





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Betonda Agregaya İle Yer Değiştirilen Atık Döküm Kumunun Sertleşmiş Betonun Kimyasal ve Mineralojik Yapısına ve Mekanik Dayanımına Olan Etkisi

 Fatmanur KARAKAYA HARMANCI^a,  Merve SOĞANCIOĞLU KALEM^{b,*}

^{a,b} Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: msogancioglu@ktun.edu.tr
DOI: 10.29130/dubited.1101512

ÖZ

Endüstriyel faaliyetlerin gelişmesine bağlı olarak endüstriyel atık miktarı gün geçtikçe artmaktadır. Bu atıklar çevresel anlamda ciddi sorunlar yaratabilmektedir. Bu atıkların geri kazanılarak farklı malzemelerin üretiminde değerlendirilmesi mümkündür. Bu sayede bu atıklar için uygun bir çevresel çözüm bulunmuş olacak ve diğer malzemelerin üretiminde meydana gelen doğal kaynakların tahribatı da engellenmiş olacaktır. Bu çalışma ile önemli bir çevresel sorun olan atık döküm kumu 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, atık döküm kumu önemli bir yapı malzemesi olan beton içerisinde değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu atıklar %5, %10 ve %20 oranlarında beton içerisinde değerlendirilerek çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu atıklar %5, %10 ve %20 oranlarında beton içerisinde değerlendirilerek çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, atık döküm kumu önemli bir yapı malzemesi olan beton içerisinde değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu atıklar %5, %10 ve %20 oranlarında beton içerisinde değerlendirilerek çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, atık döküm kumu önemli bir yapı malzemesi olan beton içerisinde değerlendirilmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu atıklar %5, %10 ve %20 oranlarında beton içerisinde değerlendirilerek çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Atık döküm kumu, agregaya, beton, SEM-EDS, FTIR, XRD.

The Effect of Using Waste Foundry Sand in Concrete on the Chemical and Mineralogical Structure and Mechanical Strength of Hardened Concrete

ABSTRACT

Depending on the development of industrial activities, the amount of industrial waste is increasing day by day. These wastes can create serious environmental problems. It is possible to recycle these wastes and use them in the production of different materials. In this way, a suitable environmental solution will be found for these wastes and the destruction of natural resources that occur in the production of other materials will be prevented. With this study, a new evaluation area for waste foundry sand, which is an important environmental problem, can be searched, 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 waste casting sand in concrete, which is an important building material. SEM-EDS, FTIR (Fourier Transform Infrared) spectrophotometer, Thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD) and compressive strength analyzes of the concrete were performed by replacing these wastes with the aggregate in the concrete at the rates of 5%, 10% and 20%. With these analyzes, chemical and

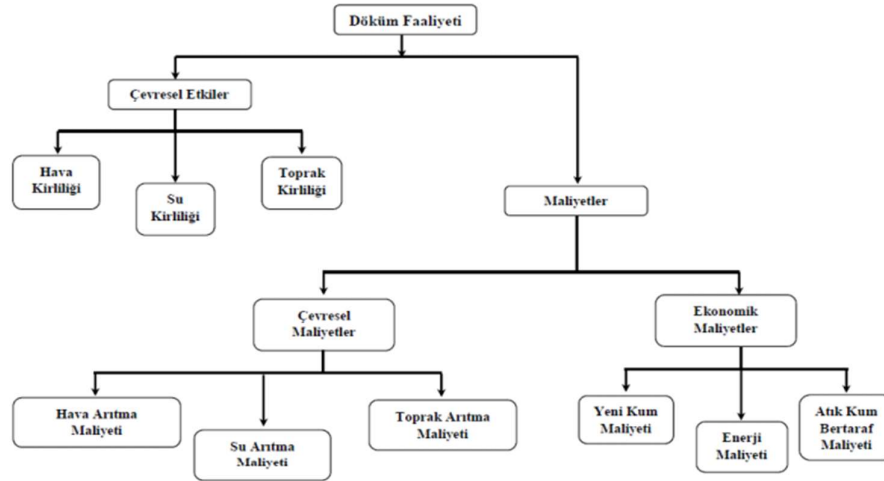
mineralogical changes occurring in the concrete due to the use of waste casting sand additive were determined and the relationship of these changes with the compressive strength was revealed. At the end of the study, according to the XRD analysis findings for the determination of the mineralogical structure of the waste foundry sand included that the hydration of the concrete positively affected and could be used as an additive in the concrete.

Keywords: Waste foundry sand, aggregate, concrete, SEM-EDS, FTIR,

I. GİRİŞ

Döküm sektörünün üretim hacmi tüm dünyada yıllar geçtikçe artmakta ve sektör gelişmeye ve büyümeye devam etmektedir. Döküm yapılırken genellikle kum kalıplar kullanılır. Genel olarak 1 ton döküm için 4–5 ton kum gereklidir [1]. Döküm kalıplarındaki kumun kullanılmasının sebeplerinden biri sıvı haldeki metalin döküldükten sonra katı forma gelene kadar ki sürede kalıp boşluğunu bozmamaktadır. 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 [2]. Döküm kumları boyut olarak genellikle 0.05-2 mm aralığında mineral yapıdaki tanelerdir. 1 ton döküm malzemesi üretiminde 0.6–0.8 ton arası atık oluşmaktadır. Bu miktarın ise 0.4–0.6 tonu atık döküm kumudur [3]. Türkiye’de 2018 yılında toplam 2.3 milyon ton döküm üretimi yapılmıştır. Bu üretimin kum kalıp tekniği ile üretim miktarı ele alınırsa geri kazanım yapılabilecek 800 bin ton atık döküm kumu ortaya çıktığı hesaplanmaktadır [2].

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’de verilmiştir [4].



Şekil 1. Atık döküm kumu çevresel etki ve maliyet analizi

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 [5]. ABD Karayolları İdaresi’nin “Döküm Kumunun İnşaat Mühendisliği Uygulamalarındaki Durumu” üzerine hazırladığı rapora göre atık döküm kumu yapısal dolgularda ve

bentlerde, yol tabanlarında, asfalt betonu yapımında, portland çimentosu üretiminde, tarım arazilerinin iyileştirilmesinde ve harç üretiminde gibi pek çok alanda değerlendirilebilir [6].

Beton endüstrisi her geçen gün büyümekte ve beton üretiminin de buna bağlı olarak çevresel etkileri artmaktadır. Bu etkilerden 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 salınımın çevre üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. CO₂ salınımının tahminen %7'sinin beton üretim sektörünün sebep olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte beton üretiminde, betonun önemli bir bileşeni olan yüksek miktarda beton agregası kullanılır. Agregalar doğadan elde edilirken doğal kaynakların tüketimi, kullanılan iş makinelerinin meydana getirdiği enerji tüketimi ve CO₂ salınımı gibi çevre için olumsuz etkileri vardır [7]. CO₂ salınımını azaltmak ve doğal kaynakların tahribatını engellemek için ise beton üretiminde CO₂ salınımı daha az olan özellikle mineral atık ürünler kullanılabilir. Bu atıklar içerisinde agrega yerine değerlendirilebilecek önemli maddelerden biri de döküm kumudur. Bu atığın kuvvetli inorganik ve mekanik yapıda olması beton içerisinde agrega olarak kullanımı açısından önemli bir avantajdır.

Literatür çalışmalarına bakıldığında atık döküm kumunun betonda kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Başar ve Aksoy, atık döküm kumu kullanarak üretilen betonların mikro-yapısal, mekanik, filtreleme, farklı pH koşullarında sızdırma özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar atık döküm kumunun yeterli özelliklere sahip olması ve ince agrega yerine %20'yi geçmemek şartıyla kullanılabilceği göstermektedir. Araştırmada atık döküm kumunun her dökümhanede farklı özelliklere sahip olabileceği bunun unutulmaması gerekliliğine değinilmiştir [3]. Torres ve arkadaşlarının ortaya koyduğu çalışmada, dökümhaneden çıkan döküm atıklarını ince ve iri agrega yerine kullanılarak beton üretmişlerdir. Karşılaştırma olarak standart beton numuneleri kullanmışlardır. İnce ve iri agregalar ağırlıkça %10, %20, %30 olmak üzere üç farklı oranda döküm atığı ile değiştirilmiştir. Deney sonuçları üç farklı oranda da ince agrega yerine, ince döküm atığı ve iri agregalar yerine ve kaba döküm atığı ile değiştirilmesinden etkilenmediğini göstermiştir. %20 oranında (%10 ince döküm atığı ve %10 kaba döküm atığı) kullanılarak üretilen betonda ise basınç dayanımı, bölme-çekme dayanımı, esneklik modülü azalmıştır. Sonuç olarak araştırma dökümhane atıklarının ince ve iri agregalar ile kısmen değişebilir olduğunu göstermiştir. Bu durum doğal kaynaklardan elde edilen doğal agregaların korunmasının yardımcı olabileceğini dökümhane atıklarının değerlendirilebilmesini göstermektedir [8]. Khatib ve arkadaşları betonda ince agrega yerine farklı oranlarda %0, %30, %60 ve %100 olmak üzere atık döküm kumu kullanmışlardır. Doğru atık döküm kumu oranı kullanılarak uygun basınç dayanımı elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Uygun karışım oranları ile atık döküm kumunun betonda kullanılabilceğine değinilmiştir [9]. Siddique ve arkadaşları kullanılmış döküm kumunun yeşil betonda doğal kum ile yer değiştirerek geri kazanımı sağlanarak çevresel ve ekonomik yararlarını araştırmışlardır. Doğal kum agregası yerine kullanılmış döküm kumu kullanılan yeşil betonun mukavemet özelliklerine çalışmada yer verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre doğal kum agregası ile yer değiştirilmiş kullanılmış döküm kumunun ağırlıkça %20 oranına kadar karşılaştırma betonuna göre mukavemet özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Kullanılmış döküm kumu geri dönüşümü ile yapılan betonda CO₂ emisyonunda ve bertaraf maliyetinde azalma olacağına değinilmiştir [10]. Parashar ve arkadaşları atık döküm kumunu ince agrega ile farklı oranlarda yer değiştirmişlerdir. Sonuçları ise ince agreganın atık döküm kumu ile değiştirilen betonun, dayanımında %10'a kadar düşüş olduğunu, beton akış hızında düşüş olduğu fakat kohezyonunda iyileşme gerçekleştirdiği sonucuna ulaşmışlardır [11]. Khatib ve arkadaşları, atık döküm kumu ihtiva eden betonun taze ve sertleşmiş formlarının özelliklerini araştırmışlardır. Betonun sertleşmiş özelliklerini belirlemek için 14, 28 ve 56. günlerinde ultrasonik darbe hızı, su emme, basınç mukavemeti, uzunluk değişimi testleri yapmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonuçlarında ise atık döküm kumunun miktarı arttıkça betonda istenilen işlenilebilirliğinin azaldığı, büzülmenin arttığı, basınç dayanımı ve ultrasonik darbe hızının düştüğü ancak %100 ince agrega ile değiştirilen atık kumunun bile yeterli mukavemeti gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [9]. Atık döküm kumunun değerlendirilmesi ve doğal nehir kumunun kullanımının azaltmasına çözüm bulmak adına yapılan bir çalışmada doğal nehir kumu ile farklı oranlarda atık döküm kumu yer değiştirmişlerdir. Deneysel çalışmaların sonucunda ağırlıkça %20 oranındaki atık döküm kumu ile üretilen betonun deneysel özellikleri diğer karışumlu betonlara göre daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada atık döküm kumunun betonda doğal nehir

kumu ile değiştirilebileceğinin bunun betonun özelliklerini etkilemeyeceğine değinilmiştir [12]. Aguayo ve arkadaşları, kullanılmış döküm kumu kullanılarak ultra yüksek dayanımlı betonun hidrasyonu ve alkali silika reaksiyonu hakkında deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Dökümhane kumu ve reaktif kumun birleşiminden, ağırlıkça %30 oranına kadar döküm kumu eklendiğinde alkali silika reaksiyonunda artış gözlemlenmiştir [13]. Gurumoorthy ve Arunachalam, demir ve demir dışı metal döküm sektöründeki kullanılan yüksek kaliteli silika kumunun kullanımından çıkan döküm kumunun betonda kullanılarak geri dönüşümü için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre; işlenmiş kullanılmış döküm kumunun oranları attıkça beton karışımlarındaki mekanik özelliklerinin arttığını gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu sonuçlarına göre ise C-S-H jel oluşumuna bakılarak mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Çalışmada asit eklenen döküm kumunun çevre kirliliğini azaltmaya ve doğal kaynaklarımızı korumaya yardımcı olarak iyi niteliklerde beton üretimini yapılabileceğine değinilmiştir [14].

Gönen ve arkadaşları, yapı malzemesi olarak üretilen betona eklenen klasik malzemelerin haricinde çeşitli atık malzemeleri eklenip eklenmeyeceğinin literatürde araştırılması ve uygun oranları ile ilgili bilgi vermeyi amaçlamışlardır. Bu atık malzemeler ise şunlardır; atık döküm kumu, plastikler, poliüretan köpük, araba lastiği, arıtma çamuru ve boya atıklarıdır. Araştırılıp incelenen malzemeler betondaki yer değiştirdiği malzemeden daha üstün veya aynı performansa sahip olduğunu görmüşlerdir. 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 sağlayabileceğini gözlemiştir [15].

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 kumunun taze ve sertleşmiş betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmış olup bu atık döküm kumu katkısının beton içerisinde meydana getirdiği kimyasal değişimlerle ilgili herhangi bir araştırma yapılmamıştır. Bu noktada betonun mekanik özelliklerini belli dozlarda geliştiren atık döküm kumunun bu geliştirmeyi nasıl gerçekleştirdiğinin açıklanması betonun mineralojik ve kimyasal yapısının da incelenmesi ile mümkün olacaktır. Buradan hareketle bu çalışma kapsamında atık döküm kumlarının beton içerisinde agrega yerine kullanılmasının sertleşmiş betonun kimyasal ve mineralojik yapısı üzerine ve buna bağlı olarak basınç dayanımını üzerine etkisi araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

A. ATIK DÖKÜM KUMU ELDESİ

Çalışmada kullanılan atık döküm kumu, Konya OSB bölgesinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilmiştir. Döküm prosesinde kullanılan ve atık durumunda olup tekrar prosese giremeyecek nitelikteki atık döküm kumları bu çalışmada kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Atık döküm kumu

B. BETON KARIŞIMININ HAZIRLANMASI

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 206 ve TS 131515'e uygun agrega, katkı olarak çalışma kapsamında ele alınan atık döküm kumu ve şebeke suyu kullanılmıştır. 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. Beton harçları C30 beton sınıfının gerektirdiği malzeme bileşimi esas alınarak hazırlanmıştır. Beton bileşimindeki ince agrega ağırlıkça %5, %10 ve %20 oranlarında atık döküm kumu ile yer değiştirilmiştir. Bu yer değiştirme oranlarına esas çalışmaya başlamadan önce çeşitli oranlarda ön denemeler yapılarak karar verilmiştir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı katkısız şahit numune hazırlanmıştır. Beton karışımları düşey eksenli cebri karıştırıcı betoniyer içerisinde karıştırılmıştır. Betoniyerde hazırlanan beton karışımları 10x10x10 cm'lik küp şeklindeki kalıplara yerleştirilmiştir. Her bir deney için üç adet 7 günlük ve üç adet 28 günlük numune hazırlanmıştır.

Bütün beton karışımlarında çimento miktarı 380 kg/m^3 olmak üzere sabit tutulmuştur. Kullanılan su ve agrega miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan agrega, çimento ve su miktarları

Numune Kodu	Numune adı ve açıklaması	Agrega			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	220	380
ADK5	%5 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	901	185	538	220	380
ADK10	%10 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	853	185	538	220	380
ADK20	%20 Atık döküm kumu içeren beton numunesi	758	185	538	220	380

Numune kalıplarına dökülen taze beton 1 gün kalıpta bekletilerek sertleşmesi sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün boyunca su içerisinde $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'lik standart kür ortamında muhafaza edilmiştir.

C. ATIK DÖKÜM KUMU VE SERTLEŞMİŞ BETON KARAKTERİZASYONU

Çalışmada atık döküm kumu ve bu atıklar kullanılarak üretilen sertleşmiş betonların yüzey morfolojisi ve elementel bileşimin tespiti için yüksek çözünürlükteki görüntüsü taramalı elektron mikroskobu tekniği (SEM-EDS) kullanılmıştır. Görüntüleme 28 gün kür işlemine tabi tutulan beton numuneleri üzerinde yapılmıştır. Görüntüleme yapılmadan önce elektronların yansımaları için numuneler altın kaplama ile kaplanıp Zeiss marka EVO-LS10 taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilerek görüntülenmiştir.

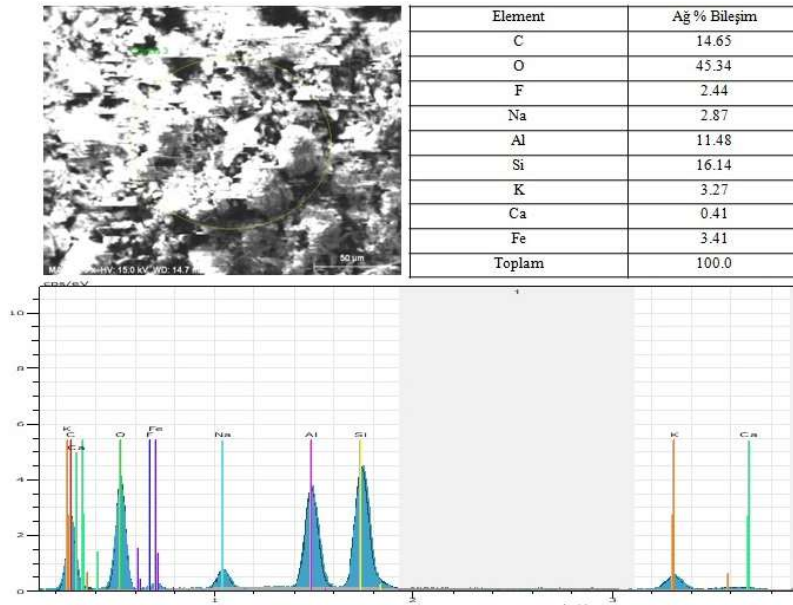
Çalışmada atık döküm kumu ve 28 gün kürlenmiş sertleşmiş betonların sahip olduğu fonksiyonel bileşikler belirlemek için FTIR analizi gerçekleştirilmiş olup, Thermo Scientific Nicolet iS5 FTIR Spektrometresi cihazı kullanılmıştır. Ayrıca atık döküm kumu ve sertleşmiş betonların mineralojik bileşimlerini tespit etmeye dayalı olarak kalitatif özelliklerini belirlemek için Bruker marka D8 ADVANCE model X-ışını difraktometrisi cihazı ile XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerinin basınç dayanımı testinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu deney için 200 ton kapasiteye sahip tek eksenli basınç presisi kullanılmıştır

III. BULGULAR

A. ATIK DÖKÜM KUMU KARAKTERİZASYONU BULGULARI

Şekil 3'te atık döküm kumunun 500 kat büyütmedeki görüntüsü ve EDS analizi sonuçları verilmiştir. Döküm kumu ağırlıkça yüksek oranda SiO₂ içermekte olup, oksijen ve alüminyum pikleri de tespit edilmiştir. Bu 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.

Kayaçların parçalanmaları ile oluşan kum tanelerinin bileşiminde yaygın olarak kuvars, feldispat, amfibol, biyotit gibi silikatlı mineraller (SiO₂, Al₂O₃, (K, Na)₀₋₁ (Ca, Na, Fe, Mg)₂ (Mg, Fe, Al)₅ (Al, Si)₈ O₂₂ (OH)₂) ile kalsit, dolomit (CaCO₃-CaMg(CO₃)₂) gibi karbonatça zengin mineraller bulunur. Dolayısı ile yapılan SEM-EDS sonuçlarında bu minerallere ait elementel bileşiminin bulunması beklenen bir durumdur.



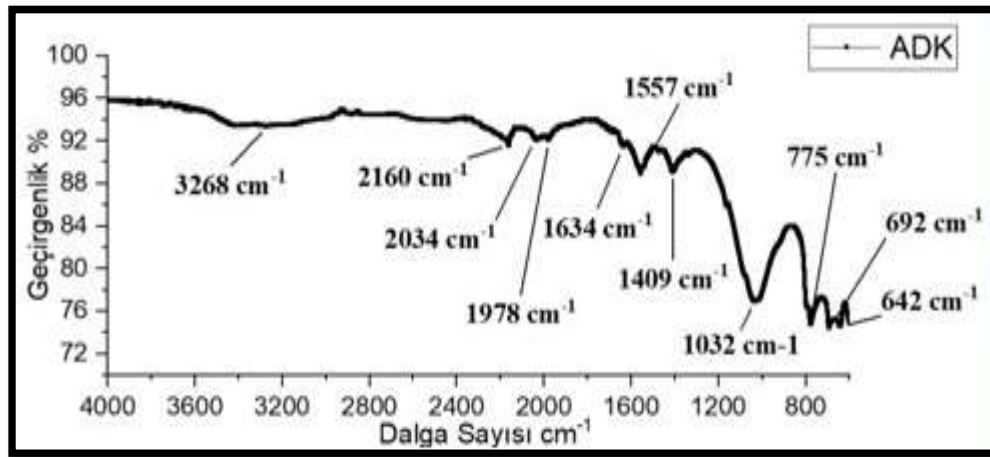
Şekil 3. Atık döküm kumunun 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Tablo 2. Atık döküm kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametre	Değeri
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

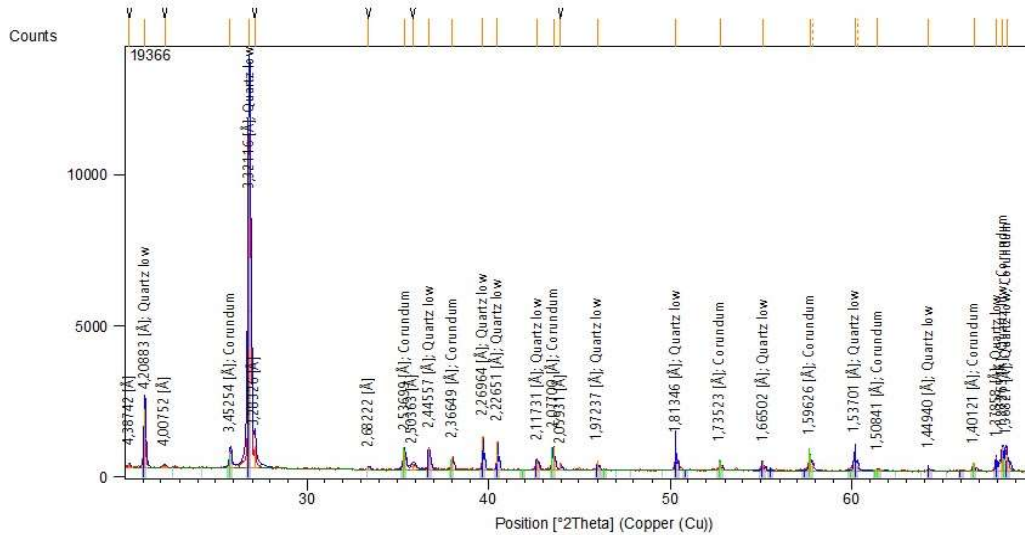
Atık döküm kumunun yapısında ağırlıkça en yüksek oranlara sahip elementler silisyum ve alüminyumlu oksijen bileşikleridir. Bunlara ilaveten kalsiyum, demir, potasyum, sodyum, magnezyumlu oksijen bileşikleri ve kükürt bileşikleri bulunmaktadır. Bunun yanı sıra proses kaynaklı olarak döküm kumu bünyesinde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

Atık döküm kumu sahip olduğu fonksiyonel bileşimi tespit etmek için elde edilen FTIR spektrumları Şekil 4'te verilmiştir. 3282 cm^{-1} 'de ADK malzemesinde şiddetli gerilme gösteren O-H piki tespit edilmiştir. Aynı zamanda 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} şiddetli gerilme gösteren S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2034 cm^{-1} , 2030 cm^{-1} ve 2029 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmekte olup atık malzemelerin yapısındaki silisyum bileşimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1634 cm^{-1} ve 1557 cm^{-1} 'de zayıf eğilme gösteren C-H pikleri, 1409 cm^{-1} ve 1394 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri, 1300-700 cm^{-1} aralığında C-H-S pikleri tespit edilmiştir. 671 cm^{-1} , 692 cm^{-1} ve 694 cm^{-1} 'de AlO bağları tespit edilmiştir [16].



Şekil 4. Atık döküm kumu FTIR Spektrumu

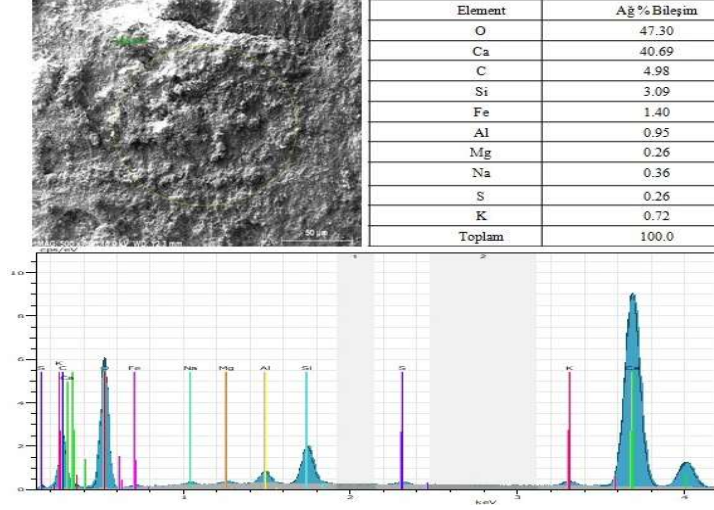
Atık döküm kumunun mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Kimyasal bileşimden kaynaklanan kuvars (SiO_2) bileşiği ve korund (Al_2O_3) bileşiği baskın olarak gözlenmiştir.



Şekil 5. Atık döküm kumunun XRD sonuçları

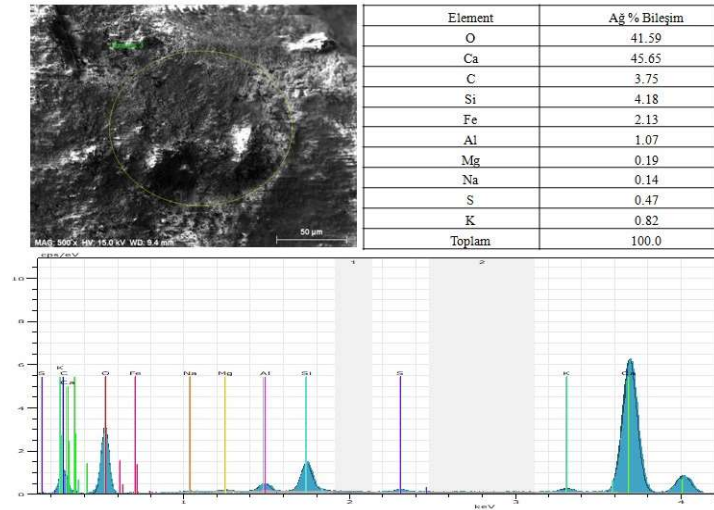
B. SERTLEŞMİŞ BETONUN KİMYASAL VE MİNERALOJİK YAPISI İLE İLGİLİ BULGULAR

Şekil 6'da 28 gün küre tabi tutulmuş şahit numuneye (katkısız) 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.



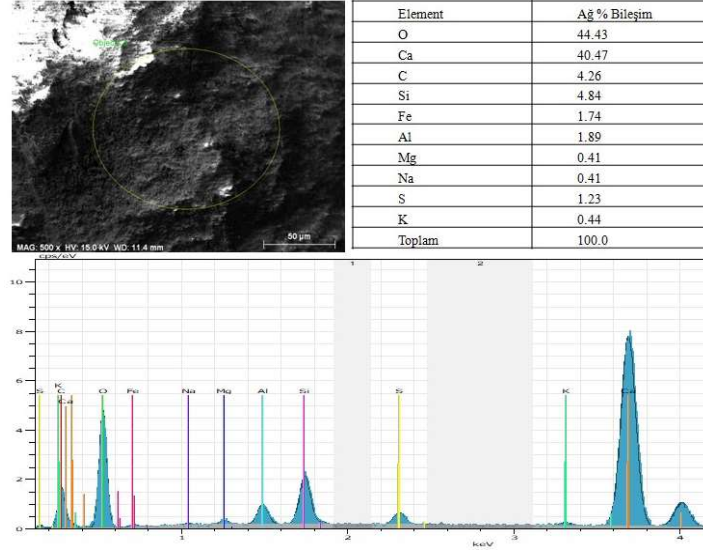
Şekil 6. Şahit beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 7'de ise %5 oranında atık döküm kumu içeren (ADK5) numunesine ait EDS analizi sonuçları verilmiştir. Katkısız şahit numunesi ile aynı elementlerin pikleri tespit edilmiştir. Silisyum elementinin miktarında şahit numunesine kıyasla bir artış tespit edilmiştir bunun sebebi ise açıklanan atık döküm kumunun yüksek oranda silisyumlu bileşikleri içermesidir. Bunun yanında atık döküm kumu katkısının kullanılması ile birlikte, katkısız şahit betona göre Ca, Fe, Al ve K gibi elementlerin de beton içerisindeki miktarı artarak betonun mineralojik bileşimi desteklenmiştir.

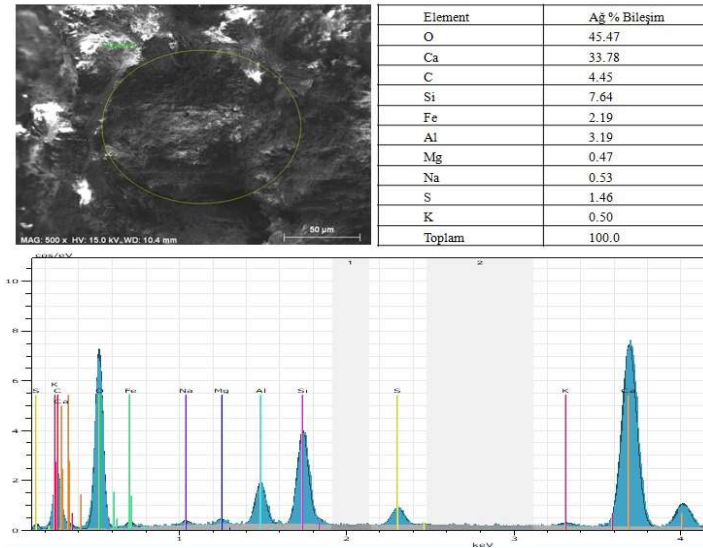


Şekil 7. ADK5 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

%10 ve %20 oranında atık döküm kumu içeren (ADK10) beton numunesine ait EDS analizi bulgularına göre, atık döküm kumu miktarı arttıkça betonun yapısındaki Al, Fe, Mg, Na ve S gibi elementel bileşimlerin de arttığı gözlemlenmiştir. Atık döküm kumları kullanıldıktan sonra yüksek ısı işleme bağlı olarak içeriğinde kükürlü yanma ürünleri ihtiva eder [1,2]. S miktarının artışı betondaki atık döküm kumunda bulunan bu yanma ürünlerine yani safsızlıkların artışına bağlamak mümkündür. Atık döküm kumunun %10 ve %20 oranlarında betonda agrega yerine kullanılmasıyla silisyum elementinin miktarında şahit ve ADK5 numunesine kıyasla artış tespit edilmiştir, bunun sebebi ise hem atık döküm kumunun kimyasal yapısındaki SiO₂ oranının fazlalığı hem de beton numunesindeki ağırlıkça atık döküm kumu oranının yani atık döküm kumun içerisindeki kuvars mineralinin fazlalığıdır (Şekil 8-Şekil 9).



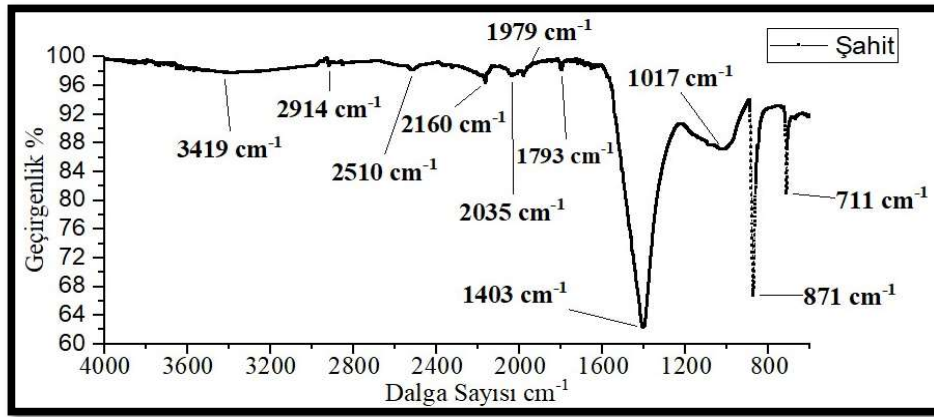
Şekil 8. ADK10 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi



Şekil 9. ADK20 beton numunesinin x500 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi

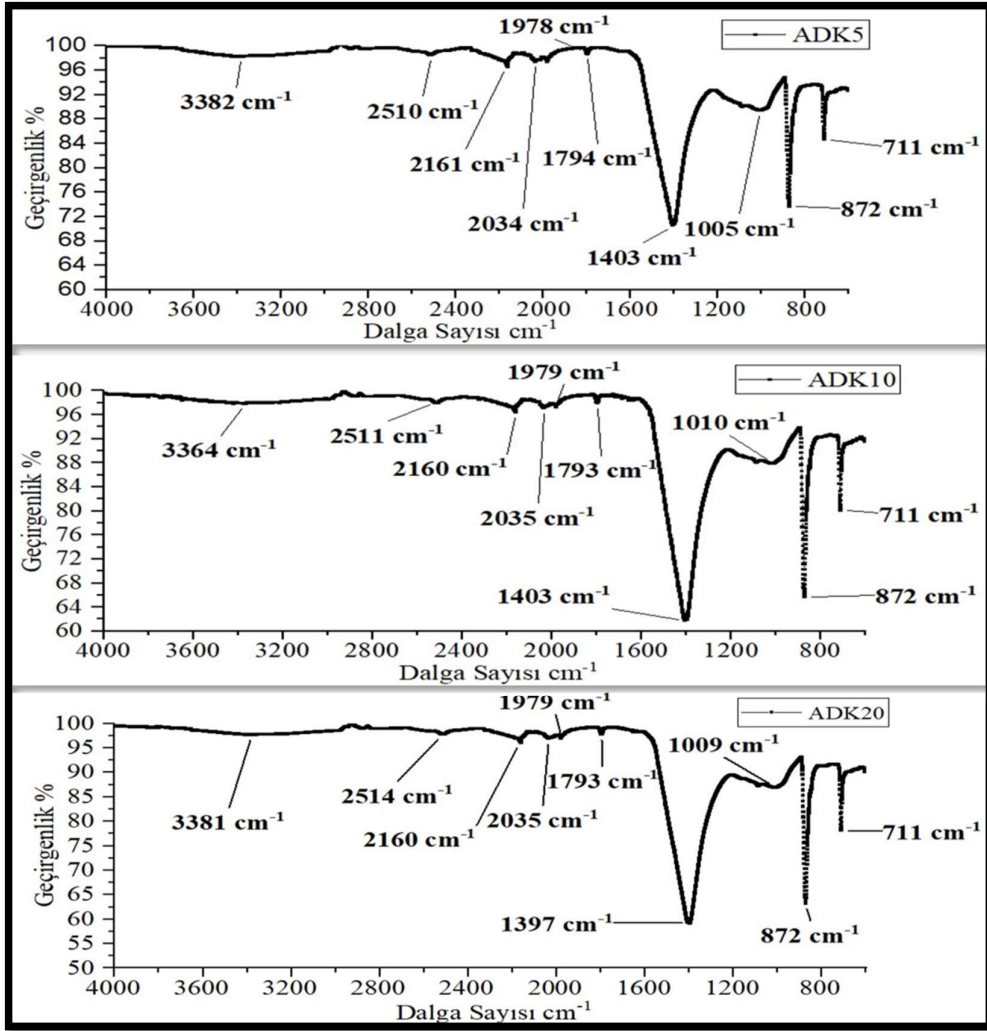
Şahit beton numunesinin sahip olduğu fonksiyonel bileşimi tespit etmek için elde edilen FTIR spektrumu Şekil 10'da verilmiştir. Şahit beton karışımında 3550-3200 cm⁻¹ aralığında şiddetli gerilme

gösteren O-H pikleri tespit edilmiştir. Bu durum ortamda su moleküllerinin olduğunun bir göstergesidir. 2510 cm^{-1} zayıf gerilme gösteren C-O piki tespit edilmiştir. 3000-2840 aralığında orta gerilme gösteren çimento reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti temsil eden C-H piki tespit edilmiştir. 2000-1650 cm^{-1} aralığında zayıf eğilme gösteren C-H pikleri, 1815-1785 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren C=O pikleri tespit edilmiştir. 1410-1380 cm^{-1} aralığında şiddetli gerilme gösteren S=O gerilme sülfonik klorür pikleri tespit edilmiştir. 1300-700 cm^{-1} aralığında kalsiyum silika hidrat içeren minerallerin yani hem agrega yapısındaki kalsit, kuvars ve amfibol ve biyotit gibi sulu minerallerin varlığını gösteren pikler hem de 1403 cm^{-1} de net olarak gözlenen ve çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran kalsiyum silika hidrat oluşumunu destekleyen C-S-H pikleri tespit edilmiştir. 1017 cm^{-1} , 871 cm^{-1} ve 711 cm^{-1} pikleri Ca(OH)_2 varlığına atfedilmiştir [17]. Ca(OH)_2 yani CH dayanıma etkisi olmayan, beton içindeki bazik yapıyı sağlayan bir hidratasyon ürünü olup, hidrate olan ürünlerin %20' sini oluşturur. Buradan betonun sertleşme sürecinin de verimli bir gerçekleştiği söylenebilir. Mineral katkılarda bulunan silikatlar çimento reaksiyonu sonucu oluşan CH ile reaksiyona girip C-S-H meydana getirirler [18]. CH varlığını gösteren 1017 cm^{-1} , 871 cm^{-1} ve 711 cm^{-1} piklerin, C-S-H varlığını gösteren 1403 cm^{-1} dalga sayısına sahip piklere göre daha sığ olması da C-S-H miktarının C-H miktarına göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır ki bu durum da betonun sertleşmesinin olumlu yönde ilerlediğini göstermektedir.



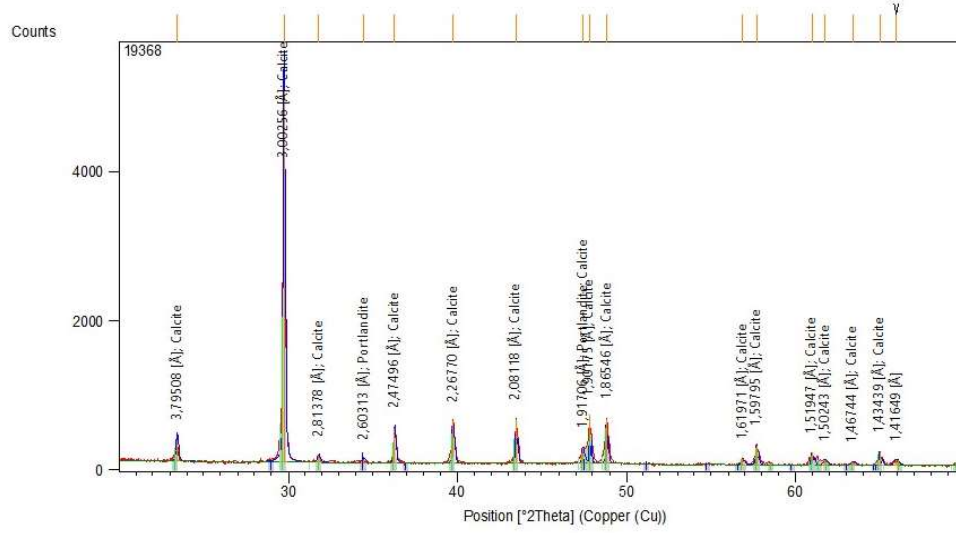
Şekil 10. Şahit beton numunesinin FTIR spektrumları

Atık döküm kumu içeren beton karışımlarının FTIR spektrumları Şekil 11'de verilmiştir. 3382 cm^{-1} , 3364 cm^{-1} ve 3381 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren O-H pikleri, 2160 cm^{-1} ve 2161 cm^{-1} şiddetli gerilme gösteren ve döküm kumu yapısını temsil eden S-C=N pikleri tespit edilmiştir. 2510 cm^{-1} , 2511 cm^{-1} , 2514 cm^{-1} 'de zayıf gerilme gösteren C-O; $[\text{CO}_3]^{2-}$ pikleri tespit edilmiştir bu pikler CaCO_3 varlığına atfedilmiştir [17]. 2035 cm^{-1} ve 2034 cm^{-1} şiddetli gerilme gösteren N=C=S pikleri tespit edilmiştir. 1979 cm^{-1} , 1978 cm^{-1} , 1794 cm^{-1} ve 1793 cm^{-1} 'de zayıf eğilme gösteren C-H pikleri tespit edilmiştir. 1403 cm^{-1} ve 1397 cm^{-1} 'de şiddetli gerilme gösteren C-S-H gerilme pikleri tespit edilmiştir. Şahit numuneye göre (Şekil 10) bu piklerin daha derin olması kalsiyum silika hidrat miktarının da atık döküm kumu içeren betonlarda daha fazla olduğunu göstermektedir. 1005 cm^{-1} , 872 cm^{-1} , 711 cm^{-1} , 1009 cm^{-1} ve 1010 cm^{-1} pikleri Ca(OH)_2 atfedilmiştir [17]. Betondaki atık döküm kumu miktarı arttıkça dayanımda çok da rolü olmayan bu Ca(OH)_2 yani CH' ı temsil eden bu piklerin derinliğinin dolayısıyla betondaki miktarının arttığı gözlenmektedir. Aynı şekilde atık döküm kumu oranı arttıkça C-S-H varlığını temsil eden piklerin (1403 cm^{-1} ve 1397 cm^{-1}) derinliğinin yani C-S-H miktarının arttığı tespit edilmiştir.



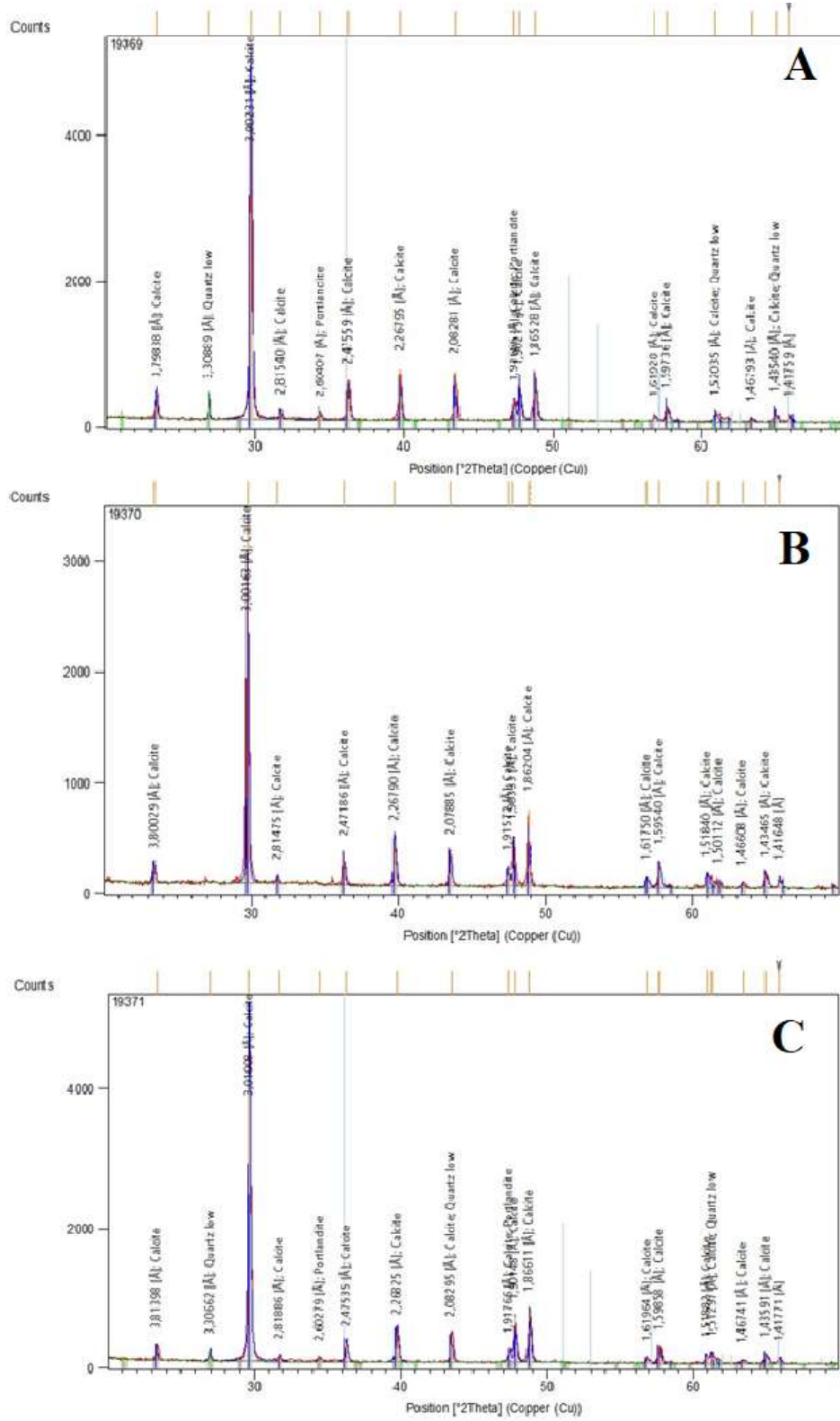
Şekil 11. ADK5, ADK10, ADK20 beton numunelerinin FTIR spektrumları

Şahit beton numunesinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 12’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 [11].



Şekil 12. Şahit beton numunesinin XRD grafiği

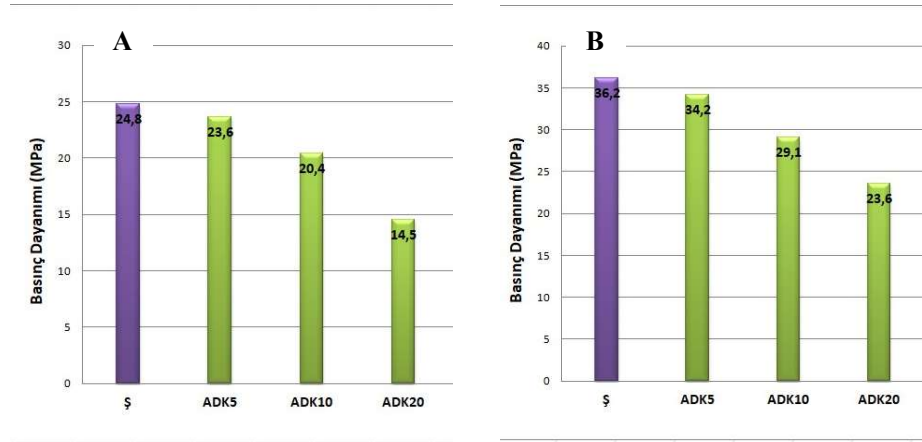
ADK5, ADK10 ve ADK20 numunesinin mineralojik bileşimlerini tespit etmek için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 13'te verilmiştir. Atık döküm kumu katkılı betonlarda her üç doz için de betonun sertleşmesine bağlı olarak oluşan kalsit ve portlandit bileşikleri gözlenmiştir. ADK dozu arttıkça hidrasyon ürünleri olan kalsit ve portlandit miktarlarının arttığı pik şiddetlerinin artışından belli olmaktadır. Aynı zamanda döküm kumunun yapısından kaynaklanan kuvars miktarı da %20 ADK içerikli betonlarda %5 ADK içerikli betonlara göre daha düşüktür. Buradan kuvars bileşiğinin reaksiyona girerek hidrasyon hızını arttırdığı ve buna bağlı olarak beton yapısındaki kalsit ve portlandit miktarını arttırdığı söylenebilir. Bu bileşik beton harcının karıştırma sürecinde alçı ile çok hızlı çözülmüş ve tepkimeye girerek reaksiyonu hızlandırmış ve CaCO_3 ve CaOH oluşumunu desteklemiştir [10]. FTIR analizi sonuçlarına bakıldığında döküm kumu oranı arttıkça C-H piklerinin derinliğinin yani CaOH miktarının artması da bu durumu desteklemektedir.



Şekil 13. A) ADK5, B) ADK10 ve C) ADK20 beton numunelerinin XRD grafiği

B. SERTLEŞMİŞ BETONUN BASINÇ DAYANIMI BULGULARI

Katkısız şahit, atık döküm kumu içeren beton karışımlarının 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları Şekil 14'te verilmiştir. Atık döküm kumu katkılı beton numunelerde katkısız şahit numuneye kıyasla atık döküm kumu dozu arttıkça hem 7 günlük hem de 28 günlük ortalama basınç dayanımlarında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. XRD bulgularındaki %20 ADK katkılı betonlardaki %5 ADK katkılı betonlara göre kuvars miktarındaki azalma (Şekil 13), FTIR spektrumlarında tespit edilen ve atık döküm kumu arttıkça C-S-H miktarının artması (Şekil 11) ve bu piklerin şahit numuneye kıyasla daha derin olmasından basınç dayanımının artması beklenmektedir. Ancak basınç dayanımı bulgularına bakıldığında tersi bir durum söz konusudur. Bunun nedenlerinden biri ADK miktarı arttıkça artan ince partikül yüzey alanı, su-çimento jel oluşumunu azaltarak agrega ve çimento hamuru arasında uygun bağlanmayı sağlamadığı ve basınç dayanımını azalttığı yönünde olabilir [19,20,21]. Bir diğer nedeni olarak da betonda istenmeyen bir durum olan ve fazla miktarda reaktif mineral bulunan ortamlarda gelişen alkali silika reaksiyonundan söz edilebilir. Atık döküm kumunun bünyesindeki oldukça reaktif silika yapıdaki minerallerle oluşan bu reaksiyon, suyu absorbe edebilen jel oluşumuna yol açmış ve genleşme sonucunda jel, betona içsel bir kuvvet uygulamıştır. Beton bünyesinde oluşan bu reaksiyonlar, betonda hasar oluşturan genleşmelere ve çatlamlara yol açabilir [22]. Bu durum da betonun basınç dayanımının düşmesine neden olabilir. Ancak basınç dayanımı bulgularına bakıldığında şahite göre 28 günlük basınç dayanımlarının ADK5 ve ADK 10 numuneleri için sırasıyla %2 ve %19 oranında azaldığı bu durum da elde edilen bu betonların bu basınç dayanımlarına uygun yapısal alanlarda kullanılabileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 14. Beton karışımlarının 7 (A) ve 28 (B) günlük ortalama basınç dayanımları

IV. SONUÇ

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

- XRD analizi bulgularına göre, atık döküm kumu katkısının betonun hidrasyonu üzerinde olumlu rol oynayarak betonun sertleşmesini hızlandırdığı tespit edilmiştir.
- Atık 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.
- Bu betonlarda atık döküm kumu katkılarının agrega ile %5-20 arasında yer değiştirilerek kullanılması, bu çalışmada elde edilen basınç dayanımlarının yeterli olabileceği yapılar için uygun olabileceği söylenebilir.

- Beton içerisinde atık döküm kumu 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 agreganın miktarı da bu katkıların kullanımı ile azaltılmış olacak ve agreganın üretimi sırasında meydana gelen doğal kaynakların tüketimi ve tahribatı da engellenmiş olacaktır.
- Ayrıca gerçekleştirilen bu çalışmadan yola çıkarak farklı ADK dozları denenerek, betonun bu çalışmada belirtilen özelliklerinin yanısıra diğer özellikleri araştırılabilir, bu katkıların ile farklı yapısal sistemler tasarlanarak bu sistemlerin mekanik özellikleri araştırılabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, “Türkiye’de sanayiden kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetiminin iyileştirilmesi raporu”, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye, 2012.
- [2] TUDOKSAD “ Kullanılmış döküm kumunun değerlendirilmesi ve geri kazanımı raporu”, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, Türkiye, ss. 1-17, 2019.
- [3] H. M. Başar ve N. Deveci Aksoy, “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*, vol. 35, pp. 508-515, 2012.
- [4] M. Y. Kılıç ve M. Tüylü, “Bursa’daki atık döküm kumlarının endüstriyel simbiyoz ile hazır beton üretiminde hammadde olarak kullanımı”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 24, s. 1, ss. 99-110, 2019.
- [5] R. Siddique, G. Kaur ve G. Rajor, “Waste foundry sand and its leachate characteristics”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp. 1027- 1036, 2010.
- [6] American Foundrymen's Society (AFS), “Foundry sand facts for civil engineers”, American Foundrymen's Society Inc. for Federal Highway Administration Environmental Protection Agency, , *Washington DC*, US, 2004.
- [7] P. K. Mehta, “Reducing the enviromental impact of concrete”, *Concrete International*, pp. 61-66, 2001.
- [8] A. Torres, L. Bartlett ve C. Pilgrim, “Effect of foundry waste on the mechanical properties of portland cement concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 674-681, 2017.
- [9] J. M. Khatib, S. Baig, A. Bougara ve C. Booth, “Foundry sand utilisation in concrete production”, *In Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Anoca, Italy, 2010.
- [10] R. Siddique, G. Singh, ve M. Singh, “Recycle option for metallurgical by-product (spent foundry sand) in green concrete for sustainable construction”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1111-1120, 2018.
- [11] A. Parashar, P. Aggarwal, B. Saini, Y. Aggarwal ve S. Bishnoi, “Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand”, *Construction and Building Materials*, vol. 251, pp.118875, 2020.

- [12] T. Manoharan, D. Laksmanan, K. Mylsamy, P. Sivakumar ve A. Sircar, “Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand”, *Waste Management*, vol. 71, pp. 454-460, 2018.
- [13] F. Aguayo, A. Torres, T. Talamini ve K. Whaley, “Investigation into the heat of hydration and alkali silica reactivity of sustainable ultrahigh strength concrete with foundry sand”, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp. 1-11, 2017.
- [14] N. Gurumoorthy ve K. Arunachalam, “Micro and mechanical behaviour of treated used foundry sand concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 184-190, 2016.
- [15] T. Gönen, O. Onat, S. Cemalgi, B. Yilmazer ve Y.T. Altuncu, “Beton teknolojisi için yeni atık malzemeler üzerine bir inceleme”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, s. 8 (1), ss.36-43, 2012.
- [16] F. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso ve T. Vazquez, “Alkali-activated fly ash/slag cement strength behaviour and hydration products”, *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 1625-1632, 2002.
- [17] M. Horgnies, J. J. Chen ve C. Bouillon, “Overview about the use of Fourier Transform Infrared spectroscopy to study cementitious materials”, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 77, pp. 251-260, 2013.
- [18] AKÇANSA. (2022, 15 Nisan). “Çimentonun hidratasyonu” [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.akcansa.com.tr/docs/20120216160047_teknik-notlar-3.pdf.
- [19] R. Siddique, G. Schutter ve A. Noumowe, “Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 976-980, 2009.
- [20] U. Mroueh, M. Wahlstrom, “By-products and recycled materials in earth construction in Finland: an assessment of applicability”, *Res. Conser. and Recycling*, vol. 35, pp. 117-129, 2002.
- [21] T.R. Naik, R.N. Kraus, Y.M. Chun, W.B. Ramme, S.S. Singh, “Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15(4), pp. 400-407, 2003.
- [22] Y. Engin. (2022, 15 Nisan). “Betonda alkali silika reaksiyonu” [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.betonvecimento.com/beton-2/alkali-silika-reaksiyonu>.