

Araştırma Makalesi / Research Article

İZOFTALİK POLYESTER MATRİSLİ SÜREKLİ E-CAMI VE BAZALT FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Tuğçegül GÜMÜLCİNE¹, Aylin BEKEM^{*1}, Mustafa DOĞU², Zafer GEMİCİ², Ahmet ÜNAL¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fak., Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Esenler-İSTANBUL

²Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş., Yıldız Teknik Üniversitesi Teknoparkı, Esenler-İSTANBUL

Geliş/Received: 20.04.2012 Revised/Düzeltilme: 17.05.2012 Kabul/Accepted: 22.06.2012

ÖZET

Günümüzde teknolojik/ileri teknolojik uygulamalarda malzeme çeşitliliğine ve üstün özellikler gösteren kompozitlere talep hızla artmaktadır. Genel amaçlı polimer matrisli kompozit uygulamalarında takviye elemanı olarak E-cam fiber kullanımı öne çıkmaktadır. Bazalt fiber ise cam fiberlere alternatif olarak geliştirilmiş görece yeni bir fiber türüdür ve özelliklerinin araştırılmasına halen devam edilmektedir. Bu çalışmada termoset bir malzeme olan izoftalik polyester reçine, iki çeşit sürekli E-camı fiber ve iki çeşit sürekli bazalt fiberle takviye edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere fiziksel ve mekanik testler uygulanarak özellikleri saptanmış ve fiber türlerinin birbirine göre üstünlükleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak bazalt fiber çeşitlerinin E-camı fiber çeşitlerine göre daha iyi özellikler gösterdiği görülmüştür. Bu sonuca ulaşmada kullanılan fiberlerin çap ve yoğunluğu (teks) da önemli olmuştur.

Anahtar Sözcükler: Kompozit, termoset matris, E-camı fiber, bazalt fiber, izoftalik polyester reçine.

CHARACTERIZATION OF CONTINUOUS E-GLASS AND BASALT FIBER REINFORCED ISOPHTHALIC POLYESTER MATRIX COMPOSITES

ABSTRACT

In present, the demand for composites showing various characteristics and diversifying raw-materials is growing for technological/advanced technological applications. The utilization of E-glass fiber as a reinforcement comes out in general purpose polymer composite applications. Basalt fiber is relatively developed as an alternative material and its properties are still being investigated. In this study, thermosetting isophthalic polyester resin was reinforced with two kinds of continuous E-glass fiber and two kinds of basalt fiber. The properties of produced composite materials were determined by applying physical and mechanical tests and the priorities of fiber types on each other were determined. Consequently, it was observed that basalt fibers exhibited better properties than E-glass fibers. Fiber diameter and density (tex) was also important to obtain this conclusion.

Keywords: Composite, thermoset matrix, E-glass fiber, basalt fiber, isophthalic polyester resins.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: aylinaltinbay@gmail.com, tel: (212) 383 47 05

1. GİRİŞ

21.yüzyılda kompozit malzemelerin geniş bir kullanım alanı bulmasıyla, kompozit üretimi için alternatif hammadde arayışı önem kazanmıştır. Kompozit malzemelerden beklentilerin artmasıyla daha hafif, sağlam, korozyona dayanaklı, yüksek sıcaklıklarda çalışan malzemelere ihtiyaç duyulmuş ve bu ihtiyacı karşılayacak bileşenlere olan gereksinim artmıştır. [1]

E-camı fiberler, kompozit malzeme üretiminde ilk kullanılan takviye malzemesi olup, endüstriyel olarak 40 yılı aşkın süresidir kullanımı vardır. Mukavemet-maliyet özellikleri açısından optimum koşullar sergilemesi, günümüz endüstriyel uygulamalarında halen en çok tercih edilen takviye türü olmasının sebebidir.

Bazalt fiberler ise, yüksek mekanik özellikleri ve görece düşük maliyeti ile E-camı fiberlere alternatif olarak geliştirilmiş ve son 5 yılda çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Volkanik kayaların ergitilmesi ve içine hiçbir katkı maddesi katılmadan fiber olarak çekilmesi ile üretilmektedirler [2, 3]. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri E-camı ve S-camı arasında yer almaktadır [3, 4]. E-camına kıyasla 280°C daha yüksek operasyon sıcaklığında çalışabilmektedir. E-camı fiberlere göre daha yüksek elastik modülüne sahiptirler ve düşük uzama göstermektedirler [2-5]. Bazalt fiberlerin kimyasal direnç performansları da E-camı fiberlerden daha iyidir [6-10]. Özellikle asit ortamında mükemmel korozyon direncine sahiptirler, su ve alkali ortamında ise E-camı fiberlere göre daha düşük bozulmaya uğramaktadırlar. [6, 7]

Bazalt fiberler genel anlamda mükemmel mekanik özellikleri ile kompozit malzemeler için takviye malzemesi olarak, alev almama ve yüksek sıcaklıkta özelliklerini kaybetmeme kabiliyeti ile yangından korunma sektöründe, ısı ve ses yalıtımı özellikleri ile izolatör olarak ve mükemmel kimyasal direnç göstermeleri nedeniyle korozyif ortam uygulamalarında kullanılmaktadır. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde bazalt fiberler; kompozit, otomotiv, inşaat, ulaşım endüstrileri, depolama tankları, kimyasal transfer sistemleri, makine imalatı, spor ve eğlence malzemeleri üretiminde alternatif bir hammadDEDİR [8-12].

Bazalt fiberlerin kompozit malzemeler için takviye amaçlı kullanılmasını araştıran Lopresto ve arkadaşları [13], E-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış ve E-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükü taşıırken, eğme ve basma yüklemelerine karşı bazalt fiber takviyeli numunelerin daha yüksek mukavemet gösterdiklerini bulmuşlardır. Çekme, eğme ve basma yüklemeleri karşında bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin elastik modüllerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Brujin ve arkadaşları [14], bazalt fiber takviyeli kompozitler ile E- ve S-camı takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmış ve çekme yüklemelerinde bazalt fiber takviyeli kompozitlerin E-camı takviyeli kompozitlerden %10-17 daha rijit, %18-34 daha mukavim olduğunu belirtmiştir. S-camı takviyeli kompozitler ile bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdıklarında ise, bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin %5-11 daha düşük rijitlik ve %6-16 daha düşük mukavemet özelliklerine sahip olduğu saptanmıştır.

Parton [15], epoksi reçine emdirilmiş eş yönlü bazalt ve E-camı fiber prepregerlerden elyaf sarma yöntemine göre kompozit malzeme üretmiş ve bunları 3 nokta eğme testine tabi tutmuştur. Çalışmanın sonucunda; %40 hacim oranı ile elde edilen kompozit malzemelerden sürekli bazalt fiber takviyeli kompozitlerin, sürekli E-camı takviyeli kompozitlerden %13,7 daha fazla eğme mukavemetine sahip olduğu ve %17,5 daha rijit olduğunu belirlemiştir.

Bazalt fiberler üretim ve yüzey özellikleri gelişimi halen tamamlanamamıştır. Gerek mekanik özellikleri gerekse de kompozit uygulamalarındaki performansları bakımından literatürde az ve tutarsız bilgiler yer almaktadır. Bu çalışmada bazalt fiberlerin, E-camı fibere alternatif olup olmayacağının, deneysel yöntemlerle bulunması ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın deneysel kısmında önce kompozit plakalar üretilmiştir. Ardından üretilen plakaların özelliklerini saptamak amacıyla standartlarına uygun hazırlanan numunelere çeşitli testler (çekme, üç nokta eğme ve darbe) uygulanmıştır. Deneyde kullanılan malzemeler, cihazlar, üretim koşulları ve yöntem ile ilgili detaylı bilgiler ilgili bölümler kapsamında verilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

Plastik bir matrisin, yüksek mukavemetli inorganik fiberler ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bileşenler, ticari pazarda bulunabilen yüksek performans ve uygun maliyetli malzemelerden tercih edilmiştir. Bu bileşenlere ait özellikler bu bölümde irdelenmiştir.

2.1.1. Matris Malzemesi

Matris malzemesi olarak Poliya firmasından temin edilen izoftalik karakterli POLİPOL 3872 numaralı polyester reçine seçilmiştir. Kütleme işleminin optimum koşullarda gerçekleştirilmesi için, hızlandırıcı olarak %0,2 oranında %6'lık kobalt oktanat ve katalizör olarak %1 Metil Etil Keton Peroksit (MEK-P) reçineye ilave edilmiştir.

Kullanılan izoftalik asit esaslı reçine, orta-yüksek reaktivitede, doymamış polyester reçinedir. İzofitalik asit ve standart glikol ihtiva etmektedir. Yoğunluğu 1,15 gr/cm³, viskozitesi 700 cP ve monomer oranı %39'dur. Çalışmada kullanılan reçinenin mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İzofitalik polyester reçinenin (Poliya-Polipol 3872) mekanik özellikleri [16].

Test	Metot	Değer
Çekme mukavemeti	ISO 527	75 MPa
Elastik modülü	ISO 527	3600 MPa
Eğme mukavemeti	ISO 178	136 MPa
Eğme modülü	ISO 178	3700 MPa

2.1.2. Takviye Malzemesi

E-camı takviye malzemesi olarak CAM ELYAF A.Ş'den temin edilen iki farklı fiber türü kullanılmıştır [7]. Bazalt fiber olarak, China GFB firmasından iki farklı fiber türü temin edilmiş. Kullanılan fiber malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir:

Çizelge 2. Takviye malzemelerinin fiziksel özellikleri [17, 18].

	Cam fiber 1 (GF01)	Cam fiber 2 (GF02)	Bazalt fiber 1 (BF01)	Bazalt fiber 2 (BF02)
Yoğunluk gr/cm ³	2,54	2,54	2,67	2,67
Teks*	1200	2400	1200	800
Fiber çapı, µm	16	22,5	13	7

*teks: gram/1000metre

2.2. Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

Kompozit plakalar el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Sürekli fiber demetleri, özel olarak tasarlanmış tutucu bir aparata tek eksende ve birbirlerine paralel olacak şekilde dizilmiş ve gergin

duruma getirilmiştir. Katkı malzemeleri ilave edilerek homojen karışım uygulanmış izohtalik polyester reçine, fiberlerin üzerine uygulanmıştır ve özel rulo ile fiber-matris sisteminin üzerinden geçilmiştir. Böylece reçinenin fiberlere emdirilmesi sağlanmış, ayrıca reçine içinde karıştırma ve dökme işlemi sırasında oluşan gözenekler giderilmeye çalışılmıştır. Daha sonra reçinenin kurlenmesi için sistem oda sıcaklığında 6 saat süre ile bekletilmiştir. Reçinenin kurlenmesinin ardından üretilen kompozit plakalar post-kür işlemine tabi tutulmuştur. Post-kür işlemi NÜVE marka kuru hava fırınında önce 70°C’de 1 saat, akabinde 90°C’de 1 saat ve son olarak 120°C’de 1 saat bekletilmiş ve fırın ortamında soğutulmuştur. Plakalar halinde üretilen kompozit numuneler standartlara uygun olarak DEWALT marka hassas kesme cihazı ve elmas diski ile kesilmiştir.

Termoset matrisli kompozit malzemeler gevrek olduğu için, üretilen kompozit numunelere; çekme, üç noktalı eğme ve darbe testleri uygulanmıştır. Bu testler, malzemelerin statik ve dinamik özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan en belirleyici testlerdir. Ayrıca özellikleri yukarıda sözü edilen test metotlarıyla tespit edilen her numuneye, kalsinasyon testi uygulanarak numunelerin fiber hacim oranları belirlenmiştir.

Çekme testi için numuneler, TS EN ISO 527-5’e [19] göre hazırlanmıştır. Fiber oryantasyonu çekme yönüne paralel olmak üzere 250mm x 25mm boyutlarında, standardın öngördüğü düz numune tipinde kesilmiştir. Çekme deneyi, bilgisayar kontrollü, 100 kN kapasiteli MOHR FEDERHAFF marka çekme cihazında yapılmıştır. Çekme hızı, 5mm/dakika olarak seçilmiştir. Bilgisayar programı tarafından numunelere ait gerilme (MPa)-gerinim (%) eğrileri çizilmiştir.

Üç noktalı eğme deneyi; TS EN ISO 14125 standardına [20] göre; 50 kN yük kapasiteli (± 1 N hassasiyete sahip), kalibreli olan MARES marka ve TST-SE-J-2T model çekme cihazına uygun eğme ucu aparatı takılarak, 5 mm/dakika hızla yapılmıştır. Test numuneleri 80 mm x 15 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Deney çıktısı olarak yük (N)-sehim (mm) eğrileri bilgisayar programı tarafından çizilmiştir. Cihazdan okunan maksimum yük (Fmax) değerinden faydalanılarak standartta tarif edildiği şekilde eğme mukavemeti hesaplanmıştır.

Darbe deneyi, TS EN ISO 179-1 standardının [21] öngördüğü şekilde Charpy metodu ile çentiksiz numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 80 mm x 15 mm boyutlarında kesilmiş ve çentik etkisini yok etmek için kenarları zımparalanmıştır. Test, ZWICK marka darbe cihazında 25J’lük çekiç ile gerçekleştirilmiştir. Cihazda okunan kırılma enerjisi değeri kullanılarak darbe mukavemeti hesaplanmıştır.

Mekanik testleri tamamlanan numunelerin fiber hacim oranlarını belirlemek için test edilmiş numune parçalarına kalsinasyon testi uygulanmıştır. Kalsinasyon testi, kompozit numunelerin kütlece takviye oranını belirlemek amacıyla TS 1177 EN ISO 1172 standardının [22] öngördüğü şekilde yapılmıştır. Kül testi olarak da bilinen bu analiz için Proterm Marka, PLF 120/5 Model kalsinasyon fırını kullanılmıştır. Numuneler önceden tartılmış krozeler içerisinde 1 saat 750°C’de kalsine edilmiş ve kalsinasyon işlemi ile kimyasal bozularak ortamdaki ayrılan termoset matristen arda kalan takviye miktarı tartılarak takviye miktarının kütlesi hesaplanmıştır. Matris ve fiber malzemesinin bilinen yoğunlukları kullanılarak, kalsinasyon testi sonucunda belirlenen kütle oranından % fiber hacim oranı hesaplanmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çekme, eğme, darbe deneyleri ve kalsinasyon testi uygulanan numuneler ait sonuçlar bu bölümde incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların karşılaştırma ve yorumlamalarına da yer verilmiştir.

3.1. Çekme testi sonuçları

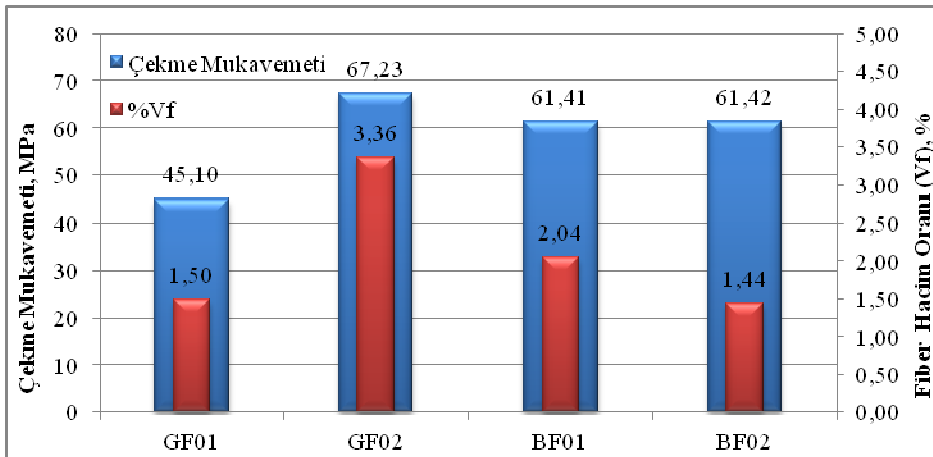
Çekme testi sonuçlarının ortalama değerleri (σ_{ort}) ve numunelerin içerdiği ortalama fiber hacim oranları (V_f -ort) ve ortalama değerlerin standart sapma miktarları Çizelge 3’te verilmiştir. Ayrıca numunelerin, teorik (V_f -teorik) olarak %5,0 hacim oranına sahip olduklarında gösterebilecekleri

teorik mukavemet (σ_{teorik}) değerleri de üretilen kompozitleri karşılaştırmak amacıyla hesaplanmıştır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Ortalama çekme deneyi ve fiber hacim oranı sonuçları, bunların standart sapmaları ve $V_f=5,0$ için teorik olarak hesaplanmış çekme mukavemet değerleri.

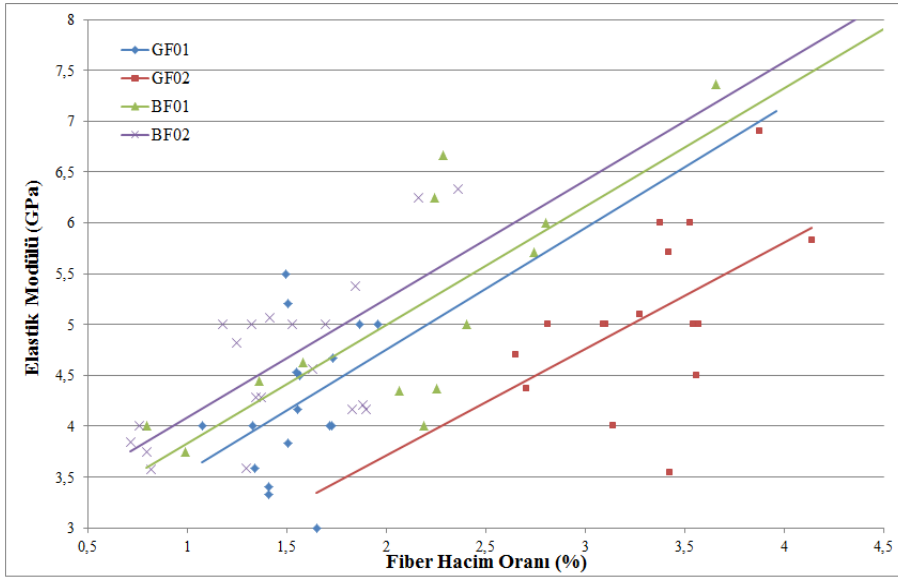
Numene	σ_{ort} MPa	std. sapma	$V_{f\text{-ort}}$ %	std. sapma	$V_{f\text{-teorik}}$ %	σ_{teorik} MPa
GF01	45,10	11,86	1,50	0,26	5,0	150,33
GF02	67,23	13,49	3,36	0,40	5,0	100,04
BF01	61,41	22,75	2,04	0,74	5,0	150,51
BF02	61,42	21,83	1,44	0,46	5,0	213,26

Çizelge 3’de yer alan veriler kullanılarak ortalama fiber hacim oranına bağlı olarak değişen çekme mukavemet değerleri Şekil 1’de diyagramize edilmiştir. Numunelerde en yüksek hacim oranı GF02 takviyeli kompozit numunelerde elde edilmiştir. Bunun nedeni GF02 demetinde, kullanılan diğer fiber çeşitlerine göre daha yoğun fiber yer almasıdır. GF02 takviyeli numunelerde daha fazla hacim oranı elde edilmesine rağmen bazalt fiberli numunelere göre yüksek çekme mukavemeti gözlemlenmemiştir. GF01 takviyeli numuneler ile GF02 takviyeli numuneleri karşılaştıracak olursak, basit bir orantıyla aynı hacim oranına sahip olma durumunda GF01 takviyeli numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti vereceği görülmektedir. Bazalt fiber takviyeli numunelerde ise farklı fiber hacim oranında yaklaşık aynı çekme mukavemeti değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni BF01 fiber çapı 7 μm ve BF02 fiber çapının 13 μm olmasından dolayı BF02 takviyeli numunelerin daha yüksek çekme mukavemetine sahip olmasıdır. Fiber çapının küçülmesi çekme mukavemeti üzerinde artan bir etki yapmaktadır.



Şekil 1. Ortalama çekme mukavemeti ve yüzde fiber hacim oranı grafiği.

Şekil 1’den alınan çekme mukavemeti değerlerine göre eşit fiber hacminde (örneğin %5,0 V_f ’de) BF02 takviyeli kompozit numuneler daha kalın çaplı BF01 takviyeli numunelerden %41,7, GF01 takviyeli numunelerden %41,8, GF02 takviyeli numunelerden %113,2 daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. BF01 takviyeli numunelerin çekme mukavemeti GF01 takviyelilerden %0,1, GF02 takviyelilerden ise %50,4 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit numunelerin çekme mukavemetini karşılaştırdığımızda ise GF01 takviyeli numuneler GF02 numunelerden %50,2 daha iyi performans sergilemiştir.



Şekil 2. Ortalama elastik modülü ve yüzde fiber hacim oranı grafiği.

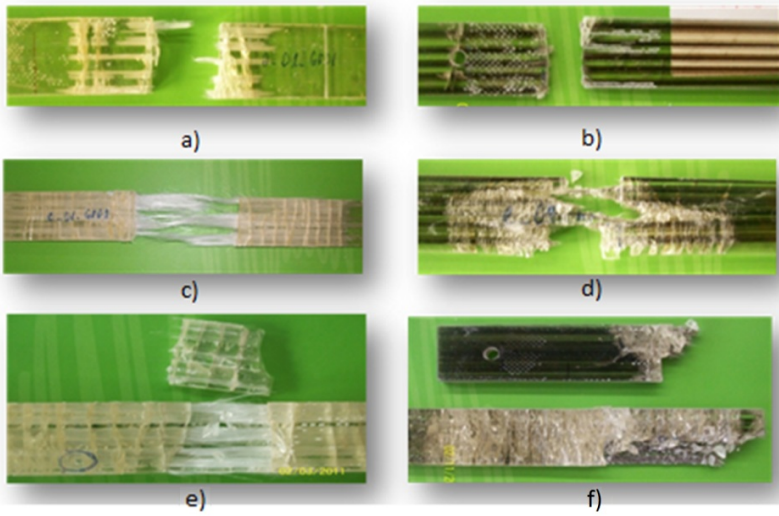
Şekil 2'den gösterilen elastik modülü değerlerine göre cam ve bazalt fiber takviyeli kompozitleri karşılaştırdığımızda bazalt fiber takviyelilerin cam fiber takviyelilerden daha yüksek elastik modülüne sahip olduğu görülmektedir. Eşit fiber hacminde (örneğin %5,0 V_r'de) BF02 takviyeli numuneler BF01 takviyelilerden %24,8, GF01 takviyelilerden %8,6, GF02 takviyelilerden de %100,4 daha yüksek çekme modülüne sahiptirler. BF01 takviyeli numunelerin elastik modülü GF01 takviyelilerden %13 daha az iken, GF02 takviyelilerden %60,5 daha yüksektir. GF01 takviyeli numunelerin elastik modülü GF02 takviyeli numunelerden %84,5 daha yüksek olarak bulunmuştur.

Kompozit malzemelerde fiber sıyrılması (fiber pull out) ve tabaka ayrılması (delaminasyon) en sık görülen hasar çeşitleridir. Şekil 3'de çekme testi sonucunda oluşan kırılmaların makroskobik görüntüleri yer almaktadır. Fiber sıyrılması, takviye malzemesi ile matris arasında iyi ara yüzey oluşmaması durumunda meydana gelmektedir. GF02 takviyeli kompozit numunelerde fiber sıyrılması diğer numunelere oranla daha fazla görülmüştür. Bunun sebebi, GF02'li numunelerin çok yoğun fiber içermesi ve bu yüzden reçinenin fiberleri tam olarak ıslatamayıp iyi arayüzey oluşturamamış olmasıdır.

Bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerde de BF02 takviyelilerde daha yüksek mekanik mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu numunelerin kırılma şekilleri makroskobik olarak incelendiğinde de numunelerde çoklu kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu numunelerde cam fiber takviyeli numunelere göre daha iyi ara yüzey elde edilmiş ve dolayısıyla matristen fibreye yük aktarımı daha iyi sağlanmıştır. Çekme kuvvetiyle gevrek karakterli matrisin önce kırılması sırasında fiberler matris içerisinden sıyrılmamış, aksine fiberler tam olarak kopuncaya kadar matriste çoklu kırılmalar meydana getirmişlerdir. BF02 takviyeli kompozit numunelerin E-camı fiber takviyeli kompozit numunelerden daha yüksek mukavemete sahip olması iyi ara yüzey özellikleri ve daha ince fiber çapı ile açıklanabilir.

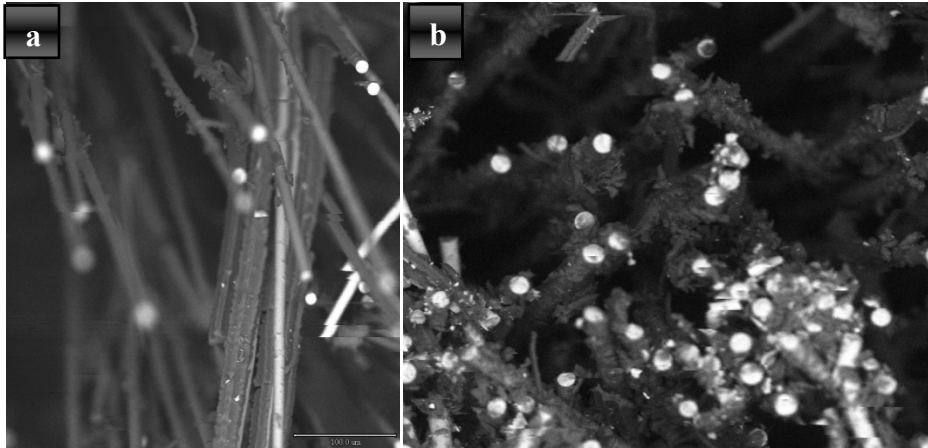
Şekil 4'de çekme testi sonucu hasara uğramış bölgelerinden alınan kesitlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri yer almaktadır. Bu görüntülerde özellikle fiber yüzeyleri görüntülenmeye çalışılmıştır. Görüntülerden E-camı takviyeli olan (Şekil 4-a) kırık kesitte fiberlerin üzerlerinde az miktarda matris kalıntısı kaldığı, ancak bazalt takviyeli olan kırık kesitte

(Şekil 4-b) fiberlerin büyük çoğunluğunun kalın bir matris tabakası kaplı olduğu görülmüştür. Bu görüntülerden E-camı takviyeli kompozitte kopmanın fiber-matris arayüzeyinde meydana geldiği, bu nedenle E-camı takviyeli kompozitlerde arayüzey bağlantısının zayıf olduğu yorumu yapılabilir. Bazalt takviyeli kompozitte ise kırık kesitte fiberlerin üzerlerinde matris kaplı olması kırılmanın matriste gerçekleştiği ve arayüzey bağlantısının kuvvetli olduğu şeklinde yorumlanabilir. Arayüzey oluşumunda etkili olan faktörler matris viskozitesi ve fiber-matris kimyasal uyumluluğudur. Bu çalışmada üretilen kompozitlerde aynı tür matris kullanıldığından arayüzeylerde görülen bu farklılığın nedeni fiber üstündeki silan kaplaması ile kullanılan matrisin kimyasal olarak uyumu ile alakalı olabilir. E-camı kompozitlerin, bazalt takviyelilere göre daha düşük mekanik özellikler sergilemesinin nedenleri arasında söz konusu arayüzey uyumsuzluğu ve bunun neden olduğu zayıf arayüzey bağlantısı yer alabilir.



Şekil 3. Çekme testi uygulanmış kompozit numunelere ait makro görüntüler;

a) ve b) gevrek kırılma sergileyen numuneler. c) ve d) çoklu kırılma ve fiber sıyrılması sergileyen numuneler. e) ve f) çoklu kırılma ve delaminasyon sergileyen numuneler.



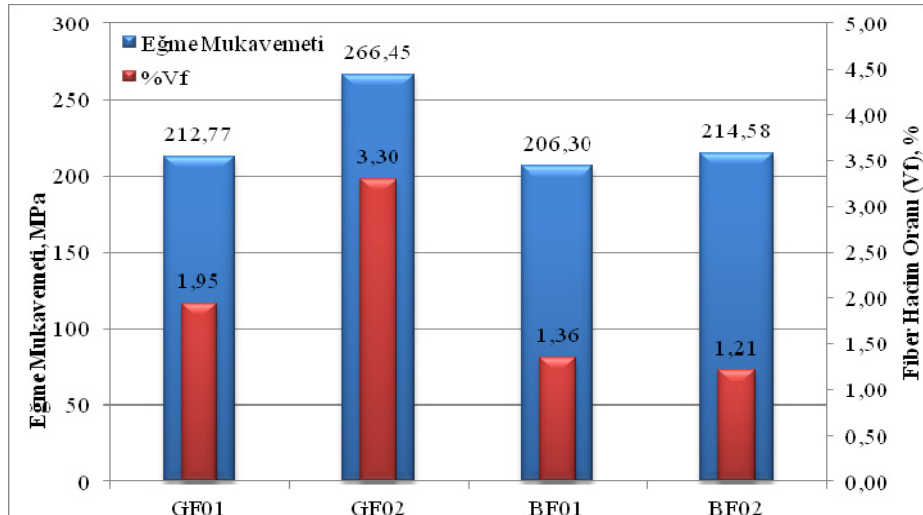
Şekil 4. a. E-camı, b. bazalt takviyeli kompozit numunelerin kırık kesit SEM görüntüleri-200X.

3.2. Eğme testi sonuçları

Eğme testi sonuçları ile hesaplanan eğme mukavemeti (σ_{f-ort}) ve yüzde fiber hacim oranının (V_{f-ort}) ortalama değerleri, ortalama değerlerin standart sapma miktarları ile birlikte Çizelge 4'te verilmiştir. Ayrıca numunelerin, teorik ($V_{f-teorik}$) olarak %5,0 hacim oranına sahip olduklarında gösterebilecekleri teorik eğme mukavemet ($\sigma_{f-teorik}$) değerleri de üretilen kompozitleri karşılaştırmak amacıyla hesaplanarak aynı çizelgede verilmiştir. Çizelge 4'de ki deneysel veriler doğrultusunda Şekil 2'de yer alan ortalama eğme mukavemeti ve ortalama fiber hacim oranı grafiği çizilmiştir.

Çizelge 4. Ortalama eğme deneyi ve fiber hacim oranı sonuçları, bunların standart sapmaları ve $V_f=5,0$ için teorik olarak hesaplanmış eğme mukavemet değerleri.

Numene	σ_{f-ort} MPa	std. sapma	V_{f-ort} %	std. sapma	$V_{f-teorik}$ %	$\sigma_{f-teorik}$ MPa
GF01	212,77	18.58	1,95	0,55	5,0	545,56
GF02	266,45	22.23	3,30	0,66	5,0	403,71
BF01	206,30	15.36	1,36	0,28	5,0	758,45
BF02	214,58	20.54	1,21	0,26	5,0	886,69

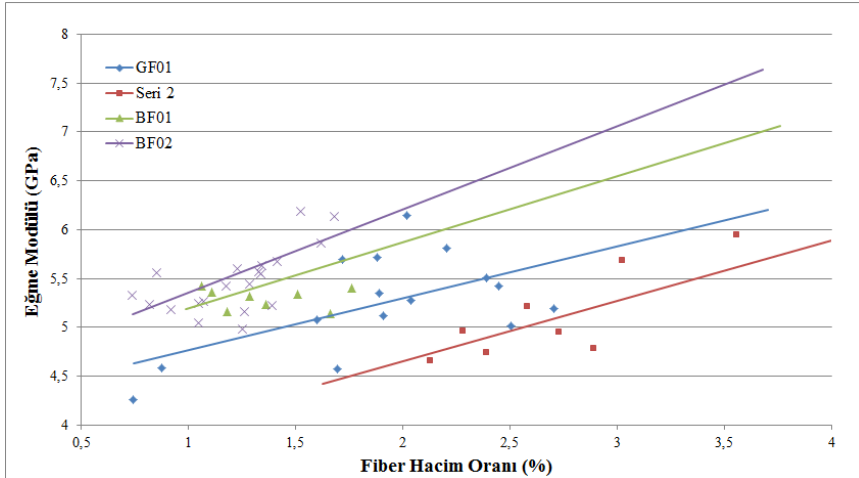


Şekil 5. Ortalama eğme mukavemeti ve yüzde fiber hacim oranı grafiği.

Şekil 5'te görüldüğü gibi eğme deneyi sonunda çekme deneyine benzer mekanik davranış elde edilmiştir. BF02 kodlu numunelerin eğme mukavemeti, çekme testinde elde edilen sonuçlara benzer şekilde hem BF01 hem de E-camı takviyeli kompozit numunelerden daha yüksektir. BF02 fiberlerin BF01 ve E-camı fiberlere göre çapının daha küçük olmasıyla görece olarak aynı miktarda takviye edilmesine rağmen daha düşük fiber hacim oranı elde edilmiş buna rağmen diğer takviye çeşitlerine göre daha yüksek eğme mukavemeti gözlemlenmiştir.

Takviye çeşidine göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f 'de) kompozit numunelerin eğme mukavemetini karşılaştırdığımızda BF02 takviyeli numunelerin eğme mukavemeti, BF01 takviyeli numunelerden %16,9, GF01 takviyeli numunelerden %62,5 ve GF02 takviyeli numunelerden %119,6 yüksek olduğu görülmüştür. Cam fiberli numuneler kendi aralarında kıyaslanacak olursa; GF01 takviyeli kompozit numunelerin eğme mukavemeti GF02

takviyeli numunelerden %35,1 daha yüksek olarak bulunmuştur. BF01 takviyeli numuneler de GF01 takviyelilerden %39 ve GF02 takviyeli numunelerden %26 daha yüksek eğme mukavemetine sahiptir.



Şekil 6. Eğme modülünün fiber takviye çeşidine göre değişimi.

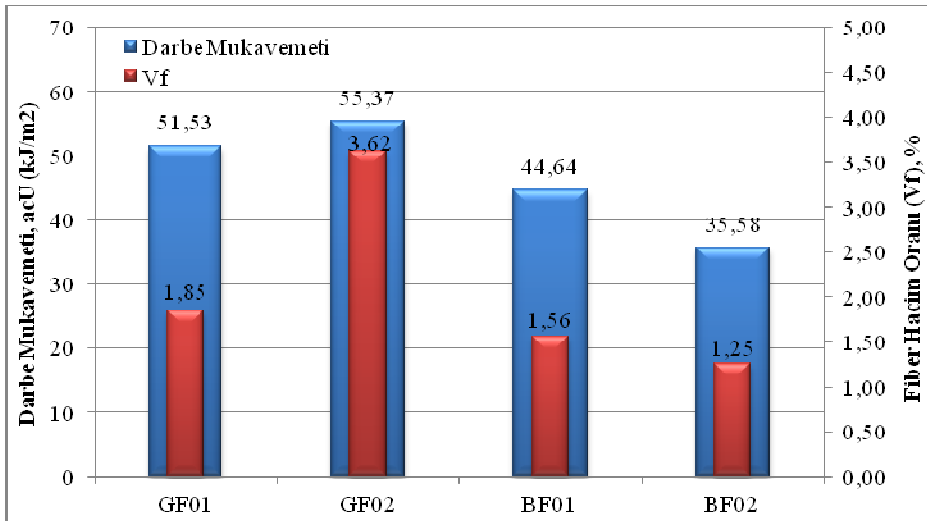
Eğme mukavemeti hesaplanan kompozit numunelerin eğme modülünün karşılaştırılması Şekil 6'da yapılmıştır. Buna göre eşit fiber hacmine sahip (örneğin %5,0 V_f 'de) BF02 takviyeli numunelerin eğme modülü, BF01 takviyeli numunelerden %9 ve GF01 takviyeli numunelerin eğme modülü, GF02 takviyelilerden %61 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda BF02 takviyeli kompozitlerin eğme modülü GF01'lilerden %63, GF02'lilerden %162 daha yüksektir. BF01 takviyeli numunelerin eğme modülü de GF01 takviyeli numunelerden %49 ve GF02 takviyeli numunelerden %140 daha yüksek olarak bulunmuştur.

3.3. Darbe deneyi sonuçları

Darbe deneyi sonrasında elde edilen kırılma enerjisi değerinden hareketle fiber takviyeli kompozitlerin darbe mukavemeti (a_{cU}) hesaplanmıştır. Hesaplanan darbe mukavemeti ve bunu sağlayan fiber hacim oranı Çizelge 5'te verilmiştir. Ayrıca numunelerin, teorik ($V_{f\text{-teorik}}$) olarak %5,0 hacim oranına sahip olduklarında gösterebilecekleri teorik darbe mukavemet değerleri ($a_{cU\text{-teorik}}$) de üretilen kompozitleri karşılaştırmak amacıyla hesaplanarak aynı çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5. Ortalama darbe deneyi ve fiber hacim oranı sonuçları, bunların standart sapmaları ve $V_f=5,0$ için teorik olarak hesaplanmış eğme mukavemetleri.

Numene	a_{cU} MPa	std. sapma	$V_{f\text{-ort}}$ %	std. sapma	$V_{f\text{-teorik}}$ %	$a_{cU\text{-teorik}}$ MPa
GF01	51,53	17,82	1,85	0,47	5,0	139,27
GF02	55,37	23,60	3,62	0,59	5,0	76,47
BF01	44,64	21,00	1,56	0,54	5,0	143,07
BF02	35,58	12,30	1,25	0,35	5,0	142,32



Şekil 7. Ortalama darbe mukavemeti ve ortalama fiber hacim oranı grafiğı.

Darbe deneyi sonucunda elde edilen darbe mukavemeti fiber hacim oranı ile değışimi Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre aynı fiber hacim oranında (örneğin %5,0 V_f ’de) BF01 ve BF02 takviyeli kompozit numunelerden birbirlerine yakın sonuçlar alınmakla birlikte, BF01 görece kısmen daha iyi sonuçlar vermiştir. BF01 takviyeli numunelerin darbe mukavemeti, BF02 takviyelilerden %0,5, GF01 takviyelilerden %3 ve GF02 takviyelilerden %87 daha yüksek bulunmuştur. Cam fiber takviyeli kompozit numuneleri karşılaştırdığımızda ise GF01 takviyeli numunelerin GF02 takviyeli numunelerden %82 daha yüksek darbe mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Sürekli E-cam fiber ve bazalt fiber takviyeli, izofталik polyester matrisli kompozit malzemelerin özelliklerinin saptanması amaçlı çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Elde edilen mukavemet değerleri, artan fiber hacim oranı ile artmakla birlikte fiber çeşidine göre değışiklik göstermiştir.

2. Bazalt fiberlerin kompozit malzemeye sağladığı mekanik mukavemet, E-camı fiberlerden çok daha fazladır. Çekme, eğme ve darbe deneylerinde bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin, cam fiber takviyeli numunelerden daha yüksek mekanik performans gösterdiği görülmüştür.

3. İki farklı bazalt fiberi kendi aralarında karşılaştırıldığında; BF02, BF01’den daha iyi çekme ve eğme mukavemet değerleri sağlamıştır. Bunun nedeni ince fiber çapının mekanik mukavemeti artırıcı yönde etki yapmasıdır. Daha kalın çaplı BF01 takviyeli kompozitlerin darbe mukavemetinin ise, ince fiber çaplı BF02 takviyeli numunelerle hemen hemen benzer olduğu tespit edilmiştir.

4. GF02 kodlu cam fiber mukavemet açısından en düşük değerlerin elde edildiğı fiber çeşididir. GF02 demetinin çok yoğun olması, üretim esnasında fiberlerin tam olarak ıslatılmamasına sebep olduğu ve dolayısıyla fiber/matris arayüzey bağlantısının zayıf olduğu, yükün matristen fiberlere aktarılamayarak düşük yüklemelerde malzemeyi hasara uğrattığı düşünülmektedir.

5. Kırık kesitlerden alınan SEM görüntülerden E-camı takviyeli kompozitte arayüzey bağlantısının zayıf olduğu, bazalt takviyeli kompozitte ise arayüzey bağlantısının kuvvetli olduğu görüldü.

6. E-camı takviyeli kompozitlerde arayüzey bağlantısının zayıf olmasına sebep olarak; fiber üstündeki silan kaplaması ile matrisin kimyasal olarak uyumsuz olması düşünülmektedir. Bazalt takviyeli kompozitlerde ise böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Acknowledgments / Teşekkür

Bu çalışma YTÜ, 2011-07-02-YULAP04 no'lu "İzoftalik Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu" isimli proje tarafından desteklenmektedir. Ayrıca, Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş. hammadde temini ve laboratuvar altyapısıyla da çalışmayı desteklemiştir.

KAYNAKLAR / REFERENCES

- [1] Peters, S.T., "Handbook of composites", 2th edition , Chapman & Hall, London, Pages 24-25, 1998.
- [2] Deepak Kumar, "Basalt Fiber", Journal of the textile association, Volume 71, No.5, Pages 242-246, January-February 2011.
- [3] Tibor Czigány, János Vad, Kornél Pölöskei, "Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites", Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Volume 49, No 1, Pages 3–14, 2005.
- [4] Jiří Militký, Martin Černý, Petr Jakeš, Vladimír Kovačič, Zbyněk Sucharda, Petr Glogar, "Composite materials with basalt fibre reinforcement and pyrolysed polysiloxane matrix", Acta Research Reports, No 17, Pages 31–36, 2008.
- [5] Bin Wei, Hailin Cao, Shenhua Song, "Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment", Materials and Design, Volume 31, Pages 4244–4250, 2010.
- [6] Sim J, Park C, Moon DY. "Characteristic of basalt fibre as a strengthening material for concrete structures", Composites Part B: Engineering, Volume 36, Pages 504–12, 2005.
- [7] M. A. Sokolinskaya, L. K. Zabava, T. M. Tsybulya, and A. A. Medvedev, "Strength properties of basalt fibers," Glass and Ceramics, Volume 48, Issue 10, Pages 435-437, 1991.
- [8] P. I. Bashtannik, A. I. Kabak, Y. Y. Yakovchuk, "The effect of adhesion interaction on the mechanical properties of thermoplastic basalt plastics", Mechanics of Composite Materials, Volume 39, No 1, 2003.
- [9] Mazumdar, S.K., "Composites manufacturing: materials, product and process engineering", CRC Press, USA, Pages 41-45, 2001.
- [10] Swink M, "Continuous filament basalt a unique fiber capable of leadership in high temperature applications", Techtextil North America Symposium Atlanta, GA, USA, 9 April 2002, Proceedings, <http://bspmat.com.previewyoursite.com/documents/Techtextil+2002+Basalt+paper1.pdf>, [son ziyaret 15.06.2012].
- [11] Belçika, Basaltex Group, Application, www.basaltex.com/en/detail_detail20_32.aspx, [son ziyaret 15.06.2012].
- [12] Rusya, Kamenny Vek, www.basfiber.com/roving, [son ziyaret 15.06.2012].
- [13] Lopresto V., Leone C., De Iorio I., "Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic", Composites Part B: Engineering, Volume 42, Issue 4, June 2011, Pages 717–723.
- [14] Bruijn M., Adams M., Staey K., "Evaluation of basalt continuous filament fibres in composite material", Report evaluation of BCF fibre in composite material, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee-Belgium, June 2007, Technical report.

- [15] Parton, H., “Characterisation of the in-situ polymerisation production process for continuous fibre reinforced thermoplastics”, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium; 2006, PhD thesis.
- [16] Türkiye, Polipol 3872 Ürün Teknik Bülteni, http://www.poliya.com.tr/urunler/polipol/kimyasal_maddelere_dayanikli/, [son ziyaret 15.06.2012].
- [17] Türkiye, Cam Elyaf Ürün Teknik Bülteni, www.camelyaf.com/products/detay.aspx?SectionID=boqd4PKv%2b2WValt7LHPA7A%3d%3d&ContentID=9JIL17jPPpC%2b0E0dfHKQvA%3d%3d, [son ziyaret 15.06.2012].
- [18] Çin, Basalt Elyaf Ürün Teknik Bülteni, <http://www.bjhongling.com/en/technical.asp>, [son ziyaret 15.06.2012]
- [19] TS EN ISO 527-5, Plastikler – çekme özelliklerinin tayini – Bölüm 5: Tek yönlü elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları, 2007.
- [20] TS EN ISO 14125, Plastik kompozitler - elyaf takviyeli - eğilme özelliklerinin tayini, 1999.
- [21] TS EN ISO 179-1, Plâstikler - charpy darbe özelliklerinin tayini - Bölüm 1: Ölçü aletsiz darbe deneyi, 2006.
- [22] TS 1177 EN ISO 1172, Tekstil - cam takviyeli plastikler –prepregler, kalıplama hamurları ve laminatlar – tekstil - cam ve mineral dolgu muhtevasının tayini – kalsinasyon metotları, 2004.