



DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

Hatice Öznur ÖZ^{1,*}, Hasan Erhan YÜCEL², Muhammet GÜNEŞ³, Beytullah MALKOÇ⁴

^{1,2,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

⁴ Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Aksaray İl Müdürlüğü, 68000, Aksaray, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma kapsamında Finlandiya'dan temin edilen doğal wollastonitin, yüksek performanslı harcın (YPH) dayanım ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. YPH üretim aşamasında su/bağlayıcı oranı sabit tutularak, wollastonit minerali %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında karışıma eklenmiştir. Ayrıca yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi (SA) vasıtasıyla karışımın işlenebilirliği sağlanmıştır. Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı testleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılırken, kılcal su geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneyleri 28. ve 90. günde uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre, %3 wollastonit içeren karışımda tüm deneyler için performansta iyileşme gözlenmiştir. %6 wollastonit içeriğine sahip karışımda ise kontrol harcına oranla daha iyi sonuçlar elde edilirken, %3 wollastonit içeren karışıma göre performansta azalmalar gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Basınç, Durabilite, Eğilme, Gaz geçirimsizliği, UTH, Wollastonit, Yüksek performanslı harç

THE EFFECTS ON HIGH PERFORMANCE MORTARS OF NATURAL WOLLASTONITE

ABSTRACT

In this study, the effects of natural wollastonite obtained from Finland on strength and durability properties of HPM of wollastonite were investigated. In the production of HPM, wollastonite mineral was added to the mixture at 3%, 6%, 9%, 12% and 15% by keeping the water/binder ratio constant. In addition, the workability of the mixture was achieved by means of a high range water reducing admixture (SP). Compressive, flexural and ultrasonic pulse velocity tests were conducted at 3, 7, 28 and 90 days while sorptivity and gas permeability tests were applied at 28 and 90 days. According to the obtained results of these tests, it was observed that the mixtures containing 3% wollastonite had the recuperation in performance for all experiments. Compared to the control mortar, the mixture containing 6% wollastonite indicated the better results whereas the reduction in performance was observed in the comparison the mixture containing 3% wollastonite.

Keywords: Compressive, Durability, Flexural, Gas permeability; UPV; Wollastonite; High performance mortar

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı beton (YPB), yüksek dayanım ve durabilite özelliklerinin istendiği yapılarda yaygın bir şekilde kullanılan yapı malzemesidir. YPB, düşük su/bağlayıcı oranının yanı sıra çimento pastasının mikroyapıdaki porozitesini azaltmak için silis dumani, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerle de tasarlanabilir [1], [2]. Sadece puzolanik karakteristikli malzemeler değil aynı zamanda inert malzemeler de çimento esaslı kompozitlerin dayanım özelliklerini ve servis ömrünü geliştirebilmektedir [3].

Çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirebilen en önemli inert malzemelerden biri de wollastonittir [3]. Özel bir mikroskobik görünüme sahip olan wollastonit minerali 3:1 ile 20:1 boy:çap aralığında değişen iğnemi parçacık yapısıyla dikkat çekmektedir [4]. Bu iğnemselliği sayesinde seramik, plastik, metalurji ve diğer sanayilerde önemli bir kullanım alanı bulan wollastonit minerali, çimento esaslı kompozitlerin tasarımında özellikle çimento yerine kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [4], [5]. Örneğin; Mathur vd. [6], wollastonit minerali içeren beton üretiminde mukavemet özelliklerinin artırılmasının yanı sıra kuruma büzülmesinin, su emiliminin, aşınma direncinin, donma çözülme ve sülfata karşı dayanıklılığın iyileştiğini rapor etmişlerdir. Kalla vd. [7], betonun basınç ve eğilme dayanımlarının, wollastonitin iğnemi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oznuroz@ohu.edu.tr

Geliş / Received: 22.04.2020 Kabul / Accepted: 18.06.2020 doi: 10.28948/ngmuh.725269

H.Ö. Öz, H. Yücel, M. Güneş, B. Malkoç

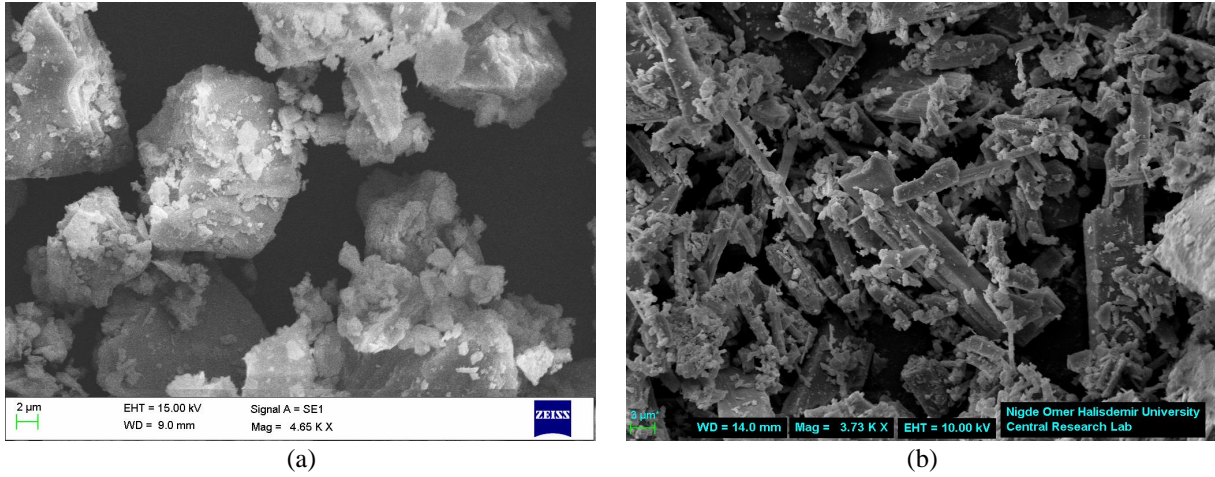
morfolojisi (lifli doğası) ve 200 GPa'a kadar yüksek elastisite modülü sayesinde 90. günde %15 oranında vollastonit kullanımıyla, yaklaşık %12 arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, vollastonitin yüksek boy:çap oranına sahip olması ile mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğinin artırarak ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımını daha yüksek seviyelere çıkardığı ve kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir [8]. Bu nedenle, çimento esaslı kompozitlerde kullanılan vollastonitin iğnemsî yapısının boy:çap oranının betonun/harcın dayanım ve durabilite karakteristikleri üzerinde belirleyici bir etken olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada kullanılan doğal vollastonit Finlandiya'dan temin edilmiş olup, yüksek performanslı harç (YPH) içerisinde değişen oranlarda kullanılmış ve YPH üzerindeki etkileri hem mekanik hem de durabilite performansı açısından değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzemeler

YPH karışımlarının üretiminde, CEM I 42,5 R tipi normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun yerine belirli oranlarda kullanılan doğal vollastonit ise Finlandiya'dan temin edilmiştir. Çimento ve vollastonitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de, bu malzemelerin SEM görüntüleri ve tane boyutu dağılımları ise sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur. Ayrıca vollastonitin boy:çap oranını gösteren SEM görüntüsü ve vollastonit olduğunu kanıtlayan XRD analizi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Vollastonitin boy:çap oranı yaklaşık olarak 11:1 (Pa 1/Pa 2 (69.28µm/6.398µm)) olarak belirlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiği zaman, 20:1 boy:çap oranı yüksek iğnemsellik olarak kabul edilmektedir [3]. Bu bilgiye göre 11:1 boy:çap oranına sahip Finlandiya vollastonitin iğnemselliği orta olarak değerlendirilmiştir. Özgül ağırlığı 1,07 olan polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı bir süper akışkanlaştırıcı (SA) işlenebilirliği sağlamak amacıyla tüm karışımlarda kullanılmıştır. Karışımlarda 0-0,4 mm, 0,6-1,2 mm ve 1,2-2,5 mm olmak üzere 3 farklı tane boyutuna sahip olan ve sırasıyla, ince orta ve iri olarak isimlendirilen kuvars kumları kullanılmıştır. Bu agregaların özgül ağırlıkları aynı olup, 2,65'tir.

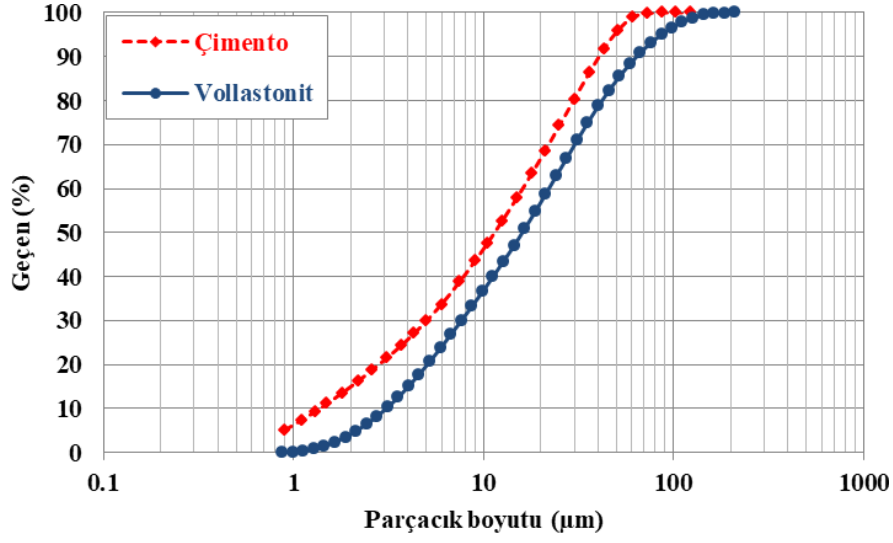


Şekil 1. (a) Çimentonun SEM görünümü, (b) Finlandiya Vullastonitinin SEM görünümü

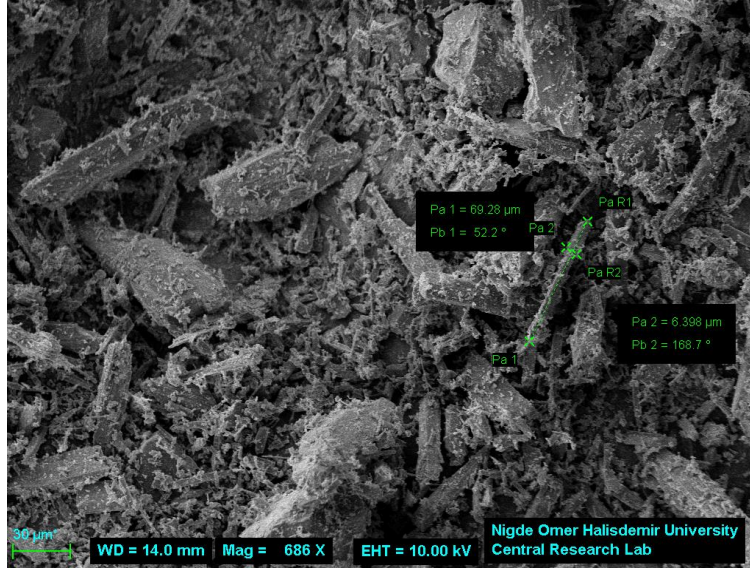
2.3. YPH Karışım Oranları

Bu çalışmada, su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak sabit tutulan 6 farklı YPH karışımı üretilmiştir. Bu YPH'lere ait karışım oranları Tablo 2'de gösterilmiştir. Karışımlardaki toplam bağlayıcı içeriği (çimento+vullastonit) 550 kg/m³ olarak belirlenmiştir. SA, tüm karışımlarda aynı oranda kullanılmıştır. YPH'ler, ASTM C305 [9] standardına uygun olarak üretilmiştir. İlk olarak kontrol karışımı (V0), hiç vollastonit eklenmeksizin üretilmiştir. Diğer karışımlarda, vollastonit, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Buna bağlı olarak V3, V6, V9, V12 ve V15 olarak isimlendirilen YPH karışımları elde edilmiştir.

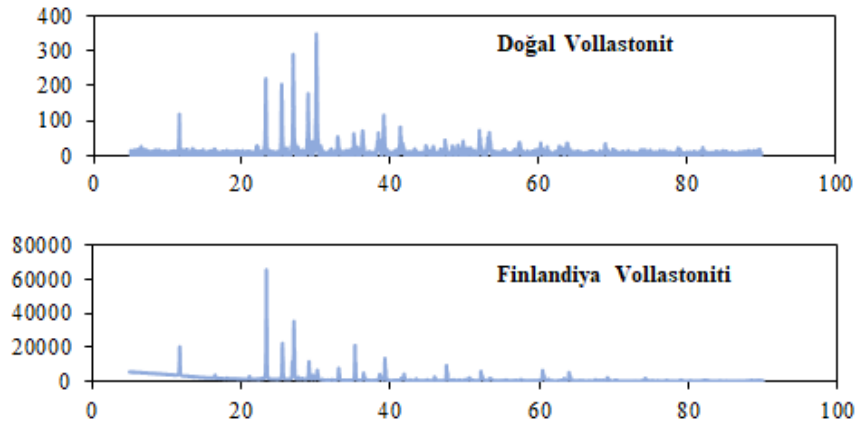
DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ



Şekil 2. Çimento ve doğal vollastonitin tane boyut dağılımları



Şekil 3. Finlandiya Vollastonitinin boy:çap oranının ölçülmesi



Şekil 4. Finlandiya Vollastoniti ve doğal vollastonitin XRD analizleri

Tablo 1. Çimento ve vollastonitin kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşenler (%)	Çimento	Vollastonit
CaO	62,58	45,69
SiO ₂	20,25	52,61
Al ₂ O ₃	5,31	0,43
Fe ₂ O ₃	4,04	0,18
MgO	2,82	0,27
SO ₃	2,73	-
K ₂ O	0,92	0,09
Na ₂ O	0,22	0,14
Mn ₃ O ₄	-	0,01
TiO ₂	-	0,13
Fiziksel Özellikler	Çimento	Vollastonit
Kızdırma Kaybı	2,96	0,50
Özgül Ağırlığı	3,15	2,82
İncelik Modülü (m ² /kg)	326	-

Tablo 2. YPH karışım oranları (1 kg/m³)

Kod	S/B	Su	Çimento	Vollastonit	İnce (0-0,4)	Orta (0,6-1,2)	İri (1,2-2,5)	SA
V0	0,35	192,5	550,0	-	748,5	582,2	332,7	12,5
V3	0,35	192,5	533,5	16,5	747,8	581,6	332,4	12,5
V6	0,35	192,5	517,0	33,0	747,1	581,1	332,0	12,5
V9	0,35	192,5	500,5	49,5	746,4	580,5	331,7	12,5
V12	0,35	192,5	484,0	66,0	745,7	580,0	331,4	12,5
V15	0,35	192,5	467,5	82,5	744,9	579,4	331,1	12,5

2.4. Deneysel Çalışmalar

2.4.1. Taze ve mekanik testler

YPH'lerin taze özellikleri slump deneyi ile ASTM C1437'ye [10] göre belirlenmiştir. Deney esnasında, akış kalıbının yaklaşık yarısı dolacak şekilde harç tabakası kesik koniye konmuş ve 20 defa şişlenmiştir. Daha sonra koninin geri kalan kısmı da harçla doldurularak birinci tabakaya uygulanan işlemin aynısı ikinci tabakaya da uygulanmıştır. Harcın fazlası mala yardımıyla alınarak koni harç kalıbından çıkarıldığı anda kronometre çalıştırılmış, yayılma tablasının kolu yardımıyla yayılma tablası, 15 saniyede 25 defa düşürülmüştür. Son olarak, kumpas yardımıyla harcın yayılma çapı tespit edilmiştir.

YPH'lerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyleri sırasıyla, ASTM C349 [11], ASTM C348 [12] ve ASTM C597'ye [13] göre belirlenmiştir. Eğilme deneyi her test yaşı için 3 adet 40x40x160 mm³ boyutlarında prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Basınç deneyi ise eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki prizmatik numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak her test yaşı için 6 numune üzerinde yapılmıştır. Tahribatsız bir test metodu olan UTH testi ise eğilme deneyinden hemen önce eğilme testinde kullanılacak olan 40x40x160 mm³ boyutlarındaki numunelerin 160 mm uzunluğundaki kısmına uygulanmıştır. Bu 3 test de YPH numunelerine 3., 7., 28. ve 90. günlerde uygulanmış olup, deney sonuçları ölçülen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

2.4.2. Durabilite testleri

Kılcal su geçirimsizliği deneyi, 50 mm kalınlığında ve yarıçapında 3 adet numune kullanılarak yapılmıştır. Bu deneye ait görseller Şekil 5'te verilmiştir. 24 saat süresince, 100±5 °C'lik bir etüvde kurutulan numunelerin su emmeye bırakılacak yüzeylerinin çevresi su geçirimsizliğini engellemek için silikon ile kaplanmıştır. İlk ağırlıkları tartılan numuneler, su seviyesi ayarlanan havuz içerisine konulmuş ve deney başlamıştır. Su içerisine bırakılan numunelerin ağırlıkları sırasıyla, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra ölçülmüştür. Dolayısıyla kılcal su

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

geçirimsizliği, birim kesit alanı başına YPH'lerin zamanla emdiği su miktarıyla Denklem (1) yardımıyla değerlendirilmiştir. Deney tüm karışımlara 28. ve 90. günde uygulanmış ve sonuçlar ortalama alınarak belirlenmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Burada; k: kapilarite katsayısı (mm/dak^{0.5}), A: su ile temas eden alan (mm²), t: geçen zaman (dak), Q: Emilen su miktarı (mm³). Kapilarite katsayısı, en küçük kareler metodu kullanılarak Q/A arasındaki lineer ilişkinin eğiminden elde edilmiştir.

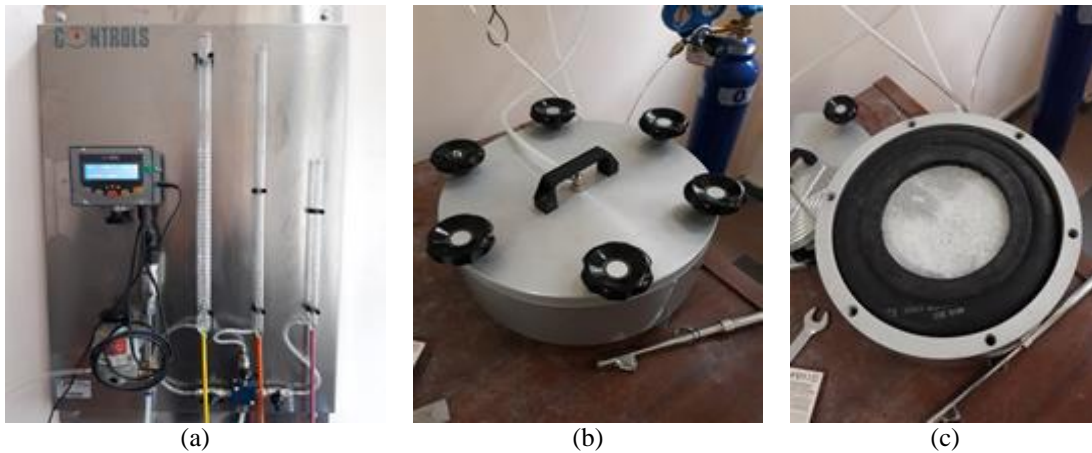


Şekil 5. Kılcal su geçirimsizliği testi

YPH'lerin gaz geçirimsizliği, RILEM tarafından önerilen CEMBUREAU'ya [14] göre, 150 mm çapında ve 50 mm kalınlığındaki disk numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Gaz geçirimsizliği deneyine ait görseller Şekil 6'da gösterilmiştir. Test yaşı geldiğinde 24 saat boyunca 50±5 °C sıcaklıkta kurutulan YPH numuneleri daha sonra üzeri örtülü bir kap içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Giriş gaz basınçları 150, 250 ve 300 kPa olarak uygulanmıştır. Gaz geçirimsizliği katsayıları kararlı hal koşullarında küçük kılcal boşluklarla gözenekli bir ortam yoluyla sıkıştırılabilir bir akışkanın laminer akışı için Hagen-Poiseuille ilişkisi kullanılarak her seviye için hesaplanmıştır. Gaz geçirimsizliği katsayısı RILEM tarafından önerilen bu katsayıların ortalaması alınarak tespit edilmiştir [14]. Gaz geçirimsizliği katsayısı "Ka", Darcy'nin denklemi (Denklem (2)) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K_a = \frac{2P_2QL\mu}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

Ka; gaz geçirimsizliği katsayısı (m²), P₁; giriş gaz basıncı (N/m²), P₂; çıkış gaz basıncı (N/m²), A; numunenin kesit alanı (m²), L; numunenin yüksekliği (m), μ; oksijenin viskozitesi (2,02x10⁻⁵ Ns/m²) ve Q; hacim akış oranıdır.

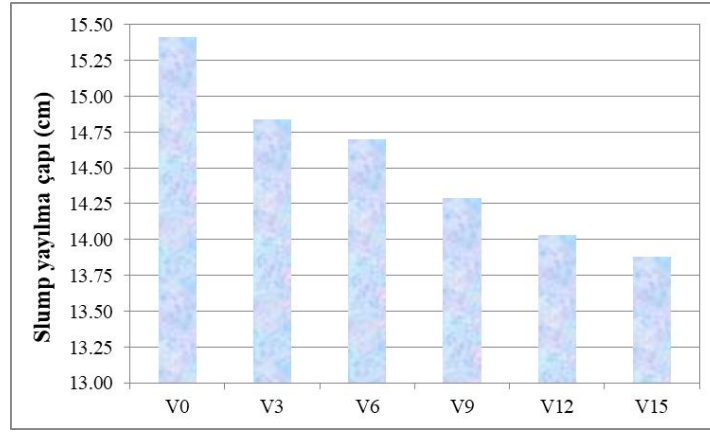


Şekil 6. (a) Dijital basınç ölçer, (b) geçirgenlik hücresi, (c) numunenin hücreye yerleştirilmesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yayılma Çapı

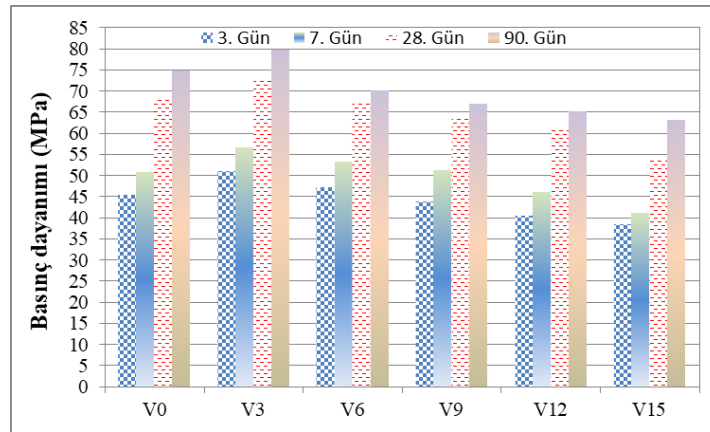
YPH karışımlarının slump yayılma çapı Şekil 7’de grafiksel olarak sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere vollastonit kullanım oranı arttıkça, YPH’lerin işlenebilirliği azalmıştır. V3, V6, V9, V12 ve V15 karışımlarının yayılma çapları kontrol harcına göre sırasıyla, %3,7, %4,6, %7,3, %9,0 ve %9,9 oranlarında azalmıştır. Benzer şekilde Zareci vd. [15] %20 vollastonit içeren betonun slump değeri aynı SA içeriği için kontrol betonuna göre %15’e kadar azaldığını göstermiştir. Vollastonitin işlenebilirliğe olan olumsuz etkisi, iğnemsiz parçacık yapısının (Şekil 1, Şekil 3) sebep olduğu kenetlenme ile açıklanabilir [16].



Şekil 7. YPH karışımlarının slump yayılma çapları

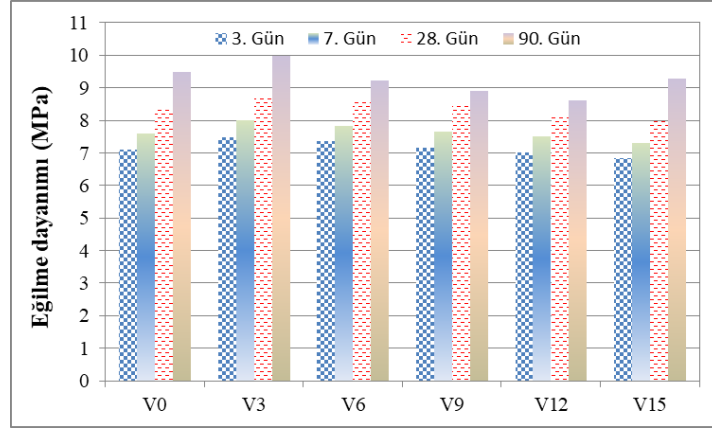
3.2. Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Ultrasonik Titreşim Hızı

YPH’lerin 3., 7., 28. ve 90. gündeki basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UTH değerleri sırasıyla, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere her 3 test yaşı için de %3 vollastonit kullanımı YPH’lerin mekanik performansını artırmıştır. V3 karışımının 3., 7., 28. ve 90. gündeki basınç dayanımları V0 karışımına göre sırasıyla, %12.0, %11.5, %7.6 ve %6.6 oranlarında artmıştır. Aynı kıyaslama eğilme dayanımı ve UTH için yapıldığında sırasıyla, %5.4, %5.5, %4.9, %5.3 ve %7.2, %4.3, %2.9, %0.3 olarak hesaplanmıştır. %3 vollastonit içeriğinde oluşan bu gelişim, vollastonit mineralinin iğnemsiz parçacık yapısı (Şekil 1-Şekil 3) ve yüksek elastisite modülü (300-530 GPa) ile açıklanabilir [4], [6]. %6 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise YPH karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı dört test yaşı içinde artan oranda azalmıştır. Bu durum vollastonitin %6 ve daha fazla oranda kullanılmasının mikroyapıyı bozması şeklinde düşünülmektedir [5]. Ayrıca, Finlandiya Vollastonitinin boy:çap oranı ile tanımlanan iğnemselliğinin (11:1) çok yüksek olmaması ve Şekil 1-3’ten görüldüğü üzere iğnemsiz yapının tüm kütleyle hakim olmamasının da bu sonucu etkileyen temel etkenlerden olduğu değerlendirilmektedir [17].

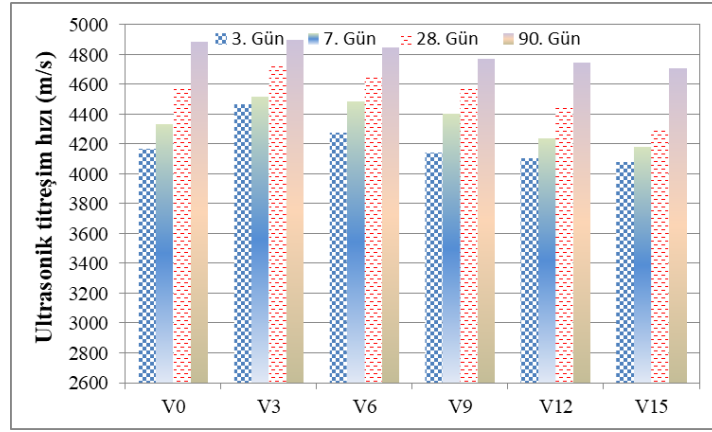


Şekil 8. YPH karışımlarının basınç dayanımları

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ



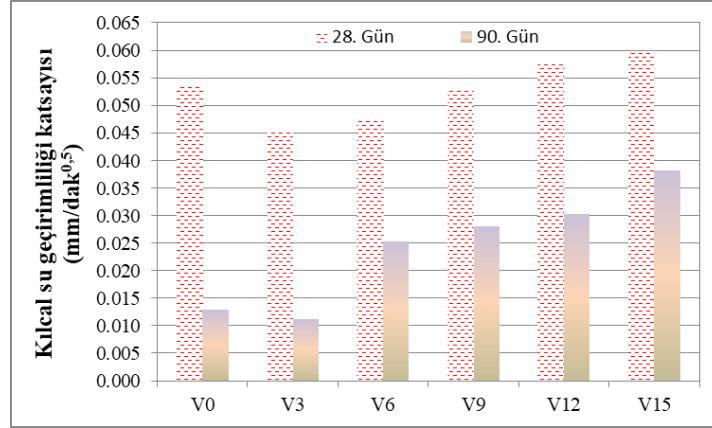
Şekil 9. YPH karışımlarının eğilme dayanımları



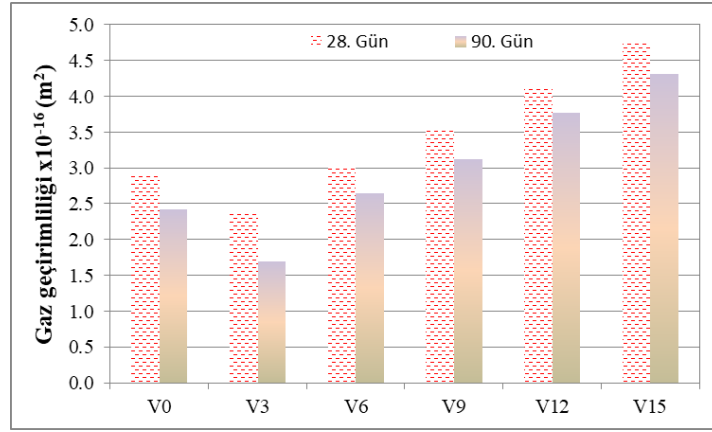
Şekil 10. YPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızları

3.3. Kılcal Su Geçirirliği ve Gaz Geçirirliği

YPH karışımlarının kılcal su geçirirliği katsayıları ve gaz geçirirliği değerlerini gösteren grafikler sırasıyla, Şekil 11 ve Şekil 12’de sunulmuştur. Grafiklerden açıkça görüleceği üzere V3 karışımının durabilite performansı, V0 karışımından daha üstün çıkmıştır. Bununla birlikte, %6 ve daha fazla vollastonit içeren YPH karışımlarının durabilite özellikleri kontrol karışımından daha düşük performans sergilemiştir. Bilindiği gibi, durabilite performanslarının belirlendiği yüzeyin çimento pastası bileşenlerinin mikro yapı özellikleri büyük ölçüde yüzey bölgesinin gözenek yapısı tarafından belirlenmektedir [6]. V3 karışımı düşünüldüğünde, gözenek yapısının vollastonit tarafından düzenlendiği ve basınç dayanımına ters orantılı olacak şekilde kılcal su geçirirliği katsayısının ve gaz geçirirliliğinin azaldığı söylenebilir. Bu nedenle, çimento sisteminde gözenek süreksizliğini sağladığı düşünülen bu özel mineralin, ince tanecik yapısı sayesinde kazandığı doldurucu etkisi ile sistemdeki gözenekleri azalttığı ve YPH’nin mikro yapısının yoğunlaşmasını sağladığı tahmin edilebilir [4], [6], [18]. %6 ve daha fazla vollastonit içeriğinde meydana gelen performans kaybı ise iğnemselliği çok da yüksek olmayan mineralin iğnemsiz yapısının tüm kütleyle hakim olmamasına (Şekil 1-3), bu nedenle, mikroyapıyı da bozmasına bağlanabilir [5], [17].



Şekil 11. YPH karışımlarının kılcal su geçirimsizliği katsayıları



Şekil 12. YPH karışımlarının açık gaz geçirimsizliği değerleri

4. SONUÇLAR

Finlandiya Vollaistonitinin YPH karışımlarının taze, mekanik ve durabilite performansları üzerine etkisini tespit etmek amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Vollaistonit minerali, iğnemsiz parçacık yapısının neden olduğu kenetlenme ve ince tanecik yapısının neden olduğu fazla su ihtiyacından dolayı YPH'lerin işlenebilirliğini azaltmıştır.

Mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlendiği deney sonuçlarına göre, bu vollaistonitin %3 oranında YPH içerisinde kullanılabilmesi, %6 ve daha fazla oranlarda kullanımının ise performans kaybına yol açacağı belirlenmiştir. İğnemsiz parçacık yapısı SEM analizi ile ispatlanan Finlandiya Vollaistonitinin iğnemsiz parçacıklarının tüm vollaistonit kütlelerine hakim olmadığı ve boy:çap oranının literatürde yüksek olarak nitelendirilen 20:1'den daha düşük olduğu, bu nedenle, % 3'ten daha fazla kullanımında hem mekanik hem de durabilite performansı açısından başarısız sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Bu bilgilere göre, çimento esaslı kompozitlerin tasarımında kullanılması planlanan vollaistonit mineralinin boy:çap oranının en az 20:1 olması ve iğnemsiz yapının kütlelerin çoğunda gözlemlenebilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Harbec, A. Zidol, A. Tagnit-Hamou, and F. Gitzhofer, "Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 142-156, 2017.
- [2] M. Mazloom, A. A. Ramezani-pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 347-357, 2004.

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLAR ÜZERİNE ETKİLERİ

- [3] H. E. Yücel, and S. Özcan, “Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique,” *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 165-176, 2019.
- [4] P. Kalla, A. Rana, Y. B. Chad, A. Misra, and L. Csetenyi, “Durability studies on concrete containing wollastonite,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, pp. 726-734, 2015.
- [5] M. A. Wahab, I. A. Latif, M. Kohail, and A. Almasry, “The use of wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes,” *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 304-309, 2017.
- [6] R. Mathur, A. K. Misra, and P. Goel, “Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete,” *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 66, pp. 1029-1034, 2007.
- [7] P. Kalla, A. Misra, R. C. Gupta, L. Csetenyi, V. Gahlot, and A. Arora, “Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite-fly ash combination,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1142-1150, 2013.
- [8] V. Dey, R. Kachala, A. Bonakdar, and B. Mobasher, “Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites,” *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 351-359, 2015.
- [9] ASTM C305, “Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [10] ASTM C1437, “Standard test method for flow of hydraulic cement mortar,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [11] ASTM C349, “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, 2017.
- [12] ASTM C348, “Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [13] ASTM C597, “Standard test method for pulse velocity through concrete,” *American Society for Testing and Materials*, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2016.
- [14] RILEM TC 116-PCD, “Permeability of concrete as a criterion of its durability,” *Materials and Structures*, vol. 32, pp. 174-179, 1999.
- [15] S. A. Zareei, F. Ameri, P. Shoaeei, and N. Bahrami, “Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study,” *Construction and Building Materials*, vol. 11–32, pp. 201, 2019.
- [16] P. C. Tatnall, “Fiber-reinforced concrete. In: J. F. Lamond, and J. H. Pielert, editors, “Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials (STP 169D),” *ASTM International*, West Conshohocken, vol. 49, pp. 578-594, 2006.
- [17] H. Ö. Öz, H. E. Yücel, M. Güneş and Ç. Duymaz, “The effects of natural wollastonite on mechanical and durability properties of standard mortars,” in 6th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG2019), 2019, pp. 265-269
- [18] G. D. Ransinchung, B. Kumar, and V. Kumar, “Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1168-1177, 2009.

