



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Atık Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze, Mekanik ve Durabilite Özellikleri

Fresh, Mechanical and Durability Properties of Self-Compacting Mortars Incorporating Waste Glass Powder and Blast Furnace Slag

Hatice Öznur ÖZ¹*

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Niğde, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hatice Öznur ÖZ, oznuroz@ohu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, atık cam tozu (ACT) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kendiliğinden yerleşen harcın (KYH) taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkilerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Mineral katkı malzemesi olarak, atık cam tozu ve yüksek fırın cürufu içeren kendiliğinden yerleşen harçlar 0.40 sabit su/bağlayıcı oranı, 24.5 ± 0.5 cm sabit bir yayılma çapı ve yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı (süper akışkanlaştırıcı) kullanılarak üretilmiştir. İlk aşamada mineral katkı malzemesi içermeyen referans KYH üretimi yapılmıştır. İki gruptan oluşan bu çalışmada, birinci grupta ACT karışımları, ACT'nin çimento yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmasıyla tasarlanmıştır. İkinci grupta ise YFC karışımları, çimentonun %20'si yerine ACT ve YFC kullanılarak üretilmiştir. Böylece ikinci grup karışımları, YFC'nin ACT ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirmesi ile elde edilmiştir. Toplamda 9 farklı karışımın üretimi yapılmıştır. Taze özellikleri belirlemek için mini yayılma çapı ve mini v-hunisi deneyleri yapılmıştır. Mekanik özellikleri tespit etmek için 3., 7., 28. ve 56. günlerde basınç ve eğilme dayanımı ile ultrasonik ses hızı deneyleri uygulanmıştır. Bunlara ek olarak 28. ve 56. günlerde yapılan kılcal su geçirimsizliği, hızlı klor geçirimsizliği deneyleriyle de durabilite özellikleri belirlenmiştir. KYH'de, çimento yerine kullanılan ACT mineralinin KYH'nin taze, mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Cam tozu ve cürufun karşılaştırıldığı ikinci grup karışımlarda ise ACT'nin YFC'ye göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu yerine kullanılan cam tozu miktarının artmasıyla, KYH'lerin taze, mekanik ve durabilite özellikleri iyileşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Cam Tozu, Dayanım, Durabilite, Kendiliğinden Yerleşen Harç, Taze Özellik, Yüksek Fırın Cürufu.

ABSTRACT

In this study, it is aimed the comparison of the effects on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting mortar (SCM) incorporating waste glass powder (WGP) and ground granulated blast furnace slag (BFS). Self-compacting mortars (SCM) containing waste glass powder and blast furnace slag as mineral admixtures were produced by using a constant water/binder ratio of 0.40, a constant slump-flow diameter of 24.5 ± 0.5 cm and a high-range-water reducing-chemical-admixture (super plasticizer). In the first stage, reference SCM was produced without the addition of mineral admixture. In this study consisting of two groups, in the first group, WGP mixtures were designed by using WGP in the ratios 5%, 10%, 15% and 20% instead of cement. However, in the second group, BFS mixtures were produced by using WGP and BFS instead of 20% of cement. Thus, the second group mixtures were obtained by replacing in the ratios by 5%, 10%, 15% and 20% of BFS with WGP. A total of 9 different mixes were manufactured. Mini-slump flow diameter and mini-v funnel tests were performed to determine the fresh properties. In order to obtain the mechanical properties, compressive and flexural strength and ultrasonic pulse velocity tests were measured on 3rd, 7th, 28th and 56th days, respectively. In addition, durability properties were specified via water sorptivity and rapid chlorine permeability tests performed on 28th and 56th days. It has been observed that WGP used in place of cement in SCM improved the fresh, mechanical and durability properties of SCM. In the second group in which the comparison of the properties for the glass powder and slag, it was determined that ACT is more advantageous than YFC. Fresh, mechanical and durability properties of SCMs have improved with increased the amount of glass powder used instead of blast furnace slag.

Keywords: Waste Glass Powder, Strength, Durability, Self-Compacting Mortar, Fresh Property, Blast Furnace Slag.

1. GİRİŞ

Dayanıklı, çok yönlü ve yüksek işlenebilirliğe sahip olan beton, yapı endüstrisi için son derece büyük bir öneme sahiptir. İlk uygulandığı tarihten bu yana kendi ağırlığı altında sıkışabilen, istenilen sık donatılı bölgeye kolayca yerleşebilen ve böylece daha az enerji ve maliyet tüketiminin yanı sıra daha az gürültüyle dökülebilen kendiliğinden yerleşen beton (KYB) bu ihtiyaçları büyük ölçüde karşılamaktadır (Corinaldesi ve Moriconi, 2004; Güneyisi ve ark., 2016; Güneyisi ve Gesoğlu, 2008; Okamura ve Ouchi, 2003).

Düşük su/bağlayıcı oranı ile tasarlanan ve genellikle yüksek bir pasta içeriğine sahip olan KYB (Omrane ve ark., 2017), yüksek oranda çimento içermesinden dolayı önemli bir dezavantaja sahiptir. Çimento üretiminde açığa çıkan CO₂ yayılımı, küresel CO₂ yayılımının yaklaşık olarak %5-8'ini oluşturmaktadır (Aliabdo ve ark., 2016; Pade ve Guimaraes, 2007). Birleşik

Devletlerde, 2007 yılında üretimi yapılan betonun yaklaşık olarak 800 milyon ton ve dünyada üretilen betonun ise tahminen 11 milyar ton olduğu düşünüldüğünde, çimento üretimini azaltacak bir takım çalışmaların yapılması gerektiği açıkça ortadadır (Aliabdo ve ark., 2016; Naik ve Moriconi, 2007). Depolama sorunları olan katı atık maddelerin veya endüstriyel yan ürünlerin KYB üretiminde kullanılması, bu malzemelerin depolama sorunları ortadan kaldırırken, çimento kullanımını azaltarak sürdürülebilir çevreye olumlu katkı sağlayacaktır. Bu nedenle, KYB’de silis dumani, uçucu kül, metakaolin ve doğal puzolan gibi bazı mineral katkı malzemeleri kullanılarak KYB’nin işlenebilirliği, dayanım ve dayanıklılık performansı yaygın olarak araştırılmıştır (Benaicha ve ark., 2015; Dadsetan ve Bai, 2017; Mohamed, 2011). Bunlara ek olarak, Yüksek fırın cürufu (YFC) ve atık cam tozu (ACT) da puzolanik özelliğe sahip beton veya harç üretiminde kullanılabilen mineral katkı malzemelerindendir.

YFC, durabiliteyi geliştirmek ve yüksek dayanım kazandırmakla birlikte çevresel ve ekonomik faydalar sağlamak için beton ya da çimento içerisinde bağlayıcı malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, cürufur, metallerin üretimi ya da saf metallerin artırılması gibi metalürjik işlemler sonucunda elde edilen atıklardır. Yüksek fırının demir cevheri üretimi sonucu oluşan bu mineral, soğutma üzerine katılan metallere yabancı madde çıkarmak için kullanılan kireç temelli 12 inorganik eritkenden elde edilir. Sıvı demirin üstünde yüzen sıvı bir tabaka olarak 1300-1600°C’lik sıcaklıkta oluşan bu mineral, demir cevheri kok ve kireç taşı ile fırına verilir (Erdoğan, 2007; Lee, 1974). Soğutma hızı, YFC mineralinin özelliklerini etkilemektedir. YFC’nin yavaş bir şekilde soğumasına izin verilirse, hemen hemen hiç çimento esaslı malzeme oluşmamak üzere kristalleşir. 800 °C’nin altında yeterince hızlı bir şekilde soğutulması durumunda, gizli hidrolik çimento olan cam oluşur. Bu mineral daha sonra %80’i 45 mikronun altına incek şekilde çok ince bir toz haline getirilir. YFC parçacıkları çoğunlukla kaba, keskin kenarlı şekillere sahiptir (Erdoğan, 2007). Arđalan ve ark. (2017),tamamlayıcı çimento malzemesi olarak kullanılan, uçucu kül ve cürufun KYB’nin yayılma çapını artırdığını, pomza tozunun ise KYB’nin yayılma çapını azalttığını belirtmişlerdir. Vejmelkova ve ark. (2011), KYB’nin taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine metakaolin ve YFC’nin etkilerini incelemiş ve metakaolinin daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Amorf bir yapıya, yüksek silis ($\text{SiO}_2 > \%70$) içeriğine ve yüksek yüzey alanına sahip olan camın geri dönüşümü çevresel bir konudur. Çevrede bulunan camın erimez yapısı ve aşırı geri dönüşüm maliyeti geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Puzolanik özellik gösteren cam tozu, parçacık boyutu 0.075 mm ya da 0.038 mm’den daha az olduğu zaman, alternatif bir çimento tamamlayıcı malzeme olarak, beton ya da harca istenilen dayanım ve dayanıklılığı kazandırmak için kullanılmaktadır. ACT, puzolanik aktivite göstermesi sayesinde çimento ve suyun hidrasyonu sonucunda oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’i, içeriğinde yüksek oranda bulunan SiO_2 ile bağlayarak betona dayanım kazandıran kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadır (Aladdine ve ark., 2009; Chesner ve ark., 1997; Fathi ve ark., 2017; Idir ve ark., 2010; Kamali ve Ghahremaninezhad, 2016; Matte ve ark., 2000; Omran ve ark., 2017; Shao ve ark., 2000; Soliman ve Tagnit-Hamou, 2011; Vijayakumar ve ark., 2013). ACT mineral katkı malzemesi olarak çimento yerine %30 oranına kadar başarılı bir şekilde kullanılmıştır (Idir ve ark., 2009; Shayan, ve Xu, 2006; Schwarz ve ark., 2008; Shi ve ark., 2005; Topçu ve Canbaz, 2004; Tagnit-Hamou ve ark., 2009; Tagnit-Hamou, 2013a; Tagnit Hamou, 2013b; Tagnit-Hamou, 2016; Zidol ve ark., 2012a; Zidol ve ark., 2012b; Zidol ve ark., 2013). Ayrıca bu çalışmalarda, alternatif bir tamamlayıcı çimento malzemesi olarak cam tozunun klor iyonu geçirimsizliğini azaltmak ve işlenebilirliği artırmak dahil yararlı etkileri olduğu gösterilmiştir. Bunların yanı sıra, mineral katkı malzemelerinin işlenebilirliğe etkilerini belirleyebilmek için kendiliğinden yerleşen harç (KYH) üretimi yapılması, KYB’nin özelliklerinin de tespit edilmesinde temel oluşturulabilir (Domone ve Jin, 1999; EFNARC, 2005; Güneyisi ve ark., 2015a). Aliabdo ve ark. (2016), çimentonun yerine %10 cam tozu kullanımının harcın basınç dayanımını yaklaşık olarak %9 oranında artırdığını belirtmişlerdir. Literatür çalışmalarına bakıldığında, yazarın bilgisine göre ACT’nin kendiliğinden yerleşen harçta kullanımı ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada ACT ve YFC’nin, KYH’lerin taze, mekanik ve durabilite özelliklerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak, 550 dozajla, bağlayıcı malzeme olarak sadece çimentonun kullanıldığı 0.40 sabit su/bağlayıcı oranı ile kontrol harcı üretilmiştir. Birinci grup karışımlarda ACT’nin kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılması planlanmıştır. Bu amaçla, ACT karışımları, ACT’nin çimento yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılmasıyla elde edilmiştir. İkinci grupta ise cam tozu ve yüksek fırın cürufu arasındaki performans farklılıklarını görebilmek amacıyla çimentonun %20’si yerine, %5YFC+%15ACT, %10YFC+%10ACT, %15YFC+%5ACT ve %20YFC+%0ACT kullanılmasıyla YFC karışımları üretilmiştir. Üretilen karışımlara, taze özellikleri belirlemek amacıyla mini yayılma çapı, mini v-hunisi deneyleri uygulanmıştır. Basınç, eğilme ve ultrasonik ses hızı deneyleri 3, 7, 28 ve 56. günlerde tespit edilirken kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği deneyleri 28. ve 56. günlerde ölçülmüştür.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi normal portland çimentosu yanı sıra atık cam tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de listelenmiştir. İnce agrega olarak özgül ağırlıkları sırasıyla 2.67 ve 2.63 olan doğal kum ve kırma kum kullanılmıştır. Doğal kumun tane boyutu 0-4 mm arasında iken kırma kumun tane boyutu 0-2 mm arasındadır. KYH’lerin istenilen işlenebilirlik seviyesine ulaşabilmesi için özgül ağırlığı 1.07 olan yüksek oranda su azaltıcı kimyasal bir katkı (polikarboksilik eter tipi süper akışkanlaştırıcı (SA)) kullanılmıştır.

Tablo 1. Çimento, Atık Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	Atık Cam Tozu	Yüksek Fırın Cürufu
CaO	62.58	9.89	40
SiO ₂	20.25	71.79	35
Al ₂ O ₃	5.31	1.04	12
Fe ₂ O ₃	4.04	0.11	1
MgO	2.82	4.10	-
SO ₃	2.73	0.23	9
K ₂ O	0.92	0.20	0.3
Na ₂ O	0.22	12.41	0.4
Kızdırma Kaybı	2.96	-	-
Özgül Ağırlık	3.15	2.60	2.94
İncelik Modülü (m ² /kg)	326	-	425

2.2. Karışımların Hazırlanması

Kontrol harcı ile birlikte toplam 9 farklı karışım, sabit su/bağlayıcı (0.40) oranı ve 550 kg/m³ bağlayıcı içeriğiyle tasarlanmıştır. İki grup karışımın hazırlandığı bu çalışmada, kontrol harcı herhangi bir mineral katkı malzemesi eklenmeksizin sadece çimento kullanılarak üretilmiştir. İlk grup dökümlerinde ACT çimentoyla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. İkinci grupta ise çimentonun %20'si yerine sırasıyla, %5 YFC+%15ACT, %10YFC+%10ACT, %15YFC+%5ACT ve %20YFC+%0ACT kullanılmıştır. Her iki gruba ait karışım oranları Tablo 2'de sunulmuştur. KYH karışımlarının üretiminde aynı üniformalılığı ve homojenliği sağlamak için ASTM C109/C 109M-99 (1999) standardında tanımlanan standart bir mikser kullanılarak üretim prosedürü gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandığında, üretilen karışımların mini-yayıma çapı ve mini v-hunisi akış süreleri belirlendikten sonra, numuneler kalıplara alınmıştır. Farklı oranlarda SA kullanılarak EFNARC'da (2002) mini slump yayılma çapı ve mini v hunisi deneyleri için belirtilen sınırlar elde edilinceye kadar deneme üretimleri yapılmıştır.

Tablo 2. KYH'lerin Karışım Oranları (kg/m³)

Grup	Kod	Su/Bağlayıcı	Çimento	ACT	YFC	Doğal Kum	Kırma Kum	SA
I ve II	KYH	0.4	550	0	0	1112.80	469.76	7.6
I	ACT5	0.4	522.5	27.5	0	1109.34	468.32	7.4
	ACT10	0.4	495	55.0	0	1105.90	466.86	7.2
	ACT15	0.4	467.5	82.5	0	1102.44	465.40	7.0
	ACT20	0.4	440	110.0	0	1099.00	463.94	6.8
	YFC5	0.4	440	82.5	27.5	1100.34	464.50	6.0
II	YFC10	0.4	440	55.0	55.0	1101.68	465.08	6.4
	YFC15	0.4	440	27.5	82.5	1103.02	465.64	6.6
	YFC20	0.4	440	0	110	1104.38	466.22	6.8

2.3. Deney Yöntemleri

Mini yayılma çapı ve mini v-hunisi deneyleri EFNARC komitesi (2002) tarafından belirlenen prosedüre göre yapılmıştır. Mini yayılma deneyinde, KYH karışımları herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmaksızın mini-Abrams konisine doldurulmuş ve koninin kaldırılması sonucunda toplam yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek ortalamaları alınmıştır. EFNARC'a (2002) göre ölçülen bu değerler 24-26 cm arasında olmalıdır. Numunelerin viskozite özelliklerinin belirlendiği mini-v hunisi deneyi, v hunisinin taze betonla doldurulduktan sonra alt taraftaki kapağın açılmasıyla harcın boşalma süresinin ölçülmesi esasına dayanır. Bu sürenin EFNARC'da (2002) 7-11 saniye arasında olması gerektiği belirtilmektedir.

KYH'lerin basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla, ASTM C349-14 (2017) ve ASTM C348-14'e (2017) göre belirlenmiştir. Eğilme deneyi 3., 7., 28. ve 56. günlerde 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Her yaş için 3 adet prizmatik numune kullanılmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Eğilmeyi test etmek için kullanılan harç prizmalarının ayrılan kısımları ASTM C349-14 (2017) test metoduna paralel olarak basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılabilir. Bu nedenle, basınç deneyi, eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizma numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak 3., 7., 28. ve 56. günlerde yapılmıştır. Dolayısıyla her bir test yaşı için 6 parça kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Basınç ve eğilme deneyinden hemen önce ASTM C597-16'ya (2016) uygun olarak yapılan ultrasonik ses hızı (USH) deneyi tahribatsız bir deney yöntemidir. Bu deneye ait görsel Şekil 1'de sunulmuştur. Uygulama açısından çok basit olan bu deney, ultrasonik dalganın numunenin bir ucundan diğer ucuna ilk varış süresini ölçer. USH deneyi, betonun veya harcın göreceli kalitesinin ve bazı kusurlarının (boşluklar, çatlaklar ve onarımlarının etkinliği vb.) değerlendirilmesine olarak sağlamaktadır. USH testleri 4x4x16 cm boyutlarında, 3 prizmatik harç numunesi üzerinde 3., 7., 28. ve 56. günlerde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler prizmanın 16 cm olan uzun kenarında alınmıştır.

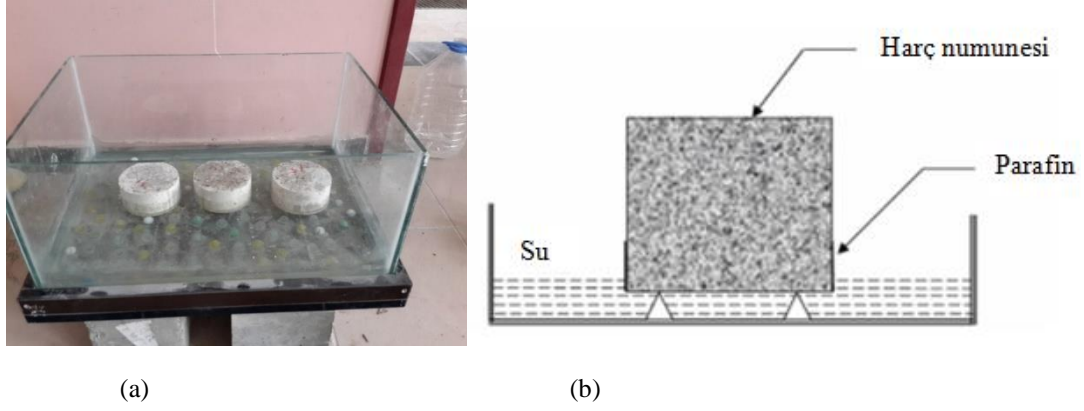


Şekil 1. 16 cm'lik Uzunlukta USH Ölçümü

Kılcal su geçirimsizliği deneyi, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, 100 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda 3 adet numune üzerinde uygulanmıştır. Kılcal su geçirimsizliği deneyine ve deney düzeneğine ait fotoğraf Şekil 2'de gösterilmiştir. Deneyden önce numuneler 24 saat boyunca $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik bir etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numunelerin su emmeye bırakılacak yüzeylerinin yan tarafları su geçirimsizliğini engellemek için silikon (parafin) kullanılarak kaplanmıştır. Deney, çevresi silikon ile kaplanmış deney numuneleri, tabanları ince bir su tabakasıyla temas içinde olacak şekilde küçük bir havuz içerisine yerleştirilmiştir. Kılcal su geçirimsizliği değerleri, suyun yaklaşık olarak 5 mm altında kalan numuneler üzerine ölçülmüştür. İlk olarak, numuneler kuru halde tartılmıştır. Daha sonra su içerisine bırakılan numunelerin ağırlıkları sırasıyla 1., 4., 9., 16., 25., 36., 49. ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra tartılmıştır. Dolayısıyla kılcal su geçirimsizliği, birim kesit alanı başına harcın zamanla emdiği su miktarıyla değerlendirilmiştir. Deney, tüm karışımlarda 28. ve 56. günlerde uygulanmıştır. Deney sonuçları, 3 adet numunenin sonuçlarının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Beton veya harcın elektriksel iletkenliği esasına dayanan hızlı klor geçirimsizliği deneyi, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, kalınlığı 50 mm ve çapı 100 mm olan silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Vakum deney cihazı, hızlı klor geçirimsizliği deney cihazı ve hızlı klor geçirimsizliği deney düzeneğine ait görseller Şekil 3'te verilmiştir. Deney, ASTM C1202 (2012) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre, numuneler 2 saat boyunca vakumda bekletilerek içindeki havanın alınması sonucu suya doymun hale getirilmiştir. Numuneler

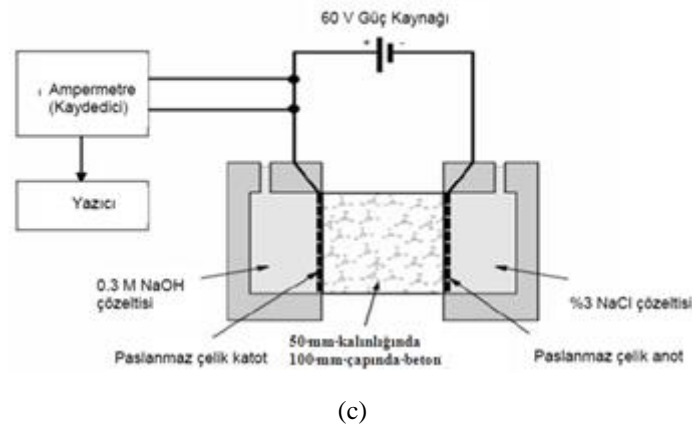
vakumdan çıkarıldıktan sonra bir tarafında 0.3 NaOH ve diğer tarafında %3 NaCl çözeltisi bulunan deney hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Ardından 60 V sabit potansiyel fark uygulanarak harç diskten geçen elektrik akım şiddeti miktarı belli aralıklarla kaydedilmiştir. 6 saat süren deney sonunda, numuneden geçen toplam akım, akım-zaman grafiği altında kalan alan hesaplanarak (Coulomb) belirlenmektedir. Hızlı klor geçirimliliği deneyi 3 silindirik numune üzerinde 28. ve 56. günlerde uygulanmıştır. Sonuçlar bu 3 numuneden çıkan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2. (a) Kılcal Su Geçirimliliği Deneyi ve (b) Kılcal Su Geçirimliliği Deney Düzeniği



(a) (b)



(c)

Şekil 3. (a) Vakum Deney Cihazı, (b) Hızlı Klor Geçirimliliği Deney Cihazı ve (c) Hızlı Klor Geçirimliliği Deney Düzeniği

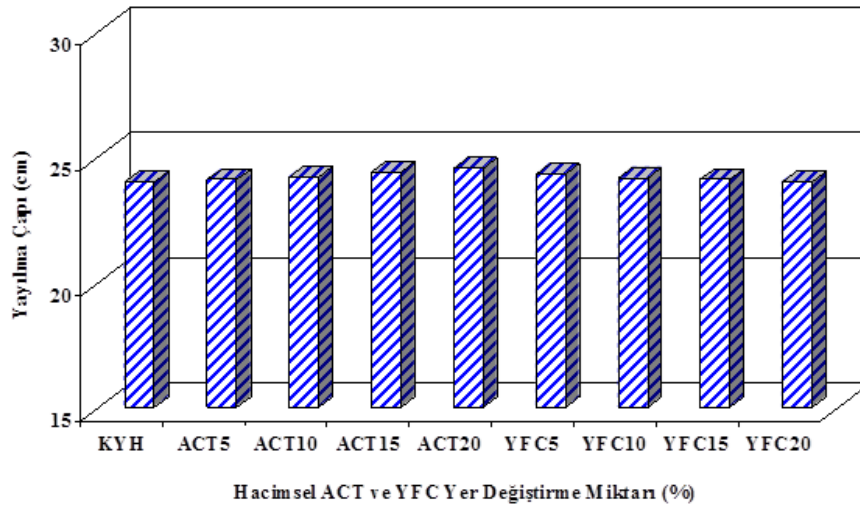
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Özellikler

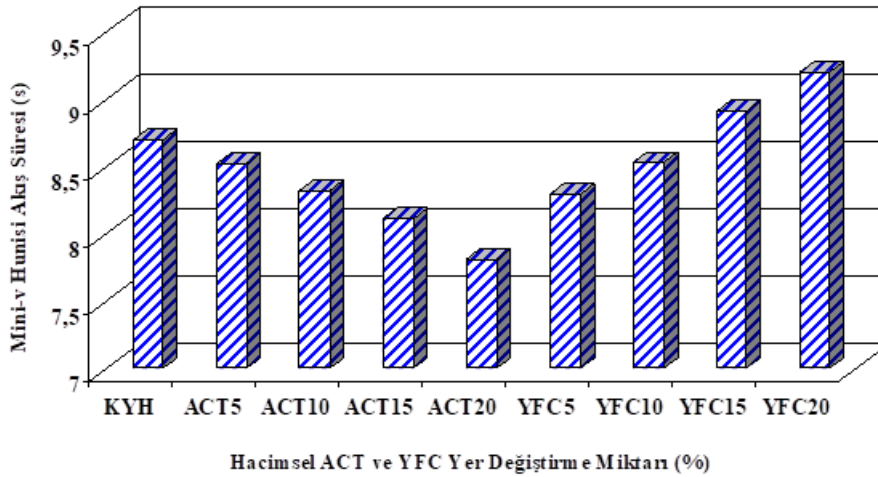
KYH'lerden ölçülen yayılma çapı değerleri ve mini-v hunisi akış süreleri sırasıyla, Şekil 4 ve Şekil 5'de sunulmuştur. Bu çalışmada üretilen KYH karışımlarının tümünde farklı oranlarda SA kullanılarak 24.5±0.5 cm'lik sabit bir yayılma çapı EFNARC (2002) standartlarına (24-27 cm) uygun olarak elde edilmiştir. ACT20 karışımına ait olan bir görsel Şekil 6'da sunulmuştur. Tablo 2'den görüldüğü üzere ACT karışımlarının üretilmesinde kullanılan SA oranı cam tozu yüzdesinin

artmasıyla birlikte azalmaktadır. Örneğin, ACT20 üretmek için kullanılan SA miktarı kontrol harcına (KYH) göre %10.53 azalmıştır. Böylece cam tozunun çimentoya göre daha akışkan bir malzeme olduğu ve KYH'nin akışkanlığını belli miktarda artırdığı belirlenmiştir. %20 oranında çimento tamamlayıcı malzeme (ACT+YFC) kullanılarak üretilen YFC karışımlarında, Tablo 2'den görüldüğü gibi kullanılan YFC yüzdesi arttıkça SA içeriği artmıştır. Ancak, Tablo 2'den görüldüğü üzere, üretilen tüm YFC karışımları sadece çimento kullanılarak üretilen KYH'ye göre daha az SA içeriğiyle tasarlanmış ve aynı yayılma çapı değerine ulaşılmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere ACT, YFC'ye göre daha akışkan bir mineral olmakla birlikte YFC de çimentoya göre daha akışkan bir malzemedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak, KYH içerisinde ACT ve YFC gibi mineral katkı malzemelerinin kullanımının işlenebilirliğe katkı sağlayacağı söylenebilir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi tüm karışımlar EFNARC (2002) tarafından belirlenen sınır değerleri (7-11 s) karşılamaktadır. KYH karışımı 8.70 saniyelik bir akış süresine sahiptir. ACT karışımlarında kullanılan cam tozu yüzdesinin artması sonucu KYH'nin akış süresi azalmıştır. Bu azalış %10.23'e kadar ulaşmıştır. YFC karışımlarında ise kullanılan YFC miktarı arttıkça akış süresi artmıştır. %20 oranında YFC içeren karışımın (%0 ACT) akış süresi, kontrol harcından %5.75 daha fazladır. Ancak YFC20'nin SA içeriği, KYH'nin SA içeriğinin %89.47'sine eşittir. Tüm bu sonuçlardan yararlanarak ACT ve YFC'nin KYH'nin akış süresini iyileştirdiği ve ACT'nin YFC'ye göre daha akışkan olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. KYH Karışımlarının Yayılma Çapları



Şekil 5. KYH Karışımlarının Mini-v Hünisi Akış Süresi Değişimleri



Şekil 6. ACT20 Yayılma Çapı Ölçümü

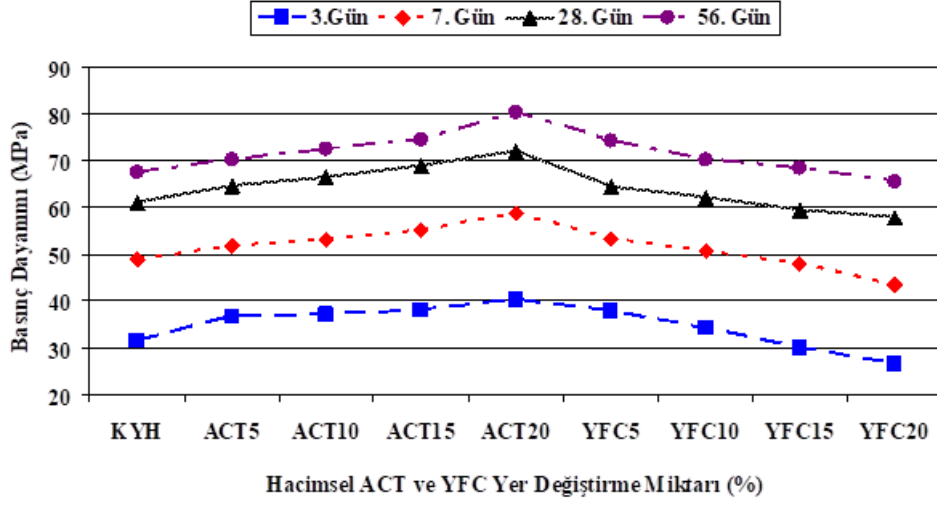
3.2. Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı, Ultrasonik Ses Hızı (USH)

KYH'lerin basınç dayanımı değişimleri ve kontrol harcına göre basınç dayanımındaki yüzde değişim değerleri sırasıyla, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, KYH'nin 3, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla, 31.54 MPa, 48.86 MPa, 61.07 MPa ve 67.59 MPa olarak belirlenmiştir. ACT kullanılarak üretilen birinci grupta ACT miktarı arttıkça basınç dayanımı artmıştır. ACT ve YFC kullanılarak üretilen ikinci grup karışımlarında ise üretilen YFC'lerin tüm test yaşlarındaki basınç dayanımı değerleri %15 YFC+%5ACT içeriğine kadar kontrol harcından fazladır. Ancak YFC içeriği arttıkça ATC20 karışımına göre basınç dayanımları azalmıştır. %15 YFC+%5ACT (56.gün hariç) ve %20 YFC+%0 ACT karışımlarının tüm test yaşlarındaki basınç dayanımı değerleri kontrol harcından düşüktür. Şekil 8'de görüldüğü üzere ACT20 karışımında, 3., 7., 28. ve 56. günlerdeki basınç dayanımı değerleri kontrol harcına göre %27.77, %20.32, %17.95 ve %18.95 oranlarında artmıştır. Bununla birlikte YFC20 karışımlarında aynı günlerdeki basınç dayanımı değerleri kontrol harcına göre %15.85, %11.26, %5.19 ve %3.24 oranlarında azaldığı Şekil 8'den görülmektedir. Ayrıca Şekil 8'de verilen basınç dayanımındaki yüzde artış değerleri dikkate alındığında, ACT'nin erken yaşlarda (3 ve 7. gün, özellikle 3. gün) basınç dayanımına olan etkisi daha geç yaşlarda (28. ve 56. gün) olan etkisinden daha yüksek olduğu görülmektedir. YFC minerali için ise bu durumun tam tersi söz konudur. YFC'nin deney yaşı arttıkça etkisini gösterdiği Şekil 8'den açıkça görülmektedir.

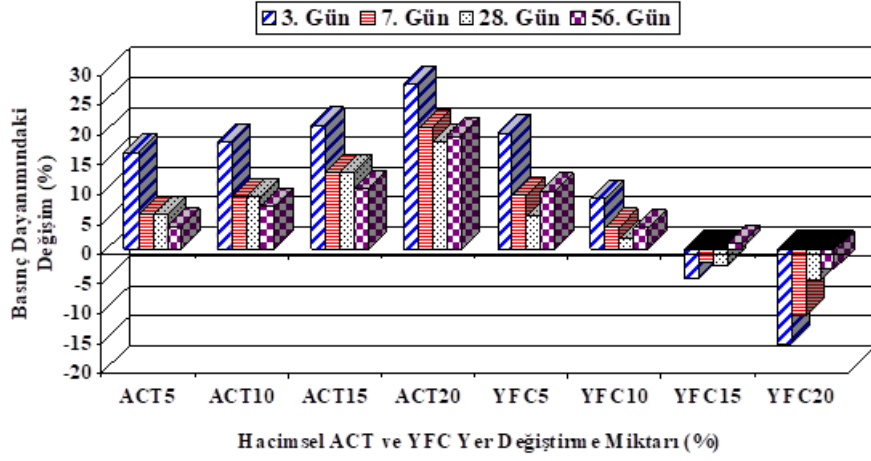
KYH karışımlarının eğilme dayanımlarının grafiksel sunumu Şekil 9'da verilirken, Şekil 10'da ise eğilme dayanımındaki yüzde değişim verileri gösterilmiştir. Karışımların eğilme dayanımı değerleri ilk grup dikkate alınarak incelendiğinde, ACT'nin kullanım yüzdesinin artması eğilme dayanımını tüm test yaşları için artırmıştır. ACT20'nin KYH'ye göre 3., 7., 28. ve 56. günlerdeki eğilme dayanımı değerindeki yüzde artış oranları sırasıyla, %26.67, %25.81, %29.69 ve %30.77 olarak belirlenirken, aynı günlerde YFC20 yüzde azalma oranları sırasıyla %3.33, %3.23, %1.56 ve %3.85 olarak tespit edilmiştir. Ancak ikinci grupta eğilme dayanımı için yüzde değişim değerlerinde meydana gelen azalma sadece YFC20 ile sınırlı iken diğerlerinde kontrol harcına göre artış olmuştur. Bununla birlikte bu artışın YFC içeriği arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, Şekil 10 dikkatle incelendiğinde, ilk grup karışımları için eğilme dayanımındaki yüzde artış miktarı 28 ve 56. günde (özellikle 28. gün) erken yaşlara (3 ve 7. gün) göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca YFC içeren karışımlar için bu değişim YFC içeriği arttıkça erken yaşlarda daha fazla düşüşe sebep olurken, geç yaşlarda bu düşüş değerinin daha az olduğu belirlenmiştir. Yani eğilme dayanımı için cüruf mineralinin etkisini daha da geç yaşlarda göstereceği tahmin edilmektedir.

Bu sonuçlardan açıkça görüldüğü üzere ACT minerali, KYH'lerin basınç ve eğilme dayanımlarını tüm test yaşlarında artırmıştır. YFC minerali ise YFC20 karışımına göre KYH karışımlarının özellikle erken yaşlarda dayanım değerlerini azaltmaktadır. YFC minerali, Portland çimentolarına göre daha yavaş hidrate olduğundan, cüruf beton veya harçların erken yaşlardaki mukavemet gelişim oranları daha düşüktür. Cürufun kullanım oranının yüksek olmasının nedeni (YFC20 gibi) ise, daha düşük mukavemet gelişimine neden olmaktadır. Ancak, uygun bir nem ve sıcaklığın sağlanması ile birlikte cüruf betonların veya harçların, uzun dönem mukavemeti muhtemel olarak daha yüksek olacaktır. Bu daha yüksek nihai dayanım, cürufun kısmen uzun süren mukavemetinden ve daha yavaş hidrasyon reaksiyonunun bir sonucu olarak meydana gelen daha yoğun hidrate olmuş mikro yapıdan ileri gelmektedir (Gündeşli, 2008). Bilindiği gibi puzolanik özellik gösteren malzemeler çimentoyla suyun hidrasyonu sonucunda oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i içeriğindeki aktif silisle bağlayarak harca ek dayanım kazandıran kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jellerini oluşturmaktadırlar (Omran ve ark., 2017; Shayan ve Xu, 2006; Schwarz ve ark., 2008; Topçu ve Canbaz, 2004). Bu olumlu etkiye ek olarak, ACT ve YFC çimento göre daha ince bir tanecik yapısına sahip olmalarından dolayı ara yüzey geçiş bölgesindeki mikroyapı daha yoğun ve daha kompakt bir harcın oluşmasını sağlamıştır. Böylece harcın basınç ve eğilme dayanımı gelişmiştir (Du ve Tan, 2017). Bu gelişim YFC için daha geç yaşlarda olmaktadır (Gündeşli, 2008). Test sonuçlarına göre, ACT'nin basınç ve eğilme dayanımına olan geliştirici etkisi YFC'ye göre daha yüksektir. Bu durumun sebebi SiO_2 içeriğiyle açıklanabilir. Bu çalışmada kullanılan ACT ve YFC'nin SiO_2 içerikleri sırasıyla, %71.79 ve %35'tir. ACT'nin silis içeriğinin daha fazla olması dayanım değerlerinin daha yüksek çıkmasının temel nedenidir. Bu durum ise şu şekilde açıklanabilir: Yüksek derecede silis içeriğine sahip olan cam tozunun çimento ve/veya YFC ile yer

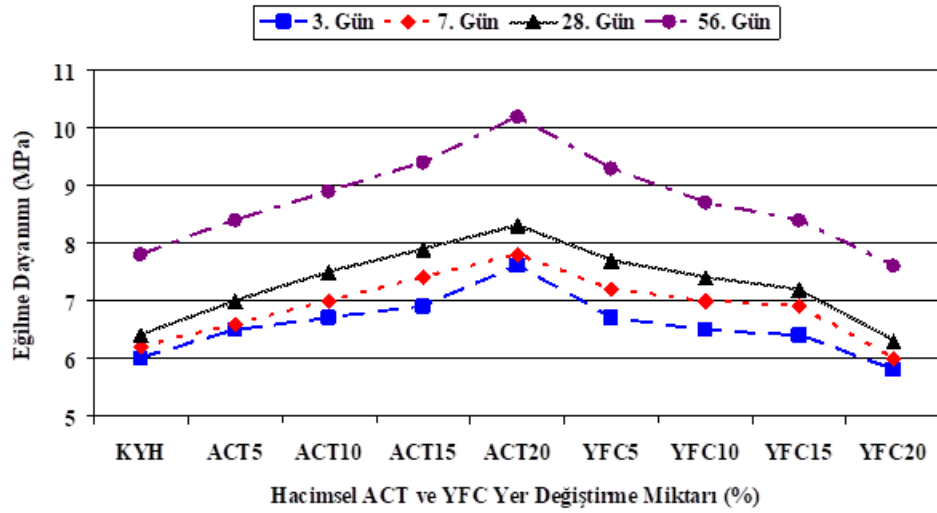
değiştirmesi Ca/Si oranını azaltmış ve daha alkali (bazik) olan C-S-H fazına bağlanmış olup dayanım değerlerindeki gelişim daha yüksek olmuştur (Du ve Tan, 2017; Lothenbach ve ark., 2001).



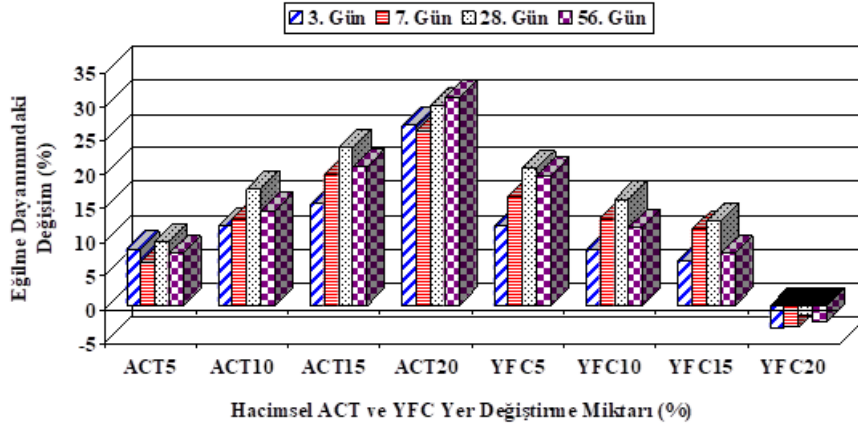
Şekil 7. KYH Karışımlarının Basınç Dayanımı Değişimleri



Şekil 8. KYH Karışımlarının Kontrol Harcına Göre Basınç Dayanımındaki Yüzde Değişim Değerleri



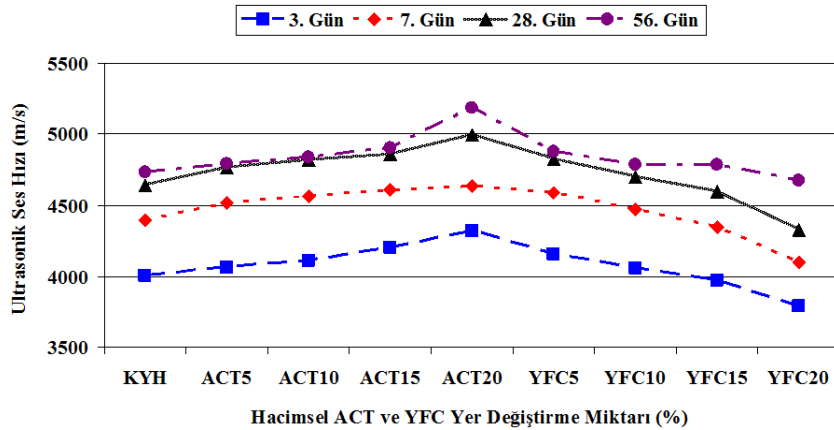
Şekil 9. KYH Karışımlarının Eğilme Dayanımı Değişimleri



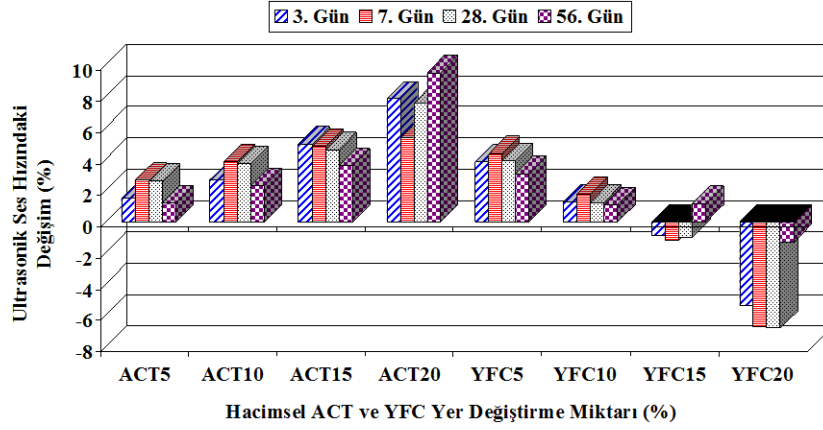
Şekil 10. KYH Karışımlarının Kontrol Harcına Göre Eğilme Dayanımındaki Yüzde Değişim Değerleri

KYH'lerin USH değerleri değişimi m/s cinsinden Şekil 11'de, USH'daki yüzde değişim değerleri ise Şekil 12'de sunulmuştur. KYH'lerin USH değerlerinde gözlemlenen değişim basınç dayanımı ile oldukça benzer bir davranış sergilemiştir. Kontrol karışımın 3, 7, 28 ve 56 günlerdeki USH değerleri sırasıyla, 4004 m/s, 4394 m/s, 4642 m/s ve 4730 m/s'dir. Birinci grup karışımları incelenecek olursa, artan ACT yüzdesi UHT değerini artırmış ve bu artış %20 ACT kullanımında tüm test yaşları için en yüksek değerlerine ulaşmıştır. 3., 7., 28. ve 56. günlerdeki bu değerler için sırasıyla 4320 m/s, 4632 m/s, 4996 m/s ve 5183 m/s olarak tespit edilmiştir. İkinci grup karışımlarında ise YFC mineralinin kullanım oranı arttıkça USH değerleri azalmış, ancak basınç dayanımına paralel olarak YFC karışımları kontrol harçlarından YFC15 (56. gün hariç) ve YFC20 karışımları hariç daha yüksek değerler vermiştir. YFC20 karışımının 3., 7., 28. ve 56. günlerdeki USH değerleri sırasıyla, 3791 m/s, 4099 m/s, 4328 m/s ve 4672 m/s olarak tespit edilmiştir. Malhotra (1976) tarafından yapılan çalışmaya göre USH ölçümünden elde edilen değer 3660-4580 m/s aralığında ise bu sonuç "iyi durum" olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, tüm karışımlar için 3 günlük USH verileri "iyi durum" olarak düşünülebilir. Ayrıca KYH, ACT5 ve ACT10 karışımlarının 7 gün değerleri de iyi durum sınırları arasındadır. USH verilerindeki yüzde değişim oranları incelenecek olursa, ACT mineralinin geliştirici etkisi açıkça görülürken, YFC mineralinin test yaşı arttıkça olumsuz etkisini azalttığı tespit edilmiştir.

ACT'nin, KYH'ye olan iyileştirici etkisi, bu mineralin çimentoya göre daha ince bir parçacık boyutuna sahip olması sayesinde harca kazandırdığı doldurucu etki ile açıklanabilir (Du ve Tan, 2017). YFC mineralinin olumsuz etkisinin ise geç yaşlarda basınç dayanımına bağlı olarak değişmesi beklenmektedir (Gündeşli, 2008). Ayrıca, ACT'nin YFC'ye göre daha iyi performans göstermesi ACT'nin daha fazla silis içeriği sayesinde sertleşmiş harçta oluşan ek C-S-H içeriğiyle açıklanabilir (Du ve Tan, 2017; Lothenbach ve ark., 2001).



Şekil 11. KYH Karışımlarının Ultrasonik Ses Hızı Değişimleri



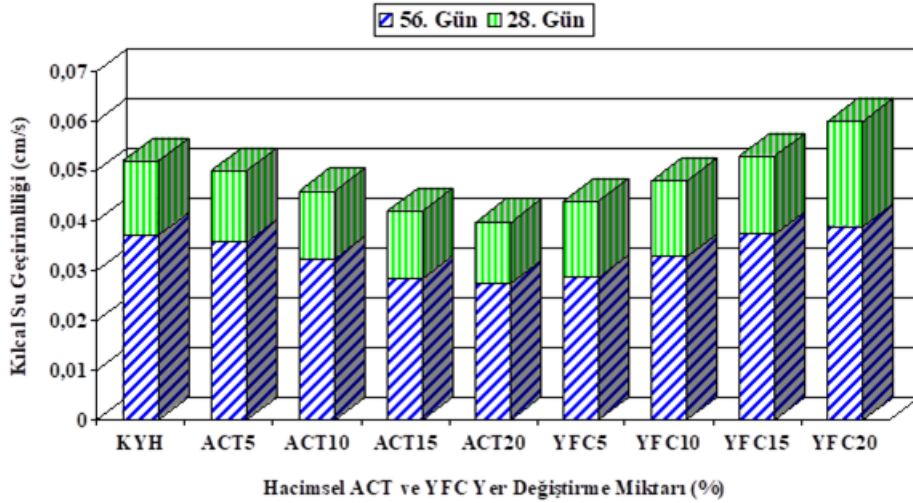
Şekil 12. KYH Karışımlarının Kontrol Harcına Göre Ultrasonik Ses Hızındaki Yüzde Değişim Değerleri

3.1. Kılcal Su Geçirirliği, Hızlı Klor Geçirirliği

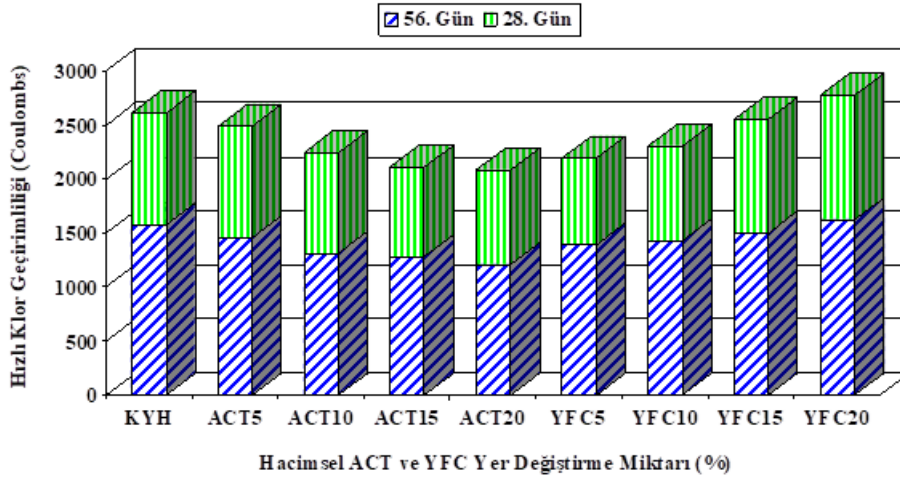
Bilindiği gibi, beton ya da harcın su geçirirliğini etkileyen birçok etken vardır. Kullanılan agreganın tip, boyut ve boşluk yapısı, çimento esaslı mineral katkıları ya da kimyasal katkıların varlığı, üretilen beton ya da harcın karışım oranları, beton ya da harç içerisindeki hava boşluklarının hacmi ve gözenek yapısının tipi bu etkenlerden bazılarıdır (Güneyisi ve ark., 2015b). ACT ve YFC'nin kullanım miktarıyla KYH'lerin kılcal su geçirirliğindeki değişimleri Şekil 13'de grafiksel olarak sunulmuştur. Birinci grup karışımlarına göre artan ACT yüzdesi harçların kılcal su geçirirliği değerlerinin azalmasını sağlamıştır. ACT'nin çimentoyla yer değiştirmesi sonucunda 28. ve 56. gün değerlerinde meydana gelen azalmalar sırasıyla, %3.85-%23.65 ve %,3.51-%25.95 aralığında değişmektedir. Bu sonuçlara göre 56. günde yüzde azalma değerleri 28. güne göre daha yüksek çıkmıştır. Bu karışımlarda, 28. ve 56. gün değerlerinde meydana gelen değişimler, %15.38 (artış)-%15.38 (azalış) ve %4.86 (artış)-%22.70 (azalış) aralığındadır.

KYH üretiminde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan ACT (hem erken hem de geç yaşlarda) ve YFC (geç yaşlarda) harcın klor iyonu geçirirliğine karşı direncini etkileyen önemli faktörler olarak düşünülebilir. ACT ve YFC minerallerinin çimentoyla veya kendi aralarında yer değiştirme seviyelerine göre KYH karışımlarının klor iyonu geçirirliği Coulombs (C) cinsinden Şekil 14'de sunulmuştur. Şekil 14'de görüldüğü gibi, birinci grup karışımlarından 28. ve 56. günlerde elde edilen düşük klor iyonu geçirirliği değeri ACT20 karışımından belirlenmiş olup sırasıyla 2082 ve 1204 olarak ölçülmüştür. 28. günde, ACT5, ACT10, ACT15 ve ACT20 harçlarından elde edilen yüzde iyileşme değerleri kontrol harcına göre %4.71, %14.13, %19.23 ve %20.26 olarak hesaplanmıştır. Bu gelişim, 56 gün için %7.44, %16.59, %18.75 ve %23.46 olarak belirlenmiştir. Yüzde değişimlerden açıkça görüldüğü gibi 56. günde gelişim, 28. güne göre daha fazla olmuştur. İkinci grup karışımlarında, en düşük klor iyonu geçirirliği değerleri 28. ve 56. gün için sırasıyla 2193 C ve 1390 C olarak belirlenmiş olup, bu gruptan elde edilen tüm değerler YFC20 karışımı hariç kontrol harcından daha azdır. 28. gün için YFC5, YFC10 ve YFC15 harçlarından elde edilen yüzde azalmalar %16.01, %11.95 ve %2.26 olarak elde edilirken, 56 günde bu oranlar %11.63, %9.22 ve %4.96 olarak belirlenmiştir. YFC20 için ise bu değerler yüzde artış olarak elde edilmiş olup, 28. ve 56. günde sırasıyla, %6.24 ve %3.12'dir. Dolayısıyla test yaşı arttıkça yüzde azalma değerleri artmakta ve harcın durabilite özellikleri gelişmektedir. Bunlara ek olarak ASTM C 1202 (2012) test standardına göre, klor iyonu geçirirliği, belirlenen Coulombs değeri 0-1000 C aralığında ise çok düşük, 1000-2000 C aralığında ise düşük, 2000-4000 C aralığında ise orta ve 4000 C'den daha büyük ise yüksektir. Bu standarda göre, bütün KYH karışımlarının 28 günlük değerleri orta derecede klor iyonu geçirirliğine, 56 günlük verileri ise düşük klor iyonu geçirirliğine sahiptir. Bu nedenle, bu harçların tamamının yapı endüstrisinde kullanımı çeşitli klor atağı riski olan yapılar için önleyici olarak düşünülebilir.

Tüm bu deney verilerine göre kılcal su geçirirliği ve hızlı klor geçirirliği değerlerine ACT mineralinin olumlu katkıları olduğu kesindir. YFC'nin ise olumlu etkisini basınç dayanımına paralel olarak geç yaşlarda göstermesi tahmin edilmektedir (Gündeşli, 2008). ACT (erken ve geç yaşlarda) ve YFC (geç yaşlarda) minerallerinin bu derecede geliştirici etkileri tanecik yapılarının çimentodan daha ince olması ve bu sayede kazandıkları doldurucu etki ile açıklanabilir. Bu doldurucu etki ile birlikte ara yüzey geçiş bölgesindeki gelişen mikroyapı sayesinde daha kompakt ve daha yoğun bir harç oluşmaktadır (Du ve Tan, 2017). Bu olumlu etkiye ek olarak puzolanik malzemelerin su ve çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ 'i içeriklerindeki SiO_2 ile bağlayarak ek C-S-H jelleri oluşturularak da sağlamaktadır (Hussein ve ark., 2013; Omran ve ark., 2017). Bu nedenle durabilite özelliklerinde gelişim olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber, çimento ve YFC'ye göre silis içeriği bakımından zengin olan ACT minerali, Ca/Si oranını azaltırken daha bazik (alkali) olan C-S-H fazındaki bağ gelişimini artırır (Du ve Tan, 2017; Lothenbach ve ark., 2001). Sonuç olarak, gözenek çözeltisindeki pH değeri azalırken, artan cam tozu ikamesiyle gözeneklilik azalmaktadır.



Şekil 13. KYH Karışımlarının Kılcal Su Geçirirliği Değişimleri



Şekil 14. KYH Karışımlarının Coulombs Cinsinden Hızlı Klor Geçirirliği Değişimleri

4. SONUÇLAR

İki farklı mineralin çimentoyla ve kendi aralarında, KYH'nin taze, mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkilerinin karşılaştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- KYH içerisinde ACT ve YFC gibi mineral katkı malzemelerinin kullanımının mini yayılma çapı ve v-hunisi akış süresi değerlerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Geliştirici etki, bu iki mineral üzerinden değerlendirildiği zaman ise ACT mineralinin YFC'ye oranla daha akışkan olduğu belirlenmiştir.
- ACT ve YFC mineral katkı malzemeleri, KYH karışımlarının basınç ve eğilme dayanımı gibi temel mekanik özelliklerini geliştirmekle beraber USH değerlerini de iyileştirmiştir. Harçların basınç dayanımları 26.54 MPa ile 80.4 MPa arasında değişirken, eğilme dayanımları 5.8 MPa ile 10.2 MPa arasında değişmiştir. KYH'lerin USH değerleri ise 3791 m/s ile 5183 m/s aralığındadır. Genel olarak YFC15 ve sonrası için kontrol harcından daha düşük değerler elde edilmiştir. Puzolanlar çimentoyla göre daha ince bir tanecik yapısına sahip olması etkisiyle çimentoyla suyun hidrasyonu sonucunda oluşan $Ca(OH)_2$ 'i içeriğindeki aktif silisle bağlayarak harca ek dayanım kazandıran C-S-H jellerini oluşturmaktadırlar. Ayrıca, ACT'nin bu temel parametrelere olan olumlu etkisinin YFC'den daha yüksek olması ise bu iki mineralin SiO_2 içeriklerinin farklı olması ile açıklanabilir.
- KYH'lerin kılcal su geçirirliği ve hızlı klor iyonu geçirirliği ACT kullanımı ve kür yaşının artmasıyla birlikte azalmıştır. Kılcal su geçirirliği değerleri 0.06 cm/s ile 0.0274 cm/s aralığındadır. Hızlı klor geçirirliği ise 2774 C ile 1204 C aralığında değişmektedir. Bilindiği gibi harcın durabilite özellikleri boşluk yapısına bağlı olarak gelişir veya kötüleşir. ACT minerallerinin tanecik yapısının çimentodan daha ince olması ve ek dayanım kazandırma özellikleri durabilite özelliklerinin gelişmesinin temel nedenidir. YFC'nin ise olumlu etkisini daha geç yaşlarda göstereceği literatür çalışmalarıyla sabittir. KYH karışımlarının 28 günlük değerleri 2000-4000 C aralığında olduğu için orta derecede klor iyonu geçirirliğine, 56 günlük verileri ise 1000-2000 C aralığında değiştiği için düşük klor

iyonu geçirimsizliğine sahiptir. Bu nedenle, bu harçların tamamının inşaat sektöründe kullanımını çeşitli klor atağı riski olan yapılar için uygun olacağı düşünülmektedir.

- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, yüksek fırın cürufu ve atık cam tozu gibi işlenebilirliği olumlu yönde etkileyen endüstriyel veya katı atık malzemelerin yapı endüstrisinde kendiliğinden yerleşen harç ve/veya beton üretiminde kullanılması yapı malzemesi sektörünün gelişmesine katkı sağlayacaktır. Böylece, çimento tüketiminin azaltılmasıyla sürdürülebilir çevreye de katkı sağlanabilir.

5.KAYNAKLAR

Aladdine, F., Laldji, S., Tagnit-Hamou, A. (2009). Glass Powder As An Alternative Cementitious Material in Concrete, *in: 10th ACI Int. Conf. Recent Advances in Concrete Tech. and Sustainability Issues*, Seville, Espagne, 683–698.

Aliabdo, A.A., Elmoaty, A.E.M.A., Aboshama, A.Y. (2016). Utilization of Waste Glass Powder in the Production of Cement and Concrete, *Construction and Building Material*, 124, 866-877.

Ardalan, R.B., Joshaghani, A., Hooton, R.D. (2017). Workability Retention and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Incorporating Pumice Powder and Silica Fume, *Construction and Building Materials*, 134, 116-122.

ASTM C109/C 109M-99 (1999). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar. *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States.

ASTM C1202 (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States.

ASTM C348-14 (2017). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States.

ASTM C349-14(2017). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States.

ASTM C597-16(2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, Pennsylvania, United States.

Benaicha, M., Roguiez, X., Jalbaud, O., Burtschell, Y., Alaoui A.H. (2015). Influence of Silica Fume And Viscosity Modifying Agent on The Mechanical And Rheological Behaviour of Self Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 84, 103-110.

Chesner, W.H., Collins, R.J., MacKay, M.H. (1997). User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction, *US Department of Transportation, Federal Highway Administration*, Publication No. FHWA-RD-97-148, USA.

Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2004). Durable Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 249–254.

Dadsetan, S., Bai, J. (2017). Mechanical and Microstructural Properties of Self-Compacting Concrete Blended With Metakaolin, Ground Granulated Blast-Furnace Slag And Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 146, 658-667.

Domone PL, Jin J. (1999). Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete, *Proceedings of The First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, 109–120.

Du, H., Tan, K.H. (2017). Properties of High Volume Glass Powder Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 75, 22-29.

EFNARC (2002). Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete, <http://www.efnarc.org>, 29–35.

EFNARC (2005). European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification and Production and Use, *Association House*, UK.

Erdoğan, Ö. (2007). Effects of Mineral Admixtures on the Fresh And Hardened Properties of Self Compacting Concretes: Binary, Ternary and Quaternary Systems, PhD Thesis, *Gaziantep University Graduate School of Natural & Applied Sciences*, Gaziantep, Turkey.

- Fathi, H., Lameie, T., Maleki, M., Yazdani, R. (2017). Simultaneous Effects of Fiber and Glass on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 133, 443-449.
- Gündeşli, U. (2008). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Adana, Türkiye.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M. (2008). Properties of Self-Compacting Mortars with Binary And Ternary Cementitious Blends of Fly Ash And Metakaolin, *Materials and Structures*, 41, 1519-1531.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Altan, İ., Öz, H.Ö. (2015a). Utilization of Cold Bonded Fly Ash Lightweight Fine Aggregates As A Partial Substitution of Natural Fine Aggregate in Self-Compacting Mortars, *Construction and Building Materials*, 74, 9-16.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O.A., Öz, H.Ö. (2015b). Physico-Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Containing Treated Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregates and SiO₂ Nano-Particles, *Construction and Building Materials*, 101, 1142-1153.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Ghanim, H., Ipek, S., Taha I. (2016). Influence of The Artificial Lightweight Aggregate on Fresh Properties And Compressive Strength of The Self-Compacting Mortars, *Construction and Building Materials*, 116, 151-158.
- Hussein, A., Yahia, A., Tagnit-Hamou, A. (2013). Statistical Modeling of the Effect of Glass Powder on Concrete Mechanical And Transport Properties, *ACI Materials Journal*, 226.
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. (2009). Use of Waste Glass in Cement-Based Materials, *Proc. of the International Conference Waste Materials in Construction (Wascon 2009)*, Lyon, France.
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of Waste Glass in Cement-Based Materials, *Déchets Sciences et Techniques*, 9.
- Kamali, M., Ghahremaninezhad, A. (2016). An Investigation into The Hydration And Microstructure of Cement Pastes Modified With Glass Powders, *Construction and Building Materials*, 112, 915-924.
- Matte, V., Moranville, M., Adenot, F., Riche, C., Torrenti, J.M. (2000). Simulated Microstructure and Transport Properties of Ultra-High Performance Cement Based Materials, *Cement and Concrete Research*, 30 (12), 1947-1954.
- Mohamed, H.A. (2011). Effect of Fly Ash And Silica Fume on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete under Different Curing Conditions, *Ain Shams Engineering Journal*, 2, 79-86.
- Lee, A.R. (1974). Blast Furnace and Steel Slag: Production, Properties and Uses. *Edward Arnold Ltd.*, London.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2001). Supplementary Cementitious Materials, *Cement and Concrete Research*, 41, 1244-1256.
- Malhotra V.M. (1976). Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods. *American Concrete Institute*, Monograph No. 9, USA.
- Naik, T.R., Moriconi, G. (2005). Environmental-Friendly Durable Concrete Made with Recycled Materials for Sustainable Concrete Construction, *International Symposium on Sustainable Development of Cement, Concrete and Concrete Structures*, Toronto, Ontario, October, 5-7.
- Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete (Invited Paper), *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 5-15.
- Omran, A.F., D.-Morin, E., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A.. (2017). Long-Term Performance of Glass-Powder Concrete in Large Scale Field Applications, *Construction and Building Materials*, 135, 43-58.
- Omrane, M., Kenai S., Kadri, E-H., Ait-Mokhtar, A. (2017). Performance And Durability of Self Compacting Concrete Using Recycled Concrete Aggregates and Natural Pozzolan, *Journal of Cleaner Production*, 165, 415-430.
- Pade, C., Guimaraes, M. (2007). The CO₂ Uptake of Concrete in A 100 Year Perspective, *Cement and Concrete Research*, 37 (9), 1348-1356.
- Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N. (2008). Influence of A Fine Glass Powder on the Durability Characteristics of Concrete and Its Comparison to Fly Ash, *Cement and Concrete Composites*, 30 (6), 486-496.

- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D. (2000). Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass, *Cement and Concrete Research*, 30 (1), 91–100.
- Shayan, A., Xu, A. (2006). Performance of Glass Powder as A Pozzolanic Material: A Field Trial on Concrete Slabs, *Cement and Concrete Research*, 36 (3), 457–468.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., Wang, H. (2005). Characteristics and Pozzolanic Reactivity of Glass Powders, *Cement and Concrete Research*, 35 (5), 987–993.
- Soliman, N.A., Tagnit-Hamou, A. (2016). Development of Ultra-High-Performance Concrete Using Glass Powder – Towards Ecofriendly Concrete, *Construction and Building Materials*, 125, 600 – 612.
- Tagnit-Hamou, A., Saeed, H., Idir, R., Harbec, D. (2009). Hydration of Glass Powder As a Cementitious Material, *International Summit on Cement Hydration Kinetics*, University Laval, Canada.
- Tagnit-Hamou, A. (2013a). Alternative Cementitious Materials-Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability, *International Congress on Materials & Structural Stability (CMSS)*, Rabat in Maroc.
- Tagnit-Hamou, A. (2013b). Alternative Cementitious Materials for Sustainable Concrete Production in Africa, *Proc. International Conference Advanced Cement Concrete Technology in Africa*, Johannesburg, South Africa.
- Tagnit-Hamou, A. (2016). Alternative Supplementary Cementitious Materials for Advances Concrete, *International Conference on Advanced in Cement and Concrete Technology*, Keynote Speaker, Africa.
- Topçu, I.B., Canbaz, M. (2004). Properties of Concrete Containing Waste Glass, *Cement and Concrete Research*, 34 (2), 267–274.
- Vejmelkova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Skalinski, B., Cerny, R. (2011). Properties of Self-Compacting Concrete Mixtures Containing Metakaolin and Blast Furnace Slag, *Construction and Building Materials*, 25, 1325-1331.
- Vijayakumar, G., Vishaliny, H., Govindarajulu, D. (2013). Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2), 153-157.
- Zidol, A., Tohoue-Tognonvi, M., Tagnit-Hamou, A. (2012a). Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability, *1st International Conference on Concrete Sustainability (ICCS13)*, Ref # 0229.
- Zidol, A., Pavoine, A., Tagnit-Hamou, A. (2012b) Effect of Glass Powder on Concrete Durability, in: *International Congress on Durability of Concrete, Trondheim in Norvège*, ICDC2012-D-11-00153.
- Zidol, A., Tohoue-Tognonvi, M., Tagnit-Hamou, A. (2013). Advances in Durable Concrete Materials Applied to The African Context, *Proceedings International Conference Advanced Cement and Concrete Technology*, in Africa, Johannesburg, South Africa.