



Recycling of marine dredged materials, coal fly ash and waste foundry sand as lightweight aggregates

Pembe Özer Erdoğan^{1*}, Hatice Merve Başar²

¹Environment and Cleaner Production Institute, TÜBİTAK Marmara Research Center, Kocaeli, 41470, Turkey

²R&D Resources Directorate, Kadir Has University, Istanbul, 34083, Turkey

Highlights:

- Beneficial use of marine dredged material in synthetic LWA production by adding industrial wastes
- Improvement of the properties of LWAs with the elevation of sintering conditions
- Investigation of the technical and environmental properties of the produced LWAs

Keywords:

- Beneficial use
- lightweight aggregate
- dredged material
- fly ash
- waste foundry sand

Article Info:

Research Article

Received: 16.02.2018

Accepted: 27.06.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460534

Acknowledgement:

This study is performed under TÜBİTAK KAMAG Project (111G036) "Marine Dredging Applications and Environmental Management of Dredged Materials (DIPTAR)" [41] and the authors wish to thank Ministries of Environment and Urbanization, and Transport, Maritime Affairs and Communications as well as Mr. Hayrettin BAYRAKTAR for his contribution in the LWA production.

Correspondence:

Author: Pembe Özer Erdoğan / e-mail: pembe.ozер@tubitak.gov.tr phone: +90 262 677 2915

Graphical/Tabular Abstract

LWAs were ordered in a decreasing surface quality regarding their external appearance and surface texture. Sintering temperature has the major variable to obtain LWAs with smooth surface texture. All LWA series sintered at 1190°C had vitrified surface texture with no external fissures. At 1180, 1170, 1150 and 1100°C sintering temperatures, surface of aggregates were rough and some external fissures were also observed on the mantle of aggregates.

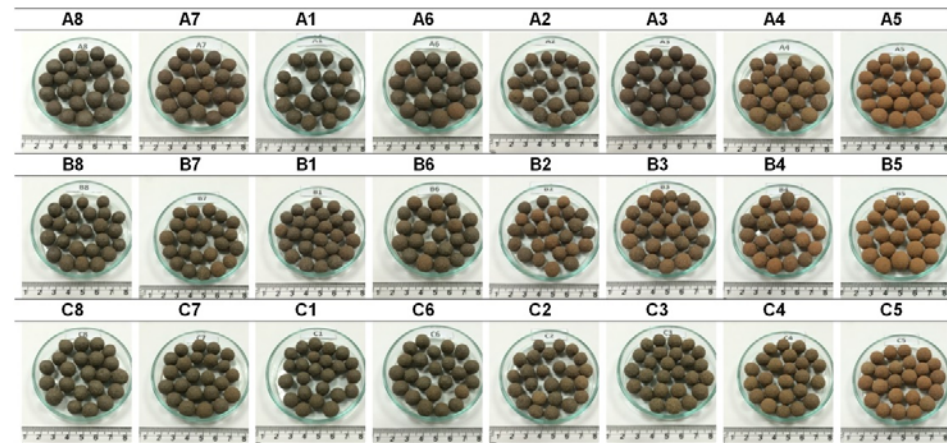


Figure A. External appearance and surface texture of produced LWAs

Purpose: The objective of this work is to investigate the influence of DM, FA and WFS co-utilization on the production of LWA, as well as to determine the effects of sintering temperature, heating rate and sintering period on the physical, mechanical, mineralogical, micro-structural and leaching properties of the produced artificial aggregates. The usage of DM as an ingredient in synthetic LWA production with the combination of DM and FA will provide valuable information for recycling industrial wastes.

Theory and Methods:

The constituent of the mixtures were determined according to bloating area of the Riley's ternary diagram. All LWAs were produced by using Pelletizing Disc (Elektron Lab, Turkey) operated at 43°, having 40 cm diameter and 11 cm depth. Rotating speed of the disc was 50 rpm and the obtained LWA granules had particle sizes of 5-12 mm.

Results:

Increase in DM content in aggregate mixtures led to decrease in strength properties and increase in weight loss and water absorption rates for all sintering conditions. Physical, mechanical, microstructural and mineralogical properties of coarse aggregates in all series were improved with the increase of sintering temperature. LWA produced under conditions of 1190°C sintering temperature, 5°C/min heating rate and 20 min sintering period resulted in optimum LWA properties.

Conclusion:

The outcomes of this study demonstrated that DM can be used as an ingredient in the production of artificial LWA with the combination of coal FA and WFS with no adverse physical, mechanical, mineralogical, micro-structural and environmental impacts.



Deniz dibi tarama malzemesi, kömür uçucu külü ve atık döküm kumunun hafif agrega olarak geri kazanımı

Pembe Özer Erdoğan^{1*}, Hatice Merve Başar²

¹TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, 41470, Türkiye

²Kadir Has Üniversitesi, Ar-Ge Kaynakları Müdürlüğü, İstanbul, 34083, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Deniz dibi tarama malzemesinin Yapay Hafif Agrega üretiminde endüstriyel atık ilavesi ile faydalı kullanımı
- Sinterleme koşullarının artırılması ile hafif agrega özelliklerinin geliştirilmesi
- Üretilen YHA'ların teknik ve çevresel özelliklerinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 16.02.2018
Kabul: 27.06.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460534

Anahtar Kelimeler:

Mikro takımlar,
takım uç nokta FTF'si,
kararlılık diyagramları,
takım titreşimi

ÖZET

Günümüzde, yüksek miktardaki deniz dibi tarama malzemesinin (DTM) diğer endüstriyel atıklarla birlikte sürdürülebilir çevresel yönetimi Türkiye genelinde ortak bir sorundur. DTM ve atıkların denize boşaltım/bertaraf yerine yapay hafif (kaba) agrega (YHA) üretiminde hammadde olarak faydalı kullanımı/geri kazanımı, döngüsel ekonomi kapsamında önemli çevresel kazanç sağlayacaktır. Bu çalışmada, DTM, kömür uçucu külü ve atık döküm kumu kullanılarak YHA üretimi araştırılmıştır. Hammaddelerin üç farklı karışımı pelletleme diskinde granüle edilmiş, 105°C'de kurutulmuş ve kül fırınında 1100, 1150, 1170, 1180 ve 1190°C'de 5-10°C/min ısıtma hızı ve 10-20 min sinterleme süresinde sinterlenmiştir. Sinterlenen YHA'lar fiziksel, mekanik, mikroyapısal, mineralojik ve sızma özellikleri açısından analiz edilmiştir. 1190°C sinterleme sıcaklığı, 5°C/min ısıtma hızı ve 20 min sinterleme süresinde üretilen YHA'lar daha iyi agrega özelliklerine neden olmuştur. Ayrıca, bu agregaların sızma (liç) testi sonuçlarına göre; eluat ve original atık parametrelerinin, sinterleme prosesinde silika matriksine hapsolmesi nedeniyle III. Sınıf (İnert Atık) düzenli depolama tesisi limit değerlerinin altında olduğu; böylece, yapı sektöründe kullanım için çevresel risk teşkil etmediği görülmüştür.

Recycling of marine dredged materials, coal fly ash and waste foundry sand as lightweight aggregates

H I G H L I G H T S

- Beneficial use of marine dredged material in synthetic lightweight aggregate (LWA) production with the addition of industrial wastes
- Improvement of the properties of lightweight aggregates with the elevation of sintering conditions
- Investigation of the technical and environmental properties of the produced LWAs

Article Info

Research Article
Received: 16.02.2018
Accepted: 27.06.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460534

Keywords:

Beneficial use,
lightweight aggregate,
dredged material,
fly ash,
waste foundry sand

ABSTRACT

Nowadays, sustainable environmental management of high quantities of marine dredged material (DM) together with other industrial wastes is a common problem across Turkey. The beneficial use/recovery of DM and wastes in the production of lightweight aggregate (LWA) instead of dumping at sea/disposal will provide substantial environmental savings in terms of circular economy. In this study, the production of LWA by using marine DM, coal fly ash and waste foundry sand were investigated. Three different mixtures of raw materials were granulated in pelletizing disc, dried at 105°C and sintered in muffle furnace at 1100, 1150, 1170, 1180 and 1190°C with 5-10°C/min heating rates and 10-20 min sintering period. Sintered LWAs were analyzed in terms of physical, mechanical, microstructural, mineralogical and leaching properties. LWA produced at 1190°C sintering temperature, 5°C/min heating rate and 20 min sintering period resulted in better aggregate properties. Furthermore, according to the leaching test results; it is observed that the parameters of the eluate and original waste were lower than the Class III (inert waste) landfilling limit values due to the entrapment of those into the silicate matrix in sintering process; thus, causing no environmental risk to be used at construction sector.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de limanlarda gerçekleştirilen dip tarama faaliyetleri sonucunda yıllık 3 million m³ dip tarama malzemesi (DTM) açığa çıkmaktadır. DTM yönetimi için ülkemizde bugüne kadar en tercih edilen seçenek denize boşaltım olmuş, bu seçeneği çok düşük miktarlarla bertaraf takip etmiştir. Ancak, DTM’lerin denize kontrolsüz bir şekilde boşaltımı, sucul ekosistem üzerinde zararlı etkilere yol açmaktadır [1]. Deniz ekosisteminin zarar görmesi ve düzenli depolama alanlarının yetersizliği nedeniyle DTM’lerin faydalı kullanımı daha sürdürülebilir bir seçenek haline gelmiştir [2]. DTM, 02/04/2015 tarihli ve R.G.29314 sayılı Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY) EK-IV’te verilen Atık Listesinde 17 05 05 (tehlikeli maddeler içeren dip tarama çamuru) ve 17 05 06 (17 05 05 dışındaki dip tarama çamuru) atık kodları ile atık olarak tanımlanmaktadır [3]; ancak DTM’ler pek çok alanda değerli hammadde olarak düşünülebilmektedir.

Ayrıca, ülkemizde 1970’lerin başından itibaren teknolojik gelişmeler ve sanayileşmeyi takip eden hızlı kentleşme ve nüfus artışının bir sonucu olarak, endüstriyel süreçlerden kaynaklanan yüksek miktarlardaki atıklar çevre için bir tehdit haline gelmiştir. Türkiye’de termik santrallerden her yıl yaklaşık 18 milyon ton uçucu kül (UK) (AYY EK-IV’e göre atık kodu 10 01 02 (tehlikesiz atık)); döküm endüstrisinden ise 300.000 ton/yıl atık döküm kumu (ADK) (AYY EK-IV’e göre atık kodu 10 09 07 (M)) açığa çıkmakta olup, bu endüstriyel atıklar genellikle, yüksek maliyetli olan, geniş alanlara ihtiyaç duyulan ve uzun dönem izleme gerektiren düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir [4, 5]. Diğer taraftan, endüstriyel atıkların bertarafı da ağır metal içerikleri ve sızma potansiyelleri sebebiyle sorun yaratmaktadır. Bu kapsamda, söz konusu atıkların sürdürülebilir bir yaklaşımla [6, 7] ikincil hammaddelere dönüştürülmesi, özellikle “Döngüsel Ekonomi”, “Sıfır Atık” ve “Sürdürülebilir Kalkınma, Sürdürülebilir Üretim” kavramlarının Bakanlıklar düzeyinde önem arz ettiği günümüzde, oldukça talep görmektedir [8]. Yapay hafif (kaba) agrega (YHA) özelliklerinin eldesi için sediment, atık cam ve silisli toprak [9], atık yakma tesisi UK [10], palmiye kabuğu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu [11], arıtma çamuru külü [12], uçucu kül [13, 14], atık seramik tozu [15], metal çamuru [16], maden atıkları, metal çamuru, şeyl ve atık yakma tesisi UK [17, 18] gibi malzemelerin granülasyonu ve sinterlenmesi, bu atıkların geri kazanım yollarından birisidir. Endüstriyel atıklardaki ağır metal içerikleri sinterleme işlemi sırasında silikat yapı içinde hapsedilmekte; böylece, herhangi bir çevresel riske sebebiyet vermeyen çevre dostu YHA elde edilmektedir [16].

Pek çok bilim adamı dünyada sınırlı miktarlarda bulunan doğal kaynakların kullanımını azaltmak için deniz/nehir sedimanlarının tek başına [19, 20] ve/veya atık cam [21], arıtma çamuru [22, 23], cam tozu [24] ve/veya atık yakma tesisi UK [25, 26] ilavesi ile YHA üretiminde sürdürülebilir

kullanımları konusuna odaklanmıştır. Ama yine de, DTM’lerin kömür UK ve ADK ile birlikte faydalı kullanımı yoluyla YHA üretimine ilişkin bilinen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu atıkların denize boşaltımı/bertarafı yerine YHA üretiminde hammadde olarak faydalı kullanımları, küresel boyutta çevre için artan bir baskı oluşturmak yerine önemli ekonomik kazanç sağlayacaktır. Ayrıca, UK’nın bağlayıcılık özelliğinin iyi olması ve SiO₂ içerikleri göreceli düşük olan DTM’ler ve UK’ya göre, ADK’nın yüksek SiO₂ içeriği bulunması sebebiyle, YHA üretimine olumlu katkı yapacağı düşünülmüştür.

Ülkemizde DTM’lerle ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; DTM’lerin ince agrega olarak hazır betonda [27] ve iyileştirilmiş yüzey toprağı olarak çevre düzenlemelerinde (peyzajda) [28] kullanımı ile DTM’lerin çevresel etkilerinin belirlenmesi [29] çalışmaları göze çarpmaktadır. DTM’lerin faydalı kullanımı konusundaki diğer çalışmalar ise; DTM’lerin karayolu dolgularında kullanımı [30], düzenli depolama tesislerinde (DDT) günlük ara örtü olarak uygunlukları [31] ve geo teknik açıdan özelliklerinin araştırılması [32] olarak sayılabilir. Atıkların geri kazanımı konusunda yapılan çalışmalara ise örnek olarak; atık fosfojipslerin yapı malzemesi olarak ekonomiye geri kazandırılması [33], atık cam ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların özellikleri [34], uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli [35], cam elyaf takviyeli polyester (CTP) boru üretim atığı ilaveli polivinilklorür (PVC) matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi [36], geri dönüşümlü iri agregaların beton özelliklerine etkisi [37], deri arıtma çamuru kompostu ilavesiye gerçekleştirilen çim yetiştiriciliğinde Cr, Cu, Zn ve Ni metallerinin kimyasal dağılımı ve bitkiye transferi [38] verilebilir. Ayrıca, uçucu kül ikamesinin ve mikro çelik lif takviyesinin çatlak oluşumunu azaltarak beton donatı korozyonuna karşı etkisi [39], yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, kireçtaşı tozu ve doğal kum kullanılarak üretilen epoksi esaslı kendiliğinden yerleşen harçların reolojik özelliklerinin belirlenmesi [40] de atıklarla ilgili yapılan diğer çalışmalar arasında sayılabilir. Dolayısıyla, DTM’lerin diğer endüstriyel atıklar ile birlikte faydalı kullanımı/geri kazanımı yolu ile YHA üretimine ilişkin bilinen bir çalışmaya ulusal bazda da rastlanmıştır. Bu çalışma ile hem DTM’lerin UK ve ADK gibi endüstriyel atıklar ile YHA üretiminde hammadde olarak kullanılması konusunda literatüre katkıda bulunulmuş olunacak, hem de ülkemizde yüksek miktarlarda açığa çıkan bu tür atıkların ekonomiye kazandırılması yolunda önemli bir adım atılmış olunacaktır.

YHA üretiminde ilk patentin alındığı 1908’den itibaren, sinterleme işlemi ile birlikte döner fırın teknolojilerinin kullanılması ile önemli başarılar elde edilmiş; bu sayede, YHA endüstrisinde Birleşik Devletler ve Avrupa ülkeleri başta olmak üzere 1950’li yıllara kadar sürekli ilerlemeler kaydedilmiştir [12]. Daha sonra, YHA üretim sürecinin gelişimi için araştırmacılar, endüstriyel atıkları hammadde

olarak doğal kaynakların yerine ikame ederek kullanmayı amaçlamışlardır [21, 25]. Günümüzde, YHA'lar yapısal ve yapısal olmayan betonlar ile prekast üretiminde kaba agrega olarak tercih edilebilmektedir [25, 26].

Bu çalışmanın amacı YHA üretiminde DTM, UK ve ADK'nın birlikte kullanımının etkisini araştırmak; ayrıca, sinterleme sıcaklığı, ısıtma hızı ve sinterleme süresinin, üretilen yapay agregaların (YHA'ların) fiziksel, mekanik, mineralojik, mikro-yapısal ve sızma potansiyelleri üzerindeki etkilerini belirlemektir. DTM'nin UK ve ADK ile birlikte sentetik YHA üretiminde hammadde olarak kullanımı, endüstriyel atıkların yapay YHA'lara dönüştürülerek geri kazanımı için değerli bilgiler sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM(MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

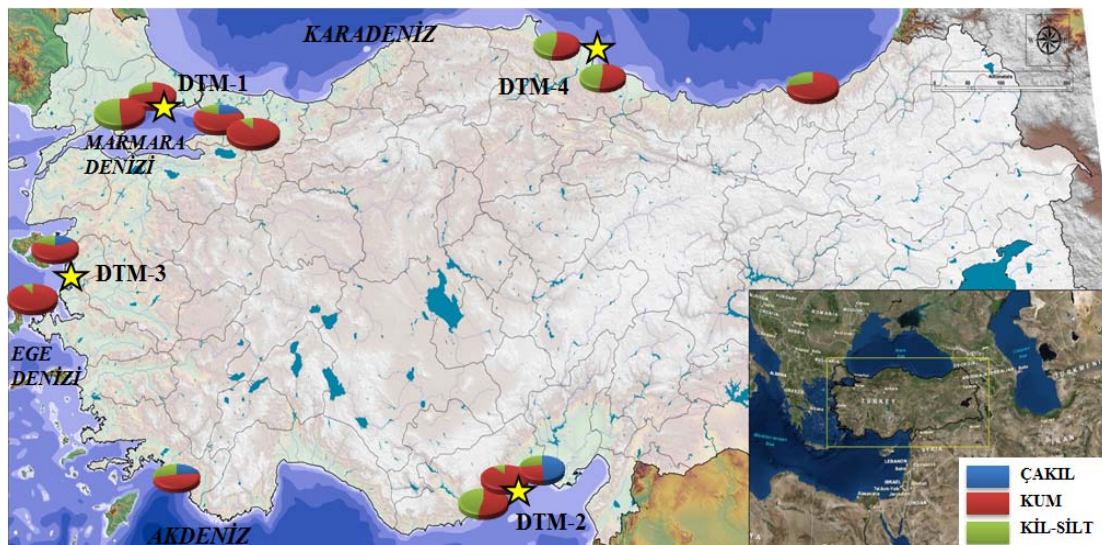
Bu çalışmada kullanılan DTM örnekleri, İstanbul Ambarlı Limanı (DTM-1), Mersin Erdemli Balıkçı Barınağı (DTM-2), İzmir PETKİM Konteyner Limanı (DTM-3) ve Samsun Limanı (DTM-4)'nda, sırasıyla, kovalı tarak gemisi, ekskavatör, kovalı tarak gemisi ve kepečli tarak gemisi ile gerçekleştirilen dip tarama faaliyetleri sırasında kompozit olarak alınmıştır. 111G036 no.lu ve "Deniz Dip Tarama Uygulamaları ve Dip Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi (DİPTAR)" isimli TÜBİTAK KAMAG Projesindeki [41] toplam on üç pilot bölge arasından seçilen bu dört örnekleme bölgesi, ülkemizin Marmara Denizi, Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz kıyılarında yer almakta olup, Şekil 1'de DİPTAR Projesindeki on üç pilot bölge ve ilgili DTM tane boyutu dağılım grafikleri ile birlikte verilmiştir. Söz konusu on üç pilot bölge için ortalama tane boyutu dağılımının sırasıyla kum (%62,38), silt-kil (%28,92)

ve kumdan (%8,69) oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmaya konu olan dört örnekleme bölgesi konum olarak birbirinden uzakta olmasına karşın, Türkiye'nin ortalama tane boyutu dağılımını yansıtmak üzere, ekonomik yön göz ardı edilerek, DTM-1, DTM-2, DTM-3 ve DTM-4 kodlu numunelerin karıştırılmasıyla elde edilen kompozit DTM numunesi kullanılmıştır [27]. Kömür UK ve ADK ise, sırasıyla, Çatalağazı Termik Santrali (Zonguldak) ve AKMETAL Dökümhane Tesisi (İstanbul)'nden temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziko-kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir. DTM'ler temel olarak ince ve kaba kumdan, UK ve ADK ise sırasıyla ince kum/kil-silt ve çakıldan meydana gelmektedir. DTM'lerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS)'ne göre; siltli kum (SM), kötü derecelendirilmiş siltli kum (SM-SP) ve killi kum (SC) sınıfına dahil oldukları sonucuna ulaşılmıştır. DTM'ler için USCS'ye göre belirlenen sınıfların, DTM'lerin mineralojik analizleri ile de uyum gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, plastisite indeksi (PI) çok yüksek (%54) olan ham DTM-3 dışındaki tüm DTM'lerin non-plastik (NP) olduğu tespit edilmiştir.

DTM örnekleri, YHA üretimine yönelik malzeme kalitelerinin artırılması amacı ile, ilk olarak DTM-su oranı ağırlıkça 1:5 olacak şekilde yıkama (Cl^- and SO_4^{2-} içeriklerini azaltmak için tuz giderimi.), filtre-pres susuzlaştırma (Zeren Filtre, İstanbul) ve $105^{\circ}C$ 'de kurutma gibi ön-arıtma işlemlerine tabii tutulmuşlardır.

Özer Erdoğan vd. [27] tarafından gerçekleştirilen bir önceki çalışma göz önünde bulundurularak, dört DTM numunesinin (ağırlıkça %40 DTM-1, %40 DTM-2, %10 DTM-3 ve %10 DTM-4) karıştırılmasıyla elde edilen kompozit DTM örneği bu çalışmada da kullanılmıştır. Hammaddelerin tane boyutu dağılımlarının granülasyon işleminde yüksek öneme sahip



Şekil 1. Çalışmadaki dört örnekleme bölgesi ile birlikte DİPTAR Projesi'ndeki on üç pilot bölge ve ilgili DTM tane boyutu dağılım grafikleri

(Four sampling regions of the study together with the thirteen pilot regions of DIPTAR Project and relevant DM particle size distribution charts)

Tablo 1. Hammaddelerin fiziko-kimyasal ve mineralojik analiz sonuçları
(Physico-chemical and mineralogical analysis results of raw materials)

Parametre	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	UK	ADK	Yöntem
Nem içeriği (%ağ.)	26,15 (0,34)	30,59 (0,40)	24,00 (0,31)	40,35 (0,52)	1,30 (0,02)	0,53 (0,01)	TS 9546 EN
Katı madde içeriği (%ağ.)	73,85 (0,96)	69,41 (0,90)	76,00 (0,99)	59,65 (0,78)	98,70 (1,29)	99,47 (1,30)	12880:2002
pH (sulu çözelti)	9,38 (0,06)	8,89 (0,06)	8,92 (0,06)	8,91 (0,06)	10,56 (0,07)	9,92 (0,06)	BS EN 12176:1998
İletkenlik (mS/cm) (sulu çözelti)	2,28 (0,05)	3,48 (0,08)	3,76 (0,08)	2,70 (0,06)	1,53 (0,03)	0,45 (0,01)	SM-2510B
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,64 (0,03)	2,54 (0,03)	2,46 (0,03)	2,50 (0,03)	2,01 (0,02)	2,96 (0,04)	TS EN 1097- 6:2013
Organik madde miktarı (%ağ.)	2,26 (0,01)	1,18 (0,01)	5,01 (0,02)	2,90 (0,01)	<0,10	2,50 (0,01)	TS
İnorganik madde miktarı (%ağ.)	71,59 (0,47)	68,23 (0,45)	70,99 (0,47)	56,75 (0,37)	98,70 (0,64)	97,50 (0,63)	8336:2008
Tane boyutu dağılımı							
Çakıl (>2 mm)	0,95 (0,03)	0,74 (0,02)	40,36 (0,63)	10,56 (0,16)	9,26 (0,14)	95,50 (1,44)	Yaş elek analizi
Kaba kum (2 mm-200 µm)	26,81 (0,41)	39,60 (0,59)	36,86 (0,58)	11,90 (0,18)	16,07 (0,24)	3,50 (0,05)	
İnce kum (200 µm-63 µm)	34,93 (0,55)	58,2 (0,91)	10,13 (0,16)	45,94 (0,72)	52,89 (0,83)	0,75 (0,01)	
Silt-Kil (<63 µm)	37,31 (0,56)	1,46 (0,02)	12,65 (0,19)	31,60 (0,47)	21,78 (0,32)	0,25 (0,01)	
Likit limit (LL) %	NP	NP	80	NP	59	NP	İşletme içi metod
Plastik Limit (PL) %	NP	NP	26	NP	27	NP	
Plastisite İndeksi (PI) %	NP	NP	54	NP	32	NP	
USCS Grup Sembolü	SM	SP-SM	SC	SM	CL	SM	
USCS Sınıfı	Siltli kum	Kötü dereceli siltli kum	Killi kum	Siltli kum	Temiz kil	Siltli kum	
Mineraller (%ağ.)							
Kuvars. SiO ₂	40,4	28,9	12,1	30,2	53,1	94,8	İşletme içi XRD metodu
Mineraller (%ağ.)	12,8	4,7	12,8	16,3	25,7	-	
Kuvars. SiO ₂	29,7	15,3	61,1	30,1	-	-	
Illit. (K.H ₃ O)Al ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	13,5	28,2	0,9	11,6	-	-	
Feldispat	-	-	0,5	3,4	5,7	-	
Kalsit. CaCO ₃	-	-	2,7	1,3	3,6	-	
Dolomit. CaMg(CO ₃) ₂	2,1	4,5	1,2	1,1	3,4	-	
Anhidrit CaSO ₄	-	-	-	-	1,3	-	
Hematit. Fe ₂ O ₃	-	4,5	1,6	-	-	-	
Anataz. TiO ₂	-	9,8	-	-	-	-	
Diopsit. CaMg(SiO ₃) ₂	-	-	1,5	-	3,4	1,2	
Lizardit. Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-	-	-	-	-	1,6	
Kristabolit. SiO ₂	-	-	-	-	-	2,3	
Kromit. (Fe, Mg)Cr ₂ O ₄	-	-	-	-	-	-	
Magnetit. Fe ₃ O ₄	-	-	-	-	-	-	

olması nedeniyle, kompozit DTM ve ADK numuneleri, benzer tane boyutuna sahip olmaları için bilyalı öğütücüde öğütülmüşler ve 300 µm'luk elekten geçirilmişlerdir. UK ise içerisindeki toplanmış taneciklerin dağıtılması için 300 µm'luk elekten geçirilmiştir. Çalışmada kullanılan

hammadelerin (DTM'ler, UK ve ADK) sızma potansiyelleri 26.03.2010 tarihli ve R.G.27533 sayılı "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ADDDY)-Ek2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri" [42] ile birlikte Tablo 2 ve Tablo 3'te

Tablo 2. DTM'lerin "ADDDY-Ek2" kalite kriterlerine göre sızma potansiyelleri
(Leachabilities of DMs according to the "ADDDY-Appendix2" quality criteria)

Parametre	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	ADDDY-Ek2 limit değerleri			Yöntem
					Inert Atık III.Sınıf	Tehlikesiz Atık II.Sınıf	Tehlikeli Atık I.Sınıf	
Eluat (L/S=10 L/kg)								
As (mg/l)	0,013 (0,0012)	0,0028 (0,0007)	0,0287 (0,003)	0,0118 (0,001)	0,05	0,2	2,5	
Ba (mg/l)	0,047 (0,004)	0,018 (0,002)	0,0508 (0,004)	0,0505 (0,004)	2	10	30	
Cd (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	4	100	500	EPA 6020A
Cr (mg/l)	<0,001	<0,001	0,0010 (0,0001)	0,0882 (0,0005)	0,05	1	7	
Cu (mg/l)	0,0084 (0,0007)	0,0078 (0,0007)	0,0149 (0,0001)	0,0311 (0,003)	0,2	5	10	
Hg (µg/l)	<0,13	<0,13	<0,13	<0,13	1	20	200	SM-3112
Mo (mg/l)	0,0059 (0,0003)	0,00696 (0,0004)	0,0374 (0,002)	0,0202 (0,001)	0,05	1	3	
Ni (mg/l)	0,0017 (0,0002)	0,0050 (0,0002)	0,0082 (0,0009)	0,0116 (0,001)	0,04	1	4	
Pb (mg/l)	0,0011 (0,0002)	0,0008 (0,00014)	0,0012 (0,0002)	0,017 (0,003)	0,05	1	5	EPA 6020A
Sb (mg/l)	0,0025 (0,0006)	0,0008 (0,0002)	0,0029 (0,0007)	0,0061 (0,001)	0,006	0,07	0,5	
Se (mg/l)	0,0027 (0,0006)	0,0011 (0,0002)	0,0011 (0,0002)	<0,001	0,01	0,05	0,7	
Zn (mg/l)	<0,005	0,0068 (0,0004)	0,0155 (0,0009)	0,0419 (0,002)	0,4	5	20	
Cl ⁻ (mg/l)	600,6 (33)	1,001 (55)	950,00 (52)	704,80 (39)	80	1500	2500	
F ⁻ (mg/l)	0,2 (0,01)	0,97 (0,5)	0,670 (0,03)	0,340 (0,02)	1	15	50	SM-4110B
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	102,9 (1,1)	155,4 (1,7)	186,0 (2)	94,7 (1)	100	2000	5000	
ÇOK (mg/l)	<0,5	1,5 (0,1)	2,1 (0,1)	4,1 (0,3)	50	80	100	SM-5310B
TÇKM (mg/l)	1204 (23)	2006 (38)	2040 (39)	1559 (30)	400	6000	10000	SM-2540C
Fenol (mg/l)	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0,1	-	-	SM-5530D
Orijinal katı								
TOK (mg/kg)	<1884	<1884	2318 (47)	9078 (184)	30000	50000	60000	SM-5310B
BTEX (mg/kg)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	6	-	-	EPA 8015C
PCB (mg/kg)	<0,10	0,49 (0,03)	<0,10	<0,10	1	-	-	ISO 10382: 2015
Mineral yağ (mg/kg)	79,3 (3)	<65	<65	162 (6)	500	-	-	BS EN 14039
Yanma kaybı (%)	<2,30	4,11 (0,2)	4,72 (0,2)	4,19 (0,2)	-	-	10%	TS EN 12879:2003

verilmiştir. TS EN 12457-4:2004 sızma testi sonuçlarına göre, DTM eluatlarında Sb, Cr, Cl⁻, SO₄²⁻ ve Toplam Çözünen Katı Madde (TÇKM) konsantrasyonlarının ADDDY-Ek2 kriterleri tablosunda 2-B) Tehlikesiz Atıkların Düzenli Depolanabilmesi Kriteri II. Sınıf depolama tesisleri sınır değerlerine uygun oldukları saptanmıştır. Yine TS EN 12457-4:2004 standardına göre, ADK'nın Se ve Çözünmüş

Organik Karbon (ÇOK) konsantrasyonları nedeniyle ADDDY-Ek2 kriterleri tablosunda I. Sınıf (tehlikeli atık), uçucu külün ise TÇKM konsantrasyonu nedeniyle ADDDY-Ek2 kriterleri tablosunda II. Sınıf (tehlikesiz atık) düzenli depolama tesisinde depolanması gerektiği tespit edilmiştir. Hammaddelerin (DTM'ler, UK ve ADK) asit ile parçalama sonrası İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon

Tablo 3. UK ve ADK'nın "ADDDY-Ek 2" kalite kriterlerine göre sızma potansiyelleri
(Leachabilities of FA and WFS according to the "ADDDY-Appendix 2" quality criteria)

Parametre	UK	ADK	ADDDY-Ek2 limit değerleri			Yöntem
			Inert Atık III.Sınıf	Tehlikesiz Atık II.Sınıf	Tehlikeli Atık I.Sınıf	
Eluat (L/S=10 L/kg)						
As (mg/l)	0,0074 (0,0006)	0,0430 (0,004)	0,05	0,2	2,5	
Ba (mg/l)	0,0786 (0,007)	0,0041 (0,0003)	2	10	30	
Cd (µg/l)	0,2 (0,01)	1,3 (0,065)	4	100	500	EPA 6020A
Cr (mg/l)	0,0080 (0,0001)	0,2110 (0,001)	0,05	1	7	
Cu (mg/l)	0,0250 (0,002)	0,0120 (0,001)	0,2	5	10	
Hg (µg/l)	<0,13	<0,13	1	20	200	SM-3112
Mo (mg/l)	0,0078 (0,0004)	0,401 (0,02)	0,05	1	3	
Ni (mg/l)	0,0111 (0,0013)	<0,0005	0,04	1	4	
Pb (mg/l)	0,012 (0,002)	0,001 (0,0001)	0,05	1	5	EPA 6020A
Sb (mg/l)	0,0014 (0,0003)	0,0394 (0,009)	0,006	0,07	0,5	
Se (mg/l)	0,002 (0,0004)	0,174 (0,04)	0,01	0,05	0,7	
Zn (mg/l)	0,0270 (0,002)	0,0132 (0,0008)	0,4	5	20	
Cl ⁻ (mg/l)	0,75 (0,04)	0,47 (0,02)	80	1500	2500	
F ⁻ (mg/l)	0,010 (0,0005)	0,003 (0,0001)	1	15	50	SM-4110B
SO ₄ ⁻² (mg/l)	0,280 (0,003)	3,69 (0,04)	100	2000	5000	
ÇOK (mg/l)	0,57 (0,04)	88,6 (5,93)	50	80	100	SM-5310B
TÇKM (mg/l)	498 (9)	672 (12,8)	400	6000	10000	SM-2540C
Fenol (mg/l)	<0,07	<0,07	0.1	-	-	SM-5530D
Orijinal katı						
TOK (mg/kg)	13891 (278)	5000 (101)	30000	50000	60000	SM-5310B
BTEX (mg/kg)	<0,5	<0,5	6	-	-	EPA 8015C
PCB (mg/kg)	<0,10	<0,10	1	-	-	ISO 10382:2015
Mineral yağ (mg/kg)	<65	<65	500	-	-	BS EN 14039
Yanma kaybı (%)	<2,30	<2,30	-	-	10%	TS EN 12879: 2003

Spektroskopisi (ICP-OES) (ISO 11885, EPA 7473) ile belirlenen ağır metal içerikleri Tablo 4'te tehlike kodları ve risk ibareleri ile birlikte verilmiştir. Hammaddelerin ağır metal içeriklerinin "AYY-Ek3B tehlikeli atık eşik konsantrasyonları"nın altında olduğu ve bu kriterler açısından herhangi bir çevresel risk teşkil etmeyecek düzeyde olduğu tespit edilmiştir [3]. Hammaddelerin (ıslah DTM'ler, ıslah kompozit DTM, UK, ADK) Philips PW-2404 X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) (işletme içi

metod) kullanılarak tespit edilen kimyasal kompozisyonları Tablo 5'te verilmiştir. Bu kimyasal bileşenler, Riley'in üçlü faz diyagramındaki kil genleşme bölgesi ile ilişkili olacak şekilde, YHA karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılmıştır [43]. Islah kompozit DTM'de ana bileşenlerin SiO₂ (%51,704), CaO (%16,121%) ve Al₂O₃ (%11,227%) olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, UK'nin başlıca SiO₂ (%53,258) ve Al₂O₃ (%29,457)'ten oluştuğu ve ADK'daki ana bileşenin SiO₂ (%94,976%) olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4. DTM'ler, UK ve ADK'nın "AYY-Ek 3B" kalite kriterlerine göre ağır metal içerikleri
(Heavy metal contents of DMs, FA and WFS according to the "AYY-Appendix 3B" quality criteria)

Parametre (mg/kg)	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	UK	ADK	Tehlike kodları	Risk ibareleri	AYY-Ek3B limitleri
Pb	11,80 (0,70)	5,64 (0,3)	13,00 (0,8)	35,40 (2,1)	10,38 (0,61)	2,49 (0,15)	H: 5, 6, 10, 14	R: 33, 61, 62, 26/27/28, 20/22, 50/53	1000 (0,1%)
Cd	<0,1	<0,1	0,43 (0,03)	0,17 (0,01)	<0,1	<0,1	H: 6, 7, 10, 11, 14	R: 26, 45, 62, 63, 68, 48/23/25, 50/53	1000 (0,1%)
Cr	85 (3)	900 (32)	140 (5)	111 (4)	84,40 (3)	2,31 (0,08)	H: 3A, 7, 14	R: 11, 40, 52	10000 (1%)
Cu	15,2 (1,0)	17,4 (1)	23 (2)	46 (4)	35,07 (3)	6,05 (0,5)	H: 3A, 4, 14	R: 11, 52, 36/37/38	20000 (20%)
Ni	37,3 (2)	687 (37)	132 (7)	55 (4)	32,05 (2)	54,10 (3)	H: 7, 13, 14	R: 40, 43, 48/23, 52/53	10000 (1%)
Zn	42 (2)	34,8 (2)	128 (6)	77 (4)	43,84 (2)	9,48 (0,4)	H: 3A, 14	R: 15, 17, 50/53	2500 (0,25%)
Hg	0,03 (0,005)	<0,01	2,33 (0,29)	0,09 (0,01)	0,154 (0,01)	<0,01	H: 6, 10, 14	R: 26, 61, 48/23, 50/53	1000 (0,1%)
As	7,90 (0,7)	8,43 (0,69)	347 (28,9)	12,80 (1,11)	14,22 (1,23)	3,19 (0,3)	H: 6, 14	R: 23/25, 50/53	2500 (0,25%)

Tablo 5. Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları (Chemical compositions of raw materials)

Bileşen	Islah DTM-1 (%)	Islah DTM-2 (%)	Islah DTM-3 (%)	Islah DTM-4 (%)	Islah Kompozit DTM (%)	UK (%)	ADK (%)
Na ₂ O	1,695	0,356	1,021	1,369	0,978	0,241	0,665
MgO	1,213	20,658	3,457	5,072	10,983	3,000	0,543
Al ₂ O ₃	12,868	5,500	17,166	13,075	11,227	29,457	1,163
SiO ₂	69,123	36,495	54,059	50,849	51,704	53,258	94,976
P ₂ O ₅	0,139	0,141	0,317	0,182	0,175	0,210	0,242
SO ₃	0,296	0,444	0,591	1,265	0,564	0,482	0,242
K ₂ O	2,427	0,330	2,568	1,880	1,480	4,536	0,454
CaO	9,564	28,291	11,595	19,623	16,121	1,554	0,240
TiO ₂	0,357	0,275	1,278	0,680	0,439	1,193	0,100
Cr ₂ O ₃	ND	0,130	ND	0,052	0,547	0,044	1,101
MnO ₂	0,065	0,145	0,198	0,148	0,142	0,083	ND
Fe ₂ O ₃	1,984	6,955	7,171	5,633	5,414	5,898	0,507
ZnO	ND	ND	ND	ND	0,001	0,025	ND
Rb	0,007	ND	0,007	ND	0,004	0,022	ND
SrO	0,047	0,029	0,100	0,059	0,044	0,036	ND
ZrO ₂	ND	0,004	0,047	0,012	0,019	0,038	0,008
BaO	ND	ND	0,223	ND	0,059	0,178	ND
PbO	ND	ND	ND	ND	ND	0,022	ND
Cl	0,041	0,112	0,203	0,102	0,014	ND	ND
NiO	ND	0,138	ND	ND	0,087	ND	ND

2.2. Yöntem (Method)

2.2.1. Hafif agrega üretim yöntemi (Lightweight aggregate production procedure)

YHA'lar 43° eğim, 40 cm çap ve 11 cm derinliğe sahip peletleme diski (granülasyon cihazı) (Elektron Lab. Ankara) kullanılarak üretilmiştir. 50 devir/min dönme hızına sahip granülasyon cihazı ile 5-12 mm tane büyüklüğüne sahip YHA'lar elde edilmiştir.

YHA üretiminde sırasıyla A serisi, B serisi ve C serisi olmak üzere üç farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir YHA serisi için karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir. Granülasyon prosesinde öncelikle az miktarda karışım granülasyon cihazına alınmış ve devamlı su pürkürtme ve karışım ilavesi yapılarak dönmenin de etkisiyle granüller elde edilmiştir. YHA üretiminde ıslatıcı ajan olarak %17-20 oranında su kullanılmıştır. Granülasyon prosesi ile elde edilen granüller, sinterleme adımı öncesinde neminin tamamen uzaklaştırılması için 24 h süre ile 105°C'de kurutulmuştur.

Tablo 6. YHA'lar için karışım oranları ve sinterleme koşulları (Mix proportions and sintering conditions for LWAs)

Seri adı	YHA No	Kompozit DTM (%)	UK (%)	ADK (%)	Sinterleme sıcaklığı (°C)	Sinterleme süresi (min)	Isıtma hızı (°C/min)
A Serisi	A1	30	40	30	1190	20	10
	A2	30	40	30	1180	20	10
	A3	30	40	30	1170	20	10
	A4	30	40	30	1150	20	10
	A5	30	40	30	1100	20	10
	A6	30	40	30	1190	10	10
	A7	30	40	30	1190	10	5
	A8	30	40	30	1190	20	5
B Serisi	B1	40	35	25	1190	20	10
	B2	40	35	25	1180	20	10
	B3	40	35	25	1170	20	10
	B4	40	35	25	1150	20	10
	B5	40	35	25	1100	20	10
	B6	40	35	25	1190	10	10
	B7	40	35	25	1190	10	5
	B8	40	35	25	1190	20	5
C Serisi	C1	50	30	20	1190	20	10
	C2	50	30	20	1180	20	10
	C3	50	30	20	1170	20	10
	C4	50	30	20	1150	20	10
	C5	50	30	20	1100	20	10
	C6	50	30	20	1190	10	10
	C7	50	30	20	1190	10	5
	C8	50	30	20	1190	20	5

Sinterleme adımıyla sırasıyla sinterleme sıcaklığı, sinterleme periyodu ve ısıtma hızının YHA performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, sinterleme sıcaklığı olarak; 1100, 1150, 1170, 1180 ve 1190°C olmak üzere 5 farklı sıcaklık; sinterleme sıcaklığında bekleme süresi olarak, 10 ve 20 min; ısıtma hızı olarak ise 5 ve 10°C/min seçilmiştir. 1100°C sinterleme sıcaklığının altında yapılan ön denemelerde YHA özelliklerinin sağlanmadığı, 1200°C sinterleme sıcaklığında yapılan ön denemede ise YHA karışımlarının krozelere kaydığı gözlenmiştir. Bu nedenle sinterleme sıcaklık aralığı 1100-1190°C ile sınırlandırılmıştır. Sinterleme sıcaklığı arttıkça, YHA'ların fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştiği belirtilmiştir [12, 21]. Her bir YHA serisi için sinterleme koşulları da Tablo 6'da verilmiştir. YHA çalışması kapsamında farklı fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip 24 farklı YHA üretimi yapılmıştır.

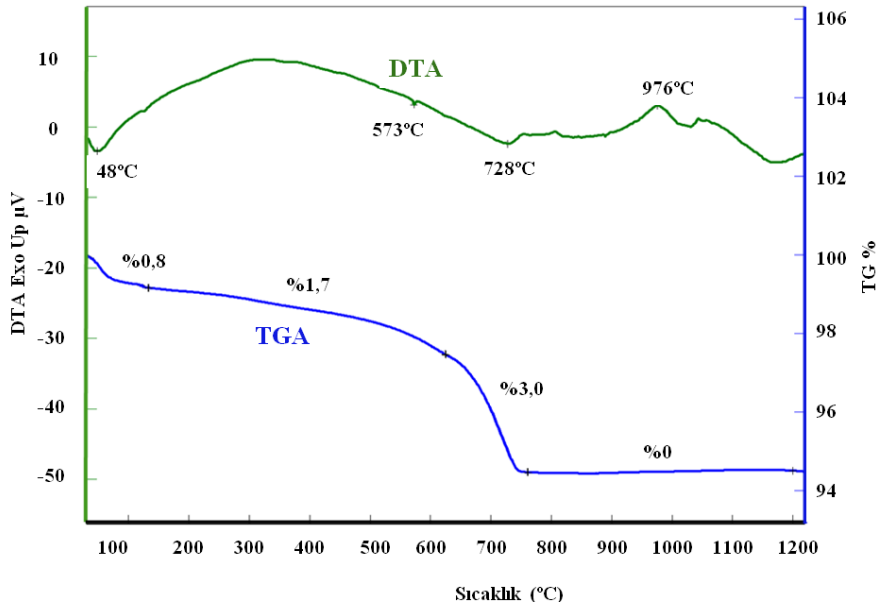
Agrega karışımlarının sıcaklık artışına bağlı ısıl davranışını incelemek amacıyla A serisi ve C serisi agrega karışımını da temsil edici olması açısından B serisi agrega karışımının termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termal analizleri (DTA) SEIKO ExStar 6300 Termal Analizör cihazı ile 5°C/min ısıtma hızı kullanılarak 1200°C'ye kadar incelenmiştir. DTA grafiğinde (Şekil 2) 48°C'de görülen endotermik pik karışımda adsorbe olan moleküler suyun çıkışını, 573°C'de görülen endotermik pik ise kimyasal olarak olarak bağlı olan suyun buharlaşmasını (illitin dehidroksilasyonu) işaret etmiştir [20, 44]. 728°C'de (kalsit ve dolomit dekarbonasyon reaksiyonları [45], 700-

875°C'de (illitin ayrışması) [46] ve 1150°C'de (kristobalit oluşumu) görülen endotermik pikler [47]; 976°C'de görülen ekzotermik pik (anorthit ve diyopsit gibi yeni minerallerin oluşumu) [48] kristal faz oluşumu veya dönüşümünü doğrulamaktadır.

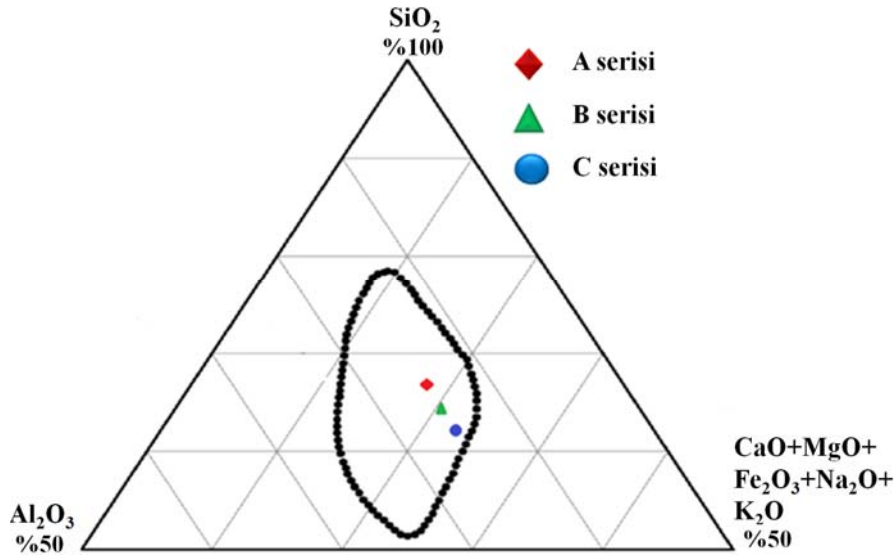
Kalsiyum içeren mineraller, 900°C ve üzeri sıcaklıklarda anorthit ve diyopsit minerallerinin oluşumuna neden olmuş olup söz konusu mineraller, üretilen YHA'ların XRD grafiklerinde de gözlenmiştir [49]. Kalsiyum içeren mineraller, 900°C ve üzeri sıcaklıklarda anorthit ve diyopsit minerallerinin oluşumuna neden olmuş olup söz konusu mineraller, üretilen YHA'ların XRD grafiklerinde de gözlenmiştir.

2.2.2. Sinterleme işlemi ve genleşme (Sintering procedure and expansion)

A serisi, B serisi ve C serisi karışımlarının kimyasal kompozisyonları, SiO₂-Al₂O₃-diğer oksit bileşikleri (CaO+MgO+Fe₂O₃+Na₂O+K₂O), dikkate alınarak Riley'in üçlü faz diyagramında işaretlenmişlerdir (Şekil 3). Karışımların ana bileşenleri sırasıyla; SiO₂ (%62,08-66,60), Al₂O₃ (%15,03-15,90) ve diğer oksit bileşikleri (%17,50-22,90)'dir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, üç YHA karışımı da, Riley'in genleşme alanının içerisinde yer alacak şekilde belirlenmiştir [43]. YHA üretiminin gerekliliklerini sağlamak için, karışımların kimyasal kompozisyonlarının, Riley'in genleşme alanı içerisinde yer alması gerekmektedir.



Şekil 2. Karışım B için TGA ve DTA eğrileri (TGA and DTA curves for Mix.B)



Şekil 3. A Serisi, B Serisi ve C Serisi için Riley'in üçlü faz diyagramı (Riley's ternary phase diagram for Mix.A, Mix.B and Mix.C)

2.2.3. Üretilen YHA'ların kalite testleri (Quality tests of produced LWAs)

YHA'ların fiziksel performans özelliklerinin belirlenmesi kapsamında tanecik yoğunluğu (ASTM C127-15), kütle kaybı (TS EN 12879:2003), 30-min and 24-saat su emme (%) (ASTM C127-15), dış görünüş (görsel) ve yüzey yapısı (görsel) incelenmiştir. YHA'ların mekanik özellikleri agrega tane kırılma yükü (kN), agrega tane kırılma dayanımı (MPa) ve kırılma dayanımı (MPa) testleri gerçekleştirilerek belirlenmiştir. YHA'lar, 2000 kN kapasiteli tam otomatik beton presinde (Elektron Lab. Ankara) 2 kN/s yükleme hızında tek tek kırılmıştır. Her bir YHA'nın agrega tane kırılma yükü YHA'ya tek bir noktadan uygulanan yük

neticesinde kırıldığı andaki kuvvet olarak ölçülmüştür. Bu testte, en az 5 YHA kırılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır [25, 50]. YHA'ların agrega tane kırılma basınç dayanımları Eş.1'de verilen formüle göre hesaplanmıştır [51, 52]:

$$Tane\ kırılma\ basınç\ dayanımı\ (MPa) = 2.8 * \frac{P}{\pi} * D^2\ (1)$$

Eş. 1'de P, kırılma yükünü (kN); D (cm) ise YHA'nın çapını ifade etmektedir. Sinterlenmiş YHA'ların kırılma dayanımı; 75 mm iç çapa ve 100 mm yüksekliğe sahip çelik silindir kap içerisinde pistonun 20 mm yol kat ettiği andaki dayanım ölçülmüştür. Kırılma dayanımı yükün, silindirin kesit alanına oranlanması ile hesaplanmıştır [6, 53].

YHA'ların morfolojisini incelemek amacıyla; A serisi, B serisi ve C serisi YHA'lar ile gerçekleştirilen fiziksel ve mekanik performans testleri neticesinde her bir agrega serisinde en iyi performansa sahip YHA'ların kesitleri JEOL 6335F taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile görüntüler alınmıştır. Sinterlenmiş YHA'ların kalitatif faz-mineralojik analizleri Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1.5405$ Angstrom) kullanılarak Shimadzu XRD-2 6000 X-ışını Difraktometresi (XRD) ile gerçekleştirilmiştir.

A serisi, B serisi ve C serisi YHA'lar ile gerçekleştirilen fiziksel ve mekanik performans testleri neticesinde her bir agrega serisinde en iyi performansa sahip YHA için TS EN 12457-4:2004 standardına göre ADDDY-EK2 sızma (liç) testi gerçekleştirilmiştir [42].

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Üretilen YHA'ların fiziksel ve mekanik özelliklerine dair sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. A serisi, B serisi ve C serisi YHA'lar kendi içinde en iyi performans özelliklerine sahip YHA'dan başlanarak azalan performansa göre sıralanmıştır.

3.1. Üretilen YHA'ların fiziksel özellikleri (Physical properties of the produced LWAs)

3.1.1. Tane yoğunluğu (Particle density)

Farklı sinterleme koşullarında sinterlenen A serisi, B serisi ve C serisi YHA'ların tane yoğunlukları sırasıyla; 1,783-

Tablo 7. Üretilen YHA'ların fiziksel ve mekanik özellikleri (Physical and mechanical properties of the produced LWAs)

Numune Kodu	Fiziksel Özellikler				Mekanik Özellikler		
	Tane yoğunluğu (g/cm ³)	Kütle kaybı (%)	Su emme (%)		Tane kırılma yükü (kN), P	Agrega tane kırılma dayanımı (MPa)	Kırılma dayanımı (MPa)
A8	1,984	5,14	1,97	2,60	1,760	15,73	17,84
A7	1,980	4,93	2,57	3,15	1,510	13,45	16,41
A1	1,788	4,87	2,17	3,76	1,490	13,29	13,61
A6	1,972	4,83	3,36	5,17	1,246	11,11	12,85
A2	1,783	4,79	2,54	4,76	1,132	10,09	12,37
A3	1,916	4,78	4,95	5,82	1,110	9,89	12,27
A4	1,848	4,70	5,21	6,79	1,102	9,82	11,88
A5	1,842	4,54	7,54	9,00	0,842	7,51	8,94
B8	1,972	6,12	3,14	3,16	1,520	13,55	16,84
B7	1,942	6,00	3,56	4,58	1,490	13,30	14,89
B1	1,946	5,97	2,80	4,18	1,486	13,25	14,97
B6	1,916	5,92	4,18	5,95	1,140	10,16	15,04
B2	1,791	5,90	3,95	8,20	1,006	8,97	12,13
B3	1,894	5,87	5,48	7,80	0,910	8,11	10,45
B4	1,772	5,55	7,54	9,92	0,586	5,23	9,47
B5	1,814	4,79	10,67	12,94	0,480	4,28	8,77
C8	1,988	7,56	1,38	2,50	1,726	15,39	14,91
C7	1,984	7,13	2,17	3,74	1,720	15,35	13,69
C1	1,923	7,10	2,11	4,18	1,568	13,98	13,37
C6	1,902	7,05	2,95	3,97	1,412	12,60	12,61
C2	1,842	6,97	4,19	5,17	1,128	10,06	11,99
C3	1,866	6,85	5,35	6,60	0,890	7,90	9,82
C4	1,776	6,78	7,97	10,59	0,690	6,15	8,42
C5	1,770	6,48	11,95	14,59	0,408	3,64	8,01

1,984 g/cm³, 1,772-1,972 g/cm³ ve 1,770-1,988 g/cm³ aralıklarında ölçülmüştür (Tablo 7). Elde edilen tane yoğunluklarının YHA'lar için üst limit olan 2,000 g/cm³'den düşük olduğu görülmüştür [54, 55]. Söz konusu tane yoğunluğu sonuçlarının Wei ve Lin tarafından yapılan çalışma ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir [56]. Ayrıca, 1190°C sinterleme sıcaklığında üretilen agregaların ısıtma hızlarına göre tane yoğunluğu değişimi kıyaslandığında; 5°C/min ısıtma hızıyla elde edilen YHA'ların 10°C/min ısıtma hızıyla elde edilene göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlara, Guo vd. [57] tarafından yapılan çalışmada da ulaşılmıştır.

3.1.2. Kütle kaybı (Weight loss)

A serisi, B serisi ve C serisi YHA'ların kütle kayıpları sırasıyla %4,54-5,14, %4,79-6,12 ve %6,48-7,56 olarak belirlenmiştir (Tablo 7). Elde edilen sonuçlara göre, sinterleme sıcaklığının artışı ile kütle kaybı azalmıştır. Bununla birlikte, DTM'nin YHA karışımındaki oranının artışı ile kütle kaybı değerleri artış göstermiştir. Bu bulgulara, Wei vd. [21] tarafından yapılan çalışmada da ulaşılmıştır.

3.1.3. Su emme (Water absorption)

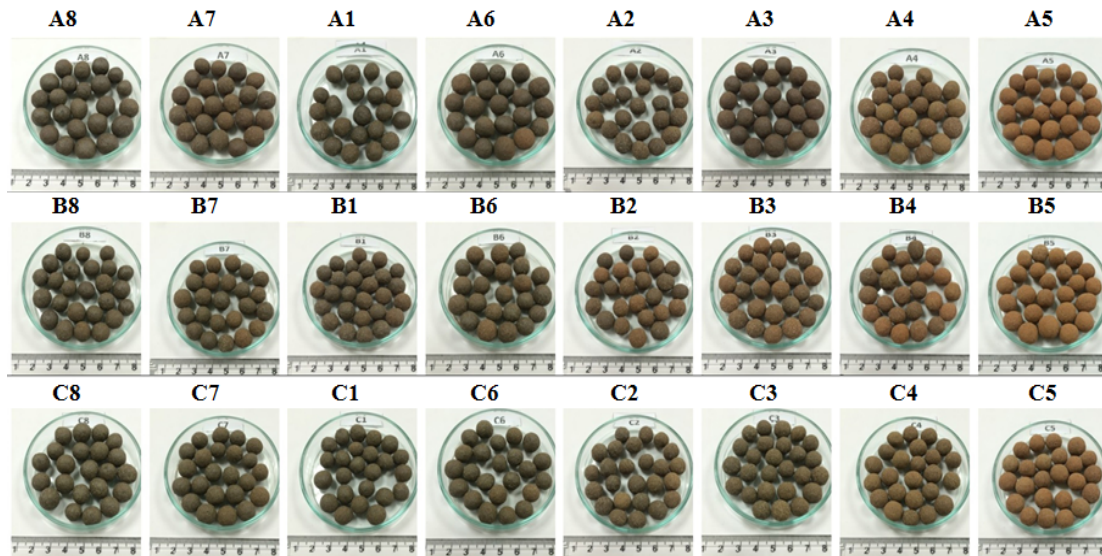
A serisi, B serisi ve C serisi YHA'ların 24 saatlik su emme sonuçları Tablo 7'de verilmiş olup A serisi, B serisi ve C serisi için su emme değerleri sırasıyla %2,60-9,00, %3,16-12,94 ve %2,50-14,59 olarak tespit edilmiştir. YHA karışımında DTM bileşiminin artması ile agregaların su emme kapasitesi artış göstermiştir. Wei vd. [21] tarafından yapılan çalışmada da bu sonuçlar elde edilmiştir. Her bir YHA serisindeki 30 min süreli su emme sonuçları 24 h süreli su emme sonuçlarından daha düşük olup 24 h süreli su emme sonuçları ile benzer davranış göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, su emme oranı sinterleme sıcaklığı artışı ile azalmıştır [25]. Bununla birlikte; ısıtma hızının azalması ve

sinterleme periyodunun artması ile su emme oranlarının düştüğü gözlenmiştir. Her bir serideki su emme oranları dikkate alındığında, minimum su emme oranları 1190°C sinterleme sıcaklığı, 5°C/min ısıtma hızı ve 20 min sinterleme periyodunda üretilen A8, B8 ve C8 numunelerinde tespit edilmiştir.

Su emme oranı, YHA'ların yüzey yapısı ile yakından ilgili olup vitrifiye olmuş kabuğa ve bağımsız gözenek dağılımına sahip YHA'larda düşük oranda gözlenmektedir [25, 58]. Huang vd. [17] vitrifiye yüzeye sahip olan YHA'ların su emme oranlarının %10'un altında olduğunu tespit etmiştir. Bununla birlikte, agregaların genel kullanım alanlarında 24 saatlik su emme oranlarının %20'nin altında olması gerekmekte olup [21, 59] üretilen YHA'ların tüm söz konusu limit değeri sağlamıştır. 1190°C sinterleme sıcaklığında üretilen YHA'ların beton üretiminde kullanılabileceği öngörülmüştür [21].

3.1.4. Üretilen YHA'ların dış görünüşü ve yüzey yapısı (External appearance and surface texture of the produced LWAs)

A serisi, B serisi ve C serisi toz agregası karışımlarının sinterlenmesi ile küresel yapıda, homojen şişme oranlarına sahip YHA'lar elde edilmiştir. Her bir seride üretilen YHA'lar azalan yüzey kalitesine göre sıralanarak Şekil 4'te verilmiştir. YHA'ların dış görünüşü ve yüzey yapısı incelendiğinde sinterleme sıcaklığının pürüzsüz ve vitrifiye yüzeye sahip YHA elde etmek için en önemli etken olduğu tespit edilmiştir. A serisi, B serisi ve C serisi için 1190°C sinterleme sıcaklığında üretilen YHA'ların yüzeyinin pürüzsüz ve parlak olduğu, ayrıca yüzeyinde çatlak olmadığı gözlenmiştir. 1190-1100°C sinterleme sıcaklıkları arasında agregaların yüzey kalitesindeki bozulma ile birlikte renklerinin griden kahverengiye değiştiği gözlenmiştir. YHA'ların vitrifiye hale gelmesi ile su emme oranlarında azalma gözlenmiş; buna karşın, sinterlemenin yetersiz olduğu, açık gözenek yapısına sahip YHA'larda yüksek su



Şekil 4. Üretilen YHA'ların dış görünüşü ve fiziksel yapısı (External appearance and surface texture of produced LWAs)

emme oranları gözlenmiştir. Elde edilen bulguların Cheeseman vd. [12] tarafından yapılan çalışma ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Üretilen YHA'ların mekanik özellikleri (Mechanical properties of the produced LWAs)

A serisi, B serisi ve C serisi YHA'ların tane kırılma yükü (kN), agrega tane kırılma dayanımı (MPa) ve kırılma dayanımı (MPa) Tablo 7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; sinterleme sıcaklığı artışı ile YHA bileşenlerinin genleşmesi (kabarması) hızlandığından, YHA'lara ilişkin tane kırılma yüklerinin ve kırılma dayanımlarının sinterleme sıcaklığı artışı ile artış gösterdiği gözlenmiştir [56]. Bununla birlikte, YHA karışımlarında DTM oranının artışı ile tane kırılma yükü ve kırılma dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, ısıtma hızı olarak 5°C/min ve sinterleme periyodu olarak 20 min seçildiğinde, agregaların mekanik dayanımlarının daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlara, Guo vd. [57] ile Yuan vd. [61] tarafından yapılan çalışmalarda da ulaşılmıştır.

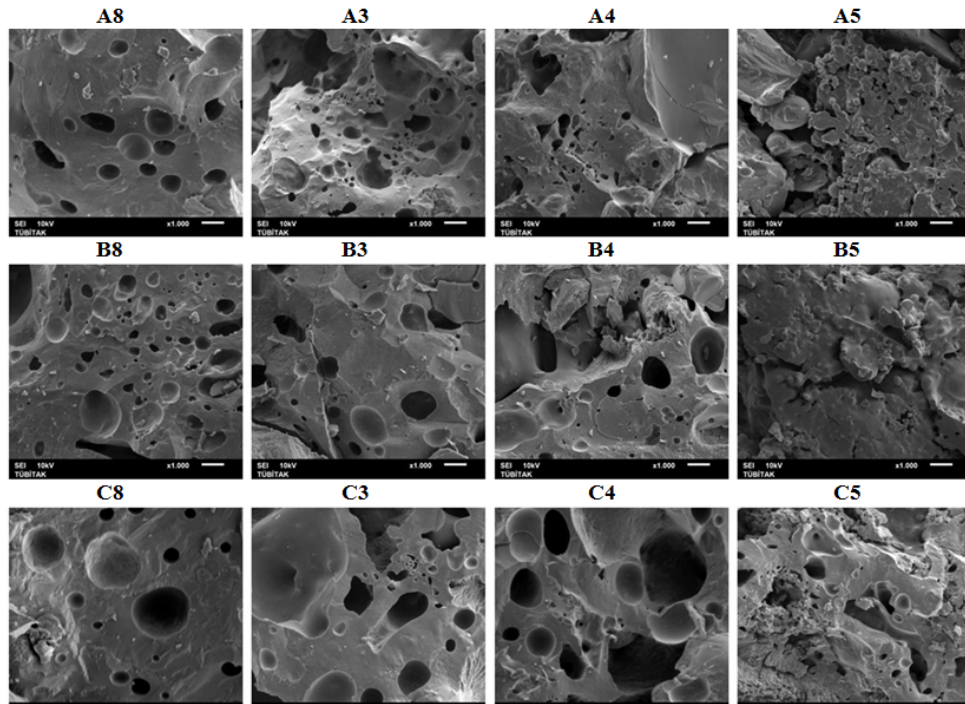
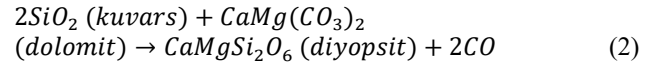
3.3. Üretilen YHA'ların mikroyapısal tespiti (Microstructural determination of the produced LWAs)

1190, 1170, 1150 ve 1100°C sıcaklıklarda üretilen YHA'ların SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. 1190°C sinterleme sıcaklığının her bir agrega serisinde vitröz faz ve matris oluşumunu desteklediği ve bu sayede üretilen YHA'ların camsı faza sahip olduğu, oluşan gözenekli yapının birbirinden bağımsız, büyük ve düzensiz morfolojiye sahip olduğu görülmüştür. Bu bağlamda; A8, B8 ve C8 kodlu YHA'ların daha düşük su emme oranına, daha yüksek tane yoğunluğuna ve daha yüksek mekanik dayanıma sahip

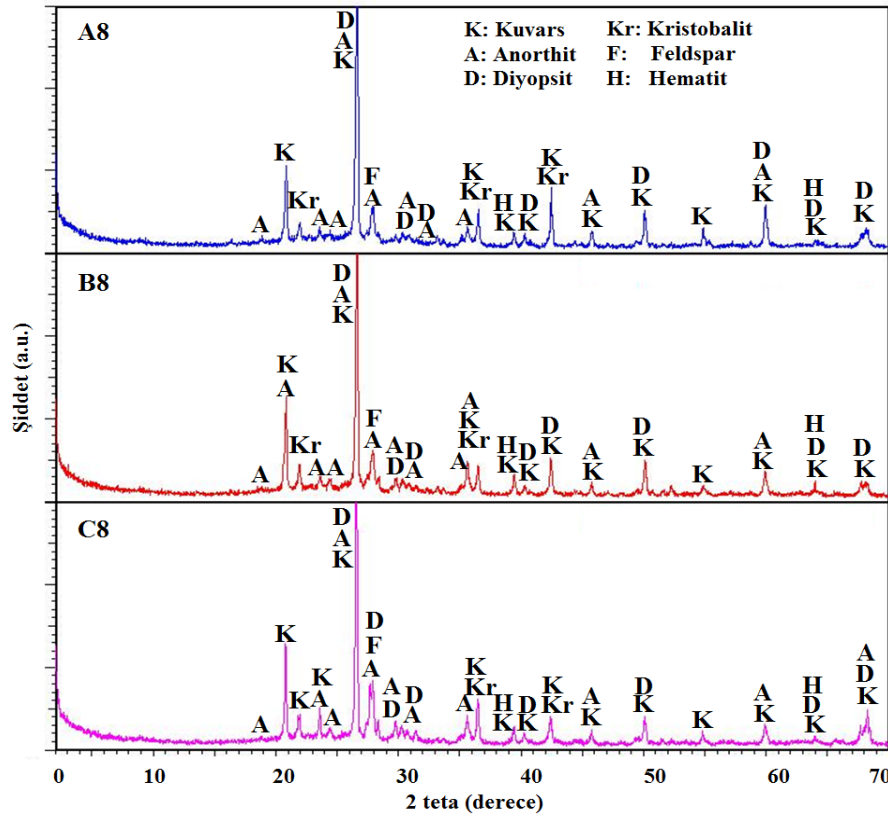
oldukları görülmüştür. Koçkal ve Özturan [62] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. A8, B8 ve C8 kodlu YHA'ların SEM görüntüleri ve dış görünüşü fiziksel ve mekanik özellikleri ile birlikte değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların birbirini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür.

3.4. Üretilen YHA'ların mineralojik özellikleri ve kimyasal kompozisyonları (Mineralogical properties and chemical compositions of the produced LWAs)

A8, B8 ve C8 kodlu YHA'ların XRD analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiş olup, söz konusu YHA'ların farklı oranlarda hammaddeler içermesi dikkate alınmaksızın benzer kristal yapıya sahip oldukları görülmüştür. Kuvars (SiO₂) her üç YHA'da da baskın kristal yapı olmakla beraber bu minerali sırası ile anorthit (CaO.Al₂O₃.2SiO₂), diyopsit (CaO.MgO.2SiO₂) ve kristobalit (SiO₂) takip etmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere YHA üretiminde kullanılan ham maddelerde (DTM'ler, ADK ve UK) gözlenen baskın mineral yapıların kuvars, illit, feldispat, kalsit, hematit ve dolomit olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme işleminde hematit ve kalsit gaz oluşumunu sağlayan mineraller olarak görev almakta; illit ise genleşme göstermeyen kristal olup gazları hapsedmek için viskoz bir eriyik oluşturmakla görevlidir [39]. Sinterleme adımında ham maddelerin içerdiği kuvars ile dolomit arasında ve illit ile kalsit arasında sırasıyla Eş. 2 ve Eş. 3'te verilmiş olan reaksiyonlar gerçekleşmiş olup bu sayede yeni kristal yapılar ortaya çıkmıştır [63].



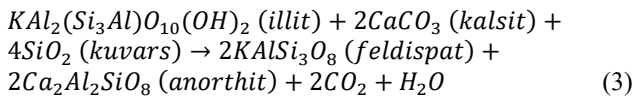
Şekil 5. Üretilen YHA'ların SEM görüntüleri (SEM micrographs of produced LWAs)



Şekil 6. Üretilen YHA'ların XRD grafikleri a) A8 b) B8 c) C8) (XRD patterns of the produced LWAs: a) A8 b) B8 c) C8)

Tablo 8. Üretilen YHA'ların kimyasal kompozisyonları (Chemical compositions of the produced LWAs)

Bileşen	A8 (%)	B8 (%)	C8 (%)
SiO ₂	64,42	63,97	63,81
Al ₂ O ₃	17,45	17,47	15,80
Na ₂ O	0,51	0,64	0,72
MgO	3,43	4,04	4,45
Fe ₂ O ₃	5,57	4,68	4,83
K ₂ O	3,26	2,79	2,70
CaO	5,35	6,41	7,70



Söz konusu tepkimeler ile oluşan diyopsit ve anorthit minerallerinin B serisi agrega karışımının Şekil 2'de verilen DTA/TGA grafiklerinde de oluşum pikleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar; Meyvel vd. [45], Faria ve Holanda [48], Araújo vd. [46] tarafından yapılan çalışmaların sonuçları ile uyumludur.

YHA'ların XRF analizi neticesinde elde edilen kimyasal kompozisyonları Tablo 8'de verilmiştir. XRF analiz sonuçlarına göre YHA'larda tespit edilen temel bileşiklerin, ham maddelerin de ana bileşenleri olan SiO₂, Al₂O₃, CaO olduğu tespit edilmiştir. Hwang vd. [25] tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

3.5. Üretilen YHA'ların sızma potansiyelleri (Leaching potentials of the produced LWAs)

En iyi agrega özelliklerine sahip oldukları tespit edilen YHA'ların (A8, B8 ve C8) TS EN 12457-4:2004 standardına göre gerçekleştirilen sızma (liç) testi analiz sonuçları ile ADDDY-EK2 sınır değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Sızma (liç) testi sonuçlarına göre; tüm agregalarda analiz edilen parametrelerin konsantrasyonlarının ADDDY-EK2'de tanımlanan III. Sınıf (İnert Atık) düzenli depolama tesisi limit değerlerinin altında olduğu görülmüştür. Ayrıca, YHA üretiminde hammadde olarak kullanılan atıklar (DTM, ADK ve UK), TÇKM, ÇOK ve bazı ağır metal (Se) konsantrasyonlarından dolayı ADDDY-EK2'ye göre I. Sınıf (Tehlikeli atık) ve II. Sınıf (Tehlikesiz atık) olarak sınıflandırılmış olmasına rağmen, YHA sinterleme prosesi sırasında bu parametrelerin silika matrisi içerisinde

Tablo 9. YHA'ların "ADDDY-Ek 2" kalite kriterlerine göre sızma potansiyelleri
(Leachabilities of LWAs according to "ADDDY-Appendix 2" quality criteria)

Parametreler	A8	B8	C8	ADDDY/Ek-2 limit değerleri		
				Inert Atık III.Sınıf	Tehlikesiz Atık II.Sınıf	Tehlikeli Atık I.Sınıf
Eluat (L/S=10 L/kg)						
As (mg/l)	0,008 (0,0007)	0,038 (0,0035)	0,011	0,05	0,2	2,5
Ba (mg/l)	0,042 (0,003)	0,043 (0,003)	0,045	2	10	30
Cd (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	4	100	500
Cr (mg/l)	0,0023 (0,00001)	0,0045 (0,00002)	0,0035 (0,000015)	0,05	1	7
Cu (mg/l)	0,007 (0,0006)	0,005 (0,0005)	0,007 (0,0006)	0,2	5	10
Hg (µg/l)	<0,13	<0,13	<0,13	1	20	200
Mo (mg/l)	0,007 (0,0003)	0,009 (0,0003)	0,004 (0,0002)	0,05	1	3
Ni (mg/l)	0,0015 (0,0002)	0,0009 (0,0001)	0,0012 (0,0002)	0,04	1	4
Pb (mg/l)	0,0016 (0,0003)	0,00095 (0,0002)	0,00081 (0,0002)	0,05	1	5
Sb (mg/l)	0,001 (0,0002)	0,001 (0,0002)	0,001 (0,0002)	0,006	0,07	0,5
Se (mg/l)	0,0002 (0,00004)	0,00015 (0,00004)	0,0002 (0,00004)	0,01	0,05	0,7
Zn (mg/l)	<0,005	<0,005	<0,005	0,4	5	20
Cl ⁻ (mg/l)	<0,2	<0,2	<0,2	80	1500	2500
F ⁻ (mg/l)	0,05 (0,003)	0,07 (0,004)	0,06 (0,004)	1	15	50
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	4,46 (0,05)	6,03 (0,06)	7,08 (0,08)	100	2000	5000
ÇOK (mg/l)	<0,5	<0,5	<0,5	50	80	100
TÇKM (mg/l)	<14,3	20	<14,3	400	6000	10000
Fenol (mg/l)	<0,07	<0,07	<0,07	0,1	-	-
Orijinal katı						
TOK (mg/kg)	<1884	<1884	<1884	30000 (3%)	50000 (5%)	60000 (6%)
BTEX (mg/kg)	<0,5	<0,5	<0,5	6	-	-
PCB (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	1	-	-
Mineral yağ (mg/kg)	<65	<65	<65	500	-	-
Yanma kaybı (%)	<2,3	<2,3	<2,3	-	-	100000 (10%)

hapsolması ile sızma (liç) probleminin çözüldüğü tespit edilmiştir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

ADDDY : Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
ADK : Atık döküm kumu
AYY : Atık Yönetimi Yönetmeliği
BTEX : Benzen, toluen, etil benzen, ksilen
ÇOK : Çözünmüş organik karbon

DDT : Düzenli depolama tesisi
DİPTAR : Deniz Dip Tarama Uygulamaları ve Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi Projesi
DTA : Diferansiyel Termal Analiz
DTM (DM) : Dip tarama malzemesi
ICP-OES : İndüktif eşlenmiş plazma-optik emisyon spektroskopisi
LL : Likit limit
ND : Tespit edilemedi
NP : Non-plastik

PCB	: Poliklorlu bifenil
PL	: Plastik limit
PI	: Plastisite İndeksi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TÇKM	: Toplam çözünen katı madde
TGA	: Termogravimetrik analiz
TOK	: Toplam organik karbon
UK	: Uçucu kül
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi
XRD	: X-ışını difraktometresi
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi
YHA (LWA)	: Yapay hafif (kaba) agrega

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

ADDDY-EK2: Atıkların düzenli depolanabilmesi için kabul kriterleri'ne göre DTM, UK ve ADK sırası ile II. Sınıf (tehlikesiz atık), II. Sınıf (tehlikesiz atık) ve I. Sınıf (tehlikeli atık) DDT'de depolanması uygun iken, bu hammaddelerin kullanılması ile üretilen YHA'ların III. Sınıf (inert atık) DDT'de depolanabilir özellikte olduğu tespit edilmiştir.

YHA'ların tanecik yoğunluklarının hafif agregalar için üst limit değer olan 2000 g/m³'ün altında olduğu görülmüştür.

A serisi, B serisi ve C serisi agregaların kütle kaybı ve dayanım değerleri sinterleme sıcaklığı artışı ile artarken su emme oranları ise düşüş göstermiştir. Agrega karışımlarında DTM oranının artışı tüm sinterleme koşullarında dayanım özelliklerinde zayıflamaya, su emme oranlarında ve kütle kaybında ise artışa neden olmuştur. A serisi, B serisi ve C serisi agregaların mineralojik özelliklerinde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. 1190°C sinterleme sıcaklığında, 5°C/min ısıtma hızında, 20 min süre ile sinterlenen YHA'ların optimum hafif agrega özelliklerini sağladığı sonucuna varılmıştır. A8, B8 ve C8 kodlu YHA'ların fiziksel ve mekanik test sonuçları, YHA'ların dış görünüşü ve YHA'ların kesitinden alınan SEM görüntüleri arasında uyum olduğu tespit edilmiştir.

Tüm agrega serilerinde, sinterleme sıcaklığı artışı ile YHA'ların mekanik, mikroyapısal ve mineralojik özelliklerinde iyileşme olduğu görülmüştür. DTM ile birlikte ADK ve uçucu külün de hammadde olarak kullanılması ile YHA üretiminin fiziksel, mekanik, mineralojik, mikroyapısal ve çevresel açıdan uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sinterleme prosesinin yüksek sıcaklık ve yüksek maliyet gerektirmesi sebebiyle, enerji kullanımını verimli hale getirmek ve maliyeti düşürmek açısından, çimento fabrikalarında döner fırınlar ile pilot ölçekte ve endüstriyel ölçekte deneme çalışmalarının devam ettirilmesi gereklidir.

Bundan sonra yapılacak diğer çalışmalarda, Türkiye'de yapay hafif agregaların beton sektöründe kullanımını teşvik etmek amacıyla üretilen YHA'ların hafif beton eldesinde kullanımına dair çalışmalar da yapılmalıdır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 111G036 no.lu ve "Dip Tarama Uygulamaları ve Dip Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi (DİPTAR)" [41] isimli TÜBİTAK KAMAG projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup başta müşteri kurum Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı ve TÜBİTAK MAM olmak üzere proje ekibine destekleri için, Sn. Hayrettin BAYRAKTAR'a da hafif agrega üretimindeki katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sheehan C., Harrington J., Management of dredge material in the Republic of Ireland - A review. Waste Management, 32, 1031–1044, 2012.
2. Yan D.Y.S., Tang I.Y., Lo I.M.C., Development of controlled low-strength material derived from beneficial reuse of bottom ash and sediment for green construction, Construction and Building Materials, 64, 201–207, 2014.
3. Türk Yönetmeliği, Atık Yönetimi Yönetmeliği, Resmi Gazete No: 29314, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2015.
4. Yazıcı H., The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 22, 456–462, 2008.
5. Agostini F., Skoczylas F., Lafhaj Z., About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment, Cement and Concrete Composites, 29, 270–278, 2007.
6. Molineux C.J., Newport D.J., Ayati B., Wang C., Connop S.P., Green J.E., Bauxite residue (red mud) as a pulverised fuel ash substitute in the manufacture of lightweight aggregate, Journal of Cleaner Production, 112, 401–408, 2016.
7. Reddy M.S., Dinakar P., Rao B.H., A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete, Microporous Mesoporous Materials, 234, 12–23, 2016.
8. Choi S.J., Mun J.S., Yang K.H., Kim S.J., Compressive fatigue performance of fiber-reinforced lightweight concrete with high-volume supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Composites, 73, 89–97, 2016.
9. Chang C.T., Hong G.B., Lin H.S., Artificial lightweight aggregate from different waste materials, Environmental Engineering Science, 33, 283–289, 2016.
10. Tan W., Lv J., Deng Q., Zhang X., Application of a combination of municipal solid waste incineration fly ash and lightweight aggregate in concrete, Journal of Adhesion Science and Technology, 4243, 1–12, 2015.
11. Mahmud H., Shafiq P., Jumaat M.Z., Structural lightweight aggregate concrete containing high volume waste materials, Key Engineering Materials, 594-595, 498–502, 2013.

12. Cheeseman C., Virdi G.S., Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 45, 18–30, 2005.
13. Nadesan M.S., Dinakar P., Mix design and properties of fly ash waste lightweight aggregates in structural lightweight concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 7, 336-347, 2017.
14. Domaga L., The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete, *Procedia Engineering*, 108, 206–213, 2015.
15. Scheinherrová L., Trník A., Kulovaná T., Pavlík Z., Rahhal V., Irassar E.F., Hydration of blended cement pastes containing waste ceramic powder as a function of age. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1752, 040025-1–040025-6. 2016.
16. Chang F.C., Lo S.L., Lee M.Y., Ko C.H., Lin J.D., Huang S.C., Leachability of metals from sludge-based artificial lightweight aggregate, *Journal of Hazardous Materials*, 146, 98–105, 2007.
17. Huang S.C., Chang F.C., Lo S.L., Lee M.Y., Wang C.F., Lin J.D., Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, 144, 52–58, 2007.
18. Tan W., Lv J., Deng Q., Zhang X., Application of a combination of municipal solid waste incineration fly ash and lightweight aggregate in concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30, 866-877, 2016.
19. Wang H.Y., Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt, *Construction and Building Materials*, 23, 2332–2337, 2009.
20. Tang C.W., Chen H.J., Wang S.Y., Spaulding J., Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry. *Cement and Concrete Composites*, 33, 292–300, 2011.
21. Wei Y.L., Lin C.Y., Ko K.W., Wang H.P., Preparation of low water-sorption lightweight aggregates from harbor sediment added with waste glass, *Marine Pollution Bulletin*, 6, 135–140, 2011.
22. Liu, M., Liu X., Wang W., Guo J., Zhang L., Zhang H., Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment, *Ceramics International*, 44, 4313-4319, 2018.
23. Li B., Ling T.C., Qu L., Wang Y., Effects of a two-step heating process on the properties of lightweight aggregate prepared with sewage sludge and saline clay, *Construction and Building Materials*, 114, 119–126, 2016.
24. Tang C., Producing synthetic lightweight aggregates by treating waste TFT-LCD glass powder and reservoir sediments, *Computers and Concrete*, 13, 149–171, 2014.
25. Hwang C.L., Bui L.A.T., Lin K.L., Lo C.T., Manufacture and performance of lightweight aggregate from municipal solid waste incinerator fly ash and reservoir sediment for self-consolidating lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34, 1159–1166, 2012.
26. Wei N., Leachability of heavy metals from lightweight aggregates made with sewage sludge and municipal solid waste incineration fly ash, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 4992-5005, 2015.
27. Ozer-Erdogan P., Basar H.M., Erden I., Tolun L., Beneficial use of marine dredged materials as a fine aggregate in ready-mixed concrete: Turkey example, *Construction and Building Materials*, 124, 690–704, 2016.
28. Güzel B., Başar H.M., Güneş K., Yenisooy-Karakaş S., Karakaş D., Tolun L., Assessment of marine dredged materials taken from Turkey's ports/harbors in landscaping, *Desalination and Water Treatment*, 71, 207–220, 2017.
29. Başar H.M., Güzel B., Özer-Erdoğan P., Tolun L., Türkiye'deki deniz dibi tarama malzemelerinin faydalı kullanım öncesi çevresel etkilerinin belirlenmesi: Ticari limanlar & balıkçı barınakları, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (4), 1063-1076, 2017.
30. Cevikbilen G., Teymur B., Karadogan U., Basar H.M., Dağlı S., Tolun L. An Investigation on Suitability of Dredge Materials on Road Construction, *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, Nevşehir, Turkey, May 20-23, 2015.
31. H.M. Başar, S. Dağlı, P. Özer Erdoğan, B. Güzel and L. Tolun (2015), Beneficial Use Alternatives for Dredged Materials: Landfill Daily Cover, *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, Nevşehir, Turkey, May 20-23, 2015.
32. G. Cevikbilen, B. Teymur, U. Karadogan, H. M. Basar, S. Dağlı, P. Özer-Erdoğan, B. Güzel, L. Tolun, Kaba Daneli Deniz Dibi Tarama Malzemelerinin Geoteknik Özelliklerinin Değerlendirilmesi, 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana, Türkiye, 26-27 Kasım, 2015.
33. Demirel Y. ve Çağlar Y., Recovery of phosphogypsum waste in economy as building material, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 743-750, 2015.
34. Özkan Ö., Properties of mortars containing waste bottle glass and blast furnace slag, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (1), 87-94, 2007.
35. Aruntaş, H.Y., The potential usage of fly ash in construction sector, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (1), 193-203, 2006.
36. Özüyağlı, A., Mehmetlioğlu, C., Özsoy, M., Akıncı, A., Investigation of mechanical properties of GFRP pipe production waste filled PVC matrix composites, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 465-472, 2016.
37. Durmuş, G., Şimşek, O., Dayı, M., The effects of coarse recycled concrete aggregates on concrete properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 24 (1), 183-189, 2009.

38. Duyuşen-Güven, E., Akıncı, G., Gök, G., Chemical fractionation and transfer of Cr, Cu, Zn and Ni in grass grown soil amended with tannery sludge compost, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 589-596, 2016.
39. Erten E., Yalçinkaya Ç., Beglarigale A., Yiğiter H., Yazıcı H., Erken yaş büzülme çatlaklarının lif içeren/içermeyen ultra yüksek performanslı betona gömülü donatı korozyonuna etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1347-1364, 2017.
40. Uygunoğlu T., Güneş İ., Ersoy B., Evcin A., Kendiliğinden yerleşen polimerik harçlarda mineral katkının reolojik özelliklere etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32 (4) 1365-1377, 2017.
41. TÜBİTAK MAM, Deniz Dip Tarama Uygulamaları ve Dip Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi (DİPTAR), Proje Sonuç Raporu, Proje No: 111G036, TÜBİTAK KAMAG 1007 Projesi, Kocaeli, Türkiye, 2016.
42. Türk Yönetmeliği, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete No: 27533, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2010.
43. Riley C.M., Relation of chemical properties to the bloating of clays, *Journal of American Ceramic Society*, 34, 121-128, 1951.
44. Gualtieri F., Ferrari S., Kinetics of illite dehydroxylation, *Physics and Chemistry of Minerals*, 33, 490-501, 2006.
45. Meyvel S., Sathya P., Velraj G., Thermal characterization of archaeological pot sherds recently excavated in Nedunkur, Tamilnadu, India, *Certamica*, 58, 338-341, 2012.
46. De Araújo J.H., Da Silva N.F., Acchar W., Gomes U.U., Thermal decomposition of illite, *Materials Research Bulletin*, 7, 359-361, 2004.
47. Xu G.R., Zou J.L., Li G.B., Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramsite, *Journal of Hazardous Materials*, 150, 394-400, 2008.
48. Faria K.C.P., Holanda J.N.F., Thermal behavior of ceramic wall tile pastes bearing solid wastes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 1119-1127, 2016.
49. Dabare L., Svinka R., Influence of thermal treatment and combustible additives on properties of Latvian clay ceramics pellets. *Process and Application of Ceramics*, 7, 175-180, 2013.
50. Bernhardt M., Justnes H., Tellesbø H., Wiik K., The effect of additives on the properties of lightweight aggregates produced from clay, *Cement and Concrete Composites*, 53, 233-238, 2014.
51. Li Y., Wu D., Zhang J., Chang L., Wu D., Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts. *Powder Technology*, 113, 176-184, 2000.
52. Yashima S., Kanda Y., National Z., Relationships Between Particle Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture as Estimated from Single Particle Crushing, *Powder Technology*, 51, 277-282, 1987.
53. Krishnamoorthy R.R., David T.K., Bin Mastor N.A., Nadarasa K., Repair of deteriorating pavement using recycle concrete materials, *Procedia Engineering*, 142, 371-382, 2016.
54. Chen H.J., Yang M.D., Tang C.W., Wang S.Y., Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments, *Construction and Building Materials*, 28, 387-394, 2012.
55. Liao Y.C., Huang C.Y., Chen Y.M., Lightweight aggregates from water reservoir sediment with added sodium hydroxide, *Construction and Building Materials*, 46, 79-85, 2013.
56. Wei Y.L., Yang J.C., Lin Y.Y., Chuang S.Y., Wang H.P., Recycling of harbor sediment as lightweight aggregate. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 867-72, 2008.
57. Guo W.M., Vleugels J., Zhang G.J., Wang P.L., Van O., Effect of heating rate on densification, microstructure and strength of spark plasma sintered ZrB₂-based ceramics, *Scripta Materialia*, 62, 802-805, 2010.
58. Fakhfakh E., Hajjaji W., Medhioub M., Rocha F., Lopez Galindo A., Setti M., Effects of sand addition on production of lightweight aggregates from Tunisian smectite-rich clayey rocks, *Applied Clay Science*, 35, 228-237, 2007.
59. Wei Y.L. and Lin Y.Y., Role of Fe compounds in light aggregate formation from a reservoir sediment, *Journal of Hazardous Materials*, 171, 111-115, 2009.
60. Chen H.J., Wang S.Y., Tang C.W., Reuse of incineration fly ashes and reaction ashes for manufacturing lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*, 24, 46-55, 2010.
61. Yuan K., Wang F., Gao J., Sun X., Deng Z., Wang H., Effect of sintering time on the microstructure, flexural strength and translucency of lithium disilicate glass-ceramics, *Journal of Noncrystalline Solids*, 362, 7-13, 2013.
62. Niyazi U. ve Özturan T., Sinterleme sıcaklığının uçucu kül hafif agregaların özelliklerine etkisi, *Ulusal Beton Kongresi, İstanbul-Türkiye*, 133-144, 2005.
63. Cultrone G., Rodriguez-Navarro C., Sebastian E., Cazalla O., Torre M.J., Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing, *European Journal of Mineralogy*, 13, 621-634, 2001.