

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

Hatice Öznur ÖZ¹ (ORCID: 0000-0003-3568-1689)*
Muhammet GÜNEŞ¹ (ORCID: 0000-0001-6788-788X)

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 08.02.2018
Kabul / Accepted: 19.02.2018

ÖZ

Bu çalışmada, wollastonit katkılı yüksek performanslı harçların (YPH) taze ve mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. İlk aşamada wollastonit mineralinin literatür çalışmaları dışında belirlenen özel bir yöntemle sentetik olarak üretimi yapılmış, ikinci aşamada ise sentetik wollastonit YPH üretiminde kullanılmıştır. Wollastonit katkılı yüksek performanslı harçların (VYPH) üretimi 0,33 sabit su/bağlayıcı (çimento+wollastonit) oranıyla, 132±10 mm sabit bir yayılma çapıyla ve yüksek oranda su azaltıcı katkı (süper akışkanlaştırıcı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kontrol harcı sabit su/bağlayıcı oranı ile üretilmiş ve daha sonra sentetik wollastonit sırasıyla, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında her defasında çimentonun yerine ikame edilmiştir. Üretilen harçların sarsma tablasında yayılma çapı ölçülmüştür. Sonrasında, harçlara basınç ve eğilme testlerinin yanı sıra ultrasonik titreşim hızı testi 28. günde uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, wollastonit miktarının artmasıyla yayılma çapı giderek azalmış ve mekanik özellikler %9'a kadar iyileşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dayanım, harç, taze özellik, wollastonit, yüksek performans

STRENGTH CHARACTERISTICS OF HIGH PERFORMANCE MORTARS INCORPORATING SYHTENIC WOLLASTONITE

ABSTRACT

In this study, fresh and mechanical properties of high performance mortar (HPM) incorporating wollastonite have been experimentally investigated. In the first stage, the wollastonite mineral was synthetically produced by a special method found outside of the literature studies, and in the second stage, synthetic wollastonite was used in the production of HPM. The production of high performance mortar incorporating wollastonite (HPMW) was carried out with a constant water/binder (cement+wollastonite) ratio of 0.33 and a constant slump flow of 132±10 mm by using a high range water reducing admixture (super plasticizer). Initially, the control mortar was produced with a constant water/binder ratio and then, synthetic wollastonite was substituted instead of cement in the ratios of 3%, 6%, 9% and 12%, respectively. Slump diameter of the mortars was measured in the flow table. Subsequently, compressive and flexural tests as well as ultrasonic pulse velocity test were conducted at 28th day. According to the test results, the slump diameter gradually decreased and mechanical property improved up to 9% with the increase of wollastonite amount.

Keywords: Strength; durability; mortar; fresh property; wollastonite; high performance

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 2769; e-mail / e-posta: oznuroz@ohu.edu.tr

1. GİRİŞ

Beton diğer yapısal malzemelere kıyasla çok yönlülük, kullanılabilirlik ve ekonomi gibi birçok üstün avantaja sahip olan ve bu özellikleri sayesinde ülkemizde ve tüm dünyada yaygın olarak kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. Geçmişin ve günümüzün en önemli yapı malzemelerinden biri konumunda bulunan betonun gelecekte de yaygın kullanımının devam etmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi, yapı teknolojisindeki ve kentsel dönüşüm projelerindeki ilerlemelerden dolayı geleneksel beton bazı durumlarda istenilen dayanım ve durabilite özelliklerini gösterememektedir. Artan talebin karşılanması ve istenilen beton özelliklerinin elde edilebilmesi için yapı sektöründeki araştırmacılar farklı beton türlerini tasarlamaya yönelmişlerdir [1-5]. Yüksek Performanslı Beton (YPB), bu farklı beton türlerinin en önemlilerinden birisi olarak dikkat çekmektedir.

YPB istenilen dayanım koşulunu sağlamanın yanı sıra beklenen dayanıklılık koşulunu da sağlayan geleneksel betona kıyasla üstün özellikleri olan yüksek dayanımlı betonun özel bir türüdür. İçeriğinde bulunan kimyasal ve mineral katkılardan dolayı YPB'nin tasarımı ve üretimi, geleneksel betonun tasarımı ve üretiminden daha karmaşıktır. YPB'nin genel tasarım kriterlerine bakıldığında su/bağlayıcı oranının 0,35'den daha düşük olması istenir [6]. Bu nedenle YPB yüksek oranda çimento veya bağlayıcı malzeme içermektedir.

Beton üretimi için vazgeçilmez bir malzeme olan çimento, özellikle yaygın olarak kullanılan portland çimentosu, yüksek oranda enerji ve doğal kaynak tüketimine, CO₂ gazı yayılımına ve bu nedenle hava, su ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Söz konusu problemler sebebiyle betonda kullanılacak çimento miktarının azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar sonucunda çimento yerine belirli yüzdelerle kullanılarak, betonda çimento ihtiyacını azaltan mineral katkı malzemeleri geliştirilmiştir. Hem malzeme maliyetini azaltmak hem de betonun uzun süreli dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirmek için kullanılan mineral katkıların çimento yerine kullanılması ile hidrasyon ısı; buna bağlı olarak da termal çatlama ve büzülme ile ilgili problemler azaltılabilmektedir. Ayrıca mineral katkılar çimento üretimi neticesinde oluşan çevresel kirlilik etkisini azaltarak enerji kaynaklarını faydalı kullanmaya yardımcı olmanın yanı sıra sürdürülebilir bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır [7-9].

YPB'de dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra sünekliğin de sağlanması istenmektedir. Betonun eğilme dayanımındaki artışı elde edebilmek için farklı lif türleri ve mineral katkı malzemelerine ek olarak yeni tür malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan birisi de boyut olarak çimento parçacıklarının boyutuna benzer, kalsiyum, silisyum ve oksijenin bileşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikat (CaSiO₃) olan vollastonittir [7, 8, 10, 11]. Vollastonit, kalsit içeren kalker (CaCO₃, kireç taşı) ve silikanın (SiO₂) yüksek sıcaklıkta genellikle sıcak magma içerisinde etkileşiminden oluşmaktadır [8, 12].

Alüminyum, demir, magnezyum, manganez, potasyum ve sodyum gibi elementleri de yapısında bulduran vollastonit, teorik olarak %50'ye kadar CaO ve %55'e kadar SiO₂'den oluşan özel bir mineraldir. Bu mineral kontak metamorfik kireçtaşları ve volkanik kayalarda apatit, andradit, diyopsit, epidot, granat, sfen, plajiyoklas feldspat, tremolit, kalsit ve kuvarzla birlikte bulunmaktadır [7, 13-15]. Doğal olarak oluşan aynı zamanda sentetik olarak da üretilebilen vollastonit minerali, metalik olmayıp iğnemsî (iğne uçlu) kristal bir yapıya ve yüksek elastisite modülüne sahip, alkalın (pH 9,8), inert ve beyaz renkli bir mineraldir. Bazen krem, gri ya da çok soluk yeşil bir renge sahiptir. Özgül ağırlığı 2,9 civarında olan bu malzemenin Mohr skalasına göre sertliği 4,5-5,0 arasındadır. [8, 11, 14, 16, 17]. Bu mineralde, bireysel parçanın uzunluğu yaklaşık olarak 0,05-2,0 mm arasında ve enine boyutu yaklaşık olarak 10-100 µm arasında değişebilmektedir [18]. Doğal genişleme sıcaklık katsayısı 11,8x10⁻⁶ 1/°C'dir. Bu özel mineral, β-CaO.SiO₂ ve α-CaO.SiO₂ olmak üzere iki formda bulunur. β-CaO.SiO₂ doğal olarak ortaya çıkmaktadır ve 1150°C'ye kadar kararlıdır. α-CaO.SiO₂ formdaki vollastonit ise 1150-1540°C değerleri arasında kararlıdır ve yalancı vollastonit olarak adlandırılır. Yalancı vollastonit doğal olarak ortaya çıkmaz fakat sık sık eriyik ve cüruflar olarak bulunur [19]. Kırma ve öğütme işlemleri esnasında, vollastonitin sahip olduğu, kendine özgü dilinim özelliklerinden dolayı, iğne şeklinde parçacıklar meydana gelir. Yüksek mukavemeti sağlayan temel etken de bu parçacık morfolojisidir. Yaygın bir kullanım alanına sahip olan vollastonit minerali, seramik karolarda; refrakterlerde, plastiklerin gerilme direncinin geliştirilmesinde büzülme çatlaklarının azalması için, diş bakımı kauçuk, duvar panosu vb. uygulamalarda, boyalarda kötü hava koşullarında oluşan aşınmaya karşı direnci önlemek için pH tamponu olarak kullanılır. Parçacıkların iğnemselliği boy/çap oranı ile ifade edilmektedir [8, 14, 20].

Önemli bir katkı malzemesi olan vollastonit mineralinin büyük rezervleri küresel vollastonit üretiminin çoğunu oluşturan Çin, Hindistan, Finlandiya, Meksika, İspanya, Birleşik Devletler, Avustralya ve Güney Afrika'dadır. Türkiye, Kanada, Şili, Kenya, Nabibya, Sudan, Tajikistan ve Özbekistan ise önemli vollastonit kaynaklarına sahip olan ülkelerdir [21]. Daha önceleri Türkiye'de üretimi yapılan vollastonit uzun süredir üretilmemektedir. Vollastonitin dünyada yıllık ortalama üretim miktarı 500.000-600.000 ton aralığındadır. Dünya çapında görünür vollastonit rezervleri tahmini 90 milyon ton civarındayken, muhtemel rezervleri tahmini 270 milyon ton

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

civarındadır. Ancak, çoğu büyük yatak tetkik edilmediği için rezerv miktarı kesin olarak bilinmemektedir [21, 22].

Vollastonit doğal kaynaklar sayesinde Türkiye’de sentetik olarak üretilebilecek olan bir malzemedir. Bu minerali üretebilmek için gerekli olan kalsit (CaCO_3) ve kuvarz kumu (SiO_2) gibi malzemeler ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Kuvarz kumu, granit türü kayaçların ayrışması sonucu oluşan 2 mm’den küçük kuvarz (SiO_2) tanecikleridir [23]. Karbonatlı kayaçları oluşturan kalsit mineralinin kimyasal yapısı %95-97 oranında CaCO_3 ’tür. Çeşitli şekillerde kristal halde bulunur (rombaeder, skalenöeder şeklinde kristallenir) [24]. Kalsit birçok sektörde kullanılmasına rağmen yapı sektöründe kullanımı bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle kalsit beton içerisinde direkt olarak kullanıldığında beton performansını olumsuz etkilemektedir. Akkaya ve Kesler [24] tarafından uçucu kül, silis dumanı ve mikro kalsit kullanılarak yapılan çalışmada, mikro kalsitli betonlarda işlenebilirlik kaybı ve prizın hızlandığı görülmüştür. Erken yaş dayanım gelişimi uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonlardan daha hızlı olmakla beraber ileri yaş dayanım değerindeki artış ve sülfat hasarına direnci düşüktür.

Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde sentetik vollastonit üretimi için üç farklı metot bulunmaktadır. Bu metotlar; ıslak metot, katı hal reaksiyon metodu ve sıvı faz reaksiyon metodu olarak isimlendirilmektedir. Islak metot, genellikle 200°C ’den daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek basınç eşliğinde uygulanmaktadır. Bu metot başlangıç karışımının uygun bir kroze içerisinde eritilerek bir araya getirilmesi şeklinde gelişmektedir [25]. Mevcut üç metot arasından ıslak metot kullanılarak, en yüksek boy:çap oranına sahip vollastonit üretilbilir. Fakat, bu üretim yönteminde, genellikle yüksek saflığa sahip çözücüler (sitrik asit) ya da inorganik tuzlar $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ hammadde olarak kullanılmaktadır [26]. Katı hal reaksiyonu metodu, 800°C üzerindeki sıcaklıklarda silikanın kalsiyum oksit veya kalsiyum karbonat ile reaksiyona girmesine dayanır. Bu metot, silis dumanı, kalsit, mermer tozu, doğal silisyumlu karbonatlar ve atık maddeleri faydalı hale getirir. Ancak genel olarak elde edilen ürünlerde iğnemsiz kristal yapı oluşmaz [25]. Sıvı faz reaksiyonu metodu geri dönüşümlü materyaller kullanılarak yüksek boy:çap oranına sahip vollastonit üretmek için en ümit verici deney metodudur [25]. %50 SiO_2 +%30 CaO +%20 ZnO ya da %55 SiO_2 +%26 CaO +%13 ZnO +%2 MgO +%13 Al_2O_3 karışımları yüksek sıcaklığa dayanıklı platin kaplar içerisinde eritilerek, çekme yoluyla 1 mm çapında çubuklar haline getirilir. Böylece lifli kristal yapıya sahip vollastonit oluşturulur.

Vollastonit mineralinin çimento yerine kullanımı ile ilgili literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Ransinchung ve Kumar [8], vollastonit içeren harçların normal kıvamı için, %100 normal portland çimentosundan oluşan kontrol harcıyla kıyaslandığında, vollastonit miktarı arttıkça gerekli olan suyun arttığını göstermişlerdir. Mathur ve ark. [27], vollastonit kullanarak yapmış oldukları çalışmada, vollastonit kullanımıyla beraber betonun, basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin arttığını belirlemişlerdir. Soliman ve Nehdi [11], vollastonit minerali arttıkça; mineralin içerdiği mikrofiberler sayesinde, basınç dayanımının arttığını, büzülme gerilmesinin azaldığını ve çatlağa karşı direncin arttığını fakat eğilme dayanımında önemli bir iyileşmenin görülmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca betonun su emme, kuruma büzülmesi ve aşınma kaybının azaldığını, donma çözülme direnci ve sülfata karşı durabilite özelliklerinin geliştiğini tespit etmişlerdir. Ransinchung ve ark. [28] %15’e kadar vollastonit ve %7,5’a kadar mikro silika kullanımının, mikro yapının gelişmesi ve gözenek boşluğundaki azalmadan dolayı, betonun su sızdırmazlığını önemli derecede geliştirdiğini belirtmişlerdir. Ransinchung ve Kumar [8] tarafından yapılan çalışmada ise %82,5 çimento, %10 vollastonit ve %7,5 oranında mikro silika kullanılmasıyla en yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Literatür çalışmalarında elde edilen verilere göre, her vollastonitin beton üzerinde farklı etkileri olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle doğal veya sentetik olarak elde edilen vollastonit çeşidine bağlı olarak betonun mekanik ve durabilite özellikleri değişebilmektedir.

Verilen bilgilerden yola çıkarak, vollastonit üretimi için kullanılan her üç üretim metodunun da avantajları ve dezavantajları vardır. Uygulamalarda kullanmaya değer sentetik vollastonit üretim metodunun bulunması durumunda, endüstriyel alanda kullanılan doğal vollastonitin yerini zamanla sentetik vollastonitin alacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, vollastonitin YPH’lerin taze ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, vollastonit minerali literatür çalışmaları dışında özel olarak belirlenen bir yöntemle sentetik olarak üretilmiştir. Vollastonit mineralinin üretim süreci bu çalışmanın birinci aşamasını oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise ilk olarak 0,33 sabit su/bağlayıcı oranında kontrol harcı (VYPH0) üretilmiştir. Bu karışımda sadece çimento kullanılmıştır. Daha sonra sentetik vollastonit minerali %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimentonun yerine ikame edilerek YPH tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen harçların taze halde iken yayılma çapı, sertleşmiş halde iken ise basınç ve eğilme dayanımları ile ultrasonik titreşim hızı değerleri 28. günde belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Sentetik Vollastonit Üretimi

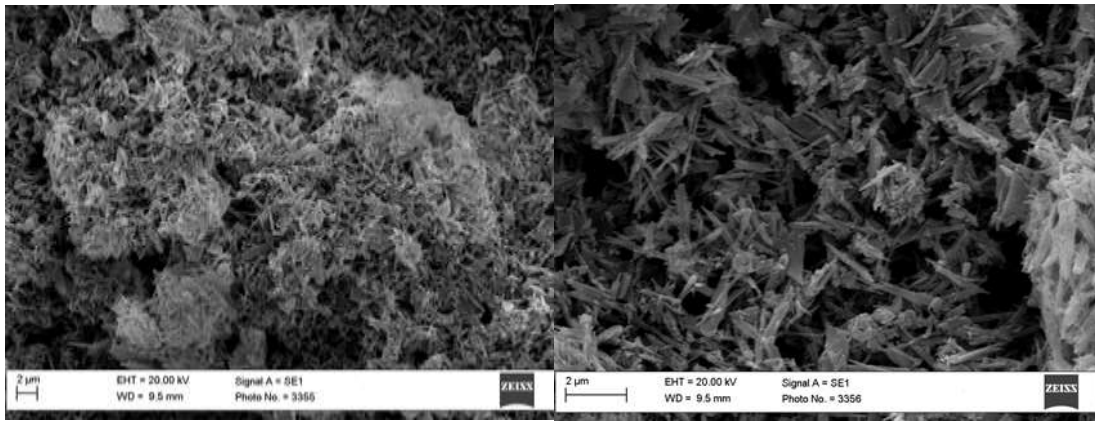
Sentetik vollastonit üretimi mekanokimyasal süreç, hidrotermal süreç ve sinterleme süreci olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Yapılan deneme üretimleri sonucunda, ilk olarak CaO ve SiO₂ 1:1 mol oranında olacak şekilde karıştırılmış ve karışımın ağırlığı kadar saf su eklenmiştir. Mekanokimyasal süreçte, bilyeli kaba konularak karıştırılan malzemeler, hidrotermal süreçte otoklava yerleştirilip 200 °C'de 24 saat boyunca bekletilmiştir. Hidrotermal otoklav tekniği (Şekil 1) nem, basınç ve sıcaklık ile daha iyi kristal yapının oluşmasını sağlamaktadır. Otoklav açıldığında sertleşmiş bir halde tobermorit (kalsiyum silikat hidrat minerali) elde edilmiştir. Tobermorit porselen kaplar içerisinde kül fırınına konularak 1100°C'de 1 saat bekletilir. Sinterleme süreci üretimin katı hal reaksiyonunu oluşturmaktadır. Sinterleme süreci bu şekilde tamamlandıktan sonra vollastonit nemden uzak bir ortamda ağız kapalı numune torbası içerisinde muhafaza edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Hidrotermal otoklav reaktörü

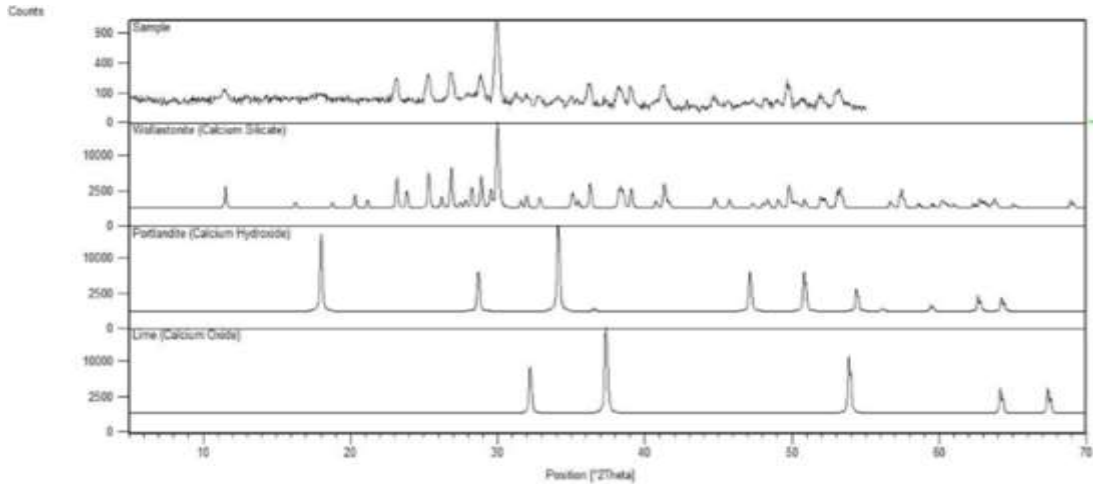
Şekil 2. Sentetik vollastonit minerali

Üretilen malzemenin karakteristik özellikleri SEM, XRD ve XRF analizleri ile tespit edilmiştir. Şekil 3'te verilen SEM analizi sonuçlarına göre, iğnemsiz parçacık yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu özel mineral iğnemsiz yapısı sayesinde sentetik kemik implantlarında kullanılmaktadır [10].



Şekil 3. SEM analizi

Şekil 4'te verilen XRD sonuçlarında görüldüğü üzere, orta ölçekli pikler beta vollastonit, büyük ölçekli pikler ise alfa vollastonit izlerini göstermektedir. Analizi yapılan malzemenin, vollastonit ile benzer piklere sahip olması sebebiyle vollastonit olduğu kesinleşmiştir.

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ**Şekil 4.** XRD analizi

Yapılan XRF analizi sonrasında ise Tablo 1’de görüldüğü gibi üretilen vollastonitin %55,53 oranında CaO ve %40,14 oranında SiO₂ bileşenlerini barındırdığı belirlenmiştir.

Son aşamada ise ASTM C618 [29]’e göre hazırlanan ve çimento yerine ağırlıkça %20 oranında vollastonit kullanılarak üretilen çimento harçları üzerinde sarsma tablası ile su miktarı belirlenerek puzolonik aktivite testi yapılmıştır. Sentetik vollastonitin betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanımına yönelik yapılan ön çalışma neticesinde puzolonik aktivite değeri ASTM C618 [29] standardında belirlenen minimum %75 seviyesinin üzerinde bir değer olarak %81 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle üretilen sentetik vollastonitin betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

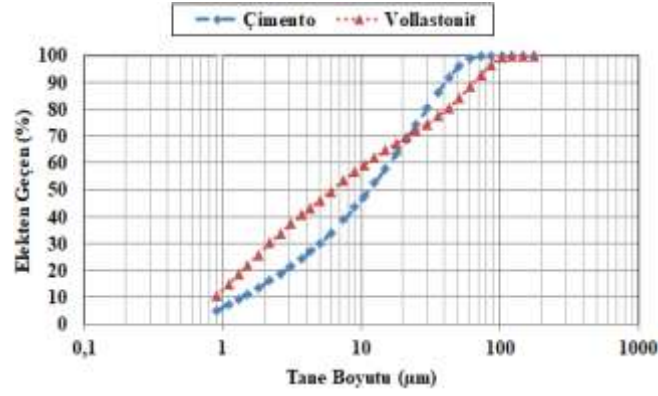
Tablo 1. Çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Kimyasal Analiz (%) | Çimento | Vollastonit |
|-------------------------------------|---------|-------------|
| CaO | 62,58 | 55,53 |
| SiO ₂ | 20,25 | 40,14 |
| Al ₂ O ₃ | 5,31 | 0,801 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,04 | 0,30 |
| MgO | 2,82 | 2,55 |
| SO ₃ | 2,73 | - |
| K ₂ O | 0,92 | - |
| Na ₂ O | 0,22 | 0,363 |
| Kızdırma Kaybı | 2,96 | - |
| Özgül Ağırlık | 3,15 | 3,09 |
| İncelik Modülü (m ² /kg) | 326 | - |

2.2. YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

YPH tasarımında, TS EN 197-1 [30] standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Kireç taşının (CaCO₃) sinterlenmesi ile oluşan CaO diğer adıyla sönmemiş kireç ve SiO₂ (silis) minerallerinin hammadde olarak kullanıldığı özel bir yöntem sonucunda üretilen sentetik vollastonit, belirli oranlarda çimento yerine kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de, bu malzemelerin elek analizi ise Şekil 5’te gösterilmiştir. Özgül ağırlığı 1,07 olan polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı bir süper akışkanlaştırıcı, istenilen işlenebilirliği elde etmek için tüm karışımlarda kullanılmıştır. Vollastonitin işlenebilirliğe olan etkisini tam olarak belirleyebilmek için tüm karışımlarda aynı oranda süper akışkanlaştırıcı (22,5 kg/m³) kullanılmıştır. Karışımlarda ince agrega olarak özgül ağırlıkları 2,67 ve 2,63 olan doğal ve kırma kum birlikte kullanılmıştır. Bu agregalar Niğde iline aittir.

H. Ö. ÖZ, M. GÜNEŞ



Şekil 5. Çimento ve vollastonitin elek analizi

2.4.2. Basınç Deneyi

YPH'lerin basınç dayanımı ASTM C349-14 [33]'e göre belirlenmiştir. Basınç deneyi, Şekil 6'da görüldüğü üzere eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak 28. günde yapılmıştır. Dolayısıyla her bir test yaşı için 6 parça kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 6. (a) Eğilme deneyinden elde edilen 6 parça deney numunesi, (b) Basınç deneyi

2.4.3. Eğilme Deneyi

VYPH numunelerinin eğilme dayanımı ASTM C348-14'e [34] göre belirlenmiştir. Bu deneye ait görseller Şekil 7'de sunulmuştur. Eğilme deneyi 28. günde 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Son olarak bu deney yöntemi yardımıyla eğilmeyi test etmek için kullanılan harç prizmalarının ayrılan kısımları ASTM C349-14 [33] test metoduna paralel olarak basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılabilir.



Şekil 7. (a) Eğilme deneyinde kullanılan prizmatik numuneler, (b) Eğilme deneyi

*SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ***2.5.4. Ultrasonik Titreşim Hızı Deneyi (UTH)**

Tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrasonik titreşim hızı deneyi inşaat mühendisliğinde kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Bu deneye ait görsel Şekil 8’de gösterilmiştir. ASTM C597-16’ya [35] uygun olarak yapılan UTH deneyi, betonun veya harcın göreceli kalitesinin ve bazı kusurlarının (boşluklar, çatlaklar ve onarımlarının etkinliği vb.) değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. UTH testleri 40x40x160 mm boyutlarında, 3 prizmatik harç numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu test 28. günde harcın 160 mm’lik kısmına uygulanmıştır. Bir numuneden 4 adet olmak üzere toplamda her bir karışımdan 12 adet okuma alınmıştır. Daha sonra bu 12 değerın ortalaması deney sonucu olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. UTH ölçümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA**3.1. Yayılma Çapı**

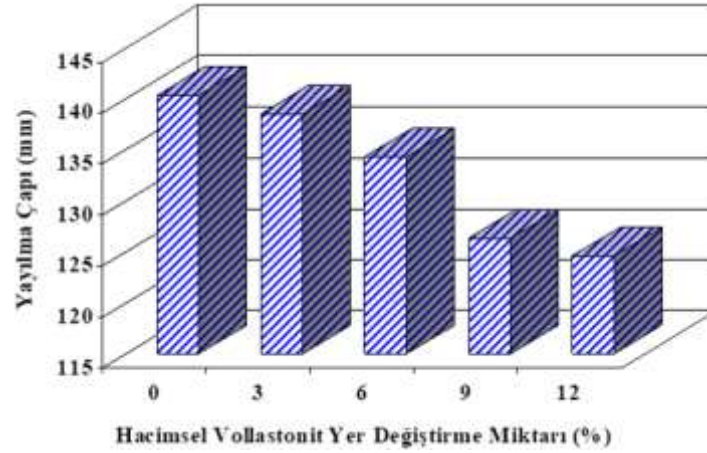
VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının yayılma çapları Şekil 9’da görüldüğü gibi sırasıyla, 140,35, 138,49, 134,34, 126,31 ve 124,60 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, çimento yerine ikame edilen vollastonit mineralinin kullanım yüzdesi arttıkça yayılma çapı azalmıştır. Literatür çalışmaları da elde edilen bu sonuca paralellik göstermektedir. Ransinchung ve Kumar [8] tarafından yapılan çalışmada, %100 normal portland çimentosu ve %100 vollastonit içeren iki ayrı karışımın normal kıvamı için gereken suyun sırasıyla %32 ve %65 olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, kullanılan vollastonit yüzdesi arttıkça süper akışkanlaştırıcının miktarının da arttığını tespit etmişlerdir. Dolayısıyla vollastonit minerali işlenebilirliği azaltmaktadır. Bağlayıcı malzemelerin kıvamı ve işlenebilirliği malzemenin tipine ve inceliğine bağlı olmaktadır [36-38]. Şekil 5’ten de görüldüğü üzere, vollastonit normal portland çimentosundan daha ince bir malzeme olduğu için daha yüksek yüzey alanına sahiptir. Bu nedenle çimentoyla aynı normal kıvamı ve işlenebilirliği elde etmek için vollastonit içeren karışımlar daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır [28]. Ayrıca Mathur ve ark. [27], vollastonit mineralinin betonun işlenebilirliğini azalttığını ve akışkanlaştırıcı kullanılmasını gerektiğini belirtmişlerdir. Soliman ve Nehdi [39], vollastonit mikro fiberler içeren ultra YPH’nin işlenebilirliğinin kontrol harcından daha az olduğunu ve daha yüksek vollastonit mikro fiber içeriğinin daha düşük işlenebilirliğe yol açtığını tespit etmişlerdir. Bu durum vollastonit mineralinin iğnemsı yapısından dolayı mikro fiberlerin artan kenetlenmesine bağlanabilir [40]. Bu nedenle, işlenebilirlikteki bu azalma, yerleştirilme esnasında vibrasyon uygulanmasına ya da daha yüksek miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmasına yol açabilmektedir [8, 40].

3.2. Basınç Dayanımı

VYPH’lerin basınç dayanımı değişimleri ve kontrol harcına göre basınç dayanımındaki yüzde değişim verileri sırasıyla, Şekil 10 ve Şekil 11’de grafiksel olarak gösterilmiştir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının 28. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 64,33, 66,44, 68,85, 69,43 ve 67,84 MPa olarak belirlenmiştir. Test sonuçlarından açıkça anlaşılacağı üzere, vollastonit miktarı arttıkça YPH’lerin basınç dayanımı artmakta ve bu artış %9 vollastonit içeriğine kadar (%9 dâhil) devam etmektedir. Bu çalışmaya paralel olarak, Mathur ve ark. [27], vollastonit mineralinin betonun basınç dayanımını artırdığını belirlemişlerdir. Buna

H. Ö. ÖZ, M. GÜNEŞ

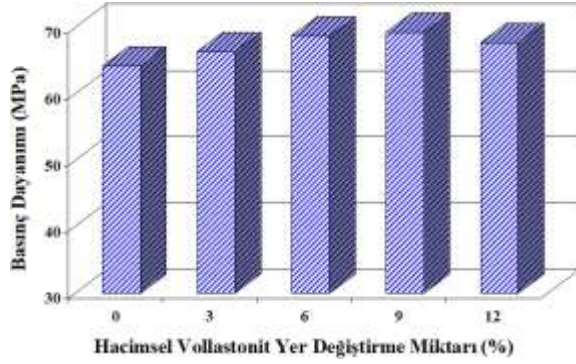
ek olarak, Soliman ve Nehdi [39], tarafından yapılan çalışmada vollastonit mikro fiberlerinin kullanım oranının artmasıyla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, Soliman ve Nehdi [11] vollastonit mineralinin ultra yüksek performanslı betonun çok erken yaştaki dayanımını da iyileştirdiğini göstermişlerdir. Kalla ve ark. [17] ise vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak yaptıkları çalışmada vollastonitin betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.



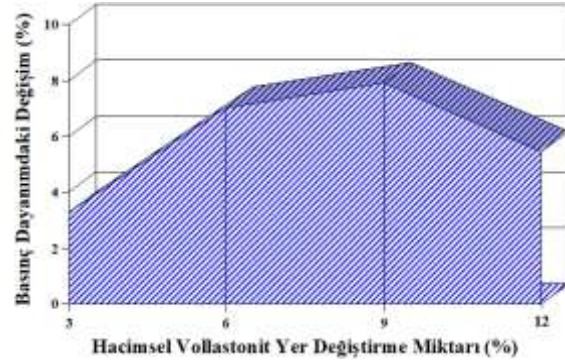
Şekil 9. VYPH karışımlarının yayılma çapları

Şekil 10'den görüldüğü üzere, %12 vollastonit içeriğinde, 28. günde elde edilen basınç dayanımı değeri VYPH9 karışımından daha az olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksektir. Kumar ve Ramujee [41], çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hem 28. hem de 56. günde %10 seviyesine kadar harcın basınç dayanımını geliştirdiğini, %15 vollastonit içeriğinde ise bu gelişimin azaldığını belirlemişlerdir. %15 vollastonit içeriğinde basınç dayanımı %5 ve %10 seviyesinden daha düşük olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, Kalla ve ark. [7], 3 farklı su/bağlayıcı (0,45, 0,50 ve 0,55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0,45 ve 0,55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğine kadar (%10 dâhil) basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. %15 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise elde edilen basınç dayanımının kontrol harcından daha az olduğunu belirlemişlerdir. 0,50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğinde basınç dayanımının azalmaya başladığı, %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için basınç dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğu belirlenmiştir.

VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının, VYPH0 karışımına göre yüzde değişimleri, Şekil 11'den, 3,28, 7,03, 7,93 ve 5,46 olarak, tespit edilmiştir. Vollastonit mineralinin her iki test yaşı için basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsiz parçacık morfolojisi) ile açıklanabilmektedir [41]. Ayrıca, Şekil 5'teki elek analizi verilerinden görüldüğü üzere vollastonit minerali çimentoya göre daha ince bir tanecik yapısına sahiptir. Dolayısıyla çimento matrisi içerisine vollastonit ikamesiyle birlikte gözenek hacminde (0,5-0,1 µm) büyük bir daralma olduğu düşünülmektedir [27]. Bundan dolayı vollastonit mineralinin kullanılmasıyla birlikte, vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesinin, vollastonitin doldurucu etkisi ile beraber, mikro yapıdaki (çok küçük gözenekler) yoğunluğu artarken daha kompakt bir harç oluşmuştur [27, 42]. Ayrıca bu artış, mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro fiberlerin, ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımının bir fonksiyonunu oluşturması ile açıklanabilmektedir [39, 43, 44]. Bu özel mineralin %12 oranında kullanımı karışımın basınç dayanımının düşmeye başlamasına neden olmuştur. Bu durum vollastonitin çimentoyla yer değiştirme oranının % 9'a kadar matris yapısını yoğunlaştırması, %12'de ise matrisle olan bağın zayıflamaya başlaması ile ifade edilebilmektedir [42].

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

Şekil 10. VYPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri



Şekil 11. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişimleri

3.3. Eğilme Dayanımı

Harç karışımları, sentetik vollastonitin çimentoyla yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak 0, 3, 6, 9 ve 12 olarak gösterilmiş olup, 28. gündeki eğilme dayanımı değerleri Şekil 12'de, 28. gündeki eğilme dayanımındaki yüzde değişim değerleri (kontrol harcına göre) ise Şekil 13'te sunulmaktadır. %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımlarının, 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 10,43, 10,73, 11,3, 11,6 ve 9,6 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, vollastonit içeriğinin artmasıyla birlikte VYPH karışımlarının eğilme dayanımları artmıştır. Bu sonuçlara paralel olarak, Soliman ve Nehdi [11], ultra YPH karışımlarında vollastonit mikro fiberlerin varlığının mikro fiberler olmaksızın tasarlanan kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımı karakteristiklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Mathur ve ark. [27], tarafından beton üzerinde yapılan çalışmada vollastonitin betonun eğilme dayanımını geliştirdiği belirtilmiştir.

%9 vollastonit içeriğine kadar (%9 dâhil) eğilme dayanımı artarken, %12 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımı azalmıştır. Bu azalma sonucunda, VYPH12'nin eğilme dayanımı kontrol harcına göre daha düşük bulunmuştur. Kalla ve ark. [7], 3 farklı su/bağlayıcı (0,45, 0,50 ve 0,55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0,45 ve 0,55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımının azalmaya başladığını, %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için eğilme dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 0,50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğine kadar (%10 dâhil) eğilme dayanımının arttığı, %15 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise elde edilen eğilme dayanımının kontrol harcından daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Wahab ve ark. [42], harç üretiminde, vollastoniti çimento yerine %10, %20 ve %30 oranlarında kullanmışlar ve %20 ve %30 için sonuçların olumsuz olduğunu gözlemlemişlerdir. %10 vollastonit içeriğinde ise 2. gündeki eğilme dayanımının kontrole göre daha az olduğunu ancak 28. gündeki eğilme dayanımının kontrole çok yakın olduğunu tespit etmişlerdir.

%3, %6, %9 ve %12 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımlarının, Şekil 13'te kontrol karışımına oranla verilen değişim değerleri 28. gün için sırasıyla, %2,88, %8,34, %11,22 ve %7,96 olarak tespit edilmiştir. Test sonuçları, vollastonit mineralinin YPH'nin eğilme dayanımını geliştirdiğini ve bu gelişimin %9 vollastonit içeriğine kadar devam ettiğini göstermektedir. Eğilme dayanımındaki bu artış, vollastonit mineralinin lifli (iğnems) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir [7, 27, 45]. Yük sonrası çimento matrisinin çatlaması ve vollastonit içeriğine bağlı olarak kırılmış yüzeyde meydana gelen değişimler incelendiğinde, vollastonit ile güçlendirilmiş çimento matrisinin sünekliği ve eğilme mukavemeti artmıştır [27]. Bununla birlikte, vollastonit minerali, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaşarak mikro çatlaklara köprü kuran mikro fiber yeteneğine sahiptir [11, 39, 46, 47]. Böylece vollastonit kullanım yüzdesinin artmasıyla birlikte eğilme dayanımı artmıştır. Eğilme dayanımı değerlerinde, %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit konsantrasyonunun %12'ye kadar yükselmesi sonucunda vollastonit mineralinin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir [42].

3.4 Ultrasonik Titreşim Hızı (UTH)

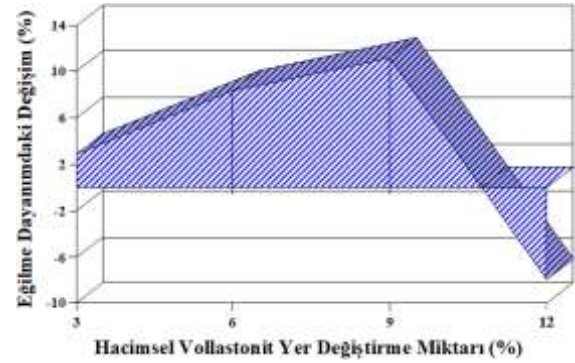
VYPH karışımlarının UTH verileri ve UTH'deki yüzde değişim değerleri (kontrol harcına göre) sırasıyla, Şekil 14 ve Şekil 15'te grafiksel olarak sunulmuştur. VYPH'lerin UTH değerleri, 3704-4990 m/s arasında değişmektedir. Vollastonit içeriğinin artması %9 seviyesine kadar UTH değerini artırmış, %9'dan sonra (%12

H. Ö. ÖZ, M. GÜNEŞ

yer değiştirme seviyesi için) bu değer azalmıştır. En düşük UTH değeri, VYPH0 karışımında 3704 m/s olarak elde edilmiştir.

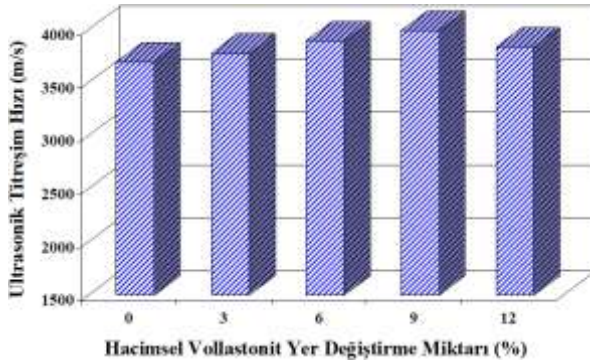


Şekil 13. VYPH karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri

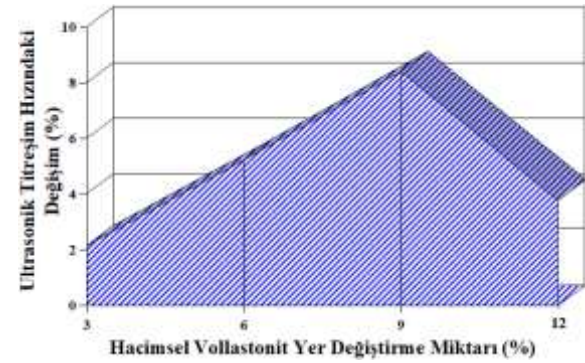


Şekil 14. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre eğilme dayanımındaki yüzde değişimleri

Malhotra'ya [48] göre UTH ölçümünden elde edilen değer 3660-4580 m/s aralığında ise bu sonuç "iyi durum" olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, tüm karışımlar için, 28 günlük UTH verileri "iyi durum" olarak düşünülebilir. Şekil 15'ten görüldüğü gibi, UTH değerindeki en yüksek yüzde farklılık 28. günde VYPH9 karışımında %8,40 olarak belirlenmiştir. Vollaştonit mineralinin UTH üzerindeki bu geliştirici etkisi, bu mineralin çimentoya göre daha ince bir parçacık boyutuna sahip olması sayesinde harca kazandırdığı doldurucu etki ile açıklanabilir. Bu doldurucu etki sayesinde, %9 vollaştonit içeriğine kadar (VYPH9 dâhil) daha yoğun ve daha kompakt bir matris bağı oluşmuş olup, gözenek süreksizliği sağlanmıştır [27, 42]. VYPH12 karışımında UTH değerlerinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollaştonit içeriğinin %12'ye kadar yükselmesi sonucunda bu mineralin, matristeki bağı zayıflatmasıdır [42].



Şekil 14. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değişimleri



Şekil 15. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre ultrasonik titreşim hızındaki yüzde değişimleri

4. SONUÇLAR

Sentetik vollaştonitin YPH'lerin taze ve mekanik özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıda sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Kullanılan vollaştonit yüzdesinin artmasıyla beraber YPH'nin yayılma çapı azalmıştır. Bu durumun temel nedenleri; vollaştonit mineralinin iğnemsî parçacık yapısı ve çimentodan daha ince tanecik yapısına sahip olmasıdır.
- 2) YPH'lerin basınç ve eğilme dayanımı vollaştonit yüzdesi arttıkça artmıştır. Basınç ve eğilme değerlerindeki artış %9 vollaştonit içeriğine kadar devam etmiş, %12 oranında ise azalma göstermiştir. Bu özel mineralin basınç ve eğilme dayanımlarına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısına (iğnemsî parçacık morfolojisine) bağlanabilir. Buna ek olarak, vollaştonit minerali, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaşarak mikro çatlaklara köprü kuran mikro fiber yeteneğine sahiptir. Böylece YPH'nin

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

basınç ve eğilme dayanımları gelişmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde, %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit konsantrasyonunun %12'ye kadar yükselmesi sonucunda bu mineralin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir.

- 3) Vollastonit mineralinin kullanılmasıyla birlikte, vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesinin mikro yapıdaki (çok küçük gözenekler) yoğunluğunun artmasıyla birlikte daha kompakt bir YPH oluşmuştur. Bu nedenle basınç dayanımına paralel olarak UTH değerleri gelişmiştir. Fakat vollastonitin %12 oranında kullanımı ise UTH değerinin azalmaya başlamasına neden olmuştur. Bu durum vollastonitin çimentoyla yer değiştirme oranının %9'a kadar matris yapısını yoğunlaştırması, %12'de ise matrisle olan bağı zayıflatmaya başlaması ile açıklanabilir. Son olarak, tüm karışımlar için 28 günlük UTH değerlerinin, "iyi durum" olarak değerlendirilen 3660-4580 m/s aralığında olduğu belirlenmiştir.
- 4) Türkiye'de bulunan kuvarz kumu potansiyelinin yaklaşık 730 milyon ton olduğu ve Anadolu'nun hemen her bölgesinde kalsit oluşumuna rastlamanın mümkün olduğu bilinmektedir. Özellikle Niğde Bölgesinde son 10 yıl içerisinde çok hızlı üretim artışı yapan kalsit ocakları bulunmaktadır ve 10 milyon ton civarında rezerve sahiptir. Ancak çıkarılan kalsitin yapı sektöründe kullanım alanı bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle kalsit beton içerisinde direkt olarak kullanıldığında beton performansını olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla ülkemizde oldukça önemli bir miktarda rezervi bulunan bu iki mineralin (kalsit ve kuvarz), vollastonit mineralinin temelini oluşturduğu bilinmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, bu iki mineral kullanılarak vollastonitin sentetik üretimi yapılması ve YPH üretiminde kullanılabilmesi, hem yapı sektörüne hem de bu iki önemli rezervin kullanılmasını artırarak yeni çalışma alanlarının oluşmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] BİNİCİ, H., DURGUN, M.Y., RIZAOĞLU, T., KOLUÇOLAK, M., "Investigation of Durability Properties of Concrete Pipes Incorporating Blast Furnace Slag and Ground Basaltic Pumice as Fine Aggregates", Sharif University Technology, 19 (3), 366-372, 2012.
- [2] GESOĞLU, M., GÜNEYİSİ, E., ÖZTURAN, T., ÖZ, H.Ö., ASAAD, D.S., "Self-Consolidating Characteristics of Concrete Composites Including Rounded Fine and Coarse Fly Ash Lightweight Aggregates", Composites: Part B, 60, 757-763, 2014.
- [3] HYEOK-JUNG, K., SANG-MIN, P., SUBBIAH, K., SEUNG-JUN, K., "Durability Performance Evaluation of Concrete Containing TDFA (Tire Derived Fuel Ash)", Construction and Building Materials, 133, 376-386, 2017.
- [4] MCGINNIS, M.J., DAVIS, M., DE LA ROSA, A., WELDON, B.D., KURAMA, Y.C., "Strength and Stiffness of Concrete with Recycled Concrete Aggregates", Construction and Building Materials, 154, 258-269, 2017.
- [5] ULUSU, H., ARUNTAS, H. Y., GENCEL, O., "Investigation on Characteristics of Blended Cements Containing Pumice", Construction and Building Materials, 118, 11-19, 2016.
- [6] TAŞDEMİR, M.A., BAYRAMOV, F., YERLIKAYA, M., "Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar", TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri, 426, 2003.
- [7] KALLA, P., RANA, A., CHAD, Y.B., MISRA, A., CSETENYI, L., "Durability Studies on Concrete Containing Wollastonite", Journal of Cleaner Production, 87, 726-734, 2015.
- [8] RANSINCHUNG, G.D., KUMAR, B., "Investigations on Pastes and Mortars of Ordinary Portland cement admixed with Wollastonite and Microsilica", Journal of Materials in Civil Engineering, 22(4), 305-313, 2010.
- [9] SABET, F.A., LIBRE, N.A., SHEKARCHI, M., "Mechanical and Durability Properties of Self Consolidating High Performance Concrete Incorporating Natural Zeolite, Silica Fume, and Fly Ash", Construction and Building Materials, 44, 175-184, 2013.
- [10] HANER, S., ÇUHADAROĞLU, D., "Vollastonit: Bir Gözden Geçirme", Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 37(1), 63-82, 2013.
- [11] SOLIMAN, A.M., NEHDI, M.L., "Effect of Natural Wollastonite Microfibers on Early-Age Behavior of UHPC", Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (7), 816-824, 2012.
- [12] PAUL, F.K., Mineral descriptions-Wollastonite, Optical Mineralogy, 4th ed., Mc Graw Hill, New York, USA, 1977.
- [13] DUMONT, M., Wollastonite, Canadian Minerals Yearbook, Kanada, 2004.
- [14] KOGEL, J.E., TRIVEDI, N.C., BARKER, J.M., KRUKOWSKI, S.T., "Industrial Minerals & Rocks", 7th ed. Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Colorado, USA, 2006.

- [15] SARIİZ, K., “Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciligi”, Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, 1992.
- [16] CIULLO, P.A., *Industrial Minerals and Their Uses*, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1996.
- [17] KALLA, P., MISRA, A., GUPTA, R.C., CSETENYI, L., GAHLOT, V., ARORA, A., “Mechanical and Durability Studies on Concrete Containing Wollastonite-Fly Ash Combination”, *Construction and Building Materials*, 40, 1142-1150, 2013.
- [18] LOW, N.M.P., BEAUDOIN, J.J., “The Effect of Wollastonite Micro-Fibre Aspect Ratio on Reinforcement of Portland Cement-Based Binders”, *Cement and Concrete Research*, 23, 1467-1479, 1993.
- [19] ZHU, L.Z., SOHN, H.Y., BRONSON, T.M., “Flux Growth of 2M-Wollastonite Crystals for the Preparation of High Aspect Ratio Particles”, *Ceramics International*, 40, 5973-5982, 2014.
- [20] RANSINCHUNG, G.D., KUMAR, B., KUMAR, V., “Assessment of Water Absorption and Chloride Ion Penetration of Pavement Quality Concrete Admixed with Wollastonite and Microsilica”, *Construction and Building Materials*, 23, 1168-1177, 2009.
- [21] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2010-wolla.pdf> (erişim tarihi 12.03.2018).
- [22] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2011-wolla.pdf> (erişim tarihi 12.03.2018).
- [23] KURŞUN, İ., İPEKOĞLU, B., “Türkiye Kuvars Kumu Potansiyeline Genel Bir Bakış”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 21-22 Nisan, 1995.
- [24] AKKAYA, Y., KESLER, Y.E., “Mikro Kalsit Katkısının Betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi”, *İMO Teknik Dergi* 384, 6051-6061, 2012.
- [25] ZHU, L., *Preparation of High-Aspect-Ratio Particles Through The High Temperature Growth of 2M-Wollastonite Crystals*, PhD Thesis, The University of Utah Graduate School, Utah, USA, 2013.
- [26] LIN, K., CHANG, J., CHEN, G., RUAN, M., NING, C., “A Simple Method to Synthesize Single-Crystalline B-Wollastonite Nanowires”, *Journal of Crystal Growth*, 300 (2), 267-271, 2007.
- [27] MATHUR, R., MISRA, A.K., GOEL, P., “Influence of Wollastonite on Mechanical Properties of Concrete”, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 66, 1029-1034, 2007.
- [28] RANSINCHUNG, G.D., KUMAR, B., KUMAR, V., “Assessment of Water Absorption and Chloride Ion Penetration of Pavement Quality Concrete Admixed with Wollastonite and Microsilica”, *Construction and Building Materials*, 23, 1168-1177, 2009.
- [29] ASTM C618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2015.
- [30] TS EN 197-1, *Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2002.
- [31] ASTM C305-12, *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.
- [32] ASTM C1437-15, *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [33] ASTM C349-14, *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.
- [34] ASTM C348-14, *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2017.
- [35] ASTM C597-16, *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2016.
- [36] GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K., “Rice Hush Ash Blended Cement: Assessment of Optimal Level of Replacement for Strength and Permeability Properties of Concrete”, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675-1683, 2007.
- [37] RAO, G.A., “Investigations on the Performance of Silica Fume-Incorporated Cement Pastes and Mortars”, *Cement and Concrete Research* 33 (11), 1765-1770, 2003.
- [38] TEMİZ, H., KOSE, M.M., KÖKSAL, S., “Effects of Portland Composite and Composite Cements on Durability of Mortar and Permeability of Concrete”, *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1170-1176, 2007.
- [39] SOLIMAN, A.M., NEHDI, M.L., “Effects of Shrinkage Reducing Admixture and Wollastonite Microfiber on Early-Age Behaviour of Ultra-High Performance Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 46, 81-89, 2014.

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

- [40] TATNALL, P.C., “Fiber-reinforced concrete. In: Lamond, J.F. and Pielert, J.H., editors, “Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials (STP 169D)”, ASTM International, West Conshohocken, 49, 578-594, 2006.
- [41] KUMAR, J.B., RAMUJEE, K., “Mechanical & Durability Characteristics of Wollastonite Based Cement Concrete”, Journal on Civil Engineering, 7(1), 1-7, 2017.
- [42] WAHAB, M.A., LATIF, I.A., KOHAIL, M., ALMASRY, A., “The Use of Wollastonite to Enhance The Mechanical Properties of Mortar Mixes”, Construction and Building Materials, 152, 304-309, 2017.
- [43] BANTHIA, N., SHENG, J., “Fracture Toughness of Micro-Fiber Reinforced Cement Composites”, Cement and Concrete Composites, 18(4), 251-269, 1996.
- [44] HAMEED, R., TURATSINZE, A., DUPRAT, F., SELLIER, A., “Metallic Fiber Reinforced Concrete: Effect of Fiber Aspect Ratio on The Flexural Properties”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4(5), 67-72, 2009.
- [45] MATHUR, R., MISRA, A.K. AND GOEL, P., “Marble Slurry Dust and Wollastonite-Inert Mineral Admixtures for Cement Concrete”, Indian Highways, 35(12), 41-46, 2007.
- [46] DING, Y. AND KUSTERLE, W., “Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fiber-Reinforced Concrete at Early-Age, Cement and Concrete Research, 30(10), 1573-1579, 2000.
- [47] HAMOUSH, S., ABU-LEBDEH, T., CUMMINS, T., ZORNIG, B., “Pullout Characterizations of Various Steel Fibers Embedded in Very High-Strength Concrete”, American Journal of Engineering and Applied Sciences, 3(2), 418-426, 2010.
- [48] MALHOTRA V.M., “Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods”, American Concrete Institute Monograph No.9., USA, 1976.