

Betonda atık vermikülit kullanımının betonun mineralojik ve kimyasal yapısına olan etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of using waste vermiculite in concrete on the mineralogical and chemical structure of concrete

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI^{1,a}, Merve SOĞANCIOĞLU KALEM^{*2,b}

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 42130, Konya

• Geliş tarihi / Received: 25.03.2022

• Düzeltılarak geliş tarihi / Received in revised form: 30.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 08.06.2022

Öz

Günümüzde atık maddelerin geri kazanılarak yapı malzemeleri içerisinde kullanımı ile ilgili yeni yaklaşımlar meydana gelmektedir. Bu atıkların yeniden kullanımı ile önemli çevresel problemlerin önüne geçilmekle birlikte yapı malzemelerinin üretiminde kullanılacak ham maddelerden de tasarruf edilmektedir. Buradan hareketle bu çalışma kapsamında önemli bir çevresel sorun olan ve henüz bir değerlendirme alanı bulamamış olan atık vermikülit madenin beton içerisinde agrega yerine değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ince agrega ile yer değiştirilen atık vermikülitin (AVK) karakterizasyonu ve elde edilen beton örneklerinin kimyasal ve mineralojik bileşimleri SEM-EDS, FTIR ve XRD analizleri ile ortaya koyularak betonun yapısında meydana gelen kimyasal ve mineralojik değişimler betonun basınç dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atık vermikülit dozunun artışı ile birlikte betonun basınç dayanımında meydana gelen düşüşler ve betonun kimyasal yapısında görülen bağlanmış fonksiyonel O-H grupları, beton karışımının fazladan su ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Ancak elde edilen sonuçlar neticesinde düşük dozlarda atık vermikülit içeren betonların basınç dayanımının önemli olmadığı yapısal alanlarda da kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Agrega, Atık vermikülit, Beton, FTIR, SEM-EDS, XRD

Abstract

Today, new approaches are emerging regarding the recycling of waste materials and their use in building materials. With the reuse of these wastes, important environmental problems are avoided and the raw materials to be used in the production of building materials are also saved. From this point of view, within the scope of this study, it is aimed to evaluate the waste vermiculite mine, which is an important environmental problem and has not yet found an evaluation area, instead of aggregate in the concrete. In this context, the characterization of waste vermiculite (AVK) replaced with fine aggregate and the chemical and mineralogical compositions of the obtained concrete samples were revealed by SEM-EDS, FTIR and XRD analyzes, and the chemical and mineralogical changes in the structure of the concrete were associated with the compressive strength of the concrete. According to the results obtained, the decrease in the compressive strength of the concrete with the increase of the waste vermiculite dose and the bound functional O-H groups seen in the chemical structure of the concrete show that the concrete mixture needs extra water. However, as a result of the obtained results, it has been shown that concrete containing low doses of waste vermiculite can be used in structural areas where the compressive strength is not important.

Keywords: Aggregate, Waste vermiculite, Concrete, FTIR, SEM-EDS, XRD

^{*b} Merve SOĞANCIOĞLU KALEM; msogancioglu@ktun.edu.tr, Tel: (0332) 5121612, orcid.org/0000-0002-8874-1801

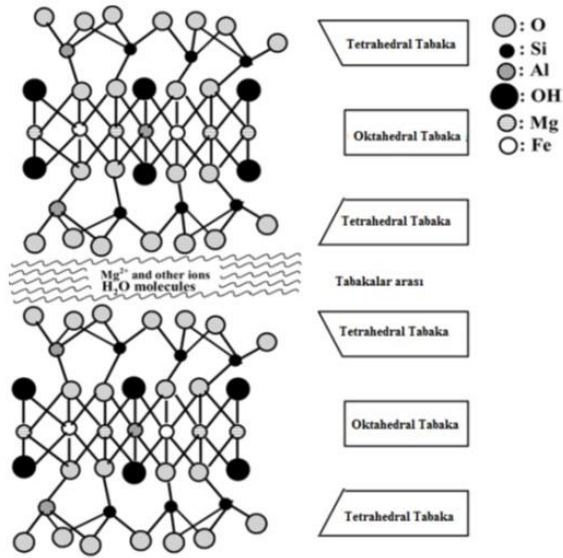
^a orcid.org/0000-0002-5898-2137

1. Giriş

1. Introduction

Vermikülit, endüstriyel olarak genişleme özelliği olan tüm mika grubu minerallerini (biotit, flogopit ve hidrobiotit) içine alan genel bir terim olarak adlandırılmaktadır. Mineralojik olarak ise tek başına bir grubu temsil etmekte olup sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da tanımlanabilir. Rengi sarımsı kahve, yeşil bazen de siyah olabilir (DPT, 2001).

Vermikülit, katmanlı bir yapıda olup içinde su molekülleri bulunduran hidratlaşmış levha magnezyum-alüminyum-demir silikatlarından oluşan bir 2:1 filossilikat mineral grubudur (Duman & Tunç, 2008). Kristal yapısı ise Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Vermikülitin kristal yapısı (Duman ve Tunç, 2008)

Figure 1. Crystal structure of vermiculite

Şekil 1'e göre iki tetrahedral tabaka arasında oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Vermikülitte, kısa bir zaman içinde ve yüksek sıcaklıklarda yaklaşık 1000°C ısıtma ile katmanlar arasında bulunan su, su buharına dönüşür ve vermiculit silikat katmanında hasar oluşturur ve genişleme meydana gelir (Marcos & Radriguez, 2011). Genleşmenin neticesinde, vermiculit yığın yoğunluğu yaklaşık 0.8 g/cm³'ten 0.08 g/cm³'e kadar azalmaktadır. Yığın yoğunluğundaki azalma, genişletirmenin yapıldığı fırının performansına ve vermiculitin kalitesine bağlıdır. Isıl işlemler neticesinde yaklaşık 30 katlık genişleme olmaktadır (Strand, 1983; Loughbrough, 1991, DPT, 2001).

Dünyada birçok ülkede vermiculit rezervleri bulunmaktadır. En önemli rezervler ise ABD ve Güney Afrika Cumhuriyeti'nde (GAC) bulunmaktadır. 2019 yılı rakamları itibari ile GAC'de 158013 ton vermiculit üretimi vardır (Word Mining Data 2019, 2021).

Türkiye'de vermiculit yataklarının varlığı pek bilinmemekle beraber jeolojik çalışmalar esnasında ofiyolit kuşaklarında vermiculit oluşumlarına rastlanmıştır (Toksoy, 1997). Bilinen vermiculit yatakları Malatya-Darende-Kuluncak, Eskişehir-Sarıcakaya, Sivas-Yıldızeli-Karakoç ve Elazığ-Harput-Arduçluk zuhurlarındadır (DPT, 2001).

Son yıllarda Sivas-Yıldızeli-Karakoç zuhurlarının incelenmesi neticesinde, bu zuhurlardaki cevherleşmenin olduğu zaman açısından Kuluncak zuhurlarıyla benzerlik gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Bu cevherleşme piroksen ve amfibol içeriğinin fazla olduğu ultramafik kütlelerin alkali damar kayalarıyla kesilmesi neticesinde oluşmuştur.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nce yapılan değerlendirmeler ve saha gözlemleri neticesinde genişleme özelliği iyi olan 2.750.000 ton ve düşük kaliteli 2.475.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermiculit cevheri tespit edilmiştir (DPT, 2001). Yapılan hesaplamalar yaklaşık 6-7 milyon ton vermiculit rezervi olduğunu göstermektedir (Aras, 1984).

Dünyada vermiculit üretimi açık ocak işletmeciliği ile yapılmaktadır. Kalite, tenör ve miktar açısından ekonomik sınırlar içinde kalan cevher zenginleştirme ünitesinde gerekli zenginleştirme yapıldıktan sonra genişletirmeye tabi tutulur (DPT, 2001).

Cevher ocaktan çıkarılarak, primer kırıcıdan geçirilir daha sonra yaş elek metodu ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır. Harmanlamadan sonra konsantreler toplanır, kurutulur ve boyutlarına ayrılarak genişletirme ünitesine gönderilir ve 900-1000°C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek ani ısı etkisiyle genişletirilir. Genleşmiş kısımlar harmanlama ile genişlenlerden ayrılır. Ayrılan kısım satışa hazır hale getirilir (Toksoy, 1997).

Vermikülitin ham halinin kullanımı oldukça azdır. Endüstride en çok tercih edilen formu genişletilmiş halidir. 1950'li yıllara kadar vermiculit ısı yalıtım özelliği ile dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken yapılan çalışmalarla diğer alanlarda da kullanılabileceği sonucuna

ulaşmıştır. ABD’de, geliştirilmiş vermikülit genellikle inşaat ve tarım alanlarında kullanılmaktadır. Ses ve ısı yalıtımında geliştirilmiş vermikülit, hafif yapı malzemelerinin yapımında portland çimento ile birlikte iyi sonuç vermektedir. Vermikülit dökümhanelerde ve çelik fabrikalarında yalıtım özellikleri, kolay uygulanması, hafifliği, ucuz maliyeti ve ateşe dayanıklı olması sebebiyle tercih edilir (Toksoy, 1997).

Vermikülitin harmanlama tekniği ile ayrılan geliştirilmiş kısımdan geriye kalan yan ürün ise vermikülit atığı olarak meydana gelmektedir. Bu atıklar geliştirilmiş vermikülit gibi bir kullanım alanı olmadığından bertarafı ve uzaklaştırılması gereken bir atık konumunda olup çeşitli çevresel problemlere neden olabilmektedir. Maden ocaklarından çıkarılan vermikülitin işlenmesinden meydana gelen bu atıklar sadece düzenli ya da düzensiz (vahşi) depolama alanlarında depolanmakta ve farklı bir kullanım alanı bulamamaktadır.

Bilimsel olarak incelendiğinde genişmiş vermikülitin beton gibi yapı malzemeleri içerisinde değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Hafif agrega yerine geliştirilmiş vermikülit kullanılmasıyla üretilen hafif harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı vermikülit/çimento karışımlarına sahip harç numuneleri üretilip bu karışımları 28 günlük standart kütleme sonrası 300°C, 600°C, 900°C ve 1100°C sıcaklığa maruz bırakarak fiziksel özelliklerini tespit etmek için birim ağırlık, su emme, ultra ses hızı, boşluk oranı, mekanik özelliklerini tespit etmek için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney verilerine göre, geliştirilmiş vermikülitin kullanılmasıyla yangına dayanıklı çimento esaslı hafif kompozit kaplama malzemesi üretilebileceği ayrıca geliştirilmiş vermikülitin yapılarda yalıtım özelliğine sahip sıva uygulamalarında hafif agrega olarak kullanılabilmesi sonucuna varmıştır (Çoşar, 2020).

Başka bir çalışmada geliştirilmiş vermikülit kullanarak, farklı oranlarda silis dumanı içeren çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık etkisindeki mekanik dayanımlarını araştırmıştır. Üç farklı vermikülit/çimento oranına sahip karışımlara, çimento ağırlığının %5, %10 ve %15’i oranında silis dumanı ekleyerek numuneler üretilmiştir. Ürettiği numuneleri 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra eğilme, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri

yapmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda, yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı içeren numunelerin, silis dumanı içermeyen numunelere göre, basınç dayanımlarının yüksek, ultrases geçiş hızlarının ve eğilme dayanımlarının düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Vermikülitin, çimento ve diğer bağlayıcılar ile birlikte yalıtım ve ısıya dayanıklı yapı malzemesi üretiminde kullanılmasıyla ilgili daha çok çalışmaya ihtiyaç olduğuna değinmiştir (Kaya, 2011).

Yüksek sıcaklık altında içinde geliştirilmiş vermikülit bulunan çelik tel ilaveli çimento esaslı kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı vermikülit/çimento içeren harçlara farklı oranlarda 6 mm uzunluğunda ve 0.16 mm çapında çelik tel ilave ederek numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneleri 20°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonra ortam sıcaklığına kadar soğutup numunelerin eğilme, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımlarını araştırmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında, ultrases geçiş hızlarında azalma olduğu sonucuna ulaşmıştır (Şahin, 2011). Başka bir çalışmada, geliştirilmiş vermikülit tozu kullanarak ürettiği köpük betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Köpük beton üretiminde, 3 farklı geliştirilmiş vermikülit tozu, 3 farklı çimento miktarı ve 3 farklı köpük miktarı kullanmıştır. Ürettiği numunelere 28 gün kürlendikten sonra ultrases geçiş hızı, porozite, su emme, birim ağırlık, kılcal su emme, ısı iletkenlik ve eksenel basınç deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda karışımlarda köpük oranı ve geliştirilmiş vermikülit oranı arttıkça su emme oranı ve porozitenin arttığı, birim ağırlığının, basınç dayanımının ve ısı iletkenlik katsayısının azaldığı sonucuna ulaşmıştır (Türeyen, 2019). İnce agrega yerine %5 ve %10 oranlarında vermikülit kullanarak betonarme kırıının eğilme özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, uygun oranı tespit ettikten sonra tek donatılı kiriş ve çift donatılı kiriş kullanarak DENEMELER yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda betonarme kırıinde vermikülitin %5 oranında kullanılabilir olduğu ve betonarme kırıin kendi ağırlığının %10’a kadar azaldığı sonucuna varmışlardır (Naveenkumar vd., 2021). Başka bir bilimsel çalışmada geliştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilen mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı kendi kendine çatlak iyileştirmesini incelemişlerdir. İlk olarak geliştirilmiş vermikülit ile mikroorganizmaların adsorpsiyon ve immobilizasyonu etkili olmuştur ve immobilizasyondan sonra mikroorganizmalar

canlanıp güçlü aktiviteye sahip olmuştur. İkinci olarak geliştirilmiş vermikülit farklı yöntemlerle sarılmıştır. Sonuç olarak geliştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilmiş mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini ortaya koymuş ve çatlağın kendi kendine iyileşme etkisini doğrulamışlardır (Zhan vd., 2021).

Kum yerine %30 ve %60 olmak üzere genişmiş vermikülit kullanarak çimento esaslı harçların özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, genişmiş vermikülit içeren çimento esaslı harçların, içermeyen harca göre işlenebilirliği daha yüksek olmuştur. Çalışmalarının sonunda genişmiş vermikülitin gözenekli yapısının su emmeyi arttırdığı ve buna bağlı olarak harcın birim ağırlığının ve basınç dayanımının azalmasına sebep olduğu, birim ağırlığının azalmasına ise harcın ısı direnci ve termal stabilitesi açısından sağlamakta olumlu etkiye sahip olduğu sonucunu elde etmişlerdir (Mo vd., 2018).

Vermikülit ve silis dumanı ile üretilen çimento esaslı hafif sıva harçlarının özellikleri laboratuvar ortamında ve yüksek sıcaklıklarda incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonunda silis dumanı ilavesinin yüksek özgül yüzeyi sebebiyle vermikülit esaslı sıva harçların akışkanlığını ve gözenekliliğini azalttığı ancak silis dumanı içermeyen harçların vermikülit içeriği arttıkça gözenekliliğinin arttığı, vermikülit içeren harçlarda su emme miktarının arttığı, ısıl iletkenlik katsayısının azaldığı, silis dumanı yüzdesi arttıkça mukavemetinin arttığı sonucu elde edilmiştir. Buna ilaveten yazarlar vermikülitin yangına karşı dayanıklı bir malzeme olduğuna ve dolayısıyla vermikülit içeren harçların da bu açıdan dayanıklı olduğuna değinmişlerdir (Köksal vd., 2015). Ayrıca bu yazarların gerçekleştirdiği başka bir çalışmalarında çelik liflerin ve geliştirilmiş vermikülitin yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonunda, 900°C'ye kadar basınç ve eğilme mukavemetinin korunduğu, basınç ve eğilme mukavemeti için maksimum uygulanabilir sıcaklığın 900°C olduğu, çelik liflerin eklenmesinin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği, geliştirilmiş vermikülit içeren hafif harçların yüksek sıcaklıklardaki veriminin kullanılan lif miktarı ile bağlantılı olduğu sonuçlarını elde etmişlerdir (Köksal vd., 2014).

Vermikülit ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalara bakıldığında çalışmaların geliştirilmiş/saf vermikülit ile yapıldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar daha detaylı tarandığında vermikülitin elde edilmesi sırasında meydana gelen vermikülit atıkları ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda vermikülitin kullanıldığı yapı malzemesi ve beton içerisinde değerlendirilmesi durumunda, bu malzemeler içerisinde meydana getireceği kimyasal ve mineralojik değişimlerin incelenmediği ve sadece mekanik ve fiziksel özelliklerin üzerinde durulduğu tespit edilmiştir. Bilindiği üzere betonun mekanik ve fiziksel özellikleri çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımı, ortam koşulları, kür koşulları gibi dış faktörlerin yanında, betonu oluşturan su, çimento, agrega, çeşitli katkıların varlığı ve bunların miktar ve özellikleri gibi iç faktörlerden etkilenmektedir. Betonu oluşturan bu bileşenler, bir dizi kimyasal reaksiyon sonucu betona dayanım kazandırmaktadır. Bu noktada sertleşmekte olan betonun bünyesinde meydana gelen bu reaksiyonları bu bileşenlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri doğrudan etkilemektedir.

Buradan hareketle bu çalışmada çözülmesi gereken bir çevresel sorun olan vermikülit atıklarının geri kazanılması ve beton içerisinde ince agrega yerine değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda betonda meydana gelen kimyasal ve mineralojik değişimler de incelenmiş ve bu değişimler ile betonun basınç dayanımı arasındaki ilişki ortaya koyulmuştur.

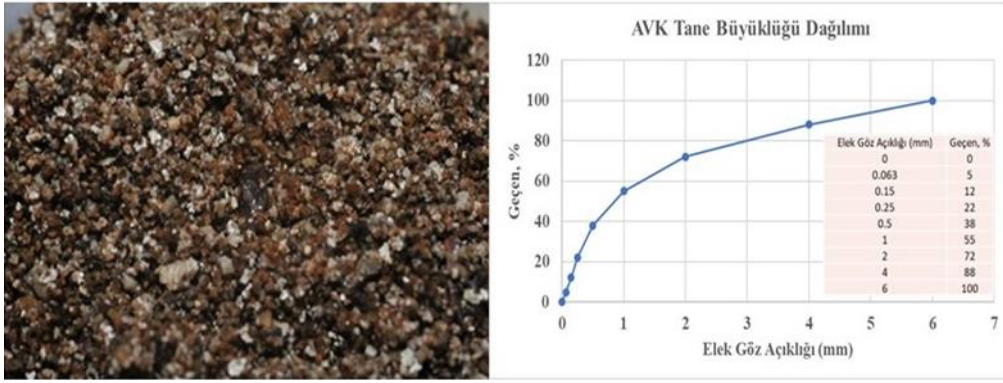
2. Materyal ve metot

2.1. Material and method

2.1.1. Atık vermikülit eldesi

2.1.1.1. Waste vermiculite

Çalışmada kullanılan atık vermikülit Sivas ilinde faaliyet gösteren MS Madencilik Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Kullanılan atık vermikülit Şekil 2'de verilmiştir. Belirtilen tesis tarafından çıkarılan vermikülitin bir kısmı içerdiği mineralojik safsızlıklardan dolayı geliştirme işlemine tabi tutulamayıp atık haline gelmektedir. Bu nedenle çalışmada bu katkı "atık vermikülit (AVK)" olarak adlandırılmıştır. Temin edilen AVK'nın yoğunluğu 3.27 g/cm³ olup, su emme oranı ağırlıkça %155'tir. Ayrıca kullanılan AVK 6.5 g/cm³ yüzey alanına sahiptir.



Şekil 2. Atık vermikülit
Figure 2. Waste vermiculite

2.2. Beton karışımının hazırlanması

2.2. Preparation of concrete mixes

Çalışma kapsamında C30 sınıfı küp beton örnekleri hazırlanmıştır. Çimento olarak CEM II 42.5 çimento, agrega (TS206-TS131515 standartlarına uygun), elde edilen atık vermikülit ve şebeke suyu beton harcının hazırlanmasında kullanılmıştır. Agrega, Konya Karaömerler çakıl ocağından temin edilerek, 0-4, 4-11.2 ve 11.2-22.4 mm boyutlarında karışıma dahil edilmiştir. Beton içerisindeki ince agrega C30 beton bileşimi esas alınarak ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında atık vermikülit (AVK) ile yer değiştirilmiştir. Bu yer değiştirme oranlarına esas çalışmaya başlamadan önce çeşitli oranlarda ön denemeler yapılarak karar verilmiştir. Ayrıca referans olarak da katkısız C30 sınıfı beton örneği üretimi yapılmıştır. Karışımlar betoniye içerisinde hazırlanmış olup 10x10x10 cm küp numunelere yerleştirilmiştir. Kalıplardan çıkarılan beton örnekleri 7 ve 28 günlük kür havuzlarında kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3).

Bütün beton karışımlarında çimento miktarı 380 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan su ve agrega miktarları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Numune kalıplarına dökülmüş taze beton örnekleri ve kürleme işlemi

Figure 3. Fresh concrete samples and curing process

Tablo 1. Kullanılan agrega, çimento ve su miktarları
Table 1. Amounts of aggregate, cement and water

Numune Kodu	Numune adı ve açıklaması	Agrega			Su Lt/m ³	CEM II 42.5 R Kg/m ³	Hacimce Karışım Oranları			
		0-4 mm Kg/m ³	4-11.2 mm Kg/m ³	11.2-22.4 mm Kg/m ³			Agrega	AVK	Su	Çimento
Ş	Şahit (Katkısız)	948	185	538	220	380	%68	-	%22	%10
AVK5	%5 Atık vermikülit içeren beton numunesi	901	185	538	220	380	%59	%9	%22	%10
AVK10	%10 Atık vermikülit içeren beton numunesi	853	185	538	220	380	%51	%17	%22	%10
AVK20	%20 Atık vermikülit içeren beton numunesi	758	185	538	220	380	%42	%26	%22	%10

2.3. Atık vermikülit ve sertleşmiş beton karakterizasyonu

2.3. Characterization of waste vermiculite and concrete

Atık vermikülit ve bu atıklardan üretilen sertleşmiş betonların yüzey topoğrafyası ve elementel bileşiminin belirlenmesi için, atığın ve beton örneklerinin görüntüsünün alındığı taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılım spektroskopisi (SEM-EDS) teknikleri kullanılmıştır. SEM-EDS analizi 28 gün kür işlemine tabi tutulan beton numuneleri üzerinde yapılmıştır. Elektronların yansması için örnekler altın kaplama ile kaplanmış ve Zeiss marka EVO-LS10 taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilerek görüntülenmiştir.

Sertleşmiş betonların ve atık vermikülitin yapısındaki fonksiyonel bileşikleri belirlemek için FTIR analizi tercih edilmiş, Thermo Scientific Nicolet iS5 FTIR Spektrometresi cihazı

kullanılmıştır. Ayrıca tüm numunelerin mineralojik yapısını incelemeye dayalı olarak kalitatif özelliklerini belirlemek için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Bruker marka D8 ADVANCE model X-ışını difraktometresi cihazı kullanılmıştır. Beton numunelerinin basınç dayanımı 200 ton kapasiteye sahip tek eksenli basınç presi ile tespit edilmiştir.

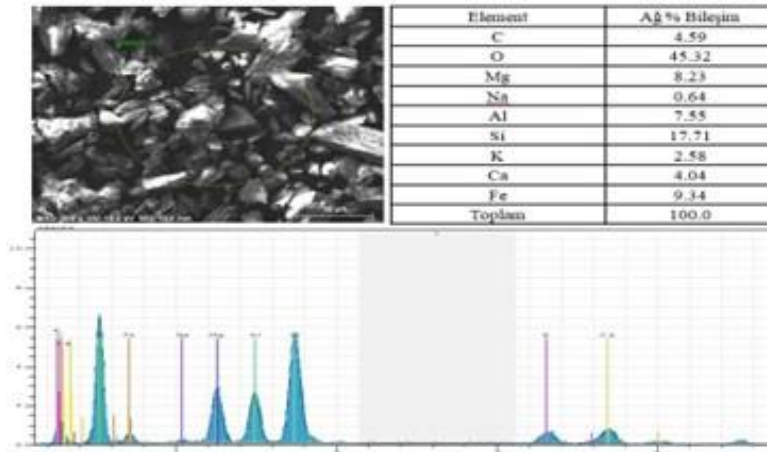
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Atık vermikülit karakterizasyonu

3.1. Waste vermiculite characterization

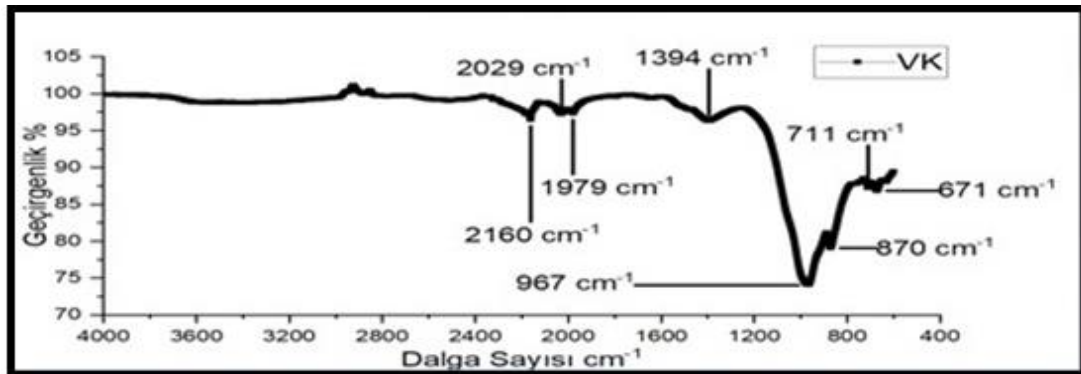
Şekil 4'te atık vermikülitin 500 kat büyütmedeki görüntüsü ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Atık vermikülitte silika bileşimine ilave olarak oksijen, alüminyum, karbon, magnezyum, potasyum, kalsiyum ve demir pikleri tespit edilmiştir.



Şekil 4. Atık vermikülitin (AVK) 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 4. Results of SEM-EDS of waste vermiculite

Atık vermikülitin içerdiği fonksiyonel bileşimleri gösteren FTIR spektrumları Şekil 5'te verilmiştir.



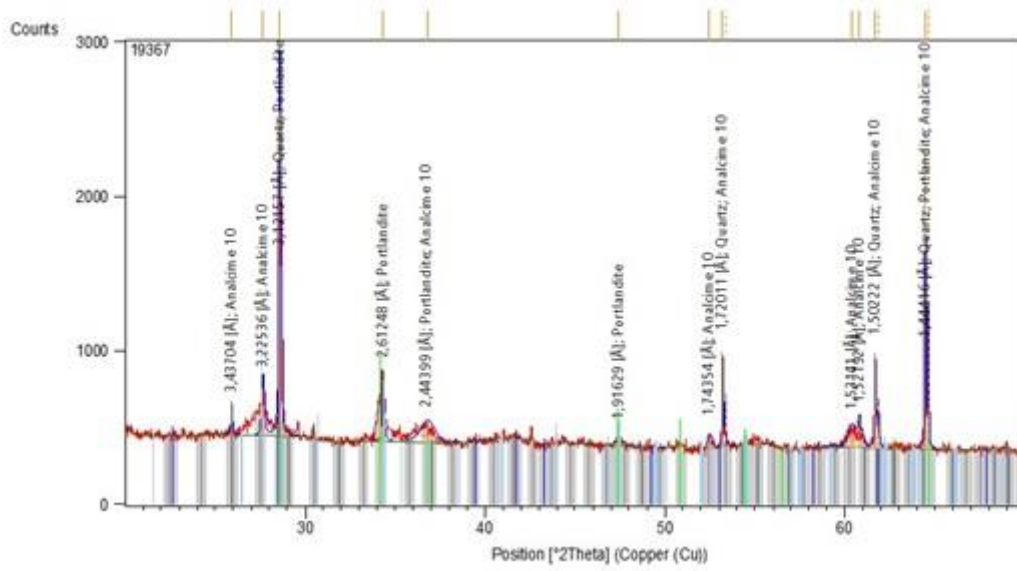
Şekil 5. Atık Vermikülitin (AVK) FTIR spektrumu

Figure 5. FTIR spectra of waste vermiculite

Yapılan FTIR analizine göre, atık vermikülitin mineralojik yapısından kaynaklanan şiddetli gerilme göstermiş S-C=N pikleri (2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1}) tespit edilmiştir. Buna ilave olarak atığın yapısındaki silisyum bileşenlerinden kaynaklı şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri (2034 cm^{-1} , 2030 cm^{-1} ve 2029 cm^{-1}) tespit edilmiştir. Ayrıca zayıf eğilme gösteren C-H pikleri (1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1634 cm^{-1} ve 1557 cm^{-1}), şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme

sülfonik klorür pikleri (1409 cm^{-1} ve 1394 cm^{-1} 'de) ve C-H-S pikleri ($1300\text{-}700\text{ cm}^{-1}$) belirgin fonksiyonel bileşik pikleridir.

Atık vermikülitin sahip olduğu mineralojik bileşimi belirlemek için gerçekleştirilen XRD analizi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. AVK numunesinin kimyasal bileşiminden kaynaklanan portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kuartz (SiO_2) ve analcime ($\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\cdot\text{H}_2\text{O}$) bileşiklerinin baskın mineral bileşimler olduğu gözlenmiştir.



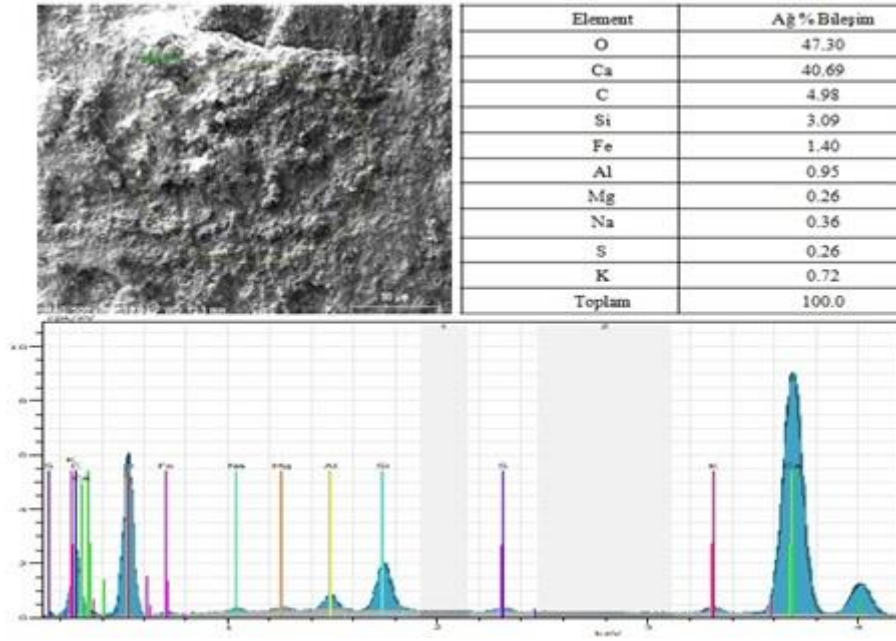
Şekil 6 . Atık Vermikülitin (AVK) XRD grafiği
Figure 6. XRD graphic of waste vermiculite

3.2. Sertleşmiş beton karakterizasyonu

3.2. Characterization of concrete

Şekil 7'de 28 gün küre tabi tutulmuş şahit numuneye (katkısız) ait SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Katkısız şahit beton

karışımında betonun inorganik yapısından kaynaklanan oksijen, kalsiyum, karbon, silisyum, demir, alüminyum, magnezyum, sodyum, sülfür ve potasyum pikleri baskın olarak tespit edilmiştir ve ağırlıkça en yüksek orana sahip elementler, çimento bileşiminden kaynaklanan oksijen ve kalsiyum olmuştur.

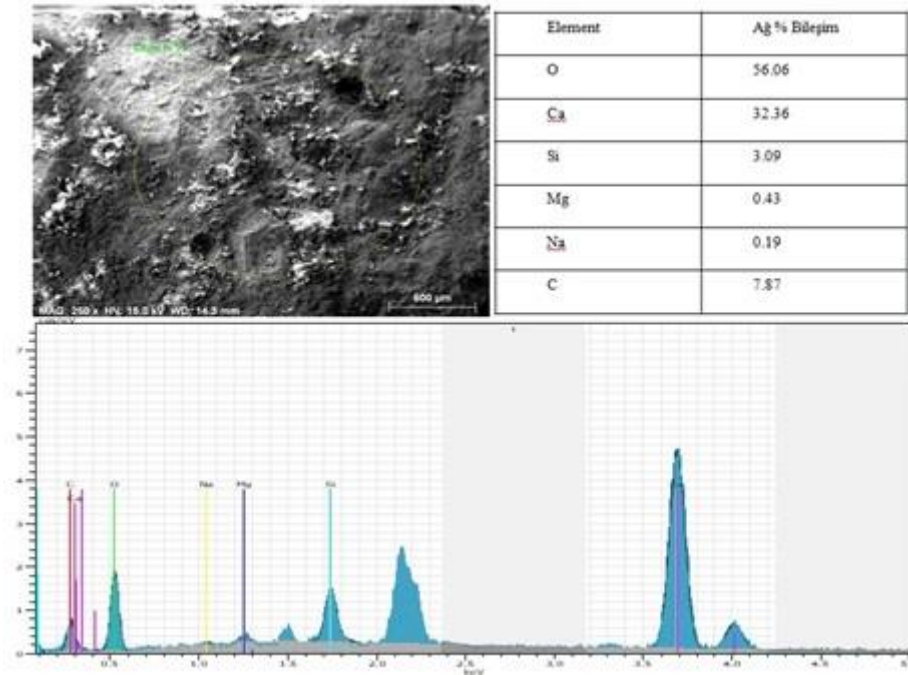


Şekil 7. Şahit beton numunesinin 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 7. Results of SEM-EDS of reference concrete

Şekil 8’de ise AVK5 numunesine ait 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi grafiği ve verileri verilmiştir. Ağırlıkça en yüksek orana sahip elementler oksijen ve kalsiyumdur. Bunlara ilaveten silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon pikleri tespit edilmiştir. Katkısız şahit numuneye kıyasla kalsiyum elementinde düşüş, C

ve Mg elemental bileşimlerinde artış tespit edilmiştir. Çimentodaki kireç taşının yapısından kaynaklanan Ca miktarındaki bu düşüşün, atık vermikülitin betonun hidrasyonunda doğrudan etkili olması sonucunda bu hidrasyon olayının hızlanmasından kaynaklı olduğu söylenebilir.

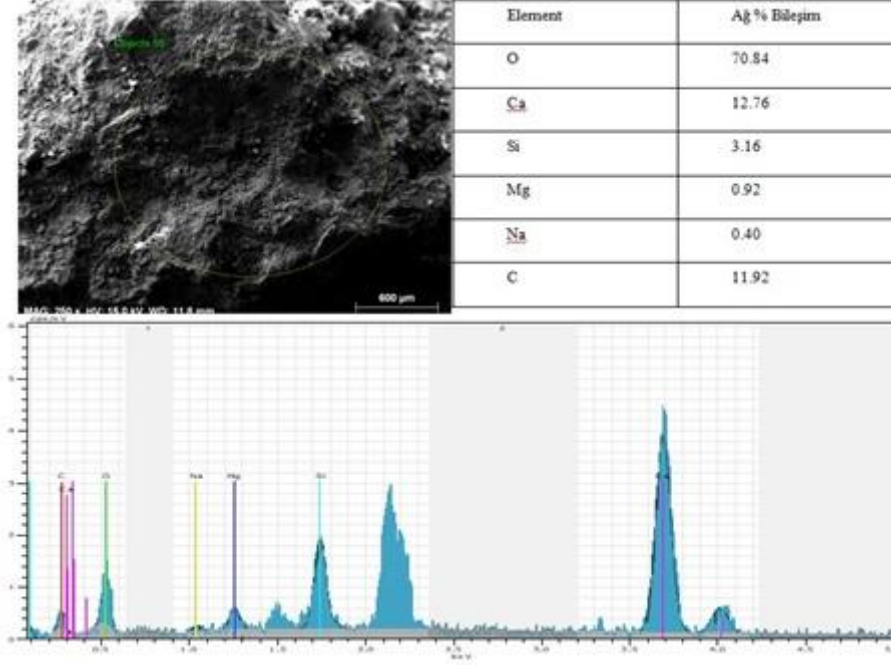


Şekil 8. AVK5 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 8. Results of SEM-EDS of AVK5 (x250)

Şekil 9'da verilen AVK10 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına bakıldığında, AVK5 numunesine kıyasla, atık vermikülit dozundaki artışa bağlı olarak ağırlıkça oksijen, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon elementlerinde artış tespit edilmiştir. Bu durum aynı zamanda atık vermikülitin beton içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Şahit numuneye

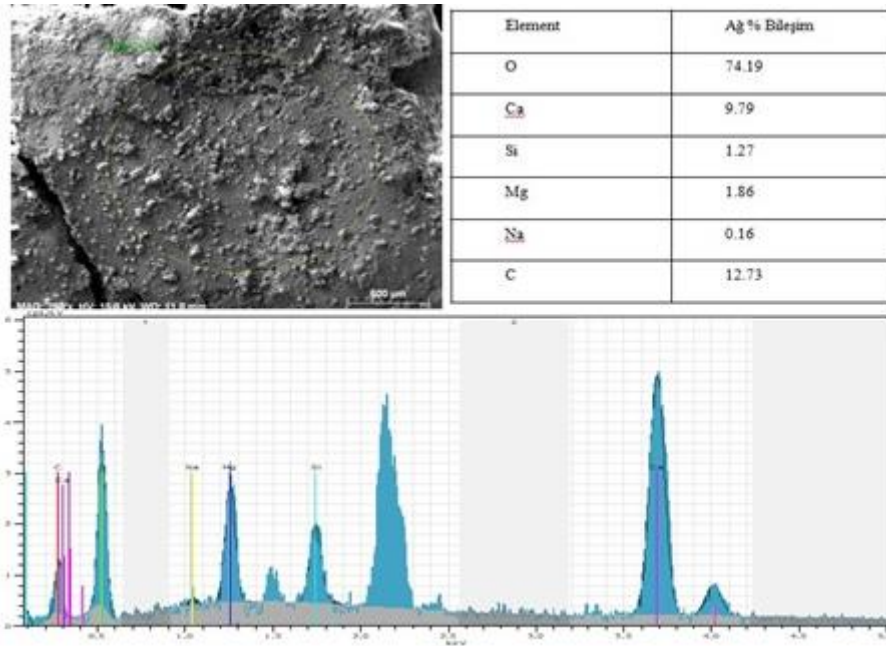
kıyasla kalsiyum elementi oranında düşüş, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon oranlarında artış olması, betonun hidrasyonu ile ilgili olumlu bir sonuç göstermiştir. Sodyum ve karbon elementlerinin artışını ise kimyasal yapıdan bağımsız olarak atık vermikülit yapısına giren safsızlıklara bağlamak mümkündür.



Şekil 9. AVK10 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi
Figure 9. Results of SEM-EDS of AVK10 (x250)

AVK20 numunesi için atık vermikülit dozu arttıkça ağırlıkça oksijen, magnezyum ve karbon elementleri oranında artış, kalsiyum oranında azalma tespit edilmiştir. Atık vermikülit dozu AVK5 ve AVK10 numunelerine göre daha fazla olduğu için mineral bileşimi sağlayan elementlerin miktarının da arttığı pik şiddetlerinden açıkça

gözlenmektedir. Aynı şekilde diğer dozlara göre Ca miktarının daha belirgin azalması atık vermikülit miktarının artışı ile birlikte hidrasyon mekanizmasının daha hızlı gerçekleştiğinin bir göstergesidir (Şekil 10).

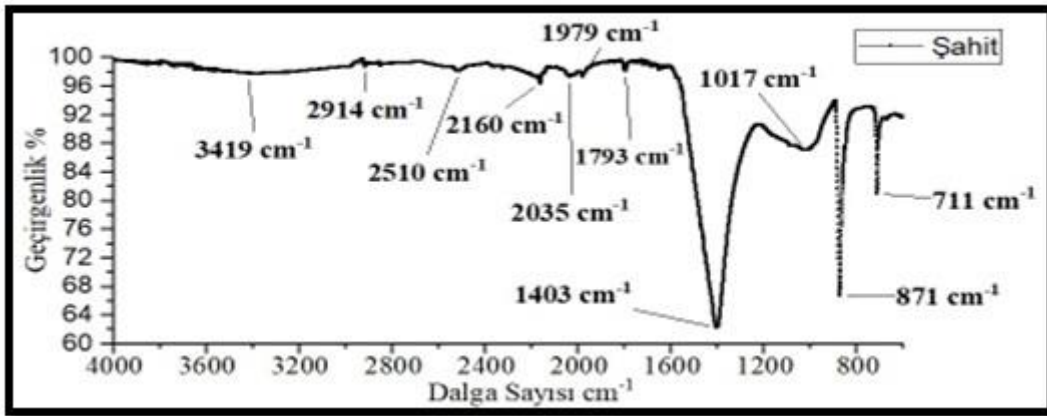


Şekil 10. AVK20 beton numunesinin 250 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları

Figure 10. Results of SEM-EDS of AVK5 (x250)

Şekil 11’de katkısız beton numunesinin içerdiği fonksiyonel grupları gösteren FTIR spektrumları verilmiştir. Şahit beton karışımında 3550-3200 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren O-H pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} zayıf gerilme gösteren C-O piki tespit edilmiştir. 3000-2840 aralığında orta gerilme gösteren C-H piki tespit edilmiştir. 2175-2140 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2140-1990 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren

N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 2000-1650 cm^{-1} aralığında zayıf eğilme gösteren C-H pikleri, 1815-1785 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren C=O pikleri tespit edilmiştir. 1410-1380 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 1300-700 cm^{-1} aralığında kalsiyum silika hidrat varlığını gösteren ve çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran C-S-H pikleri tespit edilmiştir. 1017 cm^{-1} , 871 cm^{-1} ve 711 cm^{-1} pikleri $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bileşiğine atfedilmiştir .



Şekil 11. Şahit numunesinin FTIR spektrumları

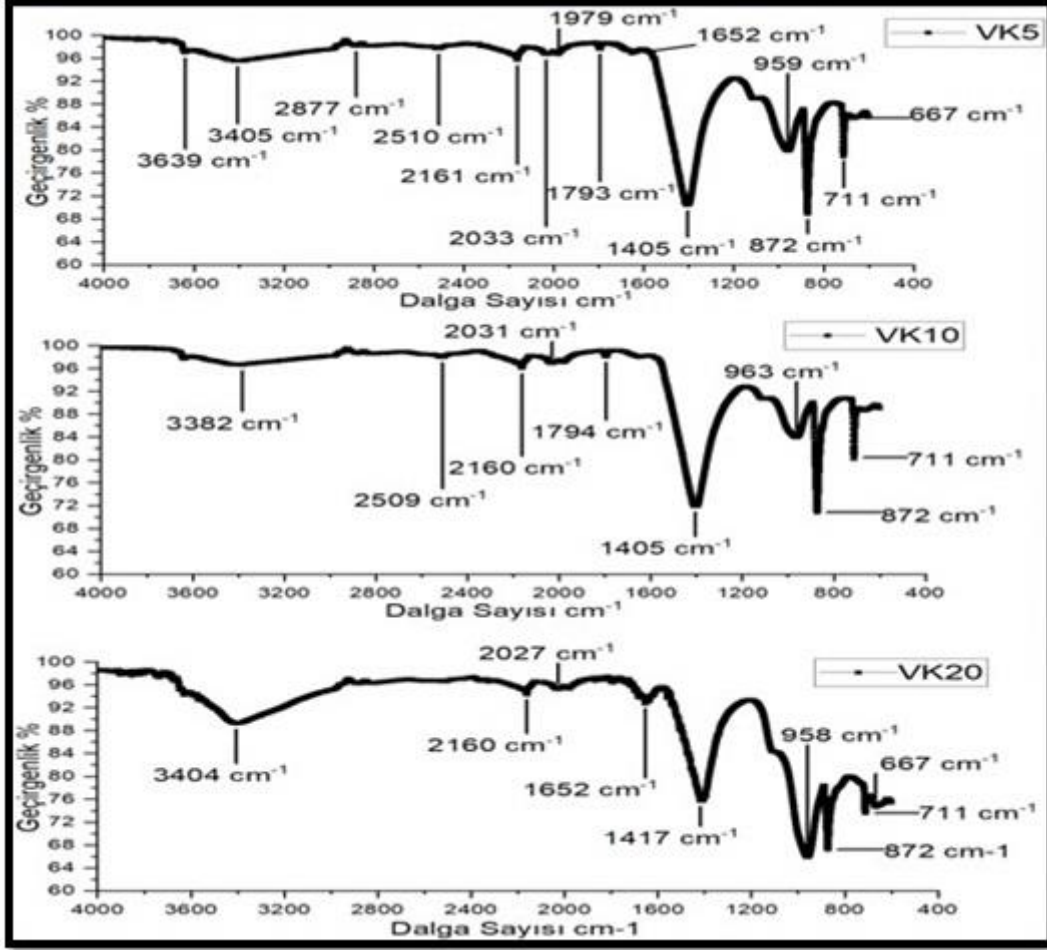
Figure 11. FTIR spectra of reference concrete

Şekil 12’de verilen AVK katkılı betonların FTIR bulgularına göre 3700-3600 cm^{-1} aralığı düşük yoğunluklu O-H bağlarını temsil etmekte olup kil bileşiklerinin varlığına atfedilmiştir (Bosch Reing ve ark., 2002). 3405 cm^{-1} , 3404 cm^{-1} ve 3382 cm^{-1}

’de şiddetli yayvan O-H gerilme pikleri, 2877 cm^{-1} ’de orta gerilme gösteren kalsiyum hidroksit varlığına işaret eden C-H pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} ve 2509 cm^{-1} ’de tespit edilen pikler şahit numunesinde (Şekil 10) de tespit edilmiş olup

beton bileşiminden kaynaklanan CaCO_3 bileşiğine atfedilmiştir. 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri, 2033 cm^{-1} , 2031 cm^{-1} ve 2027 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 1979 cm^{-1} , 1794 cm^{-1} , 1793 cm^{-1} ve 1652 cm^{-1} 'de zayıf eğilme gösteren C-H pikleri tespit edilmiştir. VK20 numunesinde 1417 cm^{-1} 'de orta eğilme gösteren

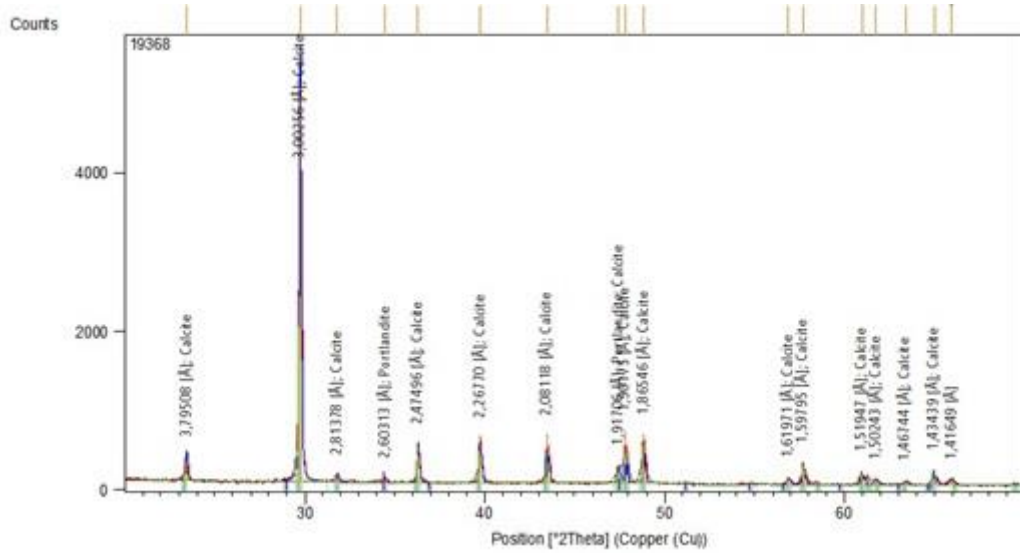
O-H piki tespit edilmiştir. O-H bağları oluşumu tespit edilen piklerde ise vermikülit dozu arttıkça piklerin derinliğinde artış tespit edilmiştir. 1405 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür piki tespit edilmiştir. $1300-700 \text{ cm}^{-1}$ aralığında C-S-H pikleri tespit edilmiştir. 667 cm^{-1} 'de AlO bağları tespit edilmiştir.



Şekil 12. AVK5, AVK10, AVK20 numunelerinin FTIR spektrumları
Figure 12. FTIR spectra of AVK5, AVK10, AVK20

Şahit beton numunesinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 13'te verilmiştir. Bu analiz sonucuna göre baskın bileşiklerin betonun doğal yapısını temsil eden kalsit (CaCO_3) ve portlandit (Ca(OH)_2) olduğu tespit edilmiştir. Beton karışım suyu

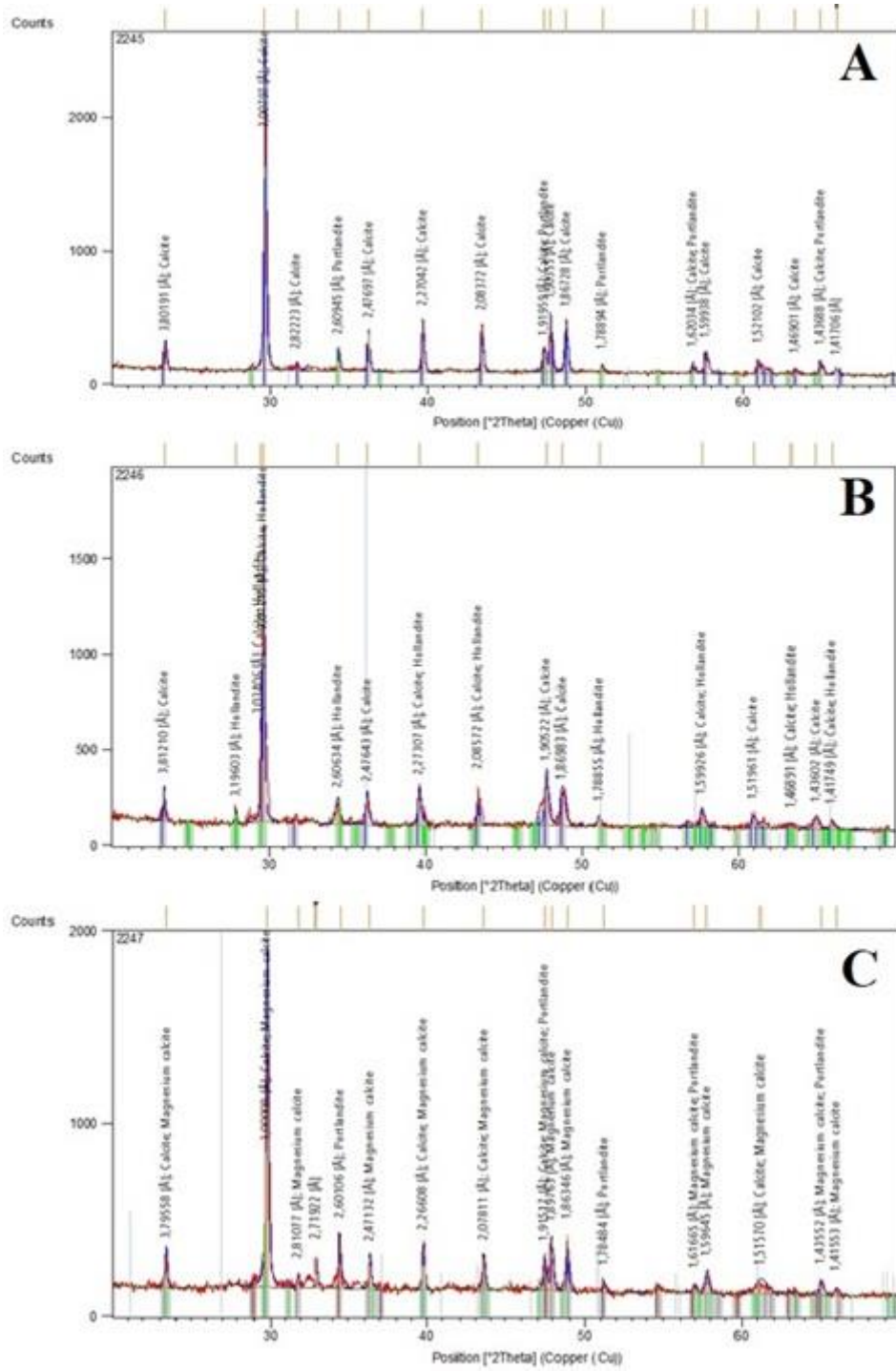
çimentonun yapısından kaynaklanan Ca iyonları ile aşırı doygun hale gelince priz süreci başlamış ve hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit bileşikleri oluşmuştur. Bu sayede betonun dayanım kazanma süreci başlamıştır.



Şekil 13. Şahit numunesinin XRD grafiği
Figure 13. XRD graphic of reference concrete

AVK5, AVK10 ve AVK20 numunelerinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 14’te verilmiştir. Atık vermikülit içeren beton karışımlarının XRD bulgularına bakıldığında baskın mineralojik bileşiklerin kalsit ve portlandit olduğu gözlenmiştir. %10 atık vermikülit içeren numunelerde ise vermikülitin kimyasal bileşiminden kaynaklanan hollandite

(Ba(Mn₆,Mn₂)O₁₆) bileşiği gözlenmiştir. Atık vermikülit dozu arttıkça hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit miktarlarının azaldığı pik şiddetlerinin azalmasından belli olmaktadır. Buradan hareketle beton bünyesindeki atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonunu azalttığı ve betona geç dayanım kazandırdığı söylenebilir.



Şekil 14. A) AVK5, B) AVK10 ve C) AVK20 beton numunelerinin XRD grafiği
Figure 14. XRD graphics of A) AVK5, B) AVK10 ve C) AVK20

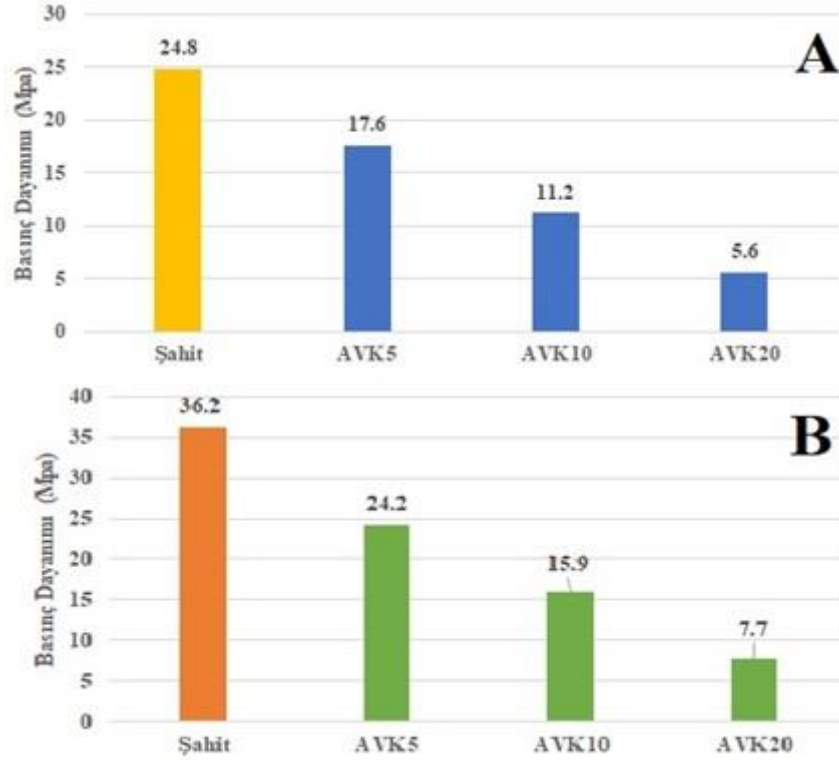
28 günlük kür işlemine tabi tutulmuş sertleşmiş şahit, AVK5, AVK10 ve AVK20 betonlarının birim hacim kütle değerleri sırasıyla 2.15 t/m^3 , 2.10 t/m^3 , 2.04 t/m^3 ve 1.92 t/m^3 olarak elde edilmiştir. Betonda AVK dozu arttıkça betonun birim hacim kütle değerleri de içerdiği atık vermikülitin hafif yapıllı olmasından dolayı azalış göstermiştir. Katkısız şahit ve atık vermikülit içeren beton karışımlarının 7 günlük ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 15'te verilmiştir. AVK dozu arttıkça betonun basınç dayanımı, birim

hacim kütle değerine paralel olarak azalmıştır. Atık vermikülit katkılı beton numunelerinde katkısız şahit numunelere kıyasla basınç dayanımı değerlerinde önemli ölçüde düşüş meydana gelmiş, buna ilaveten atık vermikülit dozu arttıkça ortalama basınç dayanım değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bunun nedeni, FTIR ve XRD bulgularında da tespit edildiği gibi, vermikülitin yapısındaki zayıf mineralojik yapıların varlığıdır. Aynı zamanda yine FTIR bulgularında görülen O-H piklerinin artışı nedeniyle vermikülitin, beton

karışım suyunu absorbe ettiği ve bunun betonun hidrasyonu üzerinde olumsuz bir etki yaratarak ve basınç dayanımının düşmesine neden olduğu söylenebilir. Bu azalma, Şekil 13'teki XRD bulgularında tespit edilen kalsit ve portlandit miktarlarının azalması, Şekil 11'de verilen FTIR spektrumlarında tespit edilen O-H bağlarının artışı ile açıklanmaktadır.

Aynı zamanda FTIR bulgularında, betonun ve vermikülitin kimyasal bileşiminden farklı olarak ortamda görülen ve safsızlık olduğu düşünülen

maddeler ve vermikülit dozunun artışı ile birlikte çimento hidrasyonu vasıtasıyla sağlayarak dayanıklılık sağlayan C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeli oluşumundaki azalmalar ve buna bağlı olarak meydana gelebileceği düşünülen mikro çatlaklar betonun ihtiyaç duyduğu su miktarını artırarak basınç dayanımının da düşmesine neden olmuştur. Bu durumda vermikülit katkısının kullanıldığı betonlarda su/çimento oranının artırılması ile hidrasyon da hızlandırılarak betona dayanım kazandırılması kuvvetle muhtemeldir.



Şekil 15. Beton karışımlarının 7 (A) ve 28 (B) günlük ortalama basınç dayanımları
Figure 15. 7(A) and 28(B) day compressive strength of concrete mix

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada atık vermikülitin katkı olarak betonda kullanılabilirliği, betonun kimyasal ve mekanik özelliklerini ortaya koyan analizler ile değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- XRD analizi bulgularına göre, atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonu üzerinde olumlu rol oynayarak betonun sertleşmesini hızlandırdığı tespit edilmiştir.
- Atık vermikülit dozu arttıkça ortalama basınç dayanım değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, FTIR ve XRD bulgularında da tespit edildiği gibi, vermikülitin yapısındaki zayıf mineralojik yapıların varlığı olduğu gibi,

FTIR bulgularında görülen O-H piklerinin artışı nedeniyle, vermikülitin beton karışım suyunu absorbe ederek hidrasyon üzerinde olumsuz bir etki yaratarak, basınç dayanımının düşmesine neden olduğu söylenebilir.

- %5 oranında atık vermikülit katkılı beton numunelerinde betonun 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerlerinin diğer AVK oranlarına göre daha fazla olup, AVK katkılarının agrega ile %5-20 arasında yer değiştirilerek kullanılması, bu çalışmada elde edilen basınç dayanımlarının yeterli olabileceği yapılar için uygun olabileceği söylenebilir.
- Beton içerisinde atık vermikülit kullanılması ile önemli bir çevresel problem olan bu atıkların geri kazanımı sağlanmış olacaktır. Bu sayede bu atıkların depolanmasının önüne geçilerek özellikle

toprak ve hava ekosistemi için oluşacak tehditler ortadan kaldırılmış olacaktır. Aynı zamanda beton içerisinde kullanılacak olan agrega miktarı da bu katkıların kullanımı ile azaltılmış olacak ve agrega üretimi sırasında meydana gelen doğal kaynakların tüketimi ve tahribatı da engellenmiş olacaktır.

• Ayrıca gerçekleştirilen bu çalışmadan yola çıkarak farklı AVK dozları denenerek, betonun bu çalışmada belirtilen özelliklerinin yanısıra diğer özellikleri araştırılabilir, bu katkılar ile farklı yapısal sistemler tasarlanarak bu sistemlerin mekanik özellikleri araştırılabilir.

Teşekkür

Acknowledgement

Makale yazarları çalışmanın değerlendirilmesinde emek gösteren editör ve hakemlere teşekkürlerini sunar.

Yazar katkısı

Author contribution

Araştırmacılarından Soğancıoğlu Kalem; bulguların değerlendirilmesi ve makalenin yazımında (%50 oranında) katkıda bulunmuştur. Karakaya Harmancı ise bulguların elde edilmesi ve değerlendirilmesinde (%50) katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

Bosch Reig, F., Gimeno Adelantado, J. V., & Moya Moreno, M. C. M. (2002). FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method application to geological samples. *Talanta*, 58, 811-821. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00372-7](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00372-7)

Çoşar, K. (2020). *Yüksek sıcaklığın genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çimento esaslı hafif harçların özelliklerine etkisi*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

DPT (2001). Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri. *III. Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer Çalışma Grubu Raporu*, Devlet Planlama Teşkilatı, 2617, Ankara, 57-68.

Duman, O., & Tunç, S. (2008). Electrokinetic properties of vermiculite and expanded vermiculite: effects of pH, clay concentration and mono and multivalent electrolytes. *Separation Science and Technology*, 0149, 3755-3776. <https://doi.org/10.1080/01496390802219109>

Köksal, F., Gencil, O., & Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.021>

Köksal, F., Serreno-Lopez, M., Şahin, M., Gencil, O., & López-Colina Perez, C. (2014). Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48(7), 2083-2092. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0294-7>

Loughbrough, R. (1991). Minerals in Lightweight Insulation, *Industrial Minerals*, October, 21-35.

Marcos, C., & Rodriguez, I. (2011). Expansibility of vermiculites irradiated with microwaves. *Applied Clay Science*, 51(1-2), 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.019>

Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>

Naveenkumar, K., Suriya P. A., Divahar, R., Sangeetha, S.P., & Jayakumar, M. (2021). Experimental investigation flexural behavior of reinforced concrete beam with partial replacement of vermiculite. *Meterials Today: Proceedings*, 46(12), 5885-5888. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.743>

Strand, P.R., (1983). *Vermiculite*, Industrial Minerals And Rocks, AIME, 1375-81.

Şahin, M. (2011). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çelik tel takviyeli-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Toksoy Köksal, F. (1997). Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu. 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (ss. 123-139), İzmir.

Türeyen, A.C. (2019). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özellikleri*. [Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].