







Termoset Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CTP) Atıkların Mekanik Geri Dönüşüm Ürünlerinin Sıcak Pres Kalıplama Bileşiminde (BMC) Tekrar Değerlendirilmesi

Re-use of Mechanically Recycled of Thermoset Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Waste in Bulk Moulding Compound (BMC)

Fatih Balıkoğlu¹ , Tayfur Kerem Demircioğlu^{1*} , Akın Ataş¹ , Seda Beyaz² , Nurettin Arslan³ 

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

²Balıkesir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Balıkesir, Türkiye

³Manisa Celal Bayar Üniversitesi Hasan Ferdi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Manisa, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, termoset esaslı cam elyaf takviyeli polimer (CTP) plakaların mekanik geri kazanımı işlemi ve tekrar kullanımı araştırılmıştır. Geri dönüşüm ürünleri kütleli olarak % 4, 8, 12, 16 oranlarında sıcak pres kalıplama bileşiminde (BMC) orijinal fiberlerin yerine kullanılmıştır. Geri dönüşüm cam fiber içeren numunelerin çekme test sonuçlarındaki düşme miktarı, orijinal numuneler ile karşılaştırıldığında %5'in altında kalmıştır. %4 geri dönüşüm içeren numunenin en düşük eğilme dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Kütlece % 8, 12, 16 geri dönüşüm takviyeli numunelerin eğilme test sonuçları ise, %100 orijinal cam fiber içeren numuneler ile kıyaslandığında eğilme özelliklerinde düşme miktarları %10 civarında belirlenmiştir. %4 geri dönüşüm içeren numune dışında tüm numuneler kabul edilebilir mekanik performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf takviyeli polimer (CTP), Mekanik geri dönüşüm, Sıcak pres kalıplama bileşimi (BMC)

Abstract

In the present research, mechanical recycling and re-use of thermoset glass fiber reinforced polymer (GFRP) plates were investigated. Recyclate materials were used by 4, 8, 12, and 16 percent in weight instead of the virgin fibers in the BMC dough. The amount of reduction in the values of tensile test results of samples containing recyclate materials remained less than 5% of the virgin fiber reinforced sample results. The samples with 4% recyclate materials had the lowest bending strength. The reduction of bending properties of the samples including 8, 12, 16% recyclates was found be approximately 10% of the results of the virgin fiber reinforced samples. All samples except for samples containing 4% wt of recyclates exhibited acceptable mechanical performance.


Keywords: Glass fiber reinforced polymer (GFRP), Mechanical recycling, Bulk moulding compound (BMC)


1. Giriş


Kompozit malzemeler, yük taşıma kabiliyetleri, hafif olmaları, korozyon dirençleri ve düşük bakım ücretleri nedeniyle kara, deniz ve hava ulaşımında, inşaat-yapı uygulamalarında ve enerji sektörlerinde tercih edilmektedir. Özellikle


otomotiv ve havacılık sanayiinde, enerji maliyetlerini ve dolayısıyla CO₂ emisyonu değerlerini düşürmeleri sebebiyle geniş uygulama alanına sahiptirler (Reynolds ve Pharaoh 2010). Kompozit malzeme uygulamaları, binek otomobil üretiminde ortalama 200 kg hafiflik sağlamaktadır. Avrupa'da her yıl 17 milyon binek araç üretildiği düşünülürse, konstrüksiyonda sağlanan hafiflik miktarı büyük miktarda yakıt tüketimi tasarrufu anlamı taşımaktadır. Ayrıca, Avrupa'da üretilen binek araçlarda tüketilen ortalama 120 kg plastik malzemenin, ağırlıkça %20'si kompozit malzeme içermektedir (Mc Kechnie 2008). Ticari hava ulaşımında ise Boeing 787 "Dreamliner" ve Airbus A380 yolcu taşıma


*Sorumlu yazarın e-posta adresi: tkerem@balikesir.edu.tr

Fatih Balıkoğlu  orcid.org/0000-0003-3836-5569

Tayfur Kerem Demircioğlu  orcid.org/0000-0002-0518-0739

Akın Ataş  orcid.org/0000-0002-2185-465X

Seda Beyaz  orcid.org/0000-0002-6422-675X

Nurettin Arslan  orcid.org/0000-0002-7910-1853

uçaklarında sırası ile yapısal eleman olarak %50 ve %25 oranında kompozit malzeme kullanım oranlarına ulaşılmıştır. Kompozit malzemelerin kullanıldığı diğer endüstri kollarına inşaat/yapı, tüketim malları (spor araç/gereç vs.), elektrik/elektronik, denizcilik, rüzgâr enerjisi ve hafif raylı taşımacılığı örnek gösterilebilir (Yang vd. 2012). Türkiye’de CTP (cam elyaf takviyeli polimer) kompozit malzeme pazarı 1.225 milyar Avro ve 245.000 tonluk bir hacme ulaşmıştır (Paksoy, K. vd. 2016). Kişi başına düşen kompozit malzeme tüketimi Dünya’da 4 ile 10 kg arasında bir dağılıma sahip iken, ülkemizde 3 kg düzeyindedir. Ülkemizde kompozit malzemenin ağırlıklı olarak yapı/inşaat, otomotiv ve boru/tank sektörlerinde kullanıldığı bilinmektedir. Bu sektörlerin toplamı kompozit malzeme tüketim pastasının yaklaşık %85’ni oluşturmaktadır. Türkiye’de, ileri teknoloji gereksinimi duyulan otomotiv, uzay ve havacılık, elektrik ve elektronik sanayinin gelişimi ile daha fazla miktar ve oranda kompozit malzeme kullanımının gerçekleşmesi beklenmektedir. BMC (sıcak presleme kalıplama hamuru) hatları ülkemizde toplam kompozit üretim hacminin %3’ünü, Avrupa’da toplam üretim hacminin %5’ni, Dünya’da ise %9’nu oluşturmaktadır (Paksoy K. vd. 2016). Bu veriler önümüzdeki dönemde BMC üreticilerinin Türkiye’deki pazar paylarını ve üretim kapasitelerini arttırmaları gerektiğini göstermektedir. Artan üretim kapasitesi ise hammadde ve enerji giderlerinin artışına neden olacaktır. BMC sıcak pres kalıplanması, kırılmış cam elyaf ve dolgulu polyeester içeren hamur haline getirilmiş karışımların yüksek sıcaklık (120°C-160°C) ve basınç altında (100-150 bar) kalıplanma yöntemidir. Dalgulu polyeester içerisinde polyeester reçine, inhibitör, sertleştirici, stiren, dolgu, kalınlaştırıcı, kalıp ayırıcı ve pigment bulunmaktadır. Örnek olarak seçilen bir BMC hamurunda; kırılmış cam elyaf %20, reçine %17.7, dolgu (CaCO₃) %57.4, çinko streat %1.1, TBPB %0.2, stiren %3.6 oranında bulunmaktadır. BMC hamurundaki kırılmış cam elyaf boyutları; 3.175 mm-12.5 mm (1/8”-1/2”) aralığında değişmektedir. Cam elyaf içeriği ise, toplam karışımın ağırlıkça %10-%30’unu oluşturur (Jutte ve Graham 1991). BMC ürünlerine elektrik, su ve doğalgaz panoları, pompa muhafazaları, park, bahçe, yol aydınlatma parçaları, otomobil far muhafazaları, tampon ve çamurluklar, kaput, rüzgâr deflektörleri, tren/metro koltukları gibi örnekler verilebilir.

Mühendislik yapıları çalışma koşullarında belirli servis ömürlerine sahiptir. Örnek olarak, yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgâr türbinlerinin ortalama servis ömürleri 20 yıl olarak tahmin edilmektedir. CTP kompozit yapıların çalışma ömürleri genel olarak 15 ile 20 yıl

arasında olduğu bilinmektedir (Asmatulu vd. 2014). Servis ömrü biten ve üretim ıskartası olan ürünler ise atık olarak sınıflandırılmaktadır. Atık olarak sınıflandırılan CTP malzemeler ise depolama (1), yakma (2) ve geri dönüşüm (3) olarak değerlendirilmektedir (Yazdanbakhsh ve Bank 2014). Mühendislik malzemelerin geri dönüşümü sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir sanayi gelişimi açısından büyük önem taşımaktadır. Metaller, cam ve plastik malzemelere büyük ölçüde geri dönüşüm uygulanmakta ve tekrar üretime katılmaları sağlanmaktadır. Fakat kompozitlerin heterojen yapıları nedeniyle matris ve takviye elemanlarının ayrışma problemi içermesi geri dönüşüm prosesleri için sorun oluşturmaktadır. 2008-2028 yılları arasında sadece rüzgâr enerjisi sektöründe atık kompozit malzeme miktarının 1 milyon tonu aşması beklenmektedir (Papadakis 2010). Avrupa birliği ülkelerinde 2015 yılı itibari ile ömrü biten ve üretim firesi olan termoset kompozit atıkların miktarının 304.000 tona ulaşacağı raporlanmıştır (Tittarelli F. 2013). Otomotiv sektöründe, ömrü biten, üretim firesi ve bakım/onarım sonucu atık olarak sınıflandırılan kompozit malzemelerin bertarafı için önlemler alınmaktadır. Avrupa Birliği yönetmelikleri (EU Directive 2000/53/EC) otomotiv sektöründe, 2015 yılından itibaren kullanım süresi sona eren araçların %85 oranında tekrar kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir olmasını istemektedir. %10 oranında ise yanma sonucu enerji kazanımına izin verilmektedir. Netice olarak ömrü sona eren otomotiv parçalarının %95 oranında tekrar kullanılması hedeflenmektedir. %5 oranında atık malzemenin ise çöp olarak nitelendirilmesi öngörülmektedir (EU Directive 2000/53/EC). Günümüzde servis ömrü biten ve üretim firesi olan kompozitlerin geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. CTP kompozit malzemeler genellikle termoset ve termoplastik matrisli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Termoset malzemelerin ucuz ve kalıplama teknolojilerine uygun olmaları tercih edilmelerine neden olmuştur. Fakat termoset malzemelerin geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanılması ise, termoplastik malzemelere kıyasla farklı ve karmaşık geri dönüşüm süreçleri içermektedir. Bu nedenle termoset malzemelerin geri dönüşümü ve tekrar kullanılması önem taşımaktadır (Yang vd. 2012, Asmatulu vd. 2014). Yang vd. (2012), termoset matrisli kompozitlerin kullanıldığı otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde geri kazanım çözümlerine yönelik geliştirilen stratejileri raporlamıştır. Makalede, ömrü biten ve üretim ıskartası olan termoset kompozitlerin geri dönüşüm prosesi, atıkların toplanması, ayrıştırılması ve geri dönüşüm süreçleri açıklanmıştır. Geri dönüşüm ürün maliyet giderlerinin

yüksek ve çıktılarının düşük kaliteye sahip olmaları nedeni ile ticari olarak tercih edilmedikleri vurgulanmıştır. Çözüm olarak (a) yeni ve kolay geri dönüştürülebilir kompozit malzemeler geliştirilmesi, (b) arınma ve ayrıştırma yöntemleri yoğunlaştırılmış geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, (c) üretimde geri dönüşüm ürünü fiberlerin orijinal fiberlerin yerine kullanılması çözüm olarak ileriye sürülmüştür. Conroy vd. (2006), çalışmalarında CTP geri dönüşüm ürünlerinin inşaat ve yapı elemanlarında kullanıma yönelik örneklerle yer vermiştir. Ahşap kerestelerin yerini alabilecek çevresel şartlara dayanıklı yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) matrisli ve CTP geri dönüşüm fiber takviyeli plastik kırımlar incelenmiştir. Plastik kırımlar, kıyı şeritlerinde dalga kıran, liman yer döşemesi ve tekneler için iskele koruyucusu olarak uygulama alanı bulmuştur. Diğer başka bir uygulamada, öğütülmüş CTP dolgu malzemesi ve ahşap parçacıklar birlikte kullanılarak ahşap-CTP kompozit kırımlar üretilmiştir. CTP geri dönüşüm takviyeli ve polyester matrisli rögar, ızgara ve pis su kapak üretimleri de termoset geri dönüşüm uygulamalarına örnek gösterilmiştir. Pickering (2006), çalışmasında termoset kompozitler için uygulanan geri dönüşüm teknolojilerini rapor etmiştir. Termoset kompozitlerin geri dönüşümü mekanik, termal ve kimyasal yöntemler ile sağlanmaktadır. Termal işlem olarak yanma (combustion), ısıl bozunma (pyrolysis) ve akışkan yataklı yanma (fluidised bed) yöntemleri kullanılmaktadır. Kimyasal olarak ise kimyasal çözünme (solvolysis) işlemi uygulanmaktadır.

Bu çalışmada ise CTP plakalara kesme, parçalama ve öğütme gibi mekanik geri dönüşüm işlemleri uygulanmıştır. Bu yöntem ile reçine, fiber ve dolgu malzemesi içeren geri dönüşüm ürünleri elde edilmektedir. Atık malzemeler, kesme, parçalama işlemleri sonucunda 50-100 mm, öğütme ile 50 µm-10 mm tane boyutlarına indirilmektedir. Uygulamalarda, sıcak pres pestili (SMC) ve sıcak pres hamuru (BMC, DMC) hatlarından çıkan ömrü sonu ermiş ve iskarta ürünlerin mekanik geri dönüşüm çıktıları tekrar üretimde kullanılmıştır (Derosa vd. 2005a). SMC geri dönüşüm ürün boyut sınıflandırılmasına, ERCOM (Almanya) ve Phoenix Fiberglass (Kanada) firmalarının uygulamaları örnek olarak verilebilir (Pickering 2006). ERCOM şirketi SMC geri dönüşüm ürünlerini 250 µm, 250µm-3mm, 3-15 mm, 3-20 mm fiber boyutlarına göre fiber ve toz dolgu içeren ürünler olarak sınıflandırmıştır. Phoenix Fiberglass şirketi ise, 0.8 mm, 1.6 mm, 3.1 mm ve 12 mm fiber boyutlarına sahip farklı fraksiyonlarda cam fiber içeren SMC geri dönüşüm ürünlerini ticari olarak

tekrar SMC ve BMC hatlarına sağlamıştır. Palmer (2009) tezinde, mekanik geri dönüşüm ürünlerini, tane boyutu 0.5 mm'den küçük ise toz dolgu malzemesi, 0.5 mm ile 2 mm aralığında ise cam fiber olarak kabul etmiştir. Tane boyutlarının azalması ile kütlece % cam içeriği azalmakta ve reçine miktarı bakımından zengin toz dolgu malzemesi sağlanmaktadır. Pickering (2006) makalesinde, SMC/BMC geri dönüşüm ürünlerinin dolgu malzemesi (kalsit, silikatlar, kil ürünlerinin) yerine kullanılması durumunda mekanik dayanımlarda gerçekleşecek %10 oranında azalmanın kabul edilebilir olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, SMC ve BMC üretiminde geri dönüşüm cam içeriğinin, orijinal fiberler ile birlikte kullanılması öngörülmüştür. Palmer ve vd. (2009), orijinal ve geri dönüşüm fiberlerin hamur içerisinde karıştırma sürelerinin nihai ürünün mekanik performansına etkisini araştırmıştır. Geri dönüşüm fiberlerin karışması ve ıslanması sağlandıktan sonra kalan karışma süresinde orijinal fiberlerin DMC hamuruna eklenmesi mekanik dayanım değerlerinde olumlu etkiye neden olmuştur. Orijinal ve geri dönüşüm fiberlerin aynı anda karışıma eklendiği numunelere göre, eğilme dayanımında %25, darbe dayanımında ise %10 artış sağlanmıştır. Çalışmada %10 değerinde geri dönüşüm çıktısı, % oransal (% fiber ve % dolgu değerleri) ve % ağırlıkça (%100 fiber takviyesi) kabul edilerek iki farklı şekilde orijinal fiberler yerine DMC hamuruna katılmıştır. Numunelerin ortalama darbe dayanım değerleri % oransal ve % ağırlıkça hesaplanan karışım değerlerinde standart numuneden yüksek çıkmıştır. Eğilme dayanımları, standart malzemenin %92 ile %97 arası değerlerine ulaşmıştır, az miktarda düşme göstermiştir. Eğilme modülü değerlerinde ise, %10 azalma gözlenmiştir. Palmer vd. (2010), diğer bir çalışmada karbon fiber geri dönüşüm çıktıları SMC ürünlerinde orijinal cam fiberler yerine kullanmışlardır. SMC pestili içerisinde ağırlıkça %20 geri dönüşüm karbon fiber takviyesi numunelerin eğilme ve darbe dayanımlarında sırası ile %14 ve %20 düşmeye neden olmuştur. Eğilme modül değerinde ise %15 artış gözlenmiştir. Bledzki ve Goracy (1994), SMC atık malzemeleri, takviye (%35) ve dolgu (%32) oranları sabit kalmak şartı ile SMC ve BMC ürünlerinde tekrar kullanmıştır. BMC hamurunda ağırlıkça %15 oranında dolgu yerine, 0.2 mm boyutunun altında atık malzemenin kullanılması nihai ürünün eğilme dayanımında %10 artışa, çekme dayanımında ise %10 düşmeye sebep olmuştur. Ağırlıkça %30 oranında aynı toz atığın karışıma eklenmesi ise ürünün eğilme ve çekme dayanım değerlerinde sırası ile %18 ve %31 oranında düşmeye neden olmuştur. Orijinal fiberlerin yerine ağırlıkça %15, 0.5 ile 1.25 mm tane boyutu aralığında fiber ağırlıklı atık malzemenin

kullanılması sonucunda, numunelerin çekme dayanımında yaklaşık %10 düşme gözlenmiştir, eğilme dayanım değeri ise etkilenmemiştir. Orijinal fiberlerin yerine ağırlıkça %30 değerine karşılık gelen geri kazanım fiberlerin kullanılması ise eğilme dayanımının %17 azalmasına neden olmuştur. BMC ürünlerinde kullanılan dolgu esaslı atık malzeme sadece eğilme dayanım değerlerinde artış sağlamıştır. Aynı çalışmada, SMC pestilinde ağırlıkça %10 oranında, tane boyutu 0.2 mm'nin altında veya 0.2 ile 0.5 mm aralığında bulunan geri dönüşüm dolgu malzemesi kullanılması ise çekme, darbe ve eğilme dayanımlarında artış sağlamıştır. Çalışmalarda, hasar alan BMC numunelerinde çatlak ilerlemesi, geri dönüşüm fiber- matris ara yüzeyinde olduğu mikroskobik görüntüler ile tespit edilmiştir. Geri kazanım ürünü fiber ve matris arasında oluşan bağ kuvvetinin zayıf olduğu ortaya çıkmıştır (Bledzki vd. 1992, Derosa vd. 2003). Petterson ve Nilsson (1994) ağırlıkça %50/50 (yarı yarıya), tane boyutları 0.2 ile 0.5 mm aralığında dolgu bazlı ve 0.5 ile 1.25 mm aralığında cam içerik ağırlıklı SMC atıkları tekrar SMC pestili içerisinde ağırlıkça %50 dolgu malzemesi yerine kullanmıştır. Üretilen numunelerin eğilme dayanımlarında %16 artış sağlanmıştır. Aynı çalışmada, BMC hamurunda CaCO₃ dolgu malzemesinin tümü (%100) yerine, 0.5 mm üstü tane boyutuna sahip fiber içerikli geri dönüşüm ürünü kullanılması ise, numunelerin eğilme dayanım değerinde %52 azalmaya neden olmuştur. Inoh vd. (1994), SMC ürünlerinde, CaCO₃ dolgu malzemesi yerine kullanılan SMC geri dönüşüm dolgu malzemesinin özgül ağırlık değerinin %25 oranında düşük olduğunu bu nedenle, geri dönüşüm dolgusunun % kütlece kullanılmasının, fazla atık girdisinin (%25) karışıma katılmasına neden olabileceğini vurgulamışlardır. Karışım viskozite değerlerinin kontrol edilebilir kalması için geri dönüşüm dolgu malzemesinin ağırlıkça %30'un altında olması gerektiği vurgulanmıştır. Derosa R. vd. (2005b), SMC geri dönüşüm ürünü fiber takviyelerini, BMC hamurunda orijinal fiberler yerine kullanmıştır. Araştırmada, 12.7 mm, 12.7&6.35 mm, 6.35 mm, 3.175 mm boyutlarında orijinal fiber takviyeli, ağırlıkça %100 geri dönüşüm fiber içeren ve takviye elemanı içermeyen numunelerin eğilme dayanım ve rijitlik değerleri karşılaştırılmıştır. Tamamen geri dönüşüm fiber içeren numunelerin eğilme dayanım değerleri, 12.7 mm orijinal fiber içeren numunelere kıyasla %75 oranında azalmıştır. Orijinal fiber boyutunun kısalması eğilme dayanım ve rijitlik değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Çalışmada, 0.5 mm ile 17 mm arasında tane boyutları değişen geri dönüşüm fiberlerin ortalama uzunluğu 3.175 mm olarak belirlenmiştir. Ağırlıkça %5 ve %11.5 geri dönüşüm içeren

numuneleri, ağırlıkça %11.5 ve %16.6 orijinal fiber içeren referans numuneler ile karşılaştırmıştır. Üretilen test numunelerinde fiber ve dolgu miktarlarının sabit kalması sağlanmıştır. Orijinal fiber içeren numunelerde fiber miktar artışı eğilme dayanım ve rijitlik değerlerinin artışı sağlamıştır. Fakat geri dönüşüm takviyeli ürünler için aynı durum geçerli değildir. Ağırlıkça %11.5 geri dönüşüm fiber içeren numunelerin eğilme dayanım ve rijitlik değerlerinde, %11.5 orijinal fiber içeren numunelere kıyasla %70 ve %51 azalma belirlenmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %11.5 orijinal fiber içeren numunelerden iki kat daha fazla takviye elemanı içeren %100 geri dönüşüm takviyeli numunenin dayanım değerlerinin sabit kaldığı ve rijitlik değerinin %40 azaldığı rapor edilmiştir. Geri dönüşüm fiber miktarının, dayanım değerlerinde düşmenin tek nedeni olmadığı vurgulanmıştır. Hasar alan numunelerin kırılma yüzeylerinin mikroskobik incelenmeleri sonucu çatlak ilerlemesinin geri dönüşüm fiber-matris ara yüzeyinde ilerlediği belirlenmiştir. BMC ürünlerinde tekrar kullanılan geri kazanım fiber boyutlarının, orijinal fiberlere kıyasla kısa ve fiber-matris bağ kuvvetlerinin zayıf olmasından dolayı dayanım değerlerinin düştüğü raporlanmıştır.

Literatürde, SMC-BMC (sıcak pres kalıplama yöntemleri) ürünlerinde, aynı üretim hatlarından çıkan ömrü biten ve fire malzemelerin geri dönüşüm ürünleri kullanılmıştır. Ayrıca, mekanik geri dönüşüm işlemi, orijinal fiber boyutlarının daha fazla kısalmasına ve cam fiberlerin yıpranmasına sebep olmuştur. Yapılan çalışmada ise, sürekli CTP üretim hattından çıkan fire ürünlerin BMC ürün reçetesinde tekrar değerlendirilmesi çalışılmıştır. Çok yüksek üretim kapasitelerine sahip ilgili sektörlerden atık niteliğindeki CTP plaka-rulo fire malzeme tedariki rahatlıkla sağlanmıştır. CTP plakaların dokuma cam elyaf içermesi, geri dönüşüm ürünlerinin fiber miktarı bakımından zengin, fiber boyutlarının ise geniş aralıkta olmasını sağlamıştır. Ayrıca, sürekli kompozit üretimi yapan hatların atıklarının temiz ve hep aynı kalitede olmasından dolayı ham madde tedarikinde kalite anlamında sürdürülebilirlik sağlanmıştır. Araştırmanın, çevre dostu olarak bilinen ve her geçen gün önem kazanan "Geri Dönüşüm" uygulamalarına örnek teşkil edecek olması ve Türk Kompozit Sektöründe oldukça yaygın uygulama alanı bulması beklenmektedir. Çalışma kapsamında üretilen menşei ve içeriği belirlenen toz atığın (cam fiber + reçine + dolgu) farklı sektörlerde kullanım potansiyeline sahip olması nedeniyle; rögar, ızgara, pis su kapak üretimi, plastik kirişler vb. yapı uygulamalarında, CTP geri kazanım ve tekrar kullanım uygulamasının yaygınlaşması öngörülmektedir.

2. Gereç ve Yöntem

Çalışmada, fire CTP plaka ve rulo malzemelere mekanik geri dönüşüm prosesi uygulanmıştır. CTP fire malzemeler ilk olarak bıçaklı kırıcı makine haznesine uygun şekilde 50x50 mm boyutlarında parçalar halinde hazırlanmıştır. Kırma ve kesme işlemleri sonrasında cam fiber, reçine ve dolgu içeren toz atık elde edilmiştir. Fiber ve dolgu malzemesi içeren ürünlerin tane boyutu sınıflandırılması elek ile eleme yöntemi ile yapılmıştır. Geri dönüşüm ürünü cam fiberler, BMC hamurunda orijinal fiberler ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada takip edilen aşamalar Şekil 1'de şematik olarak verilmiştir.

2.1. Mekanik Geri Dönüşüm İşlemi

CTP plaka ve rulo fire malzemelerin mekanik geri dönüşümü için kırma ve kesme amaçlı tasarlanan laboratuvar tipi bıçaklı kırıcı geri dönüşüm makinesi kullanılmıştır. Bıçaklı kırıcı 2.2kW, 1400 d/dak ile tahrik edilmektedir. Kırma öğütme haznesinin en/genişlik boyutları 160 mm x 240 mm olarak belirlenmiştir. Kırıcı öğütücü makine 50 mm x 50 mm parça besleme boyutuna sahiptir. Dış gövde çelik konstrüksiyondan imal edilmiş, rotor üzerinde değiştirilebilir özellikte ısı işlemi ile serleştirilmiş, taşlamaya tabi tutulan bıçaklar bulunmaktadır. Mekanik geri dönüşüme uğrayacak CTP malzemelere, rotor üzerinde bıçaklar ve öğütme duvarı arasında parçalama (kırma) işlemi uygulanmaktadır. Mekanik geri dönüşüm işlem sıralaması ve bıçaklı kırıcı makinesine ait detaylar Şekil 2'de verilmiştir.

2.2. Geri Dönüşüm Ürünlerinin Boyut Sınıflandırılması

Geri dönüşüm ürünleri tane boyutu 1 mm'den küçük (<1mm) ise ince taneli ve 1 mm'den büyük eşit (≥ 1 mm) ise kaba taneli olarak ayrılmıştır. CTP atıklardan elde edilen ince ve kaba taneli ürünlerin sınıflandırılması Şekil 3'de verilmiştir. Geri dönüşüm ürünlerine 11.7, 9.5, 6.7,

5.6, 4, 3.35, 2 ve 1 mm eleklerden geçirilerek sınıflandırma yapılmıştır. Tane boyutu sınıflandırılması yapılan atıkların resimleri Şekil 4'de verilmiştir. Geri dönüşüm ürünlerinin 1kg kütledeki ortalama tane boyutu dağılımı 3'er örnek üzerinden hesaplanmıştır (Şekil 5). Ağırlıkça % 36, % 18 ve % 16 oranlarına sahip, 1 mm, 2 mm ve 3.35 mm boyutlara sahip geri dönüşüm ürünleri, toplam ürün kütlelerinin %70'ni oluşturmaktadır. Parçacık boyutu birikimli yüzde (% kütle) tane boyutu grafiği çıkarılmış, neticesinde ortalama geri dönüşüm tane boyutu 3 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 6).

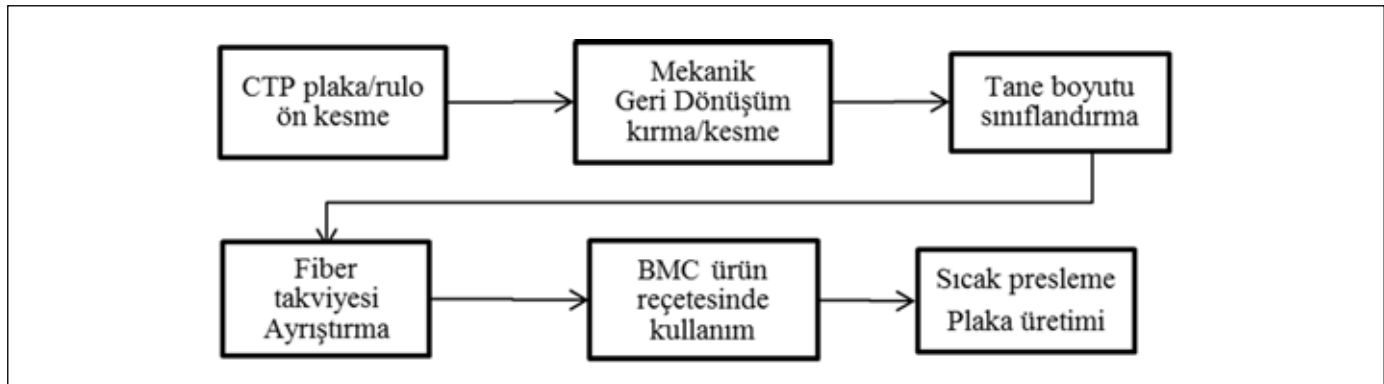
2.3. BMC Plakaların Üretimi

Geri dönüşüm ürünleri tane boyut sınıflandırılması işleminden sonra BMC hamur içerisinde orijinal fiberler (kullanılmamış) ile birlikte takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde, 200 kg BMC hamur içerisinde kütlece %12 oranında 24 kg, orijinal ve geri dönüşüm ürünü kırık cam elyaf kullanılmıştır. Orijinal cam fiber boyutu 12 mm'dir. 24 kg fiber takviyesi içerisinde kütlece % 4, 8, 12 ve 16 oranında sırası ile 1, 2, 3, 4 kg geri dönüşüm ürünleri, orijinal fiberlerin yerini almıştır. 300 gram kütleyle, 250x150x4 mm ebatlara sahip test plakaları 3 dakika sürede, 145°C'de, 150 bar basınç altında üretilmiştir. Aynı zamanda, 24 kg orijinal cam fiberin kullanıldığı referans plakalar da üretilmiştir. Hazırlanan plakalardan kesilen numunelerin mekanik performansları, orijinal fiber takviyeli numuneler ile karşılaştırılmıştır.

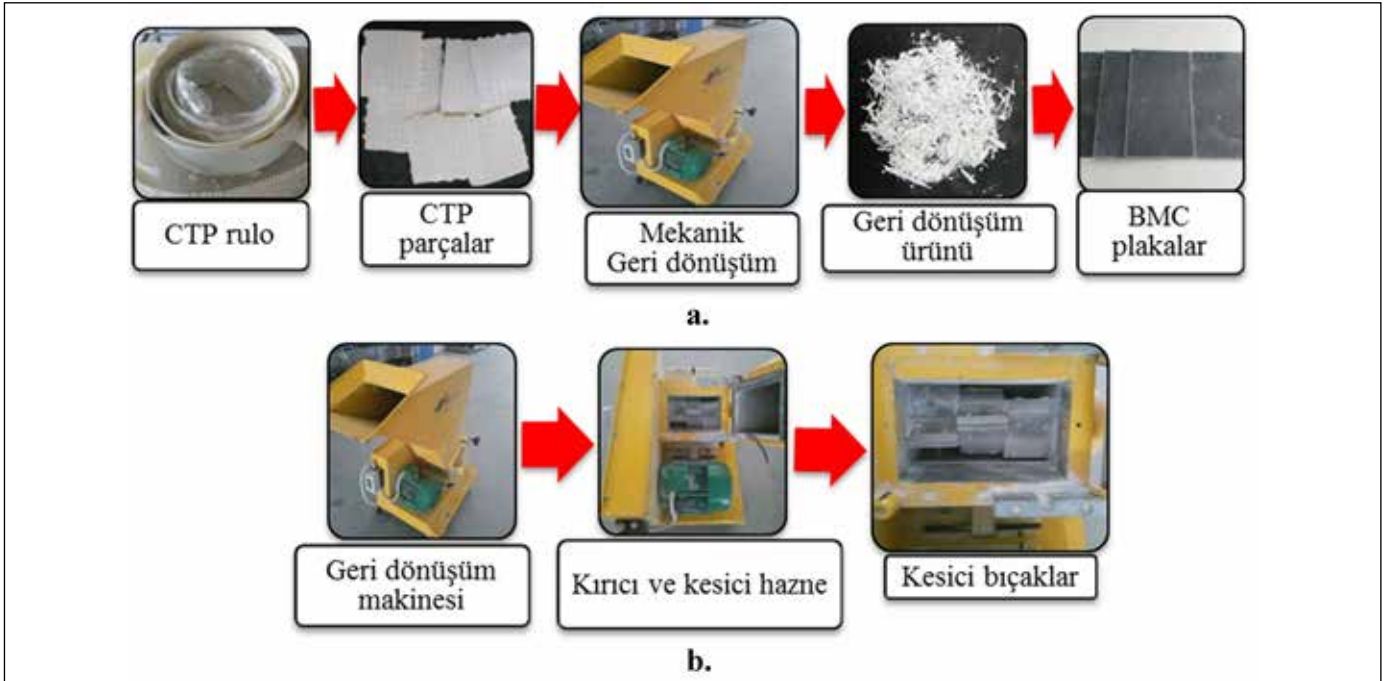
3. Bulgular

3.1. Statik Mekanik Test Sonuçları

Üretilen BMC plakalardan kesilen numunelere ISO 527-4 ve ISO 178 standartlarına uygun çekme ve eğilme statik mekanik testleri uygulanmıştır. Çekme testi numuneleri 25 mm x 250 mm x 4 mm, eğilme test numuneleri ise 10 mm x 80 mm x 4 mm boyutlarında standartlara uygun şekilde



Şekil 1. CTP plaka geri dönüşüm prosesi.



Şekil 2. Mekanik geri dönüşüm işlemi A) Geri dönüşüm işlem sıralaması, B) Bıçaklı kırıcı/kesici makine detayları.



Şekil 3. CTP plaka mekanik geri dönüşüm ürünleri (ince ve kaba taneli ürünler).

hazırlanmıştır (genişlik × uzunluk × kalınlık). Geri dönüşüm takviyeli numunelerin statik mekanik test sonuçları kutubiyik diyagramları şeklinde Şekil 7-12'de verilmiştir. Mekanik testler 250 kN Zwick Roell Z250 elektromekanik çekme-basma cihazında yapılmıştır. Mekanik testler sonucu dayanım, Young modülü ve % uzama değerleri rapor edilmiştir. Kutu biyik diyagramlarında mekanik özelliklerin maksimum, minimum, ortalama ve medyan değerleri gösterilmektedir. Geri dönüşüm takviyeli ürünlerin ortalama dayanım, Young modülü ve % uzama değerleri Çizelge 1

ve 2'de verilmiştir. Orijinal numune olarak isimlendirilen numuneler geri dönüşüm takviyesi içermemektedir. Geri dönüşüm ürünü içeren numunelerin mekanik dayanım değerlerinde %10 düşme kabul edilebilir görülmüştür (Pickering 2006). Statik mekanik çekme testleri için 15'er, eğilme testleri için ise 30'ar adet numune test edilmiştir.

Geri dönüşüm içeren numunelerin çekme dayanımı, Young modülü ve % uzama değerlerinin ± 5 sınırlar dâhilinde ve kabul edilebilir olduğu gözlenmiştir. Kütlece %16 geri dönüşüm içeren numune en yüksek çekme dayanımı, Young modülü ve % uzama değerlerine sahiptir.

Eğilme test sonuçlarında kütlece %4, %12 ve %16 geri dönüşüm cam fiber içeren numunelerin dayanım değerleri azalmıştır. Kütlece %12 geri dönüşüm cam fiber içeren numunenin eğilme dayanımında %10'un altında (kabul edilebilir) düşme gözlenmiştir. %8 atık içeren numunenin orijinal numuneye kıyasla eğilme dayanımı değeri artmıştır.

3.2. Geri Dönüşüm Ürünlerindeki Cam Elyaf İçeriklerinin Bulunması

Geri dönüşüm ürünlerinde polimerik reçine ve cam fiber takviyesi ağırlıkça fazla miktarda bulunmaktadır. Bunların dışında çok az miktarlarda da olsa inorganik kısım (başlatıcılar, katalizörler, CaCO_3 vb.) bulunabilmektedir. Cam fiberler ve inorganik malzemeler ısıya karşı oldukça dayanıklı iken polimerik reçineler 200°C 'den sonra bozunmaya başlarlar.

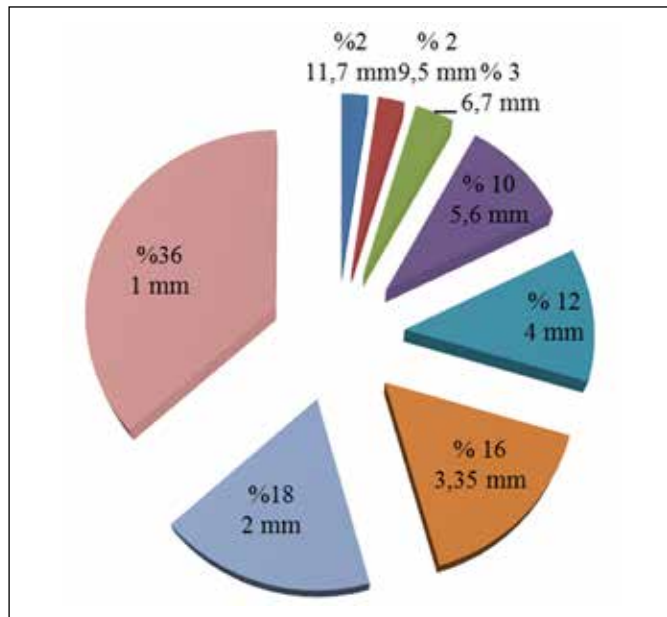
Çizelge 1. Çekme test sonuçları

Geri dönüşüm ürünü (% kütlece)	%4	%8	%12	%16	Orijinal
Çekme dayanımı (MPa)	28.575	26.772	26.948	28.839	27.345
Std. sapma	4.070	4.667	3.129	2.774	4.753
Young Modülü (GPa)	9.09	8.957	8.94	9.277	9.008
Std. sapma	352.145	326.743	311.337	306.297	292.602
% uzama	0.375	0.370	0.358	0.378	0.363
Std. sapma	0.0762	0.0771	0.0824	0.0798	0.0843

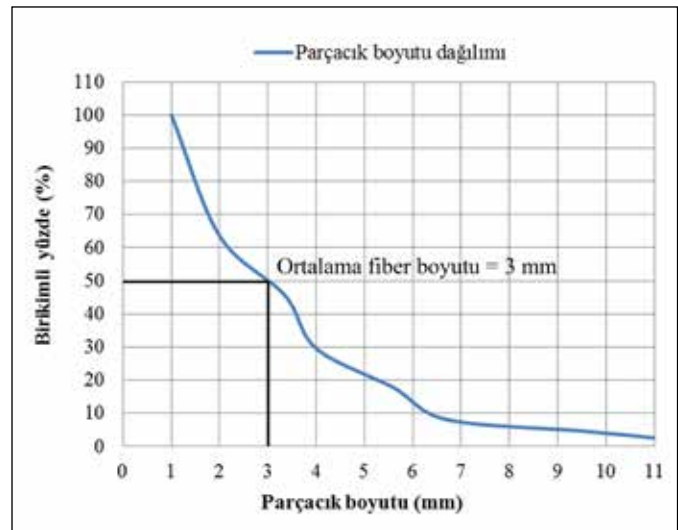
Ortalama çekme dayanımı, Young modülü, % uzama değerleri.



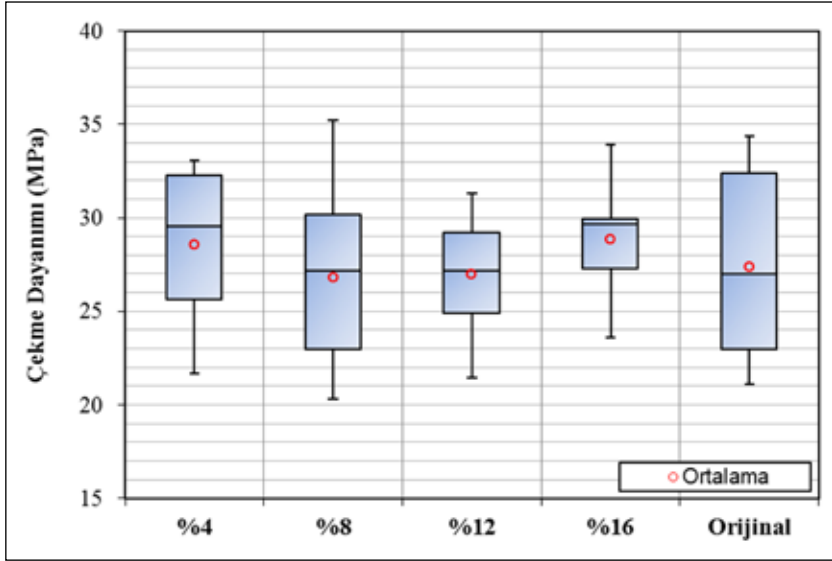
Şekil 4. CTP geri dönüşüm ürünleri. A) İnce taneli (<1 mm), B-H) kaba taneli (>1 mm).



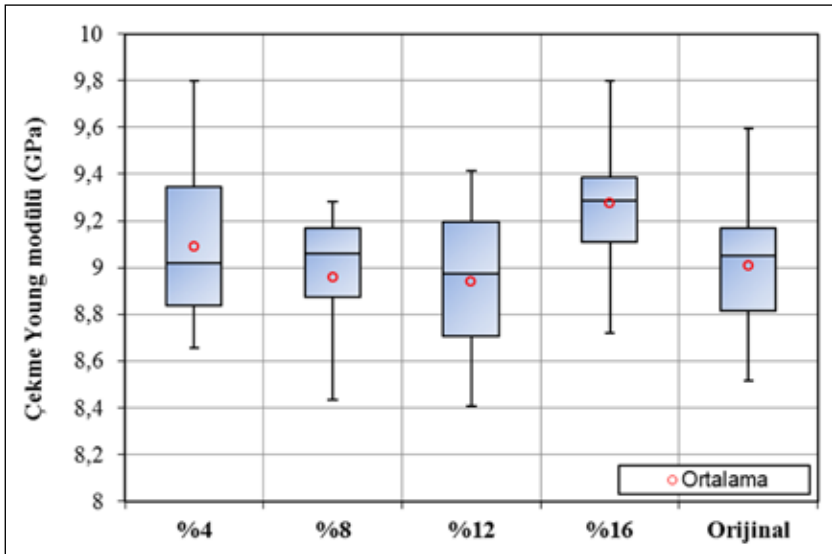
Şekil 5. Geri dönüşüm ürünlerinin tane boyutu dağılımı (% kütlece).



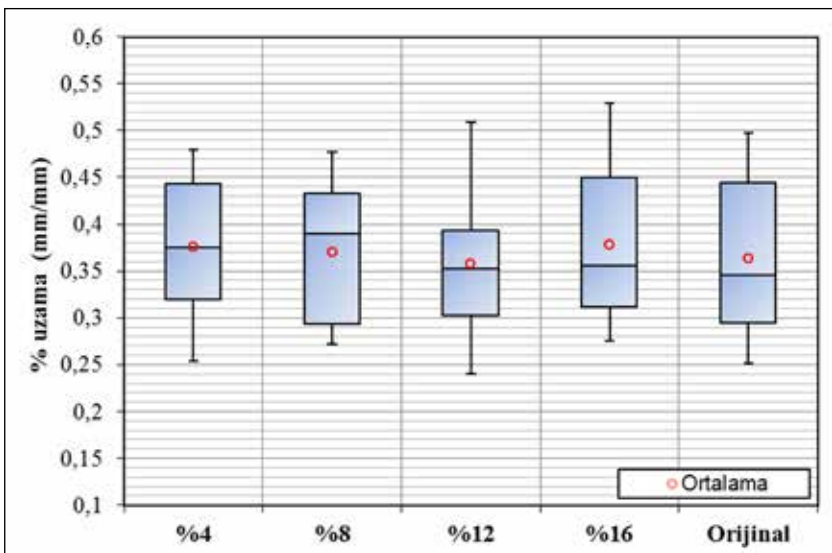
Şekil 6. Geri dönüşüm ürünü birikimli yüzde/parçacık boyutu grafiği.



Şekil 7. Kütlege % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin çekme dayanım değerleri.



Şekil 8. Kütlege % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin çekme Young modül değerleri.



Şekil 9. Kütlege % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin çekme % uzama değerleri.

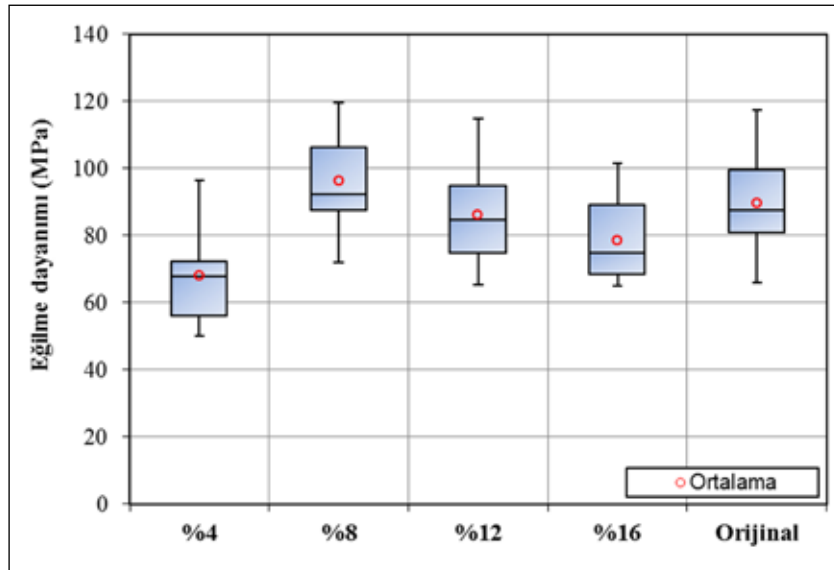
Bu yüzden geri dönüşüm ürünündeki cam fiber oranı belirli bir ısıtma düzeni sonucunda kalan ürün miktarlarından yola çıkılarak, gravimetrik olarak kabaca tayin edilebilmektedir (Rouholamin vd. 2014). Çalışmada; 3 farklı geri dönüşüm ürününün (ham ürün, 1 mm elek üstü ve 1 mm elek altı) yaklaşık 3-4 gramı porselen krozede tartıldıktan sonra, Protherm PLF 120/10 marka kül fırını içerisinde aşağıda takip edilen ısıtma ve bekleme aşamalarından geçirilmiştir (Rouholamin vd. 2014):

- 2.25°C/dk. ısıtma hızıyla 300°C ye çıkarma,
- 300°C de 30 dk. bekleme,
- 1.16°C/dk. ısıtma hızıyla 300°C den 650°C ye çıkarma
- 650°C de 40 dk. bekleme,

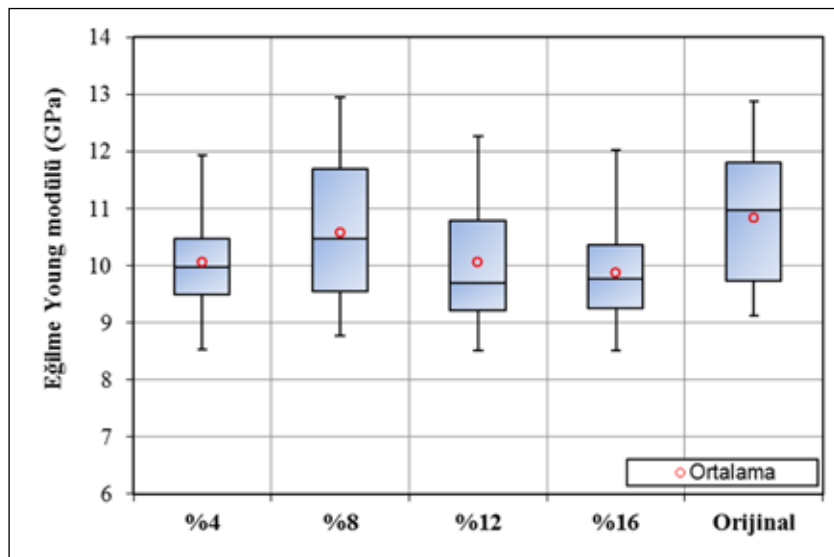
e) Oda sıcaklığına soğutma

Soğuyan ürünlerin yüzeylerinde polimerik atıklar kalabilmektedir, bunları uzaklaştırmak için krozedeki ürün saf su ile yıkanmış ve süzgeç kâğıtlarına alınmıştır. Son olarak 40°C etüvde, 1 gün kurutulmuştur. Kurutulan örnekler sabit tartıma gelene kadar birkaç kez tartılmış ve ısıtma sonrası kalan ürün miktarları kaydedilmiştir. Sonuçların doğruluğunu artırmak için analizi yapılacak her ürünün farklı noktalarında 3 kez ısıtma için örnek alınmış böylece her ürün için 3 örnek analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'de özetlenmiştir.

Çizelge 3' ten de görüldüğü gibi, geri dönüşüm ürünlerini öğütücüden sonra elemek, ürün içindeki cam fiber yüzdesini çok değiştirmemiştir. Ayrıca BMC hattında kullanılan



Şekil 10. Kütlece % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin eğilme dayanım değerleri.



Şekil 11. Kütlece % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin eğilme Young modülü değerleri.

1 mm elek üstü geri dönüşüm ürününün ortalama %47'si cam fiberlerden oluştuğu bulunmuştur. Bununla birlikte hesaplanan yüzde değerler içerisinde inorganik başka katkı maddelerinin de olabileceği unutulmamalıdır.

3.3. Geri Dönüşüm Ürünlerinin FTIR Analiz Sonuçları

BMC hatlarında kullanılan geri dönüşüm ürünün yapısını daha iyi analiz edebilmek için Perkin Elmer 65 model (Fourier transform infrared spectroscopy) FT-IR cihazı 600-4000 cm^{-1} aralığında kullanılmıştır.

Şekil 13 (A) da görüldüğü gibi geri dönüşüm ürünü olarak kullanılan malzemede 3500 cm^{-1} civarında geniş OH bandı vardır ve bu moleküller arası hidrojen bağından kaynaklanan bir titreşimdir. 3000 cm^{-1} de orta şiddette C-H

bağları görünürken 1723 cm^{-1} de şiddetli bir C=O piki ortaya çıkmaktadır. 1580-1625 cm^{-1} arasında orta şiddette N-H grupları, 1400-1500 cm^{-1} arası yine orta şiddette C-H grupları vardır. 1260 ve 1068 cm^{-1} görülen iki şiddetli pik yapıda C-O bağlarını göstermektedir. 1123 cm^{-1} de görülen şiddetli pik yapıdaki cam fiberden kaynaklanan O-Si-O titreşimlerini göstermesi bakımından önemlidir (Stuart 2004). Son olarak 700-750 cm^{-1} üst indis $^{-1}$ arasında görülen iki şiddetli pikin ise kalsite (CaCO_3) (kalsit) ait olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada, cam fiber oranını bulmak için yaptığımız 650°C'ye kadar ısıtma ve yıkama işleminden sonra çıkan ürünün de FT-IR spektrumu alınmıştır. Şekil 13 (B)'de görüldüğü gibi yapıda sadece Si-O (1091), Si-OH(897) ve

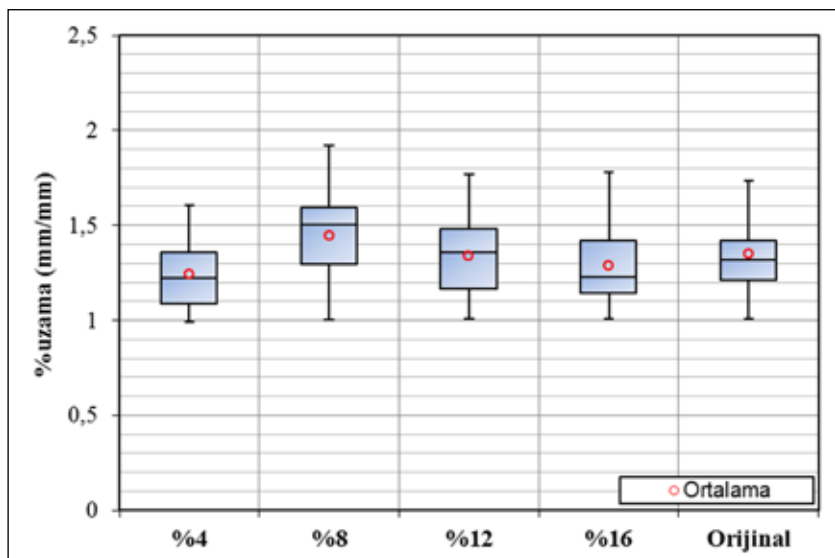
Çizelge 2. Eğilme test sonuçları

Geri dönüşüm ürünü (% kütlece)	%4	%8	%12	%16	Orijinal
Eğilme dayanımı (MPa)	67,912	96,099	86,111	78,543	89,695
Std. sapma	14,245	13,986	13,171	11,527	13,172
Young Modülü (GPa)	10.054	10.566	10.055	9.867	10.839
Std. sapma	945,455	1245,521	1023,262	954,842	1113,922
% uzama	1,240	1,446	1,337	1,289	1,350
Std. sapma	0,163	0,236	0,210	0,212	0,213

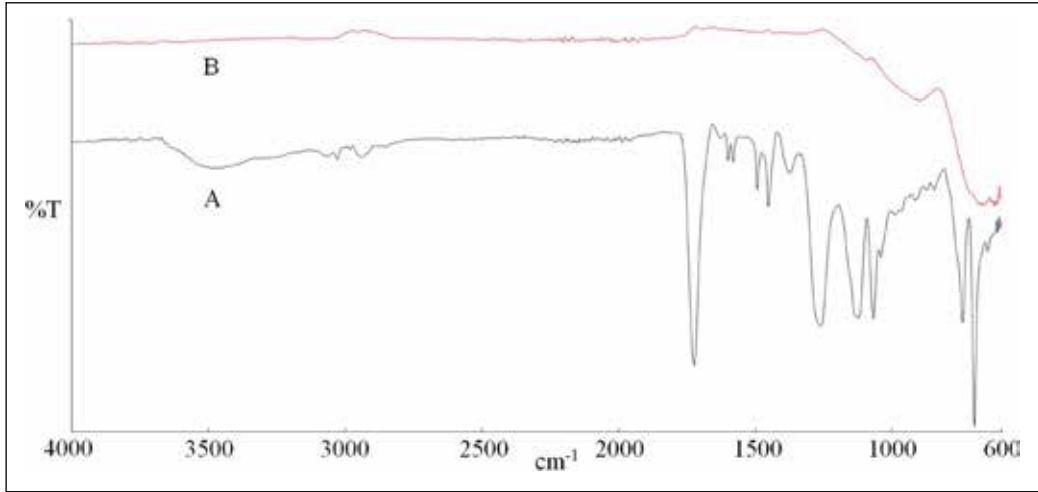
Ortalama eğilme dayanımı, Young modülü, % uzama değerleri.

Çizelge 3. Geri dönüşüm ürünlerinin kütlece fiber oranları

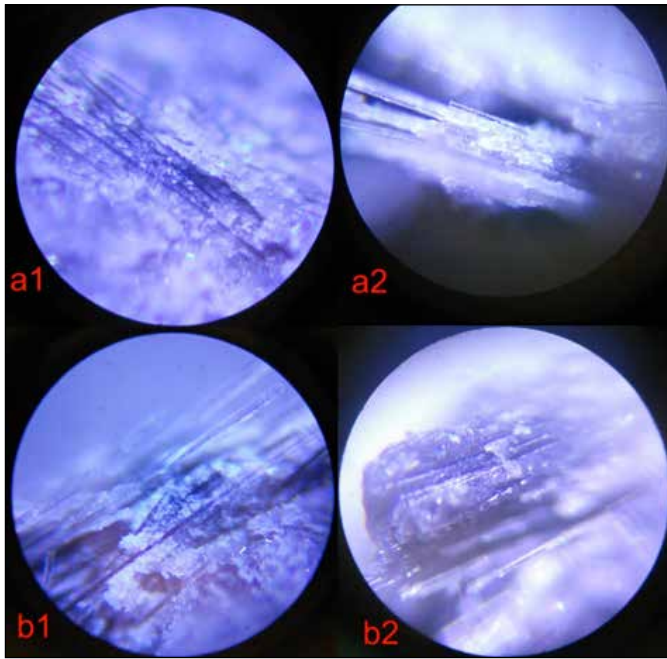
	1mm elek üstü			Ham ürün			1 mm elek altı		
Alınan miktar (g)	3.993	3.992	3.341	3.201	4.039	3.072	3.546	2.722	2.911
Kalan miktar (g)	1.815	1.817	1.684	1.478	1.544	1.331	1.503	1.237	1.268
% Cam fiber	45.45	45.51	50.40	46.17	38.22	43.32	42.38	45.44	43.55



Şekil 12. Kütlece % 4, 8, 12, 16 geri dönüşüm ürünü ve % 100 orijinal cam fiber içeren BMC test numunelerinin % uzama değerleri.



Şekil 13. BMC hamurunda kullanılan geri dönüşüm ürününün (A) ve 650°C ye ısıtma sonucu oluşan ürünün (B) FT-IR spektrumu.



Şekil 14. Geri dönüşüm ürünü cam fiber ile yapılan plaka (a1,a2) ve orijinal plakaların (b1,b2) ışık mikroskobu görüntüleri (x300 büyütme).

Ca-O(667) (Miller vd. 1952) titreşimleri gözlenirken polimerik reçineye ait bütün fonksiyonel gruplar kaybolmuştur. Böylece kalan ürünün bir SiO₂-CaO karışımı olduğu ortaya çıkmış ve geri dönüşüm ürününde hesaplanan cam fiber oranı doğrulanmıştır.

3.4. Numunelerin Işık Mikroskobu Analizi

Ger dönüşüm takviyeli ve orijinal ürünlerin ışık mikroskobundaki analizi Gazer ES-2000-SC model cihaz ile 300 büyütmede yapılmış ve Şekil 14'de gösterilmiştir. Cam fiberlerin plaka içerisindeki yerleşimleri ve kırılma noktalarındaki

yapıları değerlendirildiğinde her iki ürünün de benzer yapıda olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

Çalışmada, CTP plaka ve rulo üretim firesi malzemelere mekanik geri dönüşüm prosesi uygulanmış ve geri dönüşüm ürünleri BMC ürün reçetesinde fiber takviyesi (1mm<tane boyutu≤11.7mm) olarak kullanılmıştır.

Çekme testlerinde geri dönüşüm takviyeli test numunelerinin ortalama çekme dayanımı, çekme Young modülü ve % uzama değerlerinde ±%5'in altında artış/azalma gözlenmiştir.

Kütlece %4, %12 ve %16 geri dönüşüm takviyesi içeren numunelerin eğilme dayanım değerlerinde, orijinal numuneye kıyasla sırası ile %24.3, %4 ve %12.4 düşme gözlenmiştir. Test numunelerin Eğilme Young modülü ve % uzama değerlerinde azalma miktarı orijinal numuneye kıyasla %10 kabul edilebilir düzeyin altında kalmıştır. Sadece %8 geri dönüşüm içeren numunenin eğilme dayanım değeri artış göstermiştir.

Çalışmada, BMC ürün reçetesinde ortalama boyutu 12 mm olan orijinal kırılmış cam fiberler kullanılmıştır. Geri dönüşüm cam fiberlerin ortalama boyutu ise 3 mm olarak belirlenmiştir.

Ortalama cam fiber boyutu kısa olan geri dönüşüm ürünlerinin BMC hamurunda kullanılması, mekanik dayanım değerlerinin genel olarak düşmesine sebep olmuştur. Derosa R. vd. (2005b) makalesinde benzer durumda, cam fiber boyutunun kısılması ile mekanik değerlerin olumsuz etkilendiğini tespit etmiştir.

BMC hattında kullanılan geri dönüşüm ürünleri % kütlele olarak orijinal fiberler yerine/birlikte kullanılmıştır. Fakat geri

dönüşüm ürünlerinin kül fırını analiz neticesinde ortalama kütlelerinin %47'sinin cam fiber olduğu belirlenmiştir. Geri dönüşüm ürünlerinin BMC hattında kullanılması nihai üründe % kütleli olarak cam fiber miktarının azalmasına neden olmuştur. Netice olarak dayanım değerlerinde düşmenin bir diğer nedeni; BMC ürün reçetesinde toplam kütlece % fiber miktarının düşmesi ile açıklanabilir.

İlerleyen çalışmalarda, CTP mekanik geri dönüşüm çıktısı toz dolgu malzemesinin BMC hamurunda kalsit (CaCO_3) yerine/birlikte nitelikli dolgu olarak kullanılması ön görülmektedir.

5. Teşekkür

Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne Mek. BAP 2013.0014 nolu "Termoset kompozit atıklar ve bitkisel atıkların sandviç kompozit yapılar da kor/ara dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi ve elde edilecek sandviç yapının mekanik davranışlarının incelenmesi" başlıklı araştırma projemizin gerçekleşmesinde finans ve malzeme desteği sağladığı için teşekkür ederiz. Literatür Kimya Elek. İnş. İthalat İhracat San. Tic. Ltd. Şti. şirketine ise projenin tamamlanmasında üretim hatlarını açtıkları, test numunelerinin üretilmesinde emek ve zaman ayırdıkları için kendilerine teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar

- Asmatulu, E., Twomey, J., Overcash, M. 2014. Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *J. of Comp. Mat.* 48(5): 593-608.
- Bledzki, A. K., Kurek, K., & Barth, C. H. 1992. Development of a thermoset part with SMC reclaim. ANTEC 92-Shaping the Future Conference, 1:1558-1560.
- Bledzki, A. K., Goracy, K. 1994. The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermoset. *Mech. of Comp. Mat.*, 29(4):352-356.
- Conroy, A., Halliwell, S., Reynolds, T. 2006. Composite recycling in the construction industry. *Comp. Part A*, 37:1216-1222.
- Derosa, R., Telfeyan, E. 2005a. Current State of Recycling Sheet Molding Compounds and Related Materials. *J. of Thermoplast. Comp. Mat.*, 18(3):219-240.
- Derosa, R., Telfeyan, E., Gaustad, G., Mayes, S. 2005b. Strength and Microscopic Investigation of Unsaturated Polyester BMC Reinforced with SMC-Recyclate. *J. of Thermoplast. Comp. Mat.*, 18(4): 333-349.

- DeRosa, R., Telfeyan, E., Gaustad, G., Mayes, S. 2003. Understanding issues associated with using fiber length SMC recycle in bulk molding compounds with the aim of improving their strengths. Technical papers-society of manufacturing engineers-all series.
- Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles. Official J. of the EU, L 269/34, 21.10.2000.
- Inoh, T., Yokoi, T., Sekiyama, K. I., Kawamura, N., Mishima, Y. 1994. SMC Recycling Technology. *J. Thermoplast. Comp.* 7(1): 42-55.
- ISO 178 2010. Plastics, Determination of flexural properties.
- ISO 527-4 1997. Plastics, Determination of tensile properties, Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.
- Jutte, R.B. and Graham, W.D. 1991. Recycling SMC Scrap as Reinforcement, *Plast. Eng.*, 47(5): 13-46.
- McKechnie, D., Wegman, T. ECRC heads search for composites recycling solutions, Reinforced plastics, available online in Reinforced plastics.com <http://www.reinforcedplastics.com/view/1089/ecrc-heads-search-for-composites-recycling-solutions/> (accessed 02.03.2017).
- Miller, F. A., Wilkins, C. H. 1952. Infrared Spectra and Characteristic Frequencies of Inorganic Ions. *Analy. Chem.*, 24 (8):1253-1294.
- Paksoy, K., Delican, C. 2016. Türk Kompozit Sektörü 2015 Yılı Değerlendirmesi ve 2016 Yılı Beklentileri. *Comp. Turk. Derg.*, Sayı:12: 38-41.
- Palmer, J., Ghita, O. R., Savage, L., Evans, K. E. 2009. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Comp. Part A*, 40:490-498.
- Palmer, J. 2009. Mechanical Recycling of Automotive Composites for Use as Reinforcement in Thermoset Composites (PhD Thesis), University of Exeter, May.
- Palmer, J., Savage, L., Ghita, O. R., Evans, K. E. 2010. Sheet molding compound (SMC) from carbon fibre recycle. *Comp. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9):1232-1237.
- Papadakis, N. 2010. Designing composite wind turbine blades disposal recycling and reuse, in: V. Goodship (Ed.), Management, Recycling and Reuse of Waste Composites, WP and CRC Press, Cambridge, UK, 443-457. ISBN 978184569462.
- Petterson, J. And Nilsson, P. 1994. Recycling of SMC and BMC in Standard Processing Equipment. *J. Thermoplast. Compos.* 7(1): 56-63.
- Pickering, S. J. 2006. Recycling technologies for thermoset composite materials current status. *Comp. Part A*, 37:1206-1215.

- Reynolds, N. Pharaoh, M. 2010.** An introduction to composites recycling. In Management, Recycling and Reuse of Waste Composites; Goodship, V., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 3–19.
- Rouholamin, D., Shyng, Y.T., Savage, L., Ghita, O. 2014.** A comparative study into mechanical performance of glass fibres recovered through mechanical grinding and high voltage pulse power fragmentation, ECCM16 - 16 th. European conference on composite materials, Seville, Spain, 22-26.
- Stuart, B. 2004.** Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, Ltd.
- Tittarelli, F. 2013.** Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 2. *Const. and Build. Mat.*, 47:1539-1543.
- Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D., Kuiper, P., Wit, H. 2012.** Recycling of composite materials. *Chem. Eng. and Process.*, 51:53–68.
- Yazdanbakhsh, A. Bank, L.C. 2014.** A Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction. *Polymers*, 6:1810-1826.