

POLİKARBOKSİLATLARLA AKIŞKANLAŞTIRILMIŞ ÇİMENTO HAMURLARININ HERSCHEL-BULKLEY MODELİ İLE REOLOJİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Velican Özdemir¹, Kübra Kaya², S. Gamze Erzen³

Özet

Gerçekleştirdiğimiz çalışmada; ana zincir yapısı, yan-zincir uzunluğu ve yan-zincir yoğunluğu farklı olan polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcılar serbest-radikalik polimerizasyon reaksiyonu ile sentezlenerek, bu polimerlerle hazırlanan çimento hamurlarının işlenebilirlik ve reolojik davranışları 2 saat süreyle incelenmiştir. Örnekler üzerinde işlenebilirlik deneyleri “Kantro mini çökme konisi” ve reoloji deneyleri MCR52 reometre ile yürütülmüştür. Reolojik ölçümlerde elde edilen akış eğrileri Herschel-Bulkley (HB) modeli uyarınca analiz edilerek, modele ait parametreler olan kayma eşiği- (τ_0) , kıvam faktörü- (K) ve akış indeksi- (n) değerleri belirlenmiştir. Belirli bir kayma hızında çimento hamurlarının efektif viskoziteleri de hesaplanmış, örnekler birbirleri içinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçta, süper akışkanlaştırıcıların yapısındaki yan-zincir yoğunluğunun, yan-zincir uzunluğuna göre sistemi akışkanlaştırmada daha baskın etki oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca, ana zinciri oluşturan bileşenlerin (mono-karboksilik asit ve dikarboksilik asit) tekli olarak ve birlikte kullanımlarıyla sentezlenen süper akışkanlaştırıcıların hamurları yüksek oranda akışkanlaştırma özelliği olmasına rağmen, sadece mono-karboksilik asit taşıyanların işlenebilirliği zamana bağlı olarak daha mükemmel koruduğu belirlenmiştir.

The Rheological Examination of Cement Pastes Superplasticized With Polycarboxylates Using Herschel-Bulkley Model

In this study, polycarboxylate-based superplasticizers with different main-chain structure, side-chain length and side-chain density were synthesized with free-radical polymerization, the workabilities and rheological behaviours of cement pastes prepared with these polymers were investigated for a period of 2 hours. The workability and rheological tests were achieved with “Kantro mini-slump cone” and MCR52 rheometer, respectively. The flow curves obtained from measurements were analyzed by Herschel-Bulkley (HB) model, rheological parameters such as shear-yield stress- (τ_0) , consistency factor- (K) and flow index- (n) were determined. Effective viscosities of pastes at a certain shear-rate were calculated and, the specimens were evaluated comparatively. It was observed that, side-chain density in superplasticizer structure had more dominant effect than side-chain length on system fluidity. Although, the synthesized superplasticizers, with single and multi-combinations of the monomers (monocarboxylic and dicarboxylic acids) which form main-chain, provided higher fluidity to pastes, it was determined that superplasticizers only possessing monocarboxylic acid perfectly retained fluidity by time.

1. GİRİŞ

Polikarboksilat bazlı SA'lar yeni nesil süper akışkanlaştırıcılardandır, özellikle ilk geliştirildiği 1980'li yıllardan günümüze kadar moleküler yapısı sürekli değiştirilerek çimento içerisinde en yüksek performansın elde edilmesi hedeflenmektedir [1-3]. Gerçekleştirilen çalışmalarda, polikarboksilatların çimento esaslı sistemlerde mükemmel dağıtma kabiliyetinin ve kararlılığının olduğu, düşük dozlardaki kullanımlarında dahi çimento hamurunda etkin dağılmayı sağladığı ifade edilmiştir [1,2]. Ayrıca bu katkılar geleneksel su azaltıcı katkılara kıyasla, beton karışımların su ihtiyacını %30-40 seviyelerine kadar azaltabilmekte [4], dolayısıyla beton mekanik dayanımlarında artışa neden olmaktadır.

Betonun reolojik davranışının bilinmesi bu malzemenin karıştırılma, taşınma, pompalanma ve inşaat alanında yerleştirilmesi-kalıplanması açısından oldukça önemlidir. Çimento esaslı yapı malzemelerinin

işlenebilirliği “çökme deneyi” ve “yayılma deneyi” ile uygulama sahasında kolayca belirlenebilirken, ileri araştırmalarda bu sonuçların reolojik testlerle desteklenerek kullanılması daha doğru bir yaklaşımı oluşturmaktadır. Taze betonun reolojik özelliklerinin ilk olarak ve geniş çapta bilinen bir deney

1) velicannozdemir@gmail.com, 2) kubra_916@hotmail.com 3) gamzeerzen@sdu.edu.tr, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

düzeneği ile belirlenmesi Tattersall (1976) tarafından gerçekleştirilmiştir. Betonun taze hâli akışkan davranış sergilemektedir ve çoğunlukla Bingham akışkan özelliklerini gösterdiği varsayılmaktadır [5]. Bu tip bir akışkan profilinde, eşik (kritik) kayma gerilmesi ve plastik viskozite olmak üzere en az iki parametre akış davranışını açıklamakta kullanılmaktadır [6]. Bununla beraber, çimento içeren sistemlerin reolojik davranışlarını belirlemede son dönemlerde Herschel-Bulkley, Casson, Sisko, Williamson ve Modifiye Bingham gibi farklı reolojik modeller de kullanılmakta ve bu alandaki çalışmalar sunulmaya devam etmektedir [7].

Çalışmamızda, Herschel-Bulkley modeli kullanılarak çimento hamurlarının reolojik davranışları incelenmiştir. Aşağıda bu modele ait denklem belirtilmektedir:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$$

Burada, τ kayma gerilmesini (Pa), τ_0 eşik kayma gerilmesini (Pa), $\dot{\gamma}$ kayma hızını (s^{-1}), K kıvam faktörünü ($Pa \cdot s^n$) ve n akış indeksini ifade etmektedir. Akış indeksinin 1'e eşit olduğu durumda denklem Bingham modeline dönüşürken, $n < 1$ kayma incelmesi (deformasyon yumuşaması) ve $n > 1$ kayma kalınlaşması (deformasyon sertleşmesi) davranışını göstermektedir. Kayma incelmesi davranışında, artan kayma hızlarında akışkanın görünür viskozitesinde azalma meydana gelmektedir. Süper akışkanlaştırıcı (SA) içermeyen çimento hamurunun bu reolojik davranışı sergilediği önceki çalışmalarda belirtilmiştir [8]. Kayma kalınlaşması davranışında ise, akışkana ait görünür viskozite artan kayma hızıyla artmaktadır. Polikarboksilat bazlı SA'ların kullanımında çimento esaslı yapı malzemelerinin kayma kalınlaşması davranışına sahip olduğu ve bu davranışın kontrol edilmesinin gerekliliği yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [8-10].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

SA üretiminde, metoksi polietilen glikol (met) akrilat (mPEG(M)A), metakrilik asit (MAA-monokarboksilik asit) ve fumarik asit (FA-dikarboksilik asit) kullanılmıştır. İki farklı yan zincir uzunluğuna (M_n : 480 ve 950 Da) ve iki farklı yan zincir yoğunluğuna (MAA/mPEG(M)A: 30/1 ve 60/1) sahip kopolimerler ve terpolimer (mPEG(M)A-MAA-FA) sentezlenmiştir (Tablo 1). Polikarboksilat esaslı tarak-tipi polimerler yapılarında temelde iki ana bileşen taşımaktadır. Bunlardan ilki, pozitif yüklü çimento yüzeyine tutunan (adsorplanma) negatif

yüklerden oluşmuş bir polimer ana zinciridir. Diğer bileşen ise, çimento hamurunda topaklaşmayı engelleyerek homojen ve etkin dağılmayı sağlayan, yapısal olarak tarağın uçlarına benzeyen, tekrarlayan etilen oksit (EO) birimlerinden oluşan makromonomerlerdir. Tablo 1'de, SA ana zincirindeki karboksil grupları ile yan zincir molar oranı (MAA+FA)/mPEG(M)A ile, ana zincirdeki mono-karboksilik asitin dikarboksilik asite oranı MAA/FA ile, yan zincirlerin molekül ağırlıkları (mPEG(M)A uzunluğu) ise M_n ile ifade edilmiştir. Çimento hamuru ve harcının hazırlanmasında CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Tablo 2'de çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler yer almaktadır.

Tablo 1. SA sentezinde kullanılan makromonomer ve monomerler

Süper akışkanlaştırıcı	Yan zincir M_n (Da)	(MAA+FA)/mPEG(M)A (mol bazında)	MAA/ FA (mol bazında)
SA-1	480	30/1	sadece MAA
SA-1	480	60/1	
SA-3	950	60/1	
SA-4	480	60/1	5/1

Tablo 2. Portland çimentosunun (CEM I 42,5 R) kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Kütlece %	Fiziksel Özellikler
SiO ₂	20,26	Özgül ağırlık (g/cm ³)
Al ₂ O ₃	4,27	3,14
Fe ₂ O ₃	3,37	Blaine incelik (cm ² /g)
CaO	63,05	3480
MgO	1,53	İlk priz (dakika)
SO ₃	3,01	150
Na ₂ O	0,10	Son priz (dakika)
K ₂ O	0,59	195
Kızdırma kaybı	2,85	

2.2. Reolojik Ölçümler

Sentezlenen SA'lar ile akışkanlaştırılan çimento hamurlarının reolojik davranışı, Anton Paar MCR52 reometre ile incelenmiştir. Çimento hamurlarının hazırlanmasında, tüm katkılarla rahat çalışılabilen ve ayrışma olmadan yüksek yayılma çapları elde edilen 0,31 su/çimento oranı tercih edilmiştir. Her bir hamura ait akış eğrisi 0,1-100 s⁻¹ kayma hızı aralığında alınan verilerle oluşturulmuş ve bu veriler RheoCompass1.11 yazılımı ile "Herschel-Bulkley (HB)" modeli uyarınca analiz edilmiştir. Sonuç olarak, modele ait reolojik parametreler (eşik kayma gerilmesi- τ_0 , kıvam faktörü-K ve akış indeksi-n) belirlenmiştir. Ayrıca, çimento hamurlarının zamana bağlı viskozitelerinin karşılaştırılması amacıyla 50 s⁻¹ kayma hızındaki efektif viskozite değerleri hesaplanmıştır. Efektif viskozite, başlangıç kayma hızının üzerindeki herhangi bir kayma hızında belirlenebilen ve kayma hızının bir fonksiyonu olan viskozitedir. Birimi Pa.s'dir.

2.3. İşlenebilirlik Deneyleri

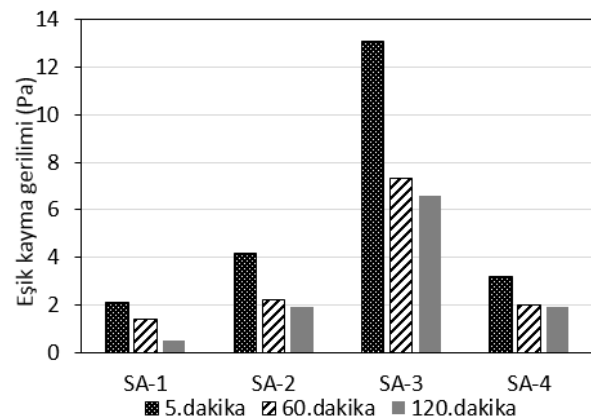
Çimento hamurunun (s/ç=0,31) işlenebilirliğinin belirlenmesinde Kantro "mini çökme" metodu kullanılmıştır. Kantro'nun çalışmasında [11] çimento-SA uyumu mini çökme konisi ile tayin edilmektedir. Burada kullanılan çökme konisinin boyutları; 36 mm üst iç çap, 64 mm alt iç çap ve 60 mm yükseklik şeklindedir. Deney şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Laboratuvar tipi karıştırıcıda çimento, su ve SA ile karıştırılarak çimento hamuru hazırlanmıştır. Mini çökme konisi bir cam plaka üzerine yerleştirilmiş, hazırlanan çimento hamuru ile doldurulmuş ve üst yüzeyi metal bir çubuk ile düzlenerek dikey yönde çekilmiştir. Cam plakaya yayılan çimento hamurunun çapı, birbirleriyle 90° açı yapacak şekilde 2 defa ölçülmüş ve ortalaması hesaplanmıştır. Hamurun içinde bulunduğu kabın yüzeyi nemli bir bezle tamamen örtülerek bir sonraki ölçüm beklenmiş, Kantro "mini çökme deneyi" sırasıyla 60. ve 120. dakikalarda tekrarlanarak zamana bağlı işlenebilirlik belirlenmiştir [12].

Çimento harçlarının işlenebilirliğinin tayini, TS EN 1015-3'e [13] uygun olarak "yayılma tablası"nda gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 0,5 su/çimento oranında referans (katkısız) ve %0,3 (çimento kütlesine göre) SA dozunda harçlar hazırlanmış, SA'ların harçların işlenebilirliğine ve zamana bağlı işlenebilirliğin korunmasına olan etkileri 2 saatlik süre boyunca belirlenmiştir. Sonuç olarak, SA'lar ile hazırlanan harçların yayılma değerleri referans harca ait sonuç ile oranlanarak "göreceli yayılma artışları" yüzdesel olarak hesaplanmıştır.

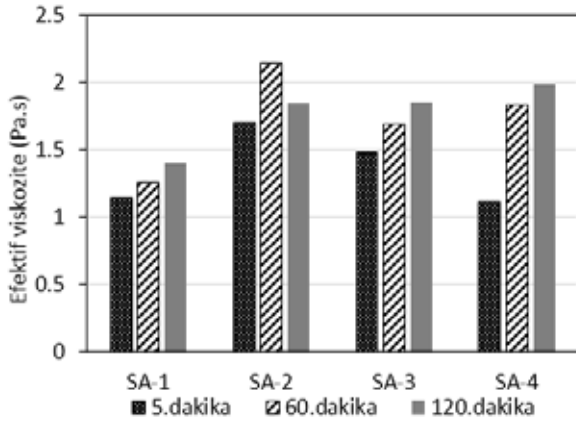
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3.1. SA Molekül Yapısının Reolojik Parametrelere Etkisi

Çimento hamurlarının reolojik davranışlarının belirlenmesi amacıyla, sentezlenen 4 farklı molekül yapısına sahip SA ile 0,31 su/çimento oranında karışımlar hazırlanmıştır. HB uyarınca belirlenen eşik kayma gerilmesi ve efektif viskozite değerleri ($\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$) Şekil 1'de yer almaktadır. Bilindiği gibi polikarboksilat bazlı SA'lar, negatif yüklü ana zincirlerinde bulunan karboksil (COO⁻) grupları ile çimento yüzeyine tutunmaktadır. Tarak yapısına benzeyecek şekilde ana zincire bağlanan uzun yan zincirlerin, taşıdıkları sterik etki kuvvetleri ise çimento taneciklerinin topaklaşmasını engellemektedir. Sentezlenen SA'lar içinde en yoğun yan zincir içeren SA-1'dir, söz konusu polimerde ana zinciri oluşturan monomerlerin yan zincir makromonomerine oranı 30:1 şeklindedir. Çimento esaslı sistemlerde SA'nın yan zincir yoğunluğu kadar, yan zincir uzunluğunun da sistemi akışkanlaştırmada etkili bir parametre olduğu ifade edilebilir. Farklı SA'lar içeren hamurların eşik kayma gerilmeleri incelendiğinde, tüm zaman değerleri için en yoğun yan zincir taşıyan kopolimerin en düşük kayma eşiği sağladığı belirlenmiştir. Bu sıralamayı, ana zincirinde iki tür monomer taşıyan SA-4 izlemektedir. İncelediğimiz sistemde, uzun yan zincirlere sahip SA-3'ün (yan zincir uzunluğu, $M_n = 950 \text{ Da}$) kayma eşiğini azaltmada en az etkili süper akışkanlaştırıcı olduğu gözlenmiştir. Çimento hamurlarının efektif viskoziteleri 50 s⁻¹ kayma hızında hesaplanmıştır. Söz konusu kayma hızı, 0,1-100 s⁻¹ kayma hızı aralığında alınan verilerde tam orta noktayı temsil etmesi bakımından tercih edilmiştir. Şekil 1'den görüleceği üzere SA-1, kayma eşiğini en fazla düşüren ve aynı zamanda sistemin efektif viskozitesini de önemli oranda azaltan bir polimerdir. Bunun yanı sıra, SA'nın taşıdığı uzun yan zincirlerin de sterik kuvvetleri ile karışım viskozitesini azaltmada önemli rol üstlendiği görülmüştür.

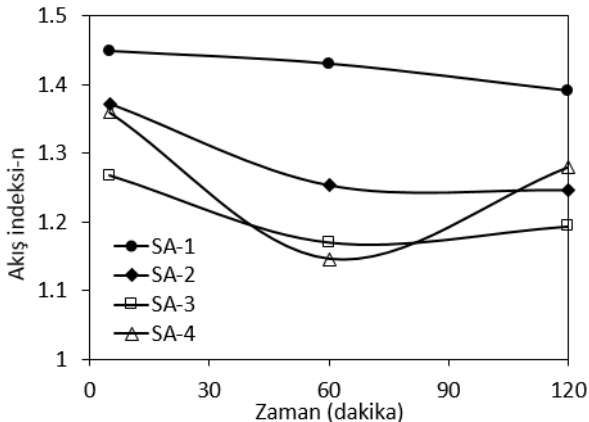


Şekil 1. SA içeren hamurların farklı zamanlardaki eşik kayma gerilmesi ve efektif viskozite değerleri

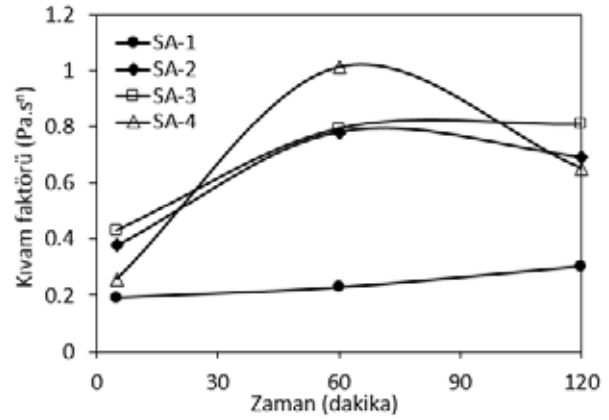


Şekil 1. SA içeren hamurların farklı zamanlardaki eşik kayma gerilmesi ve efektif viskozite değerleri

HB modelinde yer alan diğer parametreler akış indeksi ve kıvam faktörüdür. Şekil 2'de çimento hamurlarının akış indeksi ve kıvam faktörünün zamana bağlı değişimleri yer almaktadır. Polikarboksilat bazlı SA içeren sistemlerin literatürde [8,9] kayma kalınlaşması sergilediği ifade edilmiştir. Şekil 2'de de bu yaklaşım açıkça görülmektedir. Kayma kalınlaşması davranışının özellikle yüksek kayma hızlarının uygulandığı ekipmanlarda (pompa, karıştırıcı vb.) kontrol edilmesi, bu ekipmanların güvenli bir şekilde çalışması için gerekli olmaktadır. Şekil 2'de zamana bağlı en yüksek akış indeksinin SA-1 içeren hamura ait olduğu görülmektedir. Bu sırayı genel anlamda SA-2 ve SA-4 izlemektedir. Kayma kalınlaşması davranışını emsalleri içinde en fazla indirgeyenin, en uzun zincirlere sahip polimer olduğu belirlenmiştir. Kıvam faktörünün zamana bağlı değişimleri incelendiğinde, çimento hamurlarının zamanla hidrasyonuna bağlı olarak katılaşma meyili sonucu kıvam faktörünün arttığı gözlenmiştir. Kıvam faktörü en düşük hamur SA-1 içeren hamurdur, bu sonuç düşük kayma eşiği ve efektif viskozite değeri ile beraber değerlendirildiğinde daha anlamlıdır. SA-2 ve SA-3 içeren hamurlara ait eğriler birbirlerine yakın seyretmekle beraber, ana zincirinde farklı monomerler taşıyan SA-4 ile hazırlanan hamurda kıvam değişimlerinin oldukça keskin olduğu görülmüştür.



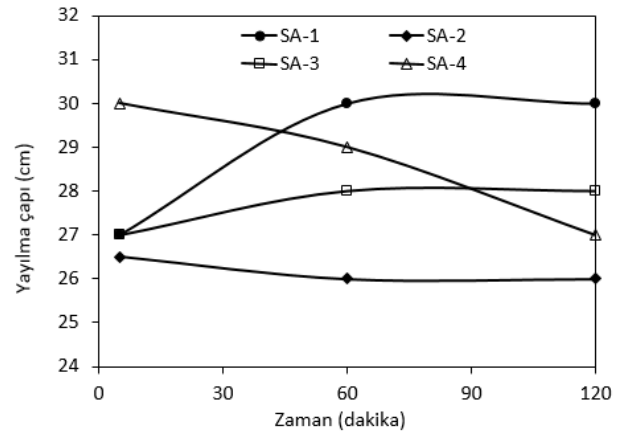
Şekil 2. SA içeren hamurların zamana bağlı akış indeksi ve kıvam faktörü değişimleri



Şekil 2. SA içeren hamurların zamana bağlı akış indeksi ve kıvam faktörü değişimleri

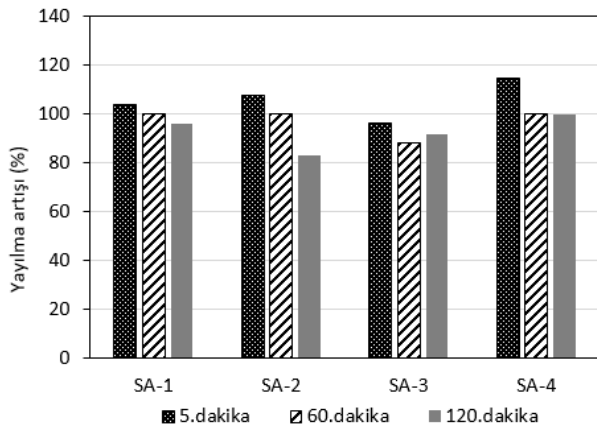
3.2. SA Molekül Yapısının İşlenebilirliğe Etkisi

Reoloji deneyleri gerçekleştirilen çimento hamurlarının Kantro "mini çökme" konisiyle belirlenen yayılma sonuçları Şekil 3'te sunulmaktadır. Düşük su/çimento (0,31) oranında hazırlanan çimento hamurları kütlece % 0,3 SA dozu içermektedir. Aynı su içeriğinde katkısız hamur da hazırlanmış, ancak yayılma değeri vermediğinden (yayılma çapı=6,4 cm) Şekil 3'te yer almamaktadır. Hamurların yayılma değerleri zamana bağlı olarak karşılaştırmalı incelendiğinde, en yüksek değeri SA-1 içeren hamur vermektedir. Burada ilk 5. dakikadaki sonucun diğerlerinden düşük olması, SA'nın çimento yüzeyine tutunmasının söz konusu süre içinde hâlâ devam ettiğini ve henüz etkin dağıtmayı sağlamadığını ifade etmektedir. Ana zincirde mono ve dikarboksilik asitleri birlikte taşıyan SA-4 ile hazırlanan hamurun yüksek işlenebilirlik özelliği yanında, zamana bağlı işlenebilirlik kaybının diğer hamurlardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Uzun yan zincirler taşıyan SA-3 ve seyrek yan zincir taşıyan SA-2 (SA-3 polimerinin yan zincir uzunluğu, $M_n=950$ Da; SA-2 polimerinde ana zinciri oluşturan monomerlerin yan zincir makromonomerine oranı 60:1) içeren hamurlar daha düşük yayılma sonuçları vermesine rağmen, bu SA'ların sistemin akışkanlığının korunmasında mükemmel etkileri olduğu görülmüştür.



Şekil 3. SA ile akışkanlaştırılan çimento hamurlarının yayılma değerleri

Sentezlenen SA'ların çimento hamurları yanında, betonu daha iyi temsil ettiğinden ötürü çimento harçlarında da performansları denenmiştir. Şekil 4'te, SA'lar ile hazırlanan çimento harçlarının (Bölüm 2.3) farklı zamanlardaki göreceli yayılma yüzdeleri verilmektedir. Harçlara başlangıçta en yüksek işlenebilirliği SA-4 sağlarken, daha düşük işlenebilirlik değerine sahip olan SA-1 ve SA-3 içeren harçlarda 2 saat boyunca işlenebilirliğin daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, ana zincirde iki tür monomer taşıyan SA-4'ün sistemi yüksek oranda akışkanlaştırmasından ötürü tercih edilebilecek bir alternatif olduğu ancak, zamanın önemli olduğu uzun nakliye süresi gerektiren uygulamalarda yoğun yan zincirli SA-1 ve uzun yan zincirler taşıyan SA-3'ün daha uygun olacağı düşünülmektedir.

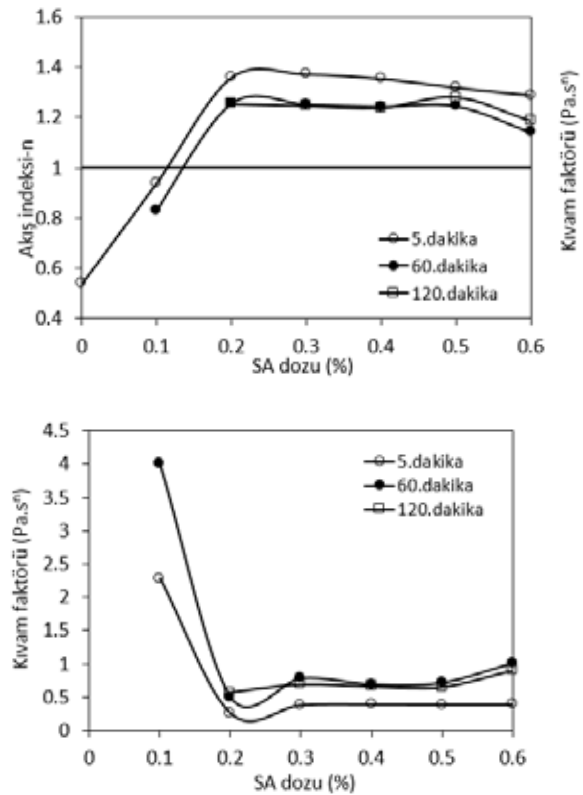


Şekil 4. Çimento harçlarının farklı zamanlardaki göreceli yayılma yüzdeleri

3.3. SA Dozunun Reolojik Parametrelere Etkisi

Beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı uygulamaları kadar, bu uygulamalar için optimum SA dozunun belirlenmesi de hem performans hem de maliyet açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, farklı SA-2 miktarlarında (çimento kütleline göre) ve 0,31 s/ç oranında hazırlanan çimento hamurlarında reoloji deneyleri gerçekleştirilmiştir. HB modeli uyarınca elde edilen bulgular sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmaktadır. Şekil 5'te, SA doz artışı ile akış indeksinin kayma incelmeleri davranışından kayma kalınlaşması davranışına doğru değişim gösterdiği ve özellikle % 0,2 dozundan sonra sabit bir seyir izlediği belirlenmiştir. Yine, zamanla hidratasyon reaksiyonlarına bağlı olarak sistemin akış davranışı da bir miktar etkilenmektedir ve çimento hamurlarının akış indeksinin tüm SA dozları için zamanla bir miktar azaldığı belirlenmiştir. SA-dozu-kıvam faktörü ilişkisi incelendiğinde, eğrilerdeki keskin dönüşün bir önceki grafikte paralel şekilde % 0,2 SA dozundan sonra gerçekleştiği görülmektedir. Çimento hamurları,

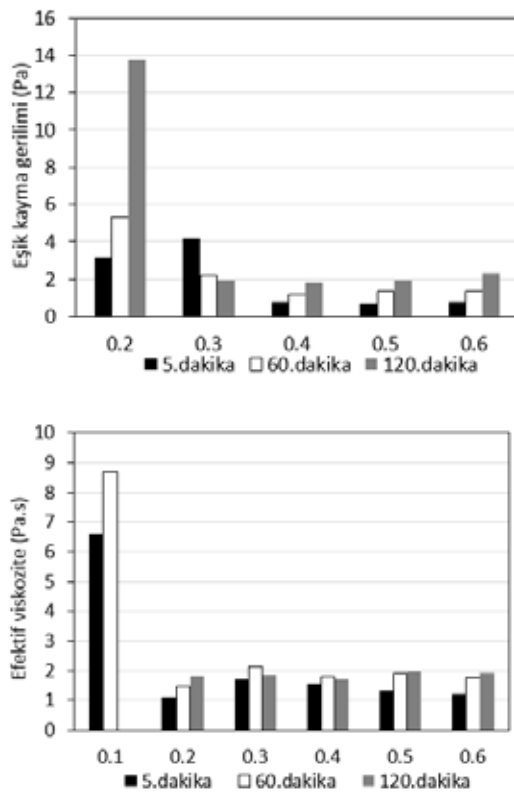
düşük SA dozunda yüksek kıvam faktörüne sahipken, optimum SA dozundan sonra kıvam faktöründe önemli değişiklikler belirlenmemiştir. Bu durum, sistemi etkin bir şekilde akışkanlaştırmak için %0,2 civarında SA'nın yeterli olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 5. Çimento hamurlarının farklı zamanlardaki SA dozu-akış indeksi ve SA dozu-kıvam faktörü ilişkileri

Şekil 6'da, farklı SA dozlarında çimento hamurlarının eşik kayma gerilmesi ve efektif viskozite değişimleri yer almaktadır. Bilindiği gibi HB modelinde akışkanın viskozite değerleri Bingham modelinde olduğu gibi sabit olmayıp, kayma hızının artma-azalmasına göre değişmektedir (Bölüm 2.2). Düşük SA dozunda (%0,2) özellikle 120. dakikada yüksek kayma eşiği sistemin katılaşma davranışına bağlı olarak gözlenmektedir. Bu durum, yüksek SA dozlarında çok çarpıcı şekilde değişmemektedir. %0,1 SA dozuna ait kayma eşiği verileri oldukça yüksek olduğundan, grafiğin net anlaşılabilmesi için bu veriler Şekil 6'da yer almamaktadır. Efektif viskozite değişimleri incelendiğinde, özellikle %0,1 dozundan sonra hamurların efektif viskozitelerinde önemli azalmalar gözlenmiştir. Sonuç olarak çimento esaslı sistemlerde yüksek akışkanlaşma

özelliğinin elde edilebilmesi için, polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcının moleküler yapısı kadar uygulama dozunun da oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Söz konusu katkıyla çalışılırken karşılaşılabilecek en önemli problem, karışımların kayma kalınlaşması davranışı yani artan kayma hızına bağlı görünür viskozitenin artmasıdır. Özellikle yüksek SA dozu ve düşük su/çimento oranında bu etkinin şiddetlenmesi beklenbilir. Üretimlerde bu özelliğin dikkate alınarak, uygun karışım tasarımlarının yapılmasının gerekliliği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 6. Farklı SA dozlarında hamurların zamanla eşik kayma gerilmesi ve efektif viskozite (50 s⁻¹) değişimleri

Teşekkür

Bu çalışma "Yeni Özelliklere Sahip Polikarboksilat Bazlı Süper akışkanlaştırıcı Sentezi ve Çimento İçeren Sistemlerdeki İşlenebilirlik ve Reolojik Etkilerinin Belirlenmesi" başlıklı projenin bir bölümünü kapsamaktadır ve yazarlar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) 213M373 projesine sağladıkları finansal destekten ötürü teşekkür ederler.

Kaynaklar

1. Plank, J., Pöllmann, K., Zouaoui, N., Andres, P.R., Schaefer, C., "Synthesis and Performance of Methacrylic Ester Based Polycarboxylate Superplasticizers Possessing Hydroxyl Terminated Poly(ethylene glycol) Side Chains", Cement and Concrete Research, No. 38, pp. 1210-1216, 2008.
2. Cho, H.-Y., Suh, J.-M., "Effects of the Synthetic Conditions of Poly(carboxylate-g-(ethylene glycol) ethyl ether) on the Dispersibility in Cement Paste", Cement and Concrete Research, No. 35, pp. 891-899, 2005.
3. Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matsuhisa, M., "Effects of the Chemical Structure on the Properties of Polycarboxylate-type Superplasticizer", Cement and Concrete Research, No. 30, pp. 197-207, 2000.
4. Ramachandran, V.S., Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, 1995.
5. Ferraris, C.F., De Larrard, F., Martys, N., Fresh Concrete Rheology: Recent Developments, Materials Science of Concrete VI (eds: Mindess, S., Skalny, J.), The American Ceramic Society, Westerville, pp. 215-241, 2001.
6. Ferraris, C.F., "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, No. 104 (5), pp. 461-478, 1999.
7. Nehdi, M., Rahman, M.-A., "Estimating Rheological Properties of Cement Pastes Using Various Rheological Models for Different Test Geometry, Gap and Surface Friction", Cement and Concrete Research, No.34, pp. 1993-2007, 2004.
8. Cyr, M., Legrand, C., Mouret, M., "Study of the Shear Thickening Effect of Superplasticizers on the Rheological Behaviour of Cement Pastes Containing or Not Mineral Additives", Cement and Concrete Research, No.30, pp. 1477-1483, 2000.
9. Yahia, A., "Shear-thickening Behavior of High-performance Cement Grouts – Influencing Mix-design Parameters", Cement and Concrete Research, No.41, pp. 230-235, 2011.
10. Feys, D., Verhoeven, R., De Schutter, G., "Why is Fresh Self-compacting Concrete Shear Thickening?", Cement and Concrete Research, No.39, pp. 510-523, 2009.
11. Kantro, D.L., "Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Pastes—A Miniature Slump Test", Cem. Concr. Aggreg., No.2, pp. 56-67, 1980.
12. Li, Z., Ding, Z., "Property Improvement of Portland Cement by Incorporating with Metakaolin and Slag", Cement and Concrete Research, No.33, pp. 579-584, 2003.
13. TS EN 1015-3 Kagir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). TSE, Ankara: Türk Standardları Enstitüsü; 2000.