

Isırgan-Polimetilmetakrilat Kompozitlerin Mekanik Testlerinde Lif Kalınlığının Kritik Lif Oranına Etkisi

¹Kenan BÜYÜKKAYA*

¹Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Giresun, Türkiye

Geliş Tarihi: 15.04.2019

Kabul Tarihi: 11.06.2019

*Sorumlu Yazar: kenan.buyukkaya@giresun.edu.tr

Öz

Bu çalışmanın amacı, lif kalınlığına bağlı olarak ısırgan lifi/ polimetilmetakrilat kompozitlerin mekanik testlerinde lifin, kritik oranlarını ($v_{f_{kritik}}$) ortaya koymaktır. Bu amaç için gevrek bir matris olan polimetilmetakrilat kullanıldı. Doğal yöntemle üretilen ısırgan lifi, elle yatırma yöntemi ile % 1,25, 2,5, 3,75 ve % 5 hacim oranlarında ısırgan lifi takviyeli polimetilmetakrilat kompozitlerin üretiminde kullanıldı. Bu kompozitlerde çekme, eğilme ve darbe mukavemeti, testlerinden elde edilen grafiklerden faydalanılarak, lif kalınlığına bağlı kritik fiber oranları tesbit edildi. Lifin fiziksel özellikleri ve matris ile etkileşimi, sırasıyla XRD ve FITIR testleri ile belirlendi. SEM görüntüleri kırılma yüzeylerinin gözlemlenen mikro yapısı yardımı ile incelendi. Elde edilen verilere göre, kalın liflerde kritik lif çapı değerleri, ince liflere göre daha yüksektir. Bu sonuç, ince liflerin kalın liflere oranla malzemelerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini gösterir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Mekanik özellikler, Isırgan lifi, Pmma, Kritik hacim oranı.

Effect of Fiber Thickness on Critical Fiber Ratio in Mechanical Tests of Nettle-Polymethylmethacrylate Composites

Abstract

The aim of this study was to determine the critical ratios of fiber (v_{fcrit}) in nettle fiber/polymethyl methacrylate composites depending on fiber thickness. Polymethyl methacrylate, a brittle matrix, was used for this purpose. Nettle fiber, produced by natural method, was used in the production of polymethylmethacrylate composites with nettle fiber with a ratio of 1,25%, 2,5, 3,75 and 5% by Hand lay-up. The tensile strength, bending strength, and impact strength of these components were used to obtain critical fiber ratios based on the thickness of the fiber. The physical properties of the fiber and its interaction with the matrix were determined by XRD and FITIR tests, respectively. SEM images were examined with the help of the observed microstructure of the fracture surfaces. According to the obtained data, critical fiber diameter values in thick fibers are higher than thin fibers. The results of the study showed that fine fibers had a positive effect on the mechanical properties of the materials compared to thick fibers.

Keywords: Composite, Mechanical properties, Nettle fiber, Pmma, Critical volume ratio.

1. Giriş

Kompozit malzemelerin avantajlarından biri, farklı gereksinimleri karşılamak üzere malzeme özelliklerini ayarlama imkânıdır. Heterojen kompozitlerin makroskopik davranışının, (Volumetrik) kompozisyon, her komponentin gerilme-şekil değiştirme davranışı, fazların geometrik düzeni ve arayüz özellikleri dahil olmak üzere birçok faktöre bağlı olduğu bilinmektedir (Shah ve Ark. 2012; Takagi ve Nakagaito 2016).

Bitkisel liflerden üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine yapılan birçok çalışmada, kompozitlerin hacimsel etkisi iyi tanımlanmamıştır (Madsen ve ark. 2009). Bununla birlikte, Doğal elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin yapı-özellik ilişkilerini çok güzel biçimde ortaya koyan bazı çalışmalar da vardır. Bunlar kısa fiber takviyeli (Aslan ve ark.2018), ve tek eksenli olarak yönlendirilmiş lif takviyeli (Madsen ve ark 2007) çalışmalarıdır.

Ghosh ve ark. (2011). tarafından yapılan ve bu alanda ilk olan çalışmada, kısa muz lif takviyeli vinil-ester kompozitlerin, kritik elyaf hacim ($V_{f,kritik}$) fraksiyonu % 25 vf, olarak tanımlanmıştır. Shah ve Ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada keten-polyester ve jüt-polyester kompozitlerde kritik fiber oranları belirlenmiştir. $v_{f,kritik} = \% 9,3$ iken jüt polyester kompozitlerde bu oran %8,1 olarak gerçekleşmiştir. Aynı çalışmada karbon polyester kompozitlerin çekme testlerinde kritik oran %2,4 olarak belirlenmiştir. Fakat ısırgan lifleri için benzer bir çalışma yoktur. Yapılan diğer çalışmalarda ısırgan lifi takviyeli kompozitlerin mekanik ve yaşlanmaya bağlı davranışları irdelenmiştir

Isırgan lifi/PP kompozitler ile yaptıkları çalışmada Paukszta ve ark. (2013) çarpma dayanımının % 35, uzamanın %7 ve çekme modülünün % 50 arttığını rapor ettiler.

Kompozitlerin mekanik davranışına farklı işletim ortamlarının etkisini araştıran Kumar ve arkadaşları (2013) farklı uygulama süresi için nehir suyu, mazot, dondurucu hava şartlarıyla, güneş ışığı (UV) ve toprağın ısırgan lifi takviyeli polipropilen (PP) kompozitlerinin çekme davranışı üzerine etkisini araştırdılar.

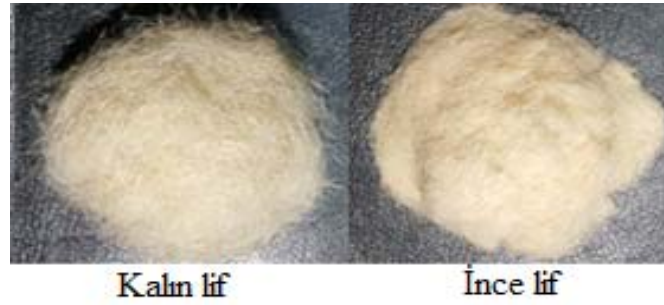
Lanzilao ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada Himalaya ısırgan otu ile Avrupa ısırgan otu lifinin mekanik özelliklerini ortaya koydular. Yaptıkları çalışmada Himalaya ısırgan otu lifinin elyaf uzunluğunun daha fazla, lümen çapı ve şeklinin daha farklı olduğunu ve maksimum gerilme dayanımının Avrupa ısırgan Lifine göre iki kat daha yüksek olduğunu rapor ettiler.

Bu çalışmada elle yatırma yöntemi ile iki farklı lif çapı kullanılarak, üretilmiş ısırgan/polimetilmetakrilat kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kompozitlerin mekanik testlerinden elde edilen (çekme, eğme, darbe) grafikler yardımı ile, minimum ve kritik elyaf hacim fraksiyonu değerleri ortaya konulmuştur. Kırılma yüzeylerinin mikro yapısı SEM yardımı ile incelenmiştir.

2.Materiyal ve Metot

2.1. Materyal

Isırgan otundan lif üretimi (*Urtica dioica*) doğal yöntem (Huang ,2005) kullanılarak (hasat, kurutma, çürütme, elle soyma, tarama) elde edilmiştir. Bu yolla literatürde belirtildiği gibi ortaya çıkabilecek mekanik hasarların kısmen de olsa engellenmesi hedeflenmiştir(Nechwatal,2003). Elde edilen liflere farklı tarama süreleri uygulanarak farklı kalınlıkta lifler elde edilmiştir Şekil.1.



Şekil 1. Kalın ve ince ısırgan lifleri

Isırgan lifinin mekanik ve fiziksel özellikleri yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Bu özellikler tablo 1’de verilmiştir.(Bodros, E. ve Baley, C.2008).

Tablo 1.Isırgan lifinin mekanik ve fiziksel özellikleri

Çekme dayanımı 954-2234	Çzunluk 42-54 mm
Young Modülü 59-119 GPa	Çap 16-43 µm
Uzama % 1,5-6	Yoğunluk 1,5 gr/cm ³

Isırgan lifi-Polimetilmetakrilat kompozitlerin oluşturulmasında kullanılan matris ve sertleştirme malzemeleri Otto Bock (Almanya) Türkiye temsilciliğinden sağlandı. Standart Pmma’nın bazı mekanik özellikleri tablo 2’de verilmiştir (Callister, 2007).

Tablo 2. Standart Pmma ait bazı mekanik özellikler

Kopma uzaması (%)	0,5-5	Elastisite modülü (MPa)	3000
Sertlik –Rockwell (M)	93	Çekme dayanımı (MPa)	40-70
Darbe dayanımı (kJ/m ²)	11	Kırılma Tokluğu (MN/m ^{3/2})	0,7-1
Poisson ratio	0,35-0,40		

Isırgan lifi -Polimetilmetakrilat kompozitlerden deney numunesi oluşturmak amacı ile PTFE malzemeden döküm kalıpları hazırlandı ve kompozitler elle yatırma yöntemi ile üretildi. Jelleşme başlangıcında kalıp üst parçası kapatılarak üzerine 6,25 MPa basınç uygulandı. Reaksiyon tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılan numuneler nihai kür uygulaması için 24 saat boyunca 80°C fırında bekletildi. Numuneler otomatik tezgahlarda standartlara uygun ölçülerde işlendi (Şekil 2). Kırılma tokluğu numuneleri üzerine a/w oranı 0,3 olan standart çentikler açıldı.

**Şekil 2.** İşlenmiş çentiksiz üç nokta eğme numunesi

2.2 Metot

Kompozitlerin FTIR analizleri, Perkin Elmer Spectrum1400 spektrometresi ile 4000-650 cm⁻¹ tarama aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Test 2 cm⁻¹ çözünürlükte ortalama 10 tarama ile yapıldı.

X-ışını kırınım testi, bakır radyasyonlu gelişmiş Diffractometer (**Europe 600 XRD**) ile gerçekleştirildi. Cu Ka, 40 kV ve 30 mA'da çalıştırıldı. Tarama aralığı 10-30, adım boyutu 0,02 ve tarama hızı 0,4 / dakika olarak seçildi.

Taramalı elektron mikroskopisi görüntüleme öncesinde numuneler 50 ± 3 °C'de 48 saat kurutuldu. Daha sonra altın kaplanan numuneler JSM-5910 cihazı kullanılarak görüntülendi. SEM görüntülerinin yorumlanması, ısırgan lifi /Pmma kompozit kırık yüzeylerinin detaylı incelenmesi ile yürütüldü.

Yapılan çalışmada kullanılan ısırgan liflerinin yoğunlukları, Piknometre Yöntemi ile belirlenmiş ve ısırgan lifinin yoğunluğu 1,157 olarak tespit edilmiştir.

Lif çaplarını belirlemek amacı ile OLIMPUS B52 optik mikroskop kullanıldı. 50'şer adet kalın ve ince lifin ölçümü yapılarak ölçüm aralığı belirlendi. Yapılan araştırmada kullanılan liflerin çap aralığı, ince liflerde 30-80 µm iken kalın liflerde 80-150µm olarak belirlendi.

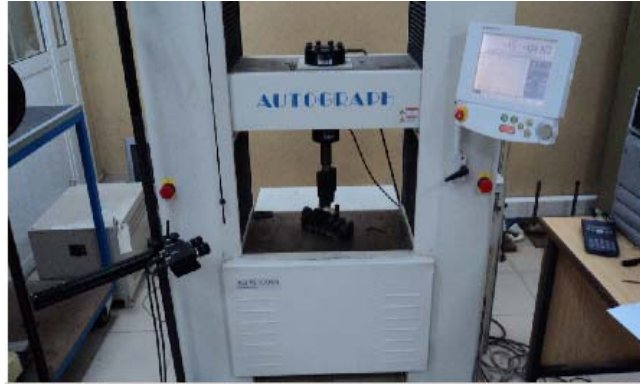
Çekme testi (ASTM D638), 3 nokta eğme testi (ASTM D790) üniversal test makinesi (Shimadzu Ag-X Plus100 Kn) ile yapıldı (şekil 3). Çatlak ucundaki açılmanın ölçülmesi için klipgeyç kullanıldı. K_{IC} ölçümü, çentik uzunluğunun, numune genişliğine oranı (a / w) 0,3 olan numuneler yardımı ile belirlendi ve denklem 1 kullanılarak hesaplandı (Hughes, 2002).

$$K_{IC} = \frac{PmS}{DW^{2/3}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

Burada Pm kırılma anındaki yük, S mesnetler arası mesafe, D numune kalınlığı, W numune genişliği, ve $f(a/w)$ olarak verilen polinomial geometrik düzeltme faktörü eşittir.

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3(a/w)^{1/2} [1,99 - (a/w)(1 - (a/w)x(2,15 - 3,93(a/w) + 2,7(a^2/w^2))]}{2(1 + 2a/w)(1 - a/w)^{3/2}} \quad (2)$$

İzod darbe testi D 4812 – 99'deki prosedürlere uygun, beş adet çentiksiz test numunesi ile gerçekleştirildi. Darbe enerjisi, 5,4 kJ sarkaç çekicine sahip Zwick B5113 izod darbe cihazı ile belirlendi ve sonuçlar kJ / m^2 cinsinden elde edildi.



Şekil.3. Eğme ve kırılma testi düzeneği

2.3. Elyaf hacim oranının değerlendirilmesi

Doğal elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin hacim fraksiyonunu (V_f) ölçmek için aşağıdaki ifade kabul edilmiştir (Messiry 2013):

$$V_f = (V_c - (M_c - M_f)/\rho_r)/V_c \quad (3)$$

Burada; Mc kompozitin kütlesi, M_f lif kütlesi, Vc kompozit hacmi ve p_f elyaf, p_r kür edilmiş polimerin yoğunluğudur.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hacim oranları ve kompoziti yoğunluğu

Deney numunelerine ait hacim oranları ve yoğunluk sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 2'de kompozit yoğunluğunun, fiber hacim ve ağırlık oranı ile değişimi incelendiğinde, Isırgan elyaf takviyesinin % hacim oranlarının artmasına bağlı olarak kompozitlerin yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Yoğunluk değişimi kompozitlerde sırasıyla % 0,6, %1,3, %1,9, %2,6 olarak kaydedilmiştir.

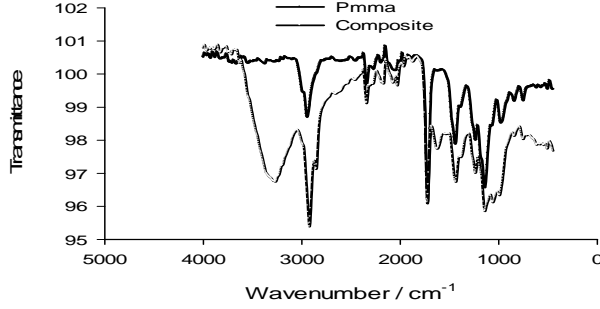
Tablo.2. Kompozitlerde fiber hacim ve ağırlık oranı ile yoğunluğun değişimi

Örnek	Lif ağırlık oranı (%)	Lif hacim oranı (%)	Kompozitin yoğunluğu
Isırgan Lifi-0	0	0	0,970±0,01
Isırgan Lifi-1	1,31	1,25	0,976±0,02
Isırgan Lifi-2	2,62	2,50	0,983±0,02
Isırgan Lifi-3	3,93	3,75	0,989±0,03
Isırgan Lifi-5	5,22	5	0,996±0,04

3.2. Kompozitin Fıtır analizi

Şekil 4'de kompozitin Fıtır analizi incelendiğinde 748 cm⁻¹ deki pik C-C bağının titreşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1051 cm⁻¹ bulunan pik aromatik halkadaki C-H titreşimine ve birincil alkollerdeki C-O titreşimine bağlı olarak ortaya çıkar. 1418 cm⁻¹ oluşan pik CH₂ nin simetrik eğilmesinden kaynaklanır. 1648- 1630 cm⁻¹ aralığındaki absorpsiyon bandı selülozun kristal olmayan bölgelerindeki absorbe edilmiş su moleküllerinin titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2933 cm⁻¹ deki pik metil ve metilen gruplarının gerilme titreşimine atfedilebilir. 3343 cm⁻¹ de gözlemlenen pik O-H gruplarının varlığını göstermektedir. Bu pik lifin içerdiği nem veya alkol yada fenol gruplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kompozitin fıtır incelemesine bakıldığında Isırgan lifinin kompozit içerisindeki varlığı açıkça teyit edilebilir. Isırgan lifinin varlığı kimyasal kompozisyona bağlı olarak

bazı farklı pikleri ortaya çıkardığı gibi Pmma'nın bazı piklerinde de küçük kaymaların olduğu gözlenmektedir. Bu da iki malzeme arasında zayıf bir etkileşimin varlığını ortaya koyar.

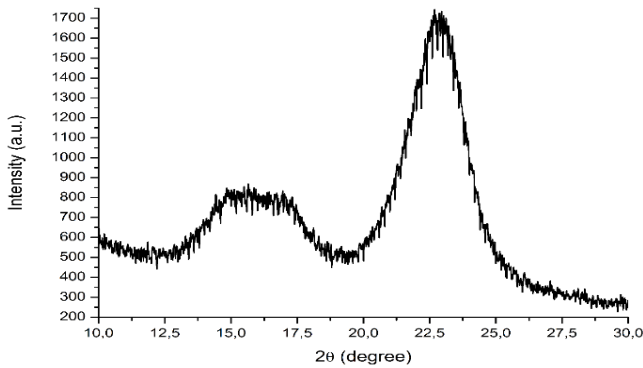


Şekil 4. Kompozitin Fıtır analizi

3.3.İsırgan Lifinin X-Işını Kırınımı Analizi

İsırgan lifi içerisindeki selülozun tipik kristal kafesine ait X-ışını kırınım desenleri Şekil 5'de verilmiştir. Selüloz elyafa ait ana desenlerin iki teta değeri sırasıyla $I_{am} = 16,5$ ve $I_{002} = 22,8$ dir ve bu desenler (101) ve (002) düzlemlerine karşılık gelir. İsırgan elyafının kristallik indeksi (CrI), Segal ampirik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İsırgan elyafının kristalinite indeksinin % 71,8 olduğu ortaya koyuldu. Yapılan bazı çalışmalarda, sisal, keten, kenevir, kenaf gibi selüloz elyaf çeşitlerinin kristalinite indeksini ölçmek için aynı yöntemi kullandı (Jonoobi ve ark.2010).

$$CrI = (I_{002} - I_{am}) \times 100 / I_{002} \quad (4)$$

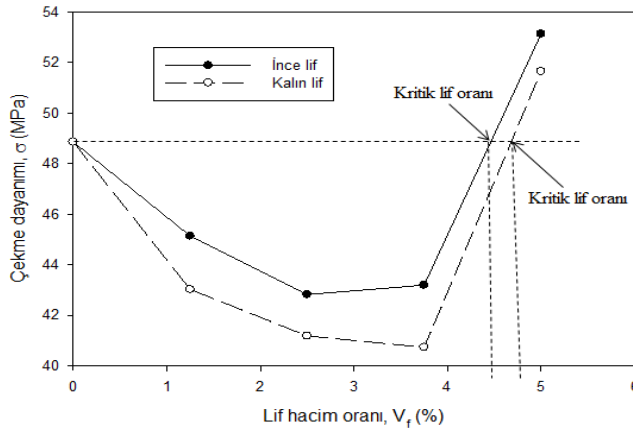


Şekil 5. İsırgan lifi X-ışını kırınım desenleri

3.3. Mekanik Testlerde, Kritik Fiber Oranının belirlenmesi

3.3.1.Çekme Testinde, Kritik Fiber Oranının Belirlenmesi

Çekme Testinde minimum ve kritik oranların değişimi deneysel yöntemle belirlenmiş ve şekil 6'da verilmiştir. Liflerin takviye edici etkisi, elyaf hacim fraksiyonu kritik elyaf hacim fraksiyonunu ($v_f > v_{f,kritik}$) aştığında görülür (Pan,1993). Yapılan çalışmada kompozitin içerisine ilave edilen %1,25 ve %2,5 oranındaki liflerin iki farklı lif kalınlığında da dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir. Lif ilavesinin artırılması ile kritik değer aşıldığında lifin takviye edici özelliği ortaya çıkar. Gerçekleştirilen test sonuçlarına göre, çekme testindeki kritik lif oranı değerleri kalın ve ince elyaflarda sırasıyla % 4,78 ve % 4,39 olmuştur. Yapılan çalışmalarda genellikle, polimer matrise liflerin eklenmesi ile matris mukavemetinin ve rijitliğinin artırılması yoluyla, kompozitlerin gerilme özellikleri belirgin şekilde geliştirilmiştir (Malkapuram ve ark.2008). Bu özelliklerdeki artış hacim fraksiyonuna, karşım kuralına, fiberin fiziksel ve kimyasal özelliklerine ve fiber matris uyumuna bağlıdır (Ku ve ark. 2011).

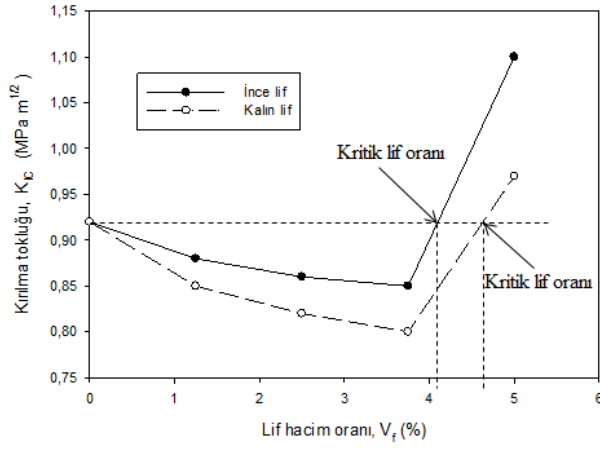


Şekil 6. Çekme testi grafiği yardımı ile, kritik lif oranlarının belirlenmesi

3.3.2. Kırılma Tokluğu Testinde, Kritik Fiber Oranının Değerlendirilmesi

Kalın ve ince lif takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun, fiber oranı ile değişimini gösteren grafik şekil 7'de verilmiştir. Çekme gerilmesindeki benzer davranış burada da tekrarlanmış, kritik lif oranına ulaşıldığında değerlerde artış görülmüştür. Bu grafikten faydalanılarak kalın ve ince lif takviyeli kompozitlerin minimum ve kritik lif oranları belirlenmiştir. İsrırgan lifi- Pmma kompozitler ile yapılan çalışmada, kalın lifler için $v_{f, kritik} = \% 4,67$ ince lifler için $v_{f, kritik} = \% 4,10$ değerleri bulunmuştur. Kompozitin mekanik özelliklerinin artırılmasında, elyafların, mekanik ve fiziksel özellikleri bunların kimyasal kompozisyonu olan, selüloz, hemiselüloz ve ligninden etkilenmektedir

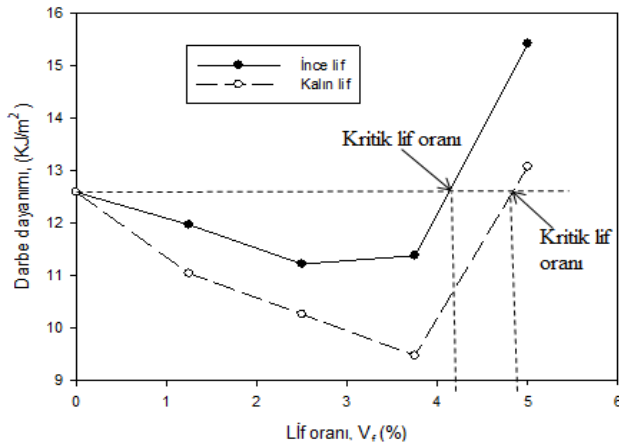
(Gümüşkaya ve ark. 2003). Örneğin, yüksek çekme mukavemeti ve yüksek termal kararlılık daha fazla kristalin selüloz ihtiva eden liflerden elde edilir (Ornaghi 2014).



Şekil 7. Kırılma tokluğu grafiğinde minimum ve kritik lif hacim oranının değişimi

3.3.3. Darbe Testinde, Minimum ve Kritik Fiber Oranının Belirlenmesi

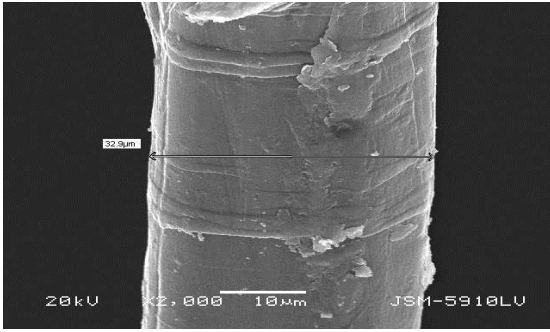
Kalın ve ince lif takviyeli kompozitlerin darbe dayanımının fiber oranı ile değişimini gösteren grafik şekil 8'de verilmiştir. Bu grafikten faydalanılarak kalın ve ince lif takviyeli kompozitlerin minimum ve kritik lif oranları belirlenmiştir. İsrırgan lifi- Pmma kompozitler ile yapılan çalışmada, kalın lifler için v_f , kritik =% 4,83 benzer şekilde ince lifler için v_f , kritik =% 4,22 değerleri bulunmuştur. Çekme testinde v_f , minimum ve v_f , kritik değerleri arasındaki fark yaklaşık % 1 iken darbe testinde bu oran daha büyüktür.



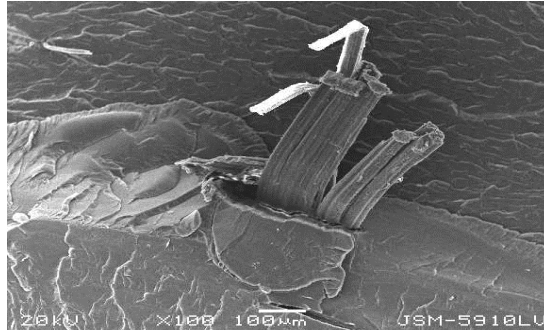
Şekil 8. Darbe dayanımında, minimum ve kritik lif hacim oranının değişimi

3.4 . Morfoloji

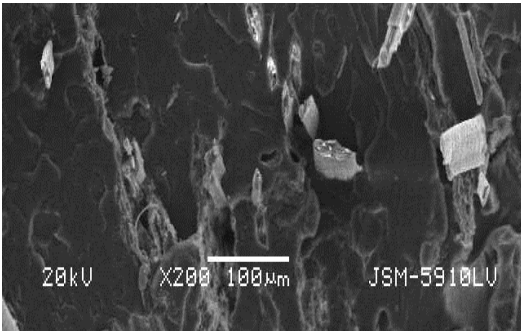
İsırgan lifi-Pmma kompozit numunelerin test sonrası kırık yüzeylerine ait SEM mikro fotoğrafları sırasıyla şekil 9 a, b, c,'de görülmektedir (Büyükkaya,2017). Tek lifinin yüzeyi pürüzsüz sayılabilecek bir görüntüye sahiptir (şekil 9a). Şekil 9b'de % 1,25 hacim fraksiyonuna ait kalın lifler ile takviye edilmiş mikrografi görülmektedir. Görüntülerle düşük lif oranlarında hasarın lif kopması şeklinde olduğu teyit edilmektedir. Şekil 9c'de % 5 hacim oranına sahip ince liflerle takviye edilmiş kompozitin kırılma yüzeyi incelemesinde yüzeyde farklı kırılma mekanizmalarının etkileri görülmektedir. Bu mekanizmalar fiber çekilmeleri ve fiber kopmalarıdır. İnce liflerle takviye edilmiş kompozitin kırık yüzey görüntüleri, kritik hacim fraksiyonu aşıldığında ısırgan lifi-Pmma kompozitlerin kırılma esnasında farklı mekanizmalarla enerji absorbe ederek mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 9a Tek ısırgan lifinin mikro görüntüsü



Şekil 9b kalın lifin hasar mikrografi



Şekil 9c Kompozitin kırık yüzeyinin mikrografi

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, Pmma matrise takviye edici katkı olarak, diğer doğal liflerden daha düşük oranda ısırgan lifi ilavesi ile iyi mekanik özelliklere sahip bir kompozitin başarılı bir şekilde

geliştirilebileceğini göstermiştir. İnce ısırgan lifi, takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri kalın life oranla daha fazla artmıştır.

Isırgan lifi/ Pmma kompozitlerin minimum ve kritik elyaf hacim fraksiyonlarının, keten ve jüt ile güçlendirilmiş kompozitlerin değerlerinden düşük, buna karşılık karbon kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Elde edilen veriler, ısırgan lifinin, mukavemeti artırma yönü ile, keten ve jüt'den daha iyi bir takviye malzemesi olduğunu ortaya koyar.

Bu sonuçlar, ısırgan lifinin mekanik değerler açısından, sentetik fiberlere ağırlık/mukavemet oranına göre lojistik, inşaat ve spor gibi bazı sektörlerde alternatif olabileceği, yada hibrit kompozit uygulamalarında önemli bir seçenek olacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Aslan, M , Kaya, M , Güler, O , Alver, Ü . (2018). Effect Of Fibre Content On The Mechanical Properties Of Basalt Fibre Reinforced Polylactic Acid (Pla) Composites. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 28 (1), 66-71
- Bodros, E. & Baley, C., (2008) Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*), *Materials Letters*, 62, 2143-2145
- Büyükkaya, K . (2017). Investigation of Mechanical Behavior of Nettle Filled Hybrid Composites of Nettle Fiber-Hazelnut Shell. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (4), 133-144. DOI: 10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.337247
- Callister W.D, (2007) *Materials Science and Engineering: An Introduction*, seventh ed., *John Wiley & Sons*.
- Ghosh R, Reena G, Krishna A.R., Raju B.H.L. (2011). Effect of fibre volume fraction on the tensile strength of Banana fibre reinforced vinyl ester resin composites. *Int J Adv Eng Sci Technol*, 4(1), 89–91.
- Gümüşkaya, E.; Usta, M.; Kirei, H. The effects of various pulping conditions on crystalline structure of cellulose in cotton linters. *Polym. Degrad. Stab.* 2003, 81, 559–564.
- Huang, G., Nettle (2005). (*Urtica cannabina* L) fibre, properties and spinning practice, *Journal of the Textile Institute*, 96(1),11-15
- Hughes, M. Hill, C. A. S. & Hague. J. R. B. W. (2002). The fracture toughness of bast fibre reinforced polyester composites, *Journal of Materials Science*, 37, 4669 – 4676
- Jonoobi, M., Harun, J., Tahir, P., Zaini, L., S. Saiflu A.S., & Makinejad, M., (2010). Characteristics of nanofibers extracted from kenaf core, *Bio- Resources*, 5(4), 2556–2566.
- Ku , H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., Trada, M., (2011) A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering* Volume 42 (4) , 856–873
- Kumar, B.P, Dharmendra, M. & Shrey, V. (2013). Tensile Behavior Of Nettle Fiber Composites Exposed To Various Environments, *Journal Of Natural Fibers*, 10(3), 244-256
- Lanzilao, G. Goswami, P. & Blackburn, R.S. (2016). Study of the morphological characteristics and physical properties of Himalayan giant nettle (*Girardinia diversifolia* L.) fibre in comparison with European nettle (*Urtica dioica* L.) fibre *Materials Letters*, 181, 200–203
- Madsen B, Hoffmeyer P., Lilholt H. (2007). Hemp yarn reinforced composites – II. Tensile properties. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, 38, 2204–2215.
- Madsen B, Thygesen A., Liholt H. (2009) Plant fibre composites – porosity and stiffness, *Compos Sci Technol*, 69, 1057–1069.
- Malkapuram R, Kumar V, Yuvraj SN. Recent development in natural fibre reinforced polypropylene composites. *J. Reinf Plast Compos* 2008;28:1169–89.
- Messiry, M.E. (2013). Theoretical analysis of natural fiber volume fraction of reinforced composites, *Alexandria Engineering Journal*, 52 (3), 301-306. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.01.006>
- Nechwatal A, Mieck K.P., Reusmann T. (2003). Developments in the characterization of natural fibre properties and in the use of natural fibres for composites. *Comp Sci Tech.*, 63, 1273-1279.
- Ornaghi, H.L., Jr.; Poletto, M.P.; Zattera, A.J., (2014) Amico, S.C. Correlation of the thermal stability and the decomposition kinetics of six different vegetal fibers. *Cellulose* , 21, 177–188.

- Pan N, (1993) Theoretical determination of the optimal fiber volume fraction and fiber-matrix property compatibility of short fiber composites, *polymer composite*, 14:(2) 85-93
- Paukzta, D. Mańkowski, J. Kołodziej, J. & Szostak, M. (2013). Polypropylene (PP) Composites Reinforced with Stinging Nettle (*Urtica dioica* L.) Fiber, *Journal of Natural Fibers*, 10 (2) , 147-158
- Shah, D. U., Schubel, P. J., Licence P. & Clifford, J. (2012). Determining the minimum, critical and maximum fibre content for twisted yarn reinforced plant fibre composites, *Composites Science and Technology*, 72, 1909–1917
- Takagi, R.B., Nakagaito, A.N. (2016). Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers, *Industrial Crops and Products*, 94 (30), 562–573.