

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019) 025904 (480-489)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 025904 (480-489)

DOI: 10.35414/akufemubid.552139

Araştırma Makalesi / Research Article

Aşındırıcı Su Jetinde Eğimli Kesimin İncelenmesi

Mustafa Armağan^{1,2}, A. Armağan Arıcı²¹ İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, İstanbul.² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

e-posta: mustafaarmagan@hotmail.com.tr, mustafa.armagan@medeniyet.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0429-0351>aarici@kocaeli.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2183-2175>

Geliş Tarihi: 11.04.2019;

Kabul Tarihi: 23.08.2019

Öz

Çeşitli sanayi kollarında son yıllarda kullanımı giderek artan Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile kesme yöntemi, geleneksel olmayan (alınmamış) bir malzeme kesme yöntemidir. ASJ yöntemi genellikle maden ve metal endüstrisinde malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada diğer bir malzeme türü olan polimer matrisli kompozit malzemeler (cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit) ASJ yöntemi ile kesilmiştir. ASJ tezgâhının ana unsurlarından biri olan ASJ nozulunun, çeşitli eğim açılarında tutulmasıyla kesme performansına etkileri araştırılmıştır. Yedi farklı eğim açısına göre kesilen malzemenin kesme yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülükleri değerleri optik profilometre aracılığıyla ölçülmüştür. Kesme yüzeyi üzerinde başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü tanımlanmış, nozulun 87,5° ve 82,5° eğim açısında her iki yüzey pürüzlülüğünü iyileştirici etkisi bulunmuştur. Ayrıca eğim açılarının etkileri SEM görüntüleri ile incelenmiş, eğimli kesimin iyileştirici etkileri gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler

Aşındırıcı su jeti;
Eğimli kesim; Cam elyaf
takviyeli vinil ester
kompoziti; Yüzey
pürüzlülüğü; Taramalı
elektron mikroskobu.

Investigation of Sloping Cuts in Abrasive Water Jet

Abstract

Abrasive Water Jet (AWJ) cutting method is a non-traditional material cutting method which has been increasing its use in various branches of industries in recent years. The AWJ method is usually used in the cutting of materials in the metal and mining industries. In this study, polymer matrix composite materials (glass fiber reinforced vinyl ester composite) which is another type of material are cut by AWJ method. AWJ nozzle is one of the main components of AWJ machine and the effects of nozzle angle on the cutting performance were investigated by keeping it at various slope angles. According to seven different slope angles, work material was cut. The average surface roughness values of the cutting surfaces were measured by optical profilometer. On the cutting surface, initial and zone average surface roughness was defined. At 87.5° and 82.5° slope angles of nozzle, it was found improvement effect for both surface roughness values. In addition, the effects of slope angles were examined by SEM images and the improvement effects of sloping cuts were shown.

Keywords

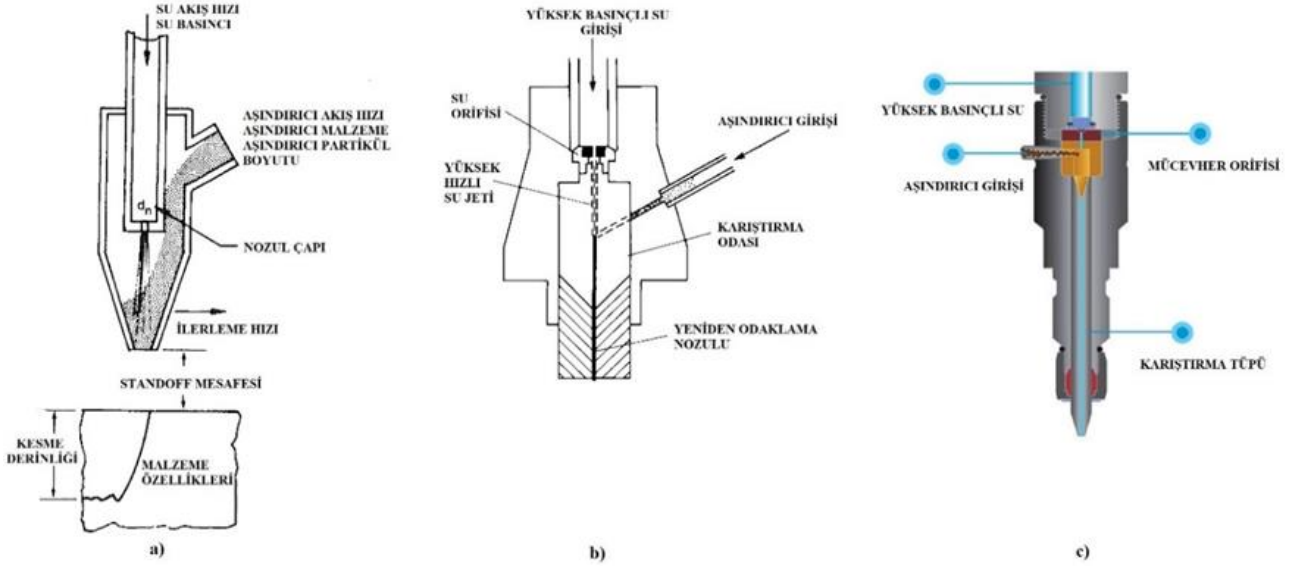
Abrasive water jet;
Sloping cuts; Glass
fiber reinforced vinyl
ester composite;
Surface roughness;
Scanning electron
microscope.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

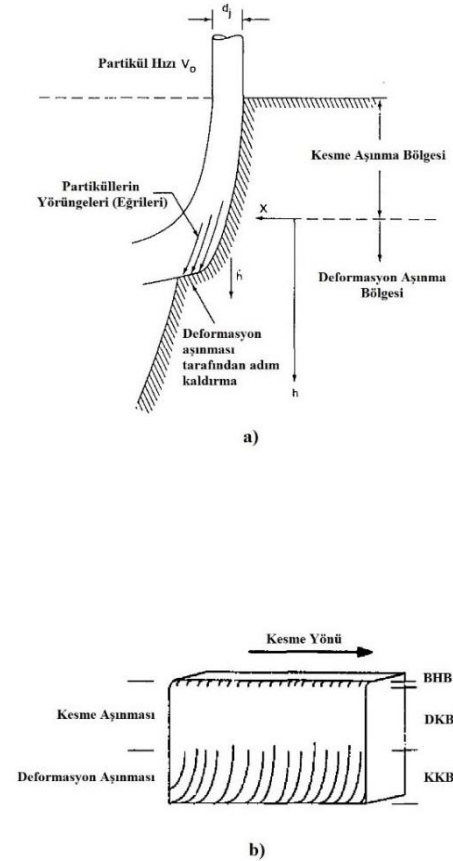
Aşındırıcı su jeti ile kesme yöntemi hedef malzemenin yüzeyleri üzerine basınçlı su ile hızlandırılan aşındırıcı malzemelerin gönderilmesine dayanmaktadır. Basınçlı su ile aşındırıcı malzemenin hızlanması ve karıştırılması sert bir malzemedan oluşan karıştırma odasında meydana gelmektedir (Hashish 1984). Yüksek hızlı su jeti karıştırma odasından geçtiğinde, yüksek akış düşük basınç

alanını oluşturmaktadır, bir besleme hattından aşındırıcı malzeme çekilmektedir. Karıştırma odasında, aşındırıcı yüksek basınçlı su jeti ile rastgele karışmaktadır. Daha sonra da ikinci bir nozul sayesinde yeniden odaklanmaktadır (Johnston 1989). Karıştırma odasını içine alan nozulun farklı konfigürasyonları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Nozul örnekleri: a) (Hashish 1984), b) (Johnston 1989), c) modern konfigürasyon (Int Kyn. 1).

ASJ ile kesme yüzeyi Mod I ve Mod II'den meydana gelmektedir. Mod I kesme aşınma modu olup; kesme aşınma bölgesi içinde bir mikro işleme prosesinde olduğu gibi sığ açılarda partikül darbesi ile malzeme yerinden kaldırılmaktadır. Mod II deformasyon aşınma modu olup; deformasyon aşınma bölgesinde geniş açılarda partikül darbesi tarafından aşırı plastik deformasyondan dolayı malzeme kaldırılması ile karakterize edilmektedir (Hashish 1984, Hashish 1988, Hashish 1989, Hashish 1989, Hashish 1991, Sheikh-Ahmad 2009). Kesme ve deformasyon aşınması Şekil 2 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Arola ve Ramulu (1997) ASJ ile kesilen yüzeyi 3 belirgin yüzeye bölmüştür (Şekil 2 (b)). Başlangıç hasar bölgesi (BHB) kerfin üstünde meydana gelmekte, radyal mesafe ile jet enerjisindeki eğimden ve çarpmadan önce jet genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölge içinde aşındırıcı hücum açısı kalan kesme derinliğine göre çok daha büyüktür. Düzgün (temiz) kesme bölgesi (DKB) ve kaba (pürüzlü) kesme bölgesi (KKB) başlangıç hasar bölgesinin altında bulunmaktadır ve bu iki bölge, dalgalılık desenleri (şekilleri) ile ayırt edilmektedir.



Şekil 2. Kesme yüzeyi aşınma mekanizmaları: a) (Hashish 1984, Hashish 1989), b) (Arola and Ramulu 1997).

ASJ ile kesme işlemlerinde hemen hemen tümüyle nozul eğim açısı 90° olmakta ve bu açı sabit kalmaktadır. Bu durumun oluşmasında, nozulun tezgâha sabit olarak bağlanmasından ve eğim etkisinin kesme performansı sonucuna bilgi

birikiminin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hâlbuki kesme yüzeyini etkileyen modlarda aşındırıcı ve jet açısının davranışı, nozul eğim açısının değişimi ile etkileneceği beklenmektedir ve sonuç olarak değişimin etkisi literatürde çok az incelenmiştir. Wang vd. (2003) yaptığı çalışmada fenolik dokumalı polimer matris kompozitinin ASJ ile kesilmesinde jet ileri darbe açıları değişim üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Tek pasolu kesme işleminde penetrasyon derinliğini arttıran ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştiren optimum jet darbe açısı 80° bulunmuştur. Siores vd. (1996) seramiklerin ASJ ile kesilmesinde maksimum toplam penetrasyon derinliği için optimum jet darbe açısını 80-85° arasında bulmuş, Chen vd. (1998) yaptığı çalışmada da aynı sonucu ifade etmiştir. Shanmugam vd. (2008) alümina seramiklerin ASJ ile kesilmesinde kerf sivrilmesini minimize etmek için bir kompanzasyon tekniğini kullanmıştır. Çalışmada diğer kesme parametrelerine bağlı olarak kerf sivrilme kompanzasyon açısı 4-5° aralığında olmasıyla kerf sivrilme açısı minimize olarak sifıra yaklaşabilmiştir. Ayrıca araştırmacılar, eğimli kesimin etkisini arttırabilmek adına belirlenen frekansta nozul eğim açısının periyodik değişimi sağlanarak salınım tekniği geliştirmiş (Siores *et al.* 1996), ve kesme performanslarını incelemiştir (Siores *et al.* 1996, Chen *et al.* 1998, Wang and Zhong 2009, Chen *et al.* 2002, Lemma *et al.* 2005, Lemma *et al.* 2002, Lemma *et al.* 2002).

Anwar vd. (2019) yaptığı çalışmada ASJ ile işleme yöntemi üzerine bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan analize göre yayımlanan makalelerin yaklaşık %50'si son on yılda gerçekleşmiş, çalışmaların artması ile de ASJ üzerine araştırmaların gittikçe önem kazandığı, şeklinde ifade edilmiştir. Supriya ve Srinivas (2018) paslanmaz çeliklerin ASJ ile kesilmesine ait makalelerin incelemesini gerçekleştirmiştir. Ravi Kumar vd. (2018) tungsten karbür takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesinde malzeme kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü değişimi açısından işleme parametrelerinin optimizasyonunu çalışmıştır. Malzeme kaldırma oranına en çok ilerleme hızı

değeri, yüzey pürüzlülüğüne ise en çok yüzde takviye elemanı oranı etki etmiştir. ASJ yöntemi genellikle maden ve metal endüstrisinde malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesinde bilgi birikiminin az olduğu literatürde kendini göstermektedir. Wang (1999) yaptığı çalışmada ASJ ile polimer matrisli kompozitleri kesmede kerf profilini incelemiştir. Test numuneleri fenolik reçine kullanılarak teflon dokuma ile takviye edilmiş polimer temelli matris bileşenini kullanmıştır. Çalışmaya göre üst kerf genişliği, nozul ile malzeme yüzeyi arasındaki uzaklık olan standoff mesafesi ve su basıncının artması ile artmış, ilerleme hızı artması ile azalmıştır. Azmir ve Ahsan (2009) cam-epoksi kompozit levhaların ASJ ile kesilmesini çalışmıştır. Taguchi tekniği ve varyans (ANOVA) analizi ile deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf incelleme oranı üzerine etkilerini belirlemiştir. Hidrolik basıncın yüzey pürüzlülüğü, aşındırıcı malzeme tipinin ise kerf incelleme oranı üzerine etkili parametreler olduğu gözlenmiştir. Hidrolik basıncı ve aşındırıcı kütle debisinin artması, standoff mesafesi ve ilerleme hızının azalması kesme performansını arttırmıştır. Shanmugam ve Masood (2009) yaptığı çalışmada iki çeşit kompozit malzemenin (önceden epoksi emdirilmiş grafit dokumalı kumaş ve cam epoksi) ASJ ile kesilmesiyle oluşan kerf sivrilme açısını incelemiştir. İlerleme hızı, su basıncı, aşındırıcı kütle debisi, standoff mesafesi deneysel değişken parametreler olarak seçilmiş ve kerf sivrilme açısını minimize edebilmek için test koşullarından yüksek su basıncı, düşük ilerleme hızı ve düşük standoff mesafesi kombinasyonlarına bağlı olarak seçilmesi önerilmiştir. Lemma vd. (2002) cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ASJ ile salınımlı kesilmesini araştırmıştır. Çalışmada bazı numunelerde ölçülen Ra değeri salınımsız kesmeye göre %20'ye kadar iyileşmiştir. Yüksek salınım açısı ve frekansı kullanıldığında yüzey kalitesinde iyileşmenin daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Azmir ve Ahsan (2008) ASJ ile kesmede cam epoksi kompozitinin kesme yüzeylerini araştırmıştır. Taguchi metodu ve varyans analizi ile verimli kesme için ASJ parametreleri optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için aşındırıcı malzeme, hidrolik basınç ve ilerleme hızı önemli kontrol faktörleri olarak

bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için en önemli kontrol faktörü ise aşındırıcı malzeme çeşidi olmuştur. Hidrolik basınç ve ilerleme hızının eşit öneme sahip olduğu ifade edilmiştir. Armağan ve Arıcı (2017) yaptığı çalışmada, ASJ ile cam elyaf takviyeli vinil ester kompoziti kesmiştir. Taguchi deney tasarımına göre kesme deneyleri yapılmış, varyans analizleri ile deneysel parametrelerin seviyelerinin etkileri bulunmuş ve optimum deney parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğünü ve üst kerf genişliğini etkileyen etkili deneysel parametre olarak standoff mesafesi bulunmuştur. Kumaran vd. (2017) karbon fiber takviyeli plastiklerin ASJ ile kesilmesinde yüzey pürüzlülüğünü regresyon analizi ile tahmin etmiştir. Deneysel çalışmada yüksek jet basıncı ile düşük ilerleme hızı ve standoff mesafe değerleri seçildiğinde yüzey pürüzlülüğü davranışı iyi çıkmıştır. Ayrıca, jet basıncı ve standoff mesafesinin yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreler olduğu bulunmuştur. El-Hofy vd. (2018) karbon fiber takviyeli epoksi reçineli kompozit levhaların ASJ ile kesilmesini araştırmıştır. Çalışmaya göre kerfin üst ve alt genişlikleri basınç ve standoff mesafesi ile artmış, ilerleme hızı ile azalmıştır. Çalışmada fiber yatırma türü, kesme genişliğine etki etmediği tespit edilmiştir. Ayrıca kesme maliyeti üzerine oluşturulan bir model sunulmuş ve ASJ ile kesme yönteminin frezeleme yönteminden daha ucuz olduğu sonucuna varılmıştır. Prasad ve Chaitanya (2018) cam elyaf takviyeli epoksi kompozit levhaların ASJ ile delinmesinde optimum işleme parametrelerinin belirlenmesini araştırmıştır. Çalışmada süreç parametrelerinin malzeme kaldırma oranına, yüzey pürüzlülüğüne ve boyutsal tamlığa etkileri araştırılmıştır. Malzeme kaldırma oranının aşındırıcı kütle debisi ile doğru orantılı olduğu, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlığın standoff mesafesi ile değiştiği ve ayrıca basıncın boyutsal tamlık üzerine etkili bir parametre olduğu çalışmanın bulguları arasındadır. Deneysel sonuçlar ASJ'nin bu tür kompozitlerin kesilmesi için uygun bir yöntem olduğunu gösterir niteliktedir. Phapale vd. (2016) karbon fiber takviyeli plastiklerin farklı ASJ parametreleri ile delinmesinde, süreç parametrelerinin delaminasyona etkilerini

araştırmıştır. Çalışmada, delaminasyon üzerine, standoff mesafesi ve su basıncının aşındırıcı kütle debisinden daha etkili olduğu gözlenmiştir. Montesano vd. (2017) karbon kumaşlı epoksi kompozit levhaların geleneksel delme ve ASJ yöntemi ile delme işlemindeki performansını araştırmıştır. Geleneksel delik delme ile açılan deliklerin yüzey pürüzlülüğü değerleri ASJ ile delmeye göre daha düşük olmuştur.

Bu çalışmada, nozulun çeşitli eğim açılarında tutulduğu ASJ yöntemiyle cam fiber takviyeli vinil ester levha kesilmiştir. Kesme yüzeylerinden optik profilometri aracılığıyla yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve pürüzlülüğün davranış gelişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca deney bulguları SEM görüntüleri ile de pekiştirilmiş ve gerekçeli nedenler tartışmalı biçimde irdelenmiştir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesi ve nozul eğim açısının kesme yüzeyine etkisinin araştırılması ile literatürdeki eksikliğin giderilmesine yönelik katkıda bulunmuş ve endüstride hemen hemen hiç rastlanmayan eğimli kesim ile performans artırıcı özgün bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

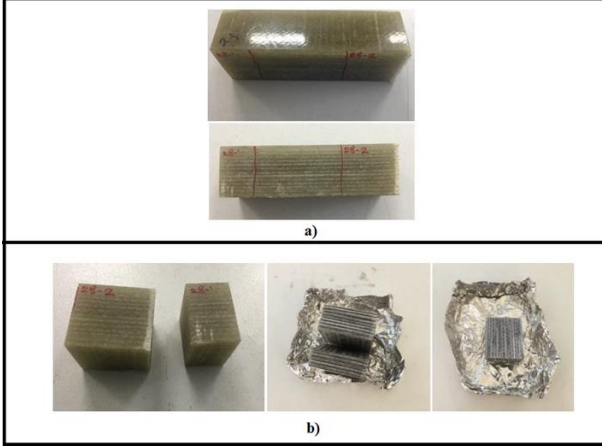
2. Materyal ve Metot

2.1 Malzeme ve Karakterizasyon

Çalışmada, genellikle denizcilik ve havacılık endüstrisinde kullanımı yaygın olan cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit levha kullanılmıştır. Cam fiber oryantasyonu dört eksenli (0°/-45°/90°/+45°) dikişli örme tipi, trikot dikiş tipi olarak seçilmiş ve ayrıca ağırlığı 1200 g/m² seçilmiştir. Kompozit levha el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Dört eksenli örgüler (600x400 mm) dikdörtgen biçiminde kesilmiştir. 14 parça kat için dört eksenli örgüler yığılmış ve plakaların son kalınlığı 28 mm olarak ölçülmüştür. Plakanın son cam fiber ağırlık oranı 0,63 olarak hesaplanmıştır.

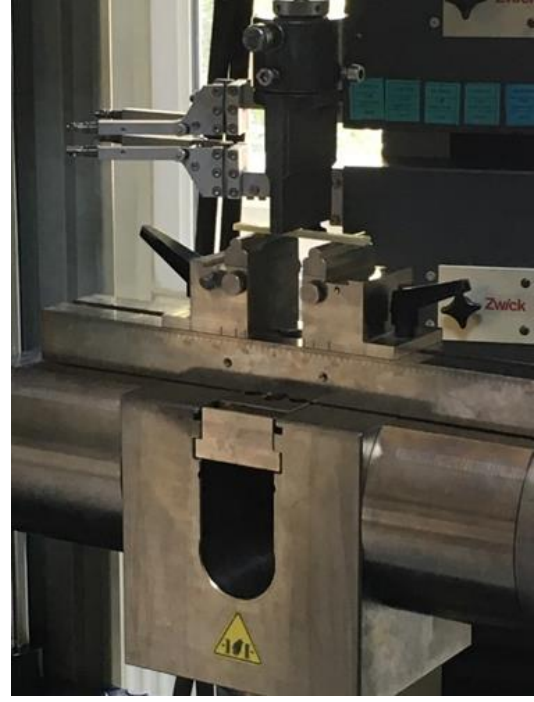
El yatırması ile üretilen levhanın karakterizasyonunda, kül yakma fırınında gerçekleştirilen yakma işlemi ile fiber oranı tayini yapılmıştır. Şekil 3 (a)'da levhadan numune alınan bölgeler gösterilmiştir. EN ISO 1172 test standardına uygun olarak 600±5 °C test sıcaklığında numuneden

iki adet numune alınarak yakma metodu uygulanmıştır. Yakma sonrası kalan cam fiber kalıntıları Şekil 3 (b)'de gösterilmiştir. Cam fiber oranı %63±3 olarak tayin edilmiş, levhanın deneysel çalışmalar için uygun olduğu şeklinde yorumlanmış ve kabul edilmiştir.



Şekil 3. a) Fiber oranı tayini için numune alınan bölgeler, b) Numunelerin yakma testi öncesi ve sonrası görüntüleri.

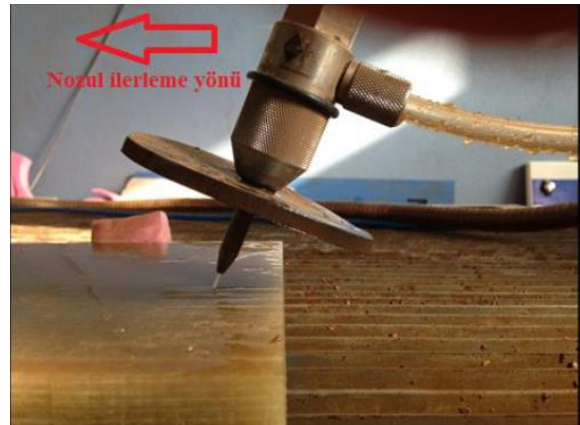
Malzeme karakterizasyonuna ait diğer bir test olan üç nokta eğme testi TS EN ISO 178 standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 4). Test koşulları: E-modülü tespit hızı 2 mm/min, test hızı 10 mm/min, ortalama numune kalınlığı 4,64 mm, ortalama numune genişliği 9,82 mm ve mesnetler arası mesafe 64 mm, şeklinde uygulanmıştır. Sonuç olarak ortalama E- modülü 10187 MPa ve ortalama σ_{max} değeri 313,2 MPa bulunmuştur.



Şekil 4. Üç nokta eğme testi.

2.2 Yöntem ve Parametreler

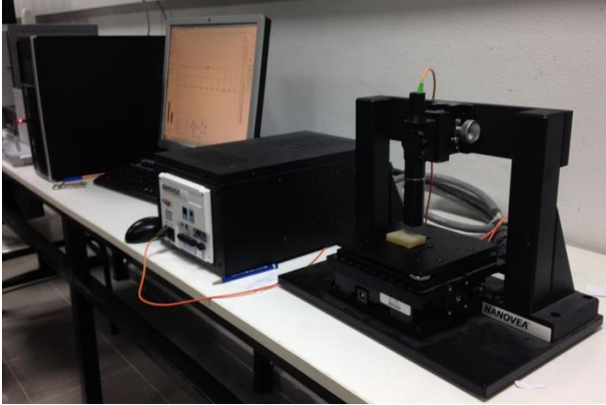
ASJ ile kesme işlemleri Robjet RJP 50 HP marka yüksek basınçlı aşındırıcı su jeti tezgâhında yapılmıştır. Nozul çapı 1,02 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada nozul eğim açısının etkilerini inceleyebilmek için 90°, 87,5°, 85°, 82,5°, 80°, 77,5° ve 75° olacak şekilde yedi farklı nozul eğim açısı seçilmiş ve eğimli ASJ kesimleri yapılmıştır (Şekil 5). Aşındırıcı malzeme olarak garnet kullanılmış ve aşındırıcı boyutu 80 mesh seçilmiştir. Önceki çalışmaya göre (Armağan and Arıcı 2017) ASJ tezgahının kesme parametreleri: basınç 260 MPa, aşındırıcı kütle debisi 250 g/min, ilerleme hızı 2,5 mm/s ve standoff mesafesi 5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Eğimli nozul ile ASJ kesimleri.

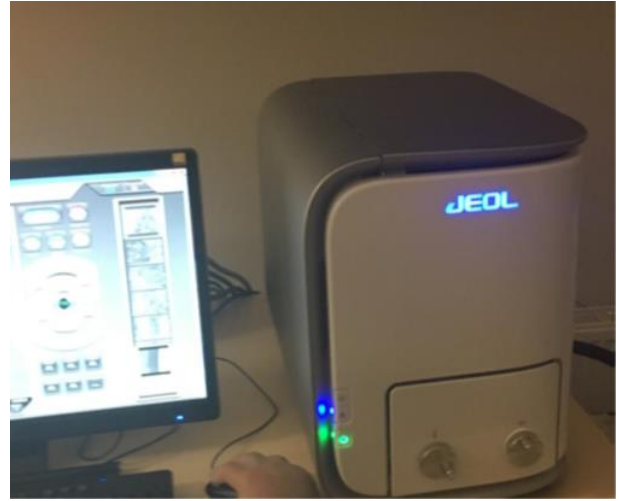
2.3 Ölçüm ve Analiz

Seçilen parametreler ve deney tasarımına göre cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit levhaların ASJ ile kesilmesinde kesme performansını belirleyebilmek için kesilen yüzeyin pürüzlülükleri (başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri) ölçülmüştür. Kesme yüzeyinde iki noktadan pürüzlülük ölçümü alınmıştır. İlk ölçüm, malzeme üst yüzeyinden 3-6 mm arası bir aralıktan alınmış ve bu ölçüm başlangıç yüzey pürüzlülüğü adlandırılmıştır. İkinci ölçüm, malzeme kalınlığının tam ortasından alınmıştır. Birinci ve ikinci ölçümlerin ortalaması bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak isimlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri Nanovea PS503D optik profilometre cihazı (Şekil 6) ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, aritmetik ortalama pürüzlülük (R_a) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler en az üç kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır.



Şekil 6. Nanovea PS503D optik profilometre cihazı.

ASJ ile kesilen numunelerin kesme performansını ve mekanizmalarını inceleyebilmek için kesme yüzeylerinin görüntüleri Jeol marka JCM-6000 Benchttop model masaüstü SEM cihazında (Şekil 7) alınmıştır. Görüntülerin alınmasından önce kesme yüzeylerinin karbon kaplaması yapılmıştır.



Şekil 7. SEM cihazı ile görüntü alınması

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Eğimli Nozul ile ASJ Kesimleri

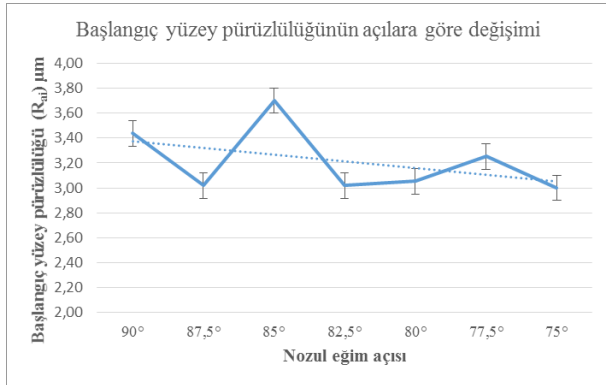
ASJ nozuluna eğim verilerek farklı eğim (nozul darbe) açılarında gerçekleştirilen kesimler ile oluşan kerf yüzeyleri incelenmiştir. Çizelge 1’de nozul eğim açısına göre başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. Nozul eğim açısına göre başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri.

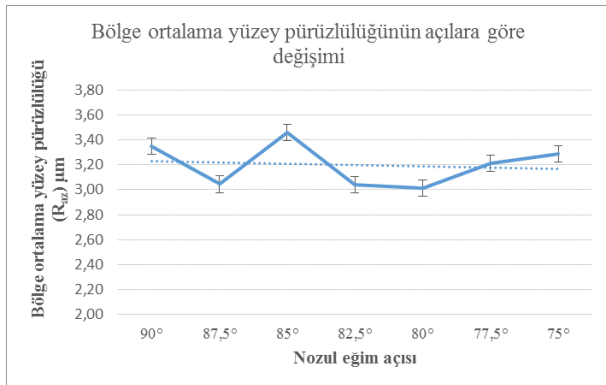
Nozul eğim açısı	90°	87,5°	85°	82,5°	80°	77,5°	75°
Başlangıç yüzey pürüzlülüğü (R_{ai}) μm	3,44	3,02	3,70	3,02	3,05	3,25	3,00
Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_{az}) μm	3,35	3,04	3,46	3,04	3,01	3,21	3,29

Başlangıç yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açılarına göre değişimi Şekil 8’de ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açılarına göre değişimi ise Şekil 9’da gösterilmiştir. Her iki şekle göre 87,5° ve 82,5° nozul eğim açıları, yüzey pürüzlüklerine iyileştirici etkide bulunmuştur. Bu durumun ortaya çıkmasında ASJ ile kesme işleminde ortaya çıkan çiziklenmeler ile açılı gelen jetin birbiri arasındaki

etkileşimden meydana geldiği düşünülmüştür. Çiziklenme ve jet açısının bileşkesi sapma durumuna etki yaparak pürüzlülüğü değiştirmektedir. Böylece pürüzlülüğü iyileştiren açılı kesimler ile ASJ kesiminin yapılması özellikle bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri için çok faydalı olmuştur. Çünkü kerf yüzeyinde jetin enerjisinin derinliğe göre azalması, aşındırıcı taneciklerin keskin köşeli yapısından derinliğe göre azalarak dairesel yapıya ulaşması bu bölgedeki pürüzlülüğü arttırmaktadır. Siores vd. (1996), Wang vd. (2003), Chen vd. (1998) yaptığı çalışmada jet darbe açısının toplam penetrasyon derinliğine etkisi çalışmamızda bulduğumuz açılar ile uyumlu olup, penetrasyonun fazla olmasının (jet enerjisi ve jet akış davranışı etkisi) yüzey pürüzlülüğünü iyileştirici etkisi ile benzerlik gösterebileceği düşünülmüştür. Ayrıca, Wang vd. (2003) polimer matrisli kompozitlerin 90° yerine 80° jet darbe açısı kullanıldığında jet penetrasyonu derinliği ve işleme yüzeyini geliştirmede marjinal etki gösterdiğini ifade etmiştir.



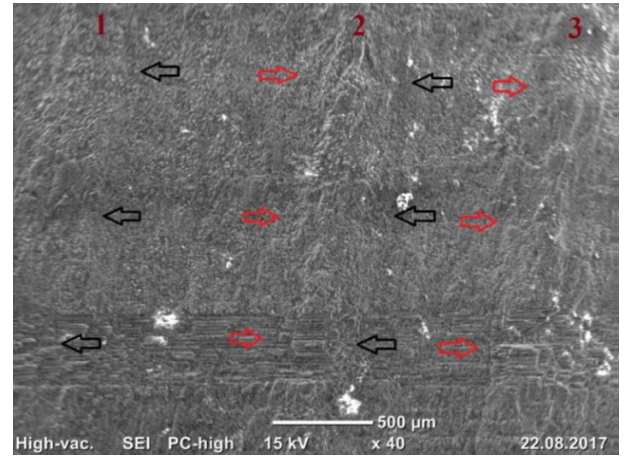
Şekil 8. Başlangıç yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açılara göre değişimi.



Şekil 9. Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açılara göre değişimi.

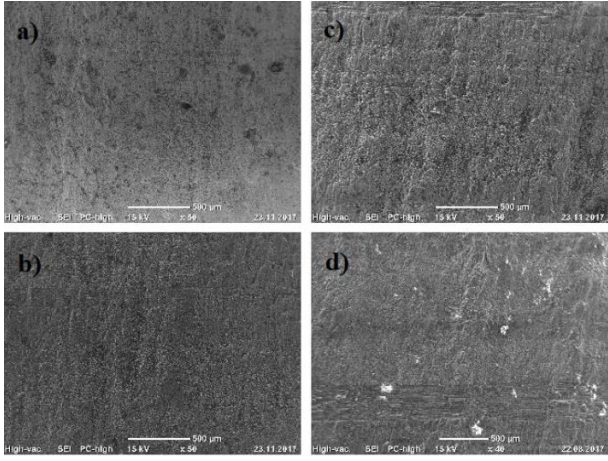
3.2. ASJ ile Kesilen Yüzeylerin SEM İncelemeleri

90° nozul eğim açılı ASJ kesim işlemine ait yüzey görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir. Aşındırıcı partikül içeren su jetinin parça yüzeyinden daha derine inmesi sırasında enerji dağılımından dolayı ortaya çıkan dalgalanmaya bağlı olarak yiv şeklinde görülen akış kanalları görülmüştür. Kesme yüzeyinde görülen bu davranış Chen ve Siores (2001)'in çalışmasında belirtildiği gibi çiziklenme olarak adlandırılmıştır. '2' ile ifade edilen kısımda, kırmızı ve siyah oklar arasındaki bölge çizigi ifade etmektedir. Şekilde üç adet çizgi oluşumu görülmüştür. Kesme yüzeyi orta bölgesinin altından alınan bu görüntüye göre deformasyon aşınma bölgesine geçildiği anlaşılmıştır.



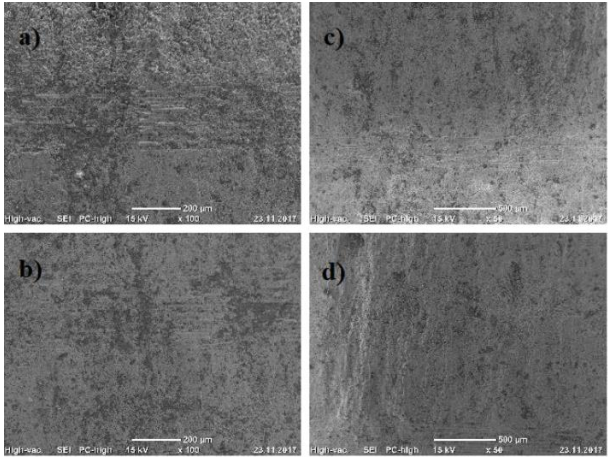
Şekil 10. Kesme yüzeyinde çiziklenmelerin gösterimi (90°).

ASJ nozulunun belirlenmiş eğimli pozisyonlarında tutulduğu, kesme işlemleri yüzeylerine ait alt bölge görüntüleri 87,5° için Şekil 11 (a)'da, 85° için Şekil 11 (b)'de, 82,5° için Şekil 11 (c)'de gösterilmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğüne ait 90° numunesi kesme yüzeyinin alt bölge görüntüsü de Şekil 11 (d)'de verilmiştir. Şekil 11'de 90° deneyi yüzeyinde görülen çiziklenme davranışı, 87,5°, 85° ve 82,5° eğimli deneylerin kesme yüzeylerinde görülmediği anlaşılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olan çiziklenmelerin oluşmaması sebebiyle yüzey pürüzlülüğünün eğimli numunelerde bir miktar iyileştirme gösterdiği söylenebilir.



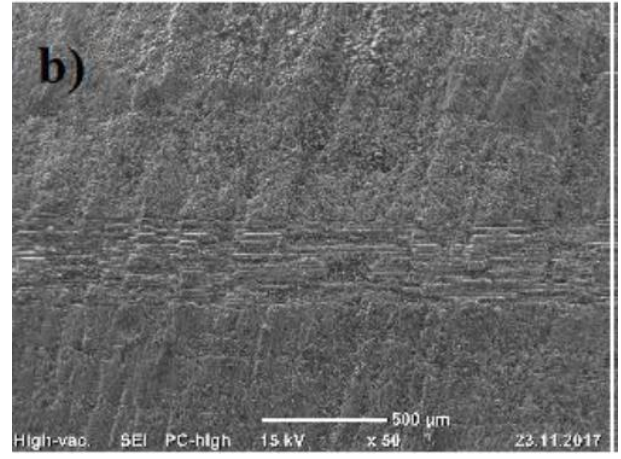
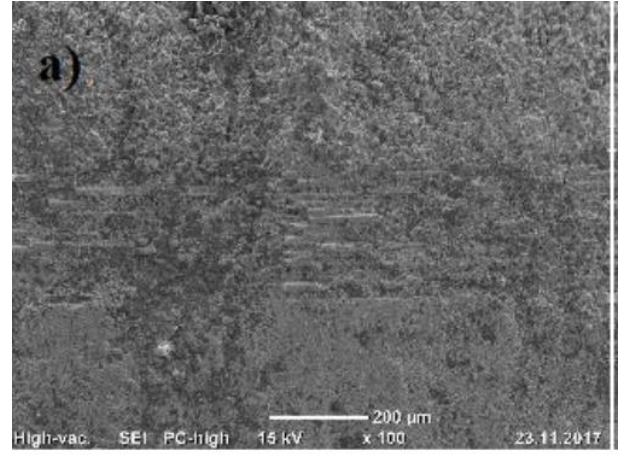
Şekil 11. ASJ kesme yüzeylerinin alt bölgeleri: a) 87,5°, b) 85°, c) 82,5°, d) 90°.

87,5° nozul eğimine sahip ASJ kesme yüzeyinin üst bölgesinden alt bölgesine doğru alınan görüntüler Şekil 12 (a-d)'de verilmiştir. Şekle göre paralel fiberlerin matrisle hemen hemen kaplı olduğu görülmüş ve kesme derinliği boyunca genel davranışını devam ettirdiği anlaşılmıştır.



Şekil 12. 87,5° nozul eğimine sahip kesme yüzeyi boyunca paralel fiberlerin durumu (a-d).

87,5° ve 82,5° nozul eğimlerine sahip kesme yüzeylerinin üst bölgeleri görüntüleri sırasıyla Şekil 13 (a) ve 13 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 13 (b)'de paralel fiberlerin matrisle daha az kaplı olduğu ve fiberlerin katmanlı olarak kesildiği görülmüştür. Fiber davranışının değişiminde eğim etkisinin olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 13. Nozul eğimlerine sahip kesme yüzeylerinin üst bölgeleri: a)87,5°, b)82,5°.

4. Sonuç

Bu çalışmada genellikle denizcilik ve havacılık endüstrisinde kullanımı yaygın olan cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit levhalar, ASJ ile başarılı bir şekilde kesilmiştir. Hem literatür bilgisi hem de çalışmada gerçekleştirilen deneysel bulgulara göre, frezeleme ve matkapla delme gibi geleneksel işleme yöntemleri yerine ASJ ile malzemenin etkili alternatif bir işleme yöntemi olduğu bilgisi literatüre ve endüstriye sunulmuştur.

•ASJ ile kesme işleminde nozul eğim açıları değiştirilerek farklı eğim açılarının kesme yüzeyine etkileri incelenmiş ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirici (yaklaşık %10) etkisi bulunmuştur.

•Kesme yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmış ve nozul eğim açısının etkileri incelenmiştir. Eğimli (87,5° ve 82,5° açılı) kesimlerde çiziklenme davranışı

görülmemiştir. Eğimli kesimin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirici etkisi görüntüler ile desteklenmiştir.

•87,5° nozul eğim açısına sahip SEM görüntülerinde, kompozitin fiber-matris davranışı kesme derinliği boyunca korunmuştur. Yüzey pürüzlülüğünü artıran çiziklenmenin oluşmaması ve deformasyon aşınma bölgesine geçişin görülmemesi eğimli kesimin iyileştirici etkisini göstermiştir.

•Sonuç olarak, ASJ ile kesme işleminde endüstride ve geçmiş çalışmalarda yaygın kullanılan 90° nozul eğim açısı yerine 82,5° gibi nozul eğim açısının kullanılması kesme performansını geliştirmiştir. Böylece ASJ tezgâhında yapılacak olan ufak bir değişiklik ile kesme performansı arttırılabilecektir. Literatüre katkısı açık bir şekilde oluşan eğimli kesimin uygulanması ile endüstri kuruluşlarının bu gelişimi kazanması sonucunda rekabetçiliğe olumlu etkide bulunabilecektir.

Teşekkür

Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimine verdiği destekten (Proje No: 2014/078) ötürü teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Anwar, S., Abdullah, F. M., Alkahtani, M. S., Ahmad, S. and Alatefi, M., 2019. Bibliometric analysis of abrasive water jet machining research. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, **31**, 262-270.

Armağan, M. and Arıcı, A. A., 2017. Cutting performance of glass-vinyl ester composite by abrasive water jet. *Materials and Manufacturing Processes*, **32**, 1715-1722.

Arola, D. and Ramulu, M., 1997. Material removal in abrasive waterjet machining of metals surface integrity and texture. *Wear*, **210**, 50-58.

Azmir, M. A. and Ahsan, A. K., 2008. Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **198**, 122-128.

Azmir, M. A. and Ahsan, A. K., 2009. A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 6168-6173.

Chen, F. L. and Siores, E., 2001. The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41**, 1479-1486.

Chen, F. L., Siores, E. and Patel, K., 2002. Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscillation techniques. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42**, 717-722,

Chen, L., Siores, E. and Wong, W. C. K., 1998. Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials. *Journal of Materials Processing Technology*, **74**, 251-254.

El-Hofy, M., Helmy, M. O., Escobar-Palafox, G., Kerrigan, K., Scaife, R. and El-Hofy, H., 2018. Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates. *Procedia CIRP*, **68**, 535-540.

Hashish, M., 1984. A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **106**, 88-100.

Hashish, M., 1988. Visualization of the abrasive-waterjet cutting process. *Experimental Mechanics*, **28**, 159-169.

Hashish, M., 1989. A model for abrasive-waterjet (AWJ) machining. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **111**, 154-162.

Hashish, M., 1989. An investigation of milling with abrasive-waterjets. *Journal of Engineering for Industry*, **111**, 158-166.

Hashish, M., 1991. Characteristics of surfaces machined with abrasive-waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **113**, 354-362.

Johnston, C.E., 1989. Metals Handbook. 16, Davis, J.R., Lampman, S.R., Zorc, T. B., Crankovic, G.M., Ronke, A. W., ASM International, Ohio, A.B.D., 520-527.

Kumaran, S. T., Ko, T. J., Uthayakumar, M. and Islam, M. M., 2017. Prediction of surface roughness in abrasive water jet machining of CFRP composites using

- regression analysis. *Journal of Alloys and Compounds*, **724**, 1037-1045.
- Lemma, E., Chen, L., Siores, E. and Wang, J., 2002. Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42**, 781-789.
- Lemma, E., Chen, L., Siores, E. and Wang, J., 2002. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation. *Composite Structures*, **57**, 297-303.
- Lemma, E., Deam, R. and Chen, L., 2005. Maximum depth of cut and mechanics of erosion in AWJ oscillation cutting of ductile materials. *Journal of Materials Processing Technology*, **160**, 188-197.
- Montesano, J., Bougherara, H. and Fawaz, Z., 2017. Influence of drilling and abrasive water jet induced damage on the performance of carbon fabric/epoxy plates with holes. *Composite Structures*, **163**, 257-266.
- Phapale, K., Singh, R., Patil, S. and Singh, R. K. P., 2016. Delamination characterization and comparative assessment of delamination control techniques in abrasive water jet drilling of CFRP. *Procedia Manufacturing*, **5**, 521-535.
- Prasad, K. S. and Chaitanya, G., 2018. Selection of optimal process parameters by Taguchi method for drilling GFRP composites using abrasive water jet machining technique. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 19714-19722.
- Ravi Kumar, K., Sreebalaji, V. S. and Pridhar, T., 2018. Characterization and optimization of abrasive water jet machining parameters of aluminium/tungsten carbide composites. *Measurement*, **117**, 57-66.
- Shanmugam, D. K. and Masood, S. H., 2009. An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 3887-3893.
- Shanmugam, D. K., Wang, J. and Liu, H., 2008. Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**, 1527-1534.
- Sheikh-Ahmad, J.Y., 2009. Machining of Polymer Composites. Springer Science+Business Media, New York, A.B.D., 237-255.
- Siores, E., Wong, W. C. K., Chen, L. and Wager, J. G., 1996. Enhancing abrasive waterjet cutting of ceramics by head oscillation techniques. *CIRP Annals*, **45**, 327-330.
- Supriya, S. B. and Srinivas, S., 2018. Machinability studies on stainless steel by abrasive water jet –Review. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 2871-2876.
- Wang, J., 1999. A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology. *Journal of Materials Processing Technology*, **94**, 30-35.
- Wang, J., Kuriyagawa, T. and Huang, C. Z., 2003. An experimental study to enhance the cutting performance in abrasive waterjet machining. *Machining Science and Technology*, **7**, 191-207.
- Wang, J. and Zhong, Y., 2009. Enhancing the depth of cut in abrasive waterjet cutting of alumina ceramics by using multipass cutting with nozzle oscillation. *Machining Science and Technology*, **13**, 76-91.

İnternet kaynakları

- 1- <https://www.omax.com/learn/how-does-waterjet-work>, (28. 03. 2017)