



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DÖKÜM VE MADEN ENDÜSTRİSİ
ATIKLARININ BETON İÇERİSİNDE
AGREGA YERİNE KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI tarafından hazırlanan “Döküm Ve Maden Endüstrisi Atıklarının Beton İçerisinde Agregaya Yerine Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması 01/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mehmet Faik SEVİMLİ

Danışman

Dr. Öğr. Üy. Merve KALEM

Üye

Prof. Dr. Şükrü DURSUN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

DÖKÜM VE MADEN ENDÜSTRİSİ ATIKLARININ BETON İÇERİSİNDE AGREGA YERİNE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Merve KALEM

2022, 97 Sayfa

Günümüzde, atık ve artık olarak ortaya çıkan malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü konusunda yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda atıklardan yeni ürünler elde edilmesi veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Atıkların yeniden kullanımı veya geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak, doğanın tahrip edilmesini önlemekte, üretimde verimliliği artırmakta ve atık depolanması sonucu oluşacak çevre problemlerini en aza indirmektedir.

Doğal kaynakların daha az tüketilmesi, çevre kirliliğinin daha aza indirgenmesi ve enerji maliyetlerinin azaltılması amacıyla betonun bileşiminde endüstriyel atık kullanımı gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konudur.

Bu yüksek lisans tez çalışması ile önemli bir çevresel sorun olan atık döküm kumu ve atık vermikülit için yeni bir değerlendirme alanı araştırılabileceği gibi, beton üretimi sırasında kullanılan agreganın kullanımı da azaltılacağı için bu agregaların temini sırasında meydana gelen doğal kaynakların tahribatının da azaltılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, saf ve atık döküm kumu ve atık vermikülitin önemli bir yapı malzemesi olan beton içerisinde değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu atıklar %5, %10 ve %20 oranlarında beton içerisindeki agregaya ile yer değiştirilerek betonun işlenebilirlik, Taramalı elektron mikroskobu (SEM), FTIR (Fourier Transform Infrared) spektrofotometresi, Termogravimetrik analiz (TGA), X-ışınları difraktometresi (XRD) ve basınç dayanımı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonunda, üç katkı türünde betonun işlenebilirliğini ve betonun termal özelliklerini olumlu yönde geliştirdiği, minerojik yapı tespiti için yapılan XRD analizi bulgularına göre saf ve atık döküm kumu katkısının betonun hidratasyonunu olumlu yönde etkilediği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık döküm kumu, atık vermikülit, beton, geri kazanım.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE USE OF CASTING AND MINING INDUSTRY WASTE IN CONCRETE INSTEAD OF AGGREGATE

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Environmental Engineering**

Advisor: Asst.Prof.Dr. Merve KALEM

2022, 97 Pages

Today, intensive work is being done on the reuse and recycling of waste and residual materials. In these studies, it is aimed to obtain new products from wastes or to use them as additives. Reuse or recycling of waste; By reducing the use of limited natural resources, it prevents the destruction of nature, increases efficiency in production and minimizes environmental problems that may arise as a result of waste storage.

In order to consume less natural resources, reduce environmental pollution and reduce energy costs, the use of industrial waste in the composition of concrete is an issue that attracts more and more attention day by day.

With this master's thesis, a new evaluation area for waste casting sand and waste vermiculite, which is an important environmental problem, can be researched, and it is aimed to reduce the destruction of natural resources that occur during the supply of these aggregates, since the use of aggregate used during concrete production will be reduced. For this purpose, studies were carried out to evaluate pure and waste casting sand and waste vermiculite in concrete, which is an important building material. These wastes are replaced with the aggregate in the concrete at the rates of 5%, 10% and 20%, and the workability of the concrete, Scanning electron microscope (SEM), FTIR (Fourier Transform Infrared) spectrophotometer, Thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffractometry (XRD) and pressure strength analyzes were carried out.

At the end of the study, it was concluded that the workability of the concrete and the thermal properties of the concrete were improved in three admixture types, and the pure and waste casting sand additive positively affected the hydration of the concrete, according to the XRD analysis findings for the determination of the mineralogical structure.

Keywords: Waste foundry sand, waste vermiculite, concrete, recovery.

ÖNSÖZ

Heyecanla başlayıp mutlulukla ve gururla tamamladığım tezimin de benimle birlikte birçok sevdiğim ve saygı duyduğum insanlar tezimin yükünü paylaştı.

Yüksek lisans ve lisans dönemim de mesleğine duyduğu sevgi ile bana mesleğimle gurur duymayı öğreten, tezimin her aşamasında yol gösteren, çok kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üy. Merve KALEM'e,

Üniversiteye ilk adım attığım andan itibaren hayat ve meslek öğretileri ile beni etkileyen, bilime ve Çevre Mühendisliği alanına önemli katkıları olan Prof. Dr. Esra YEL ve Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ hocalarıma,

Tez çalışmamın deneysel aşamasındaki katkılarından dolayı Konya Çimento A.Ş. Hazır Beton Santrali tüm idari ve laboratuvar personeline,

Tez sürecimdeki tüm stresimi paylaştığım hayat arkadaşım Halil HARMANCI'ya,

Beni bugünlere getiren başta annem ve babam olmak üzere babam Fuat KARAKAYA annem Saliha KARAKAYA'ya kardeşlerim Kemal KARAKAYA ve Tuanna KARAKAYA'ya,

Beni kızları ve kardeşleri gibi görüp desteklerini hiç eksik etmeyen İrfan HARMANCI ve Fadime HARMANCI, Ahmet Faruk HARMANCI ve Zeynep HARMANCI'ya,

Kız kardeşten öte olan hayatımın ve tezimin her aşamasında yanımda olan Hasibe TEMİR ve Müberra DEMİR'e,

Sevgili meslektaşlarım ve dostlarım Afra ÖZGAN, Esra BİRCAN, Fatmagül KIVRAK, Nazif KURT, Hilal DÜZGÜN ve Merve NOKTA'ya göstermiş oldukları sabır, emek ve sevgileri için teşekkür ederim.

Fatma Nur KARAKAYA HARMANCI
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Döküm Sektörü	1
1.2. Döküm Kumları	2
1.3. Atık Döküm Kumu Ve Çevresel Etkisi	3
1.4. Atık Döküm Kumunun Bertarafı, Geri Dönüşümü Ve Geri Kazanımı	4
1.5. Vermikülit	7
1.6. Beton	11
1.7. Betonun Özellikleri Ve Hazır Beton Üretim Miktarları	13
1.8. Beton Üretiminin Çevresel Etkisi	16
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	18
2.1. Atık Döküm Kumu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	18
2.2. Beton Üretiminde Atık Malzeme Kullanımı Ve Yapılan Çalışmalar	25
2.3. Vermikülit Kullanılarak Yapılan Literatür Çalışmaları	29
2.4. Çalışmanın Amacı	32
3. MATERYAL VE METOD	33
3.1. Materyal	33
3.1.1. Ham döküm kumu	33
3.1.2. Atık döküm kumu	33
3.1.3. Atık vermikülit	34
3.1.4. Beton karışımı	34
3.1.5. Mikser	37
3.1.6. Çökme konisi	37
3.1.7. Malzemenin, atık malzemelerin ve sertleşmiş betonun karakterizasyonunda kullanılan cihazlar	38
3.2. Metot	41
3.2.1. Beton harcının hazırlanması	41
3.2.2. Çökme deneyi	42
3.2.3. Numunelerin kürlerinin sağlanması	42
3.2.4. Beton basınç dayanımının belirlenmesi	43
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	44
4.1. Malzemenin Ve Atıkların Karakterizasyonu	44

4.2. Yaş Betonun Çökme Analizi Bulguları	52
4.3. Sertleşmiş Betonların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Bulguları	53
4.4. Sertleşmiş Betonların TGA Analizi Bulguları.....	67
4.5. Sertleşmiş Betonların FTIR Analizi	74
4.6. Sertleşmiş Betonların X-Işınları Difraktometresi (XRD) Analizi Sonuçları.....	78
4.7. Basınç Dayanımı.....	85
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
5.1. Sonuçlar	89
5.2. Öneriler	90
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrad, Sıcaklık Ölçü Birimi
Ca	: Kalsiyum
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Na	: Sodyum
K	: Potasyum
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
O	: Oksijen
S	: Sülfür

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Bileşik Devletleri
ADK	: Atık Döküm Kumu
BBS	: Başlangıç Bozunma Sıcaklığı
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GAC	: Güney Afrika Cumhuriyeti
HDK	: Ham Döküm Kumu
İBS	: İkincil Bozunma Sıcaklığı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
VK	: Atık Vermikülit
XRD	: X-ışını Kırını Difraktometresi

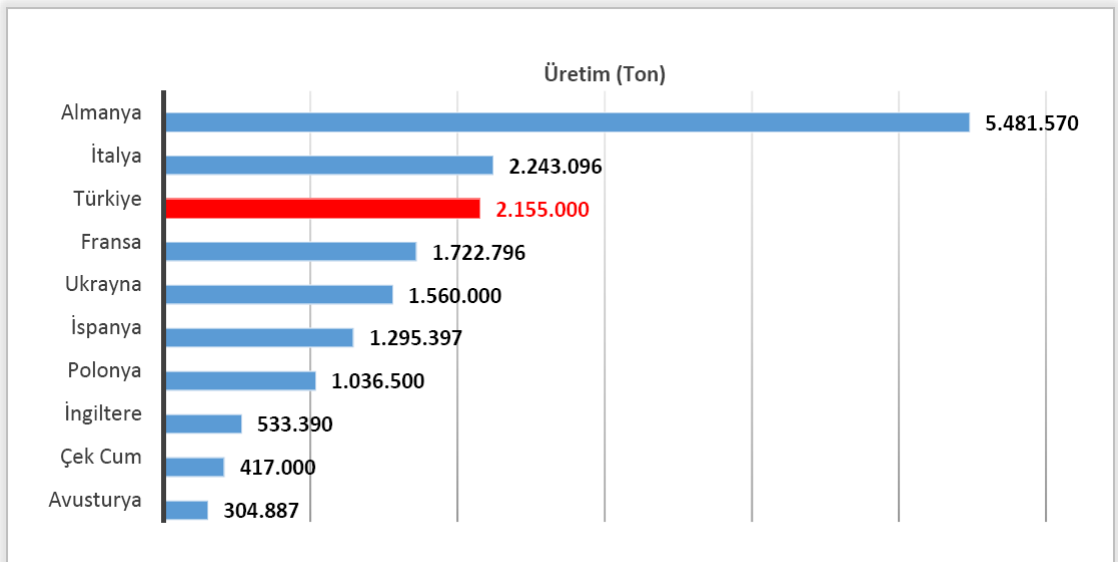
1. GİRİŞ

1.1. Döküm Sektörü

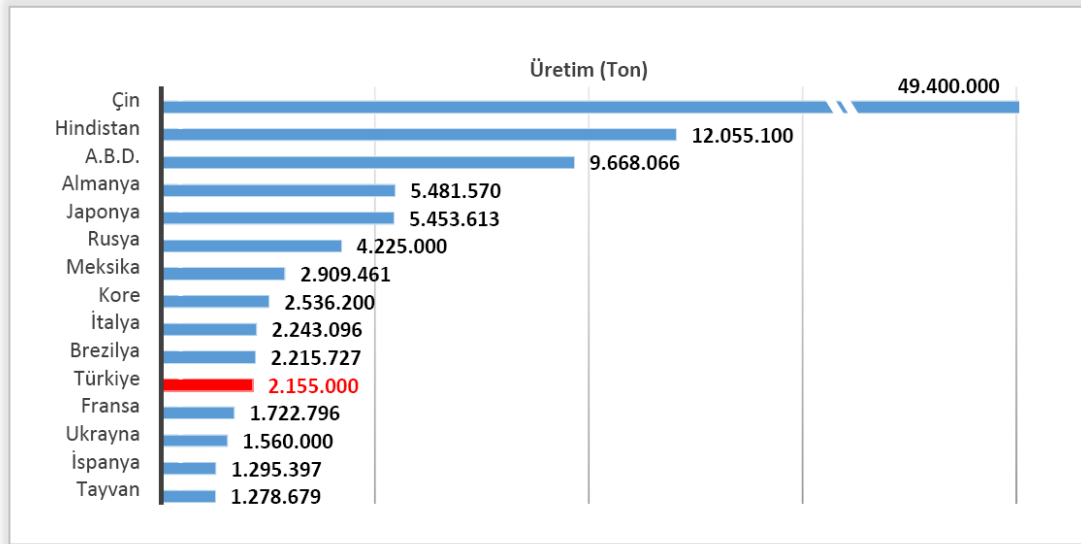
Dökümcülük insanların çok uzun sürelerden beri yaptığı eski bir meslek dalıdır. İnsanların hayatlarında ihtiyaç duydukları metal nesneleri üretme yoludur. Ham haldeki metal parçaların ve kullanılamayacak durumda olan metal parçaların indüksiyon ocaklarında eritilip, çeşitli alaşım ilaveleri yapıldıktan sonra seramik, kum ve metal kalıplara sıvı formda dökülerek döküldüğü kalıbın şeklini almasıdır (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, 2019).

Havacılık, otomotiv, savunma, enerji, ulaştırma, otomasyon, inşaat, maden, makine üretimi gibi birçok sektörde kullanılır (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, 2019).

Döküm sektörünün üretim hacmi tüm dünyada yıllar geçtikçe artmakta ve sektör gelişmeye ve büyümeye devam etmektedir. 2018 yılında yayınlanan 52. Dünya Döküm İstatistiklerine göre üretim hacmi yönünden, demir ve çelik içeren dökümlerde, Avrupa'da 2. Dünya'da 10. demir harici metaller içeren dökümlerde ise, Dünya'da 10. Avrupa'da 3. sıradadır. Avrupa metal döküm üretimi Şekil 1.1'de, dünya metal döküm üretimi Şekil 1.2'de verilmektedir (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, 2019).



Şekil 1.1. Avrupa metal döküm üretimi



Şekil 1.1. Dünya metal döküm üretimi

1.2. Döküm Kumları

Döküm kumları boyut olarak genellikle 0.05-2 mm aralığında mineral yapıda ki tanelerdir. 2 çeşit döküm kumu vardır. Birincisi doğal döküm kumu ikincisi sentetik döküm kumudur. Doğal kumlara herhangi bir işlem yapılmaz. Doğadan elde edildikleri halindeki şekliyle kullanılırlar. Doğal döküm kumunun avantajı uzun süre nem tutabilme özelliğine sahip olması, dezavantajı ise kararsız bir yapıda olmasıdır. Genellikle döküm sanayide sentetik kum kullanılır. Sentetik kumlar ise kullanılacağı alana göre temizleme, boyut küçültme vb. işlemlere tabi tutulurlar. Depolama alan ihtiyacı daha azdır. Sentetik kumların avantajları ise:

- Gaz geçirgenlikleri fazladır.
- Sıcaklığa dayanımı fazladır.
- Doğal kumlara göre kararlı yapıdadır.

Döküm kumları 4 çeşittir:

1. Silis Kumu (SiO_2): Sektörde en çok kullanılan kum türüdür. Diğer döküm kumlarına göre ucuz ve sıcaklık dayanımı fazladır.
2. Zirkon Kumu (ZrSiO_4): Silis kumu ile karşılaştırma yapıldığında 2 kat fazla özgül ağırlığa ve ısı iletkenliğe sahiptir. Hızlı katılma istenilen durumlarda daha çok tercih edilir.

3. Kromit Kumu ($\text{Fe, MgCr}_2\text{O}_4$): Silis kumu ile karşılaştırma yapıldığında yüksek yoğunluğu ve ısı iletkenliğı fazladır. Hızlı soğuma sağlar. Zirkon kumuna göre ısı genişmesi daha düşüktür.

4. Olivin Kumu ($\text{Mg, Fe}_2\text{SiO}_4$): Yüksek alaşımı olan çelik dökümlerde kullanılır ve reaksiyona girmez (Anonim, 2019).

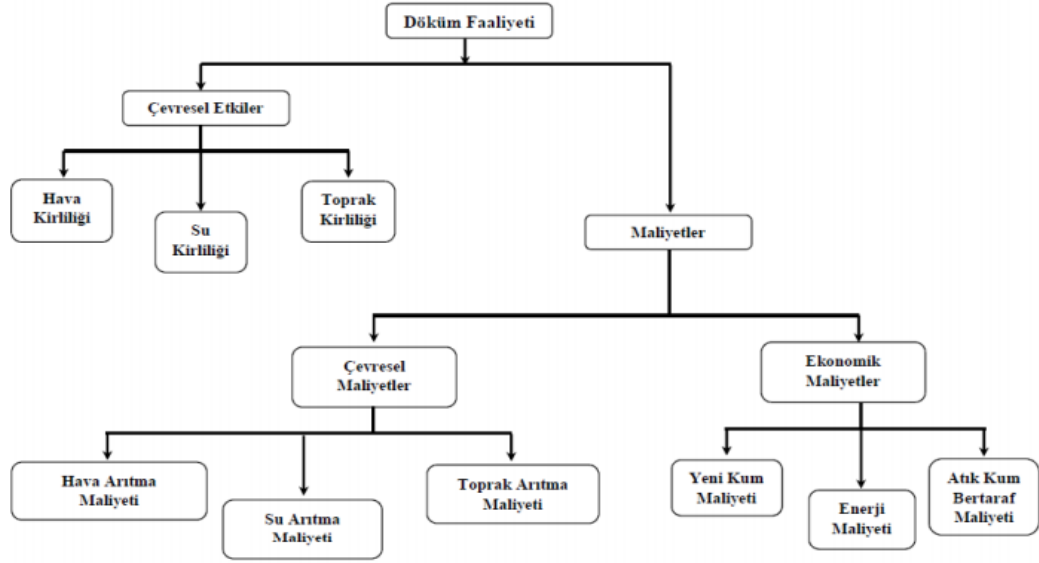
1.3. Atık Döküm Kumu Ve Çevresel Etkisi

Döküm yapılırken genellikle kum kalıplar kullanılır. Genel olarak 1 ton döküm için 4–5 ton kum gereklidir (T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Döküm kalıplarında ki kumun kullanılmasının sebeplerinden biri de sıvı haldeki metalin döküldükten sonra katı forma gelene kadarki sürede kalıp boşluğunu bozmamasıdır. Kum kalıplar her bir döküm işleminden sonra açılarak, kumdaki büyük parçalar eleme işlemine tabi tutularak uzaklaştırılması sağlanır. Bu da miktarda azalmaya sebep olur. Azalan kumun yerine yeni kum ilave edilerek tesiste çevrim devamlı hale gelir. Belirli bir çevrimden sonra döküm kumu, döküm kalıplarında kullanılmayacak duruma gelir. Bu kullanılmış/atık döküm kumu olarak dökümhaneden uzaklaştırılır (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneğı, 2019).

1 ton döküm malzemesi üretiminde 0.6–0.8 ton arası atık oluşmaktadır. Bu miktarın ise 0.4–0.6 tonu atık döküm kumudur (Başar ve Aksoy, 2012). Türkiye’de 2018 yılında toplam 2.3 milyon ton döküm üretimi yapılmıştır. Bu üretimin kum kalıp tekniğı ile üretim miktarı ele alınırsa geri kazanım yapılabilecek 800 bin ton atık döküm kumu ortaya çıktığı hesaplanmaktadır (Türkiye Döküm Sanayicileri Derneğı, 2019).

Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) 6–10 milyon ton, Avrupa’da 4.5–6 milyon ton, Hindistan’da ise 1 milyon ton atık döküm kumu oluşmaktadır (Kılıç ve Tüylü, 2019).

Atık döküm kumları doğru bir yaklaşım ile yönetimi sağlanırsa çevre için tehlike oluşturmazlar. Dökümhanelerden çıkan atık döküm kumları dökümhane sahipleri tarafından atık bertaraf maliyetinin yüksek olması sebebiyle dökümhanelerin alanlarında saklanmakta, doğru bir yönetim yapılmadığı için su, toprak ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Atık döküm kumunun bertarafından oluşan maliyet ve hava, su ve toprak kirliliğine dair çevresel etkileri Şekil 1.3’te verilmiştir (Kılıç ve Tüylü, 2019).



Şekil 1.3. Atık döküm kumu çevresel etki ve maliyet analizi

1.4. Atık Döküm Kumunun Bertarafı, Geri Dönüşümü Ve Geri Kazanımı

Atık döküm kumunun bertarafı için atık döküm kumu lisanslı firmalara verilir. Bertarafı yüksek maliyete sahiptir. Maliyeti azaltmak ve atık döküm kumunun yeniden kullanımı için yeni alternatifler geliştirmek gereklidir. Atık döküm kumu, beton dahil olmak üzere çeşitli yapı malzemelerinde kullanılabilen bir atıktır. Yapı malzemelerinde kullanımı maliyeti azaltır ve bertaraf sorununu azaltmaya çözüm olur (Siddique ve ark., 2010). Dökümhanelerden kaynaklanan atıklar 02.04.2015 tarihli ve 29314 sayılı Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) EK IV: Atık Listesi'ne göre iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

- Demir döküm işleminden kaynaklanan atıklar
- Demir dışı döküm atıklarıdır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Isıl işlemlerden kaynaklanan atıklar (AYY-EK IV Atık Listesi)

ATIK KODU	ATIK KODU TANIMI	AÇIKLAMA
10 09	Demir Döküm İşleminde Kaynaklanan Atıklar	
10 09 03	Ocak cürufları	
10 09 05*	Henüz döküm yapılamamış, tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 09 06	10 09 05 dışında henüz döküm yapılamamış maça ve kum döküm kalıpları	
10 09 07*	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 09 08	10 09 07 dışında döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları	
10 09 09*	Tehlikeli maddeler içeren baca gazı tozu	M
10 09 10	10 09 09 dışındaki baca gazı tozu	
10 09 11*	Tehlikeli maddeler içeren diğer partiküller	M
10 09 12	10 09 11 dışındaki diğer partiküller	
10 09 13*	Tehlikeli maddeler içeren atık bağlayıcılar	M
10 09 14	10 09 13 dışındaki atık bağlayıcılar	
10 09 15*	Tehlikeli madde içeren çatlak belirleme kimyasalları atığı	M
10 09 16	10 09 15 dışındaki çatlak belirleme kimyasalları atığı	
10 09 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	
10 10	Demir Dışı Döküm Atıkları	
10 10 03	Ocak cürufları	
10 10 05*	Henüz döküm yapılamamış, tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 10 06	10 10 05 dışındaki henüz döküm yapılamamış maça ve kum döküm kalıpları	
10 10 07*	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları	M
10 10 08	10 10 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları	
10 10 09*	Tehlikeli maddeler içeren baca gazı tozu	M
10 10 10	10 10 09 dışındaki baca gazı tozu	
10 10 11*	Tehlikeli maddeler içeren diğer partiküller	M
10 10 12	10 10 11 dışındaki diğer partiküller	
10 10 13*	Tehlikeli maddeler içeren bağlayıcı atıkları	M
10 10 14	10 10 13 dışındaki bağlayıcı atıkları	
10 10 15*	Tehlikeli madde içeren çatlak belirleme kimyasalları atığı	M
10 10 16	10 10 15 dışındaki çatlak belirleme kimyasalları atığı	
10 10 99	Başka bir şekilde tanımlanmamış atıklar	

(M) işareti: Atığın muhtemelen tehlikeli atık olduğunu belirtir (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015)

Atıkların bertaraf yöntemleri ve işletme dışı şirketlerde geri kazanımı Çizelge 1.2’de verilmiştir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012).

Çizelge 1.2. Atıkların bertaraf yöntemleri ve işletme dışı şirketlerde geri kazanımı

ATIK KODU	BERTARAF YÖNTEMLERİ	İŞLETME DIŞI ŞİRKETLERDE GERİ KAZANIM
10 10 05*	D1, D5, D12	Rejenerasyon
10 09 05*	D1, D5, D12	Rejenerasyon
10 09 06	D1, D5, D12	Rejenerasyon
10 10 06	D1, D5, D12	Rejenerasyon
10 09 07*	D1, D5, D12	R5
10 09 08	D1, D5, D12	R5
10 10 07*	D1, D5, D12	R5
10 10 08	D1, D5, D12	R5
10 09 09*	D1, D5, D12	R4, R5
10 09 10	D1, D5, D12	R4, R5
10 10 09*	D1, D5, D12	R4, R5
10 10 10	D1, D5, D12	R4, R5
10 09 12	D1, D5, D12	R5
10 09 99	D1, D5, D12	R5
10 10 12	D1, D5, D12	R5
10 10 99	D1, D5, D12	R5
10 09 03	D1	R5
10 10 03	D1	R5

- D1 Toprağın altında veya üstünde düzenli depolama (örneğin, düzenli depolama ve benzeri)
- D5 Özel mühendislik gerektiren düzenli depolama (çevreden ve her biri ayrı olarak izole edilmiş ve örtülmüş hücreli depolama ve benzeri)
- D12 Sürekli depolama (bir madende konteynerlerin yerleştirilmesi vb.)
- R4 Metallerin ve metal bileşiklerinin ıslahı/geri dönüşümü
- R5 **(Değişik: RG–23.3.2017–30016)** Diğer inorganik malzemelerin ıslahı/geri dönüşümü (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015).

ABD’de Karayolları İdaresi’nin “Döküm Kumunun İnşaat Mühendisliği Uygulamalarındaki Durumu” üzerine hazırladığı rapora göre atık döküm kumunun uygulamaları:

- Yapısal dolgularda ve bentlerde
- Yol tabanlarında
- Asfalt betonu yapımında
- Akışkan dolgularda
- Portland çimentosu üretmekte
- Tarım arazilerinin iyileştirilmesinde
- Taş yünü üretiminde
- Fiberglas üretiminde

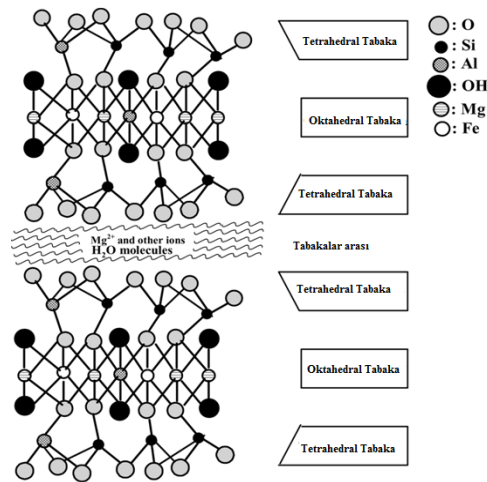
- Katı atık depolama sahası örtüsü
- Harç üretiminde
- Tehlikeli maddelerin nötralizasyonunda kullanımları vardır (AFS, 2004).

1.5. Vermikülit

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, ilk defa 1824'te Thomas H. Webb tarafından Worcester Massachusetts'de bulunmuştur. Thomas H. Webb'in vermikülit ismini vermesinin sebebi ise mineralin genleştikten sonra kurtçuklardan oluşan bir topluluk şeklinde olmasıdır. Vermikülit 1900'lü yıllara kadar sadece bilimsel bir merak olarak görülmüştür. 1900'lü yıllardan sonra ticari madencilik faaliyetlerinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk defa madencilikte kullanımı 1915 yılında Colorado'da yapılmıştır ve başarısız olmuştur. İlk başarılı girişimi ise 1923 yılında Zonolite şirketi yapmıştır ve 1990 yılına kadar faaliyetini sürdürmüştür.

Vermikülit, katmanlı bir yapıda olup içinde su molekülleri bulunduran hidratlaşmış levha magnezyum-alüminyum-demir silikatlarından oluşan bir 2:1 filo silikat mineral grubudur (Duman ve Tunç, 2008). Kristal yapısı ise Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Vermikülitin kristal yapısı

Şekil 1.4'e göre iki tetrahedral tabaka arasında oktahedral tabakadan oluşmaktadır. Vermikülitin katmanları arasında bulunan su kısa bir zaman içinde ve yüksek sıcaklıklarda yaklaşık 1000°C ısıtma ile su buharına dönüşür ve vermicülit silikat katmanında hasar oluşur ve genişleme meydana gelir (Marcos ve Radriguez, 2011). Genleşmenin neticesinde, vermicülit yığın yoğunluğu yaklaşık 0.8 g/cm³'ten 0.08 g/cm³'e kadar azalmaktadır. Yığın yoğunluğundaki azalma genleştirmenin yapıldığı fırının performansına ve vermicülitin kalitesine bağlıdır. Isıl işlemler neticesinde yaklaşık 30 katlık genişleme olmaktadır (Strand, 1983; Loughbrough, 1991, DPT, 2001).

Vermikülitin 4 çeşidi tespit edilmiştir. Bunlar kil vermicülitleri, otijenik vermicülit, metamorfik vermicülit ve makroskobik vermicülitir.

Kil Vermikülitleri

İlk defa toprak içinde vermicülit MacEvan tarafından 1948'de bulunmuştur. Kil türünde ki vermicülitlere toprak vermicülitleri de denilmektedir bunun sebebi ise genellikle toprak içerisinde bulunmasıdır (Toksoy, 1997)

Otijenik Vermikülit

İlk kez Singer ve Stoffer 1981'de deniz ortamında diğer sedimanter mineraller ile birlikte bulunan vermicülit bulmuşlardır. Yakın tarihlerde böyle bir oluşum volkanik aktivitenin ve metalojenik su akıntılarının yoğun olduğu yerlerde tespit edilmiştir. Hidrotermal vermicülitin diğer türdeki vermicülitlere göre su içeriği daha azdır (Toksoy, 1997).

Metamorfik Vermikülit

Metamorfik vermicülit, demir bakımından zengin kloritin dönüşümü ile olan ve lavsonit bulunduran metasedimanlarda bulunan vermicülit çeşididir. Yapısı biyotite benzemesine rağmen kimyası kloritinkine benzer silisçe kloritten daha zengin, alüminyum bakımından ise biyotitten fazladır (Toksoy, 1997).

Makroskobik Vermikülit

Mikanın hidrasyonu ile oluşan bir vermicülit türüdür. Elastik olmayan, altın sarısı, bronz, yeşilimsi-sarı, kahverengi, bal sarısı, yeşilimsi-siyah renklerde olabilir.

Mikalara kıyasla daha yumuşaktır. Erime noktası ise 1320°C-1350°C arasındadır (Toksoy, 1997).

Dünya’da birçok ülkede vermikülit rezervleri bulunmaktadır. En önemli rezervler ise ABD ve Güney Afrika Cumhuriyeti’nde (GAC) bulunmaktadır. 2019 yılı rakamları itibari ile GAC’de 158013 ton vermikülit üretimi vardır. Bunun yanı sıra Tablo 1.1’de Arjantin, Avustralya, Brezilya, Çin, Mısır, Hindistan, İran, Kenya, Meksika, Rusya, Türkiye, Uganda ve Zimbabve’nin vermikülit üretim miktarları verilmiştir (Word Mining Data 2019, 2021).

Tablo 1.1. Dünya vermikülit üretim miktarları (ton)

Ülkeler	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Arjantin	120	90	90	60	-	-	-
Avustralya	9091	-	-	-	-	-	-
Brezilya	60379	56444	54250	53330	50050	50000	47581
Çin	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Mısır	2750	2700	3000	3000	3000	-	-
Hindistan	11851	15327	23279	9042	6055	2992	2774
İran	1200	1200	1000	1000	-	-	-
Kenya	400	440	410	100	-	-	100
Meksika	425	226	299	310	464	244	148
Rusya	20900	21000	21000	20000	20000	25904	20000
GAC	127658	143007	13290	166483	166084	141346	158013
Türkiye	1604	716	425	1050	1618	18183	1370
Uganda	2296	2661	1213	3295	4119	10413	9674
ABD	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Zimbabve	28808	30740	30868	29312	23302	33161	26200

Türkiye’de vermikülit yataklarının varlığı pek bilinmemekle beraber jeolojik çalışmalar esnasında ofiyolit kuşaklarında vermikülit oluşumlarına rastlanmıştır (Toksoy, 1997). Bilinen vermikülit 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 kütlenin alkali damar kayaçlarıyla 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 vermikülit cevheri tespit edilmiştir (DPT, 2001). Yapılan hesaplamalar yaklaşık 6-7 milyon ton vermikülit rezervi olduğunu göstermektedir (Aras, 1984).

Dünya vermikülit üretimi açık ocak işletmeciliği ile yapılmaktadır. Kalite, tenör ve miktar açısından ekonomik sınırlar içinde kalan cevher zenginleştirme ünitesinde gerekli zenginleştirme yapıldıktan daha sonra genişletmeye 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 genişletme ünitesine gönderilir ve 900°C-1000°C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek ani ısı etkisiyle genişletilir. 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 genişleştirilmiş halidir. 1950 yıllarına kadar vermikülit ısı yalıtım özelliği ile dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken yapılan çalışmalarla diğer alanlarda da kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. ABD'de, genişleştirilmiş vermikülit genellikle inşaat ve tarım alanlarında kullanılmaktadır. Ses ve ısı yalıtımında genişleştirilmiş 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).

Genleştirilmiş vermikülitin başlıca kullanım alanları:

- ✓ Isı ve yüksek sıcaklık izolasyonu
- ✓ Hafif betonlar ve harçlar
- ✓ Vermikülit plakalar
- ✓ Sürtünme balataları
- ✓ Özel kaplama conta ve keçeler
- ✓ Gevşek yalıtım dolguları
- ✓ Seracılık ve bahçecilik
- ✓ Malzemelerin paketlenmesi
- ✓ Hayvan yemi olarak

- ✓ Yangına karşı koruyucu malzeme olarak
- ✓ Yüzme havuzu astarları

şeklinde sıralanabilir (Anonim, 2019).

1.6. Beton

Beton, çimento, agrega (çakıl ve kum), su, bağlayıcı madde birleşiminden oluşan inşaat yapı malzemesidir. Günümüzde kullanımı çok yaygın olan bir yapı ürünüdür.

Betonarme, beton ve donatıdan oluşan bir yapı malzemesidir. Betonarmenin uygulama alanları:

- Bina yapımında
- Köprü yapımında
- Baraj yapımında
- Sıvı deposu yapımında
- Tünel yapımında
- Yol inşaatı sanat yapılarında
- Kanal ve sulama yapılarında
- Baca yapımında

olarak sıralanabilir (Doğangün, 2014).

Çimento

Çimento, su eklenerek, hidrasyon reaksiyonları ve işlemleriyle katılarak sertleşebilen hamur oluşturan ve sertleştikten sonra dayanım ve kararlılığını su içinde bile sürdüren öğütülmüş inorganik malzeme olarak açıklanmaktadır. İstenilen özelliklere sahip çimento için farklı teknikler kullanılır. Bunlar kullanılan hammaddeler, öğütme ve pişirme tekniklerinin kullanımıyla mümkün olmaktadır. Çimento üretiminde öğütme işleminin sonucunda elde edilen partiküllerin boyutları çimento-su reaksiyonu üzerinde etkilidir. Aynı ağırlığa sahip ince ve iri öğütülmüş çimentolardan, ince öğütülmüş çimentoların yüzey alanı daha fazladır. Alanın fazla olması çimento-suyun daha büyük oranda reaksiyona girmesine sebep olur ve bunun sonucunda katılma daha hızlı olmaktadır (Doğangün, 2014).

Agrega

Agrega, betonda kullanıma uygun boyutta mineral malzeme olarak açıklanmaktadır. Agregalar, yapay, doğal ya da kullanılmış yapı malzemelerinin tekrar kazanım yöntemiyle elde edilmiş olabilir. Agregalar ağırlıklarına göre hafif, normal ve ağır agregalar olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif agregalar doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal hafif agregalar oluştukları sırada gözenekli bir yapı kazanmış, sünger taşı, bims, lav cürufu gibi kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Yapay hafif agregalar ise uçucu kül, kuvarsit, yüksek fırın cürufu gibi farklı yollarla gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Normal agregalar; doğal agrega (doğal taş agregası) ve yapay agrega (sanayi ürünü agregası) olarak ikiye ayrılır. Doğal taş agregaları denizlerden, göllerden, taş ocaklarından, nehirlerden elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Agregalar kaba ve ince parçacıkları içermektedir. Normal agregada ince agregası (kum) 4 mm elekten geçen, kaba agregası (çakıl) ise 4 mm elek üzerinde kalan agregalardır. Ağır agregalar da ikiye ayrılmaktadır. Barit, limonit, geotit doğal ağır agregası, ferrosilikon, demirshot ise yapay ağır agregalara örnek gösterilebilir (Doğangün, 2014).

Beton karışımında kullanılacak olan agreganın seçiminde etkili olan parametrelerden başlıcaları:

- Ağırlığı
- Tane dayanımı
- Tane boyutu
- Tane şekli
- Dona dayanıklılığı
- Tane büyüklüğü dağılımı
- Genleşme katsayısı
- İçindeki zararlı madde miktarı
- Elastisite modülü ve Poisson oranı
- Petrografik yapısı

olarak sıralanabilir (Doğangün, 2014).

Su

Suyun amacı, kıvam ve çimento taneleriyle birleşerek kimyasal reaksiyonları sağlamaktır. İçme suyu kullanılabilir. Kullanılan suda mangan bileşikleri, madeni yağlar, organik maddeler ve endüstri atıkları bulunmamalıdır (Doğangün, 2014).

Katkı maddeleri

Katkı maddeleri, betonun özelliklerini değiştirerek performansını iyileştirmek veya betonun daha ekonomik olmasına yardımcı olmak için kullanılmaktadır (Topçu ve ark., 2006).

Katkı maddeleri aşağıdaki amaçlar için kullanılmaktadır. Bunlar:

- Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, örneğin; kalsiyum klorür
- Priz süresini geciktiren katkı maddeleri
- Geçirimsizliği arttıran katkı maddeleri
- İşlenebilirliği arttıran katkı maddeleri
- Hava sürükleyici katkı maddeleri
- Soğuk havalarda beton dökmeyi sağlayan katkı maddeleri
- Donatıyı korozyondan koruyan katkı maddeleri
- Basınç dayanımını arttıran katkı maddeleri

olarak sıralanabilir (Doğangün, 2014).

1.7. Betonun Özellikleri Ve Hazır Beton Üretim Miktarları

Beton Dayanımı

Betonun dayanımı terimi; çekme dayanımı, basınç dayanımı ve kesme (kayma) gerilmesi oluşturan bütün dış etkilere karşı beton dayanımlarını içermektedir (Doğangün, 2014).

Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Yapıların inşasında kullanılan betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin bilinmesi, hesap, tasarım, yapım ve kullanım aşamalarında yardımcı olmaktadır (Doğangün, 2014).

Betonun Poisson oranı

Boyuna doğrultuda yük etkisinde kalan bir elamanda, enine şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmeye oranı poisson oranı olarak tanımlanmaktadır (Doğangün,

2014). Türk Standartları Enstitüsü (TSE), TS 500 (2000)'de beton poisson oranı 0.2 kabul edilebilir.

Betonun Elastisite Modülleri

Beton dayanımının yaklaşık üçte birine ulaşmayan düşük gerilmelerde ve kısa yüklemeler altında betonun davranışı doğrusal elastik kabul edilir (Doğangün, 2014).

Betonun Sıcaklık Genleşme Katsayısı

Betonun genleşme katsayısı çimentonun dozajına bağlıdır. Dozaj arttıkça genleşme kat sayısı da artar. Beton ve çeliğin genleşme katsayısı birbirine yakındır bu da sıcaklık değişimleri sırasında birlikte hareket etmelerine yardımcı olur (Doğangün, 2014).

Betonun büzülme (rötre) ve şişmesi

Beton kurumaya başladıktan sonra su kaybı yaşar ve hacminde değişiklik olur buna büzülme veya rötre denir.

Büzülmenin büyüklüğünü etkileyen faktörler:

- Ortam şartları
- Betonun yaşı
- Çimento tipi
- Agregası
- Donatı miktarı
- Su/çimento oranı
- Beton elemanın kalınlığı
- Katkı maddeleri

olarak sıralanabilir (Doğangün, 2014).

Betonun Sünmesi

Betonda sünme rötreye ilaveten sabit yük altında meydana gelen şekil değiştirme olarak açıklanır.

Sünmeyi etkileyen faktörler;

- Ortamın ısı ve nemi
- Betonun yükleme anındaki yaşı
- Gerilme dayanımı
- Su/çimento oranı
- Çimento türü
- Agregası türü

olarak sıralanabilir (Doğangün, 2014) .

Betonun Geçirimsizliği

Geçirimsiz beton üretiminin ilk şartı beton boşluklarının en aza indirilmesidir.

Geçirimsiz beton üretiminde dikkat edilmesi gereken faktörler:

- Çimento parçalarının ince olması tercih edilir.
- Karma suyunda betona zarar verecek maddeler bulunmamalıdır.
- Agreganın gradrasyonu iyi olmalıdır.
- Su/çimento oranı düşük olmalıdır.
- İnce taneli katkı maddeleri kullanılmalıdır.
- Beton uniform yapıda olmalıdır.
- Taze beton yerleştikten sonra kür işlemine başlanılmalıdır.
- Kür işlemi mümkün mertebe uzun tutulmalıdır.

olarak sıralanabilir (Erdoğan, 2007; Yavuz, 2011).

Avrupa Hazır Beton Organizasyonu'nun (ERMCO) yayınladığı 2018 hazır beton sektör istatistikleri Çizelge 1.3'te verilmiştir. Türkiye'nin 2018 yılı hazır beton üretimi 100.000.000 m³ tür (ERMCO, 2019).

Çizelge 1.3. Ülkelere göre hazır beton üretimi

ÜLKELER	Hacim (milyon m ³)
Avusturya	11.8
Belçika	12.8
Çek cumhuriyeti	7.1
Danimarka	2.6
Finlandiya	2.8
Fransa	39.7
Almanya	52.8
İrlanda	4.3
İtalya	27.3
Hollanda	7.5
Polonya	25.1
Portekiz	4.5
Slovakya	3.0
İspanya	22.2
İsveç	4.5
İngiltere	22.5
İsrail	18.0
Norveç	4.1
İsviçre	10.9
Türkiye	100.0
Rusya	38.0
ABD	274
Güney Amerika	134.5
Japonya	84.8

1.8. Beton Üretiminin Çevresel Etkisi

Beton üretiminin birçok çevresel etkisi vardır. Bunlardan bazıları CO₂ emisyonu, su kullanımı, enerji kullanımı, hammadde kullanımı, taşınması ve üretimden sonra kullanılarak kullanım ömrünün tamamlanması gibi hususlardır. Beton üretimi sırasında CO₂ salınımı gerçekleşir, bu salınım çevre üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. CO₂ salınımının tahminen %7'sinin beton üretim sektörünün sebep olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte beton üretiminde kireçtaşı, kıl, kömür gibi maddeler de kullanılır bu maddeler doğadan elde edilirken ve edildikten sonra doğaya olumsuz etkileri vardır örneğin; üst toprak kaybına sebep olmasıdır (Mehta, 2001).

CO₂ salınımını azaltmak için ise beton üretiminde CO₂ salınımı daha az olan atık ürünler kullanılabilir. Geri dönüştürülmüş plastik atıklarının beton üretiminde kullanılması, plastik kirliliği, küresel ısınma, atık bertarafı ve enerji tüketimi yönünden çevresel etkilerini minimuma indirmek için umut vaat eden bir çözüm olarak düşünülmektedir (Belmokaddem ve ark., 2020).

Sera gazı emisyonu ve partikül emisyonu çevresel etki değerlendirmede önemli noktalardan biridir. Pirinç kabuğu külü ve atık mermer tozunun beton da kullanılması

bu faktörleri sırasıyla %36 ve %37.6 oranında azaltır. Ozon tabakası incilmesi de son 10 yılın en önemli sorunlarından biri olmuştur. Pirinç kabuğu külü ve atık mermer tozunun beton da kullanılması ozon tabakası incelmesini %35.6 oranında azaltır. Beton için hammadde üretiminde ve işlenmesinde fosil yakıt kullanımı çok fazladır. Pirinç kabuğu külü ve atık mermer tozunun beton da kullanılması, fosil yakıt tüketimini %40.5 oranında azaltır. Beton bileşimindeki ince agreganın elde edilmesi sırasında nehir kıyalarından kum alınır bu da toprak erozyonuna sebep olabilir. Betonda atık değerlendirilmesi ile bu problem en aza indirgenebilir (Varadharajan ve ark., 2020).

Çevresel, sosyal kalkınma ve ekonomik ilkelerini devam ettirebilmek için inşaat projelerine başlanmadan önce atık geri dönüşümü yönetim planları geliştirilmelidir (Batayneh ve ark., 2007).



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Atık Döküm Kumu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Literatür çalışmalarına bakıldığında atık döküm kumunun doğrudan ve ön işlemleri olarak kullanıldığı çalışmalar mevcuttur.

Yaghoubi ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, atık döküm kumunun taşıma kapasitesi, fiziksel özellikleri, hacimsel genişleme davranışı, kayma mukavemeti özellikleri incelenilmiştir. Karşılaştırma malzemesi olarak geri dönüştürülmüş cam kullanarak benzer bir deney programı geri dönüştürülmüş cama uygulanmıştır. Hem atık döküm kumunda hem de geri dönüştürülmüş camın kimyasal bileşimde silika hakim olduğunu tespit edilmiştir. İki malzemenin de pH değeri 9.4-9.5 çıkmıştır bu da atık döküm kumunun pH değeri olarak çevresel anlamda risk oluşturmeyen yapı dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kayma mukavemeti deneyi sonuçlarına göre atık döküm kumunun geri dönüştürülmüş cama göre daha az kayma mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Üç eksenli test sonuçlarında ise benzer veriler elde edilmiştir. Atık döküm kumunun yeterli özelliklere sahip olması durumunda inşaat malzemesi olarak kullanılabileceğine değinilmiştir.

Başar ve Aksoy (2012) tarafından yapılan çalışmada atık döküm kumunun hazır beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. İnce agrega ile ağırlıkça beş farklı oranda atık döküm kumu ile karıştırılarak beton numuneleri üretilmiştir. Atık döküm kumu kullanarak üretilen betonların mikro-yapısal, mekanik ve farklı pH koşullarında sızdırma özellikleri araştırılmıştır. Üretilen tüm beton numunelerine katılaştırma/stabilizasyon işlemi yapılmıştır. Sonuçlar ince agrega ile farklı oranlarda karıştırılan atık döküm kumunun betonun dayanıklılığını, yoğunluğunu azalttığını ve su emme oranını arttırdığını göstermiştir. %20 oranında ince agrega ile karıştırılan atık döküm kumu içeren betonun, karşılaştırma beton numenesi ile benzer deneysel sonuçları olduğu tespit edilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre atık döküm kumunun yeterli özelliklere sahip olması ve ince agrega ile %20'yi geçmemek şartıyla karıştırılarak kullanılabileceği gösterilmektedir. Araştırmada atık döküm kumunun her dökümhanede farklı özelliklere sahip olabileceği bunun unutulmaması gerekliliğine değinilmiştir.

Alonso-Santurde ve ark. (2011) gerçekleştirdiği çalışmada, atık döküm kumunun kil tuğlalarda kullanılarak geri kazanımı araştırılmıştır. Atık döküm kumunu ağırlıkça

%0, %10, %20, %25, %30 ve %35 olmak üzere farklı oranlarda tuğlalara eklenilmiştir. Karşılaştırma malzemesi olarak ise aynı oranlarda doğal kumla tuğlalar üretilmiştir. Tuğlalara mekanik dayanım, yoğunluk, su emme oranı, plastisite, kurutma toleransı ve büzülme deneyleri yapılmış deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçları atık döküm kumunun kil tuğlalarda kullanılabileceğini göstermiştir. Geri kazanımı yapılabilecek atık döküm kumunun ağırlıkça %30 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre endüstri sektöründe kullanımı konusunda bazı noktalara değinilmiştir. Bu noktalar atık döküm kumunun geri dönüşümü yüzdesinin temel malzemelerin (kil ve kum) özelliklerinden ve tuğla üretim sürecinde şekillendirme, kurutma ve yakma yöntemlerinin farklı olabileceği bu yüzden tuğlarında özelliklerinin farklı olabileceğine, atık döküm kumunu kullanılmadan önce gerekli deneysel çalışmaların yapılması gerekliliğine değinilmiştir.

Torres ve ark. (2017) ortaya koyduğu çalışmada, dökümhaneden çıkan döküm atıklarını ince ve iri agrega ile belli oranlarda karıştırılarak beton numuneleri ve karşılaştırma amacı ile standart beton numuneleri üretilmiştir. İnce ve iri agregalar ağırlıkça %10, %20, %30 olmak üzere üç farklı oranda döküm atığı ile karıştırılmıştır. Çalışmada basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda ise %20 oranında (%10 ince döküm atığı ve %10 kaba döküm atığı) kullanılarak üretilen betonda ise basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü azalmıştır ve dökümhane atıklarının ince ve iri agregalar ile belli oranlarda karıştırılarak kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Khatib ve ark. (2013) tarafından atık döküm kumunun betonun içindeki ince agrega ile ağırlıkça %0, %30, %60 ve %100 oranlarında karıştırarak deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma iri agrega, su/çimento, çimento, su içeriği oranı sabit tutularak yürütülmüştür. Beton numunelerinde su emme oranı, kılcallık, basınç dayanımı ve ultrasonik darbe hızı (UPV) özellikleri incelenmiştir. Beton içerisinde atık döküm kumu miktarı arttıkça kılcal su emiliminde artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte basınç dayanımında ve ultrasonik darbe hızında azalma olduğu tespit edilmiştir. Azalma atık döküm kumu dozu miktarına bağlıdır ve doğru atık döküm kumu oranı kullanılarak uygun basınç dayanımı elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Siddique ve ark. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla atık döküm kumunun yeşil betonda kullanılmasını araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma iri agrega, su/çimento, çimento, su içeriği, süper akışkanlaştırıcı oranı sabit tutularak

yürütülmüştür. Betondaki doğal kum agregası farklı oranlarda atık döküm kumu ile karıştırılmıştır. Çekme dayanımı, basınç dayanımı, hızlı klorür geçirgenlik, buz çözücü tuza karşı direnci, ultrasonik darbe hızı testleri yapılmıştır. Çalışma sonuçlara göre doğal kum agregası ile karıştırılmış atık döküm kumunun ağırlıkça %20 oranına kadar karşılaştırma betonuna göre mukavemet özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Atık döküm kumu geri dönüşümü ile yapılan betonda CO₂ emisyonunda ve bertaraf maliyetinde azalma olacağına değinilmiştir.

Şahmaran ve ark. (2011) tarafından yapılan deneysel çalışmada taze kendiliğinden yerleşen betonda atık döküm kumunun ve uçucu külün, doğal kum agregasının ile belli oranlarda karıştırılarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmada kendiliğinden sertleşen betonun karışımları Portland çimentosunun uçucu kül ile birleşiminden daha az maliyetli ve çevreye faydalı olacak şekilde geliştirilmiştir. Taze betona yapılan deneyler doğal kum agregası ile atık döküm kumunun karıştırılarak kullanılabileceğini göstermiştir. Atık döküm kumu ve uçucu kül dayanıklılığı azaltsa da, hem uçucu kül ve hem de atık döküm kumu kullanılarak 28 günde basınç dayanımı 40 MPa ve 90 günde 50 MPa basınç mukavemetine sahip kendiliğinden sertleşen beton üretilbileceği tespit edilmiştir. Doğal kum agregasının atık döküm kumuyla %100 oranında karıştırılmasıyla ve %70'e kadar Portland çimentosunun uçucu kül ile karıştırılması yeterli mukavemet özelliklerini bulunduran kendiliğinden yerleşen beton karışımlarının yapımını mümkün hale getirebilir. Uçucu külün faydalı özellikleri, atık döküm kumunun zararlı özelliklerini telafi edebileceğine yapılan deneysel çalışmada değinilmiştir.

Parashar ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada atık döküm kumunun kendiliğinden yerleşen betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. İnce agregası farklı oranlarda atık döküm kumuyla karıştırılmıştır. Atık döküm kumunun karakterizasyonu için kapsamlı testler yapılmıştır. Bunlar; X-ışını difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), termogravimetrik analiz (TGA) ve X-ışını floresan (XRF) teknikleridir. Taze betonun ise çökme değeri ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş beton özellikleri için ise basınç dayanımı, yoğunluk, çekme dayanımı, ultrasonik darbe hızı, elastisite modülü, su akışı ve sorptivite deneyleri yapılmıştır. Sonuçları ise ince agregası ile atık döküm kumu karıştırılan betonun, dayanımında %10'a kadar düşüş olduğunu, beton akış hızında düşüş olduğu fakat kohezyonunda iyileşme gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Khatib ve ark. (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmalarla atık döküm kumu ihtiva eden betonun özelliklerini araştırılmıştır. İnce agregada farklı oranlarda atık döküm kumu ile karıştırılmıştır. Tüm numunelerde su/çimento oranı tabii tutularak betonun taze ve sertleşmiş özellikleri araştırılmıştır. Betonun sertleşmiş özelliklerini belirlemek için 14, 28 ve 56. günlerinde ultrasonik darbe hızı, su emme oranı, basınç mukavemeti, uzunluk değişimi testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonuçlarında ise beton içerisinde atık döküm kumunun dozu miktarı arttıkça betonda istenilen işlenilebilirliğinin azaldığı, büzülmenin arttığı, basınç dayanımı ve ultrasonik darbe hızının düştüğü ancak %100 ince agregada ile karıştırılan atık kumunun bile yeterli mukavemeti gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaur ve ark. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmada mantar kültürü ile işlenen atık döküm kumu içeren betonun özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmada (*Aspergillus spp.*) mantar kültürü işlenen atık döküm kumlu betonun (*Aspergillus spp.*) mantar kültürü işlenmeyen atık döküm kumlu betona göre C-S-H jel oluşumunu hızlandırdığı gözlemlenmiştir. C-S-H oluşumunun hızlanması reaksiyon kabiliyetindeki artış ile ilişkilendirilebilir. %5 ağırlık/hacim mantar kültürü eklenerek 28 gün sonunda %20 atık döküm kumu içeren beton basınç mukavemetinde %15.6 oranında artış, buna ilave olarak su emme oranında %68.8 ve gözeneklilik yapısında %45.9 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Betona mantar kültürü ilave edildiğinde poroziteyi azaltan, basınç mukavemetinde artış sağlayan sebebi bulmak için bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğuna değinilmiştir.

Gönen ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada yapı malzemesi olarak üretilen betona eklenen klasik malzemelerin haricinde çeşitli atık malzemeleri eklenip eklenmeyeceğinin literatürde araştırılması ve uygun oranları hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Bu atık malzemeler ise şunlardır; atık döküm kumu, plastikler, poliüretan köpük, araba lastiği, arıtma çamuru ve boya atıklarıdır. Araştırılıp incelenen malzemeler betondaki yer değiştirdiği malzemedan daha üstün veya aynı performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak; atık döküm kum, plastikler, poliüretan köpük, araba lastiği, arıtma çamuru ve boya atıkları gibi endüstriyel atıkların yeterli nitelikte beton yapımında, inşaat sektöründe kullanılması bunun birlikte çevrenin ve doğal kaynakların korunmasına fayda sağlayabileceğine değinilmiştir.

Monosi ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada atık döküm kumunun beton üretiminde ve çimento harcında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Doğal kum agregası ile farklı oranlarda ve farklı su/çimento oranlarında atık döküm kumu karıştırılarak

yaptıkları çimento harçlarının basınç mukavemetini ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. İki farklı oranda ve iki farklı su/çimento oranında atık döküm kumu ekleyerek ürettikleri betonların basınç mukavemetini, rötre özelliklerini ve elastisite modülü özelliklerini farklı sürelerde gözlemlenmiştir. Doğal kum agregası ile üretilen betonun aynı işlenebilirlik değerine ulaşması için daha fazla miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanılması gerekliliği tespit edilmiştir. Çimento harçlarında atık döküm kumunun oranı arttıkça basınç mukavemetinin azaldığı ve atık döküm kumunun çimento yapımında kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir. Betonlarda atık döküm kumunun ağırlıkça oranı arttıkça basınç mukavemeti ve elastisite modülünün düştüğü, rötreinin ise arttığı sonucu elde edilmiştir. Atık döküm kumunun inşaat sektöründe yapı ürünü olarak kullanılabileceğine değinilmiştir.

Monoharan ve ark. (2018) tarafından atık döküm kumunun değerlendirilmesi ve doğal nehir kumunun kullanımının azaltmasına çözüm bulmak adına deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada doğal nehir kumu ile farklı oranlarda atık döküm kumu karıştırılmıştır. Mikroyapısal özelliklerini araştırmak için XRD, SEM, Enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) ve optik mikroskopik analizler yapılmıştır. Bu analizlerin yanı sıra basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme mukavemeti, elastisite modülü, ultrasonik darbe hızı, hızlı klorür penetrasyon, su soğurumu ve aşınma direnci testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda ağırlıkça %20 oranında atık döküm kumu ile üretilen beton özelliklerinin diğer karışımli betonlara göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aguayo ve ark. (2017) tarafından atık döküm kumu kullanılarak ultra yüksek dayanımlı betonun hidrasyonu ve alkali silika reaksiyonu hakkında deneysel çalışma yürütülmüştür. Atık döküm kumu yalnızca sürdürülebilir değil buna ilaveten tamamlayıcı çimentolu ürününde özelliklerini bulundurur. Alkali silika reaksiyonu açısından reaktif olmayan ve reaktif olan bir kum kullanılarak iki farklı seri ultra yüksek mukavemetli beton karışımları üretilmiştir. Basınç dayanımı testi sonuçları 7, 14 ve 28. günlerde her iki seri içinde 85 MPa-181.78 MPa arasında değişim sağlamıştır. 23°C'de tutularak hidrasyon ısısı iletkenlik kalorimetresi ile ölçülmüştür. Alkali silika reaksiyonu hızı için ise hızlandırılmış harç çubuğu testi (AMBT) kullanılmıştır. Atık döküm kumu ve reaktif kumun birleşiminden, ağırlıkça %30 oranına kadar atık döküm kumu eklendiğinde alkali silika reaksiyonunda artış gözlemlenmiştir.

Smarzewski ve Barnat-Hunek (2016) tarafından yüksek dayanımlı betona kömür cürufu ve atık döküm kumu ilave edilerek betonun mekanik dayanımı ve

dayanıklılığı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bunlar; yoğunluk, su emme oranı, basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, donma-çözülme testleri, tuz direnci, porozite, yüzeysel enerji özellikleridir. Çalışmada su, süper akışkanlaştırıcı oranları sabit tutulmuştur. En fazla miktarda kömür cürufu içeren betonda en yüksek yüzeysel enerji değer sonucu elde edilmiştir. Kömür cürufu ve atık döküm kumunun birlikte kullanımında tuz kristalleşmesine karşı direncinde artış tespit edilmiştir. Genel sonuç ise kömür cürufunun ve atık döküm kumunun betonun tüm özelliklerini etkilediğidir.

Gurumoorthy ve Arunachalam (2016) tarafından demir ve demir dışı metal döküm sektöründeki kullanılan yüksek kaliteli silika kumunun kullanımından çıkan atık döküm kumunun betonda kullanılarak geri dönüşümü için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Demir metal içeren döküm sektöründen çıkan atık döküm kumunun içerisinde fazlaca demir bulunmaktadır. Demir metalleri içeren atık döküm kumuna bağlayıcılığını ve dayanım özelliklerini azaltmaması amacıyla farklı oranlarda HCl asit eklenmiştir. Elde edilen atık döküm kumu ağırlıkça farklı oranlarda ince agrega ile karıştırılmıştır. Tüm beton numunelerinde 0.5 su/çimento oranı sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre; atık döküm kumunun beton içerisindeki dozu attıkça beton karışımlarındaki mekanik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu sonuçlarına göre ise C-S-H jel oluşumuna bakılarak mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Çalışmada asit eklenen atık döküm kumunun çevre kirliliğini azaltmaya ve doğal kaynaklarımızı korumaya yardımcı olması amacı ile iyi niteliklerde beton üretimini yapılabileceğine değinilmiştir.

Siddique ve Singh (2011) tarafından atık döküm kumu içeren betonlarla yapılan çalışmalarla ilgili derleme makalesi hazırlanmıştır. Atık döküm kumunun çekme mukavemetini, donma-çözülme direncini, basınç mukavemeti, elastisite modülü ve büzülme gibi beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmada, atık döküm kumu ile ince agreganın farklı oranlarda karıştırılmasıyla su emme oranı kapasitesinin düştüğüne, atık döküm kumunun beton veya beton içeren malzemelerin üretiminde ince agrega ile karıştırılarak kullanılabileceğine değinilmiştir.

Salokhe ve Desai (2013), tarafından demir ve demir dışı metal döküm sektörlerinden çıkan atık döküm kumunun ince agrega ile farklı oranlarda karıştırılarak betonda kullanılabilirliği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarla taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir. 7 ve 28 gün kürlenmiş beton numunelerine testler yapılmıştır. Çalışmada demir ve demir dışı metal döküm

sektörlerinden çıkan atık döküm kumunun beton üretiminde kullanılabileceğine değinilmiştir.

Karaaslan (2019), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında atık döküm kumunun harç numuneleri üzerine etkisi incelemiştir. Atık döküm kumu farklı oranlarda ince agrega ile karıştırılmıştır. Hazırlanan numunelere farklı zamanlarda basınç mukavemeti, kılcal su emme oranı, kuru birim ağırlık ve su emme oranı, eğilme mukavemeti, alkali silika reaksiyonu ve rötre ölçümleri yapılmıştır. Buna ilaveten, beton numuneleri 400°C, 500°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ki ağırlık ve basınç mukavemeti ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Numunelerde su/çimento oranı sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmanın sonucunda ise %20'ye kadar ince agrega ile karıştırılan atık döküm kumu içeren harçların kullanılabileceğine, beton yapımında ince agrega ile uygun oranlarda atık döküm kumunun karıştırılarak kullanılabilir olduğuna değinilmiştir.

Yıldız ve ark. (2018) tarafından öğütülmüş dökümhane cürufunun farklı oranlar da çimento ile karıştırılarak kullanılmasının çimentolu harcın özelliklerini etkisini belirlemek için deneysel çalışma yapılmıştır. Taze harç numunelerine slump deneyleri, sertleşmiş harç numunelerine ise eğilme mukavemeti, birim ağırlık, su emme oranı, kılcal su emme oranı ve basınç mukavemeti testleri yapılmıştır. Numunelerde su/bağlayıcı oranı 0.6 olarak sabit tutmuşlardır. Deneysel çalışmalarının sonucunda ise; öğütülmüş dökümhane cürufunun %10 oranında kullanılmasının harç özellikleri olumlu yönde geliştirdiği %20 oranına kadar kullanılmasının mekanik özelliklerinde çok düşüşe sebep olmadan kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Aggarwal ve Siddique (2014) tarafından atık döküm kumu ve taban külünün farklı oranlarda ağırlıkça %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 olmak üzere eşit miktarlarda örneğin; %10 oranı için %5 atık döküm kumu ve %5 taban külü olmak üzere ince agrega ile karıştırılarak kullanılabilirliği ile ilgili deneysel çalışma yürütülmüştür. Basınç mukavemeti, kayma gerilmesi mukavemeti, elastisite dayanımı, hızlı klorür penetrasyonu, X-ışını kırınımı analizi (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gibi kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. %30 atık döküm kumu ve %30 taban külünü ince agrega ile karıştırılarak kullanımının dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkilemediği tespit edilmiştir.

Çelik ve ark. (2017) tarafından çelik üretimi sonucunda ortaya çıkan atık döküm kumunun ağırlıkça farklı oranlarda doğal kum agregası ile karıştırılarak çimento harcında kullanılabilirliği deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Çalışmada harç

karışımlarında çimento miktarı sabit tutulmuştur. Tüm numunelere basınç mukavemeti ölçümü yapılmıştır. Basınç dayanımı ölçüm sonuçlarına göre atık döküm kumu miktarı arttıkça atık döküm kumu içermeyen numuneye kıyasla nispi bir azalma tespit edilmiştir. En iyi basınç mukavemeti ölçüm değerini ağırlıkça %15 atık döküm kumu içeren numune vermiştir. Buna ilaveten mikroyapısal özelliklerini belirlemek için Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Bunun sonucunda ise atık döküm kumu taneciklerinin çimentolu matrise iyi gömüldüğü gözlemlenmiştir.

Literatür araştırmalarından görüldüğü üzere, atık döküm kumunun geri kazanılarak beton, tuğla, harç malzemesi gibi yapı malzemeleri içerisinde değerlendirildiği ve çevresel anlamda olumsuz etkilerinin azaltılmasının hedeflendiği ile ilgili çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalara bakıldığında atık döküm kumu, ham döküm kumunun ve atık vermikülitin karşılaştırma amaçlı beton katkısı olarak kullanıldığı çalışma ile karşılaşılmamıştır.

2.2. Beton Üretiminde Atık Malzeme Kullanımı Ve Yapılan Çalışmalar

Günümüzde, atık ve artık olarak ortaya çıkan malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü konusunda yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda atıklardan yeni ürünler elde edilmesi veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Atıkların yeniden kullanımı veya geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak, doğanın tahrip edilmesini önlemekte, üretimde verimliliği artırmakta ve atık depolanması sonucu oluşacak çevre problemlerini en aza indirmektedir. Bu kapsamda hem beton üretiminde kullanılan çimento ve agrega üretiminde meydana gelen çevresel etkilerin azaltılması ve dolayısıyla beton üretiminin çevresel etkisinin azaltılması, hem de meydana gelen farklı atıkların geri kazanılarak beton içerisinde kullanılması da atıkların yeniden kullanımı adına önemli bir gelişme göstermiştir. Bu konu ile ilgili olarak beton içerisinde atık değerlendirmeye yönelik çeşitli literatür çalışmaları mevcuttur.

Çakıroğlu ve ark. (2011) tarafından atık teneke ambalajlarının beton üretiminde kullanılabilirliği deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Çalışma atık teneke ambalajları farklı boy/en oranlarında ve farklı miktarlarda kullanılmıştır. Üretilen beton karışımlarının basınç dayanımı ölçümü yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda ise atık teneke ambalajlarının uygun boyut ve miktarda kullanıldığı zaman betonun özelliklerinin olumlu yönde etkileyeceğine değinilmiştir.

Kara ve Bekem (2018) tarafından çay fabrikasının yakma ünitesi filtre sisteminde tutulan kömür külünün beton kullanılabilirliği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kömür külünün farklı oranlarda çimento ile karıştırılarak C20/25 sınıfı dört farklı beton numunesi üretilmiştir. Ürettikleri beton numunelerine slump deneyi, geri sıçrama değeri tayini (schmidt çekici), basınç mukavemeti, ultrases geçiş hızı tayini testleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarının sonucunda ise, atık eklemenin taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, schmidt çekici yapılan basınç mukavemeti testleri değerleri 7. günde basınç mukavemeti atık içeren betonların kontrol betonuna göre daha yüksek çıkmıştır. 28. günde ise beton içerisinde atık miktarı arttıkça kontrol numunesine kıyasla basınç mukavemetinde azalma olmuştur. Atık kömür külünün beton içerisinde çimento ile %15'e kadar kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Belmokaddem ve ark. (2020) tarafından beton içeriğindeki ince ve iri agregalar ile üç plastik atığı polipropilen PP, yüksek yoğunluklu polietilen HDPE ve polivinilklorür PVC ve farklı oranlarda (%25, %50 ve %75) olmak üzere karıştırılarak betonun fiziksel, mekanik ve morfolojik özellikleri ile ilgili deneysel çalışma yapılmıştır. Agregalar ile karıştırılan plastik miktarı arttıkça basınç mukavemetinde azalma gözlemlenmiştir. %75 HDPE ile karıştırılan agregalarda ise betonun basınç mukavemeti değeri %88 daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Düşük yoğunluk ve orta mukavemetin ihtiyaç duyulduğu yapısal uygulamalarda kullanımında mekanik mukavemet kaybının önemli olmadığına değinilmiştir. Plastik miktarı artmasıyla betonun ultrasonik darbe hızı (UPV) değerlerinin azaldığı sonucu elde edilmiştir. Betonda plastik agregalarının kullanılmasının ısı yalıtımında olumlu sonuçlar verdiği ve en düşük ısı iletkenliği %75 PVC beton karışımının olduğu sonucu elde edilmiştir.

Batayneh ve ark. (2007) tarafından atık cam, atık plastik ve yıkılmış betonun beton üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Beton karışımlarında farklı oranlarda ince agregalar ile öğütülmüş plastik, iri agregalar ile ise kırılmış beton karıştırılarak taze ve sertleşmiş beton numunelerinin üzerinde testler yapılmıştır. Bu çalışmanın genel sonucunda ise; atık plastik, atık cam ve yıkılmış beton karışımlarının ince veya kaba agregalar ile uygun oranlarda karıştırılarak başarıyla yeniden kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Cabrera-Luna ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada volkanik pomza (süngertaşı) bazlı, süper sülfatlı çimentoların betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmada volkanik pomza bazlı süper sülfatlı çimentoları betonda kullanarak beton karışımları üretilmiştir. Beton karışımlarının mekanik, elektrokimyasal ve mikro-

yapısal özelliklerini 180 gün boyunca gözlemlenerek veriler elde edilmiştir. Genel sonuç olarak ise volkanik pomza bazlı süper sülfatlı çimentolara dayalı betonların, volkanik malzemelere ulaşma imkanı olan bölgeler için dayanıklı beton üretiminde umut vaat eden bir alternatif olduğuna değinilmiştir.

Nath ve Sarker (2011) tarafından yapılan çalışmada uçucu külün yüksek dayanımlı betonda dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Numuneler için toplam bağlayıcının %30 ve %40'ı kadar uçucu kül ekleyerek beton bileşimleri hazırlanmıştır. Uçucu kül içeren ve referans beton numunelerinin basınç mukavemeti, sorptivite, hızlı klorür geçirgenliği ve rötre ölçümü değerleri elde edilmiştir. 28. günde basınç mukavemetleri 65 MPa - 85 MPa arasında değişim gösterdiği, referans beton numunelerin uçucu kül içeren beton numuneleri aynı 28 günlük basınç mukavemeti için tasarlandıklarında uçucu kül içeren beton numunelerinin daha az rötre değeri gösterdiği sonucu tespit edilmiştir. Uçucu külün eklenmesinin sorptiviteyi ve klorür geçirgenliği azalttığı, sonuç olarak çimentonun uygun oranda uçucu kül ile karıştırılmasının betonun dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilediğine değinilmiştir.

Sadowski ve ark. (2019) tarafından çimento ile farklı oranlarda atık kuvars mineral tozu ve aynı oranlarda kuvars-feldspat mineral tozu eklenip beton numuneleri hazırlanarak, beton şaplarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisinin sistematik incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme için ultrasonik darbe hızı (UPV) tekniği kullanılmıştır. Betonun bileşimi ve ultrasonik darbe hızına dayalı olarak basınç mukavemetini tahmin etmek adına yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Atık kuvars mineral tozlarını kullanarak modifiye edilmiş çevre dostu düşük dayanımlı beton şaplarının basınç dayanımı açısından güvenli şekilde değerlendirilebilir olduğuna değinilmiştir.

Amin ve ark. (2020) tarafından kaba agrega ile seramik atıklarının karıştırılmasıyla hazırlanan ultra yüksek performanslı betonu zenginleştirmek için silis dumanı ve metakoalin çimento ile farklı oranlarda karıştırılarak taze ve sertleşmiş betonun mikroyapısal, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda ise çimento ile silis dumanı veya metakoalinin farklı oranlarda karıştırılmasının ultra yüksek performanslı betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği sonucu elde edilmiştir. Buna ilaveten bu atığın inşaat yapı ürünü olarak kullanılması sürdürülebilirlik yönünden ekonomik ve çevresel faydalar sağlanabileceğine değinilmiştir.

Ulubeyli ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada atık mermerin standart veya kendiliğinden yerleşen betonlarda katkı malzemesi veya agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarında klorür penetrasyonu, karbonatlaşma, su emme oranı ve geçirgenlik gibi dayanıklılık özellikleri, sülfat saldırısı ve aşınma direnci, yüksek sıcaklık, donma-çözünme performansları incelenmiştir. Atık mermerin betona eklenmesiyle su emme oranı ve geçirgenlik özelliklerinin ile sülfat saldırısına ve klorür penetrasyonuna karşı direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak atık mermerin standart veya kendiliğinden yerleşen beton karışımlarında agrega ve katkı malzemesi olarak kullanılmasının betonun dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilediği sonucu elde edilmiştir.

Varadharajan (2020) tarafından ince agrega ile %30'a oranına kadar atık mermer tozu ve %30 oranına kadar çimento ile uçucu kül karıştırılarak betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için ise %1 ve %3 arasında çengelli çelik lifler eklenerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Numunelere basınç mukavemeti, eğilme dayanımı, porozite, işlenebilirlik, çekme mukavemeti testleri uygulanmıştır. Atık mermer tozu ve uçucu külün bağlayıcı özelliklerinden ötürü betondaki ince agrega ve çimentoyla karıştırılarak kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir.

Davraz ve ark. (2018) tarafından andezit atık tozunun etkinlik faktörü incelenerek ve uçucu küllerle karşılaştırmaları yapılmıştır. Mineral katkıların verimlilik faktörlerini belirlemek için beton numunelerinin kürlenme yaşlarına göre analiz edilmiştir. Mineral katkıları farklı oranlarda betona eklenerek basınç mukavemeti, eğilme dayanımı, porozite, su emme oranı ve ultrasonik darbe hızı analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak andezit atık tozunun betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabileceğine değinilmiştir.

Soğancıoğlu (2011) tarafından andezit mermeri işleme tesisi atık suyunun farklı koagülan ve flokülantlar kullanarak, koagülasyon flokülasyon prosesleriyle arıtımı sonucu ortaya çıkan andezit çamurlarının beton katkısı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atık çamuru kuru ve ıslak halde %0.5 - %1.5 arasında değişen oranlarda 250 dozluk beton bileşimine ekleyerek beton üzerinde basınç dayanımı, donma çözülme, işlenebilirlik, su emme oranı, boşluk oranı ve kapiler su emme katsayısı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kuru formda kullanılan %0.5 dozunda alum, $FeCl_3$ ve sepiyolit içerikli katkıların betonda en iyi dayanım verdiği, uygulamada ıslak formda kullanmanın ve karışıma eklenen katkı hacmi kadar suyu eksiltmenin daha başarılı bir sonuç verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sayede arıtma tesisinde çamur

susuzlaştırma ve kurutma ünitelerine gerek duymadan çamurun betonda kullanılarak ekonomik kazanç sağladığına ve andezit çamurunun doğaya atılmasının önüne geçilerek ekolojik bir kazanç sağladığına değinilmiştir.

2.3. Vermikülit Kullanılarak Yapılan Literatür Çalışmaları

Çoşar (2020) tarafından hafif agrega ile geliştirilmiş vermikülitin farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmasıyla üretilen hafif harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Farklı vermikülit/çimento karışımlara sahip harç numuneleri üretilip 28 günlük standart kürlendirme sonrası 300°C, 600°C, 900°C ve 1100°C sıcaklığa maruz bırakarak numunelere fiziksel özelliklerini tespit etmek için birim ağırlık, su emme oranı, 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 kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kaya (2011) tarafından yapılan çalışmada geliştirilmiş vermikülit kullanarak, farklı oranlarda silis dumanı içeren çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık etkisindeki mekanik dayanımları araştırılmıştır. Üç farklı vermikülit/çimento oranına sahip karışımlara, çimento ağırlığının %5, %10 ve %15'i oranında silis dumanı ekleyerek numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneleri 300°C, 600°C ve 900°C maruz bıraktıktan sonra eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaların sonunda, yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı içeren numunelerin, silis dumanı içermeyen numunelere göre, basınç dayanım değerlerinin yüksek, ultrases geçiş hızlarının ve eğilme dayanım değerlerinin düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Vermikülitin, çimento ve diğer bağlayıcılar ile birlikte kullanılarak yalıtım ve ısıya dayanıklı yapı malzemesi üretiminde kullanılmasıyla ilgili daha çok çalışmaya ihtiyaç olduğuna değinilmiştir.

Şahin (2011) tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklık altında geliştirilmiş vermikülit bulunan çelik tel ilaveli çimento esaslı kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. 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 eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmasının sonunda sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında ve ultrases geçiş hızlarında azalma olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Türeyen (2019) tarafından yapılan çalışmada genleştirilmiş vermikülit tozu kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Köpük beton üretimi, 3 farklı genleştirilmiş vermikülit tozu, 3 farklı çimento miktarı ve 3 farklı köpük miktarı değişkeni kullanılarak yapılmıştır. Üretilen numuneler 28 gün kürlendikten sonra ultrases geçiş hızı, porozite, su emme oranı, birim ağırlık değeri, kılcal su emme oranı, ısı iletkenlik ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmasının sonunda karışımlarda köpük oranı ve genleştirilmiş vermikülit oranı arttıkça su emme oranı ve porozitenin arttığı, birim ağırlığının, basınç dayanımının ve ısı iletkenlik katsayısının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Naveenkumar ve ark. (2021) tarafından çalışmada ince agrega ile %5 ve %10 oranlarında vermikülit karıştırılarak üretilen betonarme kirişinin eğilme dayanım özellikleri incelenmiştir. Uygun oran tespit ettikten sonra tek donatılı kiriş ve çift donatılı kiriş kullanılarak üretim yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda betonarme kirişinde vermikülitin %5 oranında kullanılabilir olduğu ve betonarme kirişin birim ağırlığının %10'a kadar azaldığı sonucuna varılmıştır.

Zhan ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada genleştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilen mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı malzemelerin kendi kendine çatlak iyileştirmesi incelenmiştir. İlk olarak genleştirilmiş vermikülit ile mikroorganizmaların adsorpsiyon ve immobilizasyonu gerçekleştirilip immobilizasyondan sonra mikroorganizmalar canlanıp güçlü aktiviteye sahip olmuştur. İkinci olarak genleştirilmiş vermikülit farklı yöntemlerle sarılmıştır. Sonuç olarak genleştirilmiş vermikülit içinde hareketsiz hale getirilmiş mikroorganizmalar tarafından çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri ve çatlağın kendi kendine iyileşme etkisi doğrulanmıştır.

Mo ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada kum ile %30 ve %60 olmak üzere genleştirilmiş vermikülit karıştırılarak üretilen çimento esaslı harçların özellikleri incelenmiştir. Genleştirilmiş vermikülit içeren çimento esaslı harçların, içermeyen harca göre işlenebilirliği daha yüksek olmuştur. Çalışmalarının sonunda genleştirilmiş vermikülitin gözenekli yapısının, su emme oranının arttığı bundan kaynaklı harcın birim ağırlığının ve basınç dayanımının azalmasına sebep olduğu, birim ağırlığının

azalmasının ise harcın ısı direnci ve termal stabilitesini sağlamakta olumlu etkisi olduğu sonucu elde edilmiştir.

Köksal ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada vermikülit ve silis dumanı ile üretilen çimento esaslı harçların özelliklerini laboratuvar ortamında ve yüksek sıcaklıklarda incelenmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel, mekanik, termal ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Hacimce farklı vermikülit/çimento oranı numuneler üretilmiştir. Silis dumanını ise her bir vermikülit/çimento oranı için çimento miktarının %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen numuneler 6 saat boyunca 300°C, 600°C ve 900°C'ye maruz bırakıldıktan sonra birim ağırlıkları ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarının sonunda silis dumanı ilavesinin yüksek özgül yüzeyi sebebiyle vermikülit esaslı harçların akışkanlığını ve gözenekliliğini azalttığı ancak silis dumanı içermeyen harçların vermikülit içeriği arttıkça gözenekliliğinin arttığı, vermikülit içeren harçlarda su emme oranını arttığı, ısı iletkenlik katsayısının azaldığı ve silis dumanı yüzdesi arttıkça mukavemetinin arttığı sonucu elde edilmiştir. Buna ilaveten vermikülit içeren harçların yangına dayanıklı olduğu, vermikülitin yangına dayanıklı bir malzeme olduğuna değinilmiştir.

Köksal ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada çelik liflerin ve geliştirilmiş vermikülitin yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. 1100°C'ye kadar farklı sıcaklıklara maruz bırakılan hafif harç numuneleri üzerine harç takviyesi olarak farklı oranlarda geliştirilmiş vermikülit ve çelik lifler eklenerek bir deneysel program yapılmıştır. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler ortam sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrasonik darbe hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının sonunda, 900°C'ye kadar basınç ve eğilme mukavemetinin korunduğu, basınç ve eğilme mukavemeti için maximum uygulanabilir sıcaklığın 900°C olduğu, çelik liflerin eklenmesinin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği ve geliştirilmiş vermikülit içeren hafif harçların yüksek sıcaklıklardaki veriminin kullanılan lif miktarı ile bağlantılı olduğu sonucu elde edilmiştir.

Vermikülit ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalara bakıldığında çalışmaların saf vermikülit ile yapıldığı görülmektedir. Literatür çalışmaları daha detaylı tarandığında vermikülitin elde edilmesi sırasında meydana gelen vermikülit atıkları ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

2.4. Çalışmanın Amacı

Atık döküm kumları ve vermikülit işleme yan ürünleri (atıkları) çoğunlukla tekrar kullanılmadan düzenli depolama tesislerinde depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir. Bertaraf edilmesi yerine çevre dostu yöntemlerle ekonomik değeri olan faydalı ürünlere dönüştürülmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, kullanılmamış döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülitin doğal agrega ile belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yaş ve sertleşmiş betonun fiziksel, kimyasal, morfolojik, mekanik ve termal davranışları araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen veriler literatür bilgileri ile karşılaştırılmış, atık döküm kumu ve atık vermikülitin beton katkısı olarak kullanılabilirliğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Ham döküm kumu

Çalışmada kullanılan ham (kullanılmamış) döküm kumu, Konya OSB bölgesinde faaliyet gösteren Motus Otomotiv Makina Ve Metalurji San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Ham döküm kumu

3.1.2. Atık döküm kumu

Çalışmada kullanılan atık döküm kumu, Konya OSB bölgesinde faaliyet gösteren Motus Otomotiv Makina Ve Metalurji San. Ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Döküm prosesinde kullanılan ve atık durumunda olup tekrar prosese giremeyecek nitelikteki atık döküm kumları bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan atık döküm kumu Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Atık döküm kumu

3.1.3. Atık vermikülit

Çalışmada kullanılan atık vermikülit Sivas ilinde faaliyet gösteren MS Madencilik Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Kullanılan atık vermikülit Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Atık vermikülit

3.1.4. Beton karışımı

Çalışmada C30 sınıfı küp beton numuneleri Konya Çimento A.Ş. Hazır Beton Santralinde hazırlanmıştır. Bu beton numuneleri hazırlanırken CEM II 42.5 tip çimento, TS EN 933-1'e uygun agrega, katkı olarak çalışma kapsamında ele alınan malzeme (ham döküm kumu), atık malzemeler (atık döküm kumu ve atık vermikülit) ve şebeke suyu kullanılmıştır. Kür suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.4.1. Çimento

Bu çalışmada, Konya Çimento Fabrikası'nda üretilmiş CEM II çimentosu kullanılmıştır. CEM II çimentosunun Konya Çimento Fabrikası'nda yapılmış olan kimyasal analizleri Çizelge 3.1'de kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM II çimentosunun kimyasal özellikleri

BİLEŞEN	CEM II (%)
SO ₃	3.33
Cl	0.017
Toplam katkı miktarı	16.1
K ₂ O	0.88
Na ₂ O	0.49

Çizelge 3.2. CEM II çimentosunun fiziksel özellikleri

BİLEŞEN	CEM II (%)
2 günlük basınç dayanımı (MPa)	26.7
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	46.1
Priz başlangıcı (dk)	192
Hacim genleşmesi (mm)	1

3.1.4.2. Su

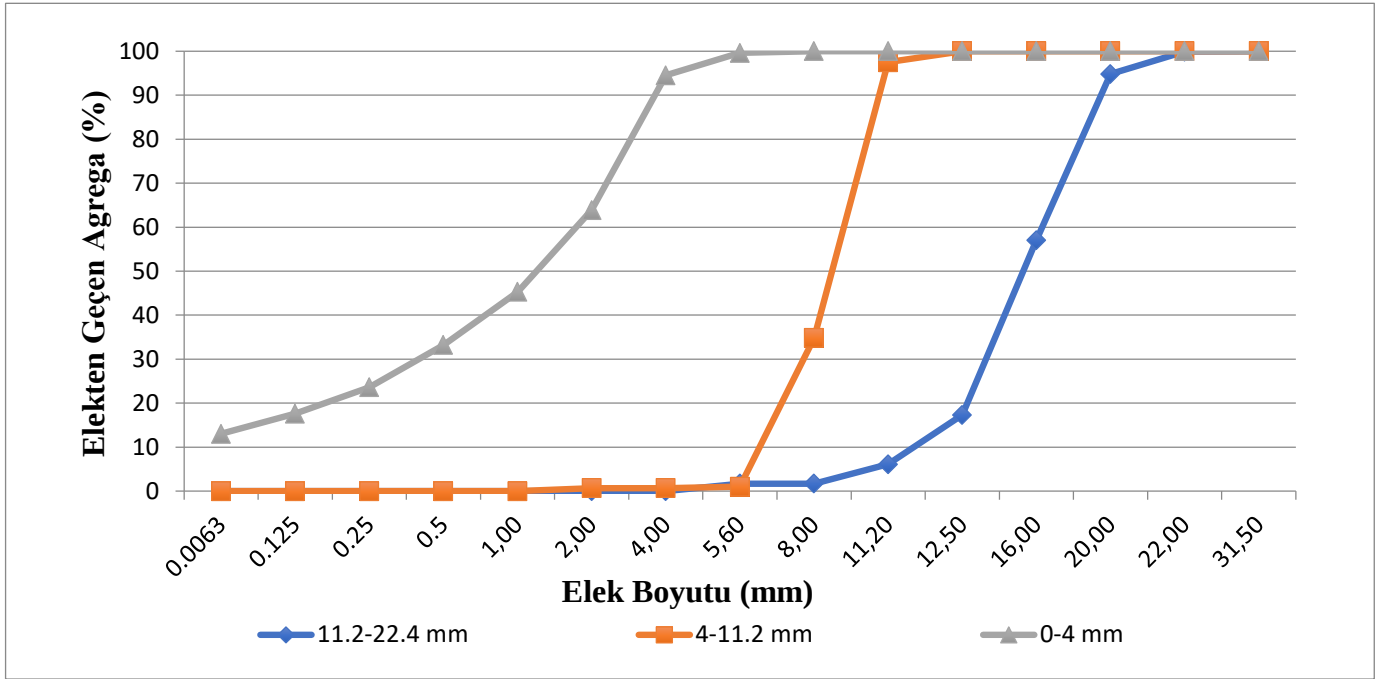
Beton karışımına su ilavesinin amacı çimento ile kimyasal reaksiyona girmesi ve taze betonun işlenebilirliğini sağlayacak kıvam oluşturmaktır. İçilebilen her su genel olarak betonda kullanılabilir. Su/çimento oranı betonun basınç dayanımını etkilemektedir. Su miktarının optimum değerden düşük olması betonun basınç dayanımını azaltacaktır. Bu çalışmada kullanılan Konya şehir şebeke suyudur. Febas Çevre Laboratuvarı Analiz San. Ve Tic. Ltd. Şti.'den alınan suyun kimyasal özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Beton karışım suyu analiz raporu

PARAMETRE	BİRİM	SONUÇ
pH (Sıcaklık: 15.7°C)	-	7.2
İletkenlik	µS/cm	1585
Alkanite	mg/L	320
Çökebilir Katı Madde	mL/L	0.3
Klorür	mg/L	128
Sülfat	mg/L	322
Nitrat	mg/L	0.952
Fosfat	mg/L	0.031
Çinko	mg/L	0.0085
Sodyumoksit	mg/L	127
Potasyumoksit	mg/L	15.2
Koku	-	Yok
Renk	-	Berrak
Sıvı-katı yağlar	-	Yok
Deterjan	-	Yok
Organik madde	-	Oluşan renk uygundur
Yoğunluk	g/cm ³	0.992

3.1.4.3. Agrega

Çalışmada bölgenin agrega ihtiyacını karşılayan Konya Çimento A.Ş. bünyesinde faaliyet gösteren Karaömerler kum çakıl ocağından getirilen kırmataş agrega kullanılmıştır. 0-4, 4-11.2 ve 11.2-22.4 mm boyutlarında olmak üzere üç çeşit kırmataş agrega kullanılmıştır. Agrega gradasyonu Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Agrega gradasyonu

3.1.5. Mikser

Beton harcını karıştırmak için düşey eksenli cebri karıştırıcı betoniyer (mikser) kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Düşey eksenli cebri karıştırıcı betoniyer

3.1.6. Çökme konisi

Çalışmada kullanılan beton karışımlarının kıvam açısından uygunluğunu tespit etmek için standart ölçülere sahip çökme konisi kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Çökme konisi

3.1.7. Malzemenin, atık malzemelerin ve sertleşmiş betonun karakterizasyonunda kullanılan cihazlar

3.1.7.1. Beton presi

Beton numunelerinin basınç dayanımı testinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu deney için hazır beton santralinin laboratuvarında bulunan 200 ton kapasiteye sahip tek eksenli basınç presi kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Beton presi

3.1.7.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu, optik ve elektronik sistemlerin beraber kullanımıyla yüksek büyütme ile analizler yapabilen bir cihazdır. Çalışmada ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülitin karakterizasyonunda ve bu malzeme ve atıklar kullanılarak üretilen sertleşmiş betonların yüzey morfolojisi tespiti için yüksek çözünürlükteki görüntüsü taramalı elektron mikroskobu tekniği ile

alınmıştır. Görüntüleme 28 gün kür işlemine tabi tutulan beton numuneleri üzerinde, kullanılmamış döküm kumu malzemesinde ve atık malzemelerin (atık döküm kumu ve atık vermikülit) üzerinde yapılmıştır. Görüntülme yapılmadan önce elektronların yansması için numuneler altın kaplama ile kaplanıp Zeiss marka EVO-LS10 taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilerek görüntülenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.1.7.3. Termogravimetrik analiz cihazı (TGA)

Termogravimetrik analiz, numunenin kütlesinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen ağırlık değişimlerini tanımlamaya yarayan bir tekniktir. Çalışmada ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülit karakterizasyonunda ve bu malzeme ve atıklar kullanılarak üretilen 7 ve 28 gün kürlenmiş sertleşmiş betonların kütlesinde sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen ağırlık değişimlerini tanımlamak için Perkin Elmer marka TGA 4000 model termogravimetrik analiz cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Termogravimetrik analiz cihazı

3.1.7.4. FTIR (Fourier Transform Infrared) spektrofotometresi

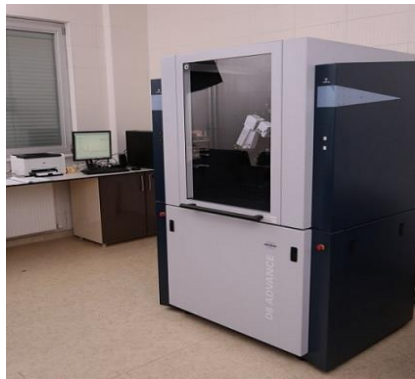
FTIR spektrum cihazı fonksiyonel bileşiklerin tanımlamasında kullanılır. Çalışmada ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülit karakterizasyonunda ve bu malzeme ve atıklar kullanılarak üretilen 28 gün kürlenmiş sertleşmiş betonların sahip olduğu fonksiyonel bileşikleri belirlemek için Thermo Scientific Nicolet iS5 FTIR Spektrometresi cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. FTIR (Fourier Transform Infrared) spektrofotometresi

3.1.7.5. X-ışınları difraktometresi (XRD)

X-ışını kırınım yöntemi, her bir kristal fazın kendine özel atomik dizilimlerine bağımlı olarak x-ışınların karakteristik bir düzen ile kırılması esasına dayanır. Çalışmada ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülit karakterizasyonunda ve bu malzeme ve atıklar kullanılarak üretilen sertleşmiş betonların minerolojik bileşimlerini tespit etmeye dayalı olarak kalitatif özelliklerine belirlemek için Bruker marka D8 ADVANCE model X-ışını difraktometresi cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. X-ışınları difraktometresi (XRD)

3.2. Metot

3.2.1. Beton harcının hazırlanması

Beton harçları C30 beton sınıfının gerektirdiği malzeme bileşimi esas alınarak hazırlanmıştır. Beton bileşimindeki ince agrega ağırlıkça %5, %10, %20 oranlarında atık döküm kumu, ham döküm kumu ve atık vermikülit ile yer değiştirilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numune hazırlanmıştır. Beton karışımları düşey eksenli cebri karıştırıcılı betoniyer içerisinde karıştırılmıştır. Betoniyerde hazırlanan beton karışımları 10x10x10 cm'lik küp şeklindeki kalıplara 3 aşamada yerleştirilmiştir. Numune kalıplarına dökülmüş taze beton örnekleri Şekil 3.12'de verilmiştir. Her bir deney için üç adet 7 günlük ve üç adet 28 günlük olmak üzere 6 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 3.12. Numune kalıplarına dökülmüş taze beton örnekleri

Bütün beton karışımlarında çimento miktarı 380 kg/m^3 olmak üzere sabit tutulmuştur. Kullanılan su miktarı, agrega miktarları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kullanılan agrega, çimento ve su miktarları

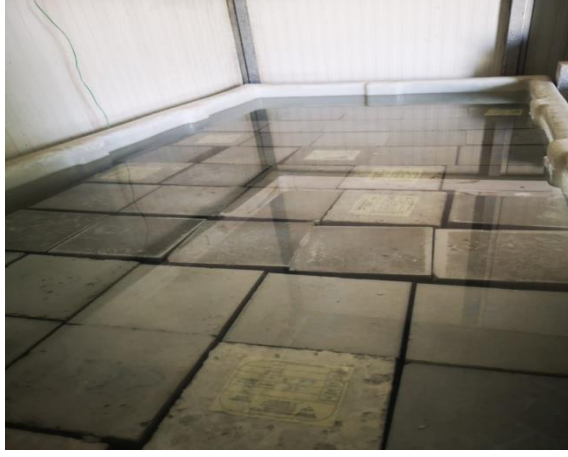
Numune Kodu	Numune adı ve açıklaması	Agrega			İkame Kg/m ³	Su Lt/m ³	CEM II 42.5 R Kg/m ³
		0-4 mm Kg/m ³	4-11.2 mm Kg/m ³	11.2-22.4 mm Kg/m ³			
Ş	Şahit (Katkısız)	948	185	538	0	220	380
ADK5	%5 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	901	185	538	47	200	380
ADK10	%10 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	853	185	538	95	227	380
ADK20	%20 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	758	185	538	190	250	380
HDK5	%5 Ham döküm kumu içeren beton numunesi	901	185	538	47	220	380
HDK10	%10 Ham döküm kumu içeren beton numunesi	853	185	538	95	220	380
HDK20	%20 Ham döküm kumu içeren beton numunesi	758	185	538	190	220	380
VK5	%5 Atık vermikülit içeren beton numunesi	901	185	538	47	280	380
VK10	%10 Atık vermikülit içeren beton numunesi	853	185	538	95	350	380
VK20	%20 Atık vermikülit içeren beton numunesi	758	185	538	190	480	380

3.2.2. Çökme deneyi

Çalışmada üretilen her beton için TS EN 12350-2'ye göre çökme deneyi yapılmıştır. Taze beton, çökme konisine üç tabaka halinde ve her tabaka koninin üçte birini dolduracak şekilde 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. Beton yerleştirildikten sonra üst kısım mala ile düzeltilmiştir. Daha sonra doldurulan beton sarsılmadan, koni yukarı doğru çekilerek alınmıştır. Beton kendi ağırlığıyla bir miktar çökünce çökme miktarı ölçülmüştür.

3.2.3. Numunelerin kürlerinin sağlanması

Numune kalıplarına dökülen taze beton 1 gün kalıpta bekletilerek sertleşmesi sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün boyunca su içerisinde 20 ± 2 °C'lik standart kür ortamında muhafaza edilmiştir (Şekil 3.13). Kür işlemi TS EN 12390-2'ye uygun şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.13. Kür ortamındaki numuneler

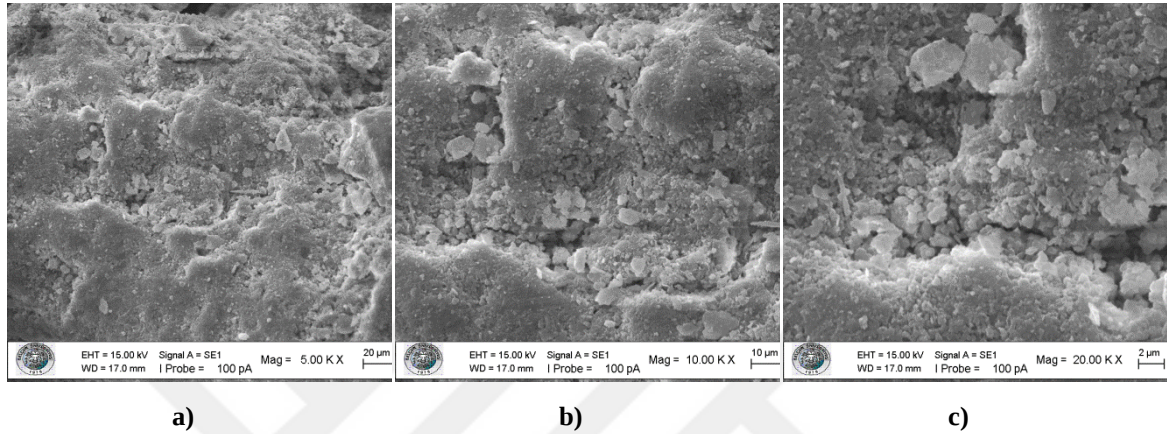
3.2.4. Beton basınç dayanımının belirlenmesi

Kür ortamından çıkarılan numunelerin beton presi yardımıyla 7 ve 28 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

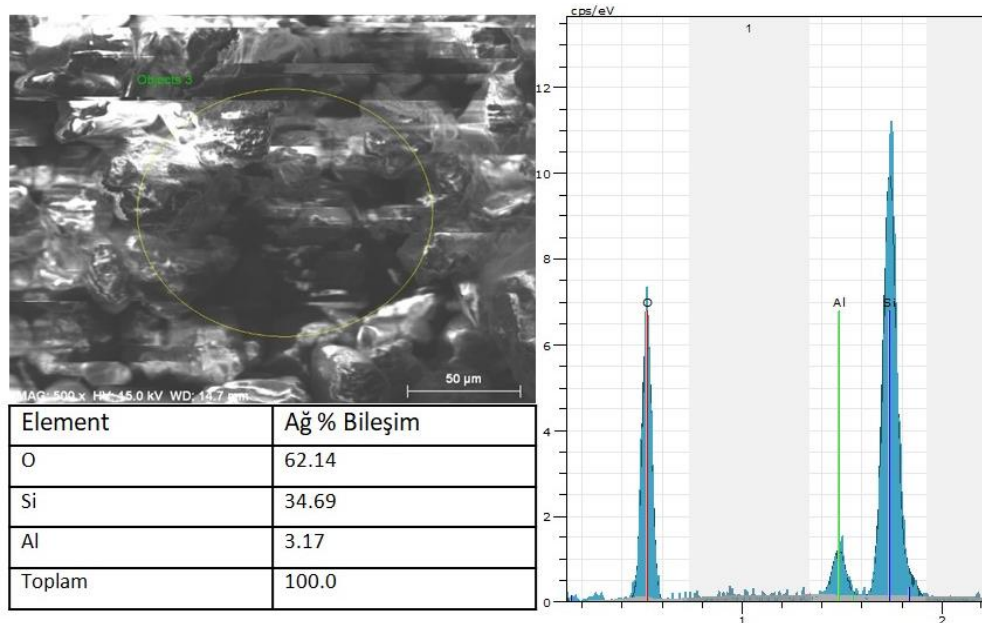
4.1. Malzemenin Ve Atıkların Karakterizasyonu

Kullanılan ham döküm kumunun yüzey morfolojisinin tespiti için çekilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Ham döküm kumunun a) x5000, b) x10000 ve c) x20000 SEM görüntüleri

Farklı büyütmelerdeki (x5000, x10000 ve x20000) SEM mikroyapı analizi görüntülerinde Şekil 4.1’de mikro yapılarda aglomerasyon, toz tane boyutlarında geniş bir dağılım ve toz şekillerinde farklılıklar gözlenmiştir. Makro yapıli taneciklerde ise yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve düz bir topoğrafik yapı gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Ham döküm kumunun x500 SEM görüntüsü ve EDS analizi

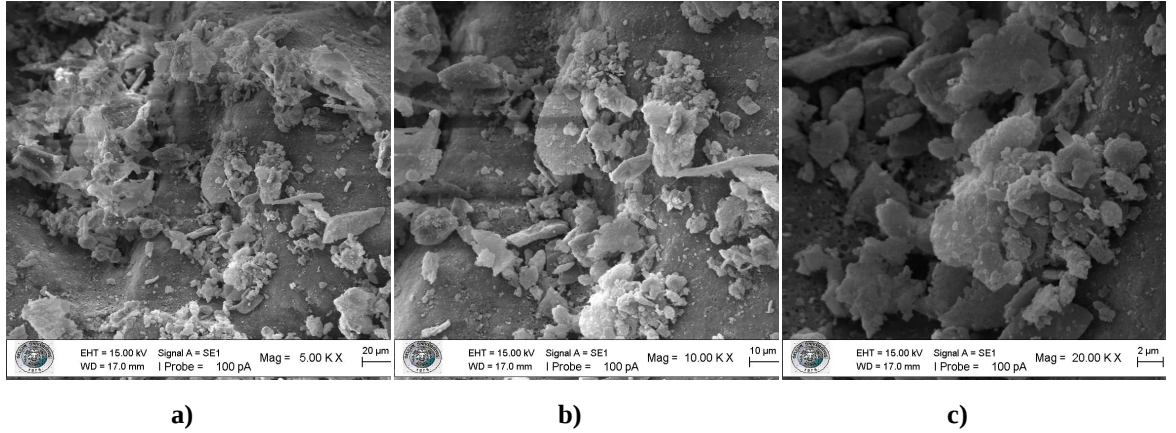
Şekil 4.2’de x500 büyütmedeki görüntü ve EDS analizi verilmiştir. Döküm kumu ağırlıkça yüksek oranda SiO_2 içermekte olup, Şekil 4.2’de görüldüğü üzere ham döküm kumunda silika bileşimine ilave olarak oksijen ve alüminyum pikleri tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen ham döküm kumunun fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları da silisyum, oksijen ve alüminyum elementlerini içerdiğini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.1. Ham döküm kumunun fiziksel ve kimyasal analizi

PARAMETRE	DEĞERİ
Yoğunluk, kg/m^3	2345
Su emme oranı	0.85
Alkali-silika reaktivliği	Tehlikesiz
Toplam kükürt (%)	0.08
SiO_2 (%)	76.4
CaO (%)	0.18
MgO (%)	0.27
Al_2O_3 (%)	5.1
FeO_3 (%)	0.84
K_2O (%)	0.21
Na_2O (%)	0.25

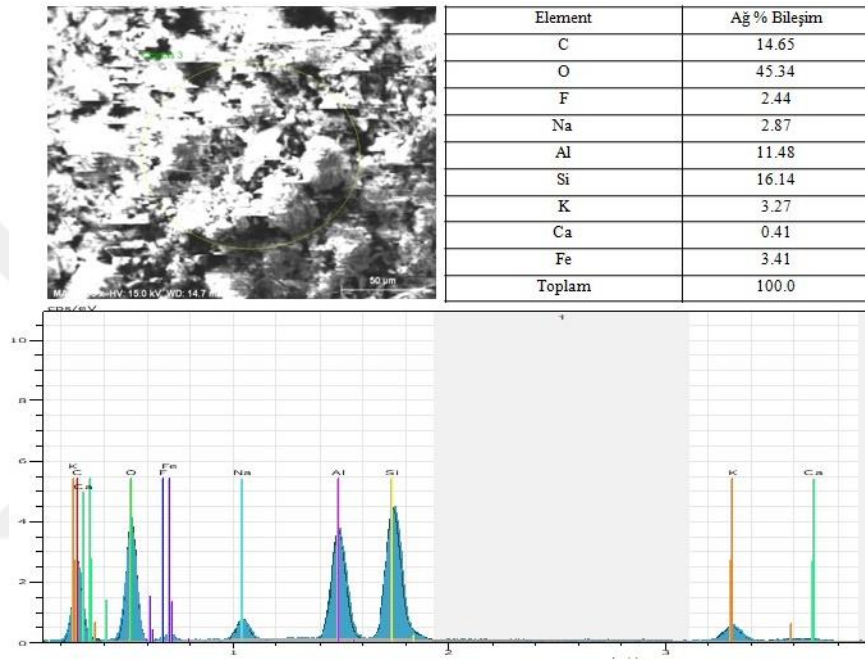
Ham döküm kumunun yapısında ağırlıkça en yüksek oranlara sahip elementler silisyum ve alüminyumlu oksijen bileşikleridir. Bunlara ilaveten kalsiyum, demir, potasyum, sodyum, magnezyumlu oksijen bileşikleri ve kükürt bileşikleri bulunmakta ve bu da döküm kumunun yüksek dayanımlı minerolojik bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır.

Kullanılan atık döküm kumunun yüzey morfolojisinin tespiti için çekilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Atık döküm kumunun a) x5000, b) x10000 ve c) x20000 SEM görüntüleri

Farklı büyütmelerdeki (x5000, x10000 ve x20000) SEM mikroyapı analizi görüntülerinde Şekil 4.3'te atık döküm kumu bünyesinde, ham döküm kumuna göre prosesten kaynaklı birtakım safsızlıkların olduğu tespit edilmiştir. Büyük boyutlu taneciklerde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve düz bir topoğrafik yapı gösterdiği gözlenmiştir. Taneciklerin genel olarak değişen boyutlara sahip olduğu ve ham döküm kumuna göre prosesten kaynaklı olabileceği düşünülen topaklanmaların olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Atık döküm kumunun x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

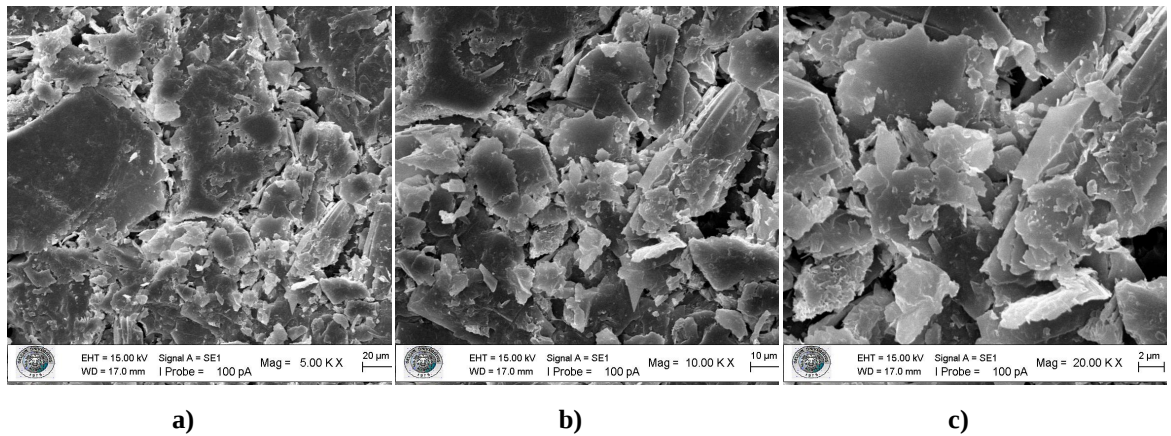
Şekil 4.4'te x500 büyütmedeki görüntü ve EDS analizi verilmiştir. Şekil 4.4'e göre atık döküm kumunda, ham döküm kumunda tespit edilen piklere ilaveten karbon, florür, sodyum, potasyum, kalsiyum ve demir pikleri tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise döküm sırasında kullanılan metal parçacıkları ve alaşım ilaveleri gibi safsızlıklardır. Atık döküm kumunun Çizelge 4.2'de verilen fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları da silisyum, oksijen, alüminyum, potasyum, kalsiyum ve demir elementlerini içerdiğini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.2. Atık döküm kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

PARAMETRE	DEĞERİ
Yoğunluk, kg/m ³	2521
Su emme oranı	0.82
Alkali-silika reaktivliği	Tehlike arz edebilir
Toplam kükürt (%)	0.1
SiO ₂ (%)	73.9
CaO (%)	0.17
MgO (%)	0.42
Al ₂ O ₃ (%)	7.5
FeO ₃ (%)	2.3
K ₂ O (%)	0.33
Na ₂ O (%)	0.19
Yağ (%)	18.6

Atık döküm kumunun yapısında ağırlıkça en yüksek oranlara sahip elementler silisyum ve alüminyumlu oksijen bileşikleridir. Bunlara ilaveten kalsiyum, demir, potasyum, sodyum, magnezyumlu oksijen bileşikleri ve kükürt bileşikleri bulunmaktadır. Bunun yanı sıra proses kaynaklı olarak döküm kumu bünyesinde yüksek oranda yağ da tespit edilmiştir.

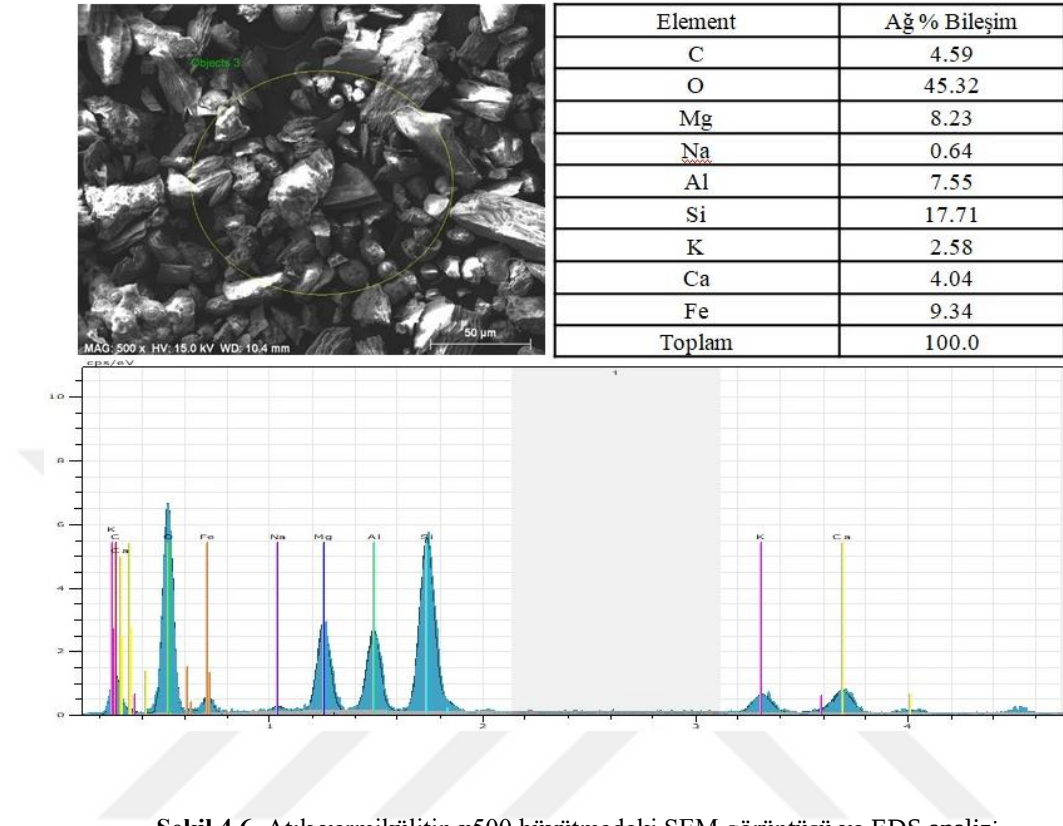
Kullanılan atık vermikülitin yüzey morfolojisinin tespiti için çekilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Atık vermikülitin a) x5000, b) x10000 ve c) x20000 SEM görüntüleri

Atık vermikülitin SEM görüntülerinde tane boyutlarında ve şekillerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Buna ilaveten vermikülitin kimyasal yapısından

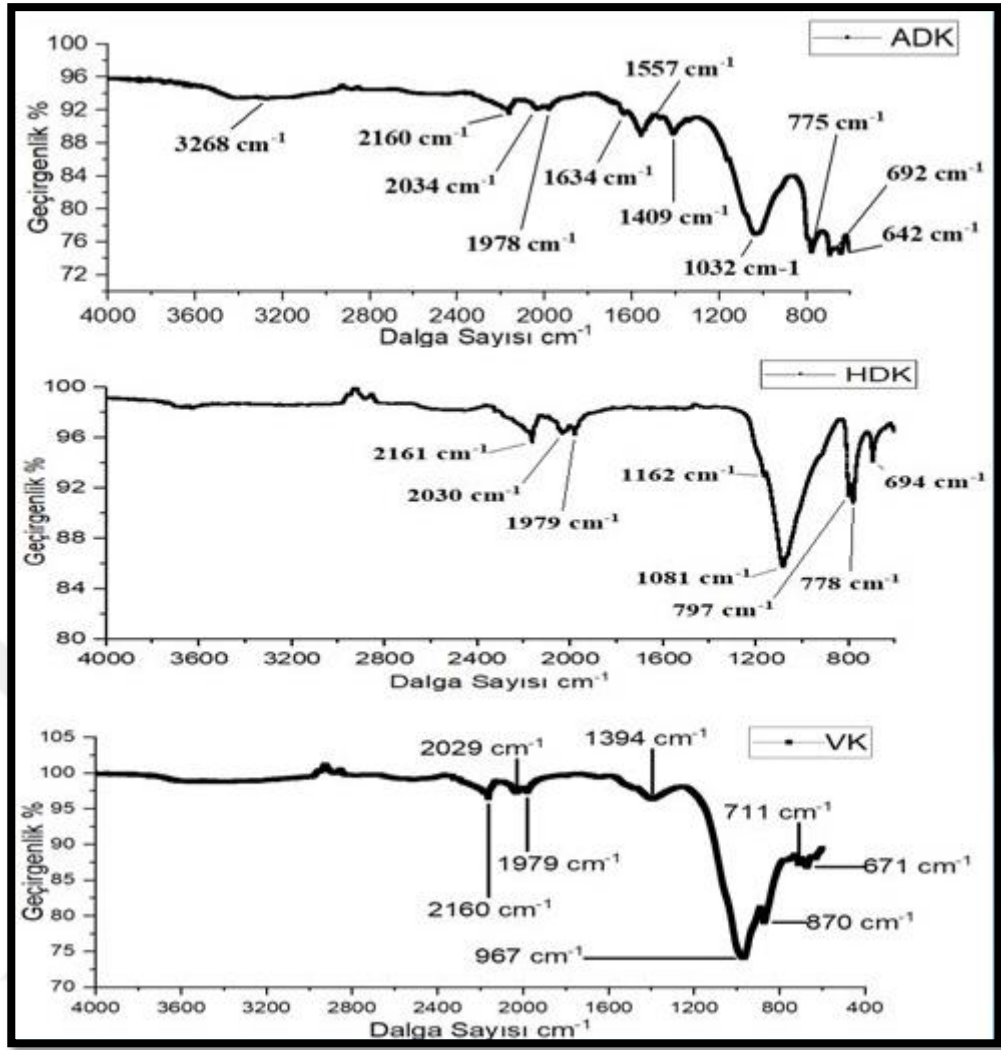
kaynaklanan safsızlıklar gözlenmektedir. Saf ve atık döküm kumuna kıyasla yüzey yapısında pürüzlülük gözlenmiştir.



Şekil 4.6. Atık vermikülitin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

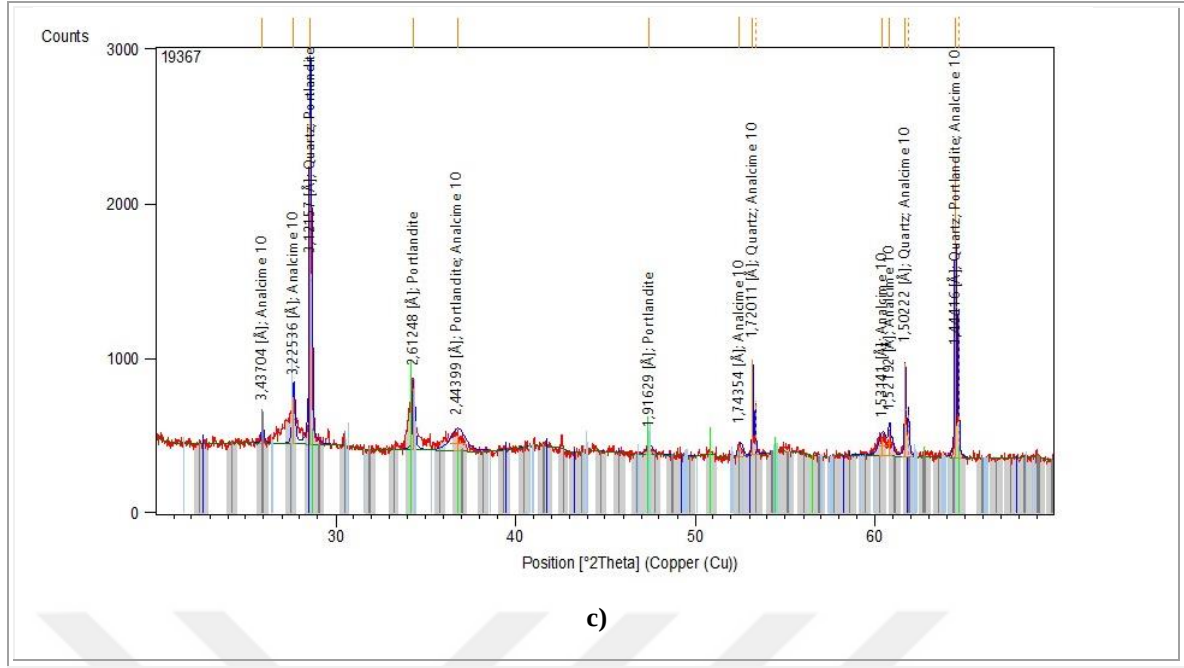
Şekil 4.6’da x500 büyütmedeki görüntü ve EDS analizi verilmiştir. Atık vermikülitte silika bileşimine ilave olarak oksijen, alüminyum, karbon, magnezyum, potasyum, kalsiyum ve demir pikleri tespit edilmiştir.

Atık döküm kumu, ham döküm kumu ve atık vermikülitin sahip olduğu fonksiyonel bileşimi tespit etmek için elde edilen FTIR spektrumları Şekil 4.7’de verilmiştir.



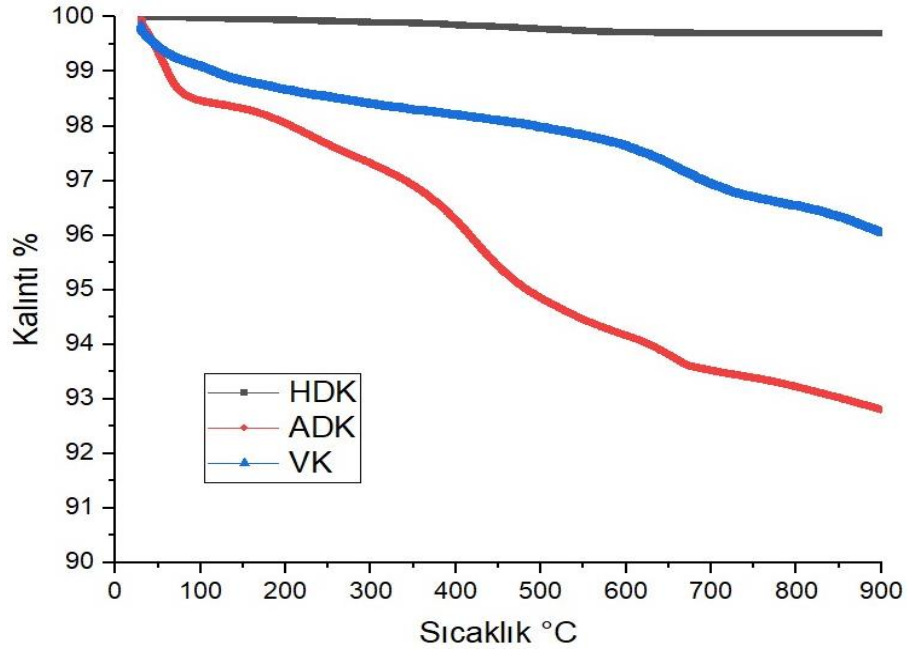
Şekil 4.7. HDK, ADK ve VK numunesinin FTIR spektrumları

Şekil 4.7'ye göre 3268 cm^{-1} 'de sadece ADK malzemesinde pik veren ve şiddetli gerilme gösteren O-H bağları piki tespit edilmiştir. Tüm numunelerde ise 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2034 cm^{-1} , 2030 cm^{-1} ve 2029 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmekte olup malzemenin ve atık malzemelerin yapısındaki silisyum bileşimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1634 cm^{-1} ve 1557 cm^{-1} dalga boylarında zayıf eğilme gösteren C-H bağları pikleri, 1409 cm^{-1} ve 1394 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri, 1300 ile 700 cm^{-1} dalga boyu aralığında C-S-H bağı pikleri tespit edilmiştir. 671 cm^{-1} , 692 cm^{-1} ve 694 cm^{-1} 'de AlO bağları tespit edilmiştir (Puertas ve ark., 2000).



Şekil 4.8. a) HDK, b) ADK ve c) VK numunesinin XRD grafikleri

Ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülitin termal dayanımları TGA cihazı ile tespit edilmiştir. Şekil 4.9’da HDK, ADK ve VK’nın TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklıkları ve 900°C’deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.9. HDK, ADK ve VK numunelerinin TGA termogramı

Çizelge 4.3. Malzemenin ve atık malzemelerin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	900°C'de kalıntı (%)
Ham döküm kumu	385	591	> 900	> 900	> 900	99.7
Atık döküm kumu	90	695	480	> 900	> 900	92.8
Atık vermikülit	140	760	> 900	> 900	> 900	96

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

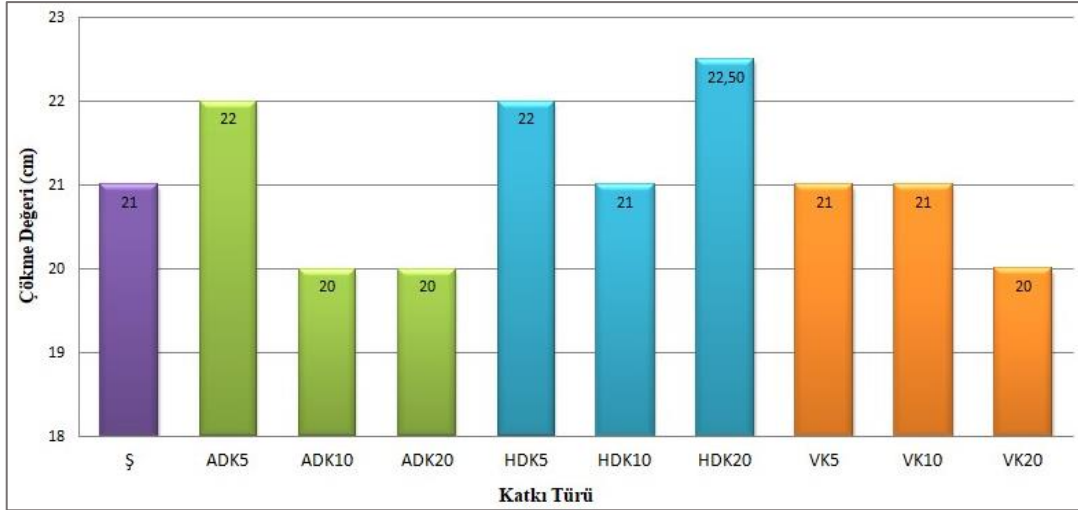
Ham döküm kumunun, atık döküm kumunun ve atık vermikülitin ilk termal bozunma sıcaklığı sırayla 385°C, 90°C ve 140°C'dir. Kalıntı miktarı arttıkça termal stabilite de artmaktadır. En yüksek termal stabiliteye sahip malzeme ham döküm kumudur. Atık döküm kumunun başlangıç bozunma sıcaklığının ham döküm kumundan düşük olmasının nedeni ise atık döküm kumunun yüksek sıcaklıktaki döküm prosesinden meydana gelmiş olmasıdır. Ham döküm kumunun ve atık vermikülitin %95 oranında bozunması için ve atık döküm kumunun ise %90 oranında bozunma için ortam sıcaklığının 900°C'den yüksek olması gerekmektedir.

4.2. Yaş Betonun Çökme Analizi Bulguları

İşlenebilirlik, taze betonun önemli özelliklerinden biridir. Bu sebeble deneysel olarak ölçülebilen beton kıvamı, genellikle betonun işlenebilirliğini yorumlamak için kullanılmaktadır. Yapılan çökme deneyleri sonuçları ise Şekil 4.10'da verilmiştir.

Atık döküm kumu katkılı betonların standart betona göre %5 katkı oranı için çökme değerini arttırdığı ve diğer dozlar için şahit ile yakın çökme değeri verdiği, ham döküm kumunun ise genel anlamda artan dozlarda işlenebilirliği arttırdığı söylenebilir. Döküm kumlarının SEM görüntülerine de bakıldığında döküm kumunun yüzeyinin pürüzsüz olması ve bu durumun kayganlığı artırarak işlenebilirliğin olumlu yönde gelişmesini desteklediği söylenebilir (Şekil 4.1-Şekil 4.3). Vermikülit atıklarının ise sahip olduğu poroz yapıdan dolayı beton içerisindeki karışım suyunu kısmen emdiği ve işlenebilirliği çok az miktarda azalttığı kabul edilebilir.

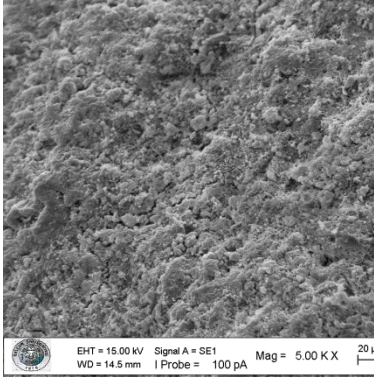
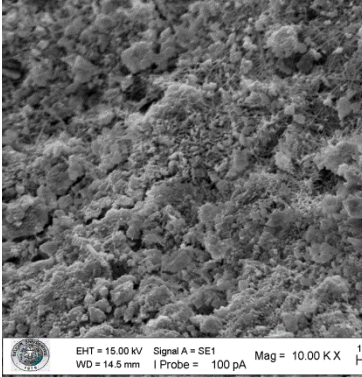
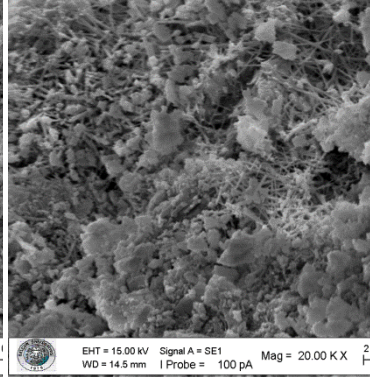
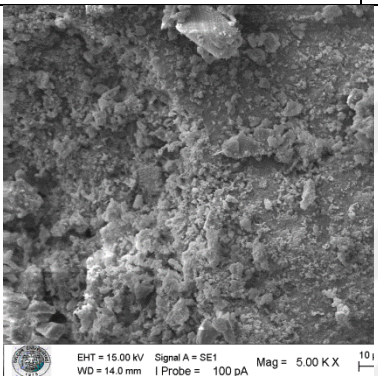
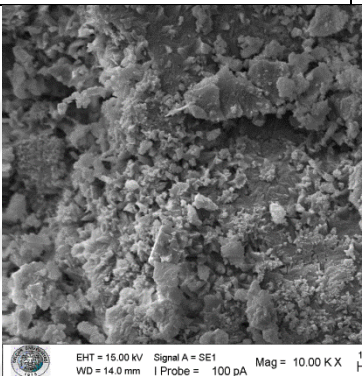
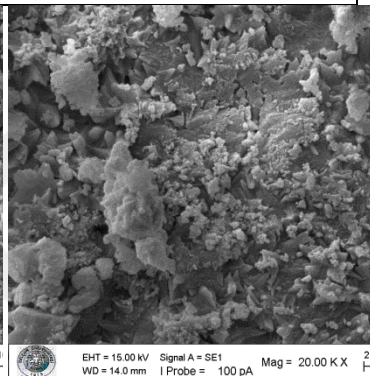
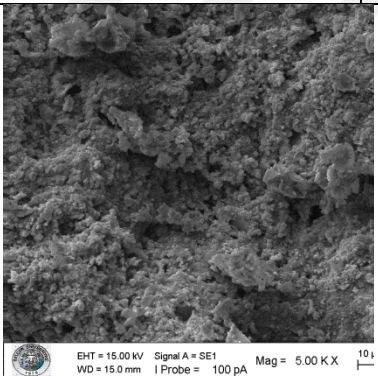
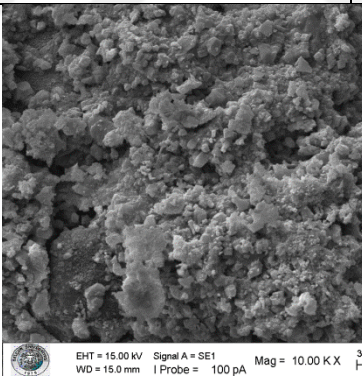
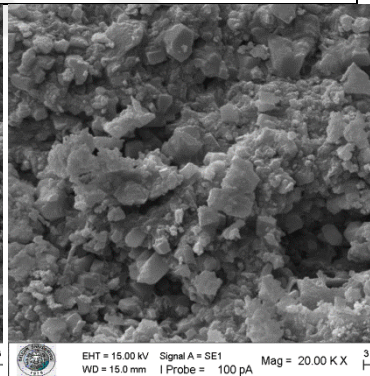
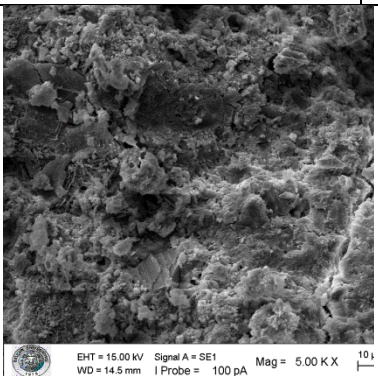
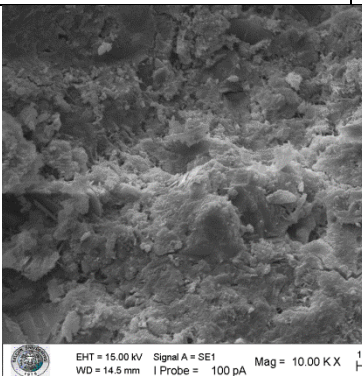
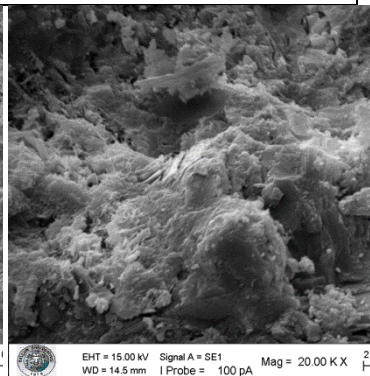
İşlenebilirlik açısından %5, %20 oranlarında ham ve %5 oranında atık döküm kumunun şahit numuneden daha fazla çökme değeri göstererek betonun işlenebilirliğinde ve yerleştirilmesinde olumlu bir rol oynamıştır.



Şekil 4.10. Beton karışımlarının çökme değerleri

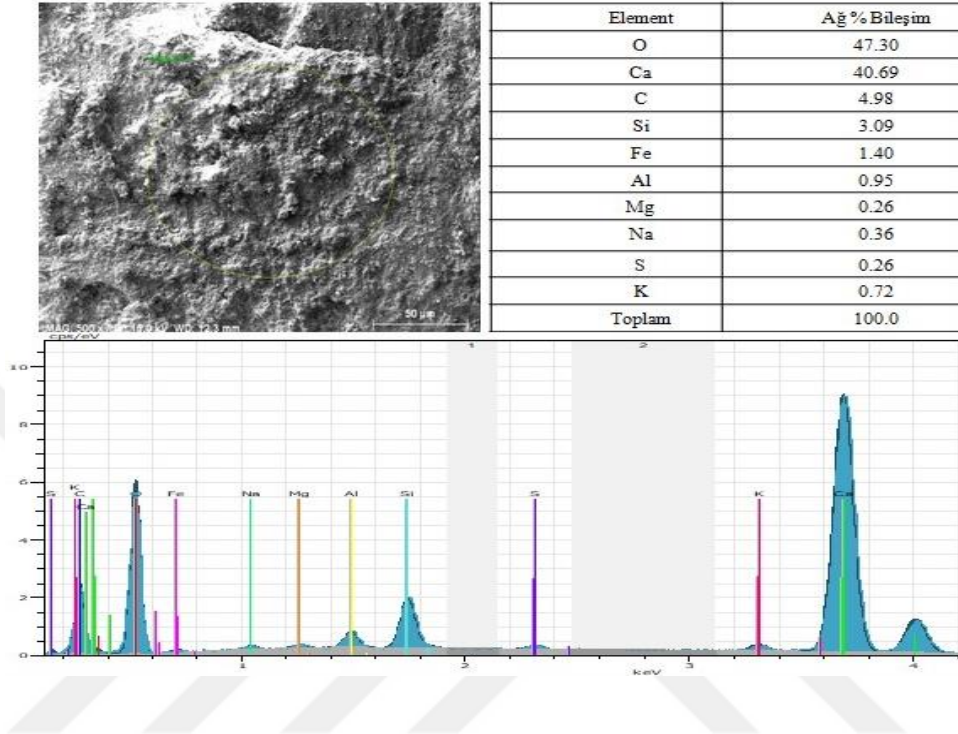
4.3. Sertleşmiş Betonların Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Bulguları

Atık döküm kumunun ve karşılaştırma amacıyla şahit numunesinin x5000, x10000 ve x20000 büyütmelemlerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Şahit numuneye kıyasla tüm atık döküm kumu içeren beton numunelerinde tanecik şekilleri ve boyutlarında değişkenlik, tanecikli ve gözenekli yapısının dağılımda artış gözlenmiştir. Bütün numunelerde C-S-H jeli (kalsiyum silikat hidrat) oluşumu vardır. Bu oluşum çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandırmakta olup istenilen bir durumdur. Atık döküm kumu oranı arttıkça tanecikli yapıda artış, aglomerasyonda azalma ve homojen bir dağılım olduğu gözlenmiştir.

Numune Kodu	x5000	x10000	x20000
ADK5			
ADK10			
ADK20			
ŞAHİT			

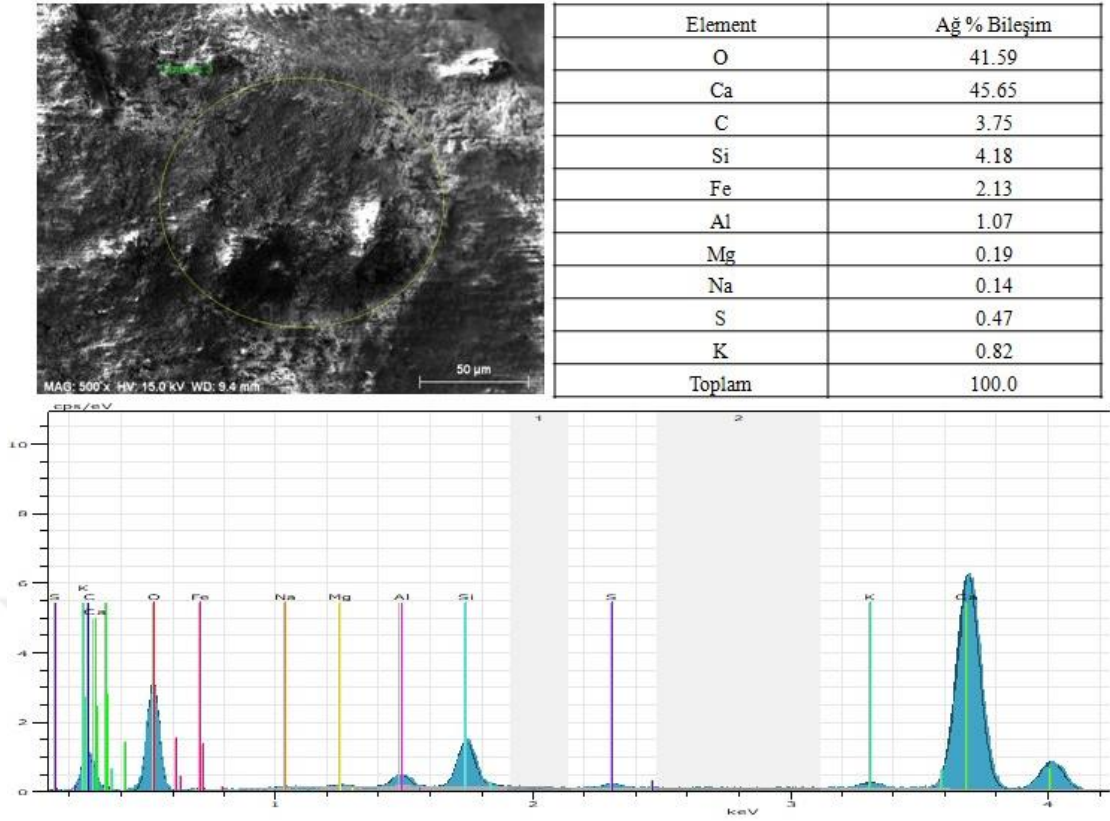
Şekil 4.11. Atık döküm kumu katkıli betonların ve şahit beton numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.12’de ise şahit numunesine ait EDS analizi sonuçları verilmiştir. Katkısız şahit beton karışımında beton bileşiminden kaynaklanan oksijen, kalsiyum, karbon, silisyum, demir, alüminyum, magnezyum, sodyum, sülfür ve potasyum pikleri tespit edilmiştir ve ağırlıkça en yüksek orana sahip elementler oksijen ve kalsiyumdur.



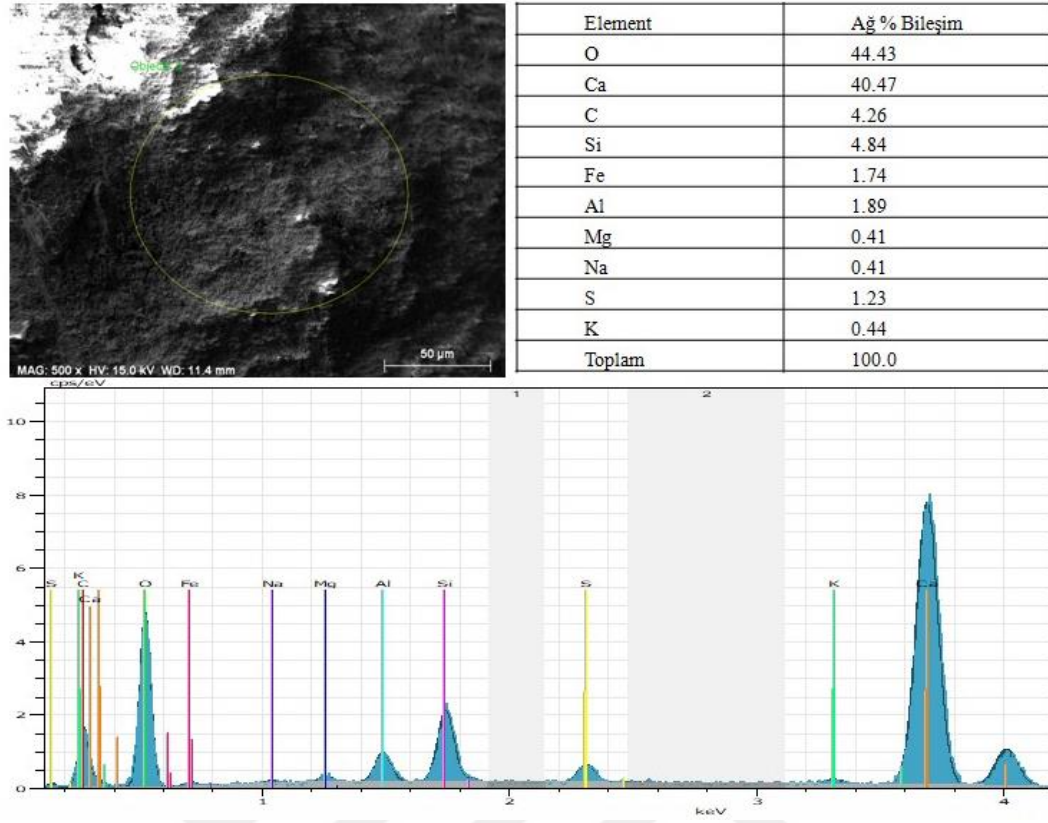
Şekil 4.12. Şahit beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.13’te ise ADK5 numunesine ait EDS analizi sonuçları verilmiştir. Şekil 4.13’e göre katkısız şahit numunesi ile aynı elementlerin pikleri tespit edilmiştir. Silisyum elementinin ağırlıkça bileşim oranında şahit numunesine kıyasla bir artış tespit edilmiştir bunun sebebi ise açıklanan atık döküm kumunun yüksek oranda silisyumlu bileşikler içermesidir. Bunun yanında döküm kumu katkısının kullanılması ile birlikte, katkısız şahit betona göre Ca, Fe, Al ve K gibi elementlerin de beton içerisindeki miktarı artarak betonun minerolojik bileşimi desteklenmiştir.

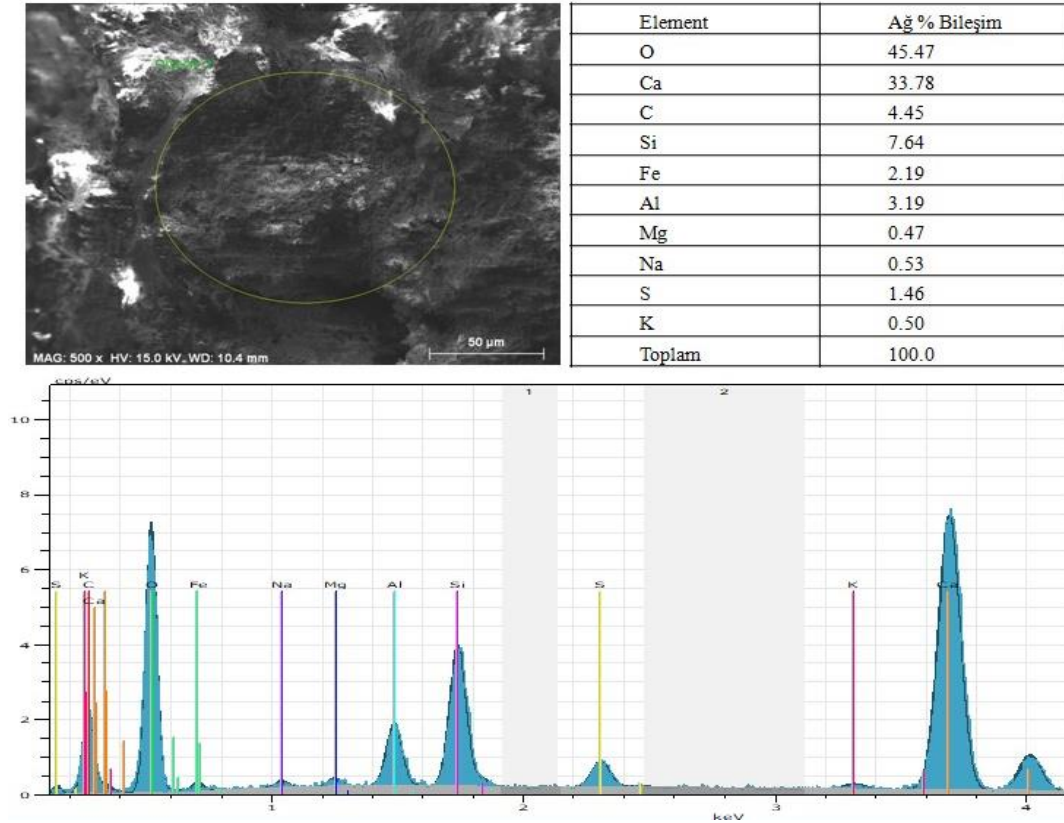


Şekil 4.13. ADK5 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

ADK10 numunesine EDS analizi bulguları Şekil 4.14'te verilmiştir. Atık döküm kumu miktarının artışı ile birlikte betonun yapısındaki Al, Fe, Mg, Na ve S gibi elementel bileşimlerin de arttığı gözlenmiştir. S elementinin miktarının artışı betonadaki atık döküm kumunda bulunan safsızlıkların artışına bağlamak mümkündür. Silisyum elementinin ağırlıkça bileşim oranında şahit ve ADK5 numunesine kıyasla artış tespit edilmiştir bunun sebebi ise hem atık döküm kumunun kimyasal yapısındaki SiO_2 oranının fazlalığı hem de beton numunesindeki ağırlıkça atık döküm kumu oranının artışıdır.



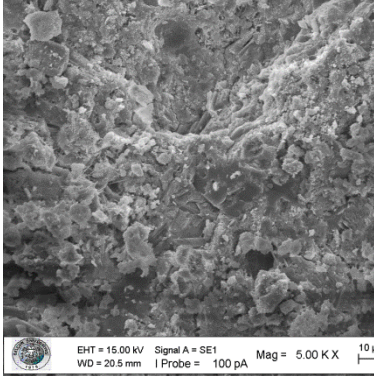
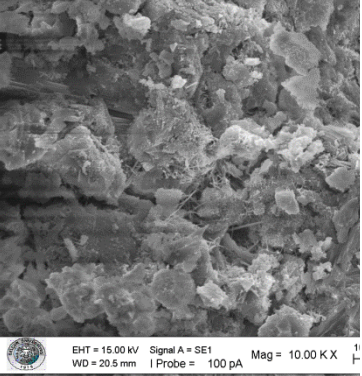
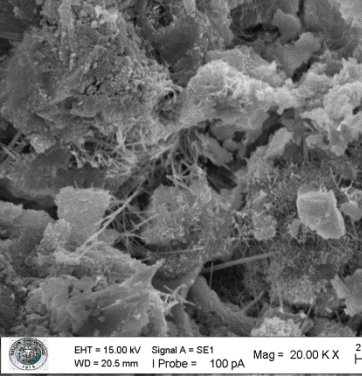
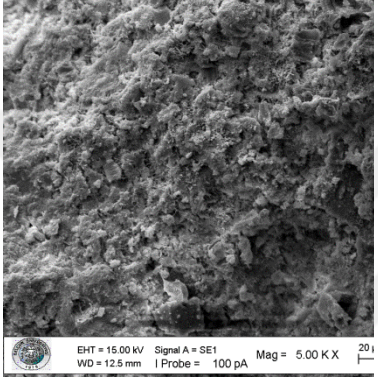
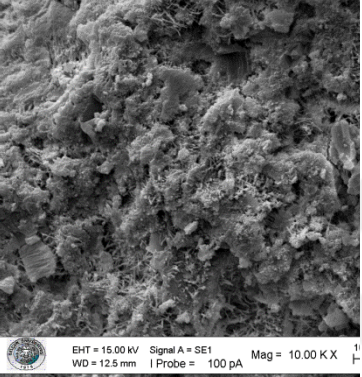
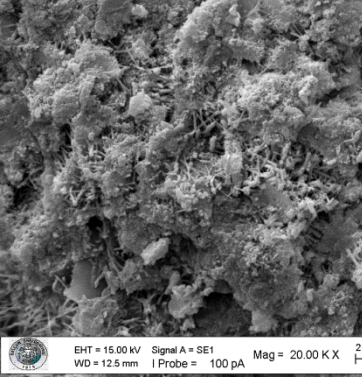
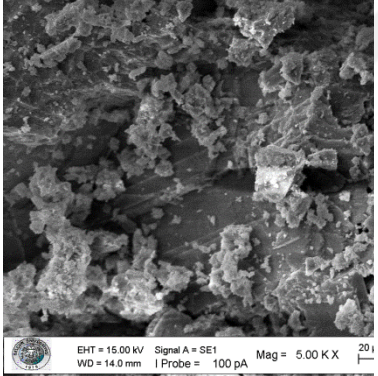
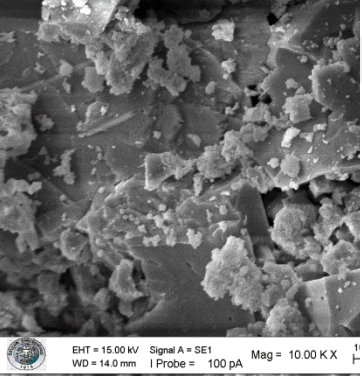
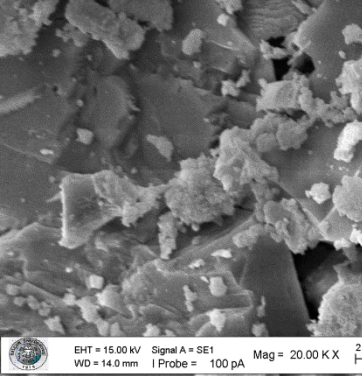
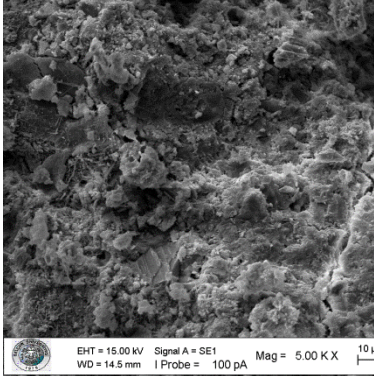
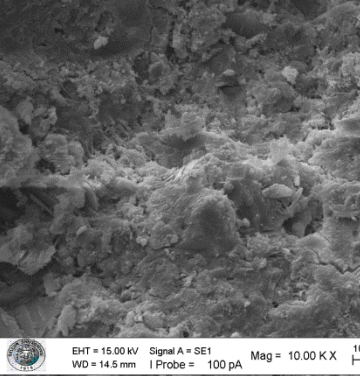
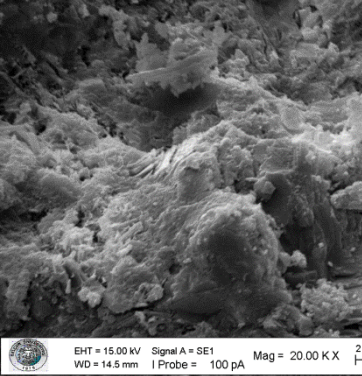
Şekil 4.14. ADK10 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi



Şekil 4.15. ADK20 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

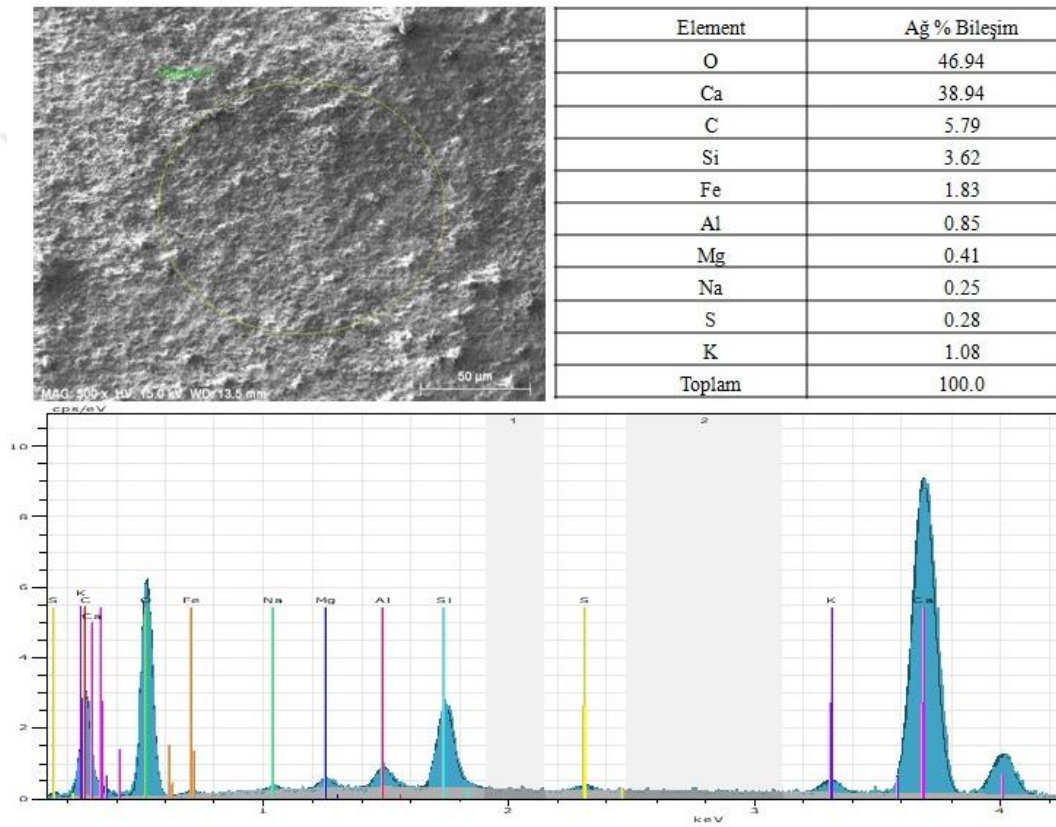
Şekil 4.15'te ise ADK20 numunesine ait x500 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. ADK20 numunesinde şahit numuneye kıyasla silisyum elementinde %4.55'lik bir artış tespit edilmekle birlikte demir, alüminyum, magnezyum, sodyum ve sülfür elementlerinin bileşiminde de bir artış vardır. ADK5 ve ADK10 numunesine nazaran silisyum ve sülfür bileşiklerinde önemli bir artış tespit edilmiştir. SiO_2 oranındaki artışın sebebi atık döküm kumu katkısının dozundaki artış ve atık döküm kumunun kimyasal yapısındaki SiO_2 bileşiğinin miktarının fazlalığıdır. Bunun yanında sülfür elementinin artışının sebebi ise ADK artışı ile birlikte SEM görüntülerinde gözlenen safsızlıklardır.

Ham döküm kumunun ve karşılaştırma amacıyla şahit numunesinin (x5000, x10000 ve x20000) büyütmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Ham döküm kumu dozundaki artış ile birlikte poroz yapılarda azalma, mikroyapılarda toz tane boyut ve şekillerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra atık döküm kumu içeren beton numunelerinde de gözlemlenen C-S-H jeli oluşumu ham döküm kumu içeren beton karışımlarında da tespit edilmiştir. Sebebi ise beton bileşiminde bulunan çimentonun hidrasyonudur. Katkısız şahit numuneye kıyasla ise poroz yapılarda azalma gözlemlenmiştir.

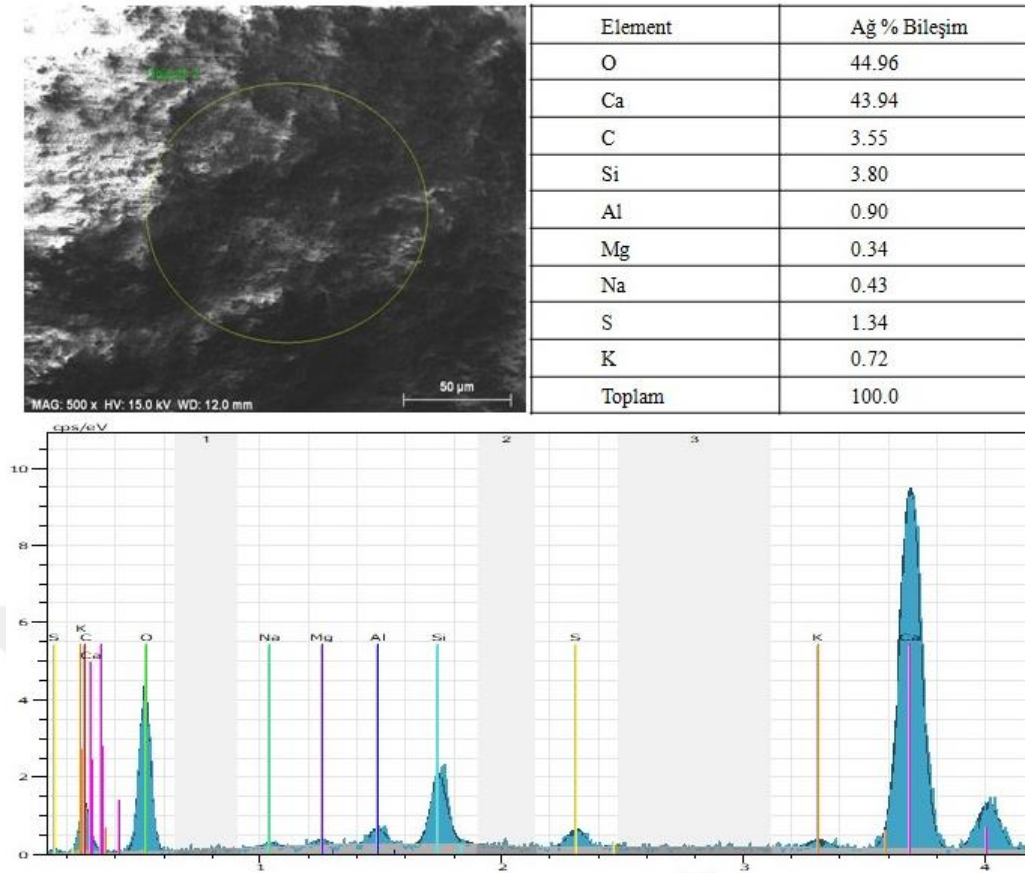
Numune Kodu	x5000	x10000	x20000
HDK5			
HDK10			
HDK20			
ŞAHİT			

Şekil 4.16. Ham döküm kumu katkılı betonların ve şahit beton numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 4.17’de ise HDK5 numunesine ait x500 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Şahit beton numunesi ile aynı elementlerin pikleri tespit edilmiştir. Silisyum elementinin ağırlıkça bileşim oranında şahit numunesine kıyasla %0.53’lük bir artış tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise açıklanan ham döküm kumunun yüksek oranda silisyumlu bileşikler içermesidir. Buna ilaveten ham döküm katkısının kullanılması ile birlikte, katkısız şahit numuneye kıyasla K, Mg, C ve Fe gibi elementlerin de beton içerisindeki miktarları artarak betonun minerolojik bileşimi desteklenmiştir.

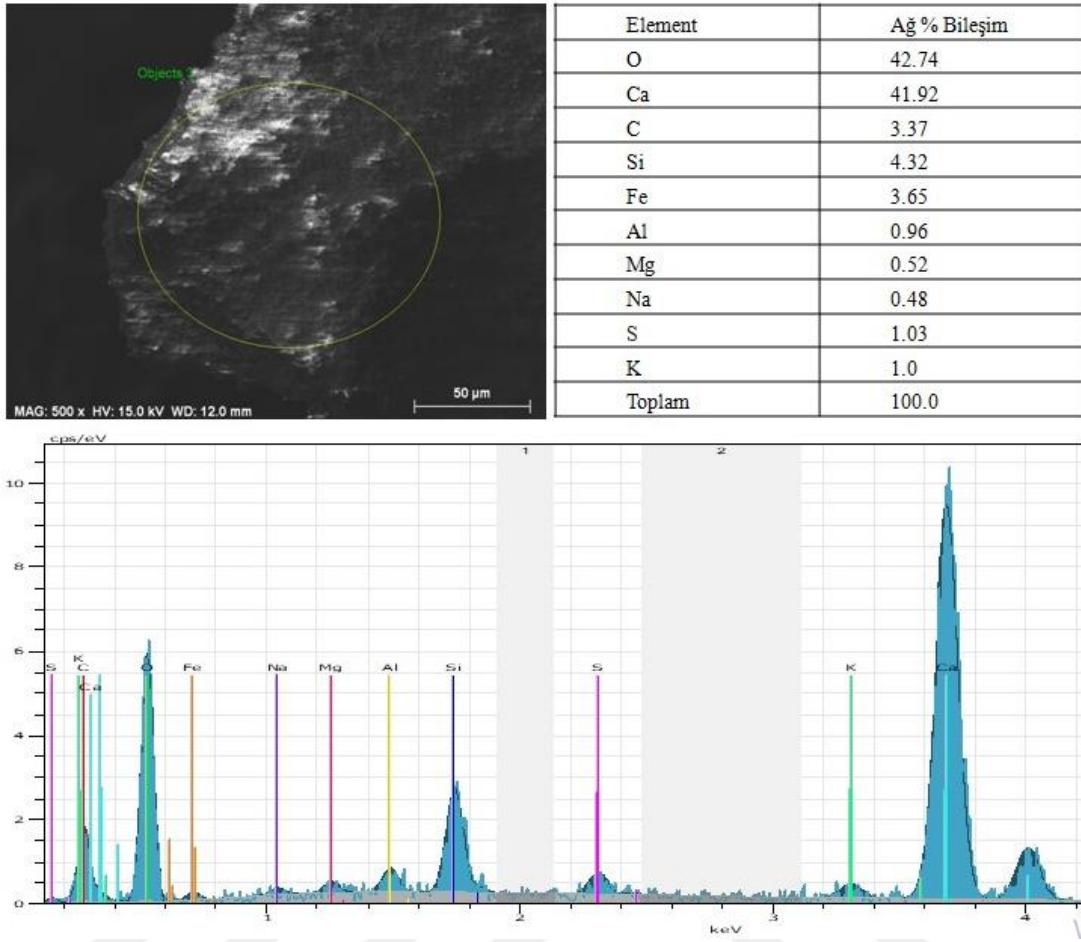


Şekil 4.17. HDK5 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi



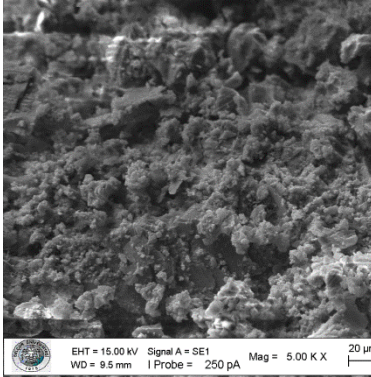
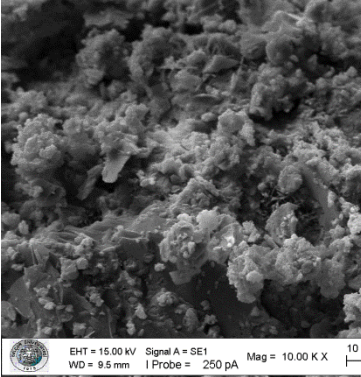
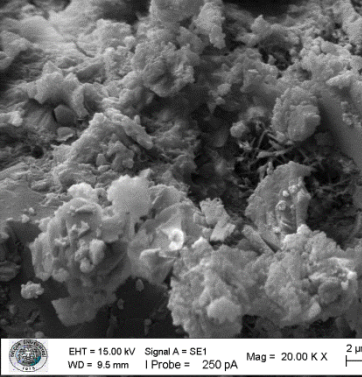
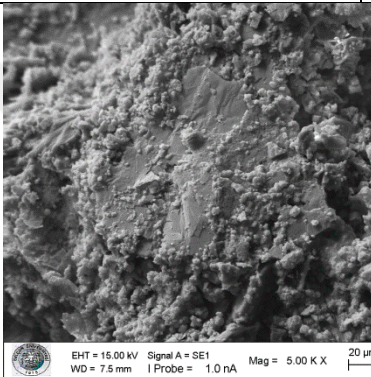
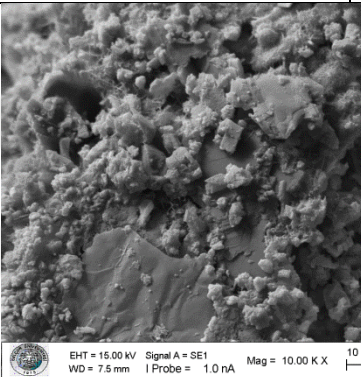
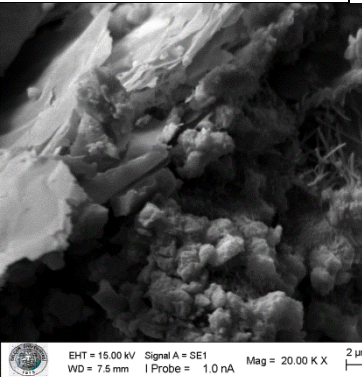
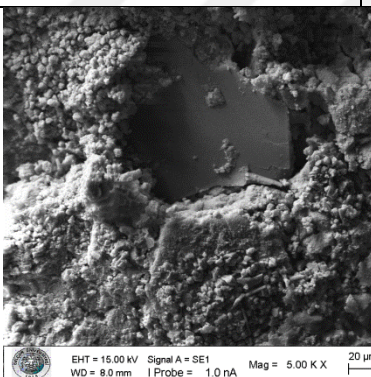
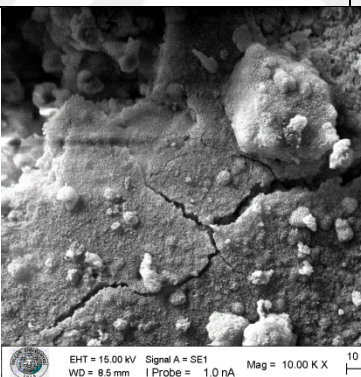
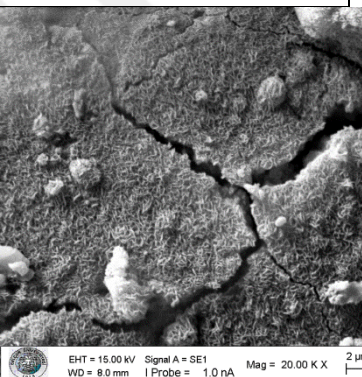
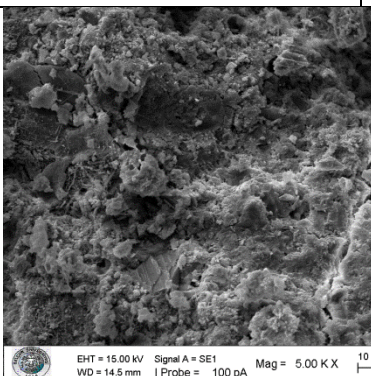
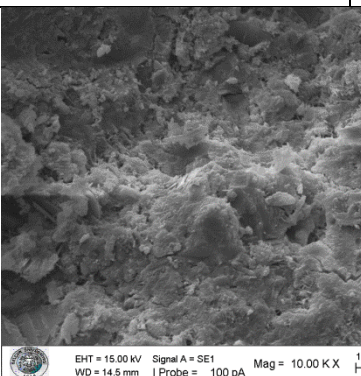
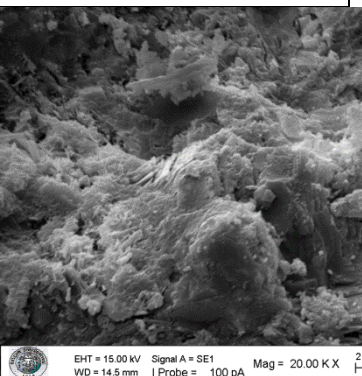
Şekil 4.18. HDK10 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.18’de ise HDK10 numunesine ait x500 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Ham döküm kumu miktarının artışı ile birlikte Ca, Al, Na ve S gibi elementel bileşimlerin arttığı gözlenmiştir. Silisyum elementinin ağırlıkça bileşim oranında şahit ve HDK5 numunesine kıyasla artış tespit edilmiştir bunun sebebi ise ham döküm kumunun kimyasal yapısındaki SiO_2 oranının fazlalığı ve beton bileşimindeki ham döküm kumu dozunun artışıdır.



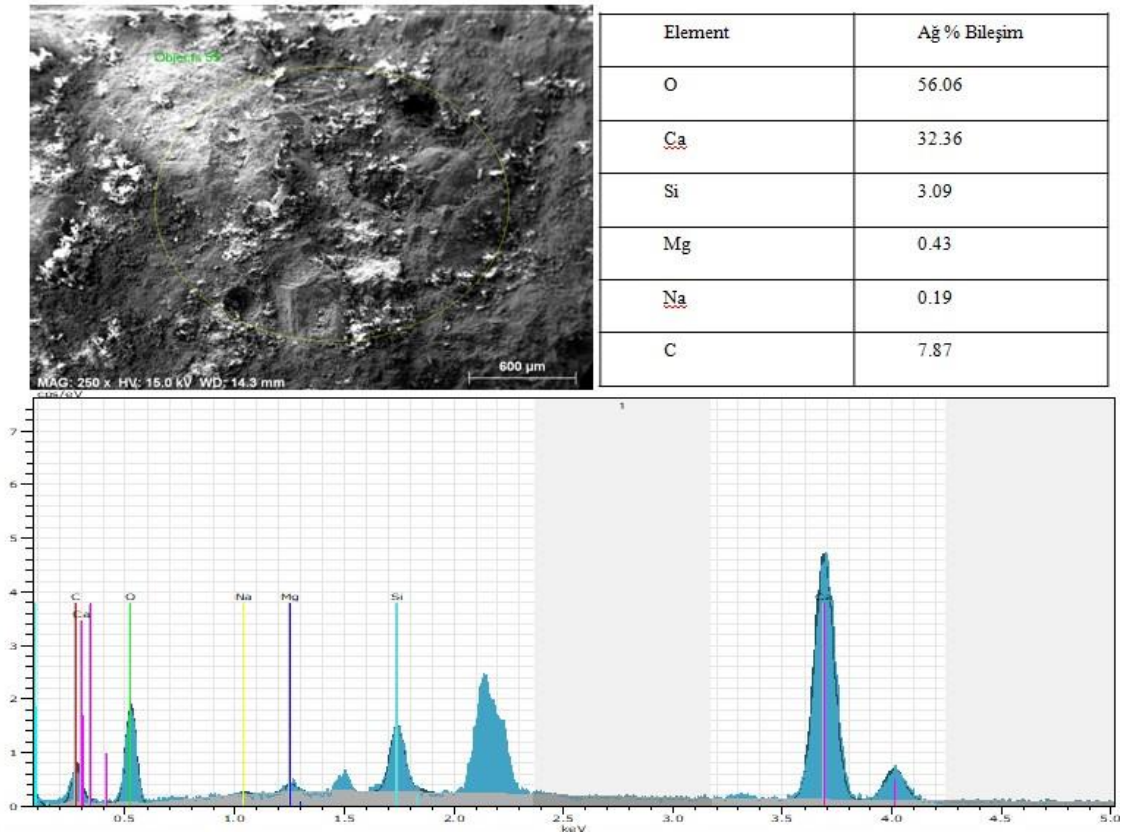
Şekil 4.19. HDK20 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.19’da ise HDK20 numunesine ait x500 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Ağırlıkça en fazla silisyum elementi oranı HDK20 numunesinde tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise ham döküm kumunun kimyasal yapısındaki SiO_2 ’nin yüksek oluşu bunun yanı sıra beton karışımındaki ham döküm kumu dozunun artışıdır. Buna ilaveten şahit numuneye kıyasla Ca, Fe, Mg, Na, S ve K gibi elementel bileşimlerin miktarı artarak betonun mineralojik bileşimi desteklenmiştir.

Numune Kodu	x5000	x10000	x20000
VK5			
VK10			
VK20			
ŞAHİT			

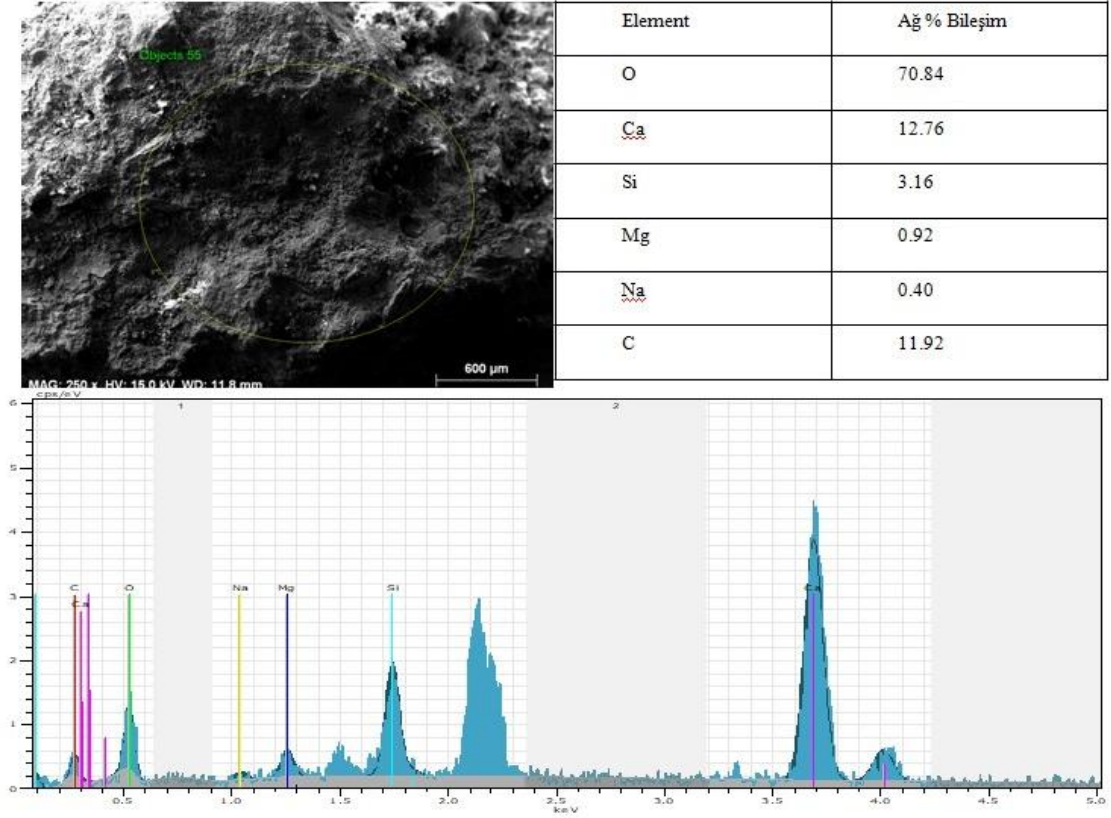
Şekil 4.20. Atık vermikülit katkılı betonların ve şahit beton numunesinin SEM görüntüsü

Atık vermikülitin ve karşılaştırma amacıyla şahit numunesinin (x5000, x10000 ve x20000) büyütmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Atık vermikülit dozu arttıkça safsızlıklar ve kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jelin de azalma gözlenmekle birlikte bu oluşumun çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırdığı için istenmeyen bir durumdur. Katkısız şahit numune, saf ve atık döküm kumu katkılı beton numunelere kıyasla tane boyut ve şekillerinde farklılıklar tespit edilmiştir. Buna ilaveten tüm atık vermikülit katkılı beton numunelerinde mikroyapılarda çatlaklar tespit edilmiştir.



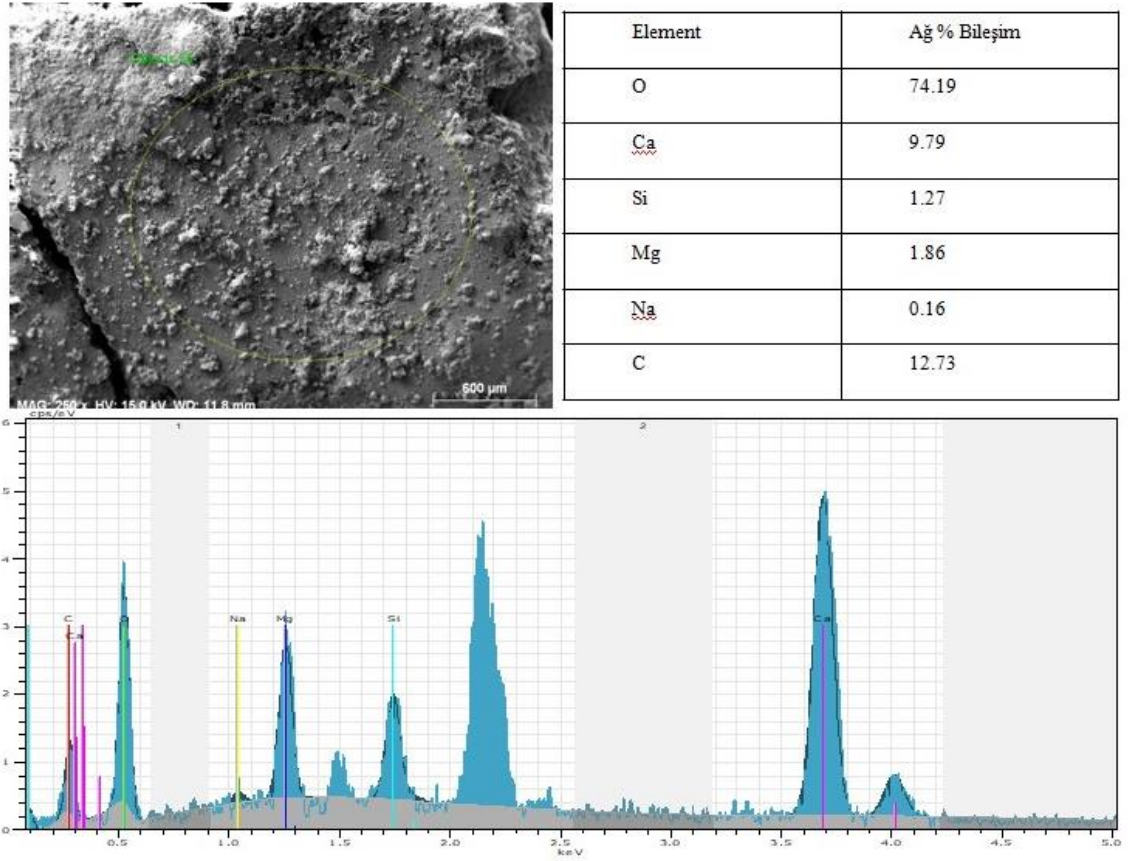
Şekil 4.21. VK5 beton numunesinin x250 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.21’de ise VK5 numunesine ait x250 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Ağırlıkça en yüksek elementler oksijen ve kalsiyumdur. Bunlara ilaveten silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon pikleri tespit edilmiştir. Katkısız şahit numuneye kıyasla kalsiyum elementinde düşüş, C ve Mg elementel bileşimlerinde artış tespit edilmiştir.



Şekil 4.22. VK10 beton numunesinin x250 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.22’de ise VK10 numunesine ait x250 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. VK5 numunesine kıyasla ağırlıkça oksijen, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon elementlerinde artış tespit edilmiştir. Şahit numuneye kıyasla kalsiyum elemeninde düşüş, silisyum, magnezyum, sodyum ve karbon oranlarında artış tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. VK20 numunesinin x250 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

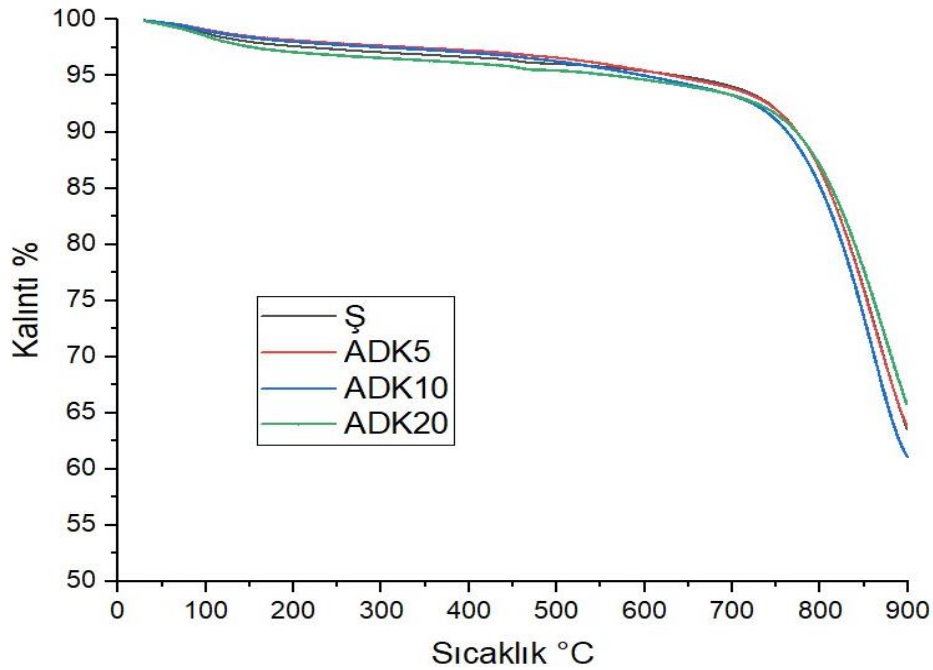
Şekil 4.23’de ise VK20 numunesine ait x250 büyütme SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Atık vermikülit dozu arttıkça ağırlıkça oksijen, magnezyum ve karbon elementleri oranında artış, kalsiyum oranında azalma tespit edilmiştir bunun sebebi vermikülitin kimyasal yapısından kaynaklanan elementel bileşimlerdir.

4.4. Sertleşmiş Betonların TGA Analizi Bulguları

- 7 gün kürlenmesi yapılmış sertleşmiş betonların TGA Analizleri

Şekil 4.24'te ADK5, ADK10 ve ADK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

ADK5, ADK10, ADK20 ve şahit numunesinin ilk termal bozunma sıcaklığı sırayla 720°C, 714°C, 730°C ve 700°C'dir. Atık döküm kumu içeren tüm beton karışımlarının ilk termal bozunma sıcaklığı şahit numuneye göre yüksektir. Katkılı betonların İBS değerleri ise genellikle şahit numune ile aynı sonuçları göstermiştir. Tüm numunelerde kalıntı miktarı arttıkça termal stabilite de artmaktadır. En yüksek termal stabiliteye sahip beton karışımı ADK20 numunesidir. ADK5, ADK10, ADK20 ve şahit numunesinin %50 oranında bozunması için ortam sıcaklığının 900°C'den yüksek olması gerekmektedir. Sonuç olarak betondaki atık döküm kumu katkısı şahit betona göre betonun termal dayanımını olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Atık döküm kumunun termal olarak dayanımının yüksek olduğu da TGA analizleri ile desteklenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.24. ADK5, ADK10, ADK20 ve Şahit TGA termogramı

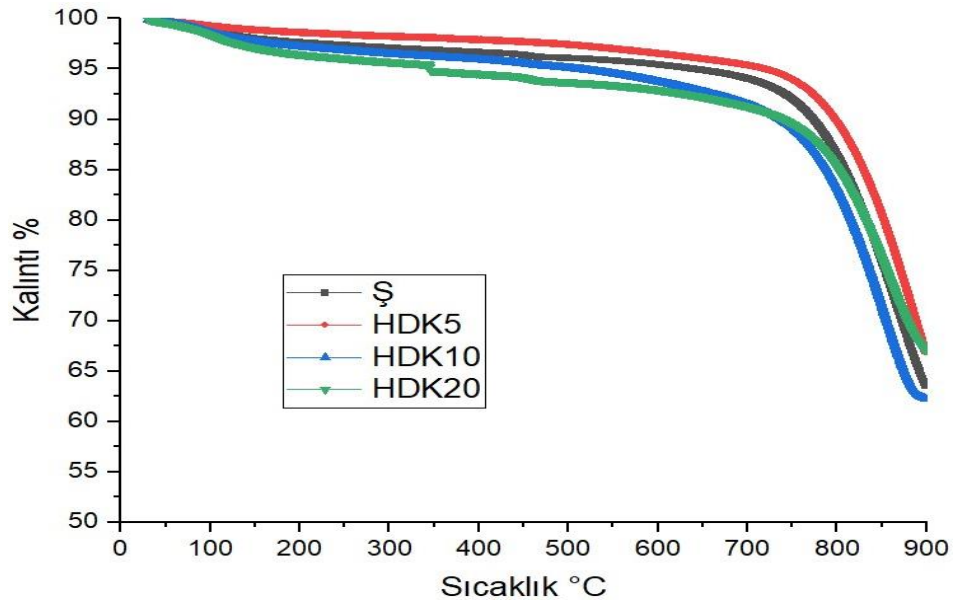
Çizelge 4.4. ADK5, ADK10, ADK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	900°C'de kalıntı (%)
ADK5	720	895	632	773	> 900	63.8
ADK10	714	892	600	762	> 900	61
ADK20	730	895	568	772	> 900	65.8
Şahit	700	895	639	773	> 900	63.5

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

Şekil 4.25'te HDK5, HDK10 ve HDK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Sonuçlara bakıldığında (Çizelge 4.5) ham döküm kumu içeren numunelerin başlangıç termal bozunma sıcaklığı (BBS) şahit numuneye göre yüksek çıkmıştır. En yüksek BBS değeri HDK20 numunesi için elde edilmiştir. Buna ilaveten en yüksek termal dayanıma sahip beton karışımı da HDK20'dir. Ham döküm kumu içeren beton karışımlarının ve katkısız şahit numunesinin %50 oranında bozunması için ortam sıcaklığının 900°C'den yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca ADK katkılı beton numunelerine göre (Çizelge 4.4) HDK katkılı betonların genel olarak termal dayanımları da daha yüksektir.



Şekil 4.25. HDK5, HDK10, HDK20 ve Şahit TGA termogramı

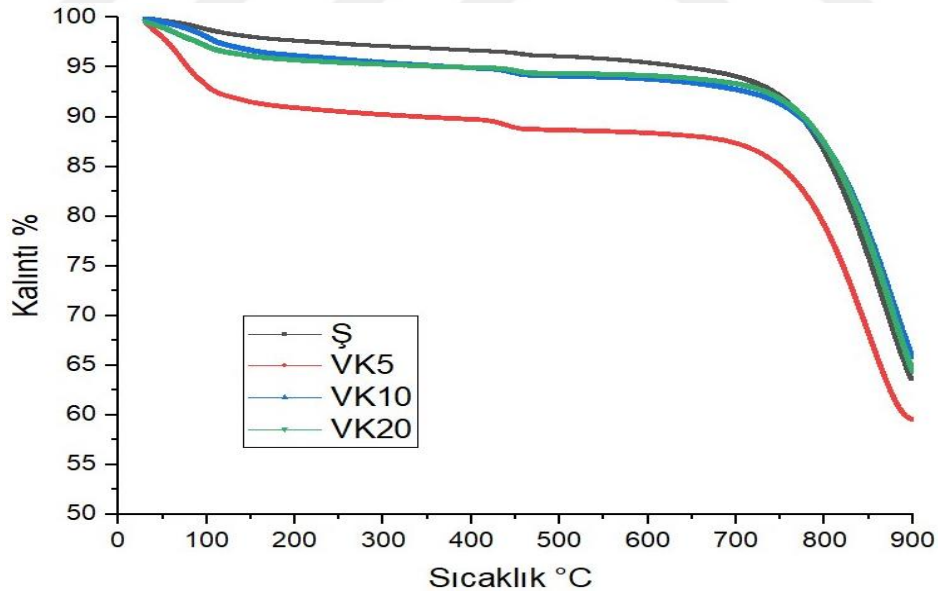
Çizelge 4.5. HDK5, HDK10, HDK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	900°C'de kalıntı (%)
HDK5	722	895	568	772	> 900	66.9
HDK10	750	895	720	798	> 900	62.2
HDK20	755	893	345	740	> 900	67
Şahit	700	895	639	773	> 900	63.5

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

Şekil 4.26'da VK5, VK10 ve VK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları verilmiştir. Bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Atık vermikülit bulunan beton karışımlarının ilk bozunma sıcaklığı şahit numuneye kıyasla fazla olduğu ve en yüksek ilk bozunma sıcaklığına sahip beton karışımının VK5 olduğu sonucu elde edilmiştir (Çizelge 4.6). Atık vermikülit dozu azaldıkça ilk bozunma sıcaklığında artış meydana gelmektedir. En yüksek termal dayanıma sahip beton karışımı ise VK10 numunesidir.



Şekil 4.26. VK5, VK10, VK20 ve Şahit TGA termogramı

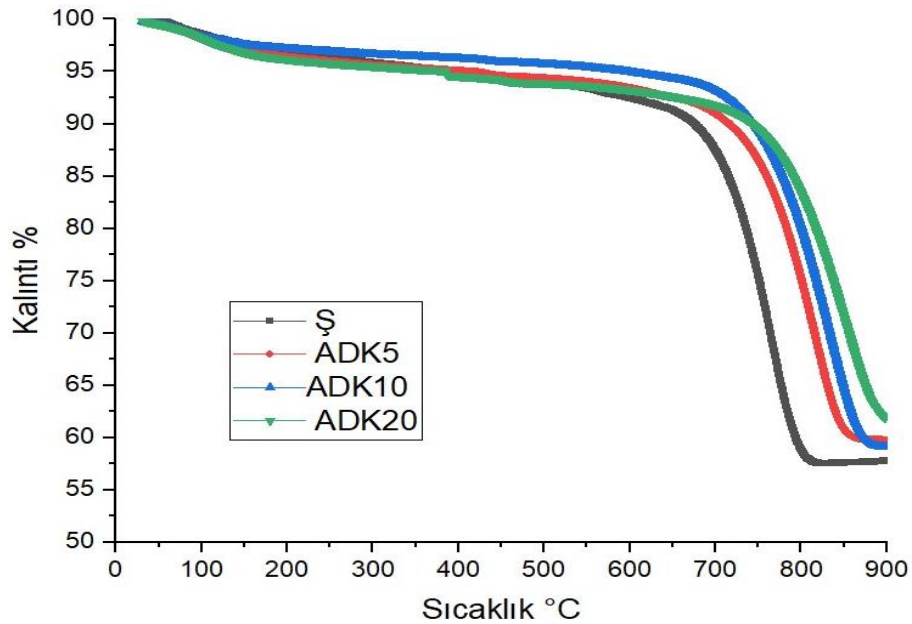
Çizelge 4.6. VK5, VK10, VK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					900°C'de kalıntı (%)
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	
VK5	732	890	78	345	> 900	55.9
VK10	725	892	376	773	> 900	65.8
VK20	713	895	413	775	> 900	64.3
Şahit	700	895	639	773	> 900	63.5

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

- **28 gün kürlenmesi yapılmış sertleşmiş betonların TGA Analizleri**

Şekil 4.27'de ADK5, ADK10 ve ADK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.7'de verilmiştir. ADK5, ADK10, ADK20 ve şahit numunesinin ilk termal bozunma sıcaklığı sırayla 680°C, 700°C, 715°C ve 650°C'dir. Atık döküm kumu içeren tüm beton karışımlarının ilk termal bozunma sıcaklığı şahit numuneye göre oldukça yüksektir ve atık döküm kumu oranı arttıkça ilk termal bozunma sıcaklığında artış tespit edilmiştir. Atık döküm kumunun yapısındaki baskın minerolojik bileşimlerin bu termal dayanımı arttırdığı söylenebilir. En yüksek termal stabiliteye sahip beton karışımı ADK20 numunesidir.

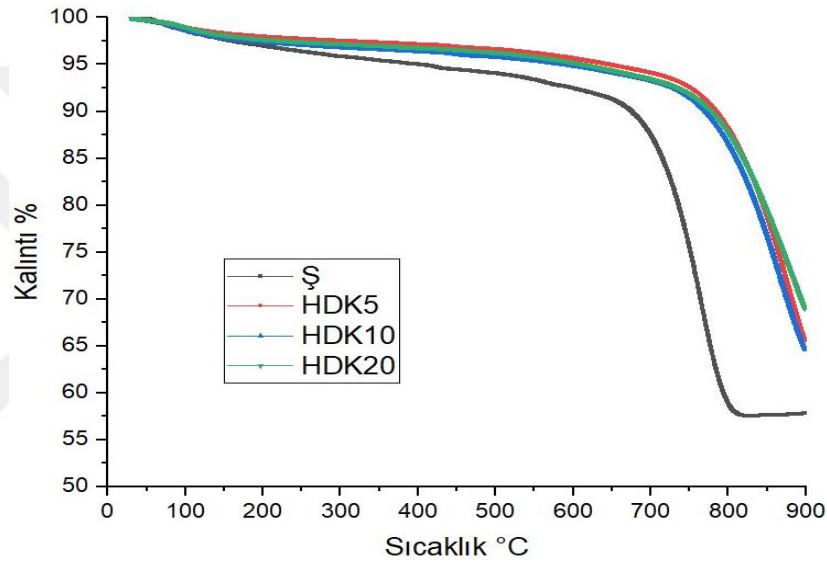


Şekil 4.27. ADK5, ADK10, ADK20 ve Şahit TGA termogramı

Çizelge 4.7. ADK5, ADK10, ADK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					900°C'de kalıntı (%)
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	
Şahit	650	815	400	675	> 900	57.8
ADK5	680	860	420	715	> 900	59.8
ADK10	700	875	595	745	> 900	59.1
ADK20	715	890	385	742	> 900	61.8

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]



Şekil 4.28. HDK5, HDK10, HDK20 ve Şahit TGA termogramı

Şekil 4.28'de HDK5, HDK10 ve HDK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8'e göre en düşük ilk bozunma sıcaklığı şahit numunesine en yüksek ilk bozunma sıcaklığı ise HDK5 numunesine aittir. Ham döküm kumu dozundaki artış ile birlikte ilk termal bozunma sıcaklıklarında düşüş gözlenirken, ikinci bozunma sıcaklıklarında (İBS) şahit numune göre artış olmakla birlikte her üç doz içinde İBS değerleri aynı tespit edilmiştir. En yüksek termal stabilite ise kalıntı miktarlarına bakıldığında HDK20 numunesinde elde edilmiştir. Atık döküm kumu içeren beton karışımlarının sonuçlarına (Çizelge 4.7) kıyasla ham döküm kumu içeren beton numunelerinin termal stabilitesi daha yüksektir. Tüm ham döküm kumu içeren beton

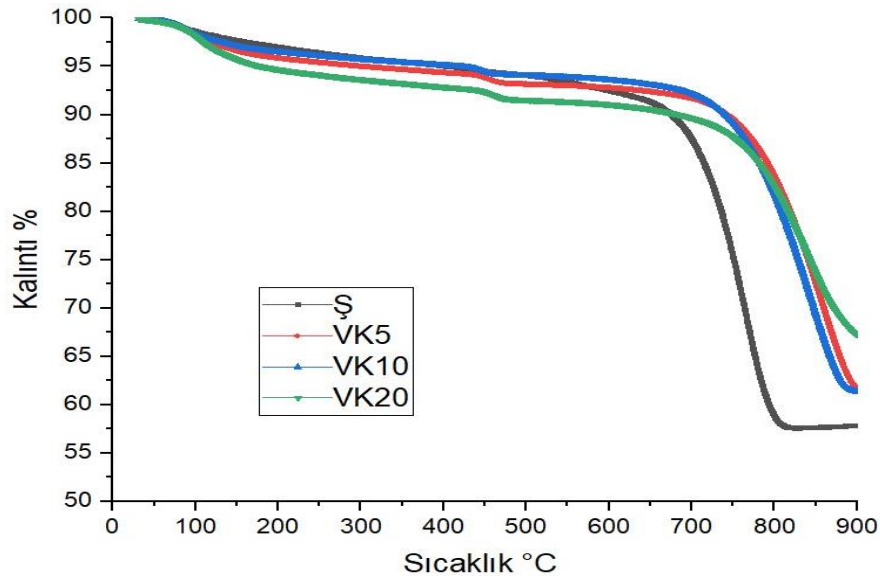
karişımlarının %50 oranında bozunması için ortam sıcaklığının 900°C'den yüksek olması gerekmektedir.

Çizelge 4.8. HDK5, HDK10, HDK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklığları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

Numune	Termal dayanım değerleri					900°C'de kalıntı (%)
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	
şahit	650	815	400	675	> 900	57.8
HDK5	750	895	647	784	> 900	65.6
HDK10	740	895	586	770	> 900	64.6
HDK20	730	895	614	777	> 900	68.9

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5 , %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

şekil 4.29'da VK5, VK10 ve VK20 numunelerinin ve karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numunesinin TGA analiz sonuçları, bozunma sıcaklığları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri ise izelge 4.9'da verilmiştir. Çizelge 4.9 sonuçlarına bakıldığında ilk termal bozulma sıcaklığı vermikülit dozu ile doğru orantılı olarak artmıştır. En düşük ilk termal bozunma sıcaklığı ise şahit numunesine aittir. En yüksek termal stabiliteye sahip beton karişımı ise VK20 numunesidir.



şekil 4.29. VK5, VK10, VK20 ve şahit TGA termogramı

Çizelge 4.9. VK5, VK10, VK20 ve şahit numunenin bozunma sıcaklıkları ve 900°C'deki kütle kaybı değişimleri

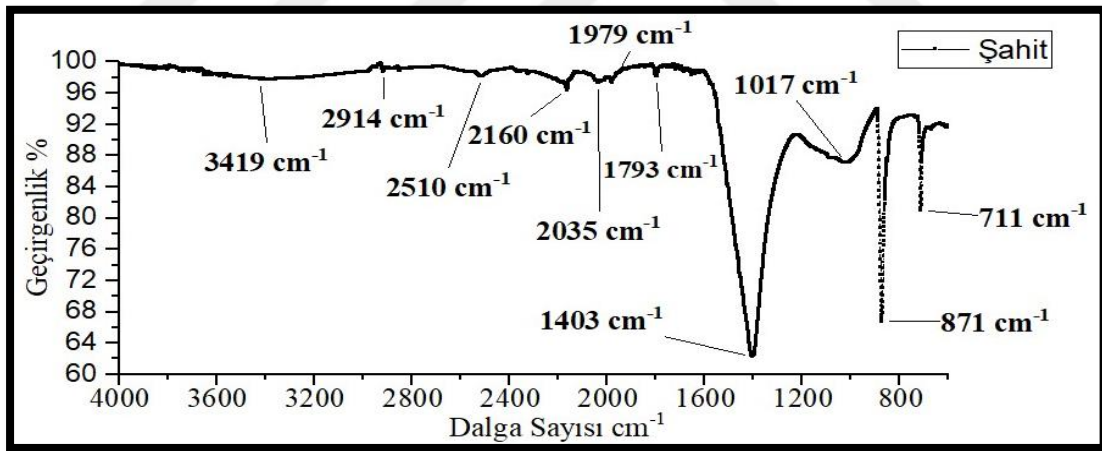
Numune	Termal dayanım değerleri					900°C'de kalıntı (%)
	BBS (°C)	İBS (°C)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	
Şahit	650	815	400	675	> 900	57.8
VK5	680	895	303	743	> 900	61.6
VK10	710	885	418	740	> 900	61.3
VK20	735	894	179	684	> 900	67.2

[BBS: Birincil bozunma sıcaklığı; İBS: İkincil bozunma sıcaklığı; T_{5, 10, 50}: %5, %10 ve %50 bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar]

7 ve 28 günlük kür işlemine tabi tutulmuş tüm sertleşmiş beton numunelerinin TGA sonuçlarına bakıldığında, 7 günlük beton numunelerinde ADK ve HDK katkılı betonların BBS ve İBS değerleri şahit numuneden daha yüksektir. Aynı zamanda 900°C sıcaklıkta ortamda kalan kalıntı miktarları da şahit betona göre daha yüksektir. ADK ve HDK dozlarının artması ile birlikte BBS ve İBS değerleri ile kalıntı miktarları da artış göstermiştir. Vermikülit katkılı 7 günlük betonlarda ise BBS ve İBS değerleri şahit numuneden yüksek olmakla birlikte artan vermicülit dozları ile birlikte kalıntı miktarı da artmıştır. 28 günlük ADK, HDK ve VK katkılı betonların BBS ve İBS değerleri ve 900°C' de ki kalıntı miktarları doz arttıkça artış göstermiş ve şahit (katkısız) betona göre artış göstermiştir. Genel olarak bakıldığında betonda ADK, HDK ve VK katkılarının kullanılması ile betonun termal dayanımı şahit numuneye göre daha fazladır. ADK, HDK ve VK katkılarının sahip olduğu yüksek termal bozunurluk özelliği (Çizelge 4.3) sayesinde katkı olarak kullanıldıkları betonların da termal dayanımları olumlu yönde etkilenmiştir. Buradan hareketle bu katkılı betonların özellikle termal dayanımın önemli olduğu yapılarda kullanılması önerilebilir.

4.5. Sertleşmiş Betonların FTIR Analizi

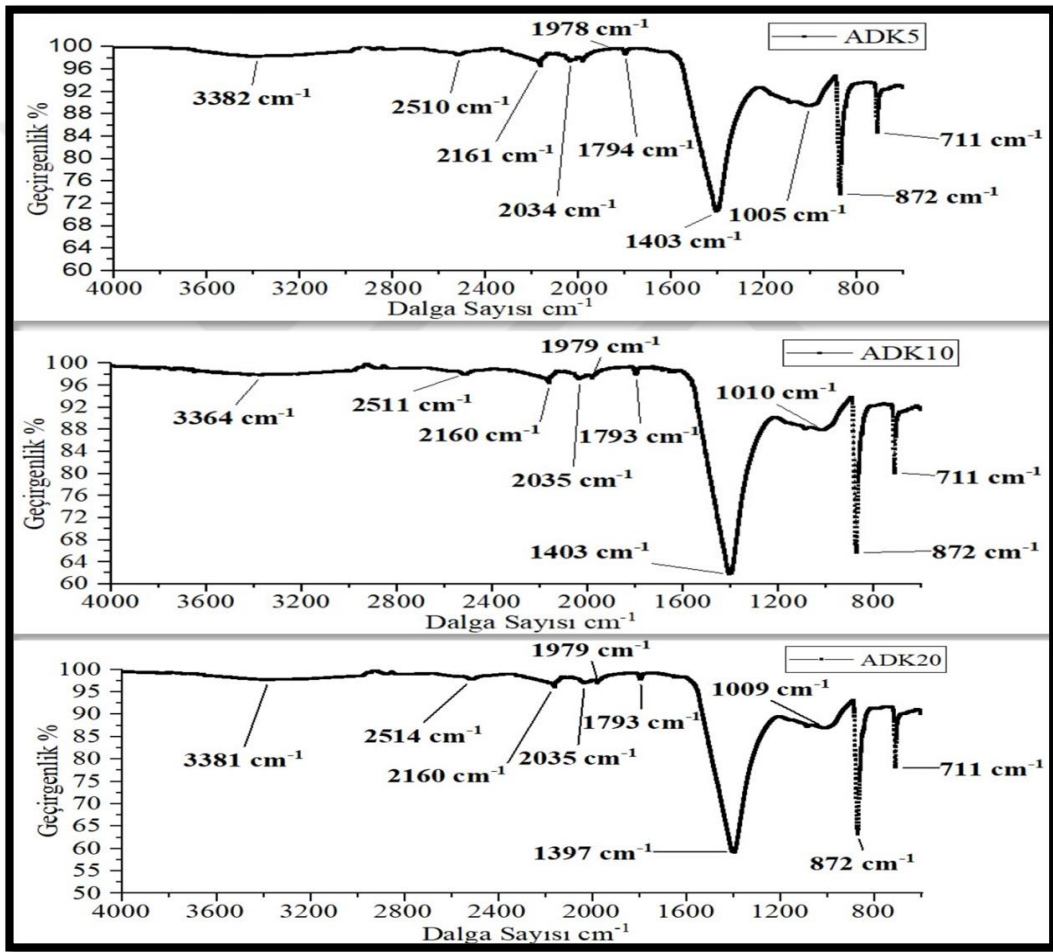
Şahit beton numunesinin sahip olduğu fonksiyonel bileşimi tespit etmek için elde edilen FTIR spektrumları Şekil 4.30'da verilmiştir. Şahit beton karışımında 3550 ile 3200 cm^{-1} dalga boyu aralığında şiddetli gerilme gösteren O-H bağı pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} zayıf gerilme gösteren C-O bağı piki tespit edilmiştir. 3000 ile 2840 cm^{-1} dalga boyu aralığında orta gerilme gösteren C-H bağı piki tespit edilmiştir. 2175 ile 2140 cm^{-1} dalga boyu aralığında şiddetli gerilme gösteren S-C=N bağı pikleri tespit edilmiştir. 2140 ile 1990 cm^{-1} dalga boyu aralığında şiddetli gerilme gösteren N=C=S bağı pikleri tespit edilmiştir. 2000 ile 1650 cm^{-1} dalga boyu aralığında zayıf eğilme gösteren C-H pikleri, 1815 ile 1785 cm^{-1} dalga boyu aralığında şiddetli gerilme gösteren C=O pikleri tespit edilmiştir. 1410 ile 1380 cm^{-1} dalga boyu aralığında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 1300 ile 700 cm^{-1} dalga boyu 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 Ca(OH)_2 atfedilmiştir (Horgnies ve ark., 2013).



Şekil 4.30. Şahit numunesinin FTIR spektrumları

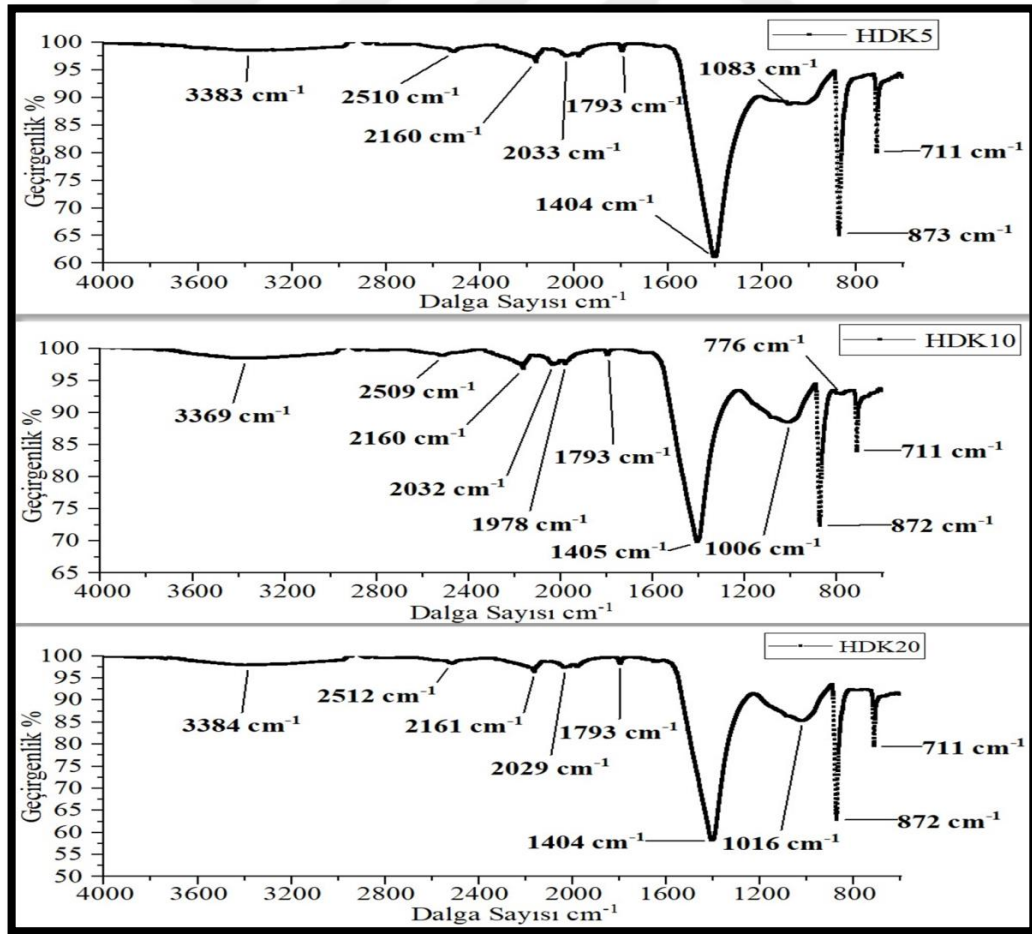
Atık döküm kumu içeren beton karışımlarının FTIR spektrumları Şekil 4.31'de verilmiştir. 3382 cm^{-1} , 3364 cm^{-1} ve 3381 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren O-H bağı pikleri, 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren S-C=N bağları pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} , 2511 cm^{-1} , 2514 cm^{-1} dalga boyunda zayıf gerilme gösteren C-O; $[\text{CO}_3]^{2-}$ pikleri tespit edilmiştir bu pikler CaCO_3 varlığına atfedilmiştir (Horgnies ve ark., 2013). 2035 cm^{-1} ve 2034 cm^{-1} dalga boyunda

şiddetli gerilme gösteren N=C=S bağları pikleri tespit edilmiştir. 1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1794 cm^{-1} ve 1793 cm^{-1} dalga boylarında zayıf eğilme gösteren C-H baği pikleri tespit edilmiştir. 1403 cm^{-1} ve 1397 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 1300 ile 700 cm^{-1} dalga boyu aralığında C-S-H baği pikleri tespit edilmiştir. Şahit numuneye göre (Şekil 4.30) bu pikin daha sığ olması kalsiyum silika hidrat miktarının da atık döküm kumu içeren betonlarda daha az olduğunu göstermektedir. 1005 cm^{-1} , 872 cm^{-1} , 711 cm^{-1} , 1009 cm^{-1} ve 1010 cm^{-1} dalga boylarındaki pikler Ca(OH)_2 varlığına atfedilmiştir (Horgnies ve ark., 2013).



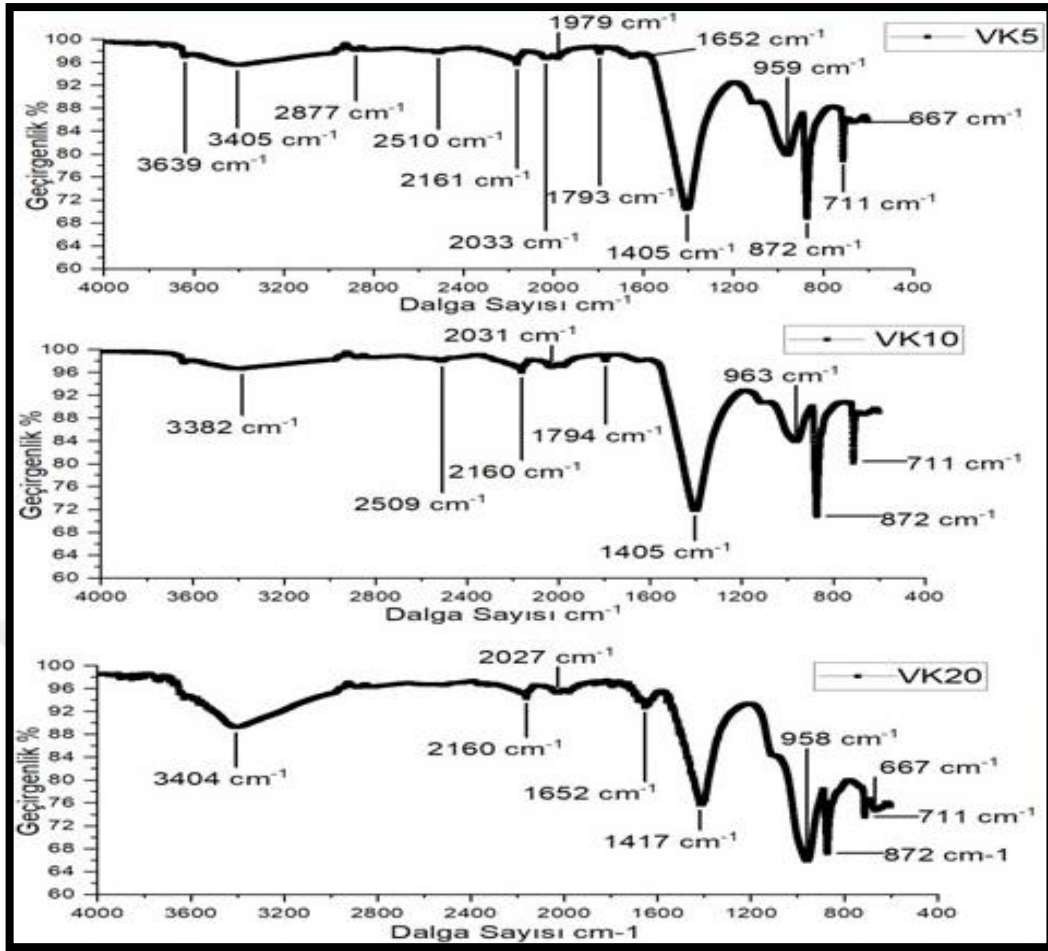
Şekil 4.31. ADK5, ADK10, ADK20 numunelerinin FTIR spektrumları

Ham döküm kumu içeren beton karışımlarının FTIR spektrumları Şekil 4.32’de verilmiştir. Şekil 4.32’ye göre 3384 cm^{-1} , 3383 cm^{-1} ve 3369 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren O-H bağı pikleri tespit edilmiştir. Şekil 4.31’de de tespit edilen 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2033 cm^{-1} , 2032 cm^{-1} ve 2029 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 1793 cm^{-1} dalga boyunda zayıf eğilme gösteren kalsiyum hidroksit varlığını gösteren C-H bağı pikleri tespit edilmiştir. C-H piklerinin hem şahit numuneye göre hem de atık döküm kumu katkılı betonlarına göre daha sığ bir pik gösterdiği ve betonda HDK dozu arttıkça da daha az miktarda azaldığı söylenebilir. 1405 cm^{-1} ve 1404 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} , 2509 cm^{-1} , 2512 cm^{-1} dalga boylarında zayıf gerilme gösteren C-O; $[\text{CO}_3]^{2-}$ pikleri CaCO_3 bileşiği varlığını ve 1016 cm^{-1} , 872 cm^{-1} , 711 cm^{-1} , 1006 cm^{-1} , 1010 cm^{-1} , 1083 cm^{-1} ve 873 cm^{-1} dalga boyundaki pikler $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bileşiğini temsil etmektedir.



Şekil 4.32. HDK5, HDK10, HDK20 numunelerinin FTIR spektrumları

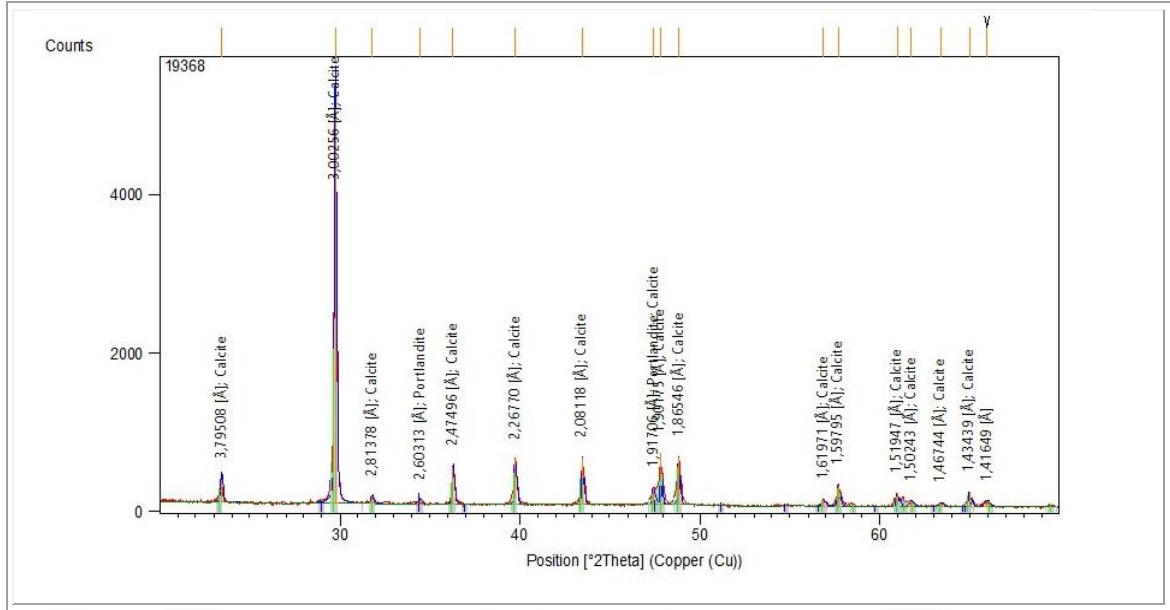
Şekil 4.33'te verilen VK katkılı betonların FTIR bulgularına göre 3700-3600 cm^{-1} dalga boyu aralığı düşük yoğunluklu O-H bağlarını temsil etmekte olup kil bileşiklerinin varlığına atfedilmiştir (Bosch Reing ve ark., 2002). 3405 cm^{-1} , 3404 cm^{-1} ve 3382 cm^{-1} dalga boylarında şiddetli yayvan O-H bağları gerilme pikleri, 2877 cm^{-1} dalga boyunda orta gerilme gösteren kalsiyum hidroksit varlığını gösteren C-H bağı pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} ve 2509 cm^{-1} dalga boyunda tespit edilen pikler şahit numunesinde (Şekil 4.30), ham döküm kumu içeren beton numunelerinde (Şekil 4.32) ve atık döküm kumu içeren beton numunelerinde (Şekil 4.31) de tespit edilmiş olup beton bileşiminden kaynaklanan CaCO_3 atfedilmiştir. 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri, 2033 cm^{-1} , 2031 cm^{-1} ve 2027 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 1979 cm^{-1} , 1794 cm^{-1} , 1793 cm^{-1} ve 1652 cm^{-1} dalga boylarında zayıf eğilme gösteren C-H bağı pikleri tespit edilmiştir. VK20 numunesinde 1417 cm^{-1} 'de orta eğilme gösteren O-H piki tespit edilmekte olup Çizelge 3.4'te açıklanan vermikülit dozunun artışı ile ihtiyaç duyulan su miktarının artması emilen su miktarının artışına sebep olup O-H bağlarını oluşturmuştur. O-H bağları oluşumu tespit edilen piklerde ise vermikülit dozu arttıkça piklerin derinliğinde artış tespit edilmiştir. 1405 cm^{-1} dalga boyunda şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür piki tespit edilmiştir. 1300-700 cm^{-1} dalga boyu aralığında C-S-H bağı pikleri tespit edilmiştir. 667 cm^{-1} 'de AlO bağları tespit edilmiştir (Puertas ve ark., 2000).



Şekil 4.33. VK5, VK10, VK20 numunelerinin FTIR spektrumları

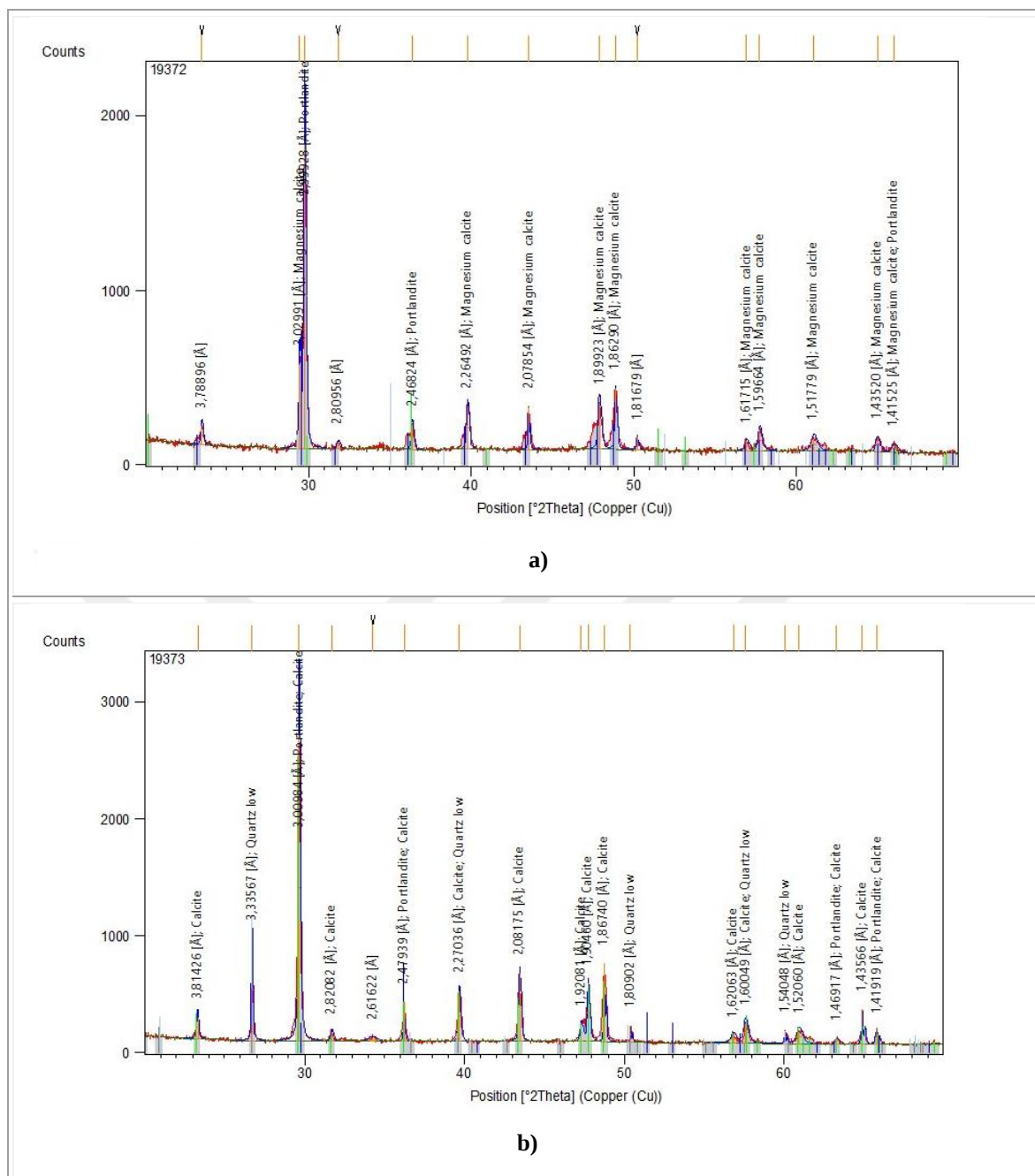
4.6. Sertleşmiş Betonların X-Işınları Difraktometresi (XRD) Analizi Sonuçları

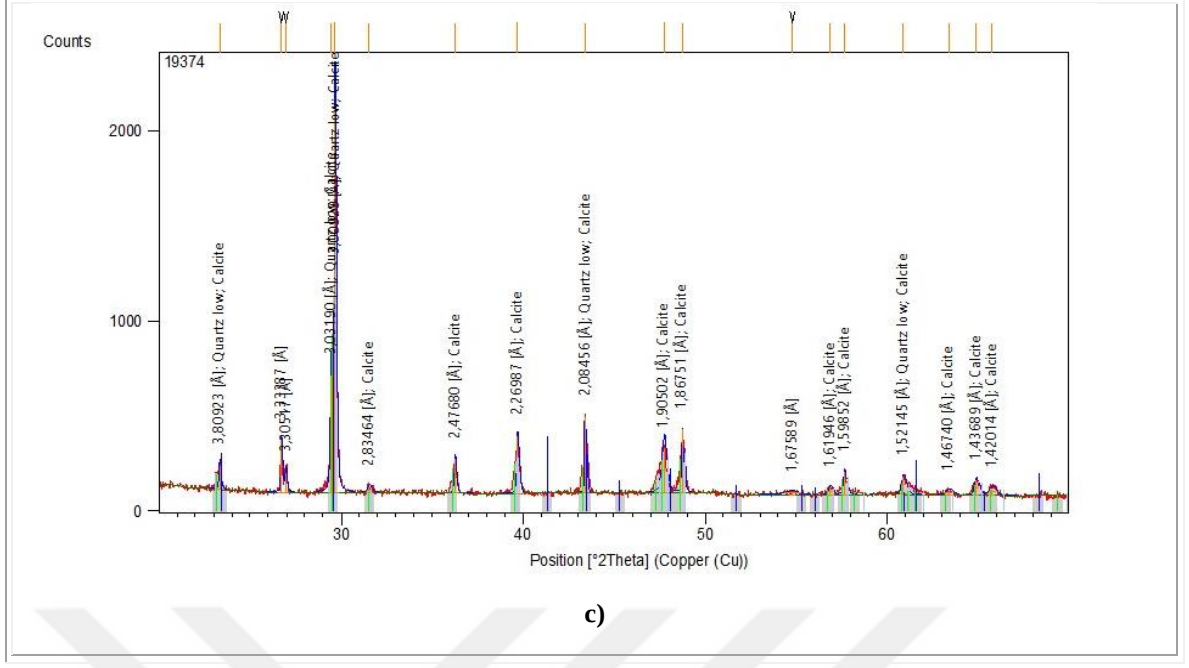
Şahit beton numunesinin minerolojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 4.34’de verilmiştir. XRD bulgularına bakıldığında baskın bileşiklerin kalsit (CaCO_3) ve portlandit (Ca(OH)_2) olduğu gözlenmektedir. Beton karışım suyu çimento yapısındaki Ca iyonları ile aşırı doygun hale gelince priz sertleşme başlamış ve kalsit ve portlandit hidratasyon ürünleri oluşmuştur. Bu sayede betonun dayanma süreci başlamıştır. SEM bulgularında gözlenen C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeli oluşumu da betonun sertleşmeye başladığını desteklemektedir.



Şekil 4.34. Şahit numunesinin XRD grafiği

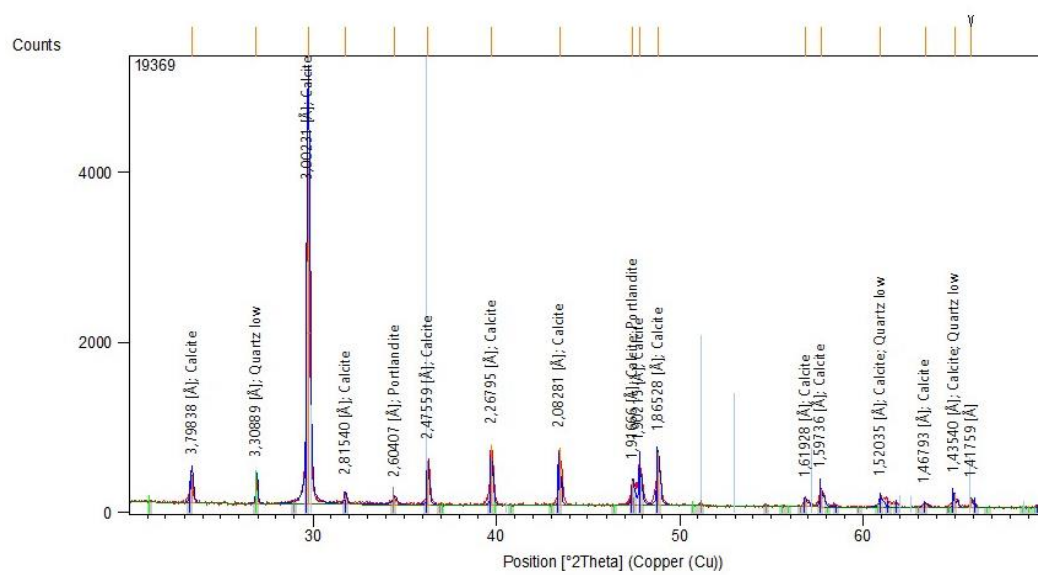
HDK5, HDK10 ve HDK20 numunesinin minerolojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 4.35’de verilmiştir %5, %10 ve %20 dozları için beton yapısındaki baskın minerolojik bileşiklerin kalsit ve portlandit olduğu gözlenmiştir. Ham döküm kumunun dozu arttıkça kuartz (SiO_2) bileşiğinin miktarı artmakta olup beton bileşimindeki ham döküm miktarının artışı ile ilişkilendirilmektedir. Buradan SiO_2 bileşiğinin hidratasyon hızını arttırarak beton bileşimindeki kalsit ve portlandit miktarlarında artışa sebep olduğu sonucuna ulaşılabilir. Buna ilaveten SiO_2 bileşiğinin reaksiyona girmesi ile C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) oluşumunu desteklediği ve HDK dozu artışı ile birlikte poroz yapıların azaldığı SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Sonuç olarak beton bünyesindeki döküm kumu katkısının betonun hidratasyonu üzerinde olumlu rol oynadığı söylenebilir.



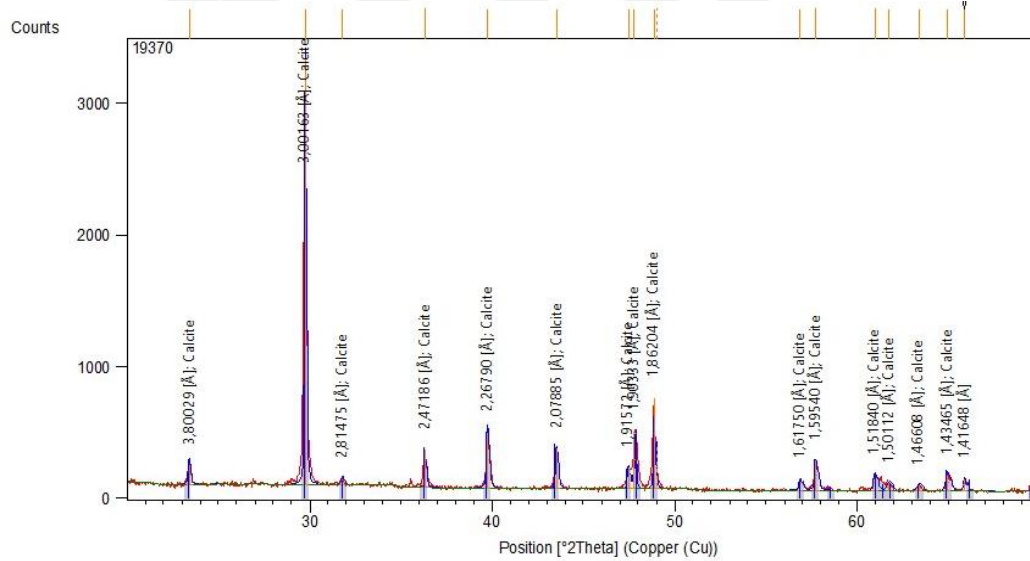


Şekil 4.35. a) HDK5, b) HDK10 ve c) HDK20 numunesinin XRD grafiği

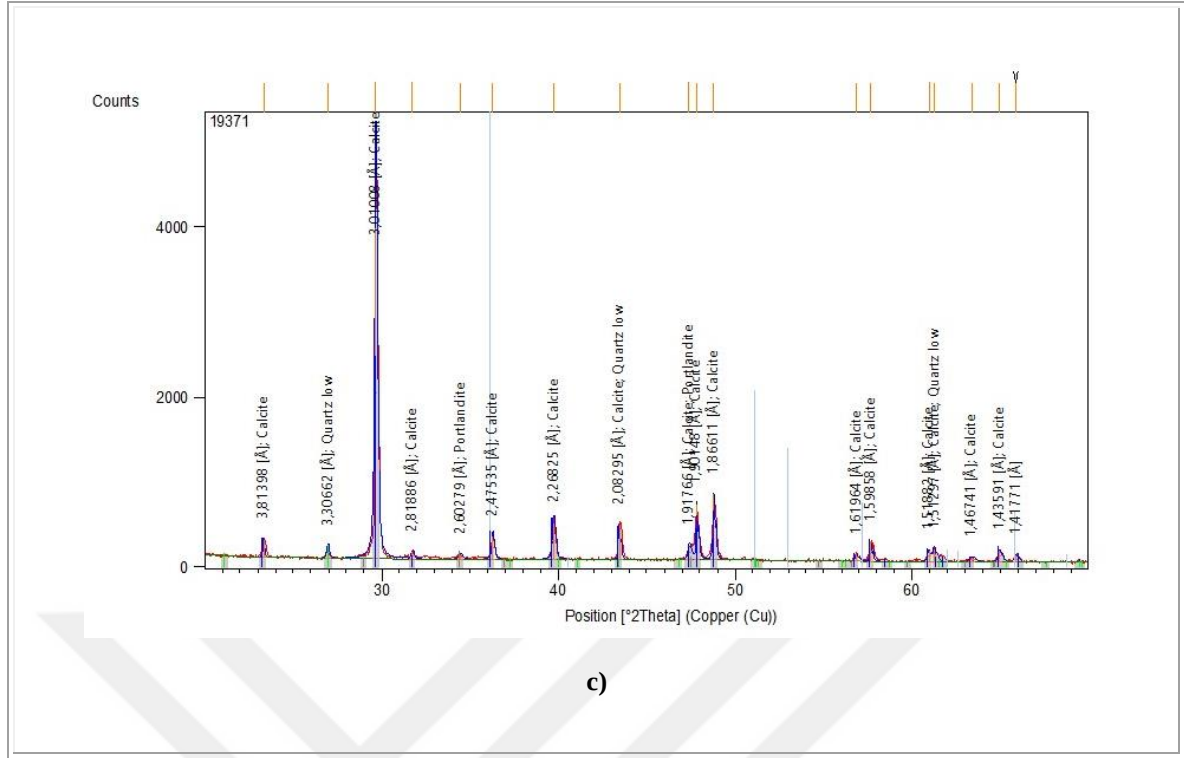
ADK5, ADK10 ve ADK20 numunesinin minerolojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 4.36’da verilmiştir. Atık döküm kumu katkılı betonlarda her üç doz için de betonun sertleşmesine bağlı olarak oluşan kalsit ve portlandit bileşikler gözlenmiştir. ADK dozu arttıkça hidratasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit miktarlarının arttığı pik şiddetlerinin artışından belli olmaktadır. Aynı zamanda döküm kumunun yapısından kaynaklanan kuartz miktarı da %20 ADK içerikli betonlarda %5 ADK içerikli betonlara göre daha düşüktür. Buradan kuartz bileşiğinin hidratasyon hızını artırarak beton yapısındaki kalsit ve portlandit miktarını arttırdığı söylenebilir. Aynı zamanda SiO_2 ’in reaksiyona girerek bir diğer hidratasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunu desteklediği de SEM görüntülerinden C-S-H miktarının artışından anlaşılmaktadır. Bu hidratasyon ürünlerinin (kalsit ve portlandit) ham döküm kumu katkılı betonlara göre pik şiddetlerinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni olarak atık döküm kumunda görülen Al_2O_3 bileşiğinin olduğu söylenebilir. Bu bileşik beton harcının karıştırma sürecinde alçı ile çok hızlı çözünmüş ve tepkimeye girerek reaksiyonu hızlandırmış ve CaCO_3 ve CaOH oluşumunu desteklemiştir.



a)

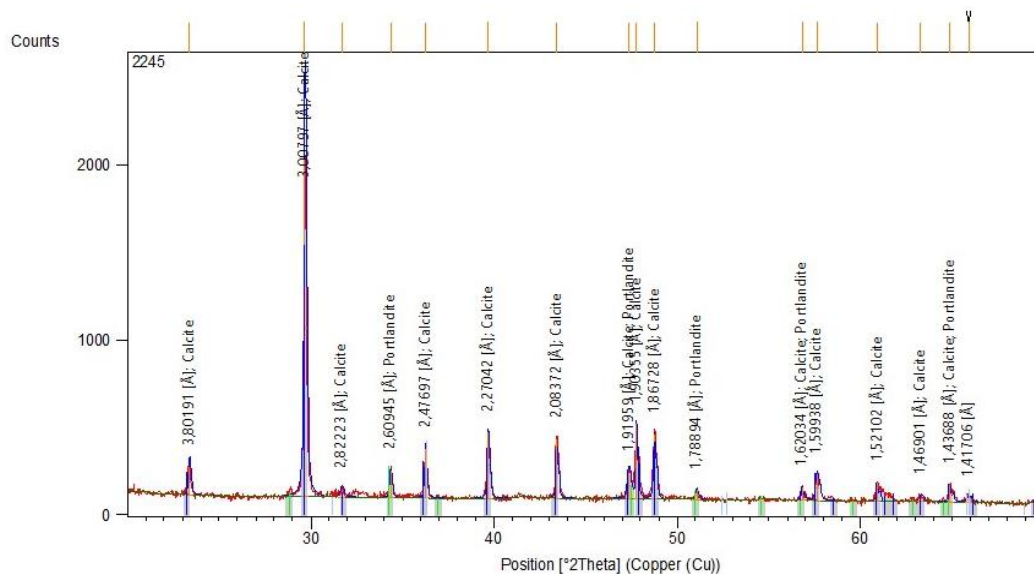


b)

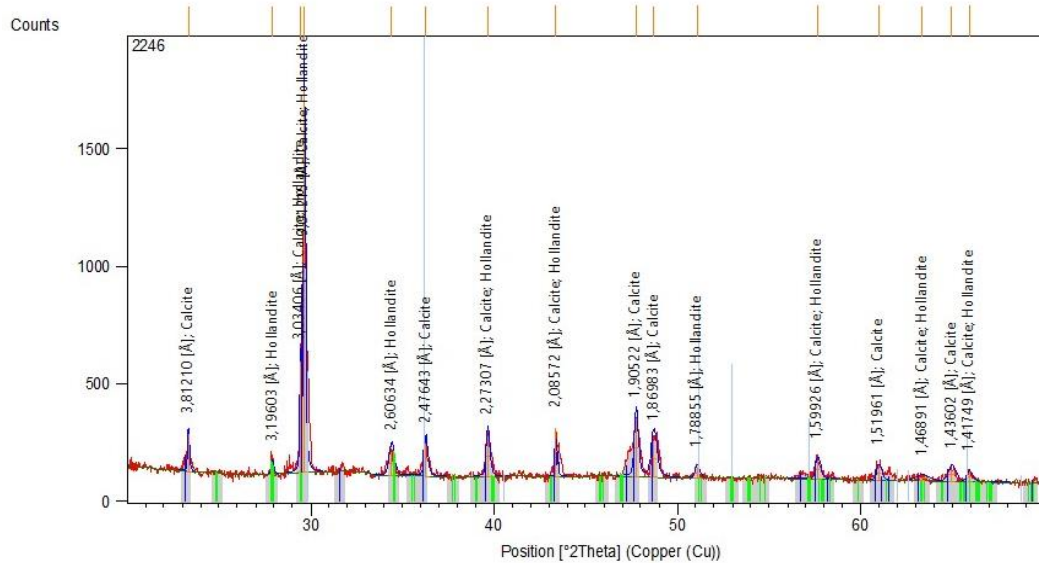


Şekil 4.36. a) ADK5, b) ADK10 ve c) ADK20 numunesinin XRD grafiği

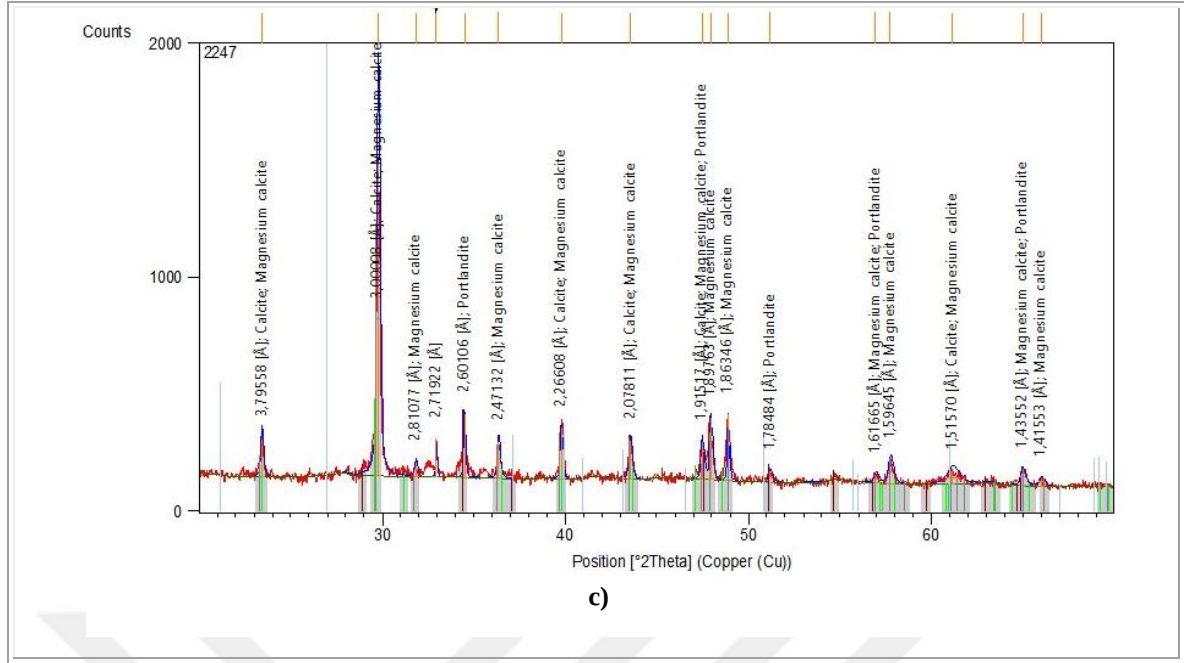
VK5, VK10 ve VK20 numunesinin minerolojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 4.37’de verilmiştir. Atık vermikülit içeren beton karışımlarının XRD bulgularına bakıldığında baskın minerolojik bileşiklerin kalsit ve portlandit olduğu gözlenmiştir. Atık vermikülit dozu arttıkça hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit miktarlarının azaldığı pik şiddetlerinin azalmasından belli olmaktadır. Buradan hareketle beton bünyesindeki atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonunu azalttığı ve geç dayanım kazandırdığı söylenebilir.



a)



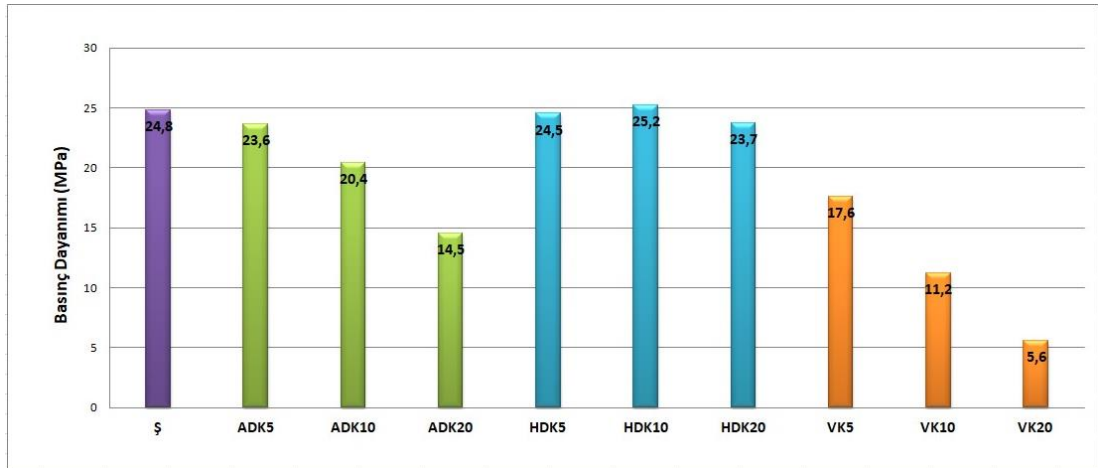
b)



Şekil 4.37. a) VK5, b) VK10 ve c) VK20 numunesinin XRD grafiği

4.7. Basınç Dayanımı

Katkısız şahit, saf ve atık döküm kumu ve atık vermikülit içeren beton karışımlarının 7 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 4.38’de verilmiştir.



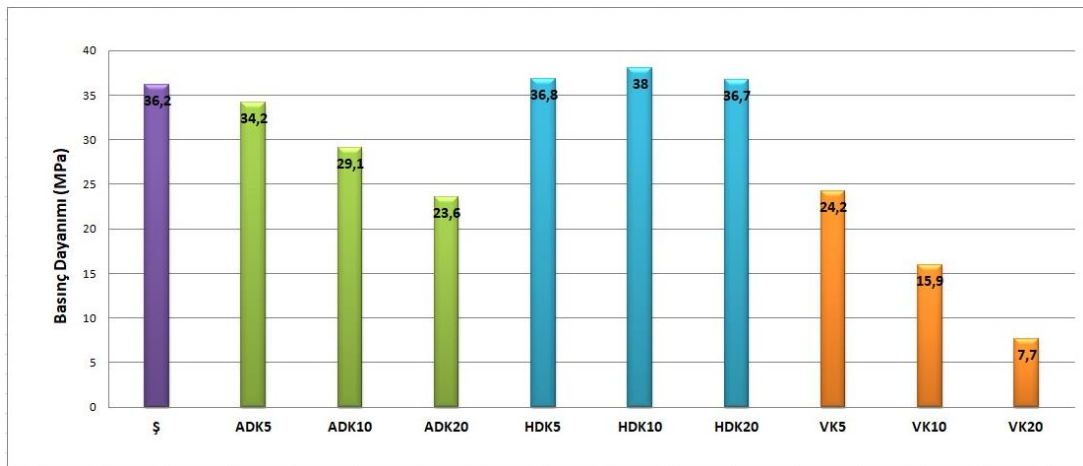
Şekil 4.38. Beton karışımlarının 7 günlük ortalama basınç dayanımları

Ham döküm kumu içeren tüm beton numunelerinde katkısız şahit numuneye kıyasla ortalama basınç dayanımı değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.16’da ki SEM görüntülerinde görüldüğü üzere ham döküm kumundaki doz artışı

ile birlikte poroz yapılarda azalma gözlemlenmesi, Şekil 4.35’de açıklanan XRD bulgularındaki HDK dozunun artışı ile birlikte kalsit ve portlandit pik şiddetlerinin artışı dolayısıyla ham döküm kumu katkısının betonun hidrotasyonunu hızlandırması, Şekil 4.32’de ki FTIR spektrumlarında tespit edilen CaCO_3 ve Ca(OH)_2 varlığına atfedilen bileşiklerin HDK dozu artışı ile pik şiddetlerinin derinliğindeki artış ile basınç dayanımındaki artışı açıklanmaktadır.

Atık döküm kumu katkılı beton numunelerde katkısız şahit numuneye ve ham döküm kumu katkılı numuneye kıyasla atık döküm kumu dozu arttıkça ortalama basınç dayanımında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.11’de ki SEM görüntülerinde de görüldüğü üzere atık döküm kumu dozu artışı ile tanecikli yapıdaki artış tespiti Şekil 4.36’da açıklanan XRD bulgularındaki %20 ADK katkılı betonlardaki %5 ADK katkılı betonlara göre kuvarz miktarındaki azalma, Şekil 4.31’de ki FTIR spektrumlarında tespit edilen C-S-H piklerinin varlığı ve bu piklerin şahit numuneye kıyasla daha sık olması basınç dayanımında azalmayı açıklanmaktadır.

Atık vermikülit katkılı beton numunelerinde katkısız şahit, saf ve atık döküm kumu katkılı numunelere kıyasla önemli ölçüde basınç dayanımı değerlerinde düşüş meydana geldiği, buna ilaveten atık vermikülit dozu arttıkça ortalama basınç dayanım değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu azalma Şekil 4.20’de ki SEM görüntülerindeki mikroyapılarda çatlakların gözlemlenmesi, Şekil 4.37’de ki XRD bulgularında tespit edilen kalsit ve portlandit miktarlarının azalması, Şekil 4.33’de ki FTIR spektrumlarında tespit edilen O-H bağlarının artışı ile açıklanmaktadır.



Şekil 4.39. Beton karışımlarının 28 günlük ortalama basınç dayanımları

Ham döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülit içeren beton karışımlarının 28 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 4.39’da verilmiştir.

Ham döküm kumu katkılı beton numunelerinde katkısız şahit numuneye, atık döküm kumu ve atık vermikülit katkılı beton numunelere kıyasla ortalama basınç dayanımında artış tespit edilmiştir. Bu artışın sebebi ham döküm kumunun Şekil 4.16’da ki SEM görüntülerinde gözlemlendiği üzere ham döküm kumu katkısının artışı ile birlikte beton içerisindeki boşlukların azalması, C-S-H jeli oluşumunun artması dolayısıyla çimentonun hidrotasyonunun gerçekleşerek beton dayanımını etkilemesi, Şekil 4.35’de ki XRD bulgularında tespit edilen baskın minerolojik bileşiklerin kalsit ve portlanditin pik şiddetlerinin artması dolayısıyla bu hidrasyon ürünlerinin miktarının artışı, ham döküm kumunun kimyasal bileşiklerinde bulunan SiO_2 (kuvartz bileşiğinin) ham döküm kumu katkısı dozu artışı ile birlikte hidrasyonun hızını arttırması, Şekil 4.32’de ki FTIR spektrumlarında tespit edilen C-H pikleri ve C-O pikleri ve bu piklere atfedilen CaCO_3 ve Ca(OH)_2 bileşiklerinin varlığı, Şekil 4.1’deki SEM görüntülerinde gözlenen ham döküm kumunun yüzey yapı pürüzlülüğü ham döküm kumundaki katkılı betonlarda ki basınç dayanımı artışını açıklamaktadır.

Atık döküm kumu katkılı beton numunelerde atık vermikülit içeren beton numunelerine kıyasla basınç dayanımında artış, ham döküm kumu katkılı beton numunelerine kıyasla basınç dayanımında azalma, şahit numuneye kıyasla %5 ADK’ya yakın değerler gösterdiği atık döküm kumu dozu artışı ile birlikte ise ortalama basınç dayanımında azalma tespit edilmiştir. Şekil 4.11’deki SEM görüntülerindeki şahit numuneye kıyasla tanecikli ve gözenekli yapıdaki artış agromerasyonda azalma, Şekil 4.3’de ki atık döküm kumu malzemesinin SEM görüntülemesinde gözlenen safsızlıklar, Şekil 4.36’da ki XRD bulgularındaki atık döküm kumu dozu artışı ile birlikte kuvartz bileşiğinin pik şiddetlerinde azalma dolayısıyla kuvartz miktarında azalma meydana gelerek hidrasyon hızında azalma, FTIR spektrumlarında tespit edilen O-H piklerinin artışı, basınç dayanımında ki azalmayı açıklamaktadır.

Atık vermikülit katkılı beton numunelerinde şahit, saf ve atık döküm kumu katkılı beton numunelere kıyasla, atık vermikülit dozu artışı ile ortalama basınç değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Basınç değerlerindeki azalma Şekil 4.5’de ki atık vermikülit malzemesinin SEM görüntüsündeki gözlemlenen safsızlıklar, Şekil 4.20’de ki SEM görüntülerinde gözlemlenen vermikülit dozunun artışı ile birlikte çimento hidrasyonunu sağlayarak dayanıklılık sağlayan C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jeli oluşumunda azalmalar, mikroyapılarda çatlak oluşumu ve gözenekli yapıların artışı,

Şekil 4.37’de ki XRD bulgularında tespit edilen atık vermikülit dozu artışı ile hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit pik şiddetlerinin azalması, dolayısıyla atık vermikülit katkısının betonun hidrasyonunu azaltarak geç dayanım kazandırması, Şekil 4.33’de ki FTIR spektrumlarındaki bulgularda tespit edilen atık vermikülit dozu arttıkça O-H piklerin derinliğinde artış tespit edilmesi dolayısıyla ihtiyaç duyulan su miktarının artışı ile emilen su miktarında artışa sebep olması ile açıklanmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, ham (kullanılmamış) döküm kumu, atık döküm kumu ve atık vermikülitin katkı olarak betonda kullanılabilirliği, yaş ve sertleşmiş betonun fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklerini ortaya koyan analizler ile değerlendirilmiştir. Bu sayede atık döküm kumunun ve atık vermikülitin yaratabileceği çevresel problemlerin önüne geçilmesi ve betonda kullanılacak agregadan tasarruf edilerek bu malzemelerin eldesi için doğal kaynakların tahribatının ve tüketilmesinin de önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- İşlenebilirlik bakımından, kullanılmamış ve atık döküm kumu ve atık vermikülit standartları sağlayarak beton yerleştirilmesinde olumlu rol oynamıştır.
- Atık döküm kumu katkılı betonlarda, ham döküm kumu katkılı betonlara kıyasla safsızlıklar, atık vermikülit dozu arttıkça ise kalsiyum silikat hidrat jeli oluşumunda azalma ve mikroyapılarda çatlaklar SEM görüntülerinde gözlenmiştir.
- SEM görüntülemelerine göre kullanılan malzeme ve atık malzemelerin ve bunlar kullanılarak üretilen beton karışımlarının mikroyapılarında tanecik boyut ve şekillerinde farklılıklar ve homojen bir dağılım gözlenmiştir.
- Genel olarak bakıldığında betonda ADK, HDK ve VK katkılarının kullanılması ile betonun termal dayanımı şahit numuneye göre daha fazladır. ADK, HDK ve VK katkılarının sahip olduğu yüksek termal bozunurluk özelliği sayesinde katkı olarak kullanıldıkları betonların da termal dayanımları olumlu yönde etkilenmiştir. Buradan hareketle bu katkılı betonların özellikle termal dayanımın önemli olduğu yapılarda kullanılması önerilebilir.
- XRD analizi bulgularına göre, ham döküm kumu ve atık döküm kumu katkısının betonun hidrasyonu üzerinde olumlu rol oynayarak betonun sertleşmesini hızlandırdığı tespit edilmiştir.

- Atık döküm kumu ve ham döküm kumu katkılı beton numunelerinde betonun 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerlerinin katkısız şahit beton numunesi ortalama basınç dayanımı değerlerine yakın değerler elde edilmiştir. Atık vermikülit katkılı betonlarda ise VK dozu arttıkça 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanım değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Atık malzemeler arasında şahit numeye en yakın ortalama basınç dayanım değerini %5 atık döküm kumu katkılı beton numunesi vermiştir.

5.2. Öneriler

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre,

- ADK, HDK ve VK katkılı betonlar termal dayanımın önemli olduğu yapılarda kullanılabilir. Ayrıca bu betonlarda ham ve atık döküm kumu katkılarının ince agregası ile %5-20 arasında karıştırılarak kullanılması beton basınç dayanımını çok fazla olumsuz yönde etkilemeyeceği ve düşük basınç dayanımının yeterli olduğu yapılarda bu betonların kullanımının uygun olduğu söylenebilir.
- Beton içerisinde atık döküm kumu ve atık vermikülitin 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 agregası miktarı da bu katkıların kullanımı ile azaltılmış olacak ve agregası üretimi sırasında meydana gelen doğal kaynakların tüketimi ve tahribatı da engellenmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aggarwal, Y. ve Siddique, R., 2014, Microstructure and properties of concrete using bottomash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 54, 210-223.
- Aguayo, F., Torres, A., Talamini, T. ve Whaley, K., 2017, Investigation Into The Heat Of Hydration And Alkali Silica Reactivity of Sustainable Ultrahigh Strength Concrete With Foundry Sand, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.
- Alonso-Santurde, R., Andrés, A., Viguri, J. R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C. ve Dondi, M., 2011, Technological Behaviour And Recycling Potential of Spent Foundry Sands in Clay Bricks, *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 994-1002.
- American Foundrymen's Society (AFS), 2004, Foundry sand facts for civil engineers, *American Foundrymen's Society Inc. for Federal Highway Administration Environmental Protection Agency, Report No: FHWA-IF-04-004, Washington DC, US*, 80.
- Amin, M., Tayeh, A. B. ve Agwa, I. S., 2020, Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete, *Journal of Cleaner Production*, 273, 123073.
- Anonim, 2019, Döküm Kumu (online), <https://www.tunasiliskum.com.tr/dokum-kumu/> [Ziyaret Tarihi: 11 Kasım 2020].
- Anonim, 2015, Atık Yönetimi Yönetmeliği. Türkiye Cumhuriyeti, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Anonim, 2019, Vermikülit kullanım alanları (online), <https://insapedia.com/vermikulit-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/>, [Ziyaret Tarihi: 9 Temmuz 2021].
- Aras, A., 1984, Malatya-Darende-Kuluncak-Darılı Vermikülit Zuhuru Jeoloji Raporu, MTA, 1725.
- Başar, H. M. ve Deveci Aksoy, N., 2012, Recovery Applications of Waste Foundry Sand, *Mühendislik ve Fen Dergisi*, 30, 205-224.
- Başar, H. M. ve Deveci Aksoy, N., 2012, The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete, *Construction and Building Materials*, 35, 508-515.
- Batayneh, M., Marie, I. ve Asi, İ., 2007, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, 27, 1870-1876.
- Belmokaddem, M., Mahi, A., Senhadji, Y. ve Pekmezci, B. Y., 2020, Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate, *Construction and Building Materials*, 257, 119559.

- Bosch Reig, F., Gimeno Adelantado, J. V. ve 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.
- Cabrera-Luna, K., Maldonado-Bandala, E. E., Nieves-Mendoza, D., Castro-Borges, P. ve Escanlante Garcia, J. I., 2020, Novel low emissions supersulfated cements of pumice in concrete; mechanical and electrochemical characterization, *Journal of Cleaner Production*, 272, 122520.
- Çakıroğlu, M. A., Kasap, S. ve Keskin, N., 2011, Betona Atık Teneke Ambalajlarının İlave Edilmesinin Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma, *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 92-95.
- Çelik, S., Mutuk, T., Oktay, B. M. ve Demirbaş, K. A., 2017, Mechanical and microstructural characterization of cement mortars prepared by waste foundry sand (WFS), *Journal of Australian Ceramic Society*, 53, 829-837.
- Çoşar, K. (2020), Yüksek sıcaklığın genişletilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çimento esaslı hafif harçların özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, 3-87.
- Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B. ve Uygunoğlu, T., 2018, Pozzolan effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 165, 494-503.
- Doğangün, A., 2014, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul, İstanbul.
- DPT, 2001, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer Çalışma Grubu Raporu, DPT, 2617 - ÖİK: 628, Ankara, 57-68.
- Duman, O. ve Tunç, S., 2008, Electrokinetic Properties of Vermiculite and Expanded Vermiculite: Effects of pH, Clay Concentration and Mono and Multivalent Electrolytes, *Separation Science and Technology*, 0149-6395, 3755-3776.
- Erdoğan, T. Y., 2007, Beton, Genişletilmiş 2. Baskı, O.D.T.Ü. Yayıncılık, Ankara.
- European Ready Mixed Concrete Organization, 2019, Ready-mixed concrete industry statistics year 2018, *ERMCO*, 1-20.
- Gönen, T., Onat, O., Cemalgil, S., Yilmazer, B. ve Altuncu, Y. T., 2012, Beton Teknolojisi İçin Yeni Atık Malzemeler Üzerine Bir İnceleme, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8 (1), 36-43.
- Gurumoorthy, N. ve Arunachalam, K., 2015, Micro and Mechanical Behaviour of Treated Used Foundry Sand Concrete, *Construction and Building Materials*, 123, 184-190.

- Horgnies, M., Chen, J. J. ve Bouillon, C., 2013, Overview about the use of Fourier Transform Infrared spectroscopy to study cementitious materials, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 77, 251-260.
- Kara, C. ve Bekem, İ., 2018, Endüstriyel Atıkların Beton Dayanımına Etkisi Üzerine Bir Çalışma: Çay Fabrikası Kömür Külü Örneği, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7 (2), 75-85.
- Karaaslan, E. (2019), Atık Döküm Kumunun Harç İçinde Agrega Olarak Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-61.
- Kaur, G., Siddique, R. ve Rajor, A., 2012, Properties of Concrete Containing Fungal Treated Waste Foundry Sand, *Construction and Building Materials*, 29, 82-87.
- Kaya, M. (2011), Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen silis dumanı katkı-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri, Yüksek Lisans, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, 21-105.
- Khatib, J. M., Baig, S., Bougara, A. ve Booth, C., 2010, Foundry Sand Utilisation in Concrete Production, *In Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Anoca, Italy, 931-938.
- Khatib, J. M., Herki, B. A. ve Kenai, S., 2013, Capillarity of Concrete Incorporating Waste Foundry Sand, *Construction and Building Materials*, 47, 867-871.
- Kılıç, M. Y. ve Tüylü, M., 2019, Bursa'daki Atık Döküm Kumlarının Endüstriyel Simbiyoz İle Hazır Beton Üretiminde Hammadde Olarak Kullanımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (1), 99-110.
- Köksal, F., Gencel, O. ve 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.
- Köksal, F., Serreno-Lopez, M., Şahin, M., Gencel, O. ve 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.
- Loughbrough, R., 1991, Minerals in Lightweight Insulation, *Industrial Minerals*, October, 21-35.
- Manoharan, T., Laksmanan, D., Mysamy, K., Sivakumar, P. ve Sircar, A., 2018, Engineering Properties of Concrete with Partial Utilization of Used Foundry Sand, *Waste Management*, 71, 454-460.
- Marcos, C. ve Rodriguez, I., 2011, Expansibility of vermiculites irradiated with microwaves, *Applied Clay Science*, 51 (1-2), 33-37.

- Mehta, P. K., 2001, Reducing the enviromental impact of concrete, *Concrete International*, 61-66.
- Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J. ve Ling, T. C., 2018, Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar, *Construction and Building Materials*, 179, 302-306.
- Monosi, S., Sani, D. ve Tittarelli, F., 2010, Used Foundry Sand in Cement Mortars and Concrete Production, *The Open Waste Management Journal*, 3, 18-25.
- Nath, P. ve Sarker, P., 2011, Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, *Procedia Engineering*, 14, 1149-1156.
- Naveenkumar, K., Suriya P. A., Divahar, R., Sangeetha , S.P. ve Jayakumar, M., 2021, Experimental investigation flexural behavior of reinforced concrete beam with partial replacement of vermiculite, *Meterialstoday: Proceedings*, 46 (12), 5885-5888.
- Zhan, Q., Zhou, J., Wang, S., Su, Y., Liu, B., Yu, X., Pan, Z. ve Qian, C., 2021, Crack self-healing of cement-based materials by microorganisms immobilized in expanded vermiculite, *Construction and Building Materials*, 272, 121610.
- Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y. ve Bishnoi, S., 2020, Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand , *Construction and Building Materials*, 251, 118875.
- Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso, S. ve Vazquez, T., 2002, Alkali-activated fly ash/slag cement strength behaviour and hydration products, *Cement and Concrete Research*, 30, 1625-1632.
- Reichl, C. ve Schatz, M., World Mining Data, 2019, Iron and Ferro-Alloy Metals Non-Ferrous Metals Precious Metals Industrial Minerals, Mineral Fuels, 34, Vienna, 262.
- Reichl, C. ve Schatz, M., World Mining Data, 2021, Iron and Ferro-Alloy Metals Non-Ferrous Metals Precious Metals Industrial Minerals, Mineral Fuels, 36, Vienna, 146.
- Sadowski, L., Piechowka-Mielnik, M., Widziszowski, T., Gardynik, A. ve Mackiewicz, S., 2019, Hybrid ultrasonic-neural prediction of the compressive strength of environmentally friendly concrete screeds with high volume of waste quartz mineral dust, *Journal of Cleaner Production*, 212, 727-740.
- Salokhe, E. P. ve Desai, D. B., 2013, Application of Foundry Waste Sand in Manufacture of Concrete, *IOSRJMCE*, ISSN, 2278-1684.
- Siddique, R., Kaur, G. ve Rajor, G., 2010, Waste foundry sand and its leachate characteristics, Resources, *Conservation and Recycling*, 54, 1027- 1036.

- Siddique, R., Singh, G. ve Singh, M., 2018, Recycle Option for Metallurgical by-Product (Spent Foundry Sand) in Green Concrete for Sustainable Construction, *Journal of Cleaner Production*, 172, 1111-1120.
- Siddique, R. ve Singh, G., 2011, Utilization of Waste Foundry Sand (WFS) in Concrete Manufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (11), 885-892.
- Smarzewski, P. ve Barnat-Hunek, D., 2016, Mechanical and Durability Related Properties of High Performance Concrete Made with Coal Cinder and Waste Foundry Sand, *Construction and Building Materials*, 121, 9-17.
- Soğancıoğlu, M. (2011), Andezit Mermer İşleme Atıksuyu Fiziko-Kimyasal Arıtma Çamurunun Beton Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-71.
- Soğancıoğlu, M. (2016), Evsel Termoplastik Atıkların Piroliz Ürünleri Ve Yeni Değerlendirme Yaklaşımları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, 29-30.
- Strand, P.R., 1983, Vermiculite, *Industrial Minerals And Rocks*, AIME, 1375-81.
- Sütçü, M., 2015, Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks, *Ceramics International*, 41 (2), 2819-2827.
- Şahin, M. (2011), Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çelik tel takviyeli-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri, Yüksek Lisans, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, 3-81.
- Şahmaran, M., Lachemi, M., Erdem, T. K., Yücel, H. E., 2011, Use of Spent Foundry Sand and Fly Ash for the Development of Green Self-Consolidating Concrete, *Materials and structures*, 44 (7), 1193-1204.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2012, Türkiye’de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi, Döküm Sektörü, Rehber Doküman.
- Toksoy Köksal, F., 1997, Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye deki durumu, 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 123-139.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M. ve Karakurt, C., 2006, Beton Üretiminde Kimyasal Madde Kullanımı, *Politeknik Dergisi*, 9 (1), 59-63.
- Torres, A., Bartlett, L. ve Pilgrim, C., 2017, Effect of Foundry Waste on the Mechanical Properties of Portland Cement Concrete, *Construction and Building Materials*, 135, 674-681.
- TS 500, 2000, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları, TSE, Ankara.
- Türeyen, A.C. (2019), Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özellikleri, Yüksek Lisans, *Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, 3-116.

- Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, 2019, Kullanılmış Döküm Kumunun Değerlendirilmesi Ve Geri Kazanımı, Türkiye Döküm Sektörü, *TUDOKSAD, İstanbul*, 1-17
- Ulubeyli, G. C., Bilir, T. ve Artir, R., 2016, Durability Properties of Concrete Produced by Marble Waste as Aggregate or Mineral Additives, *Procedia Engineering*, 161, 543-548.
- Varadharajan, S., 2020, Determination of mechanical properties and environmental impact due to inclusion of flyash and marble waste powder in concrete, *Structures*, 25, 613-630.
- Varadharajan, S., Jaiswal, A. ve Verma, S., 2020, Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk ash and marble dust in concrete, *Structures*, 28, 389-406.
- Yavuz,, H. İ. (2011), Su Geçirimsiz Beton ve Örnek Uygulamalar, Yüksek Lisans, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 8-9.
- Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Yaghoubi, M. ve Horpibulsuk, S., 2020, Shear strength properties and stress-strain behavior of waste foundry sand, *Construction and Building Materials*, 249, 118761.
- Yıldız, S., Yıldırım, S. T., Karaman, D. ve Karaaslan, E., 2018, Öğütülmüş Döküm Cürufunun Çimento Harcı İçinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, 1455-1462.