

## Cam Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mikrodalga Sinterleme Yöntemi ile Üretimi

Ziya Özgür Yazıcı <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

e-posta: [zyazici@aku.edu.tr](mailto:zyazici@aku.edu.tr). ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9590-4384>

Geliş Tarihi: 22.02.2019;

Kabul Tarihi: 13.07.2019

### Öz

Bu çalışmada, %0-20 atık cam tozları içeren alüminyum kompozit numuneler üretilmiştir. Farklı oranlarda cam tozu takviyesi içeren karışımlar yüksek devirli bilyeli öğütme işlemine maruz bırakıldıktan sonra tek eksenli hidrolik presleme ile şekillendirilmiştir. Sinterleme işlemleri mikrodalga fırında gerçekleştirilmiştir. Tekrar edilebilir uygun sinterleme sıcaklıkları ev tipi bir mikrodalga fırının başarılı bir şekilde modifiye edilmesi ile elde edilmiştir. Sinterleme işlemleri 550°C'de 18 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin faz içerik ve mikroyapıları incelemelerinde istenmeyen arayüzey reaksiyon ürünlerine rastlanılmamıştır. Sinterleme sonrasında cam tozu katkılı numunelerdeki porozite miktarının ham durumdaki numunelere kıyasla azalması (%20 CT için %13'ten %8,5'e kadar), sinterleme işleminin göreceli başarısını göstermiştir. Artan cam partikül katkısına göre numunelerin basma yüklemesi altındaki davranışları incelendiğinde, takviye partikül oranı arttıkça basma dayanımı değerinin 67 MPa'dan 234 MPa'a kadar arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte katkısız alüminyumun mikrosertlik değeri (53 Hv) %20 cam partikül takviyesi ile birlikte 77 Hv'ye kadar artırılmıştır.

### Anahtar kelimeler

Atık cam tozları;  
Alüminyum kompozit;  
Mikrodalga sinterleme;  
Karakterizasyon.

## Production of Glass Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites by Microwave Sintering Method

### Abstract

In this study, aluminum composite samples containing 0-20% waste glass powders were produced. Mixtures containing different amounts of glass powder reinforcement were shaped by uniaxial hydraulic pressing after subjected to high-speed ball milling. The sintering process was carried out in the microwave oven. Controllable suitable sintering temperatures were achieved by successfully modifying a domestic microwave oven. The sintering processes were performed at 550°C for 18 minutes. During the phase and microstructure analysis of composite samples, undesirable interface reaction products were not encountered. After sintering, the amount of porosity in samples with glass powder decreased compared to the samples in the green state (from 13% to 8.5% for 20% CT), indicating the relative success of the sintering process. When the mechanical behaviors of the samples under compression loading were examined, it was determined that the compressive strength values of the samples increased from 67 to 234 MPa, as fraction of the glass particles were increased. In addition, the microhardness value of pure aluminum (53 Hv) was increased to 77 Hv with 20% glass particle addition.

### Keywords

Waste glass powders;  
Aluminum composite;  
Microwave sintering;  
Characterization.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Kompozitler, havacılık uygulamaları, yüksek hızlı tekneler ve trenler gibi ağırlığın büyük önem arz ettiği yapılarda kullanılan metalik malzemelere alternatifler olarak görülmektedir. Kısaca kompozit malzeme aralarında belirli bir arayüze sahip iki

veya daha fazla farklı materyalin makroskopik bir kombinasyonu olarak tanımlanmaktadır (Mallikarjuna et al. 2017). Metal matrisli kompozitlerde metalik bileşen tokluk ve sünek özellik sağlayan ana faz olarak görev yaparken, yüksek dayanım, sertlik ve modüle sahip seramik

katkılar ise matrisin eksik olan özelliklerini takviye eden faz olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları hafiflik, yüksek spesifik dayanım, aşınma direnci, termal iletkenlik ve uygun termal genleşme katsayısı gibi özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında ilgi görmektedir (Torralba et al. 2003, Singh and Chauhan 2016). Tercih edilen takviye elemanlar arasında karbür (SiC, TiC), borür (TiB<sub>2</sub>) ve oksit (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) seramiklerin sıkça kullanıldığı görülmektedir (Kim et al. 2013, Pavithra et al. 2018). Diğer seramik takviye partiküller üzerindeki çalışmalar oldukça yaygın olmasına rağmen, matris içerisine SiO<sub>2</sub> partiküllerinin uygulanması ile ilgili çalışmalara nadir rastlanmaktadır (Pattnayak et al. 2018). Bazı araştırmacılar sınırlı çalışma yapılmasının kuvars ile alüminyum arasındaki sıcaklığın etkisi ile birlikte artan agresif reaktiviteye (Vijayaram and Baskaralal 2016, Sayuti et al. 2012) ve düşük sıcaklıklarda takviye fazının aglomerasyonuna bağlamaktadır (Rogatgi et al. 1979). Ergitme ve döküm işlemi esnasında arayüzey iletme özelliklerini geliştirici magnezyumun kullanıldığı durumlarda, magnezyum ile oluşan arayüzey etkileşimlerinin meydana gelmesi üretim sürecini daha karmaşık hale getirir de, SiO<sub>2</sub> takviyeli kompozitin dayanımını geliştirdiği gösterilmiştir (Moghadam et al. 2016). Bununla birlikte soğuk veya işlem görmemiş SiO<sub>2</sub> ilavesinin eriyik metal matris tarafından reddedildiği de belirtilmektedir (Moghadam et al. 2016). Diğer yandan, SiO<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretildiği bazı çalışmalarda takviye faz miktarının belirli oranlara kadar artırılması ile kompozit özelliklerinde gözlenen düşüşe de dikkat çekilmektedir. Sulaiman ve ark. (2008) LM6 alüminyum alaşımına farklı oranlarda kuvars partikül takviyesi yaparak alaşımın çekme dayanımındaki etkisini incelemişlerdir. %5-30 SiO<sub>2</sub> ilavelerinde maksimum çekme dayanımının düştüğünü rapor eden çalışmalarında, sertlik değerlerinde ise artan SiO<sub>2</sub> miktarı ile artış tespit etmişlerdir (Sulaiman et al. 2008).

SiO<sub>2</sub> takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin hakkındaki sınırlı literatür bilgisine göre, atıl durumdaki ve yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içeren uçucu kül, cam tozları veya organik (pirinç kabukları, bambu

lifleri vb.) maddelerin değerlendirilmeye çalışıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, toz metalurjisi yolu ile üretimin benimsendiği sadece iki çalışmaya rastlanmaktadır. Pattnayak ve arkadaşları pirinç kabuğunun içerdiği yüksek SiO<sub>2</sub>'i kullanarak, alüminyum kompozit numunelerdeki sertlik değeri artışına dikkat çekmişlerdir (Pattnayak et al. 2018). Diğer çalışmada ise, silika kumu ve ticari silikanın %30'a kadar kompozit üretiminde kullanılmasının sertlik ve kırılma modülü değerlerini geliştirdiği gösterilmiştir (Zuhailawati et al. 2007).

Geleneksel toz metalurjisi yöntemleri yüzey bitirme maliyetlerini azaltan ve nihai şekle en yakın ürünlerin üretilebilmesini sağlamasına rağmen, nihai ürünün tokluk ve dayanımındaki çeşitli problemlerle karşı karşıyadır. Özellikle alüminyum partikülleri üzerinde oksit film tabakasının oluşma ihtimali dayanıklı metalik bağlanmayı engelleyici rol oynamaktadır (O'Donnell and Looney 2001). Bu oksit tabakasından, kaplama, gaz alma, sinterleme esnasında inert gaz veya vakum ortamlarının kullanımı sayesinde kaçınılabilmektedir. Ancak bu yöntemler zaman kaybettirici ve maliyet artırıcı yöntemlerdir (Matli et al. 2016). Son yıllarda, metal matrisli kompozitlerin üretimi için mikrodalga sinterleme yönteminin kullanımı üzerine yaygın çalışmalar yapılmıştır. Mikrodalga teknolojisi geleneksel ısıtma yöntemlerine göre, hızlı ısıtma (Marinel and Savary 2009), yüksek yoğunlaştırma davranışı (Shukla et al. 2016), bünyenin hacimsel olarak ısıtılması (Oghbaei and Mirzaee 2010), düşük sinterleme sıcaklığı (Chockalingam and KodiTraver 2010) ve uygun nihai mikroyapısal özellikler (Ratna et al. 2010) gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ancak sinterlenmesi hedeflenen malzemenin mikrodalga absorpsiyon davranışı burada önemli bir parametredir. İletken metalik malzemeler mikrodalgalara karşı duyarsız olmasına rağmen, toz formları söz konusu olduğunda tanecikler arasında meydana gelen mikro arklar sayesinde metal tozlarının da ısıtılabilirdiği gösterilmiştir (Mondal et al. 2009). Gerekli görülen bazı durumlarda ise, mikrodalga sever yardımcı bir ısıtma elemanı kullanımı da tercih edilebilmektedir (Matli et al. 2016).

Dünya yıllık cam üretimi kapasitesinin miktar olarak yaklaşık 180 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Üretilen cam ürünlerin % 60'ından fazlasını şeffaf cam ürünler oluşturmaktadır. Genellikle şeffaf olan konteynerler tercih edilmesine rağmen, ürünlerin güneş ışığına maruz kalma ve buna bağlı sıcaklık değişimleri şeffaf cam kaplardaki ürünlerin bozulmasına neden olabilmektedir. Kahverengi ve yeşil renkli cam şişeler, içeriklerini güneş ışığından kaynaklanan bozulmalara karşı koruyarak, gıdanın kendi özelliklerini korumasını sağlar. Kahverengi veya kehribar renginin şişelerde elde edilmesi için saydam cama karbon, nikel ve sülfür eklenir. Yeşil cam üretmek için berrak cama demir ve bakır veya krom eklenerek üretilmektedir (Int Kyn.1). Genel olarak, kullanılmış şeffaf cam ürünler saydam cam eriyikleri içinde tekrar kullanılabilirken, farklı renklendirici katkıları içeren kahverengi ve yeşil camlar ise sadece kendi rengindeki cam ürünlerine geri dönüştürülebilmektedir (Int Kyn.2).

Atık durumuna geçtiklerinde cam ürünlerin doğadaki bozunma süreleri 4000 yıl ile 1 milyon yıl arasında ifade edilmektedir (Erüz vd. 2010, Scalenghe, R. 2018, Int Kyn.3). Doğal yollar ile neredeyse geri dönüşümü olmayan bir durumu ifade eden uzun bozunma süresi, yüksek oranda SiO<sub>2</sub> içeren cam malzemelerin korozyon direnci, mekanik ve diğer üstün özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikleri ile camın teknolojik geri dönüşüm yöntemleri ile veya sentetik ürünler içerisinde değerlendirilerek tekrar kullanımı düşünüldüğünde, katı atık yığın sahalarında biriktirilen camlara aslında bir yarı mamul gözüyle bakılabilir. Bu nedenle dünya üzerinde atık değerlendirme sistem ve market analizlerinin ve çeşitli raporlamalarının yapıldığı görülmektedir (Exposito and Velasco 2018). Böylece katı atık malzemelerinin kullanımı ile hem üretimde harcanacak enerjiden kazanç sağlanmasında, hem de mevcut doğal kaynakların korunmasında avantajlar sağlanması düşünülmektedir. Atık durumdaki camların geri dönüşümü yolu ile tasarruf edilen enerji, cam kapları işlenmemiş hammaddelerden yapmak için gereken enerjinin yaklaşık % 13'ü kadardır. (Int Kyn. 4). Üretimleri ergitme esasına dayanan cam malzemeler neredeyse saf hammaddelerden üretildikleri için, tekrar kullanıldıklarında çevre kirliliğini azaltan temiz ürünler üretilmesinde avantajlıdır. Fakat yeni

cam üretimine kıyasla geri dönüşüm oranı çeşitli nedenlerden dolayı oldukça düşüktür. Bu nedenle, atıl durumdaki camların geri dönüşümü için kullanım alanını artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bunlara örnek olarak; polimer (Ondrušová et al. 2017), beton (Walczak et al. 2015) ve asfalt (Arabani et al. 2012) gibi malzemelerin içerisinde takviye veya katkı malzemesi olarak değerlendirilmeleri verilebilir. Son yıllarda çimento yerine belirli oranlarda atık cam tozlarının kullanılması ile nihai betonun özelliklerinin incelenmesi üzerindeki çalışmalarda artış görülmektedir. Al-Zubaid ve ark. (2017) yeşil, neon ve kahverengi camların betonun sertleştikten sonraki özelliklerine olan etkilerini incelemişler ve neon camı ve yeşil camın çimento yerine kısmen kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkilerine dikkat çekmişlerdir (AL-Zubaid et al. 2017).

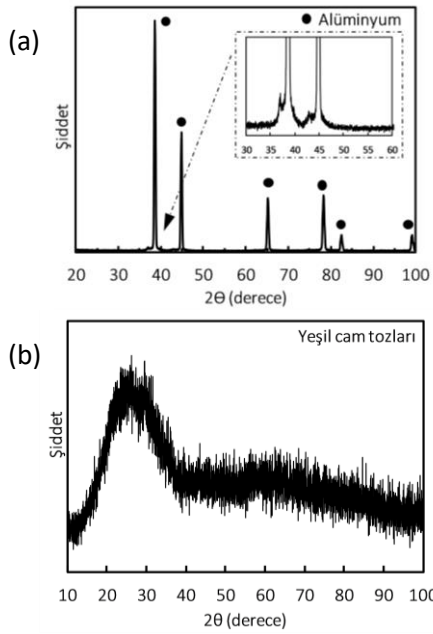
Bu çalışmada, geri dönüşümünde kendi renk sınıfı haricinde geri dönüşüm amaçlı kullanılmayan, yüksek SiO<sub>2</sub> içerikli, atık cam şişe kırıklarının metal matrisli bir kompozit bünyesindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla, alüminyum kompozitleri için hızlı ve etkili bir sinterleme yöntemi olarak kabul edilen mikrodalga sinterleme süreci tercih edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

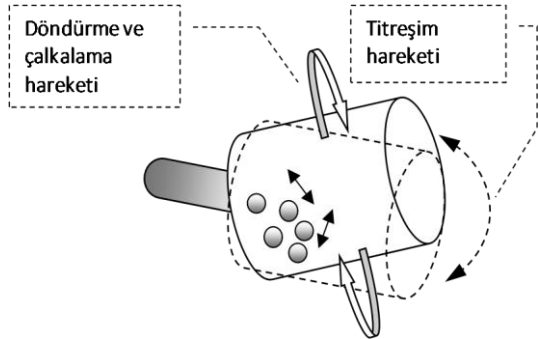
Kompozit numunelerin üretiminde matris fazı olarak ticari saflıktaki alüminyum tozları (<48 µm) kullanılmıştır. Şekil.1a'da verilen XRD analizinden ticari alüminyum tozlarının üretiminden kaynaklı bir miktar öğütme kirlilikleri (Şekil.1a-iç resim) içerdiği anlaşılmaktadır. Takviye fazı olarak seçilen cam tozları (CT) ise yeşil renkli cam hurdalarının öğütülmesi ile elde edilmiştir. Atık cam tozlarının kuru ortam öğütme işleminde alümina bilyeler içeren porselen değirmen kullanılmıştır. Elde edilen bu tozlar (Şekil 1b) daha sonra 53 µm'luk elekten geçirilmiştir.

Kompozit numunelerin üretimi için, alüminyum tozlarına ağırlıkça değişen oranlarda (% 5-20 CT) atık cam tozları ilave edilerek toz karışımları hazırlanmıştır. Farklı oranlarda cam takviyesi içeren

karışımlar 2 saat süre ile yüksek devirli bilyeli öğütme işlemi (1200 rpm) ile homojen karıştırılmıştır. Şekil 2’de yüksek devirli bilyeli öğütme haznesinin şematik gösterimi verilmiştir. Öğütme işlemleri etanol ortamında ve çelik haznede gerçekleştirilmiştir. Öğütme süresi, değirmen haznesindeki olası ısınmadan kaçınmak için 5’er dk’lık aralıklarla tamamlanmıştır. Daha sonra, toz karışımları yaklaşık 80 bar basınç altında tek eksenli presleme işlemi ile şekillendirilmiştir. Preslenmiş numuneler silindirik şekilli ve çap/boy oranları yaklaşık 1:2 olacak şekilde üretilmiştir. Kalıp yağlayıcısı olarak Mg-stearat kullanılmıştır.



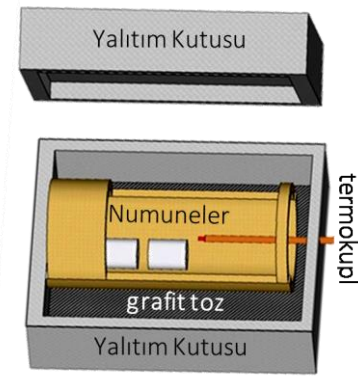
Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan (a) ticari saflıktaki alüminyum ve (b) öğütülmüş atık cam tozlarının XRD paternleri



Şekil 2. Yüksek devirli bilyeli öğütme haznesinin şematik gösterimi

Sinterleme işlemleri, üzerinde uygun modifikasyonların yapıldığı, ev tipi bir mikrodalga

fırında (Samsung-MS23F301EAW) 2.45 GHz ve 450W’ta gerçekleştirilmiştir. Fırının güç ve süre ayarları dijital olarak kontrol edilebilmektedir. Fırın içerisine kurulan ısıtma haznesinin şematik görünümü Şekil 3’te verilmiştir. Hazne içerisinde yardımcı ısıtıcı eleman olarak grafit tozları kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri termokupl (TP-01 K-tipi) vasıtasıyla yapılmıştır. Numuneler 550 °C’lik hedef sıcaklığa çıktıktan sonra bekleme yapılmadan kendi halinde soğutulmuştur. Numunelerin yoğunluklarının tespitinde Arşimet yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3. Mikrodalga fırın içerisine kurulan ısıtma haznesinin şematik görünümü

Metalografik hazırlama prosedürleri (kesme, zımparalama, parlatma) sonrasında numunelerin kesit görünümleri optik (Olympus-BX51M) ve elektron mikroskopi (LEO 1430 VP) yöntemleri ile incelenmiştir. Parlatma işlemlerinde 600-1200 gritlik zımparalar ve 0.3 µm alumina solüsyon kullanılmıştır. Numunelerin faz içerikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla X-ışını difraksiyon analizleri (Shimadzu 6000 XRD, Cu-Kα) yapılmıştır. Difraksiyon tarama işlemleri 10-100° (2θ) arasında 0,02°’lik basamak ve 0,6 sn/adım hızıyla yapılmıştır. Numunelerin sertlik değerleri Shimadzu HVM-2L cihazı (100 g, 15 sn) ile ölçülmüştür. Son olarak, üretilen numunelerin basma yüklemesi altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla Universal Mekanik Test Cihazı (Shimadzu-AG-IS 100 kN) kullanılmıştır. Basma testleri 0,5 s<sup>-1</sup> yükleme hızları ile gerçekleştirilmiştir.

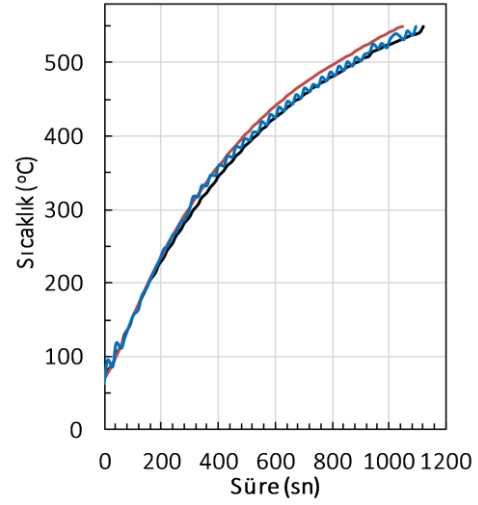
### 3. Bulgular

#### 3.1. Sıcaklık Ölçümleri ve Yoğunluk Analizleri

Oldukça ucuz fiyatlarda temin edilebilen ev tipi mikrodalga fırınlarda uygun ekipman (kızılötesi termometre, termokupl vb.) mevcut olmadığı için sıcaklık ölçümü yapılamamaktadır. Bununla birlikte mikrodalga fırın haznesi içerisinde metalik malzemelerin elektriksel ark problemlerine neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, ev tipi mikrodalga fırınlarda termokupl (ısı çiftler metalik tellerden imal edildiği için) vasıtasıyla ile sıcaklık ölçümü gerçekleştirmek oldukça zordur. Deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümlerinin problemsiz bir şekilde yapılabilmesi için, ince bir seramik kılıf içerisinde muhafaza edilen termokupl uçları kullanılmıştır. Ölçülen sıcaklıkların doğruluğunun tespiti için mikrodalga fırın 450 W'ta çeşitli süreler boyunca çalıştırılmış ve sıcaklık-süre ilişkisi bir veri kaydedici (datalogger) ile kaydedilmiştir. Ölçümler, fırın tamamen soğuduktan sonra aynı güç ve süreler için tekrarlanmış (20 tekrar) ve sıcaklık ölçüm verilerinin uyumu teyit edilmiştir. Şekil 4'te ısıtma haznesindeki numunelerin üç farklı ölçüm için ısınma süreçleri verilmiştir. Tekrarlanarak ölçülen sıcaklık-süre ilişkileri kıyaslandığında, kaydedilen verilerin oldukça tutarlı olduğu görülmüştür. Numuneler yaklaşık 18 dakikada 550°C'lik sinterleme sıcaklığında başarılı bir şekilde üretilebilmiştir (Şekil 5a). İstendiğinde, belirli parametrelerin (yardımcı ısıtıcı malzeme miktarı, mikrodalga gücü vb.) değiştirilmesiyle çok daha hızlı (<7 dk) ısıtma hızlarına da ulaşılabilirdiği tespit edilmiştir. Ancak hızlı ısıtmalarda bileşenlerin termal genişleme katsayıları gibi özelliklerinin de dikkate alınması gereklidir.

Bundan başka, 570°C ve üzerindeki sıcaklıkların etkisinin görülmesi amacıyla yapılan çalışmalarda, sıcaklık arttıkça numunelerde sırasıyla hacimsel genişleme ve daha sonra kısmi ergime (Şekil 5b) problemleri gözlenmiştir. Kısacası, yüksek sıcaklıklara (>550°C) çıkıldıkça tekrarlanabilir ve güvenilir numune üretimi sıkıntısı yaşandığı görülmüştür. Benzer problemlerin oluştuğunu, Zheng et al. (2014) ve Laparoux et al. (2003) Al-TiWC

ve Al-SiC kompozit sistemleri üzerinde yaptıkları mikrodalga sinterleme çalışmalarında da bildirmişlerdir. Ayrıca, ısıtma işlemleri grafit yardımcı elemanı olmadan tekrarlanmış, fakat sıcaklık artışının oldukça yavaş olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. Mikrodalga sinterleme esnasında sinterleme haznesindeki numunelerin ısınma eğrileri

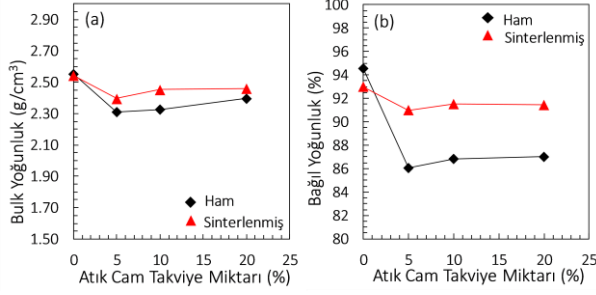
Bu durum, belirli bir sıcaklıktan sonra numunelerin mikrodalga ile etkileşebildiğinin (grafitten bağımsız olarak) ve numunelerdeki hacimsel ısınmanın daha sonra kontrolsüz bir şekilde partiküllerarası mikro arklar vasıtasıyla artarak alüminyumun ergime sıcaklığına ulaşıldığının göstergesi olarak kabul edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı, tekrarlanabilir ve güvenilir numunelerin üretimi için sinterleme sıcaklığı 550°C olarak seçilmiştir.



Şekil 5. (a) 550°C (18dk boyunca) ve (b) 570°C (21dk boyunca) sinterlenmiş kompozit numunelerin dış görünüşleri

Şekil 6'da farklı takviye içeriğine karşı ham ve sinterlenmiş numunelerdeki yoğunluk ölçümleri kıyaslanmıştır. Genel olarak, ham ve sinterlenmiş numune gruplarında takviye partikül miktarındaki (%5-20) artış katkısız duruma (%0 CT) kıyasla bulk

yoğunluk değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Toz metalurjisi yöntemlerinde başlangıç gözenek miktarı sinterleme süreci açısından önem arz eder.



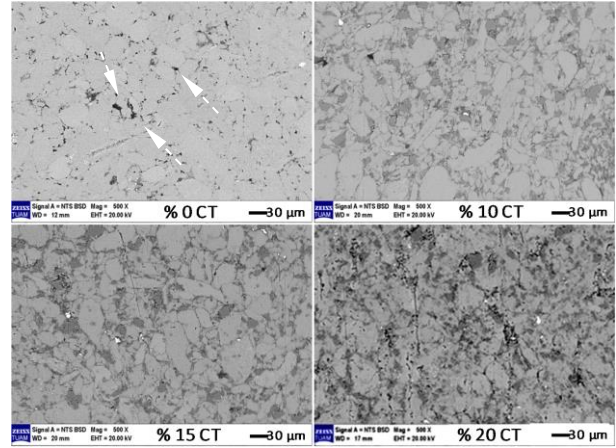
**Şekil 6.** Ham ve 550 °C'de sinterlenmiş numunelerin (a) bulk yoğunluk ve (b) bağlı yoğunlukların takviye miktarıyla değişimi

Çalışma kapsamında üretilen numuneler bu açıdan değerlendirildiğinde, ham numunelerdeki artan takviye miktarı (Vt) ile artış sergileyen gözenek miktarının sinterleme sonrası durumlara da taşındığı görülmektedir. Ayrıca atık cam tozlarının yoğunluğu ( $d_t=2.4-2.5 \text{ g/cm}^3$ ) alüminyum tozlarının yoğunluğundan ( $d_m=2.7 \text{ g/cm}^3$ ) daha düşüktür. Dolayısıyla, karışım kuralına ( $d=d_t.Vt+d_m.Vm$ ) göre, numunelerin bulk yoğunluk değerlerinde bir miktar düşüş olması normaldir. Ancak, %0 CT'den %5 CT'ye doğru bulk yoğunluk değerlerindeki belirgin düşüşten sonra, %5 CT'den %20 CT'ye doğru hafif bir artış gözlenmiştir (Şekil 6a). Katkılı numunelerin ortalama bulk yoğunluk değerlerinde gözlenen göreceli yükselişin sebebinin sert tabiatlı cam tozlarının artan miktarıyla ilgili olduğu; sert CT'ler nedeniyle nispeten daha fazla hazne kirlenmesinin olduğu, bu nedenle yoğunluk değerlerinde hafif bir yükselmenin meydana geldiği düşünülmektedir. Katkısız ham durumda yaklaşık %6 civarında olan porozite miktarı, ham numunelerdeki CT miktarı arttıkça yaklaşık %13 seviyelerine kadar ulaşmıştır. Ham numunelerin bağlı yoğunluk değerlerindeki bu düşüş (Şekil 6b), katkısız alüminyumun sıkıştırılabilirliğine kıyasla deformasyon özelliği olmayan takviye cam miktarındaki artıştan kaynaklanan sıkıştırılabilir kabiliyetlerindeki düşüş ile ilgilidir (Prasad et al. 2014). Bu nedenle başlangıçtaki ham numunelerde sıkıştırılması zor takviye partiküllerin etrafında daha fazla gözenek olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte,

sinterleme sonrasında katkılı numunelerdeki porozite miktarının ham durumdaki numunelere kıyasla azalması (örneğin %20 CT için %13'ten %8,5'e kadar), sinterleme işleminin göreceli başarısını göstermektedir.

### 3.2. Sinterlenmiş Numunelerin Mikroyapısal ve Mekanik Özellikleri

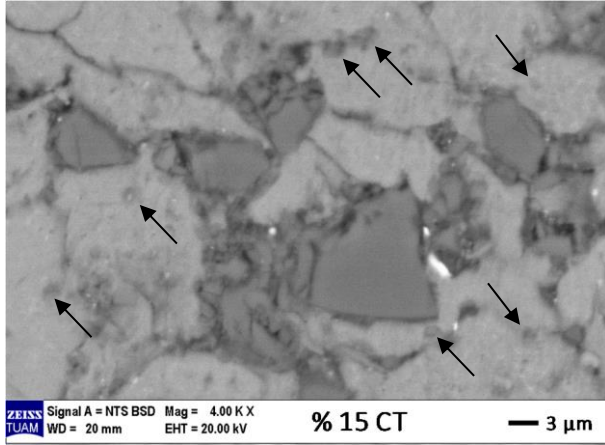
Şekil 7'de artan takviye oranına göre sinterlenmiş kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Katkısız numunenin, Şekil 6b'de verilen yoğunluk değerleriyle tutarlı ve nispeten daha yoğun bir mikroyapı sergilemesine rağmen, kompozit numunelere kıyasla daha büyük boyutlu kalıntı gözenekler içerdiği tespit edilmiştir. Bu gözenekler tane sınırları arasında yoğun bir şekilde (Şekil 7a, beyaz oklar) gözlenmektedir. Takviye edilmiş numunelerin mikroyapı incelemelerinde ise, genel olarak CT partiküllerinin alüminyum tane sınırlarında biriktiği gözlenmiştir. Buna ek olarak, az miktardaki ince tane boyutlu ( $<1\mu\text{m}$ ) CT partiküllerinin sinterlemenin etkisiyle birleşen alüminyum tanelerinin iç bölgelerinde hapsolması (Şekil 8- siyah oklar) dikkat çekicidir.



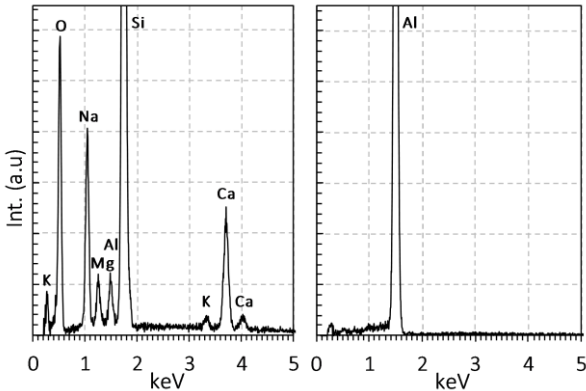
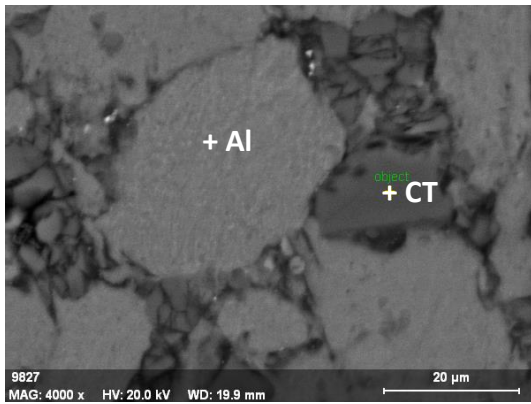
**Şekil 7.** Sinterlenmiş (a) %0, (b) %10, (c) %15 ve (d) %20 CT takviyeli kompozit numunelerin genel SEM mikroyapıları

Koyu renkli partiküller üzerinde yapılan kimyasal analizler, bu taneciklerde yüksek oranda silisyum ve oksijenin yanında belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, magnezyum ve potasyum elementlerinin varlığını göstermiştir (Şekil. 9b-c). Genel olarak, cam tozlarının kompozisyonunda da bu elementlerin

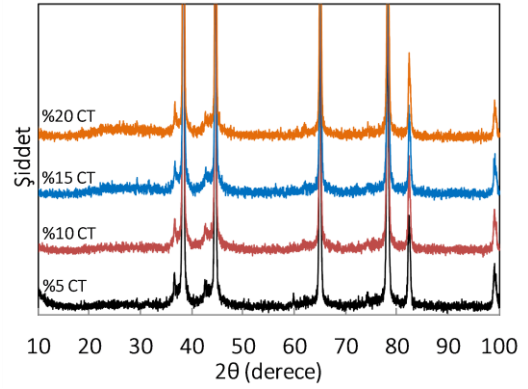
mevcut olduğu rahatlıkla ifade edilebilir. Bundan başka, tane sınırındaki cam partikülleri daha yüksek büyütme oranı ile incelendiğinde, sinterleme sıcaklığının etkisiyle birlikte bu partiküllerin köşelerinde yuvarlaklaşma ve kısmen bazı cam taneciklerinin birleşme davranışı sergilediği de ayrıca tespit edilmiştir.



Şekil 8. CT takviyeli (%15) numunenin yüksek büyütme SEM mikroyapısı



Şekil 9. Sinterlenmiş (550°C) kompozit numunenin (a) SEM mikroyapısı ve (c,d) alüminyum taneleri arasında kalan takviye partiküllerinin EDX analizleri

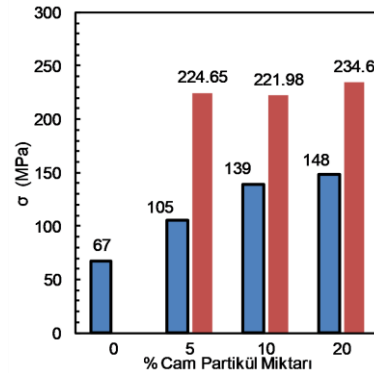


Şekil 10. Deneysel çalışmalarda üretilen % 5-20 CT takviyeli numunelerin XRD analizleri

Sinterlenmiş numunelerin XRD analizleri Şekil 10'da verilmiştir. XRD desenlerinde şiddetli alüminyum piklerinden başka, CT miktarındaki artışa bağlı olarak 20-30° 2θ değerleri arasındaki amorf desende hafif bir belirginleşme görülmektedir. Ayrıca başlangıç alüminyum tozlarından (ve bu çalışmadaki çelik hazneli öğütme işleminden) gelen impürite piklerinin (2θ: 36,56 ve 42,46) mevcut olduğu görülmektedir. Bundan başka, alüminyum ve CT partikülleri arasındaki etkileşimle ilgili istenmeyen bir arayüzey reaksiyon ürününe rastlanılmamıştır.

Çizelge 1. 550 °C'de mikrodalga sinterlenmiş kompozit numunelerde ölçülen ortalama sertlik değerleri

Takviye CT (%)	Ortalama Mikrosertlik (Hv)
0	53,25
5	57,51
10	66,76
15	71,93
20	77,64



Şekil 11. Mikrodalga sinterlenmiş CT takviyeli alüminyum kompozit numunelerin akma ve maksimum dayanım değerleri

CT takviyeli kompozit numunelerin sertlik değerleri Çizelge 1’de verilmiştir. Mikrodalga sinterlenmiş takviyeli numunelerin ortalama sertlik değerleri referans saf alüminyuma göre daha yüksektir. Sertlik değerleri takviye miktarındaki artışla birlikte yükseliş sergilemektedir. Benzer şekilde, Shankar ve Kumar (2012) döküm yöntemi ile ürettikleri cam partikül takviyeli alüminyum kompozitlerinde takviye miktarındaki artışın sertlik değerlerinin gelişmesinde rol oynadığını göstermişlerdir. Kıyaslama yapıldığında, bu çalışmadaki sertlik değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri (Hv=98) elde ettikleri görülmektedir. Bu farklılık, çalışmalarında kullandıkları Al6061 alaşım kompozisyonundan (Hv=75) ve gözeneksiz yapı üreten döküm yönteminden kaynaklanmaktadır (Kumar et al. 2012). Jamaludin et al. (2013) %15 CT ile takviye ettikleri Al-%4Cu alaşımını 580°C’de 2 saat boyunca geleneksel olarak sinterlemişlerdir. Yaşlandırma işlemi sonrası ölçülen sertlik değerlerinin 32-40 Hv değerleri arasında olduğunu bildirmişlerdir. Ancak, mikroyapı incelemelerinde bakır ve cam partikülleri arayüzeyinde oksit tabaka ve mikro çatlak oluşumlarını gözlemişlerdir. Bu çalışmadaki mikroyapı incelemelerinde ise mikro çatlak oluşumu veya istenmeyen reaksiyon ürünleri gözlenmemiştir.

Bununla birlikte, Şekil 11’de verilen basma testi sonuçları da sertlikteki artış trendiyle uyumludur. Katkısız alüminyum için akma dayanımı yaklaşık 67 MPa civarında iken, bu değer, %20 CT takviyeli kompozit numune için 148 MPa’a kadar kademeli olarak artmıştır. Maksimum basma dayanımı değerlerinin %5 CT için 224 ve %20 CT takviyeleri için 234 MPa değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Numunelere ilave edilen CT takviyelerinin, akma ve maksimum dayanım değerlerini etkili bir şekilde daha yüksek değerlere taşıdığı görülmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmalarda ev tipi mikrodalga fırın başarılı bir şekilde modifiye edilerek sinterleme açısından uygun koşullar hazırlanmıştır. 550°C’ye optimum 18 dk süre ile çıkılarak güvenilir numuneler elde edilmiştir. Böylece geleneksel ısıtma teknolojilerine kıyasla enerji ve zamandan kazanım

sağlanabilmektedir. Atık durumundaki yeşil renkli cam tozları alüminyum esaslı kompozit bünyesinde takviye faz olarak değerlendirilerek, cam tozu takviyesinin hem sertlik hem basma dayanımı değerlerini geliştirdiği gösterilmiştir. Koruyucu gaz ortamının sinterleme haznesinde kullanımı durumunda, elde edilen sonuçları daha gelişmiş değerlere taşıyacağı düşünülmektedir.

Kompozit bünyelerde atıkların değerlendirmesi ile ilgili başlangıç aşamasında olan bu çalışma, nispeten yüksek poroziteyle (% 7-9) üretilmelerine rağmen numunelerin sergiledikleri gelişmiş sertlik ve dayanım değerleri açısından tatmin edicidir ve daha yoğun mikroyapılı durumlar için ümit vericidir. Dolayısıyla, elde edilen veriler, başlangıç tozlarının tane boyutları, şekillendirme basıncı, mikrodalga gücünün optimum ayarlanması ve sinterleme sıcaklığında bekleme süresi gibi parametrelerin değerlendirilerek, daha dikkat çekici özelliklere sahip kompozit numunelerin geliştirilebilmesi için ipuçları vermektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 16.MUH.ALTY.08 no’lu proje ile desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- AL-Zubaid, A.B., Shabeeb, K.M. and Ali, A.I., 2017. Study the effect of recycled glass on the mechanical properties of green concrete. *Energy Procedia*, **119**, 680-692.
- Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. and Ferdowsi, B., 2012. Modeling the fatigue behaviors of glasphalt mixtures. *Scientia Iranica*, **19**, 3, 341-345.
- Chockalingam, S. and Traver, H.K., 2010. Microwave sintering of  $\beta$ -SiAlON-ZrO<sub>2</sub> composites. *Materials & Design*, **31**, 8, 3641-3646.
- Erüz, C., Liman, Y., Çakır, B., Özşeker, K., 2010. Doğu-Karadeniz Kıyılarında Katı Atık Kirliliği, Türkiye’nin Kıyı ve Deniz Alanları, VIII. Ulusal Kongresi, L. BALAS (Editör) 27 Nisan-1 Mayıs, Trabzon, 1495-1501.
- Exposito A. and Velasco F., 2018. Municipal solid-waste recycling market and the European 2020 Horizon Strategy: A regional efficiency analysis in Spain. *Journal of Cleaner Production*, **172**, 938-948.
- Jamaludin, S.B., Hadipramana, J., Wahid, M.F.M., Hussin, K., Rahmat, A., 2013, Microstructure and Interface Analysis of Glass Particulate Reinforced Aluminum



- Matrix Composite. *Advanced Materials Research*, **795**, 578-581.
- Kim, E.H., Cho, G.H., Lee, J.H., Jung, Y.G., Yoo, Y.S. and Seo, S.M., 2013. Fabrication and mechanical properties of metal matrix composite with homogeneously dispersed ceramic particles. *Ceramics International*, **39**, 6503–6508.
- Kumar YC, M., Shankar, U., 2012. Evaluation of Mechanical Properties of Aluminum Alloy 6061-Glass Particulates reinforced Metal Matrix Composites. *International Journal of Modern Engineering Research*, **2**, 5, 3207-3209.
- Leparoux S., Vaucher S., Beffort O., 2003. Sintering of Al/SiC and for in-situ Synthesis of TiC. *Advanced Engineering Materials*, **5**, 6, 449-453.
- Mallikarjuna, B.E, Shivanand, H.K., Reddy, H. and Ahamadsab M.H., 2017. Evaluation of Impact Properties of Fly Ash and S-Glass Reinforced Al-4046 Hybrid Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, **4**, 12285-12290.
- Marinel, S. and Savary, E., 2009. In situ measurement of the shrinkage during microwave sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 10, 4784-4788.
- Matli.P.R., Shakoore, R.A., Mohamed, A.M.A. and Gupta, M., 2016. Microwave Rapid Sintering of Al-Metal Matrix Composites: A Review on the Effect of Reinforcements, Microstructure and Mechanical Properties. *Metals*, **6**, 143, 1-19.
- Moghadam, A.D., Ferguson, J.B., Schultz, B.F. and Rohatgi, P.K., 2016. In-situ reactions in hybrid aluminum alloy composites during incorporating silica sand in aluminum alloy melts. *AIMS Materials Science*, **3**(3), 954-964.
- Mondal A., Agrawal D. and Upadhyaya A., 2009. Microwave heating of pure copper powder with varying particle size and porosity. *Journal Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **43**(1), 5-10.
- O'Donnell, G. and Looney, L., 2001. Production of aluminium matrix composite components using conventional PM technology. *Materials Science and Engineering: A*, **303**(1–2), 292-301.
- Oghbaei M. and Mirzaee O., 2010. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, **494**, 1–2, 175-189.
- Ondrusova, D., Domcekova S., Pajtasova, M., Dubec A., Micicova, Z., Pecusova, B., 2017. Alternative Filler Based on the Waste from Glass Production and its Effect on the Rubber Properties. *Procedia Engineering*, **177**, 462-469.
- Pattnayak, A., Madhu, N., Panda, A.S., Sahoo, M.K. and Mohanta K., 2018. A Comparative study on mechanical properties of Al-SiO<sub>2</sub> composites fabricated using rice husk silica in crystalline and amorphous form as reinforcement. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 8184-8192.
- Pavithra, H.S. and Anantha Prasad M.G., 2018. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Al/SiO<sub>2</sub>/C hybrid metal matrix composite, with the Influence of Chills. *Materials Today: Proceedings*, **5**(2), 1, 6053-6058.
- Prasad, D. S., Shoba, C., Ramanaiah, N., 2014. Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, **3**, 1, 79-85.
- Rogatgi, P.K., Pai, B.C. and Panda, S.C., 1979. Preparation of cast aluminum-silica particulate composites. *Journal of Materials Science*, **14**, 2277-2283.
- Sayuti, M., Baharudin, B.T. H. T., Arifin, M.K.A., Sulaiman, S. and Vijayaram, T.R., 2012. Composites and Their Properties., Ning Hu (ed.), *INTECH Open Access Publisher*, 411-436.
- Scalenghe, R., 2018. Resource or waste? A perspective of plastics degradation in soil with a focus on end-of-life options. *Heliyon*, **4**, 12, e00941, 1-39.
- Shukla, M., Ghosh, S., Dandapat, N., Mandal, A.K. and Balla V.K., 2016. Comparative Study on Conventional Sintering with Microwave Sintering and Vacuum Sintering of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Ceramics. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, **4**, 71-78.
- Singh, J. and Chauhan, A., 2016. Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, **5**(2), 159-169.
- Sulaiman, S., Sayuti, M. and Samin, R., 2008. Mechanical properties of the as-cast quartz particulate reinforced LM6 alloy matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **201**, 731–735.
- Sunil, B.R., Sivaprahasam, D. and Subasri, R., 2010. Microwave sintering of nanocrystalline WC–12Co: Challenges and perspectives. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **28**, 2, 180-186.
- Torralba, J.M., da Costa, C.E., Velasco, F., 2003. P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, **133**, 203-206.
- Vijayaram, T.R. and Baskaralal, V. P. M., 2016. A Review on the Processing Methods, Properties and Applications of Metal Matrix Composites. *International Journal of Engineering Research and Technology*, ISSN 0974-3154, **9**(1), 45-51.
- Walczak, P., Malolepszy, J., Reben, M., Szymanski, P. and Rzepa K., 2015. Utilization of Waste Glass in Autoclaved Aerated Concrete. *Procedia Engineering*, **122**, 302-309.
- Zheng R.R., Wu Y., Liao S.L., Wang W.Y., Wang W.B and Wang A.H., 2014. Microstructure and mechanical properties of Al/(Ti,W)C composites prepared by microwave sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, **590**, 168–175.
- Zuhailawati, H., Samayamutthirian, P. and Haizu C.H.M., 2007. Fabrication of Low Cost of Aluminium Matrix Composite Reinforced with Silica Sand. *Journal of Physical Science*, **18**(1), 47–55.

**İnternet kaynakları**

1-<https://www.researchgate.net/publication/329000719> (08.01.2019)

2-<http://www.johnsrefuse.com/blog/bid/148981/Glass-What-is-and-isn-t-Recyclable> (06.01.2019)

3-<https://www.mass.gov/files/documents/2016/08/pq/pocket-guide-2003.pdf> (06.01.2019)

4-<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/5703.pdf> (08.01.2019)