

BETONDA KULLANILAN HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKI PERFORMANSLARININ YÜZEY GERİLİMİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF PERFORMANCES OF AIR ENTRAINING ADMIXTURES USED IN CONCRETE BASED ON SURFACE TENSION METHOD

Yuşa Şahin

Yozgat Bozok Üniversitesi
yusa.sahin@bozok.edu.tr

Özet

Kış aylarında hava sıcaklığına bağlı olarak, beton ve betonarme yapılarda donma çözülme etkisi sonucu hasar meydana gelmektedir. Hasarın nedeni boşluklardaki suyun donarak hacminin artması ve sertleşmiş betonun bu hacim artışına karşı koyamayarak çatlamasıdır. Hasarı önlemek için üretim aşamasında betona mikron mertebesinde çok küçük çaplı küresel hava boşlukları oluşmasını sağlayacak kimyasal katkıları ilave edilmektedir. Beton içinde oluşan bu hava boşlukları genleşen buz için rezerv hacim oluşturarak hasar oluşumunu engellemektedir. Hava sürükleyici katkıların (HSK) betonlarda yeterli hava boşluğu oluşturabilmeleri için gerekli katkı miktarı ve hava boşluklarının kararlılıkları köpük indeksi ve köpük drenajı deneyleri ile belirlenmektedir. HSK'ların beton performansları köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilimi ölçümlerine dayanan yüzey gerilimi yöntemiyle de araştırılmaktadır. Ayrıca, katkıların betonlarda oluşturdukları hava boşluk sistemleri, taze halde hava boşluğu analizleri yapılarak belirlenebilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda, hava sürükleyici katkıların yüzey gerilimini farklı etkilediği ve oluşturdukları hava boşluğu sistemlerinin bu etkileri ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, yüzey gerilimi ölçümlerinin betonlarda yeterli miktarda hava boşluğu oluşturacak katkı miktarının belirlenmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, harç, hava sürükleyici katkı, köpük indeksi, yüzey gerilimi.

Abstract

During the winter months, depending on the seasonal air temperature, damage occurs on concrete and reinforced concrete structures as a result of the freezing and thawing effect. The cause of the damage is that the water in the pores freezes and increases in volume, and the hardened concrete cannot resist this increase and cracks. In order to prevent damage, chemical admixtures are added to the concrete during the production phase to

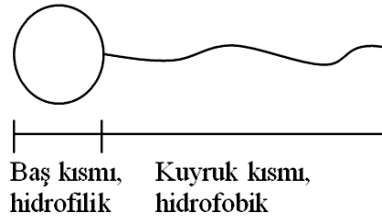
create micron-sized spherical air voids. These air voids formed within the concrete prevent damage by creating a reserve volume for the expanding ice. The amount of admixtures required for air entraining admixtures (AEA) to create sufficient air voids in concrete and the stability of the air voids are determined by foam index and foam drainage tests. Concrete performances of AEAs are investigated by the surface tension method, which is based on surface tension measurements, as well as foam tests. In addition, the air void systems generated by admixtures in concrete can be determined by performing air void analyses at fresh state. As a result of experimental studies, it has been revealed that AEAs affect surface tension differently and that the air void systems they create are related to these effects. Furthermore, it has been observed that surface tension measurements can be used to determine the amount of AEAs that will create a sufficient amount of air void in concrete.

Keywords: Concrete, mortar, air entraining admixture, foam index, surface tension.

1. GİRİŞ

Beton terminolojisinde hava sürükleyici katkıları (HSK) olarak adlandırılan yüzey aktif kimyasalların kullanılmasıyla beton içerisinde boyutları 10 µm ile 1 mm arasında değişen küresel hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu hava kabarcıklarının büyük bir kısmı beton üretimi aşamasında karıştırıcı paletlerinin yaptığı mekanik etki sonucu oluşmakta ve HSK molekülleri tarafından kararlılıkları ve stabiliteyi sağlanmaktadır [1].

HSK molekülleri su seven (hidrofilik) baş kısmından ve su sevmeyen (hidrofobik) kuyruk kısmından meydana gelmektedir (Şekil 1). Bu moleküller, baş kısmın elektriksel yükü; negatif (-) ise anyonik, pozitif (+) ise katyonik, nötr ise nan-iyonik ve hem negatif hem de pozitif yüklü ise amfoterik olarak adlandırılırlar [2].



Şekil 1. Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı [1]

Betonların donma-çözülme dayanıklılığı açısından hava sürüklemenin önemi belirlendikten sonra araştırmacılar yeterli dayanıklılık için gerekli hava miktarı, hava boşluklarının özellikleri, hava boşluğu oluşumunda beton bileşenlerinin etkileri ve benzeri birçok konuda çalışmalar yapmışlardır. 2000’li yılların başlarında ise özellikle Portland Çimentosu Birliği (Portland Cement Association, PCA) ve Amerikan Federal Karayolları İdaresi (U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration, FHWA)’nin çalışma grupları hava sürükleyici katkı performansları ve sürüklenmiş hava boşluklarının kararlılıkları konularında çalışmalar yürütmüşlerdir [3-7]. Bu çalışmalar kapsamında farklı kimyasal esaslara sahip birçok hava sürükleyici katkı kullanılmış ve bu katkıların performansları köpük deneyleri ile değerlendirilmiştir. 2010’lu yılların sonlarında ise İstanbul Teknik Üniversitesi’nden Sahin ve ark. [8] Du Nouy halkası prensibine göre, ABD’de bulunan Princeton Üniversitesi’nden Tunstall ve ark. [9]

Damla-Ağırlık (drop-weight) yöntemine göre hava sürükleyici katkıların yüzey gerilimi üzerine etkilerini incelemişlerdir.

Hava sürükleyici katkıların etkinliklerinin köpük oluşturabilme özellikleri ile belirlenmesi 1950'lere dayanmaktadır [10]. Son yıllarda birçok araştırmada hava sürükleyici katkıların değerlendirilmesinde uygulanan “Köpük İndeksi” (Foam Index Test) ve “Köpük Drenajı” (Foam Drainage Test) deneyleri basit ve kısa süreli deneylerdir. Köpük indeksi deneyi betonda yeterli hava boşluğu oluşması için gerekli hava sürükleyici katkı miktarının görsel değerlendirme sonucu belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Köpük drenajı deneyi ile ise hava sürükleyici katkıların kararlılıkları, köpüklerin zamana bağlı olarak drene olmasıyla değerlendirilmektedir.

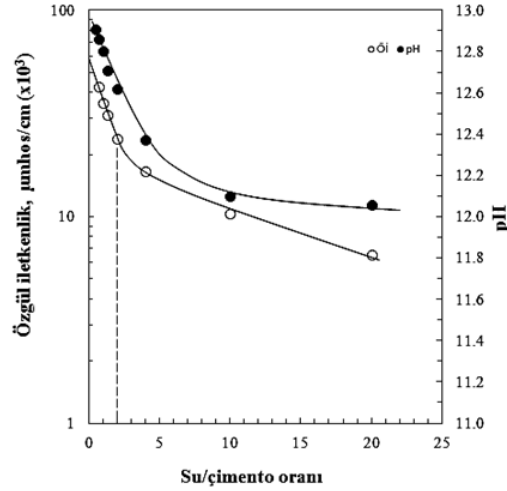
Yüzey gerilimi ölçümleri ilaç, boya, tarım, tekstil ve benzeri birçok endüstriyel alanda önemli rol almaktadır. Yüzey aktif kimyasal maddeler olan hava sürükleyici katkıların karışım suyunun yüzey gerilimini düşürerek betonlarda hava boşluğu oluşmasını sağladığı bilinmektedir. Hava sürükleyici katkıların betonlarda yeterli hava boşluğu oluşturabilmeleri için gerekli katkı miktarı, hava boşluklarının kararlılıkları ve beton performansları köpük deneylerinin yanı sıra yüzey gerilimi ölçümlerine dayanan yüzey gerilimi yöntemiyle de araştırılmaktadır. Pedersen ve ark. [11] çalışmalarında köpük indeksi deneyi yerine kullanılacak yeni bir yöntem olarak yüzey gerilimi ölçümlerini önermişlerdir. Çalışmalarında sadece yüzey gerilimi ölçümleri ile köpük indeksi ölçümlerinin korelasyonunu incelemişlerdir. Bununla birlikte, yüzey gerilimi ölçümlerini rastgele çimento ve su miktarlarında uygulamışlardır. Bu yazı içeriğinde ise, Pedersen ve ark. [11]'larının çalışmalarından sonra konu üzerindeki bilimsel çalışmalar incelenmiş ve ilerlemeler sunulmuştur.

2. YÜZEY GERİLİMİ ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Bu bölümde yüzey gerilimi ölçüm yöntemlerinden Du Nouy halkası yönteminin yazar ve arkadaşları tarafından çimento esaslı malzemelere yönelik geliştirilen bir uygulanmasından bahsedilecektir. Ayrıca, diğer başka bir grup tarafından uygulanan Damla-Ağırlık (drop-weight) yöntemi ile de karşılaştırmaları yapılacaktır.

2.1. Süpernatantın hazırlanması

Çimento esaslı malzemelerde hava sürükleyici katkıların performanslarını değerlendirmede yüzey gerilimi yönteminin uygulamadaki durumu temsil etmesi amacıyla çimento ve suyun karıştırılması ile hazırlanan karışımın çökmesinden sonra üste toplanan sıvı (süpernatant) üzerinde yüzey gerilimi ölçümleri yapılmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi Pedersen ve ark. [11] rastgele su/çimento oranlarında çalıştıktan sonra, konu üzerinde Şahin ve ark. [8] ise daha yönetsel bir yol izlemişler ve yüzey gerilimi ölçümlerinin yapılacağı su ve çimento oranı için ölçümler yapmış ve en uygun oranı belirlemişlerdir. Süpernatant'ın hazırlanmasında başlıca iki etken göz önüne alınmıştır. Bunlar; ölçümlerin yapılacağı karışımın betondaki durumu temsil etmesi (1), ve deneyin pratikliği ve uygulanabilir olması yönünden süpernatantın olabildiğince kısa sürede ve sorunsuz olarak toplanmasıdır (2). Bu etkenler göz önünde tutularak çeşitli su/çimento oranlarında, süpernatant toplanma süresi, pH ve özgül iletkenlik ölçümleri yapılarak yöntem için en uygun su/çimento oranı belirlenmiştir (Şekil 2).

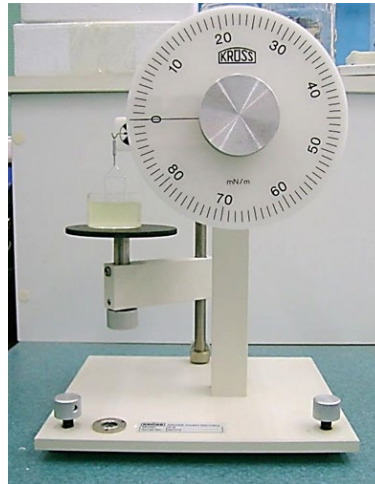


Şekil 2. S/Ç oranına bağlı olarak özgül iletkenlik ve pH değişimleri [1]

Ölçümler için 100 ml suya çeşitli oranlarda çimento katılmıştır. Karışımlar manyetik karıştırıcıda çeşitli sürelerde karıştırıldıktan sonra ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre 5 dakika karışım süresinin yeterli olduğu, bu değerden sonra sonuçların değişmediği görülmüştür. Karıştırma işleminden sonra katı kısmın çökmesi için karışım beklemeye alınmıştır. Çökelen karışımdan süpernatant damlalıklarla alınmış ve bir kaptan toplanmıştır. Sonrasında toplanan süpernatant üzerinde pH ve özgül iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, yüzey gerilimi ölçümleri için kullanılacak karışımın su/çimento oranı 2 olarak belirlenmiştir. Bu oranda, süpernatant hem kısa sürede elde edilebilir hem de betondaki durumu temsil edebilir bulunmuştur.

2.2. Du Nouy halkası deneyi

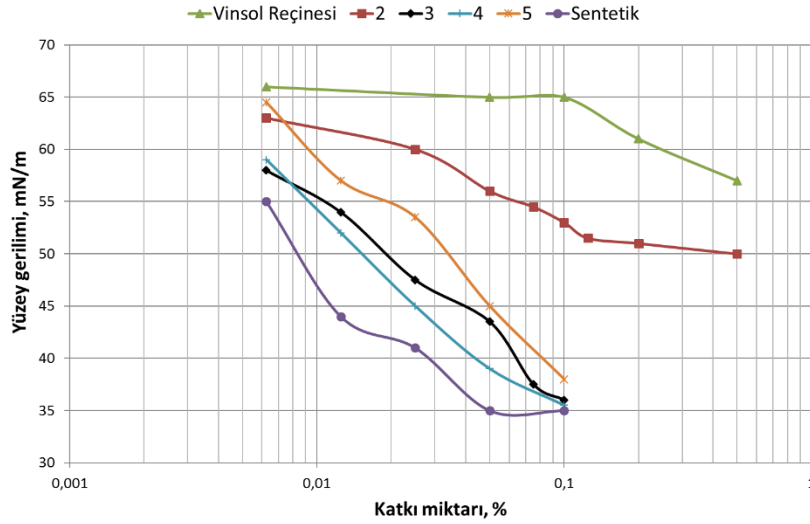
Du Nouy halkası deneyi Halka-Koparma yöntemi olarak da bilinmektedir. Bu deneyin uygulanması için daha önceki aşamada su/çimento oranı 2 olarak belirlenen süpernatanttan yaklaşık 50 ml alınarak manyetik karıştırıcıda karıştırılır ve bu esnada kimyasal katkıları, karışıma miktarınca eklenir. Süpernatant 5 dakika karıştırıldıktan sonra deney için 30 ml alınır. Deney kabına konan 30 ml süpernatant üzerinde yüzey gerilimi ölçümleri yapılır. Yüzey gerilimleri ölçümleri için Du Nouy halkası prensibine göre ölçüm yapan Krüss marka K6 model tensiyometre kullanılmıştır (Şekil 3).



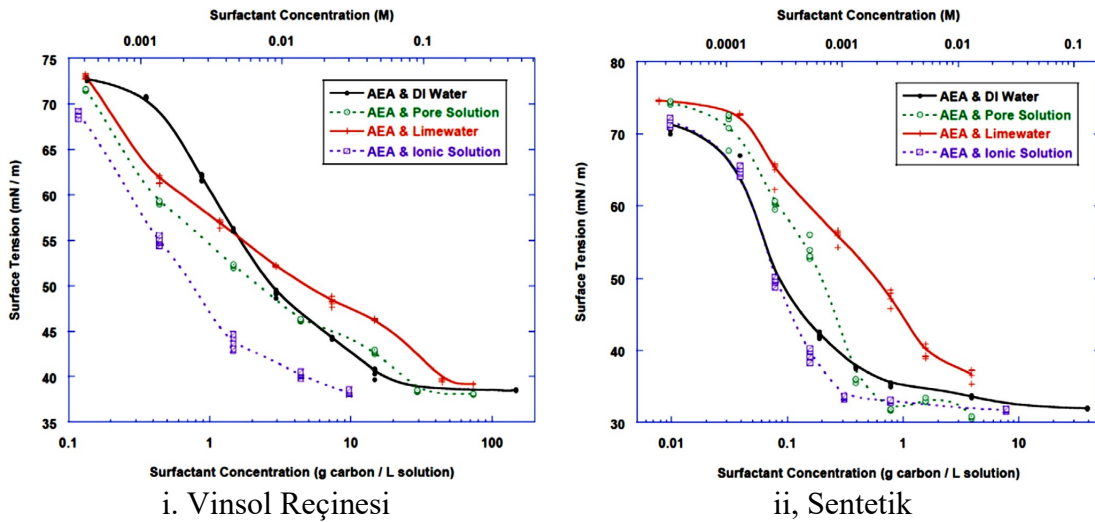
Şekil 3. Yüzey gerilimi ölçümleri [1]

2.3. Yüzey Gerilimi Değerleri

Hava sürükleyici katkıların yüzey gerilimi üzerine etkilerini incelemek için süpernatant içerisinde kullanılan katkı miktarı artırılarak ölçümlerin yapılması üzerine bir yol izlenebilir. Bu prensibe göre iki farklı yöntemle yüzey gerilimi ölçen iki farklı araştırmaya ait sonuçlar Şekil 4'te verilmektedir.



a) İTÜ'de yapılan çalışma sonucu [8]



b) Princeton'da yapılan çalışma sonucu [9]

Şekil 4. Farklı HSK'lara ait yüzey gerilimi değerleri

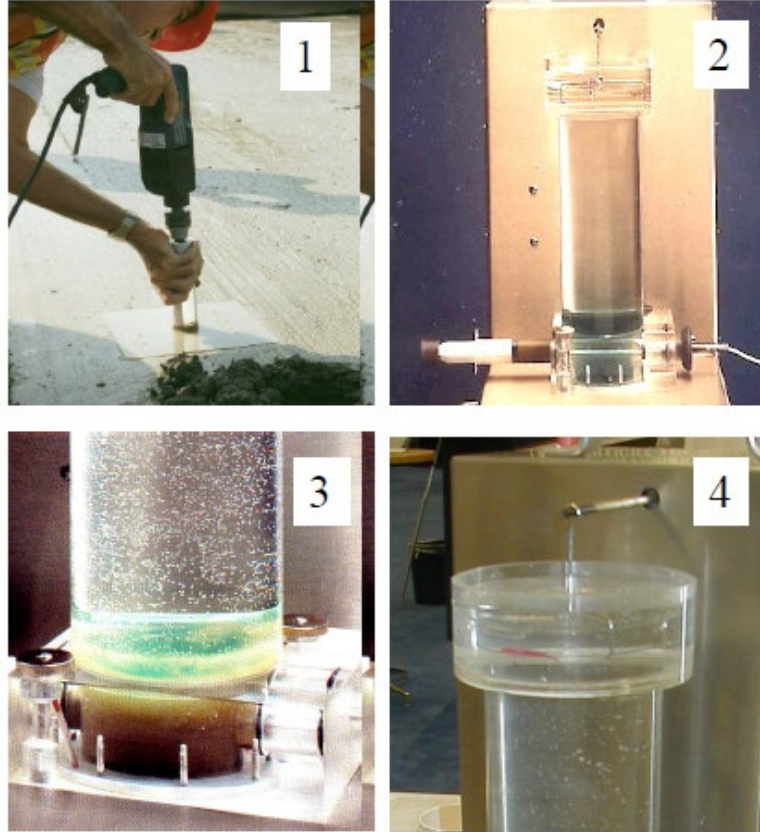
İTÜ'de yapılan çalışmada 6 farklı kimyasal esasa sahip HSK'nın süpernatanta ilavesi sonrasında her bir katkı için farklı kullanım miktarlarında yüzey gerilimi ölçümleri yapılmıştır. Princeton'da yapılan çalışmada ise vinsol reçinesi ve sentetik esaslı katkıları saf su, boşluk suyu solüsyonu, kireçli su ve iyonik solüsyon içerisine farklı miktarlarda eklenmişler ve yüzey gerilimleri ölçülmüştür. Yüzey gerilimi ölçümleri için, İTÜ'de yürütülen çalışmada Du Nouy halkası yöntemi kullanılırken, Princeton Üniversitesi'ndeki çalışmada Damla-Ağırlık (drop-weight) yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla vinsol reçinesi esaslı ve sentetik esaslı katkıların deney sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. Her iki çalışmada da reçine esaslı katkıların yüzey gerilimini düşürmede diğer katkılara kıyasla daha az etkili oldukları görülmektedir. Katkı miktarının daha çok artırılmasıyla deneylerin yürütüldüğü Princeton'daki çalışmada dahi reçine esaslı katkı ile en fazla 40mN/m yüzey gerilimi elde edilmiştir. Oysaki, sentetik esaslı katkı için her iki çalışmada da 0,1 katkı miktarı veya konsantrasyonunda dahi 35 mN/m yüzey gerilimi değeri kolaylıkla elde edilmiştir. Hemen hemen aynı zamanda yayımlanan bu iki çalışmada, kimyasal esasları aynı olan HSK'lar için farklı ölçüm yöntemleri uygulanmasına rağmen çok yakın yüzey gerilimi değerleri elde edildiği görülmüştür.

3. TAZE HAL HAVA BOŞLUK SİSTEMİ ANALİZLERİ

3.1. Analiz Yöntemi

Betonlarda taze hal hava boşluk sistemi analizlerinde Air Void Analyzer (AVA) cihazı kullanılmaktadır. Analiz sonuçları, sertleşmiş beton sonuçları ile yüksek korelasyon vermektedir [12]. Analizler taze betonlardan alınan 20 ml'lik örnekler üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle AVA cihazı ile taze betonun toplam hava miktarını tam olarak belirlenmeyebilmektedir. Diğer hava boşluğu sistemi parametreleri olan aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri ise taze ve sertleşmiş halde elde edilen değerlere çok yakın olarak elde edilmektedir. Numune alınması ve ölçümlere ait şekiller Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Taze betonda hava boşluğu sistemi ölçümleri [13].

1. Taze betondan örnek alınması. Kullanılan matkabın ucunda göz aralıkları 6 mm olan bir kafes bulunmaktadır. Kafes içine dolan betondan şırınga ile 20 ml'lik örnek alınır.

2. Alınan örnekler ölçümün yapılacağı sisteme şırınga ile enjekte edilir. Ölçümlerin yapılacağı plastik boru şartlandırılmış su ve viskozitesi ayarlanmış sudan daha yoğun olan deney sıvısı ile doludur.

3. Enjekte edilen beton, boru tabanında bulunan manyetik karıştırıcı ile 30 saniye süreyle karıştırılır. Karıştırma işlemi esnasında beton içinde bulunan hava kabarcıkları betonu terk eder ve plastik boruda yükselir. Karışımı terk eden hava kabarcıklarının deformasyona uğramaması için deney sıvısı kullanılmaktadır.

4. Hava kabarcıkları boru boyunca Stoke yasasına göre yükselirler. Yükselen hava kabarcıkları borunun tavanında asılı olan terazide suyun yerini alarak ağırlık azalmasına sebep olurlar. Hava boşluğu sistemi analizleri belirli zaman aralıklarında terazideki ağırlık ölçümleri kullanılarak bir bilgisayar yazılımı ile yapılmaktadır. Analizler sonucunda hava boşluğu sistemi parametreleri olan hava miktarı, aralık faktörü ve özgül yüzey değerleri belirlenmektedir.

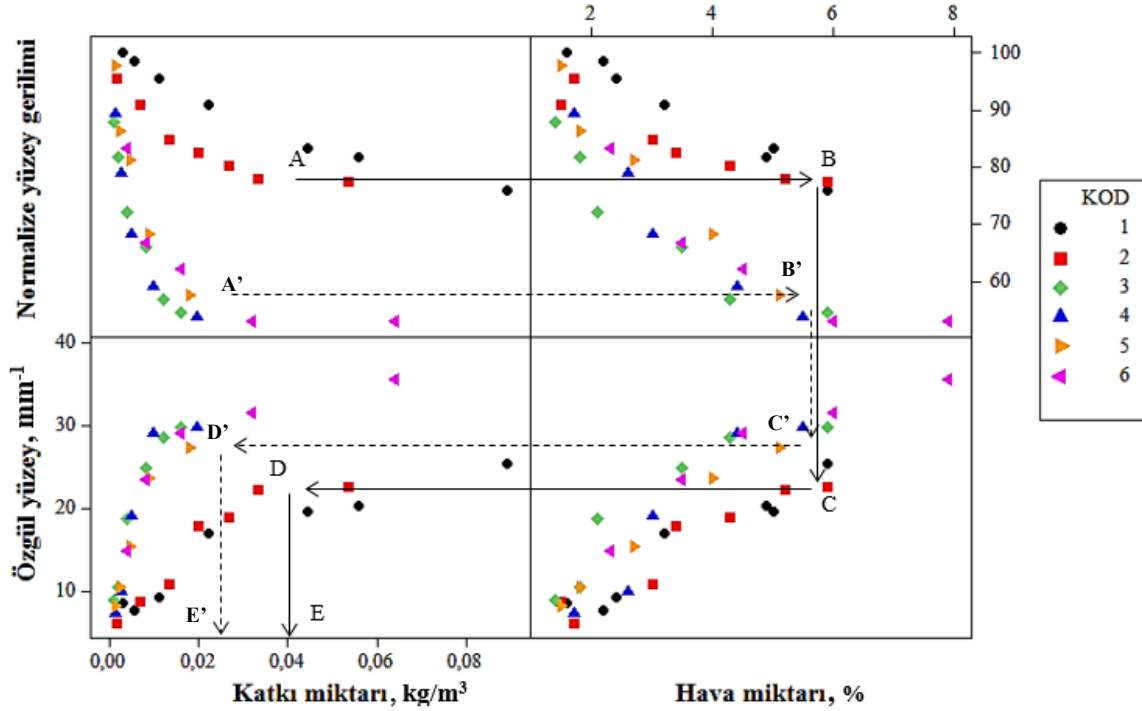
3.2. Harçlar üzerinde yapılan örnek bir uygulama

Genellikle, bir önceki madde de anlatıldığı gibi taze betonlarda uygulanan hava boşluk sistemi analizleri, örneklemenin bir şırınga yardımı ile elde edilen 20 ml'lik bir hacimde yapılması ve 6 mm üzerinde bileşen içermemesinden yola çıkılarak harçlar üzerinde Şahin ve ark. [8] tarafından uygulanmıştır. Standart bir şekilde üretilen harçlardan eşit süreler sonunda şırınga yardımı ile yaklaşık 20 ml kadar taze harçlar alınmış ve harçlar üzerinde analizler yürütülmüştür. Çalışma kapsamında 6 farklı kimyasal esasa sahip HSK ile farklı oranlarda toplam 36 karışım üzerinde (kontrol karışımı hariç) hava boşluğu sistemi analizleri yapılmıştır. Bu katkılar ile yüzey gerilimi analizleri de yapıldığı için çalışma sonucu elde edilen veriler bir sonraki bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

4. HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKI TÜRÜ VE MİKTARININ, YÜZEY GERİLİMİ VE HAVA BOŞLUK SİSTEMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Daha önce 2. Bölümde anlatılan yüzey gerilimi ölçümleri ve 3. Bölümde anlatılan hava boşluk sistemi analizlerini birleştiren bir çalışmada elde edilen sonuçlar bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Şahin ve ark. [8] yüzey gerilimi ölçümleri yaptıkları HSK'larla harçlar üretmişler ve hava boşluğu sistemi analizleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar Şekil 6'da verilmektedir.

Hava sürükleyici katkıların betonlarda kullanılmadan önce oluşturacağı boşluk boyutu ve kullanım miktarı açısından karşılaştırılmalarında ve değerlendirilmelerinde yüzey gerilimi ölçümlerinin kullanılabilirliği grafiklerden (Şekil 6) görülmektedir. Farklı kimyasal esaslara sahip katkılar üzerinde; yüzey gerilimi değerinin katkı miktarının artırılmasıyla daha fazla düşürülemediği noktalardan (A noktası) çıkarılan oklarla %4-6 arasında (donma-çözülme dayanıklılığı için genel olarak önerilen aralık) hava miktarı elde edilebildiği (B noktası), bu noktalardan aşağıya doğru indirilen oklarla hava miktarlarında elde edilen özgül yüzey değerleri (C noktası) ve özgül yüzey - katkı miktarı grafiğinde bu noktadan (D noktası) aşağıya indirilen okların katkı miktarını kestiği noktalarda (E noktası) da kullanılması gereken katkı miktarları gösterilmiştir.



Şekil 6. Yüzey gerilimi ile boşluk sistemi ve katkı miktarı ilişkileri [8]

Şekil 6'da performanları farklı olan 2 HSK'nın karşılaştırılması gösterilmiştir. Yüzey gerilimini düşürmede 5 nolu katkının 2 nolu katkıdan daha etkili olduğu görülmektedir. A ve A' noktaları sırasıyla 2 ve 5 nolu katkılar için yüzey geriliminin katkı miktarının artmasına karşı daha fazla düşmediği limit noktalar olarak ele alınabilir. Her iki katkı ile toplam hava içeriğinin %4-6 aralığında elde edilebildiği görülmüştür (B ve B' noktaları). Bununla birlikte 2 nolu katkı ile daha iri hava boşlukları oluştuğu görülmüştür (C ve C' noktaları). Toplam kullanılan katkı miktarı ise DE ve D'E' çizgileri ile belirlenmiştir. Özet olarak, yüzey gerilimini düşürmede daha az etkili bir HSK'nın yeterli bir toplam hava içeriği sağlayabileceği ancak daha kaba hava boşluğu sistemi oluşturacağı ortaya konmuştur.

Köpük indeksi yöntemi yaygın olarak kullanılmasına karşın değerlendirmenin görsel olması ve operatöre bağlı olması nedeniyle hala standartlaşmamıştır. Bu yazı içeriğinde karşılaştırılan iki makaleden görüleceği üzere farklı yöntemler uygulansa da katkıların yüzey gerilimi üzerine etkileri pratik olarak belirlenebilmektedir. Ancak, yüzey gerilimi yönteminin standartlaşması için daha fazla araştırmaya ve ileri çalışmalara gereksinim vardır. Bununla birlikte, HSK'ların performansını belirlemek için yüzey gerilimi deneyleri faydalı olsa da çimento-akışkanlaştırıcı katkı uyumsuzluğu nedeniyle de beklenmedik sonuçlar elde edilebilir. Uygulamada birçok betonun içeriğinde kullanılan akışkanlaştırıcı katkıların etkilerinin ortaya çıkarılması için, bu yazı içeriğinde sunulan çalışmalarda önerilen prosedürler akışkanlaştırıcı katkı içerecek şekilde düzenlenebilir.

Teşekkür

Yazar, sunulan konu üzerine kendisini yönlendiren ve çalışmalarında cesaretlendiren doktora danışmanları Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir ve Prof. Dr. Yılmaz Akkaya'ya, ve yüzey gerilimi ölçümlerinde verdikleri destekten dolayı Prof. Dr. Feridun Boylu ve Prof. Dr. Mehmet Sabri Çelik'e teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

1. Şahin, Y., “Hava Sürükleyici Katkıların Karakterizasyonu ve Deney Koşullarının Betonun Donma-çözülme Hasarına Etkisi”, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
2. Myers, D., “Surfactant Science and Thecnology”, 3rd edition Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
3. Ansari, F., Zhang, Z., Maher, A., ve Szary, P., “Effects of synthetic air entraining agents on compressive strength of portland cement concrete-mechanism of interaction and remediation strategy” Report no. FHWA-NJ-2002-025, U.S. : Federal Highway Administration, 2002. <http://cait.rutgers.edu/files/FHWA-NJ-2002-025.pdf>
4. Kozikowski, R.L., Vollmer, D.B., Taylor, P.C. ve Gebler, S.H., “Factors affecting the origin of air-void clustering” R&D Serial no. 2789, U.S. : Portland Cement Association, 2005.
5. Camposagrado, G.R., “An investigation on the cause and effect of air-void coalescence in air-entrained concrete mixes” R&D Serial no. 2624, U.S. : Portland Cement Association, 2006.
6. Tanesi, J., ve Meininger, R., “Freeze-thaw resistance of concrete with marginal air content” Report no. HRT-06-117, U.S. : Federal Highway Administration, (2006). <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/06117/06117.pdf>
7. Nagi, M. A., Okamoto, P. A., Kozikowski, R. L., ve Hover, K., “Evaluating air-entraining admixtures for highway concrete” NCHRP Report no. 578, U.S. : National Cooperative Highway Research Program, (2007). http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_578.pdf
8. Şahin, Y., Akkaya, Y., Boylu, F., Taşdemir, M.A., “Characterization of air entraining admixtures in concrete using surface tension measurements”, *Cement and Concrete Composites*, 82, 95-104, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.023>.
9. Tunstall, L.E., Scherer, G.W., Prud'homme, R.K., “Studying AEA interaction in cement systems using tensiometry”, *Cement and Concrete Research*, 92, 29-36, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.005>.
10. Cross, W., Duke, E., Kellar, J., ve Johnston, D., “Investigation of low compressive strengths of concrete paving, precast and structural concrete”, Report no. SD98-03-F, U.S. : Federal Highway Administration - South Dakota Department of Transportation, 2000. http://www.sddot.com/business/research/projects/docs/SD1998_03_FINAL_report.pdf
11. Pedersen, K.H., Andersen, S.I., Jensen, A.D., Dam-Johansen, K., “Replacement of the foam index test with surface tension measurements”, *Cement and concrete research*, 37 (6), 996-1004, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.007>.

12. Magura, D.D., “Air void analyzer evaluation” Report no. FHWA-SA-96-062, U.S. : Federal Highway Administration, 1996.
<http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/013379.pdf>
13. Petersen, C.G., “Air void analyzer for fresh concrete, latest advances”, Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sevilla, Spain : October 13-17, 2009.