



**INVESTIGATION OF USABILITY OF WASTE FOUNDRY SAND IN READY-MIXED CONCRETE**

**Hatice Merve BAŞAR<sup>\*1</sup>, Nuran DEVECİ AKSOY<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, Gebze-KOCAELİ

<sup>2</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ayazağa-İSTANBUL

Received/Geliş: 22.05.2013 Accepted/Kabul: 13.08.2013

**ABSTRACT**

Concrete is the most widely used man-made material in the world. Aggregate owing to 75% proportion in the ready-mixed concrete (RMC) is an important component; but its natural resources are in the limit of extinction. Thus, the usage of industrial wastes together with aggregates in RMC production will be helpful in overcoming problems related to possible aggregate demand in the upcoming years. In this study, the usability of waste foundry sand (WFS) in the production of RMC was carried out. Concrete specimens were prepared using 0% (control), 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% and 100% WFS by weight as replacement of silica sand and the mechanical, leaching and micro-structural properties of WFS-based RMC products. In order to determine the performance of fresh and hardened concrete specimens prepared by solidification/stabilization (S/S) process as two control and seven concrete specimens and performed at four different curing periods; physical and mechanical properties such as slump, unit weight, temperature, setting time, compressive and tensile splitting strength, modulus of elasticity, water absorption ratio and density were examined and the most suitable replacement ratio was determined as 20%. Leachability characteristics of the solidified concrete specimens at three different pH conditions were also observed. Furthermore, micro-structural properties of both control concrete and concrete having 20% WFS were investigated by using XRD, XRF, SEM and EDS techniques. As a result, it's suggested that WFS can be effectively utilized in the production of RMC by a maximum of 20% replacement instead of fine aggregates with no adverse physical, mechanical, environmental and micro-structural impacts.

**Keywords:** Waste foundry sand, ready-mixed concrete, recovery, solidification/stabilization.

**ATIK DÖKÜM KUMUNUN HAZIR BETONDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**ÖZET**

Beton, dünyada yaygın olarak kullanılan sentetik bir üründür. Hazır beton içerisinde %75 oranında bulunan agrega önemli bir bileşendir; ancak, doğal kaynakları giderek tükenmektedir. Bu nedenle, endüstriyel atıkların hazır beton imalatında agregalarla birlikte kullanımının, ileride yaşanması olası agrega ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada atık döküm kumunun (ADK) hazır beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Silika kumu ağırlıkça %0 (şahit), %10, %20, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranlarındaki ADK'yla ikame edilerek beton karışımlar hazırlanmış ve ADK-esaslı hazır beton ürünlerinin mekanik, sızma ve mikro-yapısal özellikleri incelenmiştir. Solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) prosesi ile iki şahit ve yedi farklı ikame oranında hazırlanan ve dört farklı kür süresi uygulanan taze ve sertleşmiş betonların performanslarını belirlemek üzere; çökme, birim ağırlık, sıcaklık, priz süresi, basınç ve yarmada çekme dayanımı, elastisite, su emme oranı ve yoğunluk gibi fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve en uygun ikame oranı %20 olarak belirlenmiştir. Katılaşmış beton ürünlerinin üç farklı pH'taki sızma davranışları da incelenmiştir. Ayrıca, şahit ve %20 ADK içeren beton örneklerinin mikro-yapısal özellikleri XRD, XRF, SEM ve EDS teknikleri ile araştırılmıştır. Sonuç olarak, ADK'nın fiziksel, mekanik, çevresel ve mikro-yapısal açıdan olumsuz bir etkiye sebep olmaksızın hazır beton üretiminde ince agrega yerine maksimum %20 ikame oranında etkin bir şekilde kullanılabileceği önerilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Atık döküm kumu, hazır beton, geri kazanım, solidifikasyon/stabilizasyon.

\*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: merve.basar@tubitak.gov.tr, tel: (262) 677 29 74

## 1. GİRİŞ

Modern yaşam, sağlıklı kentleşme ve sağlam yapılaşmanın gereklerinden biri de modern inşaat teknolojileriyle birlikte "hazır beton" kullanımudur. Hazır beton sektörü, ülkemizde lokomotif konumunda yer alan inşaat endüstrisinin alt kolu ve temel taşlarından biri olmakla birlikte diğer ülkelerle karşılaştırıldığında oldukça yenidir. Ülkemizde ilk hazır beton üretimi 1976'da Ankara'da başlamıştır [1]. *Hazır beton*; kullanıcı olmayan şahıs veya kuruluş tarafından hazırlanarak taze halde teslim edilen plastik ve sertleşmemiş betondur [2]. Hazır beton hacimce %75 agrega, %10 çimento ve %15 sudan oluşmakta olup yüksek miktarda agrega (kum, çakıl, kırma taş vb.) tüketilmektedir. Ülkemizde sadece hazır beton için agrega ihtiyacının 140 milyon ton/yıl olduğu ve bunun gelecekte daha da artacağı düşünüldüğünde, endüstriyel atıkların (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, döküm kumu vb.) hazır betonda agregayla birlikte kullanılabilirliğinin ortaya konulmasının, hazır beton sektöründe ileride yaşanması olası agrega ihtiyacının aşılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Döküm kumu, kararlı fiziksel özelliklere sahip yüksek kaliteli silika kumudur. Demir ve demir dışı döküm endüstrisinin yan ürünüdür ve termal iletkenliği, ergimiş metalin ısı ve basıncına karşı direnç göstermesi ve ekonomik oluşundan ötürü dökümhanelerde kum kalıplarda kullanılmaktadır [3, 4, 5]. Kalıplar her dökümden sonra açılarak döküm kumundaki büyük parçalar elenip uzaklaştırılmakta ve azalan kum kadar sisteme yeni kum eklenmektedir [3, 6]. Döküm kumu belli bir çevrimden sonra kalıplarda kullanılamaz hale gelir ve "atık döküm kumu (ADK)" olarak dökümhaneden uzaklaştırılır [7, 8, 9]. Bunun sebepleri; kumun fiziksel ve kimyasal bozulması, döküm sırasında 1500°C'lik ergimiş metale maruz kalması [10], kumdaki bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesi ve mekanik aşınmadan dolayı kum tanelerinin direncinin kırılmasıdır [11]. ADK temelde ince agregadır, bu nedenle doğal kum yerine pekçok uygulamada kullanılarak doğal kaynak korunumunu sağlayacaktır [12]. Çeşitli araştırmacılar, ADK'nın geoteknik (bent, yapısız-akışkan dolgu, düzenli depo örtüsü, geçirimsiz perde), imalat ürünü (Portland çimentosu, harç, asfalt betonu, tuğla-briket, parke taşı), karayolu inşaatı (yol alt-üst temel malzemesi, bitümlü asfalt) ve tarımsal uygulamalarda (kompost, yüzey örtüsü) kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır [3, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28]. Buna karşın, ülkemizde ADK geri kazanım uygulamaları oldukça yetersizdir, ADK genellikle düzenli depolamayla bertaraf edilmektedir [29]. Ülkemizdeki sınırlı gerikazanım uygulamalarında ise ADK'nın çoğunlukla depo saha örtüsü olarak kullanıldığı, az bir miktarının ise mühendislik alanlarında (Portland çimentosu, parke taşı, bordür ve beton park-bahçe mobilyalar) değerlendirildiği belirtilmektedir [30]. Bu durum, ADK'nın olası kullanım alanlarındaki bilgi ve araştırma eksikliğinden ileri gelmektedir. Ayrıca, endüstriyel atıkların farklı mühendisliklerde tekrar kullanımıyla ilgili yasal ve bürokratik düzenlemeler ile teşvik mekanizmasındaki yetersizlikler de ADK geri kazanım potansiyelini yavaşlatmaktadır [9]. İnce agrega yerine belli ikame oranlarında ADK kullanılarak beton vb. ürün eldesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, genellikle bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanıldığı ve ürünlerin sadece fiziksel ve mekanik özellikler (kalite, performans) açısından incelendiği, buna karşılık çevresel etkiler açısından çok fazla irdelenmediği görülmüştür [3, 9, 12, 19, 25, 31, 32, 33]. Halbuki endüstriyel atık olan ADK'nın farklı mühendislik uygulamalarında çevresel etkiler açısından da değerlendirilmesi, AB'ye üyelik müzakerelerinde çevrenin en zorlu alanlardan olduğu ve çevre korunmasının AB'nin temel önceliklerinden olduğu düşünüldüğünde, ayrı bir önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, ülkemizde sınırlı sayıda yeniden kullanım uygulamalarına ışık tutacak şekilde, geri kazanım yöntemi olan solidifikasyon/stabilizasyon (S/S) teknolojisi ile yapı endüstrisine yönelik hazır beton eldesinin ve bu ürünün betonarme yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılması, bu kapsamda elde edilen katılaştırılmış ürünlerin hem ürün kalitesi (fiziksel ve mekanik özellikler), hem çevresel etkiler, hem de mikro-yapısal özellikler açısından değerlendirilmesi ve nihai ürünlerin ilgili Çevre Mevzuatı Yönetmelikleri ve Türk Standartlarındaki kriterlerle karşılaştırılmasıdır. Bu sayede, dökümhanelerde yüksek miktarda

çıkan ve mevcut durumda düzenli depolanarak bertaraf edilen ADK'nın üniversite-sanayi işbirliğiyle, hazır beton sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması planlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Kullanılan Materyaller

Çalışmada kullanılan ADK, Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir dökümhane tesisinden temin edilmiş olup silika kumu (ince agrega) yerine kullanılmıştır. TS 706 EN 12620+A1:2009-Beton agregaları standardına göre silika kumu ve ADK özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. ADK'nın silika kumuna göre metilen mavisi değeri ve hafif organik kirletici içeriği yüksek, kum eşdeğeri düşük tespit edilmiş olup potansiyel tehlike arz edebilir agrega olarak belirlenmiştir. Ancak, ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile karıştırılması suretiyle, hazır betonda ince agrega olarak kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

**Çizelge 1.** Agrega özelliklerinin TS 706 EN 12620+A1:2009'a göre karşılaştırılması

	Parametre	Silika kumu	ADK
	Agrega türü	İnce agrega	İnce agrega
	Tane sınıfı, mm	0-4	0-4
	Elek açıklığı, mm	Elekten geçen, %w	Elekten geçen, %w
A) Geometrik Özellikler	Tane	97	100
	büyükçük	95	99
	dağılımı	78	94
		28	35
		2.11	16
		2.02	13.2
	Çok ince malzeme, %	2.27	13.2
	Kum eşdeğeri, %	89.09	32
	Metilen mavisi değ., g/100g	0.08	0.85
	B) Fiziksel Özellikler	Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	2650-2700
Su emme oranı, %		0.7	0.9
Gevşek yığın yoğ., kg/m <sup>3</sup>		1390	1160
Kuruma büzülmesi, %		0.02-0.03	0.054
Alkali-silika reaktifliği		Tehlikesiz	Potansiyel tehlike arz edebilir
C) Kimyasal Özellikler	Suda çöz. Cl <sup>-</sup> iyonu, %	0.06	0.09
	Asitte çözünebilen sülfat, %w	0.02-0.03	0.15
	Toplam kükürt, %w	0.04-0.06	0.11
	Asitte çözünebilen sülfat, %w	0.03	0.1
	Humus muhtevası	Yok	Yok
	Fulvo asit muhtevası	Yok	Yok
	Hafif organik kirleticiler, %	0.20	4.5

Silika kumu ve ADK'nın kimyasal bileşimi Çizelge 2'de verilmiştir. ADK'nın SiO<sub>2</sub> içeriği, yapısındaki katkı maddeleri (bentonit, kömür tozu vb.) nedeniyle daha düşük tespit edilmiştir. Bütün hazır beton ürünlerinde bağlayıcı olarak CEM I 42.5R Portland çimentosu (TS EN 197-1:2002), su, ADK ve agrega olarak mıcır, taş tozu, silika kumu ve ADK kullanılmıştır. Hazır betonların işlenebilirliğini belli bir seviyede tutmak üzere karışımlara iki farklı melamin-bazlı ticari süper akışkanlaştırıcı (EPO515 ve EPO SP954) da ilave edilmiştir.

### 3. DENEYSSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Hazır Beton Karışımlarının Hazırlanması

Hazır beton karışımları iki şahit (M0A, M0B) ve yedi farklı ikame oranında (M1A-M3A ve M1B-M4B) TS EN 206-1:2002'ye uygun hazırlanmıştır. İlk örnekler %50, %75 ve %100 ikame oranında ADK ile hazırlanmış; yüksek ADK miktarının beton özelliklerini olumsuz etkilemesinden ötürü, %10, %20, %30 ve %40 ikame oranında yeni karışımlar hazırlanmıştır.

Çizelge 2. ADK ve silika kumu kimyasal bileşimi

Bileşen	ADK (%)	Silika kumu (%)	Bileşen	ADK (%)	Silika kumu (%)	Bileşen	ADK (%)	Silika kumu (%)
Na <sub>2</sub> O	0.764	0.068	SO <sub>3</sub>	0.842	0.016	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.818	0.137
MgO	1.974	0.156	K <sub>2</sub> O	0.494	0.164	ZnO	0.018	0.001
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.412	1.887	CaO	1.210	0.062	Cl	0.071	0.009
SiO <sub>2</sub>	81.851	97.379	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.025	0.022	LOI (%)	6.93	0.14

Beton karışımlarda, su ihtiyacını azaltmak üzere süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. İlk denemelerde (M1A-M3A) EPO515, ikinci denemelerde (M1B-M4B) EPO SP954 (daha etkin) süper akışkanlaştırıcı seçilmiştir. Şahit numunelerin TS EN 206-1:2002'ye göre 28 günlük basınç dayanımları 30 ve 37 MPa olacak şekilde ayarlanmış, çalışmada uygulanan ikame oranları ve bileşen miktarları Çizelge 3'te verilmiştir. Hazır beton harçları laboratuvar tipi betoniyerde homojen ve uniform bir görünüm kazanıncaya kadar karıştırılmış, kübik standart kalıplara (15x15x15 cm) yerleştirilmiş ve priz süresi tamamlanan numuneler 20°C'deki kür havuzunda 7, 28, 56 ve 90 günlük küre tabii tutulmuştur. S/S teknolojisinin etkinliğini belirlemek üzere fiziksel, mekanik, çevresel ve mikro-yapısal özellikler incelenmiştir.

Çizelge 3. S/S amaçlı uygulanan ikame oranları ve bileşen miktarları

Bileşenler	M0A	M1A	M2A	M3A	M0B	M1B	M2B	M3B	M4B
Çimento, kg/m <sup>3</sup>	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Mıdır 1, kg/m <sup>3</sup>	494	494	494	494	494	494	494	494	494
Mıdır 2, kg/m <sup>3</sup>	514	514	514	514	514	514	514	514	514
Silika kumu, kg/m <sup>3</sup>	442.24	221.12	110.56	0	442	397.8	353.6	309,4	176.8
ADK, kg/m <sup>3</sup>	0	221.12	331.68	442.24	0	44.2	88.4	132.6	176.8
ADK, %	0	50	75	100	0	10	20	30	40
Taş tozu, kg/m <sup>3</sup>	359	359	359	359	359	359	359	359	359
Su, kg/m <sup>3</sup>	181.08	228.4	244.8	280	159.44	180	183.2	184.7	187.4
Su/çimento oranı	0.517	0.653	0.7	0.8	0.55	0.514	0.524	0.528	0.535
Akışkanlaştırıcı, kg/m <sup>3</sup>	0	0	0	0	6.32	6.32	6.32	6.32	6.32
Priz başlama, sa.	4.33	4.42	4.58	5	4.33	4.5	4.67	4.83	5.17
Priz sonlanma, sa.	7.33	7.42	7.58	8.5	7.33	7.5	7.5	7.75	8
Çökme (Slamp), cm	19	18	19.5	19	19	18	20	19.5	20
Taze beton birim ağırlığı, kg/m <sup>3</sup>	2370	2353	2335	2318	2410	2406	2360	2376	2361

#### 3.2. Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri

Taze betonlarda çökme (TS EN 12350-2:2010) ve birim ağırlık (TS 2941:1978) değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Karışımların birim ağırlıklarında belirgin bir değişim görülmemektedir. Aynı

çökme sınıfı (S4; çökme: 16-21 cm) için ADK oranı arttıkça su/çimento (s/ç) oranlarında yükselme tespit edilmiştir. Bunun nedeni, ADK'daki bentonit vb. ince partiküllerin, taze betonun akışkanlığını azaltması ve su ihtiyacını arttırmasıdır. Ayrıca, ikame oranı arttıkça priz sürelerinde gecikme olduğu tespit edilmiştir. ADK'daki kömür tozunun varlığı ve çimento-agrega aderansındaki zayıflama, çimento hidrasyonunda gecikmeye yol açmaktadır [25]. Buna rağmen, ADK içeren beton karışımların priz sürelerinin şahit denemelerle benzerlik arz ettiği gözlenmiştir. Hazır betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek üzere basınç dayanımları (TS EN 12390-3:2010), yarmada çekme dayanımları (TS EN 12390-6:2010), elastisiteeleri (TS 500:2000), su emme oranları (TS EN 480-11:2008) ve yoğunlukları (TS EN 12390-7:2010) analiz edilmiştir.

### 3.3. Sızma (Liç) Testi

ADK, TS EN 12457-4:2004'e uygun sızma testine tabii tutulmuş, analiz sonuçları "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)-EK 2" limit değerleri ile karşılaştırılarak Çizelge 4'te verilmiştir. Ni, Cr, Zn derişimi Varian AAS ile, F<sup>-</sup> içeriği Dionex ICS-1000 İyon Kromatografi cihazı ile, TÇKM gravimetrik yöntemle, TOK ve ÇOK içeriği Shimadzu TOC-V TOK analizöründe tespit edilmiştir [34]. ÇOK derişiminin I. Sınıf, Cr, Ni, Zn, F<sup>-</sup>, TÇKM ile TOK içeriğinin II. Sınıf; diğer parametrelerin ise III. Sınıf depolama sınır değerlerine uygun olduğu saptanmıştır. Hazır betonlar, çevresel etkilerinin ve farklı doğa koşullarındaki davranışlarının incelenmesi amacıyla farklı pH'larda (5.5; 9; 4) TS EN 12457-4:2004 sızma testine tabii tutulmuşlar; eluatta ÇOK, Ni, Zn, Cr, TÇKM, F<sup>-</sup> ile orijinal katıda TOK derişimleri izlenmiştir.

Çizelge 4. ADK sızma testi sonuçları

Parametre	ADK	ADDDY-EK2 limit değerleri			
		III. Sınıf	II. Sınıf	I. Sınıf	
Eluat (Sıvı/Katı=10 L/kg)	As, mg/L	0.05	0.05	0.2	2.5
	Ba, mg/L	1.74	2	10	30
	Cd, mg/L	0.0005	0.004	0.1	0.5
	Cr, mg/L	0.12	0.05	1	7
	Cu, mg/L	0.12	0.2	5	10
	Hg, mg/L	<0.0005	0.001	0.02	0.2
	Mo, mg/L	0.007	0.05	1	3
	Ni, mg/L	0.14	0.04	1	4
	Pb, mg/L	0.043	0.05	1	5
	Sb, mg/L	0.0004	0.006	0.07	0.5
	Se, mg/L	0.006	0.01	0.05	0.7
	Zn, mg/L	0.593	0.4	5	20
	Cl <sup>-</sup> , mg/L	11.38	80	1500	2500
	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , mg/L	37.53	100	2000	5000
	F <sup>-</sup> , mg/L	1.89	1	15	50
	ÇOK, mg/L	<b>89.4</b>	50	80	100
	TÇKM, mg/L	<b>4731</b>	400	6000	10000
Fenol, mg/L	0.09	0.1			
Orijinal Atık	TOK, mg/kg	<b>45601</b>	30000	50000	60000
	BTEX, mg/kg	0.18	6		
	PCB, mg/kg	<0.01	1		
	Mineral yağ, mg/kg	123.54	500		
	Kızdırma kaybı LOI %	6.93			%10

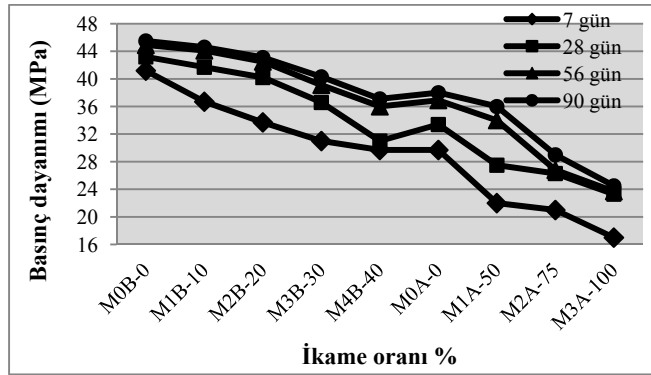
### 3.4. Mikro-yapısal Özellikler

Hazır beton ürünlerinin kalitatif mineralojik yapısı Shimadzu-XRD 6000 X-Işını Difraksiyonu (XRD) ile, kimyasal bileşimdeki elementlerin yarı kantitatif analizi Philips PW-2404 X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) ile tespit edilmiştir. Morfolojik karakterizasyon JEOL 6335F Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile belirlenmiş; ayrıca, ürünler Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi (EDS)'nde yarı-kantitatif mikroanalitik yöntemle kimyasal olarak da incelenmiştir.

## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Testi Sonuçları

S/S işlemi tamamlanan iki şahit ve yedi farklı ikame oranında hazır betonların 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Basınç dayanımı analiz sonuçları

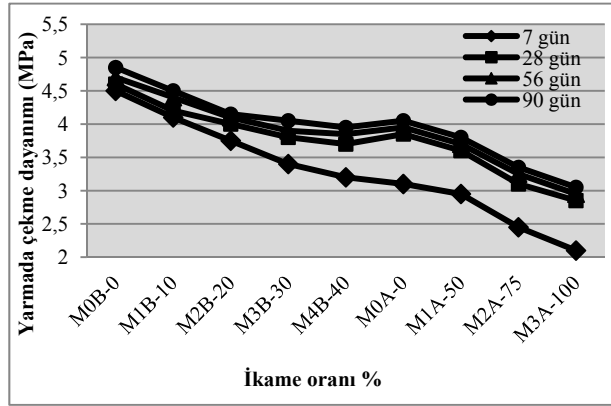
İlk denemelerde (M1A-M3A) klasik süper akışkanlaştırıcı (EPO515) kullanılarak C25/30 sınıfı hazır beton imal edilebilirliği araştırılmıştır. TS EN 206-1:2002'ye göre C25/30 sınıfı beton için (28 günlük) basınç dayanımının 30-37 MPa, C30/37 sınıfı beton için ise 37-45 MPa olması istenmektedir. %50, %75 ve %100 ikame oranında hazırlanan beton numunelerinde C25/30 sınıfı basınç dayanımına ulaşamamış, deneyler daha düşük ikame oranlarında tekrarlanmıştır. İkinci denemelerde (M1B-M4B) su kesmesi daha yüksek ve etkin bir süper akışkanlaştırıcı (EPO SP954) kullanıldığı için, C25/30 beton sınıfı reçete ile C30/37 sınıfı değerlerine ulaşmıştır. İkame oranı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana gelmektedir [19, 22, 25, 31]. Kür zamanı uzadıkça dayanımın arttığı görülmüş, M1B ve M2B numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları >37 MPa ölçülmüştür. ADK arttıkça dayanımın azalma sebebi, ince partikül yüzey alanının artmasından ötürü su-çimento jel oluşumunu azaltması ve agrega-çimento hamuru arasında uygun bağlanma gerçekleşmemesidir. Ayrıca, ADK'daki karbon ve bentonit de basınç dayanımını azaltmaktadır [3, 35, 36]. Beton basınç dayanımı bilindiğinde elastisite modülü, TS 500:2000'e göre belirlenebilmekte;  $E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ MPa}$  eşitliğinde;  $E_{cj}$ ; j günlük betonun elastisite modülünü (MPa),  $f_{ckj}$  ise j günlük beton karakteristik basınç dayanımını (MPa) ifade etmektedir. Elastisite modülü 7, 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri için Çizelge 5'te hesaplanmıştır. İkame oranı arttıkça elastisite modülünde azalma gözlenmektedir [25]. Kür zamanı uzadıkça elastisite artmıştır.

Çizelge 5. Elastisite modülü değerleri

Örnek	Elastisite modülü, MPa				Örnek	Elastisite modülü, MPa			
	7 gün	28 gün	56 gün	90 gün		7 gün	28 gün	56 gün	90 gün
M0A	31712	32782	33742	34034	M0B	34861	35361	35777	35922
M1A	29244	31043	32951	33500	M1B	33689	34987	35583	35705
M2A	28893	30667	30825	31502	M2B	32867	34606	35187	35336
M3A	27401	29688	29822	30087	M3B	32095	33662	34322	34632
					M4B	31712	32095	33500	33796

#### 4.2. Yarmada Çekme Dayanım Testi Sonuçları

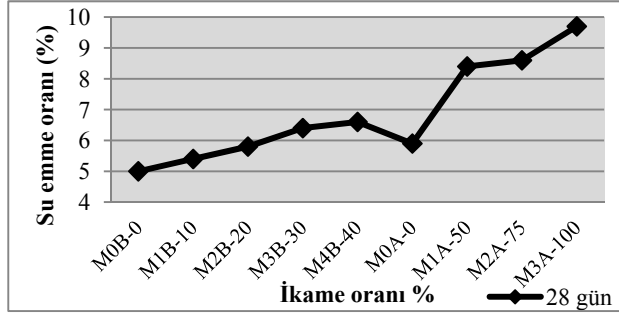
Genellikle beton çekme dayanımı, basınç dayanımının %10'udur, beton kalitesi ve yaşına göre %7-17 arasında değişebilmektedir [37]. S/S işlemi tamamlanan hazır betonların 7, 28, 56 ve 90 günlük çekme dayanımları Şekil 2'de verilmiştir. İkame oranı arttıkça çekme dayanımlarında azalma olduğu, ADK'nın çekme dayanımını olumsuz etkilediği ve çekme dayanımının basınç dayanımı ile paralellik gösterdiği gözlenmektedir [22]. Kür zamanı uzadıkça dayanım artmıştır.



Şekil 2. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

#### 4.3. Su Emme Oranı Testi Sonuçları

TS 2824 EN 1338:2005-04 (AC: 2009-02)'e göre; zemin beton kaplama blokları için  $\leq 6\%$  olan su emme oranı hazır betonda kullanılabilir. Su emme oranı azaldıkça, kapiler boşluklar azalır, hazır beton geçirimsizliği ve durabilite (dayanım) artar. ADK'nın su emme oranına etkisi Şekil 3'te verilmiştir. İkame oranı arttıkça, hazır betondaki boşluklar arttığı için su emme oranı artmaktadır [31]. M1B ve M2B numunelerinin su emme oranları  $< 6\%$ 'dır.



Şekil 3. ADK'nın su emme oranına etkisi

#### 4.4. Yoğunluk Testi Sonuçları

7 günlük kür süresi sonunda yoğunluk değerleri Çizelge 6'da verilmiştir. Yoğunlukların normal beton sınıfına ( $2000-2600 \text{ kg/m}^3$ ) uygun olduğu; ayrıca, ADK'nın yoğunluğu olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Bunun sebebi; ADK'daki kömür tozu, kil ve tozdan ötürü, kullanılan suyun artması ve ADK'nın silika kumuna göre yoğunluğunun daha az olmasıdır.

Hazır betonların fiziksel ve mekanik özellikleri topluca incelendiğinde, M2B (%20 ikame oranı) numunesinin performans özelliklerinin M0B (şahit) ile paralellik arz ettiği tespit edilmiştir. %20'den yüksek ikame oranlarında performans özelliklerinde sapma olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 6. 7 günlük yoğunluk değerleri

Örnek	M0A	M1A	M2A	M3A	M0B	M1B	M2B	M3B	M4B
Yoğunluk, $\text{kg/m}^3$	2210	2130	2110	2080	2280	2260	2240	2210	2190

#### 4.5. Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi

Hazır betonların TS EN 12457-4:2004 sızma testine göre üç farklı pH'ta belirlenen eluat konsantrasyonları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Farklı pH'larda eluat değerleri

pH	Örnek	Eluat konsantrasyonları, mg/L					
		Ni	Zn	Cr	F <sup>-</sup>	TÇKM	ÇOK
	ADK	0.14	0.593	0.12	1.89	4731	89.4
pH 4	M0B	0.018	0.027	0.039	<0.2	<14.3	30.1
	M2B	0.021	0.020	0.036	<0.2	<14.3	35.8
pH 5.5	M0B	0.007	0.020	0.036	<0.2	<14.3	12.8
	M2B	0.003	0.013	0.029	<0.2	<14.3	10.3
pH 9	M0B	0.006	0.042	0.036	<0.2	<14.3	17.7
	M2B	0.004	0.021	0.035	<0.2	<14.3	11.4

Başlangıçta ADK'da TOK değeri  $45601 \text{ mg/kg}$  iken, farklı ikame oranlarına göre (%0, %10, %20, %30, %40, %50, %75, %100) sırasıyla; 20690, 24443, 27967, 29504, 31645, 35299,



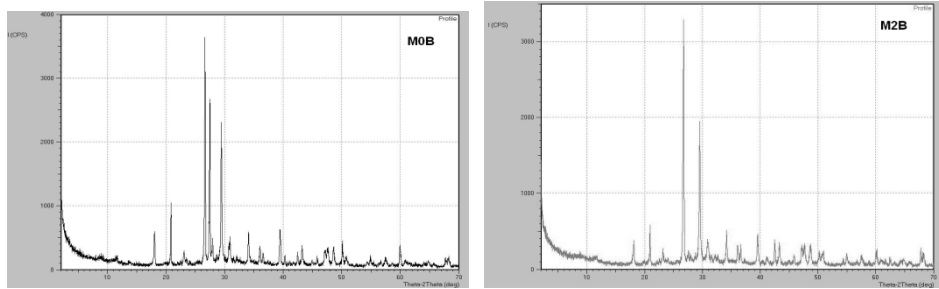
40514, 44930 mg/kg'a inmiştir. İkame oranı arttıkça TOK değeri artmakla birlikte tüm betonlarda TOK içeriği ADK'dakinden düşük çıkmış, S/S yönteminin organik madde sızmasını önlediği saptanmıştır. Ayrıca, hazır beton numunelerinde hedef metal (Ni, Zn, Cr), F<sup>-</sup>, TÇKM ve ÇOK eluat konsantrasyonlarının "ADDDY-EK 2" III. Sınıf (inert atık) kriterlerine uygun olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, S/S prosesinin uygulanabileceği ve %20 ikame oranındaki beton numunesinin (M2B) çevreyi kirletici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

#### 4.6. Mikro-yapısal Değerlendirme

XRD ile kalitatif analiz neticesinde; M0B ve M2B hazır beton numunelerinin XRD paternleri Şekil 4'te, XRF ile yarı-kantitatif elementel analiz sonuçları Çizelge 8'de, SEM görüntüleri ve EDS spektrumları ise Şekil 5'te verilmiştir. Kalitatif, kantitatif, morfolojik ve yarı-kantitatif mikro analiz sonuçları incelendiğinde, iki hazır beton ürünü arasında mikro-yapısal ve morfolojik olarak herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

### 5. VARGILAR VE ÖNERİLER

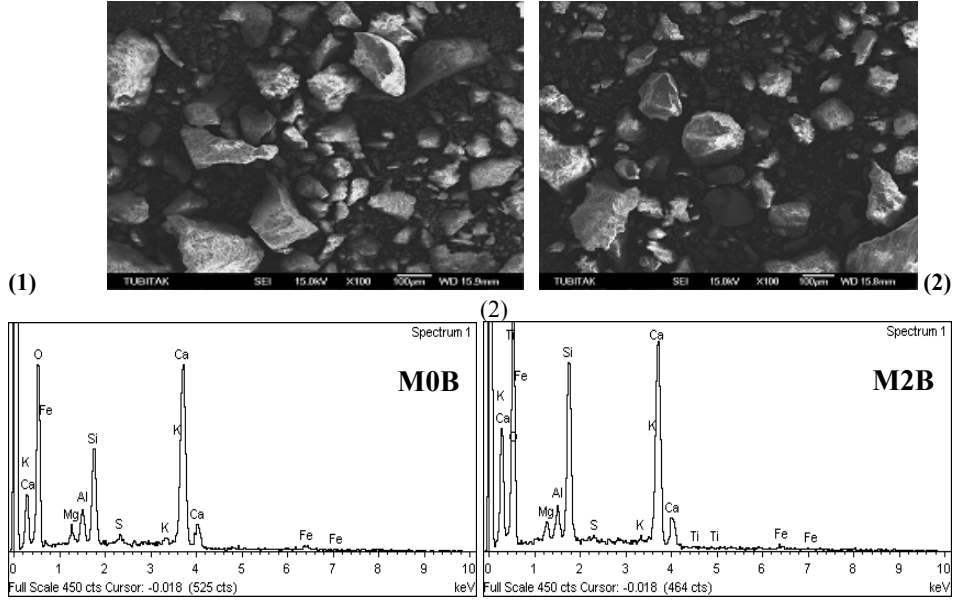
Bu çalışma, dökümhanelerde yüksek miktarda ortaya çıkan ve mevcut durumda düzenli depolama yolu ile bertaraf edilen ADK'nın, S/S teknolojisiyle yapı endüstrisine yönelik hazır beton üretiminde agregalarla birlikte kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. ADK'nın bu yolla kullanımı, hazır beton sektörünün gelecekteki olası agrega ihtiyacını belli oranda karşılayabilecektir. TS 706 EN 12620+A1:2009'a göre ADK'nın belli ikame oranında silika kumu ile hazır betonda kullanılabileceği belirlenmiştir. Farklı ikame oranlarında ADK ile hazırlanan taze betonların özellikleri incelendiğinde, ADK oranı arttıkça birim ağırlık değerinin azaldığı, aynı çökme sınıfı (S4) için s/ç oranının arttığı ve priz sürelerinin geciktiği tespit edilmiştir. İkame oranı arttıkça basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisitede azalma olduğu ve ADK'nın betonun



Şekil 4. XRD paternleri

Çizelge 8. Yarı kantitatif analiz sonuçları

Bileşik	M0B, %	M2B, %	Bileşik	M0B, %	M2B, %	Bileşik	M0B, %	M2B, %
Na <sub>2</sub> O	0.311	0.259	SO <sub>3</sub>	2.019	1.956	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.047	0.049
MgO	2.839	4.235	Cl	0.086	0.090	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.091	2.896
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.408	6.114	K <sub>2</sub> O	1.247	1.047	NiO	0.011	0.014
SiO <sub>2</sub>	26.755	25.77	CaO	56.43	56.78	ZnO	0.016	0.019
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.151	0.129	TiO <sub>2</sub>	0.290	0.335			



Şekil 5. SEM görüntüleri ve EDS spektrumları (1) M0B, (2) M2B.

mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği, kür zamanı uzadıkça dayanım ve elastisite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. İkame oranı arttıkça su emme oranında yükselme, yoğunluk değerinde ise düşme saptanmıştır. M2B numunesinin performans (fiziksel ve mekanik) özelliklerinin M0B ile paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. %20'den yüksek ikame oranlarında ise performans özelliklerinde sapma olduğu belirlenmiştir. Hazır beton ürünlerinin farklı pH'lardaki sızma testi sonuçlarına göre; M2B numunesinde ADK'dan gelebilecek eluatta Zn, Ni, Cr, TÇKM, F<sup>-</sup>, ÇOK içeriğinin "ADDDY-EK 2" III. Sınıf kabul kriterlerine uygun olduğu saptanmıştır. İkame oranı arttıkça TOK değeri artmakla birlikte tüm beton numunelerinde TOK içeriği ADK'daki TOK içeriğinden düşük çıkmıştır. Sonuç olarak, S/S prosesinin uygulanabileceği ve %20 ikame oranında hazırlanan beton numunesinin (M2B) çevreyi kirlenici özelliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir. M0B ve M2B hazır beton numuneleri arasında mikro-yapısal ve morfolojik açıdan farklılık gözlenmemiştir. ADK'nın hazır beton üretiminde ince agrega yerine maksimum %20 ikame oranında kullanımının fiziksel, mekanik, çevresel ve mikro-yapısal açıdan olumsuz bir etkiye sebep olmadığı sonucuna varılmıştır. ADK'nın içeriği nedeniyle betonarme yapılarda metal donatı korozyonuna etkisi araştırılmalı, ADK kullanımının hazır beton üretim prosesine etkisini değerlendirmek üzere endüstriyel ölçekli çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca, ADK özellikleri dökümlenelere göre değişim göstereceğinden, farklı kaynaklardan temin edilen ADK'ların aynı kalitede olması ve sürekliliği sağlanmalıdır.

#### Acknowledgments / Teşekkür

Çalışmanın laboratuvar analizleri ile desteklerinden ötürü TÜBİTAK MAM'a, ince agrega ve hazır beton analizleri altyapı hizmetlerinden ötürü İSTON A.Ş. ve THBB'ne teşekkür ederiz.

**REFERENCES / KAYNAKLAR**

- [1] Karakule, F., Akakın, T., Uçar, S. Türkiye'de ve dünyada hazır beton sektörü, *Beton 2004 Kongresi*, 10-12 Haziran, İstanbul, 2004.
- [2] TS EN 206-1. Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, *Türk Standartları*, Ankara, 2002.
- [3] Siddique, R., Schutter, G. ve Noumowe, A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 976-980, 2009.
- [4] Gedik, A., Lav, A.H. ve Lav, M.A. Atık döküm kumlarının yol inşaatında alt temel ve dolgu malzemesi olarak kullanılması, 3. *Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES 2009)*, 28-29 Ocak, İstanbul, 2010.
- [5] Beeley, P. *Foundry Technology*, University of Leeds, England, 2001.
- [6] Zannetti, M.C. ve Fiore, S. Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations, *Resources, Conservation and Recycling*, 38, 243-254, 2002.
- [7] Singh, G., Siddique, R. Effect of waste foundry sand as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, 26(1), 416-422, 2012.
- [8] Siddique, R., Kaur, G. ve Rajor, G. Waste foundry sand and its leachate characteristics, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1027-1036, 2010.
- [9] Guney, Y., Sari, Y.D., Yalcin, M., Tuncan, A. ve Donmez, S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete, *Waste Management*, 30, 1705-1713, 2010.
- [10] Dungan, R.S., Huwe, J. ve Chaney, R.L. Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in spent foundry sands, *Chemosphere*, 75, 1232-1235, 2009.
- [11] Dayton, E.A., Whitacre, S.D., Dundan, R.S., Basta, N.T. Characterization of physical and chemical properties of spent foundry sands pertinent to beneficial use in manufactured soils, *Plant Soil*, 329, 27-33, 2010.
- [12] Lawrence, D. ve Mavroulidou, M. Properties of concrete containing foundry sand, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, 3-5 Eylül, Chania, Greece, 2009.
- [13] Kirk, P.B. Field demonstration of highway embankment constructed using waste foundry sand, *Doktora tezi*, Purdue University, West Lafayette, IN, US, 1998.
- [14] Mast, D.G. ve Fox, P.J. Geotechnical performance of a highway embankment constructed using waste foundry sand, *Geotechnical Special Publication*, 79, 66-85, 1998.
- [15] Abichou, B.C. ve Edil, T. Database on beneficial reuse of foundry by-products, Recycled materials in geotechnical applications. In: Vipulanandan, C. ve Elton, D., eds. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 79, 210-223, 1998.
- [16] Başar, H.M., Deveci Aksoy, N., 2013. Pre-treatment of Waste Foundry Sand via Solidification/Stabilization, *Clean-Soil, Air, Water*, 41(1), 94-101.
- [17] Kleven, J.R., Edil, T.B. ve Benson, C.H. Evaluation of excess foundry system sands for use as sub-base material, *Transportation Research Record*, 1714, 40-48, 2000.
- [18] Braham, A. *The use of blended recycled foundry sand in hot mix asphalt*, *Interim Report*, University of Wisconsin-Madison, Asphalt Research Group, US, 2002.
- [19] Khatib, J.M. ve Ellis, D.J. Mechanical properties of concrete containing foundry sand, *American Concrete Institute special publication*, SP-200, 733-748, 2001.
- [20] Naik, T.R., Kraus, R.N., Chun, Y.M., Ramme, W.B. ve Siddique, R. Precast concrete products using industrial by-products, *ACI Materials Journal*, 101(3), 199-206, 2004.
- [21] Fiore, S. ve Zanetti, M.C. Foundry wastes reuse and recycling in concrete production, *American Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 135-142, 2007.

- [22] Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E. H. ve Bennacer, R. Strength, durability and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS), *Construction and Building Materials*, 25, 1916-1925, 2011.
- [23] Kaur, G., Siddique, R., Rajor, A. Micro-structural and metal leachate analysis of concrete made with fungal-treated waste foundry sand, *Construction and Building Materials*, 38, 94-100, 2013.
- [24] Etxeberria, M., Pacheco, C., Meneses, J.M. ve Berridi, I. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, *Construction and Building Material*, 24, 1594-1600, 2010.
- [25] Monosi, S., Sani, D. ve Tittarelli, F. Used foundry sand in cement mortars and concrete production, *The Open Waste Management Journal*, 3, 18-25, 2010.
- [26] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21<sup>st</sup> ed., American Public Health Association, Washington, D.C., 2005.
- [27] Dungan, S.R., Kukier, U. ve Lee, B. Blending foundry sands with soil: Effect on dehydrogenase activity, *Science of the Total Environment*, 357(1-3), 221-230, 2006.
- [28] Deng, A. ve Tikalsky, P.J. Geotechnical and leaching properties of flowable fill incorporating waste foundry sand, *Waste Management*, 28, 2161-2170, 2008.
- [29] Regan, R.W., Heaney, M. ve Dunkelberger, J.A. Weighing sand reuse options from the customer's perspective, *Modern Casting*, 87, 45-47, 1997.
- [30] Solmaz, P., Benli, B., Lav, M.A., Çelik, M.S. ve Lav, A.H. Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı, 2. *Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu ve Sergisi*, 24-26 Ekim, İstanbul, 2007.
- [31] TÜDOKSAD. *Kişisel görüşme*, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, İstanbul, 2011.
- [32] Khatib, J.M, Baig, S., Bougara, A. ve Booth, C. Foundry sand utilisation in concrete production, *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 28-30 Haziran, Ancona, Italy, 2010.
- [33] Bakis, R., Koyuncu, H. ve Demirbas, A. An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures, *Waste Management Resources*, 24, 269-274, 2006.
- [34] Yalçın, M., Güney, Y., Koyuncu, H. ve Baş, Ö.F. Atık döküm kumunun betonda kullanılabilirliği, 5. *Ulusal Beton Kongresi*, 1-3 Ekim, İstanbul, 2003.
- [35] Mroueh, U., Wahlstrom, M. By-products and recycled materials in earth construction in Finland: An assessment of applicability, *Res. Conser. and Recycling*, 35, 117-129, 2002.
- [36] Naik, T.R., Kraus, R.N., Chun, Y.M., Ramme, W.B., Singh, S.S. Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(4), 400-407, 2003.
- [37] Erdoğan, T.Y. *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 2007.