerators. Norwegian University of Science and Technology Faculty of Natural Sciences and Technology Department of Materials Science and Engineering.
- [14]. Biesalski, M. And Rühle, J. (2002). "Polyelectrolytes at Solid Surfaces: Multilayers and Brushes." *Handbook of Polymers and Their Applications*. 39-63
- [15]. Compater C., Nonat A., Pourchet S., Mosquet M., Maitrasse P., The Molecular Parameters and The Effect of Comb-Type Superplasticizers on SCC: A Comparison of Comb-Type Superplasticizer Adsorption onto a Basic Calcium Carbonate Medium in the Presence of Sodium Sulphate. Malhotra VM, editor. Proceedings of 7th CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI SP 217. 2003. P.195-210
- [16]. Felekoğlu B., Sarıkahya H., (2007) Effect of Chemical Structure of Polycarboxylate-Based Superplasticizers on Workability Retention of SCC. Science Direct: Construction and Building Materials 22 p.1972–1980.