

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN AŞINDIRICILI SU
JETİ İLE KESİLMESİ**

MUSTAFA ARMAĞAN

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN AŞINDIRICILI SU
JETİ İLE KESİLMESİ

MUSTAFA ARMAĞAN

Doç. Dr. A. Armağan ARICI

Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

Doç. Dr. Nejat Y. SARI

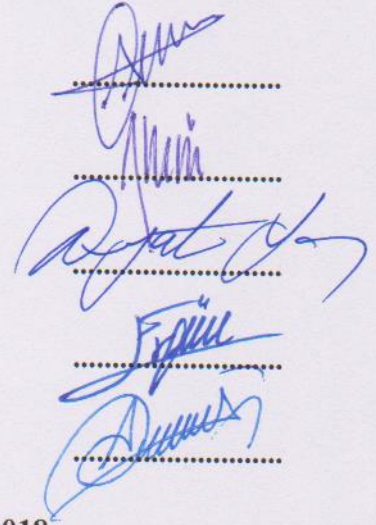
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU

Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.

Dr. Öğr. Üyesi E. Asım GÜVEN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 28.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilginin birikimi ile küreselleşen dünyanın sağladığı bilgiye kolay erişilebilirliğin teknolojik gelişim süreci üzerine olumlu etkileri her alanda kendini göstermektedir. Malzeme ve imalat sanayi bu etkiyle gelişimini hızlandırarak spesifik ihtiyaçlara spesifik çözümlerin çeşitliliğini arttırabilmektedir. Özellikle uzay, havacılık, savunma ve denizcilik sanayileri gibi teknolojik gereksinimi ve katma değer etkisi yüksek olan üretim alanlarında rekabetçiliğin sağlanabilmesi ve avantajlarının oluşması ile polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Söz konusu malzemelerin üstün özelliklerini daha iyi kullanabilmek ve geliştirebilmek için modern imalat ve işleme yöntemleri bu gelişim sürecinde kendini göstermektedir. Bu çalışmada, özellikle denizcilik sanayisinde yaygın olarak kullanılan cam fiber takviyeli vinil ester kompozit malzemenin geleneksel olmayan (alışılmamış) bir malzeme işleme yöntemi olan Aşındırıcı Su Jeti ile kesme performansı detaylı bir şekilde farklı yönleriyle incelenmiştir.

Bu doktora tezi Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Projesi (No: 2014/078) kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü Kocaeli Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Kompozit levhaların üretilmesinde desteklerinden ötürü Sn. Çağın GENÇ ve Sn. İskender DEMİR ile 'Sirena Marine Denizcilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Kompozit levhaların karakterizasyon testlerinin yapılabilmesinde desteklerinden ötürü 'Telateks A.Ş.-Metyx Composites' ve 'TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Kompozit levhaların Aşındırıcı Su Jeti ile kesilebilmesinde desteklerinden ötürü Sn. Kenan ÇİMEN ve Sn. Ufuk ÇİÇEK ile 'Robjet Robotik Otomasyon Su Jeti Sistemleri Makine San.ve Tic.Ltd.Şti.'ne teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği ve Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümlerine çalışmalarım sırasında vermiş oldukları destek nedeniyle teşekkürlerimi sunarım.

Yaklaşık 8 yıl önce lisansüstü öğrenimimin başlangıcında tanıştığım ve o günden bu güne kadar danışmanımın olmasıyla gurur ve şeref duyduğum değerli hocam Sn. Doç Dr. Aziz Armağan ARICI'ya, bu aşamaya gelebilmemde birincil derecede etkisi ve katkısının olması, tüm zorlukları aşabilmemde ve zorluklara karşı koymayı öğrenmemde destekleri ve bilge kişiliği ile akademik kişiliğimi yoğurması, ilgisini, yardımını hiç esirgememesi, üstün bilgi ve akademik birikimi ile her şeyiyle kendime rol model almamdan dolayı sonsuz minnet, şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora yeterliliğim ile başlayan akabinde izleme jüriliğinde bulunan, tarafıma bir babanın evladına yaklaştığı gibi yaklaşmasıyla bu tezin şekillenmesinde yoğun emeği olan, yol göstericiliği ve önümü aydınlatmasıyla beraber akademik camiadaki üstün ve güçlü duruşunu bizzat tatbik etmekle gurur duyduğum ve şerefine nail olduğum değerli hocam Sn. Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a sonsuz minnet, şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenimin başlangıcında tanıştığım, daha ilk günlerden desteğini esirgemeyen değerli kardeşim, dostum Sn. Dr. Öğr. Üyesi Egemen AVCU'ya ve laboratuvar çalışmalarımnda sabırla yardımını hiç esirgemeyen değerli kardeşim, dostum Sn. Arş. Gör. Yasemin AVCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında vermiş oldukları desteklerinden dolayı Sn. Doç. Dr. Kasım BAYNAL'a, Sn. Doç. Dr. Taner YILMAZ'a, Sn. Doç. Dr. Nejat. Y. SARI'ya, Sn. Dr. Öğr. Üyesi Sinan FİDAN'a, Sn. Arş. Gör. Erhan BALCI, Sn. Mak. Müh. Murat BOZKURT'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni hep destekleyen, bugünlere gelmemi sağlayan ve her zaman yanımda olan değerli Annem Müzeyyen ARMAĞAN ve değerli Babam Faruk ARMAĞAN ile çalışmam süresince sabrı, motivasyonu, desteği ve yardımıyla hep yanımda olan değerli eşim Seçil ARMAĞAN ve biricik kızımız Zeynep ARMAĞAN'a sonsuz minnet ve şükran duygularımı sunarım.

Haziran – 2018

Mustafa ARMAĞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	4
1.1. Kompozit Malzemeler	4
1.2. Termoset Plastikler	8
1.2.1. Polyester reçineleri	9
1.2.2. Epoksi reçineleri	10
1.2.3. Vinil ester reçineleri.....	11
1.3. Aşındırıcılı Su Jetinin Tarihçesi	13
1.4. Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ).....	14
1.4.1. ASJ kesme mekanizması	18
1.4.2. ASJ modelleri	22
1.4.3. Yapılmış deneysel çalışmaların derlemesi.....	27
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	38
2.1. Malzeme	38
2.2. Yöntem	41
2.3. Deney Düzeni	43
2.4. Ölçüm ve Analiz.....	45
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
3.1. Bulgular	48
3.3.1. Taguchi deney düzenine göre yapılan kesimler.....	48
3.3.2. ASJ nozulunun eğimli kesimleri.....	58
3.2. ASJ ile Kesilen Yüzeylerin SEM İncelemeleri	60
3.2.1. ASJ nozulunun dik pozisyonda tutulduğu kesme işlemlerine ait yüzey incelemesi.....	60
3.2.2. ASJ nozulunun eğimli pozisyonda tutulduğu kesme işlemlerine ait yüzey	66
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	72
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	80
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Takviye malzemesinin kompozit içerisindeki farklı düzenlemeleri	6
Şekil 1.2. Cam fiber takviyeli plastiklerin Avrupa’da üretim miktarı	7
Şekil 1.3. 2016 yılında Avrupa’da cam fiber takviyeli plastiklerin üretim sektörü dağılımı (% , Mt)	7
Şekil 1.4. Son kullanım uygulaması için 2007 yılında global kompozitler dağılımı	8
Şekil 1.5. Polyesterin polimer zinciri yapısı	10
Şekil 1.6. Epoksinin polimer zinciri.....	10
Şekil 1.7. Glisidil estere sahip diğer bir epoksi.....	11
Şekil 1.8. Vinil ester reçinelerin polimerizasyon yapıları: (a) bisfenol-A epoksi vinil ester reçine; (b) Novolak epoksi vinil ester reçine	12
Şekil 1.9. Nozulların gösterimi: (a); (b); (c) modern konfigürasyon	15
Şekil 1.10. ASJ tezgahının şematik gösterimi.....	16
Şekil 1.11. Su jeti basınç yükselticinin şematik gösterimi.....	17
Şekil 1.12. Kesme performansını etkileyen ASJ parametreleri	17
Şekil 1.13. Aşındırıcılı jet ile kesmede görselleştirmenin deney düzeneği.....	18
Şekil 1.14. Jetin giriş ve çıkış yerlerini gösteren jet-katı izi	19
Şekil 1.15. Kesme prosesi aşamaları.....	20
Şekil 1.16. Kesme yüzeyi aşınma mekanizmaları: (a); (b)	22
Şekil 1.17. Düşük karbonlu Fe360B çeliğinde basıncın kesme derinliğine etkisi	24
Şekil 1.18. Mikro aşındırıcı penetrasyonu (a), mikro çentik formasyonu (b) için sonlu elemanlar modelleri	25
Şekil 1.19. Otomatik gelişen bulanık mantık sistemi için kesme derinliğinin saçılma grafiği.....	26
Şekil 1.20. Kerf geometrisinin optik mikroskop görüntüleri (farklı ilerleme hızları): (a) 0,2 mm/s; (b) 0,5 mm/s, (c) 1,5 mm/s; (d) 1,8 mm/s; (e) 2,5 mm/s; (f) 3,0 mm/s; (g) 4,0 mm/s; (h) 5,0 mm/s	27
Şekil 1.21. Farklı ilerleme hızlarında kesme genişliği ile kesme derinliği arasında ilişki	28
Şekil 1.22. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne parametrelerin etkileri	29
Şekil 1.23. Uygulanan pompa basıncı ve kaldırılan malzeme hacmi arasındaki ilişki.....	30
Şekil 1.24. Tek pasoda polimer matrisli kompozitlerin kesilmesinde kerf karakteristikleri üzerine jet darbe açısının etkisi.....	30
Şekil 1.25. ASJ tarafından yüzeyde çiziklenme oluşumunun öngörülen süreci	31
Şekil 1.26. Toplam penetrasyon derinliği üzerine jet darbe açısının etkisi	32
Şekil 1.27. Değişik salınım tekniklerinin şematik gösterimi	33
Şekil 1.28. Normal (sol taraf jet kesimi) ve kerf-sivrilme kompanzasyonlu (sağ taraf jet kesimi) ASJ kesiminin şematik olarak gösterimi.....	34
Şekil 1.29. Tek ve çok pasolu ASJ kesiminde kerf profili.....	35
Şekil 1.30. Çiziklenme oluşum mekanizmasının şematik gösterimi.....	36

Şekil 1.31. Değişik aşındırıcıların kerf sivrilme ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri	36
Şekil 2.1. El yatırması yönteminin şematik gösterimi	38
Şekil 2.2. Üretilen levhalardan örnek görüntü	39
Şekil 2.3. Fiber oranı tayini için numune alınan bölgeler	39
Şekil 2.4. Numunelerin yakma öncesi ve sonrası görüntüleri.....	40
Şekil 2.5. ASJ kesme işleminde kullanılan cihaz.....	42
Şekil 2.6. ASJ ile kesme işlemi	42
Şekil 2.7. Nozul eğimli ASJ kesimleri	43
Şekil 2.8. Nikon MA100 optik mikroskop cihazı	45
Şekil 2.9. Nanovea PS503D optik profilometri cihazı.....	46
Şekil 2.10. Ölçüm işlemleri: (a) Üst kerf genişliği; (b) yüzey pürüzlülüğü.....	46
Şekil 2.11. Jeol JCM-6000 Benchtop masaüstü SEM cihazı.....	47
Şekil 3.1. Deney parametrelerinin etkileri	52
Şekil 3.2. Deney parametreleri seviyelerinin üst kerf genişliğine etkileri.....	53
Şekil 3.3. Deney parametreleri seviyelerinin başlangıç yüzey pürüzlülüğüne etkileri	55
Şekil 3.4. Deney parametreleri seviyelerinin bölge ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri	56
Şekil 3.5. Başlangıç yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açlarına göre değişimi	59
Şekil 3.6. Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açlarına göre değişimi	60
Şekil 3.7. 17 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin kaplanması	60
Şekil 3.8. 10 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin kesilmesi	61
Şekil 3.9. 26 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin çekilmesi.....	61
Şekil 3.10. 10 nolu deneyin kesme yüzeyinde oluşan fiber boşlukları	62
Şekil 3.11. Fiber ufalanması görünümü: (a) 13 nolu deney; (b) 16 nolu deney	62
Şekil 3.12. Doğrulama deneyi kesme yüzeyinde çiziklenmelerin gösterimi	63
Şekil 3.13. 17 nolu deneyin kesme yüzeyinde çiziklenme oluşumu: (a) genel görünüm; (b) detay görünüm	64
Şekil 3.14. Basınç parametrelerinin kesme yüzeyleri üst bölgelerine etkisi: (a) doğrulama deneyi; (b) 13 nolu deney; (c) 26 nolu deney.....	65
Şekil 3.15. 26 nolu deneyde çiziklenme oluşumu: çiziklenme görülmeyen bölgeler (a) ve (b); çiziklenme görülen bölgeler (c) ve (d).....	66
Şekil 3.16. ASJ kesme yüzeylerinin alt bölgeleri: (a) 87,5° eğimli deneyi; (b) 85° eğimli deneyi; (c) 82,5° eğimli deneyi; (d) yüzey pürüzlülüğüne ait doğrulama deneyi	67
Şekil 3.17. 87,5° nozul eğimine sahip kesme yüzeyi boyunca paralel fiberlerin durumu (a-d).....	68
Şekil 3.18. Nozul eğimlerine sahip kesme yüzeylerinin üst bölgeleri: (a) 87,5; (b) 82,5°	68

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Oda sıcaklığında bazı polimerler matrislerin mekanik ve termal özellikleri.....	9
Tablo 1.2. Cam elyaf-vinil ester kompozitinin çekme özellikleri örnekleri	13
Tablo 2.1. Yakma testi sonuçları	41
Tablo 2.2. Deney parametrelerinin faktörleri ve seviyeleri	43
Tablo 2.3. L27 Taguchi ortogonal dizi tasarımı.....	44
Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan ASJ nozulu eğim açıları	45
Tablo 3.1. Taguchi deney düzenine göre ASJ kesme sonuçları.....	49
Tablo 3.2. Üst kerf genişliği için varyans analizi.....	50
Tablo 3.3. Başlangıç yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi.....	50
Tablo 3.4. Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi.....	51
Tablo 3.5. Yanıt (Tepki) parametresi için deney parametrelerinin optimum seviyeleri	56
Tablo 3.6. Yanıt (Tepki) parametresi için doğrulama testleri değerleri.....	58
Tablo 3.7. Nozul eğimli kesimlerde başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

K	: Termal iletkenlik, (W/m°C)
C _p	: Öz ısı, (kJ/kg°C)
α	: Termal genleşme katsayısı, (10 ⁻⁶ °C)
T _g	: Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)
T _m	: Erime sıcaklığı, (°C)
P	: Basınç, (Mpa)
u	: İlerleme hızı, (mm/dak veya cm/dak)
X	: İlerleme mesafesi, (mm)
h	: Kesme derinliği, (mm)
\dot{m}	: Aşındırıcı kütle akış hızı
d _j	: Jet çapı
R	: Aşındırıcı kütle akışı hızının su kütle akışı hızına oranı
σ_0	: Akış kuvvetinin (dayanımının) kesme yüzeyinin üstündeki (h=0) çarpma açısına oranı
ϵ	: Deformasyon aşınması tarafından birim hacmin kaldırılması için gereken enerji
c	: Malzeme özelliği değeri
h _c	: Kesme aşınmasına bağlı kesme derinliği
V ₀	: Başlangıç partikül (parçacık) hızı
C _K	: Karakteristik hızı
ρ_p	: Partikülün (parçacığın) yoğunluğu
V _e	: Eşik partikülün (parçacığın) hızı
h _d	: Deformasyon aşınmasına bağlı kesme derinliği
σ	: Malzeme akış gerilmesi
C _f	: Kerf duvarının üzerindeki sürtünme katsayısı
V	: İlerleme hızı, (mm/dak)
q	: Aşındırıcı akış hızı, (kg/dak)
V _r	: Dönüş hızı, (açı/s)
I	: Artım, (mm)
α_s	: Salınım açısı, (derece)
R _a	: Yüzey pürüzlülüğü, (μ m)
E ₀	: İş parçası malzemesinin kritik yıkım (tahribat) enerjisi
W _t	: Üst kerf genişliği, (μ m)
R _{ai}	: Başlangıç yüzey pürüzlülüğü, (μ m)
R _{az}	: Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü, (μ m)
σ_{max}	: Maksimum eğilme gerilmesi, (MPa)

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Al-SiC MMCs	: Alüminyum-Silisyum Karbür Metal Matris Kompoziti
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)

ASJ	: Aşındırıcı Su Jeti
BHB	: Başlangıç Hasar Bölgesi
DKB	: Düzgün (Temiz) Kesme Bölgesi
EN ISO	: European Norm - International Organization for Standardization (Avrupa Standardı - Uluslararası Standartlar Teşkilâtı)
KKB	: Kaba (Pürüzlü) Kesme Bölgesi
OH	: Hidroksil
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Ti-6Al-4V	: Titanyum 6 Alüminyum 4 Vanadyum
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu



POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KESİLMESİ

ÖZET

Uzay, havacılık, savunma, otomotiv ve denizcilik sanayilerinde polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu tür malzemelerin işlenebilmesinde geleneksel olmayan bir malzeme işleme yöntemi olan aşındırıcı su jeti (ASJ) önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada, cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhalar çeşitli ASJ kesme parametrelerinde Taguchi deney düzenine göre kesilmiştir. Taguchi deney düzenine göre, deneysel parametreler standoff mesafesi, aşındırıcı kütle akışı hızı, ilerleme hızı, basınç ve malzeme kalınlığı olacak şekilde üçer seviyede belirlenmiştir. Kesme performansını anlamak için üst kerf genişliği ve yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Üst kerf genişliği optik mikroskop, yüzey pürüzlülükleri ise optik profilometri cihazı ile incelenmiştir. Lineer regresyon modelleri eşliğinde ANOVA analizi yapılarak tüm performans parametrelerinin ana etkileri gösterilmiştir. Tüm test sonuçlarına göre standoff mesafesi en etkin deney parametresi bulunmuştur. Optimum deney parametrelerinin seviyeleri belirlenmiş ve bu parametrelerin seviyelerine göre deneyler yapılmıştır. Tahmini model oluşturulmuş ve optimum deney parametrelerinin seviyelerine göre deneysel ve tahmini sonuçların karşılaştırılmasıyla doğrulamaları yapılmıştır.

Sonraki aşamada, ASJ nozuluna eğim verilerek eğim açısının kerf yüzeyine etkisi araştırılmıştır. Kesilme yüzeyi optik profilometri ile tamamen taranmış ve yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Tüm testlerde 87,5° ve 82,5° nozul eğim açılarının yüzey pürüzlülüklerine olumlu etkileri bulunmuştur.

Kerf kesiti boyunca aşındırıcı su jetinin davranışları optik mikroskop ile incelenmiş ve kerf yüzeylerindeki kesme performanslarının parametre ile seviyelerine göre etkileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla incelenmiştir.

Sonuç olarak cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhaların ASJ kesme performansları incelenmiş, optimum parametreler belirlenerek eğimli kesim ile performansları geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ANOVA, Aşındırıcı Su Jeti Kesimi, Cam Fiber Takviyeli Vinil Ester Kompoziti, Taguchi Metodu, Taramalı Elektron Mikroskobu.

CUTTING OF POLYMER MATRIX COMPOSITES BY ABRASIVE WATER JET

ABSTRACT

The use of polymer matrix composite materials in aerospace, aviation, defense, automotive and marine industries is more and more increasing. Abrasive water jet (AWJ), which is a non-traditional material machining method, has an important place in the machining of such materials.

In this study, glass fiber reinforced vinyl ester composite plates were cut according to the Taguchi experimental design in various AWJ cutting parameters. According to Taguchi experimental design, the experimental parameters are standoff distance, abrasive mass flow rate, traverse rate, pressure and material thickness, which are determined at three levels. Top kerf width and surface roughnesses are examined to understand the cutting performance. Top kerf width was examined by optical microscope and surface roughness was examined by optical profilometer. ANOVA analysis was performed in accompanied by linear regression models and the main effects of all performance parameters were showed. According to all test results, the most effective test parameter of standoff distance was found. The levels of the optimum experimental parameters were determined and experiments were carried out according to the levels of these parameters. A predictive model was created. According to the levels of the optimum test parameters experimental and predicted results were compared and verifications were made.

In the next stage, AWJ nozzle slope was given and the effect of different slope angles on the surface of the kerf was investigated. The cutting surface was completely scanned with optical profilometer and surface roughness was investigated. In all tests were showed positive effects on the surface roughness of 87.5° and 82.5° nozzle slope angles.

Behaviors of the AWJ along kerf section were investigated by optical microscope. The effects of cutting performance on the kerf surfaces according to parameter and their levels was investigated by scanning electron microscopy (SEM).

As a result, ASJ cutting performances of glass fiber reinforced vinyl ester composite plates were investigated, optimum parameters were determined and it was improved their performance with sloping cut.

Keywords: ANOVA, Abrasive Water Jet Cutting, Glass Fiber Reinforced Vinyl Ester Composite, Taguchi Method, Scanning Electron Microscopy.

GİRİŞ

Aşındırıcı su jeti (ASJ) ile işleme yöntemi, mühendislik malzemelerini işlemek ve kesmek için hedef malzemelerin yüzeyleri üzerine basınçlı su ile hızlandırılan aşındırıcı malzemelerin gönderilmesi üzerine dayanmaktadır (Hashish, 1984). ASJ ile işleme yöntemi diğer işleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında bir çok avantaja sahiptir ve bu avantajlar şu şekilde sıralanabilmektedir: ısıdan etkilenen bölge oluşmamakta (Lebar ve diğ., 2010) ve böylece kesme yüzeyinde erime ve katılma görülmemekte, kesme takımları üzerinde kesme kuvvetleri oluşmamakta ve böylece işlenecek malzemenin bağlantısı için montaj fikstürüne gerek duyulmamakta (Sheikh-Ahmad, 2009), aşındırıcı malzeme ilave ederek basınçlı su yardımıyla kompleks şekiller kolaylıkla oluşturulabilmekte (Krajcarz, 2014), çeşitli malzemeler aşındırıcı parçacıkların yardımı ile işlenebilmekte (Ferenc, 2007; Yuvaraj ve Kumar, 2017a) ve tüm proses tamamen çevre dostu olmaktadır (Dong ve diğ., 2014).

Kesme yüzeyi, kesme ve deformasyon aşınma bölgelerini içeren iki aşamalı bir mekanizmaya sahiptir. İlk aşama kesme aşınma bölgesi olarak ifade edilmektedir. Partiküllerin mikro kesme hareketi tarafından hedef malzeme öncelikle kaldırılır ve bu partiküllerin sığ açılarının darbeleriyle olmaktadır (Hashish, 1984; Arola ve Ramulu, 1997). İkinci aşama ise deformasyon aşınma bölgesi olarak ifade edilmektedir ve bu bölgede büyük darbe açıları nedeniyle malzeme plastik deformasyon ile kaldırılmaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009; Hashish, 1984).

ASJ proses parametrelerini hidrolik, karıştırma ve hızlandırma, kesme, aşındırıcılar başlıkları altında olmak üzere dört bölüme ayırmak mümkündür (Kechagias ve diğ., 2012). Araştırma çalışmalarının çoğu parametrelerin etkilerini belirlemeye odaklanmıştır (Sreekesh ve Dr. Govindan, 2014; Folkes, 2009; Aydın ve diğ., 2014; Karakurt ve diğ., 2012) ve indikatörler genellikle kerf biçimi ve yüzey pürüzlülüğü olmuştur (Begic-Hajdarevic ve diğ., 2015; Gupta ve diğ., 2014; Yuvaraj ve Kumar, 2015; Yuvaraj ve Kumar, 2017b; Selvam ve diğ., 2016).

Polimer matrisli kompozitlerin yapısında takviye elamanları farklı formlarda bulunmaktadır (Karger-Kocsis ve diğ., 2015). Bu farklılık işlenebilmeye olumsuz bir etki oluşturarak kompozit malzemelerin işlenmesini zorlaştırmaktadır (Dandekar ve Shin, 2012). Bu nedenle, geleneksel işleme yöntemlerinden (tornalama, frezeleme, vb.) ziyade polimer matrisli kompozitlerin işlenmesinde geleneksel olmayan işleme yöntemlerinin kullanımı hızla artmaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009; Sheikh-Ahmad, 2016).

ASJ ile işleme yöntemi genellikle maden ve metal endüstrisinde kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerde yöntemin kullanılabilme potansiyeli bulunmasına rağmen az sayıda bilimsel çalışmanın varlığı polimer matrisli kompozit malzemelerin ASJ ile işlenmesini anlamak için yeterli değildir. Buna ek olarak, söz konusu malzemelerin önemli ve stratejik olan endüstri alanlarında kullanılmasının artmasına rağmen, hâlihazırda geleneksel işleme yöntemlerinin malzemelerin üretim süreçlerinde çoğunlukla kullanılmasının, ASJ ile işlenebilme üzerine bilgi birikiminin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca belirtildiği üzere yöntemin getirmiş olduğu avantajlar ile yöntemin tercih edilebilme potansiyeli oldukça etkindir.

Tez çalışmasının amacı, ilk etapta Taguchi deney düzenine göre deney parametrelerini belirleme, ASJ ile cam fiber takviyeli vinil ester kompozitleri kesme, varyans analizi (ANOVA) ile işleme parametrelerinin etkilerini belirleme, optimum deney koşullarının belirlenerek bu koşullar altında tahmini ve deneysel kesim sonuçlarını karşılaştırma ve onaylanmasını sağlamaktır. İkinci etapta ise optimum deney koşullarında nozul eğiminin sağlanması ile kesme işlemi iyileştirme, kesme yüzeylerinin SEM altında topografik incelenmesini sağlama ve böylece polimer matrisli kompozit malzemelerin ASJ ile kesilme mekanizması hakkında bilgi birikimine sahip olma ile gelişimini sağlamaktır. Tez çalışması dört ana bölümden oluşmuştur. İlk bölümde, polimer matrisli kompozit malzemeler ile tez de kullanılan malzemenin genel özelliklerine, ASJ işleme yöntemi ve teorilerine, ASJ'yi oluşturan ekipmanların genel özelliklerine, ASJ ile işleme üzerine literatür bilgilerine yer verilmiş ve son olarak çalışmanın özgün yanı ortaya konarak diğer bölümlere geçişi sağlanmıştır.

İkinci bölümde, tezde kullanılan malzeme ve yöntem ele alınmıştır. ASJ tezgâhı, ölçü ve görüntü cihazları (optik mikroskop, optik profilometri, taramalı elektron mikroskobu) bilgileri ve kesme işlemi anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, deney düzenine göre yapılan kesimlerin sonuçları verilmiş sonraki aşamada belirlenen optimum deney parametrelerine göre nozul eğimi verilerek yapılan kesimlerin sonuçları verilmiş ve elde edilen bulgular literatür eşliğinde tartışılmıştır. Kesme performansını daha iyi anlayabilmek için SEM görüntüleri alınmış ve incelenmiştir. Özgün ve geliştirici sonuçlara yer verilmiştir.

Son bölümde; daha önceki bölümlerden elde edilen verilerle çalışmanın değerlendirilmesi yapılmıştır. Buradan yöntemin uygulanabilirliği koşulları belirlenerek; endüstriyel uygulamalar için reel parametreler elde edilmiştir. Deney bulguları SEM ile de pekiştirilmiş ve gerekçeli nedenler tartışmalı biçimde irdelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

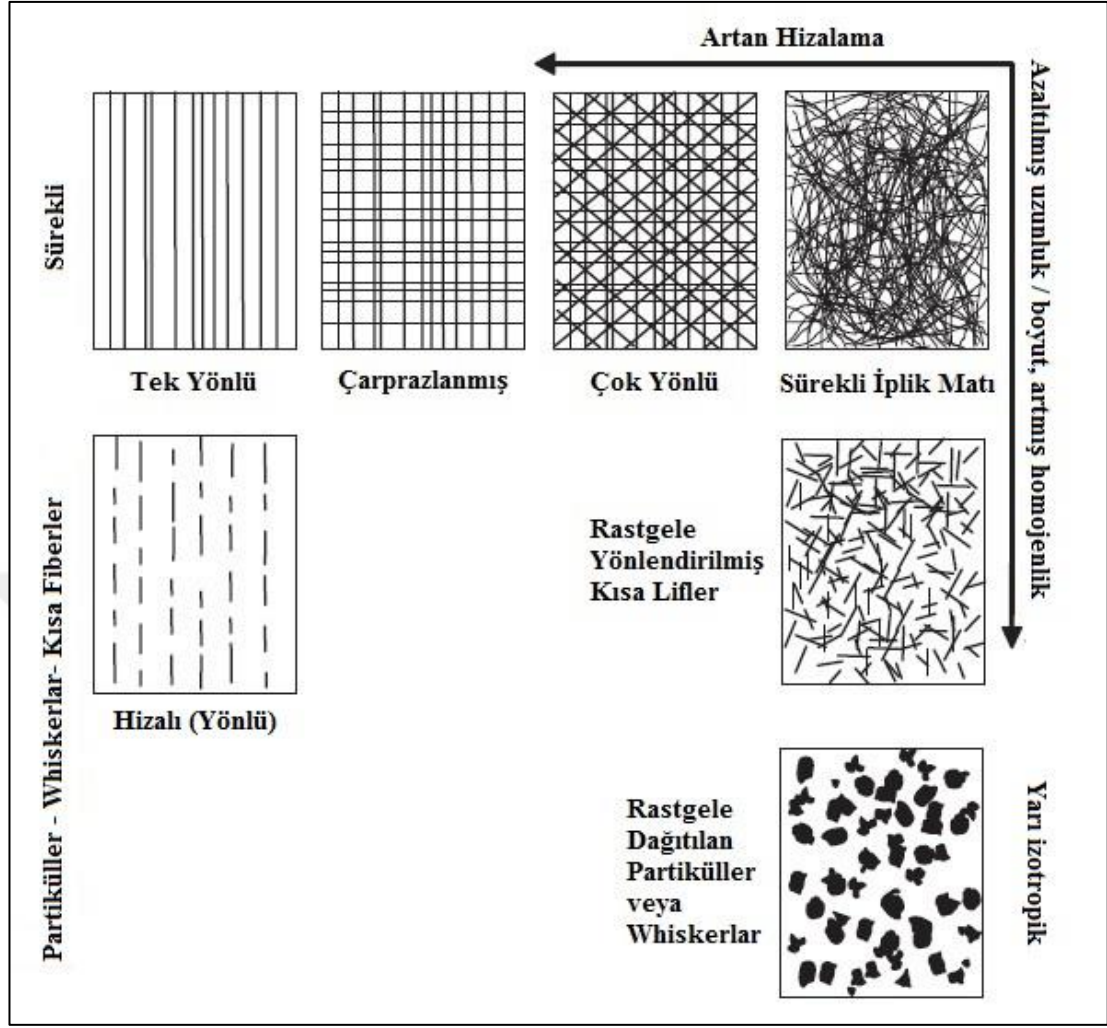
1.1. Kompozit Malzemeler

İnsanlık tarihinin ilk dönemlerinde kilin saman ve saman sapları ile takviyelendirilmesiyle briket olarak adlandırılan sağlam ve dayanıklı yapılar kullanılmıştır (Sheikh-Ahmad, 2009). Bu uygulamanın Antik Mısır döneminde uygulandığına dair atfın bulunması kompozitlerin kullanımı başlangıcının çok eskilere dayandığını göstermektedir (Sarasini ve Santulli, 2013). Ayrıca kemik ve odun gibi doğal kompozitlerde mevcuttur. Odun içeriğine bakıldığında kuvvetli selüloz lifler (fiberler) ile birlikte lignin matrisi tarafından tutularak kompoziti oluşturduğu görülmektedir. Kemikler ise mineral matrisi içerisinde kısa ve yumuşak kolojen fiberlerin gömülü olduğu yapıdan oluşmaktadır. Bu iki yapı örneği bize kompozit yapıların çeşitli koşullar altında yükleri uyumlu ve güçlü bir şekilde desteklenebildiğini göstermektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Her ne kadar erimiş cam fiber malzemeler 3000 yıl öncesinde kullanımı sıradan olmasına rağmen, geçtiğimiz yüzyılda plastiklerin piyasaya sunulmasına kadar cam fiberlerin takviye malzemeleri olarak potansiyelleri tanınmamıştır (Norwood, 1994). 1839 yılında Charles Goodyear'ın kauçuğun sertleştirilmesini (vulkanizasyon) keşfetmesiyle polimerler için bir dönüm noktası olmuştur (Totuk, 2015). Kompozit endüstrisinin doğuşu 1909 yılında ilk termoset plastiklerden olan fenolikler ile başlar. Bununla birlikte 1940'larda büyüyen yapısal kompozit endüstrisinde 'Yapay Kompozit Malzemeler Çağı' başlamıştır. Modern kompozit dönemi 1946 yılında, doymamış polyester reçinelerin Birleşik Krallıkta ilk termoset reçineleri serisi ile olmuştur. (Norwood, 1994). 1970'lerin sonunda uçak, otomotiv ve spor ekipmanlarında kompozitlerin uygulamaları genişlemiştir (Sarasini ve Santulli, 2013) ve 90'lı yıllara kadar fiber takviyeli plastiklerin ana ticari kullanımı, yaklaşık 1942'den itibaren ABD'de uçak radomlarının inşası için kullanılmıştır (Norwood, 1994).

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla bileşenlerin (fazların) birleşiminden oluşur (Sarasini ve Santulli, 2013) ve makroskobik olarak birbiri içerisinde çözünmeden yapıda oluşan yeni malzeme grubudur (Sheikh-Ahmad, 2009). Kompozit malzeme yapımının temel düşüncesi; bileşeni oluşturan malzemelerin özelliklerinden daha üstün olacak şekilde tasarlanmış bir materyal sistemi olması şeklindedir (Sarasini ve Santulli, 2013).

Kompozitin bileşenini oluşturan malzemelerden sürekli ve büyük miktarda bulunan malzeme matris olup özellikleri diğer bileşen ile geliştirilebilir. Matristeki ana düşünce takviye malzemesinin bağlanması ve kapsanmasıdır. Kompozite uygulanan yük takviye elemanına aktarılmakta, dışarıdan ve çevre etkenlerden takviye elemanı korunmaktadır. İkinci bileşen takviye fazı olup çoğu durumda seçilen malzeme matris malzemesinden daha dayanıklı ve daha serttir. Matris içerisindeki takviye elemanının birincil görevi yük taşınmasını sağlamaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009). Kompozitin özellikleri bileşenlerinin özelliklerine, geometrisine ve fazların dağılımına bağlıdır (Sarasini ve Santulli, 2013). Takviyeler uzun fiber, kısa fiber, partikül veya whiskers (fırça) şeklinde bulunabilir (Sheikh-Ahmad, 2009). Uygulamada kompozit fazlarındaki farklılığa (takviye malzemesinin sürekli-kesikli olması gibi) göre özellikler değişmektedir. Düşük ve orta derecede performansa sahip kompozitler istendiğinde, takviye malzemesi genellikle kısa veya parçacıklar şeklinde bulunmakta ve matris malzemesi kompozitin temel yük taşıyıcısı olarak mekanik özelliklerini yönetmektedir. Yüksek performanslı yapısal kompozitler istendiğinde ise sürekli elyaf takviyesi uygulanmakta ve takviye elemanı malzemenin omurgası konumuna gelmektedir. Sürekli fiberlerin yönelimide malzemenin dayanımı belirlemekte ve ayrıca matris fazı bir elyaftan diğerine koruma ve lokal gerilme aktarımını sağlamaktadır (Sarasini ve Santulli, 2013). Takviye malzemesinin kompozit içerisindeki farklı düzenlemeleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Kompozitlerde mevcut uygulamalarda çoğunlukla polimerik matrisler kullanılır. Çevresel etkilerin yüksek etkisiyle cam fiberlerin kullanımı denizcilik sanayi, kimya ve gıda sektörlerinde daha cazip hale gelmiştir (Sheikh-Ahmad, 2009).

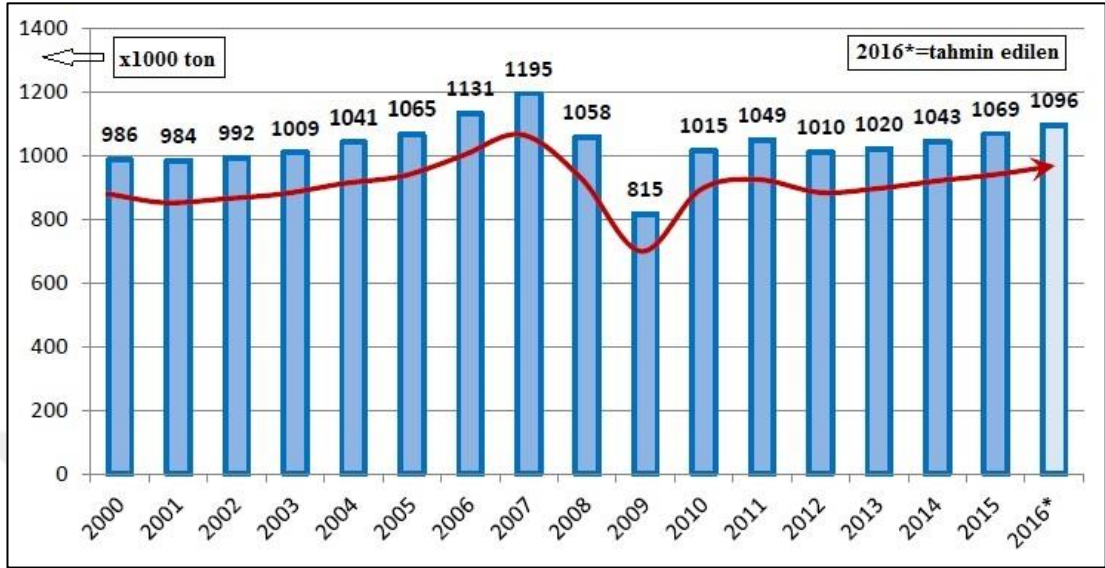


Şekil 1.1. Takviye malzemesinin kompozit içerisindeki farklı düzenlemeleri (Sheikh-Ahmad, 2009)

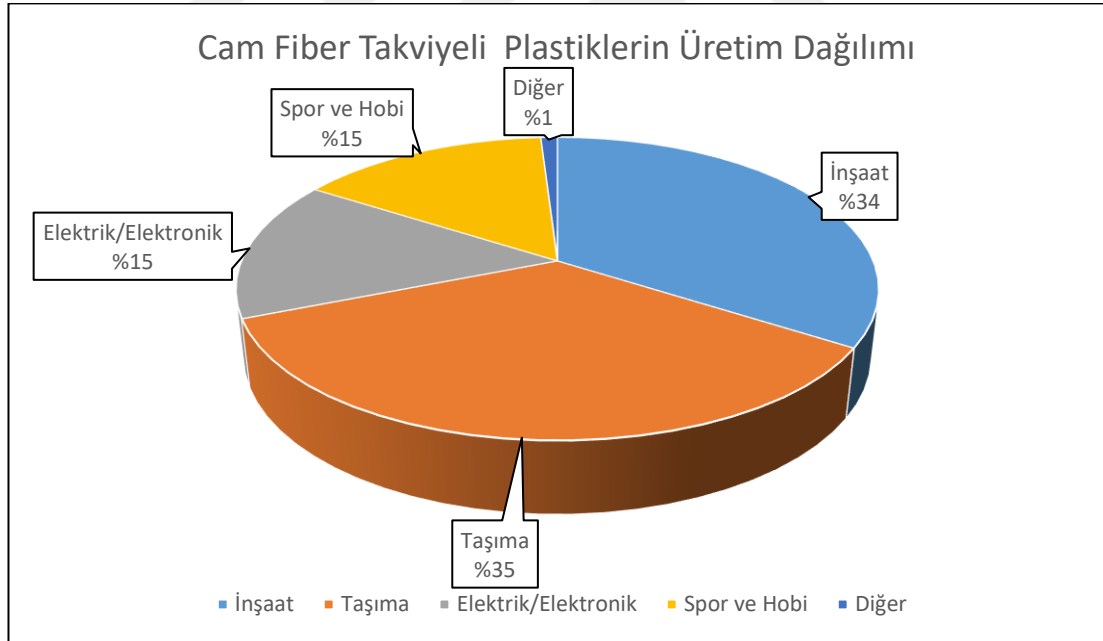
Avrupa ülkelerinde üretilen cam fiber takviyeli plastiklerin hacmi 2016 yılında % 2,5'in üzerinde büyüyeceği düşünülmüş ve böylece büyümenin 2015 yılındaki aynı oranla devam edeceği ifade edilmiştir. Toplam üretimin $1,096 \times 10^6$ tona ulaşması tahmin edilmiş ve 2000-2016 yılları arasında Avrupa üretim hacmi Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Avrupa'da son yıllarda toplam üretimdeki mutlak büyümeye rağmen küresel kompozit payı azalmaya devam etmektedir (Witten, 2016). Ülkemizde ise 2016 yılında kompozit üretiminde %6'lık büyüme gerçekleşmiştir (URL-1).

Cam fiberler; fiber takviyeli plastikler ve kompozitler içerisinde hala en çok kullanılan takviye edici malzemedir. Taşıma ve inşaat sektörünün her birinin tüketimi toplam tüketimin yaklaşık %30'u kadardır ve sektör tüketimini içeren grafik

Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Witten, 2016). Ülkemizde boru ve tank ile yapı ve inşaat sektörlerinde kompozit malzemelerin kullanımı fazladır (URL-1).



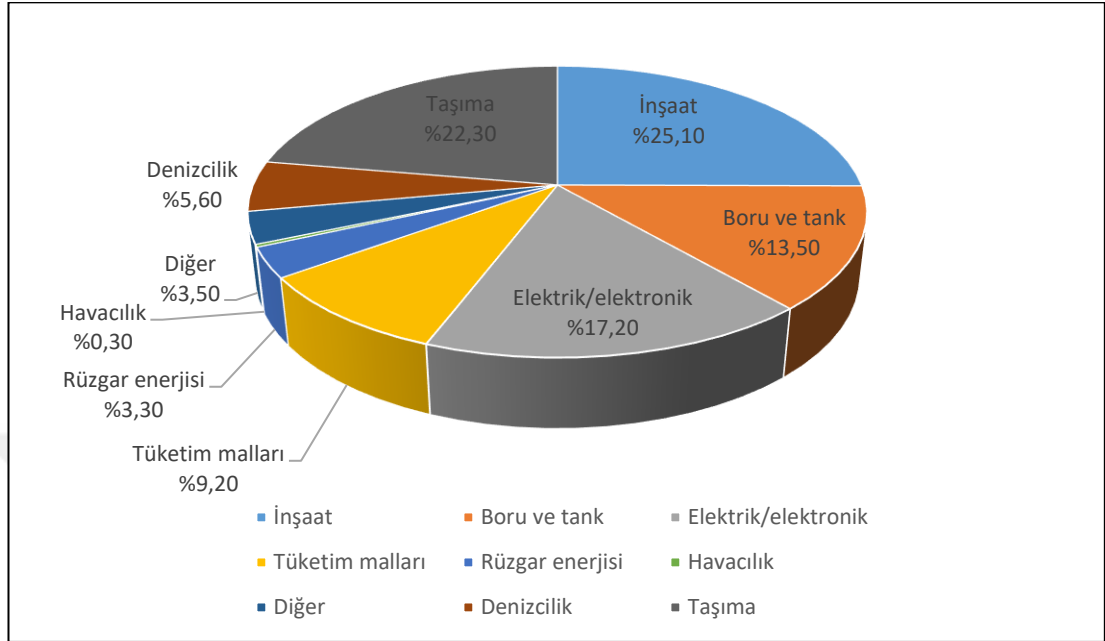
Şekil 1.2. Cam fiber takviyeli plastiklerin Avrupa'da üretim miktarı (Witten, 2016)



Şekil 1.3. 2016 yılında Avrupa da cam fiber takviyeli plastiklerin üretim sektörü dağılımı (Witten, 2016)

Kompozitlerin pazarı genel olarak uzay, taşıma, yapı, boru ve tank, denizcilik, tüketici ürünleri (spor, hobi), elektrik/elektronik ve rüzgar enerjisi kategorilerine ayrılabilir. Küresel kompozit endüstrisinde inşaat sektörü ağırlıkça üretim

miktarı bakımından kompozit malzemelerin en büyük tüketicisidir. Tüketime ait pazar payı Şekil 1.4' te gösterilmiştir (Sarasini ve Santulli, 2013).



Şekil 1.4. Son kullanım uygulaması için 2007 yılında global kompozitler dağılımı (%), Mt) (Sarasini ve Santulli, 2013)

1.2. Termoset Plastikler

Termoset polimerler uzun hidrokarbon moleküller ile moleküllerin içinde tutulan atomların birincil bağlarından oluşmaktadır. Ancak polimer moleküllerin aynı zamanda çapraz bağlar ile birlikte kovalent bağlarla bağlanmaktadır. Termoset moleküllerin düzenlenmesi rastgele olup amorf yapıya sahiptirler. Moleküller arası bağların kırılması kolay olmamakla birlikte termosetler sıcaklık ile eriyemezler. Bunun yerine yeterli ısınma yapıldığı zaman parçalara ayrılma başlar ve yanabilmektedirler. Tablo 1.1'de yaygın olarak kullanılan polimerik matrislerin mekanik ve termal özellikleri gösterilmektedir. Fiberlerin emdirilme esnasında tamamen ıslatılması için sıvı fazın viskozitesi önemlidir. Termosetler ile takviyelerin tamamen ıslanabilmesi termoplastiklere göre daha kolaydır. Çoğu termosetler üreticiler tarafından sıvı biçimde piyasaya sürülmektedir. Çapraz bağlanma ve katılma çapraz bağ ajanlarının eklenmesinden sonra meydana gelir ve 7 saat ile birkaç gün süre tamamlanabilmesi için gereklidir. Termosetlerin düşük maliyeti ve kullanımının uzun geçmişi önemli avantajlarıdır. Termosetler bu nedenle

kullanım alanları olan uzay ve inşaat sektörünü domine etmişlerdir (Sheikh-Ahmad, 2009).

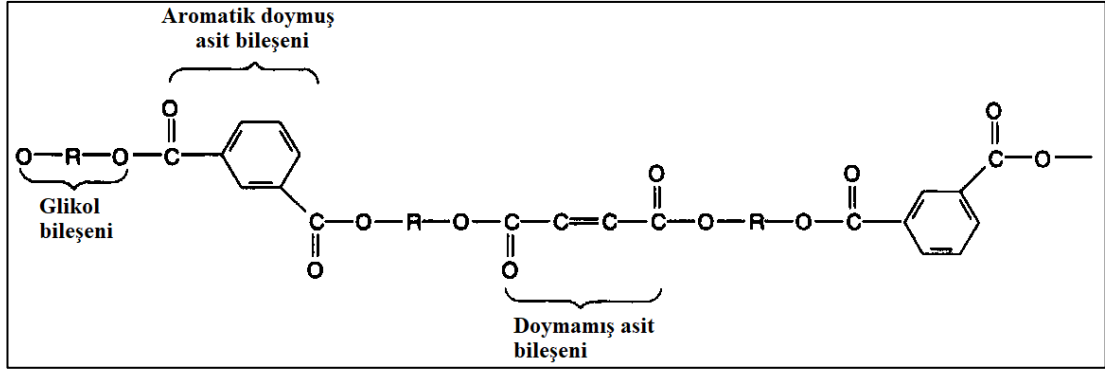
Tablo 1.1. Oda sıcaklığında bazı polimer matrislerin mekanik ve termal özellikleri (Sheikh-Ahmad, 2009)

	Yoğunluk (mg/m ³)	Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	K (W/m ² C)	C _p (kJ/kg°C)	α (10 ⁻⁶ °C)	T _g (°C)	T _m (°C)
Termosetler									
Doymamış Polyester	1,10-1,23	3,1-4,6	50-75	1,0-6,5	0,17-0,22	1,3-2,3	55-100	70-	-
Epoksi	1,10-1,20	2,6-3,8	60-85	1,5-8,0	0,17-0,20	1,05	45-65	65-175	-
Fenolikler (Bakalit)	1,00-1,25	3,0-4,0	60-80	1,8	0,12-0,24	1,4-1,8	25-60	300	-
Bismaleimid	1,20-1,32	3,2-5,0	48-110	1,5-3,3				230-345	-
Vinilesterler	1,12-1,13	3,1-3,3	70-81	3,0-8,0				70-	-
Termoplastikler									
Polipropilen	0,90	1,1-1,6	31-42	100-600	0,11-0,17	1,8-2,4	80-100	-20-5	165- 175
Poliamid (nylon)	1,10	2,0	70-84	150-300	0,24	1,67	80	55-80	265
Polifenilen sülfid	1,36	3,3	84	4,0	0,29	1,09	49	85	285
Polieter eter keton	1,26-1,32	3,2	93	50	0,25	1,34	40-47	145	345
Polietersülfon	1,37	3,2	84	40-80	0,26	1,0	55	225	-

K: Termal iletkenlik, C_p: Öz ısı, α: Termal genişleme katsayısı, T_g: Camı geçiş sıcaklığı, T_m: Erime sıcaklığı

1.2.1. Polyester reçineleri

Polyesterler bir reaktif organik solvent (monomer) içerisinde çözülmüş polimer zincirlerinden oluşan şurup yapısındadır. Uygun bir katalizör ve hızlandırıcı ilavesi ile şurup soğuk halde bir kimyasal reaksiyona girmektedir, basınç olmadan katı ve üç boyutlu bir yapı oluşturmasına neden olmaktadır. Polyester reçineleri oluşturmada ana başlangıç malzemeleri dibazik organik asitler (doymuş ve doymamış herikiside) ve dihidrik alkollerdir (glükoller). Asitler ve glükoller arasındaki suyun ortadan kaldırılmasıyla ester bağları oluşur ve bu da alternatif asit ve glükol ünitelerinden oluşan uzun zincirli bir molekül oluşturur. Polyesterin polimer zinciri Şekil 1.5'de gösterilmiştir.

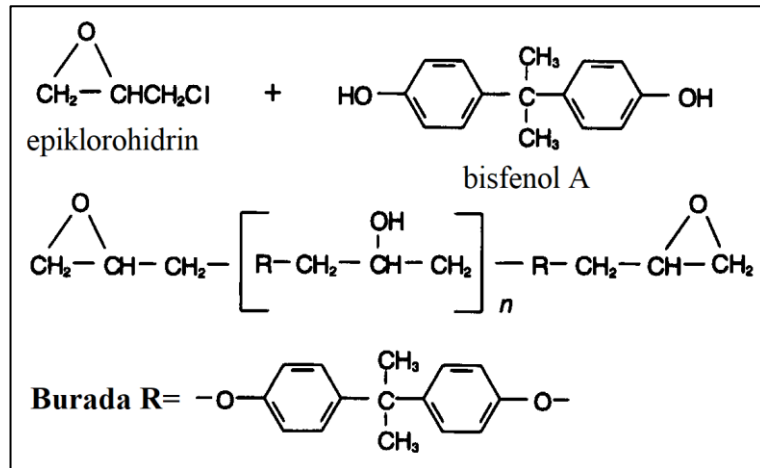


Şekil 1.5. Polyesterin polimer zinciri yapısı (Norwood, 1994)

Doymuş ve doymamış dibazik asit oranının dikkatli bir şekilde düzenlenmesi ile zincir boyunca düzenli aralıklarla çapraz bağ alanlarının (doymamışlık veya karbon-karbon çift bağları) bir araya getirilmesi sağlanır. Polimer zincirindeki doymamış alanların yoğunluğunun değiştirilmesi, reçinenin sertleşmiş yapısı ve son özellikleri üzerinde temel etkilere sahiptir (Norwood, 1994).

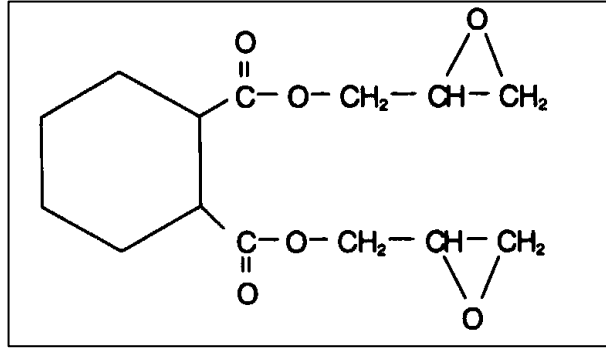
1.2.2. Epoksi reçineleri

Epoksi reçineler genellikle epiklorohidrinin bisfenol A ile reaksiyona sokulmasıyla üretilmektedir. Epoksinin polimer zinciri Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Epoksi reçineler uçucu monomerik bileşen içermediğinden polyester ve vinil ester reçineden önemli derecede farklıdır. Epiklorohidrin ve bisfenol A'nın oranlarını değiştirerek farklı reçineler oluşturulmaktadır.



Şekil 1.6. Epoksinin polimer zinciri (Norwood, 1994)

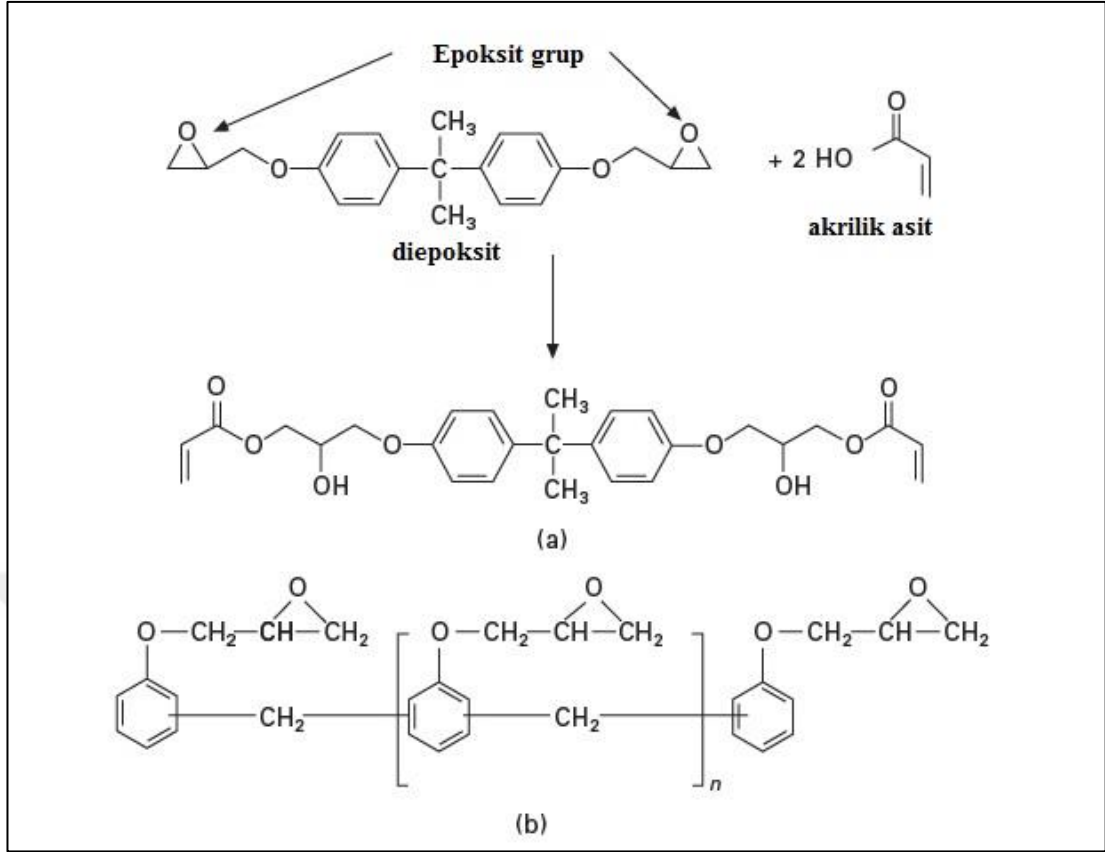
Şekil 1.7’de glisidil ester reçinelerine sahip diğer bir epoksi reçinene yapısı gösterilmiştir. Burada viskozite ve reaktiflik vakum impregnasyon (emdirme), laminasyon ve döküm uygulamaları için idealdir (Norwood, 1994).



Şekil 1.7. Glisidil estere sahip diğer bir epoksi (Norwood, 1994)

1.2.3. Vinil ester reçineleri

Genellikle vinil ester reçineleri epoksilerin ve doymamış polyesterlerin en iyi özelliklerinin birleşimi kabul edilir. Özellikle oda sıcaklığında kolayca işlenebilmesi önemlidir (Sarasini ve Santulli, 2013). Vinil reçineler geleneksel polyesterlere kıyasla daha az ester bağları içerirler (Norwood, 1994) ayrıca vinil esterler daha iyi kimyasal direnç (polyestere göre) gösterir, özellikle hidrolitik stabilitesi, kür oranı ve reaksiyon koşulları üzerinde epoksi reçinelerden daha kolay kontrol imkânı sunar. Vinil esterler doymamış dolayısıyla termosetleşen reçinelerdir. Monofonksiyonel doymamış asidin reaksiyonu tarafından hazırlanır ve buna örnekler bisfenol diepoksit ile metakrilik, akrilik, krotonik ve sinmanik asittir. Bu yapı türüne bisfenol-A epoksi vinil ester denir.(Şekil 1.8 (a)) Vinil esterlerin gelişmiş kimyasal ve mekanik özelliklerini en azından kısmen gösteren yapısal fark, sadece zincirlerin uçlarındaki (sonlarındaki) reaktif çift bağların vinil esterindeki varlığıdır; buna karşın, doymamış polyester reçineler, zincirler boyunca dağılmış reaktif çift bağlara sahiptir. Vinil ester reçineleri elde etmenin alternatif bir yolu da novolak epoksi kimyasal yapıyadır (Şekil 1.8 (b)). Bu durumda, bir fenol diepoksit elde edilir. Novolak omurga yapısı, bisfenol- A vinil ester reçineler tarafından izin verilmesinden daha yüksek sıcaklıklarda, sıvı ve buhar halindeki asitlere karşı geliştirilmiş direnç için özellikle uygundur (Sarasini ve Santulli, 2013).



Şekil 1.8. Vinil ester reçinelerin polimerizasyon yapıları: (a) bisfenol-A epoksi vinil ester reçine; (b) Novolak epoksi vinil ester reçine (Sarasini ve Santulli, 2013)

Vinil ester reçineler, reaktif bir monomer genellikle stiren içerisinde sağlandıkları için, polyester reçine aralığının bir uzantısı olarak en iyi kabul edilmektedir. Polyester reçineler için kürleşme mekanizması gibi aynı şekilde serbest radikal reaksiyonu yoluyla kürleşme başlatılmalıdır.

Vinilester reçineler polyester reçinelere benzer bir şekilde üretilmektedir. Bu işlemde peroksit katalizörler ve kobal hızlandırıcılar kullanılır ve sık sık dimetilaninin eklenmesi ile de arttırılır. Benzoil peroksit veya üçüncül butil peroksibenzoat bazlı sıcak kür sistemleri de kullanılabilir (Norwood, 1994). Daha az çapraz bağlardan dolayı kürleşmiş vinil ester reçine kürleşmiş polyestere göre daha esnek ve kırılma tokluğu daha fazladır. Genellikle vinil esterlerin ıslanabilme özellikleri iyidir ve OH (hidroksil) gruplarının sayısının yüksek olması nedeniyle cam fiberler ile iyi bağ oluşturur, cam fiber yüzeyinde benzer gruplarla hidrojen bağları oluşturabilir. Tablo 1.2’de cam fiber-vinil ester kompozit malzemesinin farklı fiber/matris oranına ait çekme özellikleri örnekleri gösterilmiştir (Sarasini ve Santulli, 2013).

Tablo 1.2. Cam fiber-vinil ester kompozitinin çekme özellikleri örnekleri (Sarasini ve Santulli, 2013)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Cam fiber-vinil ester kompoziti (Rastgele yönelmiş fiberler) (fiber/matris oranı %67)	1,84	19,3	269
Cam fiber-vinil ester kompoziti (Rastgele yönelmiş fiberler) (fiber/matris oranı %50)	1,80	15,8	166

1.3. Aşındırıcı Su Jetinin Tarihçesi

Doğada uzun süreler boyunca sert kayalar üzerine yağın yağmurlar ile oluşan aşınma etkisi kayaların aşınmasını sağlamakta ve dolayısıyla dağları da yıpratmaktadır. Kayalar aynı zaman sürecinde suyun yavaş hareketiyle kırılmakta ve bölgeden uzaklaşmaktadır. Nehirlerin ağzında oluşan büyük deltalar suyun büyük taşıma kapasitesini göstermektedir. Bu oluşumlar, su jetinin kullanımında malzemenin uzaklaştırılması, taşınması ve kırılmasına ait üç yönünü göstermektedir. Bu gücün insanlar tarafından görülebilmesi ile insanların kullanımına adapte edilebilmiştir.

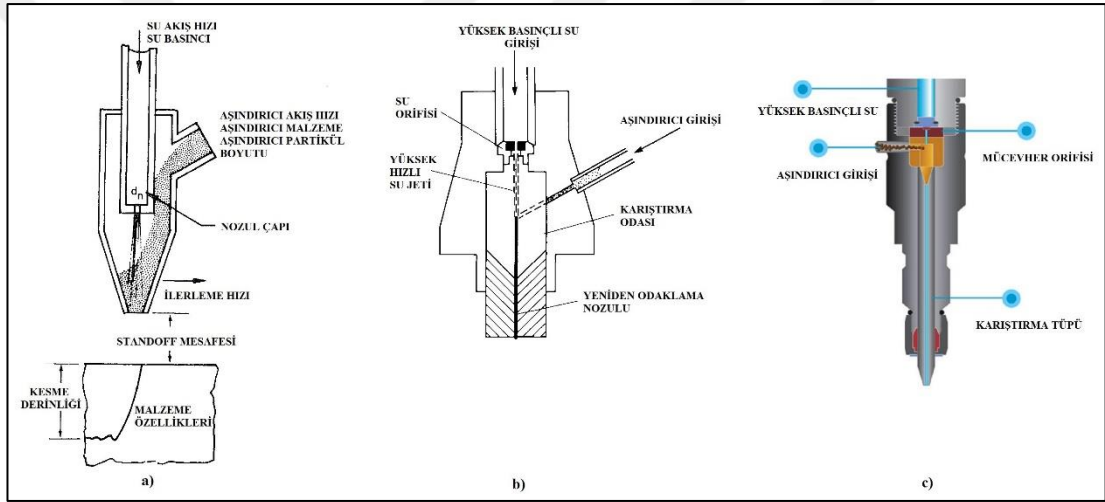
Mısır'da ilk taş dokümanlarda nehrin yolunun yönlendirilmesiyle değerli maden yatağının kullanılması anlatılmıştır. Daha sonra Roma döneminde suyun yüksek yerlerde depolanması ve istenilen yere yönlendirilebilmesiyle malzemeler çıkarılmış ve bu malzemeler taşınarak vadiye düşürülmüştür. Böylece değerli madenler kolay bir şekilde çıkarılabilmiş ve geçtiğimiz dönemde suyun bu şekilde kullanımı popüler olmuştur. Sovyetler Birliği ve Yeni Zelanda'da kömürün hidrolik madenciliğinde, Güney Afrika'da ise derin altın madenlerinde kullanılmıştır. Daha modern zamanlarda iki gelişme modern endüstrinin yaratılmasına yol açmıştır. Bunlar, 1853-1856 yılları arasında Kaliforniya Altın Bölgesinde ana altın üretim aracı olarak hidrolik madenciliği olmuş ve 20. Yüzyılın başlarında Prusya'da bataklık kömürü madenciliğine bu gelişmenin ulaşması ile 1930'lu yıllarda ilk kez Rusya'da kömür madenciliğinin kullanımının taşınmış olmasıdır. Sert kayaların kesilebilmesi için ilk

denemeleri Sovyetler Birliği yapmış ve 7000 bar su basıncına çıkabilen cihaz kullanılmıştır (Summers, 1995). Yine aynı yıllarda düşük basınçlı su jeti ile kâğıt kesimi yapılmış ve ilk su jetleri ile yumuşak malzemeler kolayca kesilebilmiştir. Metaller gibi sert malzemelerin kesilmesinde bu ilk su jetleri efektif olmamış olup su jetine aşındırıcı malzemelerin eklenebilmesiyle sert malzemelerin kesilebilmesi sağlanmıştır. Yine aynı yıllarda aşındırıcılı su jeti nozulu konsepti patent altına alınmıştır. 1940'lu yıllarda havacılık ve otomotiv hidroliği için yüksek basınç contaları geliştirilmiş, 1950'li yıllarda ultra-yüksek basınçlı (6900 bar) sıvı jet kullanılarak uzay metalleri kesilmiş, nümerik kontrol sistemi ve plastik şekilleri kesmek için yüksek basınç su jeti geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda 3450 bar basınca kadar atımlı su jeti oluşturulmuş, metal ve taş kesimi yapılmış ayrıca polietilen endüstrisi için yüksek basınçlı pompalar üretilmiştir (URL-2). 1970'li yıllarda ABD'de 40000 bar basınca ulaşılmış ve su jeti tarafından kaya kesimi için bunların kullanımının bazı potansiyelleri olduğu belirtilmiştir (Summers, 1995). Yine aynı yıllarda su jeti orifisi için korindon kristali kullanımının konsepti geliştirilmiş, yüksek basınç akışkan yoğunlaştırıcı (artırıcı) geliştirilmiş ve patenti alınmış, ilk ticari su jeti kesme sistemi tanıtılmıştır (URL-2). Günümüze kadar olan süreçte yöntemin birçok yönüyle geliştirilmesine devam edilmiştir.

1.4. Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ)

Su jeti ile plastik, oluklu mukavva, deri ve yumuşak kaya gibi malzemelerin kesilmesinde geleneksel kesme sistemlerine göre daha etkin ve ekonomik olarak kesme kabiliyetini göstermesi endüstride kullanımı yaygınlaştırmıştır. Öte yandan sadece su jeti ile cam, sert kaya, metaller gibi sert malzemeler kesilememektedir. Yüksek hızlı bir su jeti içinde sürüklenen aşındırıcı partiküllerin akışı vasıtasıyla bu sert malzemeleri kesmek için bir sistem geliştirilmiş ve deneysel olarak test edilmiştir. Aşındırıcılı su jetinin çalışma prensibi: ~ 3100 bar (45000 psi)'a kadar basınçlar ile tahrik edilen bir su akışı ile aşındırıcı partiküllerin karışarak hızlanması neticesinde malzeme yüzeyine jetin püskürtülmesi (gönderilmesidir) şeklindedir. Söz konusu karıştırma ve hızlandırma işlemi sert bir malzemedan yapılmış (tungsten karbür veya bor karbür gibi) karıştırma odasında meydana gelmektedir. Şekil 1.9 (a)'da işlemi gösteren ASJ nozulu gösterilmiştir (Hashish, 1984). Su jeti ile aşındırıcılı su jeti arasındaki fark sadece ASJ tezgahına aşındırıcı jet nozulu ve

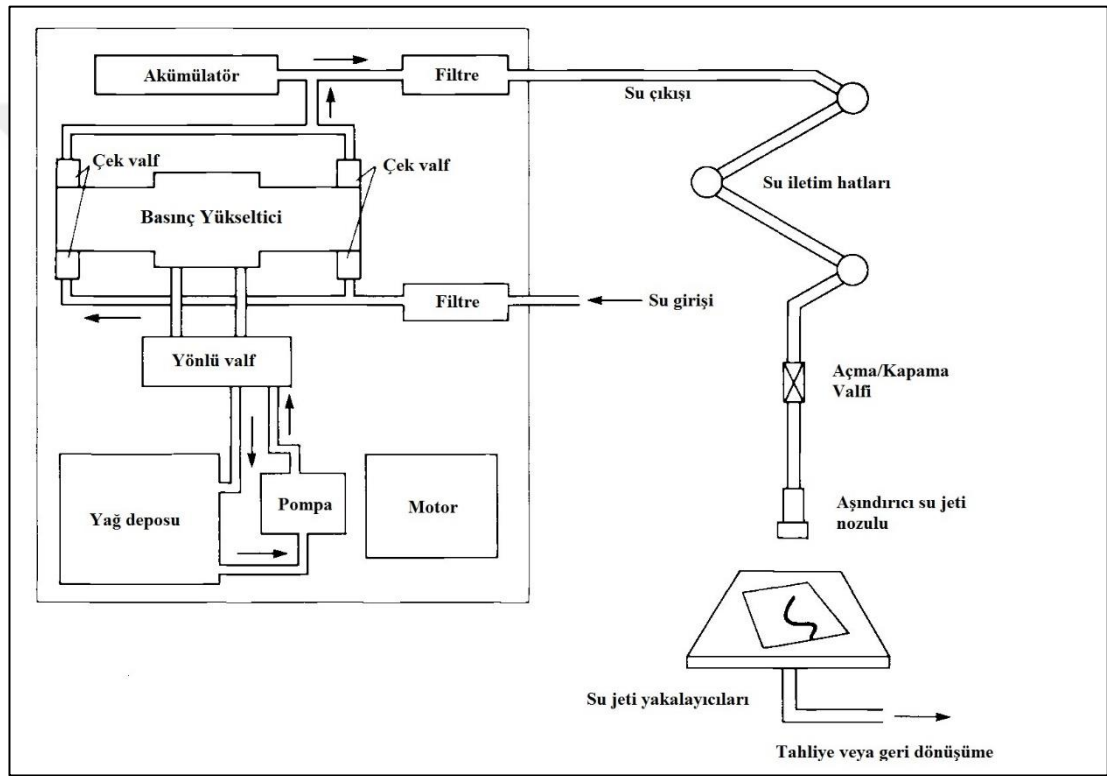
aşındırıcı besleme mekanizmasının eklenmesidir. Şekil 1.9 (b)' de diğer bir ASJ nozulu gösterilmiştir. Burada da bir karıştırma odası içinde yüksek basınçlı su jetine aşındırıcı eklenmektedir. Yüksek hızlı su jeti karıştırma odasından geçtiğinde, yüksek akış düşük basınç alanını oluşturmaktadır, bir besleme hattından aşındırıcı malzeme çekilmektedir. Aşındırıcı akışı bir ölçme mekanizması ile kontrol edilmektedir. Karıştırma odasında, aşındırıcı yüksek basınçlı su jeti ile rastgele karıştırılır. Daha sonra da ikinci bir nozul sayesinde yeniden odaklanır (Johnston, 1989). Tüm aşındırıcılı su jeti nozulları ilk kez 1936 yılında patentlenen sıvı patlatma nozulu gibi aynı çalışma prensibini kullanır. Nozulun modern konfigürasyonu Şekil 1.9 (c)' de gösterilmiştir (URL-3).



Şekil 1.9. Nozulların gösterimi: (a) (Hashish, 1984); (b) (Johnston, 1989); (c) modern konfigürasyon (URL-3)

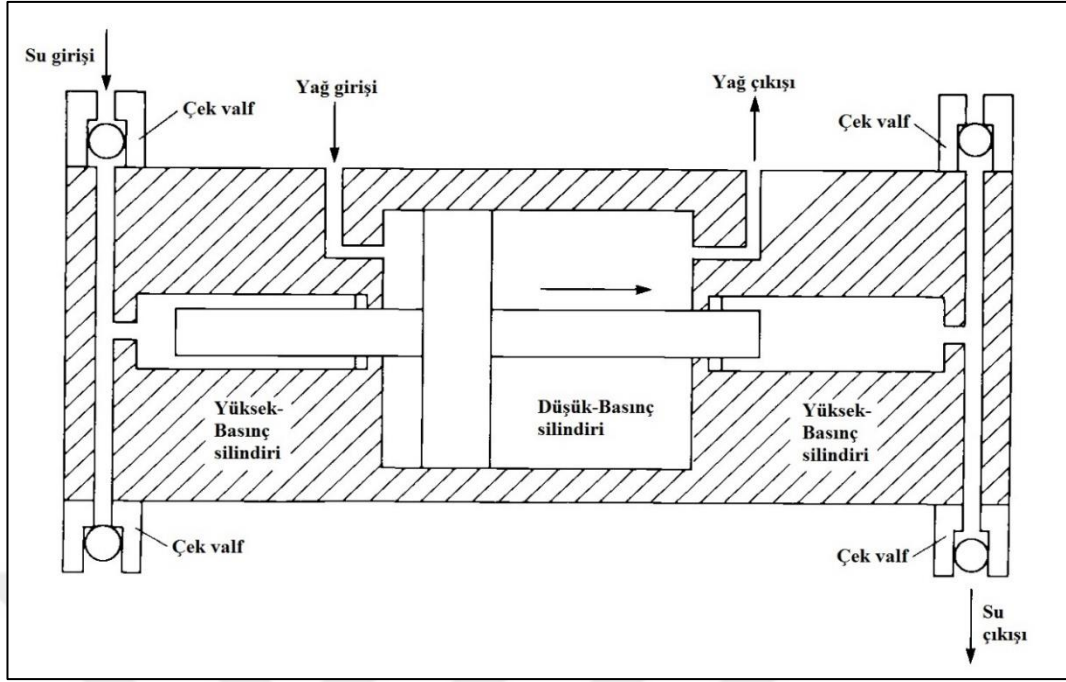
Şekil 1.10 bir ASJ tezgahının ana bileşenlerini göstermektedir. Hidrolik ünite bir elektrik tahrikli, değişken deplasmanlı, basıncı dengelenmiş hidrolik pompayı içermektedir. Basınç yükseltici, su basıncını arttırmak için kullanılmaktadır. Hidrolik basınç, basınç yükselticinin düşük basınç silindirine uygulanır ve su basıncı yüksek basınç silindirinde geliştirilir. İki silindirin çalışma alanlarının oranı tarafından basınç artışı belirlenmektedir (Şekil 1.11). Akümülatör veya şok zayıflatıcısı, basınç yükselticisinin yüksek basınçlı çıkışı ile paraleldir. Basınç yükselticinin karşılıklı strokunun (vuruşunun) tersine çevirmesiyle oluşan basınç sıçramalarını (artımlarını/aniden yükselmelerini) düzeltmek için eklenir. Bu durum suyun sıkıştırılmasından kaynaklanır. Filtreler nozul orifisini yabancı malzeme tarafından olası hasarlardan korumaktadır. Su iletim hatları esnek hortum, sert borular,

firdöndüler, esnek bağlantıları kapsamaktadır. Açma-kapama valfi jet akışını açmak veya kapatmak için kullanılan iki yönlü, iki pozisyonlu, hızlı etkili bir valftir. ASJ nozulu, basınçlı su ve aşındırıcının birleştiği ve bu karışımın hedef malzemeyi işlenmesini sağlamaktadır. Malzeme kesiminden çıkarken aşındırıcılı su jeti hapsolmalı ve dağıtılmalıdır. Bu amaçla yakalayıcı denilen konteynırlar kullanılmaktadır. Ayrıca yakalayıcılar işleme sırasında oluşan gürültüyü de azalmaktadır. Bazen su jetinin yapışmasına yardımcı olmak için de uzun zincirli polimer sıvı katkıları kullanılmaktadır (Johnston, 1989).



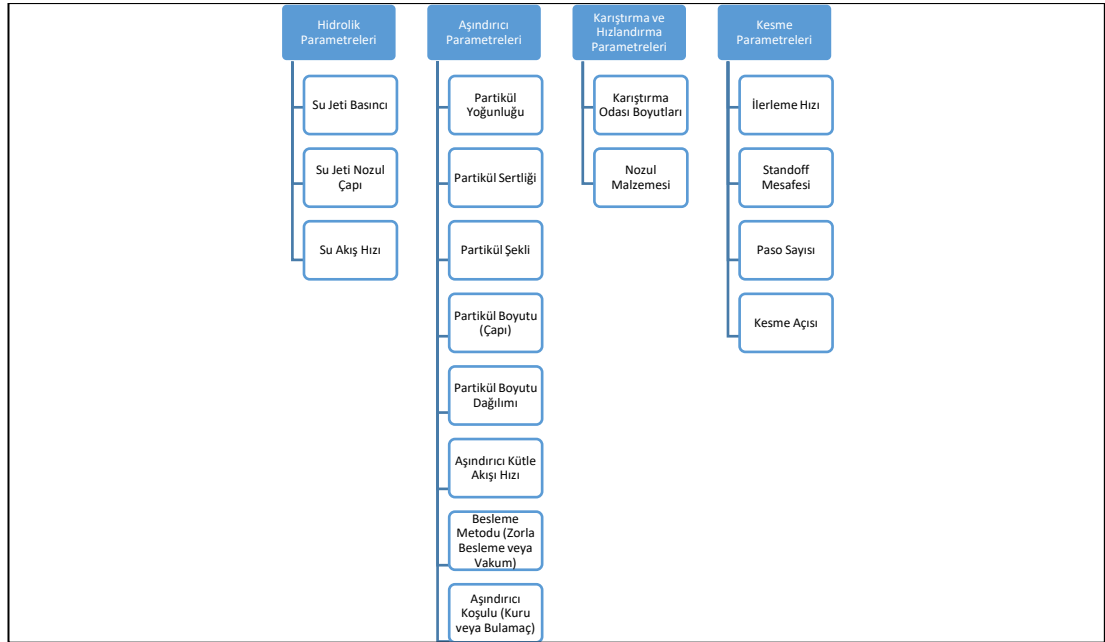
Şekil 1.10. ASJ tezgahının şematik gösterimi (Johnston, 1989)

Basınç yükseltici pompanın haricinde günümüzde krank mili ile tahrik edilen doğrudan tahrikli pompa (URL-3) ve elektrikli servo pompa da kullanılmaktadır (URL-4).



Şekil 1.11. Su jeti basınç yükselticinin şematik gösterimi (Johnston, 1989)

ASJ ile kesme işleminde tezgâha özgü olarak kesme performansını etkileyen faktörler (hidrolik, aşındırıcı, karıştırma - hızlandırma ve kesme parametreleri olmak üzere) dört ana başlıkta toplanmaktadır. Hashish (1984 ve 1989c) ile Kechagias ve diğ. (2012)'ne göre dört ana başlığın alt detaylarının düzenlenmesi Şekil 1.12'de gösterilmiştir.

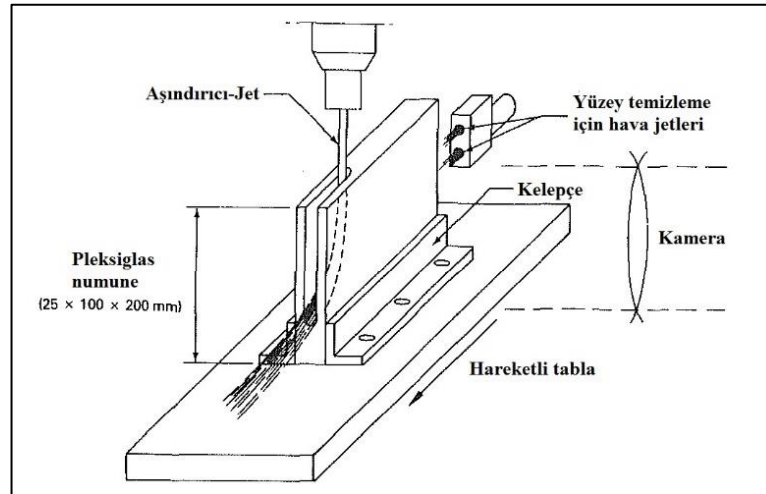


Şekil 1.12. Kesme performansını etkileyen ASJ parametreleri (Hashish, 1984 ve 1989c; Kechagias ve diğ., 2012)

1.4.1. ASJ kesme mekanizması

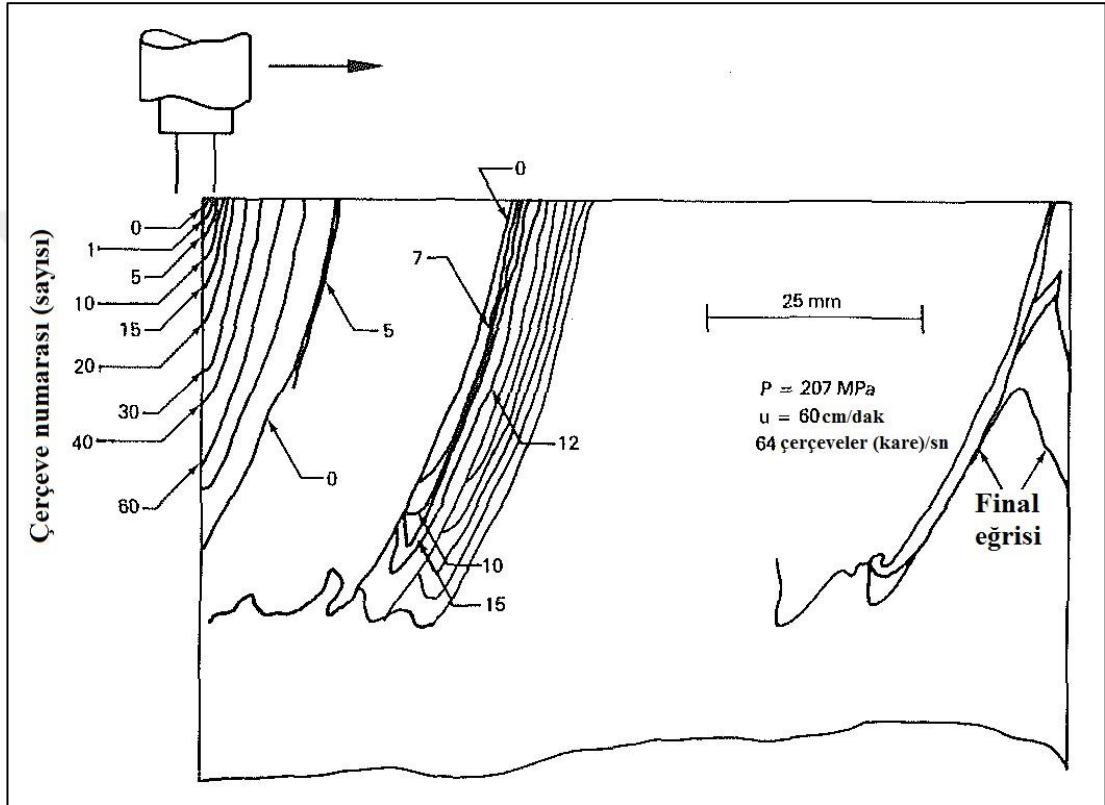
Hashish ve duPlessis (1978) sürekli yüksek hızlı su jetleri tarafından geniş katı malzeme yelpazesinin penetrasyonu için bir teori geliştirmeye çalışmışlardır. Teori, kesme yuvasının (oluğunun) katı sınırlarına etki eden hidrodinamik kuvvetleri belirlemek için bir kontrol hacim analizine dayanmış olup çok çeşitli malzemelerin kesme davranışı tanımlanması denenmiştir. Aynı araştırmacıların (1979) yapmış olduğu çalışmada, önceki çalışmada katıların sürekli jet penetrasyonu için türetmiş oldukları bir denklemi, jetin havadaki saçılımı ve hızının azalması üzerine elde ettikleri verilerle birleştirmiştir.

Hashish (1984) ASJ ile işlemenin anlaşılabilmesinde önemli bir çalışma olan metal kesiminin modellemesini çalışmış, sünek metallerin ASJ ile kesilmesinin deneysel ve teorik araştırılması ile deneysel kesme testleri, görüntüleme deneyleri ve model geliştirilmesini yapmıştır. Su jeti basıncı, su jeti çapı, aşındırıcı malzeme, partikül boyutu, aşındırıcı akış hızı, ilerleme hızı ve paso sayısı ASJ parametreleri ile kesme derinliği ve kalitesini incelemiştir. Aşındırıcı jet kesme fenomeni, akış fazlarının bireysel ve/veya kombine etkilerinden dolayı proseslerin karmaşık bir etkileşimini içerdiği belirtilmiş olup çalışmada aşındırıcı akışı tarafından erzyonun teorilerinin literatür araştırılması yapılmıştır. Çalışmada şeffaf Pleksiglas levha kullanılarak (Şekil 1.13) kesmenin jet/katı ara yüzeyi görselleştirilmiş ve ilerleme şekli gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Aşındırıcı jet ile kesmede görselleştirme deney düzeneği (Hashish, 1984)

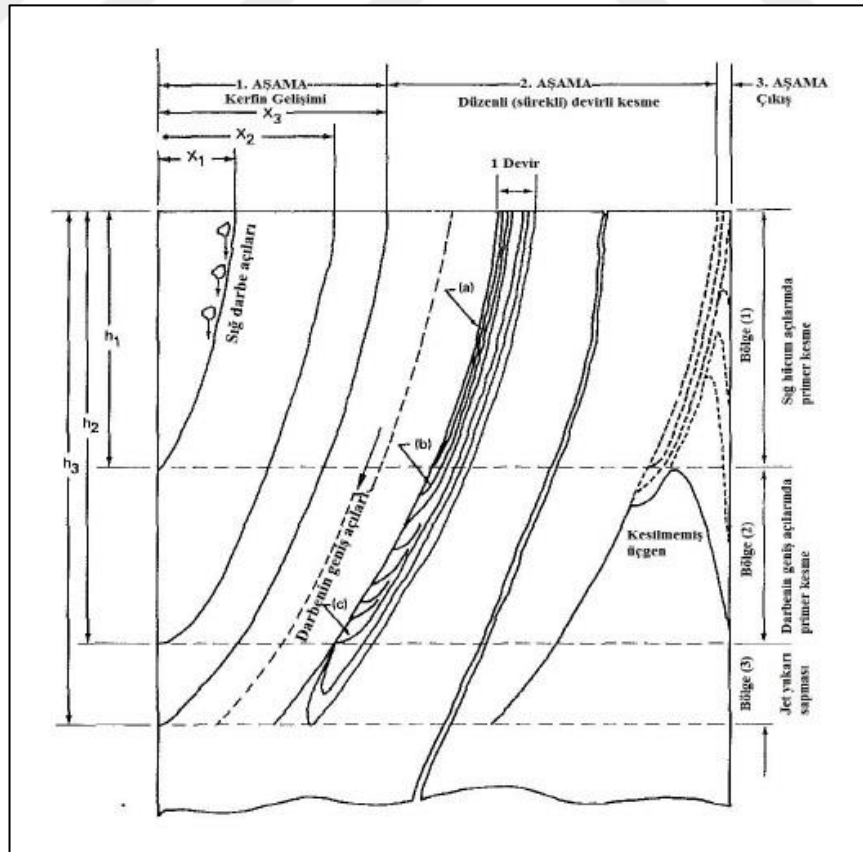
Şekil 1.14'de başlangıç jet penetrasyonundan jetin Pleksiglas'tan çıktığı noktaya kadar kesme işleminin izi gösterilmiştir. Proses tekrarlanabilir olduktan sonra yapılan penetrasyonun iki devri gösterilmiş ve yaklaşık 25 mm derinliğe ulaştıktan sonra jet yaklaşık 5000 mm/dakikalık bir oranda bir hızda malzemeyi penetre ettiğini göstermiştir. Ayrıca jetin penetrasyonu daha derin olduğunda hızın azalmakta olduğu görülmüştür (Hashish, 1984).



Şekil 1.14. Jetin giriş ve çıkış yerlerini gösteren jet-katı izi (Hashish, 1984)

Kesme işlemi Şekil 1.15'te görüldüğü üzere üç aşamada ilerlemektedir. Birinci aşama kerfin gelişimi olarak adlandırılmaktadır ve bu aşamada giriş kesme süreci içinde maksimum kesme derinliğine ulaşılan kadar farklı kesme mekanizmaları gelişmektedir. İkinci aşama düzenli (sürekli) devirli kesme olarak adlandırılmaktadır ve bu aşamada devirli kesme sürecinde jet plakanın sonuna ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Üçüncü aşama çıkış olarak adlandırılmaktadır ve bu aşamada çıkış kesme sürecinde kesme işlemi sona ermektedir.

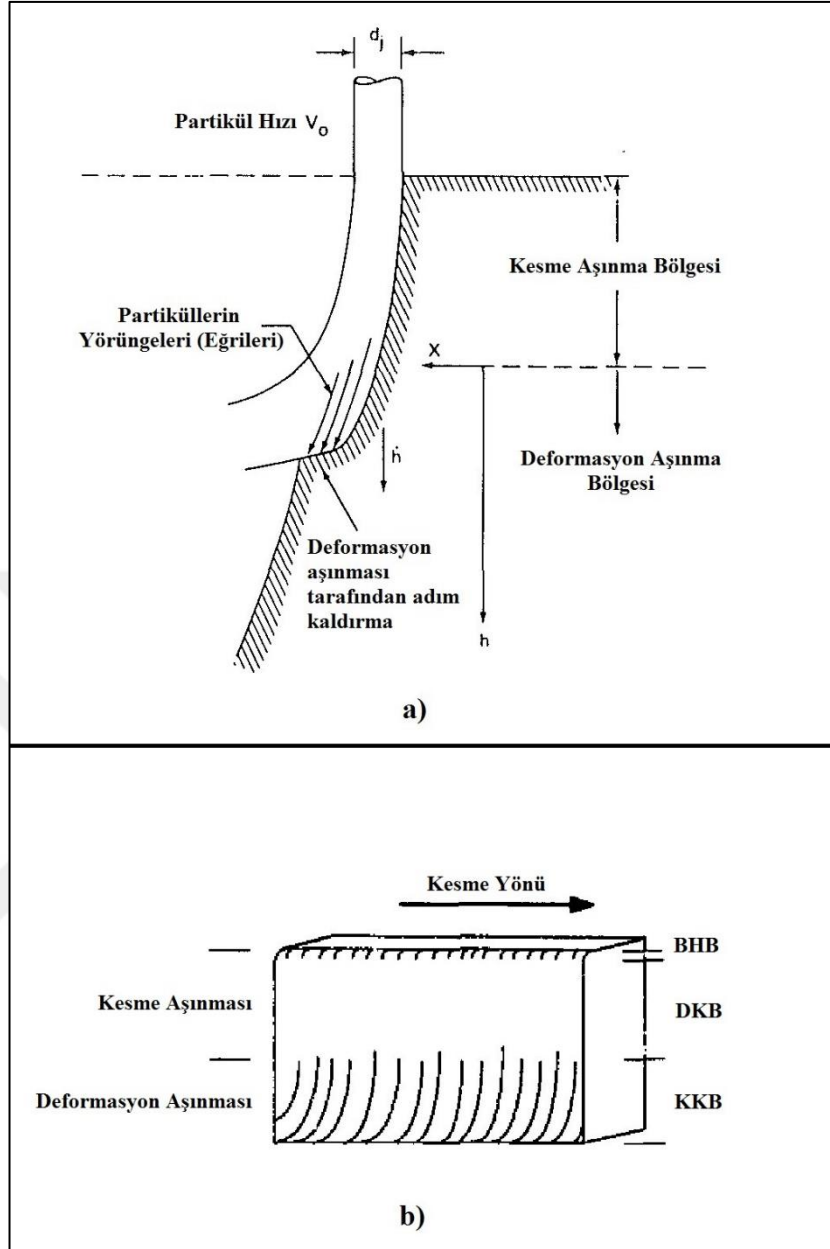
Şekil 1.15 daha detaylı incelendiğinde, X_1 mesafesi kadar ilerleme olduğunda h_1 derinliği oluşmaktadır ve bu periyotta erozyon ile sık darbe açılarında öncelikle (primer) kesme meydana getirmektedir. X_1 'den X_2 'ye ilerleme sırasında h_1 'den h_2 'ye olan penetrasyon, öncelikle geniş açılarda gelen darbedeki erozyondan kaynaklanmaktadır. Toplam ilerleme X_3 'e geldiğinde penetrasyon süreci tamamen gelişmekte ve h_2 'den h_3 'e final penetrasyon süreci oluşmaktadır. Burada geniş darbe açılarında erozyon aşınması tarafından kontrol edilmesiyle ilişkili momentum değişiminin lokal hızlarının artması jetin yukarı sapması ile sonuçlanmaktadır. Bu bölge kerfin alt kısmındaki kesimin engebeliğinden sorumludur (malzeme penetre olmasına engel olacak kadar kalınsa). İşlemede bir jet çapı kadar ilerlendiğinde h_3 derinliği kadarki süreç 1 devri meydana getirmektedir. Çıkış sürecinde kesilmemiş üçgen biçimi ile sonuçlanması jetin yanlamasına sapmasıyla ilişkilidir. Kesme sürecinin giriş ve çıkışları iş parçasının geometrisine duyarlıdır ve X_3 mesafesinin gelişimi geometriye bağlı olarak değişebilmektedir. Dikdörtgen numuneler için gelişme mesafesi jetin, malzeme ve kesme parametrelerinin bir fonksiyonudur (Hashish, 1984).



Şekil 1.15. Kesme prosesi aşamaları (Hashish, 1984)

Şekil 1.15'te jetin bir devrinde penetrasyon sürecinde (a) ile gösterilen kısımda, jet ara yüzeyi ile katı malzeme üzerinde bir yüzey farz edilmektedir. Bu yüzeyin üst kısmı, sığ açılarda parçacık darbesine maruz kalmakta ve malzeme kaldırma oranı eğik kesme mekanizmasına uyan bir fonksiyon olmaktadır. Küçük bir adım (b), lokal malzeme kaldırma oranı eğrinin sonunda sıfır olduğunda jet küçük bir ilerleme göstermiş olmaktadır. Bu adım, daha sonra dikey darbelere maruz bırakılmakta ve kaldırılmaktadır. Diğer küçük ilerleme, eğrinin yeni alt ucunda benzer bir adımın oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Derinlik arttıkça her bir adımın boyutu artmaktadır. Dolayısıyla, adımın üst kısmında kaldırılacak malzeme hacmi giderek artacağından ikinci adıma geçiş sürecinde gecikme ortaya çıkmaktadır. Eğride (c) ile gösterilen kısımda görüldüğü gibi jet sapma açısı 90° oluncaya kadar bu süreç geçerlidir (Hashish, 1984).

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, 1988, 1989a, 1989b, 1991; Sheikh-Ahmad, 2009). Kesme ve deformasyon aşınması Şekil 1.16 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Arola ve Ramulu (1997) ASJ ile işlenen (kesilen) yüzeyi 3 belirgin yüzeye bölmüştür (Şekil 1.16 (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) tarafından ayırt edilmektedir. DKB içerisinde, işlenen yüzey dokusu aşındırıcı partikül boyutu tarafından öncelikle belirlenmektedir. Buna karşılık, jet kinetik enerjisini etkileyen kesme parametreleri KKB'nin yüzey özelliklerini yönetmektedir. ASJ ile işlemede yüzey dokusunun parametrik bağımlılığı iyi belirlenmiş olsa da işlenmiş yüzey yapısı üzerinde malzeme özelliklerinin etkileri yeterli olarak incelenmemiştir (Arola ve Ramulu, 1997).



Şekil 1.16. Kesme yüzeyi aşınma mekanizmaları: (a) (Hashish, 1984 ve 1989a); (b) (Arola ve Ramulu, 1997)

1.4.2. ASJ modelleri

ASJ işleme çıktıları üzerine çeşitli modeller geliştirilmiştir. Hashish (1984) yaptığı çalışmada sünek metallerin (Alüminyum 7075-T73, tellür bakır, dökme demir, yumuşak çelik) kesilmesini modellemiştir. Denklem (1.1)'de toplam kesme derinliği;

$$h = \frac{\dot{m}P}{d_j u (1+R)^2} \left[\frac{c}{4\sigma_0} + \frac{2(1-c)}{\pi\epsilon} \right] \quad (1.1)$$

şeklinde bulunmaktadır. Burada h , kesmenin derinliğini, \dot{m} , aşındırıcı kütle akış hızını, P , su basıncını, d_j , jet çapını, u , ilerleme hızını, R , aşındırıcı kütle akışı hızının su kütle akışı hızına oranını, σ_0 , akış kuvvetinin (dayanımının) kesme yüzeyinin üstündeki ($h=0$) çarpma açısına oranını, ϵ , deformasyon aşınması tarafından birim hacmin kaldırılması için gereken enerjiyi, c , malzeme özelliği değerini ifade etmektedir.

Hashish (1989a) farklı metallerin ASJ ile kesilmesinde kesme derinliğinin yeni bir modelini oluşturmuştur. Bu model katı partikül darbesi tarafından erozyonun gelişmiş modeline dayanmaktadır. Denklem (1.2)'de belli koşullarda kesme aşınmasına bağlı kesme derinliği ve Denklem (1.3)'de deformasyon aşınmasına bağlı kesme derinliği;

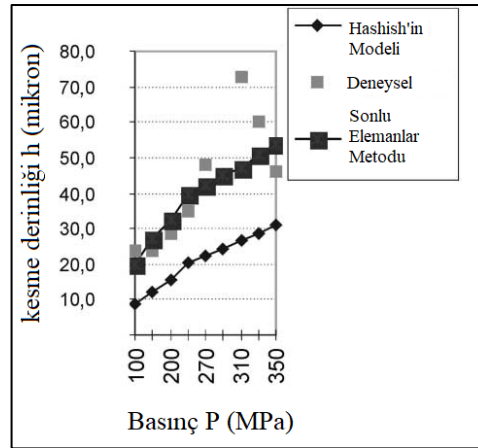
$$h_c = \frac{(V_0 / C_K) d_j}{\left(\frac{\pi \rho_p u d_j^2}{14 \dot{m}} \right)^{2/5} + \left(\frac{V_e}{C_K} \right)} \quad (1.2)$$

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_j \sigma u}{2 C_1 \dot{m} (V_0 - V_e)^2} + \frac{C_f}{d_j} \frac{V_0}{(V_0 - V_e)}} \quad (1.3)$$

şeklinde bulunmaktadır. Burada h_c , kesme aşınmasına bağlı kesme derinliğini, V_0 , başlangıç partikül (parçacık) hızını, C_K , karakteristik hızını, d_j , jet çapını, ρ_p , partikülün (parçacığın) yoğunluğunu, u , ilerleme hızını, \dot{m} , aşındırıcı kütle akış hızını, V_e , eşik partikülün (parçacığın) hızını, h_d , deformasyon aşınmasına bağlı kesme derinliğini, σ , malzeme akış gerilmesini, C_1 , oranını, C_f , kerf duvarının üzerindeki sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

Srinivasu ve Babu (2008) kesme derinliğini belirlemede yapay sinir ağı temelli bir model geliştirmiş ve yapay sinir ağı modelini genetik algoritma ile birleştirmiştir. Wang ve Guo (2002) enerji yaklaşımını kullanarak polimer matrisli kompozitlerin ASJ ile kesilmesinde penetrasyon derinliğini tahmin etmede bir model geliştirmiştir. Çalışmada malzeme numuneleri olarak fenolik dokuma polimer matris kompozitleri kullanılmış, yarı deneysel model şeklinde bir model geliştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Penetrasyon derinliğine jet ilerleme hızı, su basıncı ve

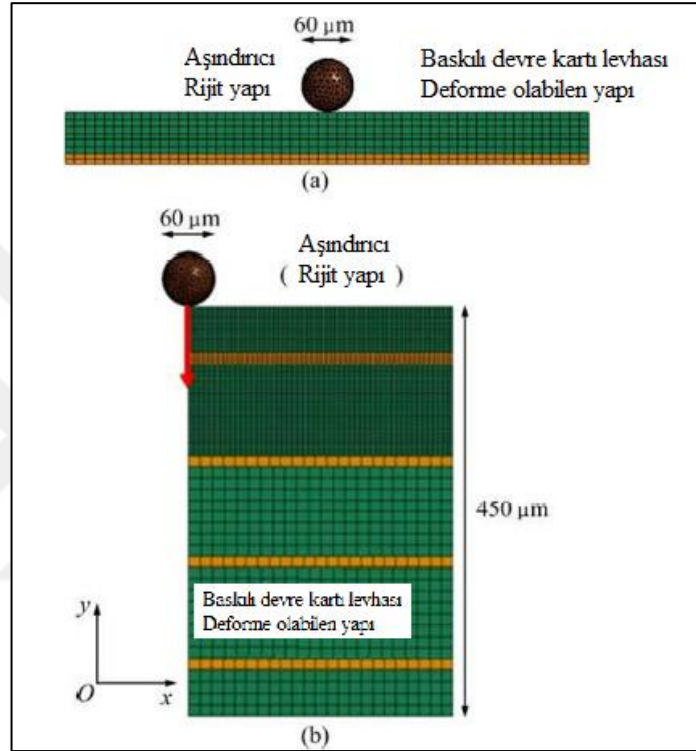
aşındırıcı kütle akışı hızı parametrelerinin etkileri grafik olarak gösterilmiştir. Grafiklere göre su basıncı ve aşındırıcı kütle akışı hızı artışı penetrasyon derinliği artışına, jet ilerleme hızı artışı ise penetrasyon derinliği azalışına (genel trend) sebep olmuştur. John Rozario Jegaraj ve Ramesh Babu (2007) yaptığı çalışmada, 6063-T6 alüminyum alaşımının ASJ ile kesilmesinde proses parametrelerinin: kesme derinliği, üst kerf genişliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerini belirlemede L 27 Taguchi deney dizaynı metoduna göre testlerini yapmış ve ANOVA analizi ile parametrelerin istatistiki anlamlılıklarını incelemiştir. Çalışmaya göre yüzey pürüzlülüğüne; odaklayıcı tüp boyutu, ilerleme hızı ve su jeti basıncı etkileri büyüktür. Paul ve diğ. (1998a) sünek malzemelerin ASJ ile kesilmesinde analitik ve deneysel modellerini çalışmıştır. Paul ve diğ. (1998b) diğer bir çalışmada gevrek polikristal malzemelerin ASJ ile işlenmesinde toplam kesme derinliğinin tahmin edilmesinin bir analitik modelini geliştirmiştir. Hassan ve Kosmol (2001) ASJ ile işlemede dinamik elastik-plastik sonlu elemanlar modelini çalışmıştır. Çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeli iş parçası yüzeyi ile aşındırıcı parçacığın etkileşimi doğru bir şekilde simüle edilmiş ve sonuçların deneysel sonuçlar ile tutarlı olduğu ifade edilmiştir. Şekil 1.17'de Hashish'in modeli ile çalışmadaki model ve deneysel sonuçları karşılaştıran grafik verilmiştir ve bu grafiğe göre yapılan çalışmanın deneysel sonuçlara daha yakın olduğu düşünülmüştür.



Şekil 1.17. Düşük karbonlu Fe360B çeliğinde basıncın kesme derinliğine etkisi (Hassan ve Kosmol, 2001)

Zain ve diğ. (2011a) tümleşik yapay sinir ağı ve benzetilmiş tavlama ile ASJ işlemede minimum işleme performansının kestirimini incelemiştir. Lee ve diğ.

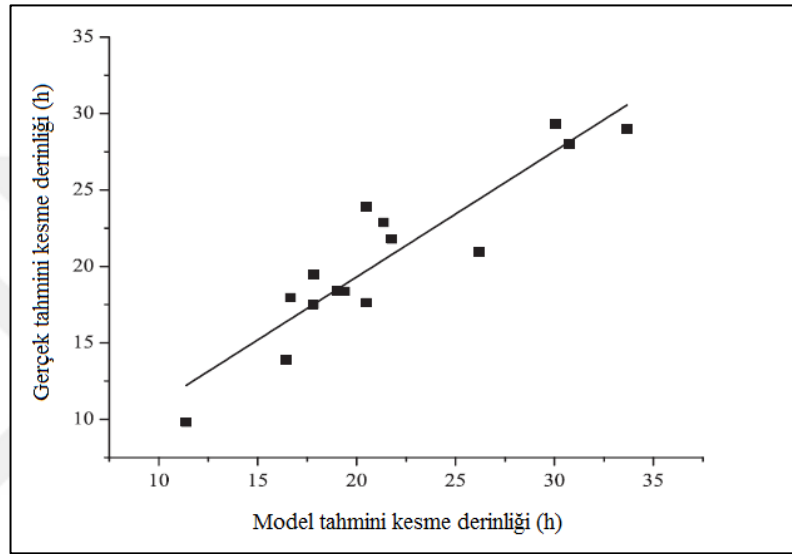
(2012) ince tabaka yapılı malzemelerin ASJ ile kesilmesinde mikro boyutlu ($60 \mu\text{m}$) aşındırıcının darbe dayanımının deneysel ve bilgisayar simülasyonunu araştırmıştır. ASJ'nin malzeme kaldırma mekanizmalarından mikro penetrasyon ve mikro çentiklerini (ortalama çapı $20 \mu\text{m}$ ve derinliği $5 \mu\text{m}$) deneysel incelemiş ve yüksek genleme hızı etkisini göz önüne alarak yeni bir bilgisayar simülasyon modelini önermiştir. Sonlu elemanlar modellemesine ait görüntü Şekil 1.18'de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Mikro aşındırıcı penetrasyonu (a), mikro çentik formasyonu (b) için sonlu elemanlar modelleri (Lee ve diğ., 2012)

Kumar ve Shukla (2012) titanyum Grade 5 alaşımının üç boyutlu erozyonunu simüle etmek için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar modelini sunmuştur. Çalışmada ayrıca üç farklı model (sonlu elemanlar modeli, Hashish'in modeli, Finnie'nin modeli) karşılaştırılmış ve grafiksel olarak gösterilmiştir. Junkar ve diğ. (2006) ASJ ile işlemede tek aşındırıcı darbesinin sonlu elemanlar analizini incelemiştir. Anwar ve diğ. (2013a) ise ASJ ile frezelemede izlerin sonlu elemanlar modellemesini çalışmış, yine aynı araştırmacılar (2013b) ASJ ile frezelemede üst üste örtüşen izlerin sonlu elemanlar modellemesini çalışmıştır.

Vundavilli ve diğ. (2012) ASJ ile işlemede kesme derinliğinin tahmini için bulanık mantık tabanlı bir sistem geliştirmiştir. Odaklama nozulu çapı, su basıncı, aşındırıcı kütle akışı hızı ve jet ilerleme hızı proses parametreleri olup üç farklı yaklaşım (otomatik bulanık mantık sisteminin diğer iki yaklaşımdan daha iyi olduğu bulunmuştur) geliştirilerek kesme derinliği tahmin edilmiştir. İkili kodlanmış bir genetik algoritma kullanılmıştır. Otomatik gelişen bulanık mantık sistemi için kesme derinliğinin saçılma grafiği Şekil 1.19'da gösterilmiştir.



Şekil 1.19. Otomatik gelişen bulanık mantık sistemi için kesme derinliğinin saçılma grafiği (Vundavilli ve diğ., 2012)

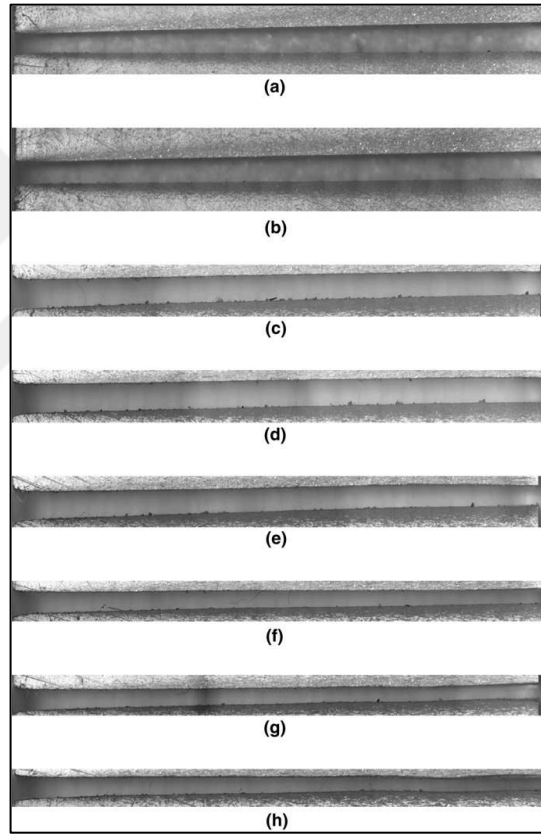
Geiger ve diğ. (2003) hafif ağırlıklı kompozitlerin ASJ ile kesilmesinde bulanık mantık temelli bilgi gösterimini çalışmıştır. Proses parametrelerinin hesaplanması için bir bulanık model geliştirilmiştir. Aultrin ve diğ. (2012) alüminyum silisyum karbürün ASJ ile işlenmesinde optimum işleme parametrelerini için bulanık-genetik yaklaşımı çalışmıştır. Zain ve diğ. (2011b) ASJ ile işlemede proses parametrelerinin optimizasyonunda tümlşik benzetilmiş tavlama-genetik algoritmayı çalışmıştır.

Srinivas ve Ramesh Babu (2012) alüminyum-silisyum karbür metal matris kompozitlerin (Al-SiC MMCs) ASJ ile kesilmesinde penetrasyon yeteneğini çalışmıştır. Proses parametrelerin ANOVA analizi yapılmış, jet penetrasyonu üzerine su jeti basıncı ve ilerleme hızı parametrelerinin katkısı aşındırıcı akış hızından daha fazla bulunmuştur. Wang (2007) alümina seramiklerin ASJ ile kesilmesinde jet

penetrasyonun derinliğini çalışmıştır. Bir boyut analizi tekniğini kullanmış, jet penetrasyonu için tahmini modeller geliştirilmiştir.

1.4.3. Yapılmış deneysel çalışmaların derlemesi

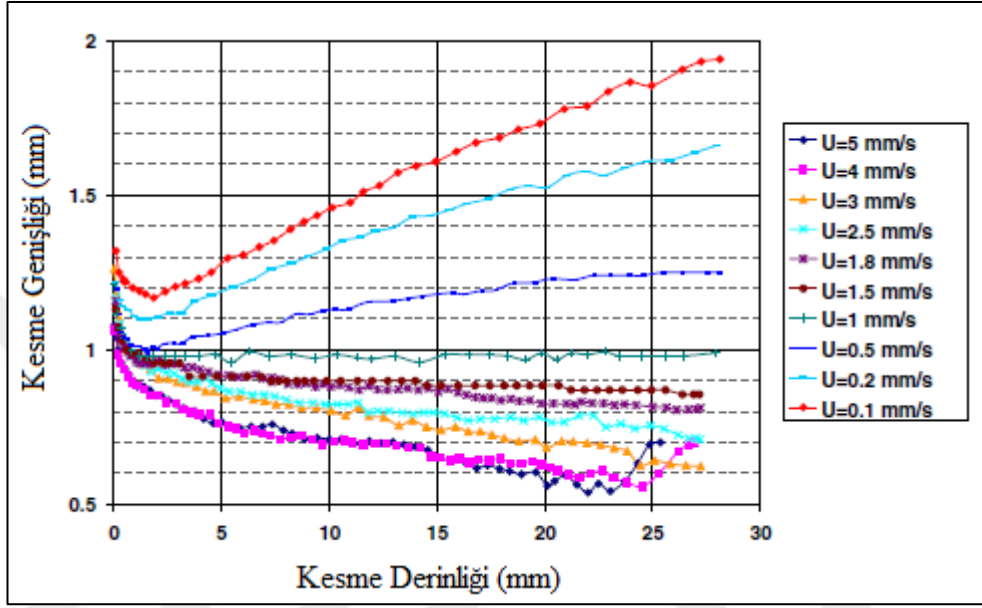
Ma ve Deam (2006) yaptığı çalışmada ASJ ile kesme işleminde oluşan kerf profilinin tahmini için bir korelasyon geliştirmiştir. Kerf geometrisini optik mikroskop ile ölçülmüştür (Şekil 1.20). Ölçümler ile iyi bir kerf şekline uyacak şekilde değişik ilerleme hızları altında kerf profili şekli için basit bir ampirik korelasyon geliştirilmiştir.



Şekil 1.20. Kerf geometrisinin optik mikroskop görüntüleri (farklı ilerleme hızları): (a) 0,2 mm/s; (b) 0,5 mm/s, (c) 1,5 mm/s; (d) 1,8 mm/s; (e) 2,5 mm/s; (f) 3,0 mm/s; (g) 4,0 mm/s; (h) 5,0 mm/s (Ma ve Deam, 2006)

Kerf genişliği için geliştirilen korelasyon çalışmasında gelişmekte ve tam gelişmiş bölge şeklinde iki bölgeden olduğu gösterilmiştir. İlk bölge (gelişmekte olan bölge) kesme derinliğinin yaklaşık 2 mm aşağısına kadardır ve bu oluşum düzgün bir

profilinden bir olukta tamamen gelişmiş bir akışa değişen jetin hız profilinden kaynaklanmıştır. İkinci bölge (tam gelişmiş bölge) ise ilk bölgenin bitimi ile başlamıştır ve kesme hızına bağlı olarak kesme genişliği derinlik ile daha geniş veya daha dar olabilmektedir. Kesme hızına göre kerf genişliği genişlemiş veya daralmıştır (Şekil 1.21).

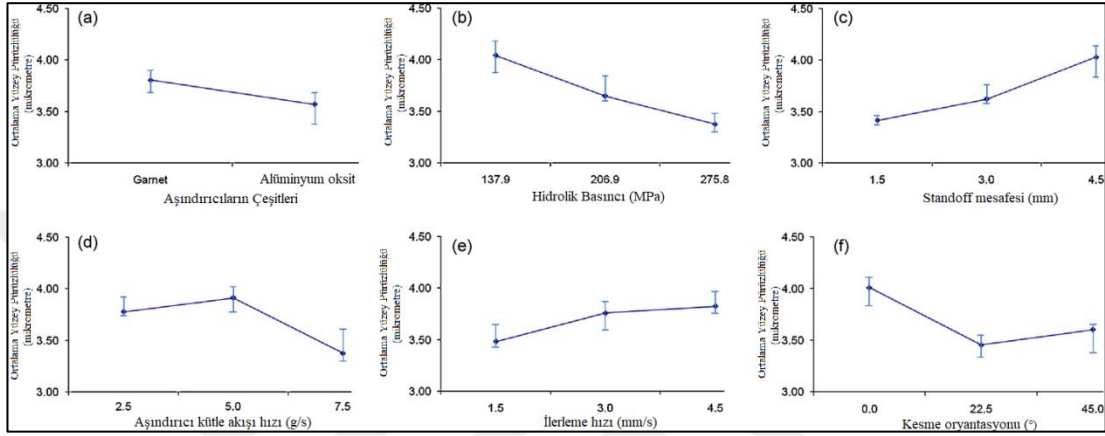


Şekil 1.21. Farklı ilerleme hızlarında kesme genişliği ile kesme derinliği arasında ilişki (Ma ve Deam, 2006)

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 bileşenidir. Çalışmaya göre üst kerf genişliği, nozul ile malzeme yüzeyi arasındaki uzaklık olan standoff mesafesi ve su basıncı parametrelerinin artması ile artmış, ilerleme hızı parametresine göre azalmıştır (genel eğilimler bu şekilde görülmüştür). Jegaraj ve Babu (2005) yaptığı çalışmada orifis ve odaklama nozulu çaplarının ASJ üzerine kesme kalitesini ve verimliliğini araştırmıştır. 6063-T6 alüminyum alaşımı kullanılmış ve ayrıca denenen deneysel parametre olarak su jeti basıncı ve aşındırıcı kütle akışı hızı kullanılmıştır. Grafik davranışlarına bakıldığında parametre değişimlerinin genel bir artış veya azalış eğiliminde olmadığı düşünülmüştür.

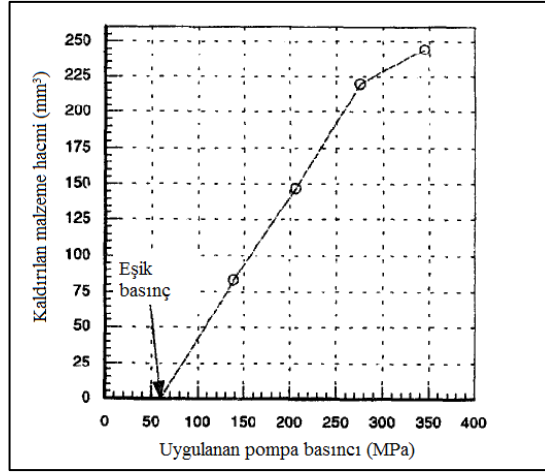
Azmir ve Ahsan (2009) cam-epoksi kompozit levhaların ASJ ile işlenmesini çalışmıştır. Taguchi deney düzenine ve ANOVA analizine göre deney

parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf incelme oranını etkilerini belirlemiştir. Hidrolik basınç yüzey pürüzlülüğüne, aşındırıcı malzeme çeşidi ise kerf incelme oranına en çok etkisi olduğu düşünülmüştür. Hidrolik basıncı ve aşındırıcı kütle akışı hızının artması, standoff mesafesi ve ilerleme hızının azalması işleme performansını geliştirebilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne parametrelerin etkileri Şekil 1.22’de gösterilmiştir.



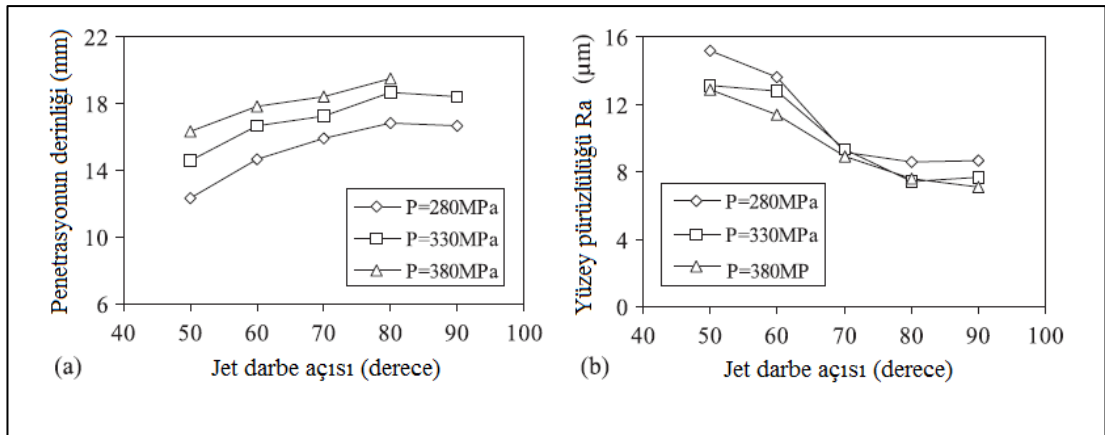
Şekil 1.22. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne parametrelerin etkileri (Azmir ve Ahsan, 2009)

Palleda (2007) yaptığı çalışmada ASJ ile delik açma işleminde malzeme kaldırma hızı ve sivrilme açlarına değişik kimyasalların kullanımı, bu kimyasalların farklı konsantrasyonları ve farklı standoff mesafelerinin etkilerini incelemiştir. Standoff mesafesi belli bir sınır değere artmasına kadar malzeme kaldırması artmış sınırın aşılması durumunda ise malzeme kaldırması azalmıştır. Saf su yerine fosforik asit ve aseton gibi aktif kimyasal sıvıların kullanılması ile malzeme kaldırması daha fazla olmuştur. Kantha Babu ve Krishnaiah Chetty (2003) yaptığı çalışmada lokal garnet aşındırıcılarının ASJ ile alüminyumun kesiminde geri dönüşümünün (yeniden kullanımı) etkisini araştırmıştır. Geri dönüşümü yapılmış aşındırıcıların kullanılması ile kesme yüzeyinin paralellliği artmış ve kerf sivrilmesi azalmıştır. Momber ve diğ. (1997) yaptığı çalışmada ASJ ile lamel grafitli dökme demirin kesilmesini araştırmıştır. Uygulanan pompa basıncı ile malzeme kaldırma hacmi arasında ilişki incelendiğinde eşik basınç değeri Şekil 1.23’te gösterilmiştir. Malzeme kaldırma verimliliği çok yüksek pompa basınçları ve aşındırıcı partikül hızlarında azalmıştır.



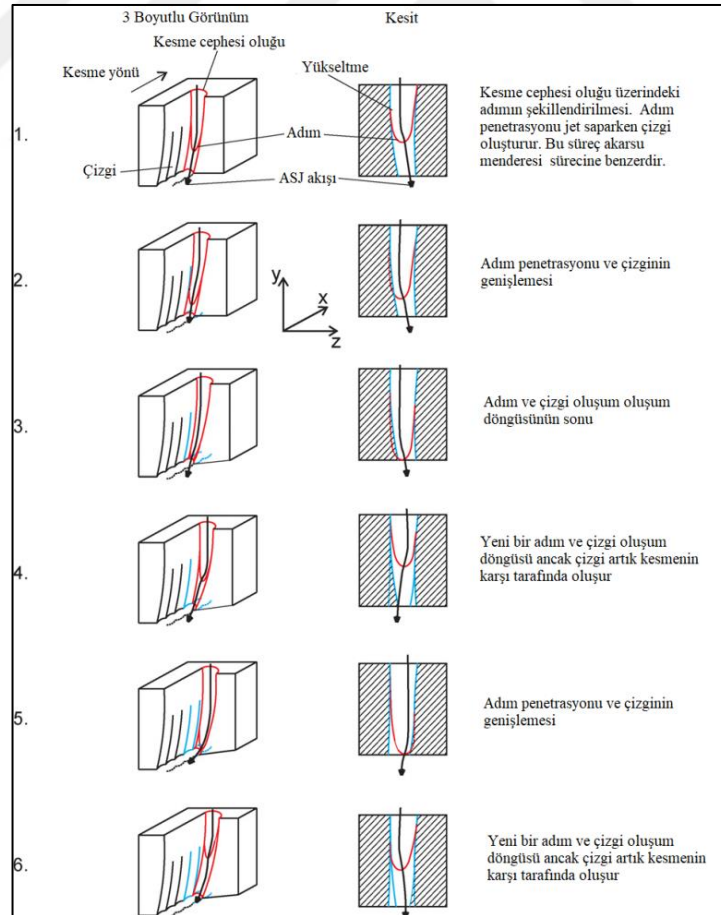
Şekil 1.23. Uygulanan pompa basıncı ve kaldırılan malzeme hacmi arasındaki ilişki (Momber ve diğ., 1997)

Wang ve diğ. (2003) yaptığı çalışmada alümina seramiği (% 87 fayans şeklinde) ve fenolik dokumalı polimer matris kompozitinin ASJ ile kesilmesinde jet ileri darbe açıları ve çok pasolu kesme işlemlerinin hem tek başına hem de beraber olduğunda kesme performansını geliştirmesi için deneysel bir çalışma yapmıştır. Tek pasolu kesme işleminde optimum jet darbe açısı 80° bulunmuş (Şekil 1.24) ve ayrıca çok pasolu kesme tekniğinin kesme kabiliyetini arttırdığı ifade edilmiştir. Polimer matris kompozitlerinde delemantasyon kusuru oluşumu nedeniyle tek pasolu kesimin seçilmesi önerilmiştir.



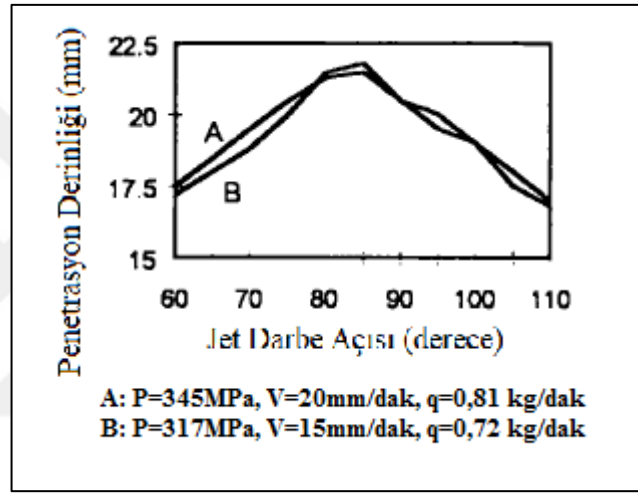
Şekil 1.24. Tek pasoda polimer matrisli kompozitlerin kesilmesinde kerf karakteristikleri üzerine jet darbe açısının etkisi (Wang ve diğ., 2003)

Shanmugam ve Masood (2009) yaptığı çalışmada iki çeşit kompozitin (epoksi ön emdirilmiş grafit dokumalı kumaş ve cam epoksi) ASJ ile kesilmesiyle oluşan kerf sivrilme açısını incelemiştir. İlerleme hızı, su basıncı, aşındırıcı kütle akışı hızı, 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. Orbanic ve Junkar (2008) ASJ ile kesmede çiziklenme oluşum mekanizmasını analiz etmiştir. Bu oluşum mekanizması doğadan ve teknik dünyadan iki benzeşim ile açıklanmıştır. İlk benzeşim akarsu menderesi şeklinde olup jet akışının sapmasına neden olan kesme cephesindeki karışıklıktan meydana gelmiştir. Bu karışıklık kesme cephesindeki adımlardan meydana gelmiştir. Adım oluşum nedenlerini açıklamak için ikinci benzeşim kullanılmış ve bu adım 90° pnömatik konveyör bükümünün aşımı şeklinde anlatılmıştır. ASJ tarafından yüzeyde çiziklenme oluşumunun tahmini süreci Şekil 1.25’de anlatılmıştır.



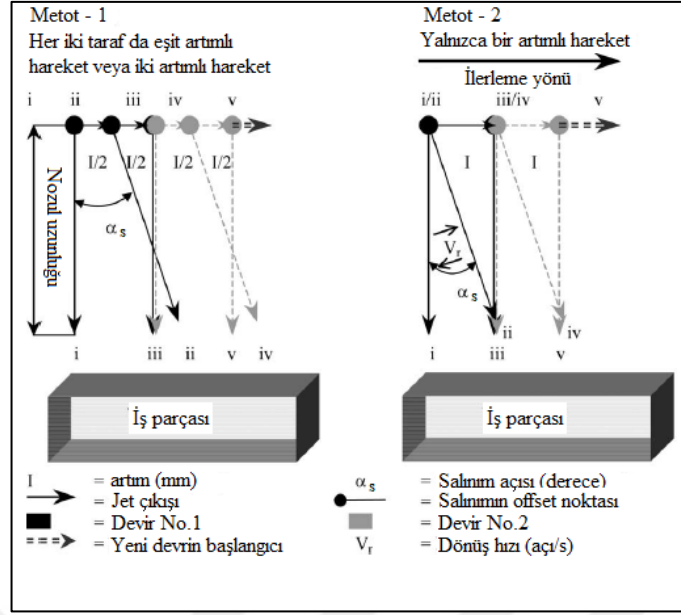
Şekil 1.25. ASJ tarafından yüzeyde çiziklenme oluşumunun öngörülen süreci (Orbanic ve Junkar, 2008)

Hascalik ve diğ. (2007) Ti-6Al-4V alaşımının ASJ ile işlenmesinde ilerleme hızının etkisini araştırmıştır. Çalışmada seçilen koşullarda ilerleme hızının artmasıyla kerf sivrilme oranı ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) de artmıştır. Siores ve diğ. (1996) seramiklerin ASJ ile kesilmesini nozul salınım tekniği ile geliştirmiştir. Salınımın farklı açı ve frekanslardaki etkileri incelenmiş ve açılı kesimde toplam penetrasyon derinliği Şekil 1.26'da gösterilmiştir. Söz konusu şekle göre maksimum toplam penetrasyon derinliği için optimum jet darbe açısı 80-85° arasındadır. Ayrıca çalışmada salınım uygulanması ile salınımsız kesime göre pürüzsüz yüzey bölgesinin derinliği %30'dan fazla artmıştır.



Şekil 1.26. Toplam penetrasyon derinliği üzerine jet darbe açısının etkisi (Siores ve diğ., 1996)

Wang ve Zhong (2009) alümina seramiklerin nozul salınımı ile çok pasolu ASJ kesiminin kesme derinliğini arttırmasını incelemiştir. Tek pasolu kesime göre nozul salınımı uygulanmasında kesme derinliği önemli artış göstermiştir. Ayrıca kalın malzemelerde (çalışmada 25,4 mm'dir) çok pasolu kesimde toplam kesme derinliğinin arttığı ifade edilmiştir. Chen ve diğ. (2002a) değişik nozul salınım tekniklerini (Şekil 1.27) geliştirerek ASJ işleme sürecini optimize etmiştir. Çalışmada en iyi kesim sonuçları için optimum salınım frekansı 3 Hz, optimum salınım açısı 2,5° bulunmuştur. Gudimetla ve diğ. (2002) endüstriyel seramiklerin ASJ ile kesilmesinde kerf oluşumlarını analiz etmiştir. Kerf genişliği ilerleme hızının artması ile azalmıştır.

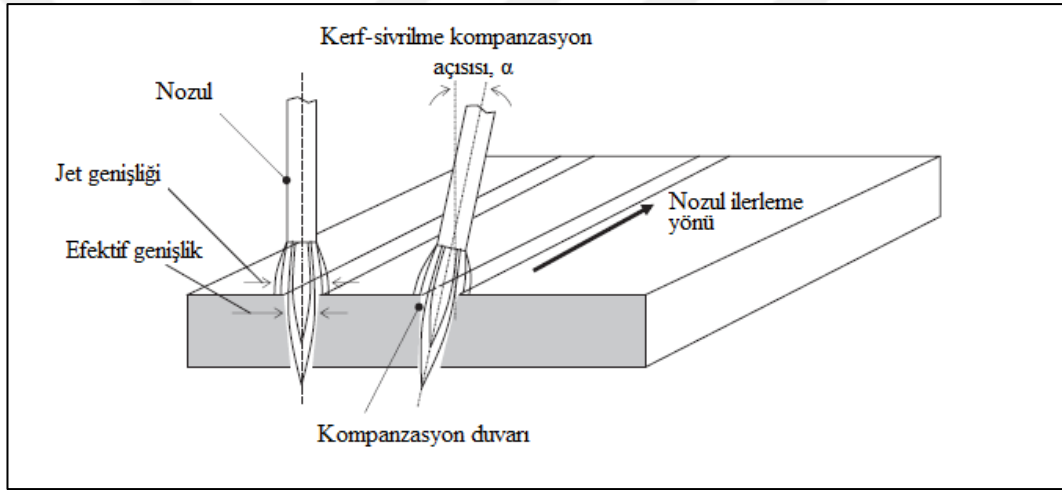


Şekil 1.27. Değişik salınım tekniklerinin şematik gösterimi (Chen ve diğ., 2002a)

Lemma ve diğ. (2005) yaptığı çalışmada sünek malzemelerin ASJ ile salınımlı kesilmesinde maksimum kesme derinliği ve erozyonların mekaniğini araştırmıştır. Testlerde optimum salınım parametreleri seçildiğinde yumuşak çelik numunelerde yaklaşık %30, alüminyum numunelerde yaklaşık %20 kesme performansının geliştiği görülmüştür. Chen ve diğ. (2002b) ASJ ile işlemede nozul salınımı yöntemiyle işlenen yüzeylerde partikül kirlenmesinin minimize edilmesini çalışmıştır. Partikül kirlenmesinin kesme derinliğine, ilerleme hızına ve pompa basıncına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Gömülü partiküller tarafından kirlenmeyi azaltmak için nozul salınım tekniği kullanıldığında %200'e (aynı deney koşulları altında geleneksel ASJ yöntemine göre) kadar kirlenmenin düşürülebileceği bulunmuştur. Chen ve diğ. (1998) yaptığı çalışmada seramik malzemelerin kesilmesinde nozul salınımını kullanmıştır. Salınım uygulanması ile pürüzsüz (düzgün) bölge derinliğinin %30'dan fazla arttırılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca maksimum toplam penetrasyon derinliği için optimum jet darbe açısı 80-85° arası bulunmuştur. Lemma ve diğ. (2002a) ASJ ile sünek malzemeleri kesme işleminde nozul salınımını araştırmıştır. Deneysel sonuçlara göre salınım ile kesme yüzeyinin ortasından alınan ortalama Ra değeri %30'a kadar iyileşmiştir. Yumuşak çeliği işlemek için salınım açısının yüksek, frekansının düşük olması gerektiği ifade edilmiştir. Alüminyum numuneleri kesmek için (daha iyi bir yüzey kalitesi için) ise daha yüksek salınım açıları gerektiği

ifade edilmiştir. Lemma ve diğ. (2002b) cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ASJ ile salımlı kesilmesini araştırmıştır. Çalışmada bazı numunelerde ölçülen Ra değeri %20'ye kadar iyileşmiştir (salımsıza göre). Yüksek salınım açısı ve frekansı kullanıldığında yüzey kalitesinde gelişmenin daha iyi olduğu ifade edilmiştir.

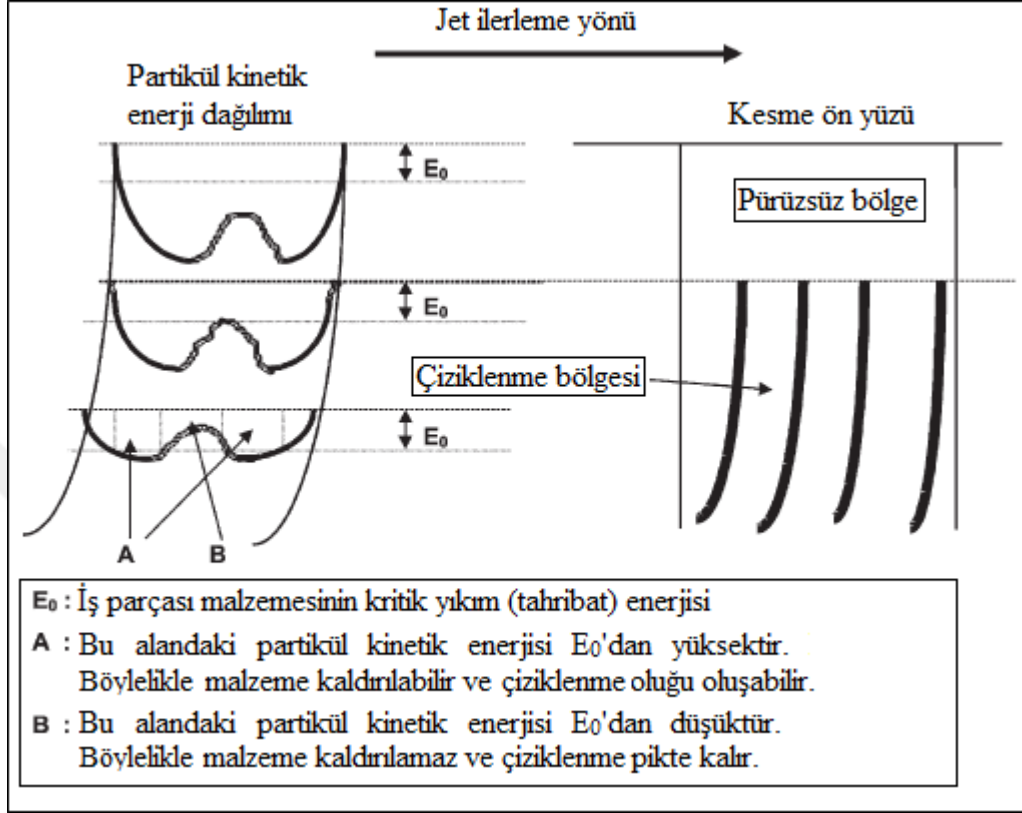
Shanmugam ve diğ. (2008) alümina seramiklerin ASJ ile işlenmesinde kerf sivrilmesini minimize etmek için bir kompanzasyon tekniğini (Şekil 1.28) kullanmıştır. Çalışmada diğer kesme parametrelerine bağlı olarak kerf sivrilme kompanzasyon açısı 4-5° aralığında olmasıyla kerf sivrilme açısı minimize olarak sıfıra yaklaşabilmiştir. Su basıncı ve aşındırıcı kütle akış hızı arttığında kerf sivrilme açısı azalmış, ilerleme hızı ve standoff mesafesi ise aksi trend göstermiştir.



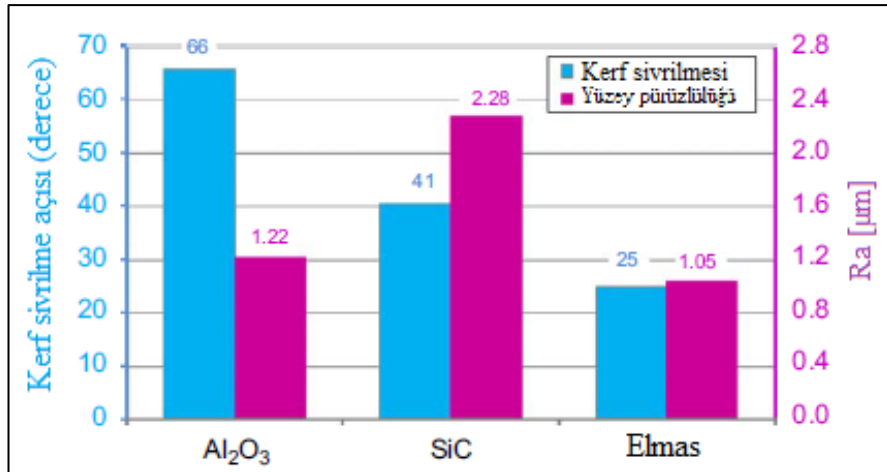
Şekil 1.28. Normal (sol taraf jet kesimi) ve kerf-sivrilme kompanzasyonlu (sağ taraf jet kesimi) ASJ kesiminin şematik olarak gösterimi (Shanmugam ve diğ., 2008)

Khan ve Haque (2007) camın değişik aşındırıcı malzemeler ile ASJ işleme performansını araştırmıştır. Çalışmada kerf sivrilmesi standoff mesafesi ile artmıştır. Garnet aşındırıcıları Al_2O_3 ve SiC aşındırıcılarına göre kesmede geniş sivrilme oluşturmuştur. Basıncın artmasıyla sivrilme azalmış, besleme hızı artması ile de sivrilme artmıştır. Standoff mesafesi artması ile jetin odak alanı artmış ve kesmenin ortalama genişliği artmıştır. Besleme hızının artması kesmenin ortalama genişliğini azaltmıştır. Basıncıdaki artış kesmenin ortalama genişliğinde artışa neden olmuştur. SiC aşındırıcısı diğer aşındırıcılara göre daha sert bir malzeme olduğu için kesme yeteneğinin daha fazla olduğu ve bu nedenle kesmenin ortalama genişliğini daha yüksek oluşturduğu ifade edilmiştir. Momber ve Kovacevic (1997) kaya benzeri

edilmiştir. Ayrıca alaşım elementinin ASJ kesme işleminde önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 1.30. Çiziklenme oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (Chen ve Siores, 2001)



Şekil 1.31. Değişik aşındırıcıların kerf sivrilme ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri (Axinte ve diğ., 2009)

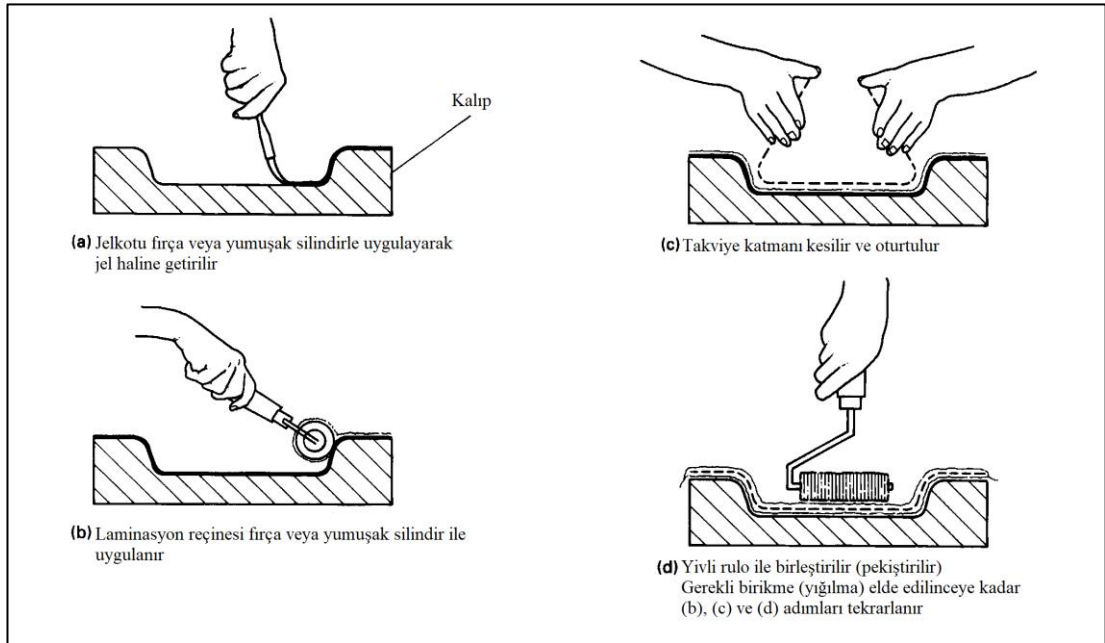
Azmir ve Ahsan (2008) ASJ ile işlemede cam epoksi kompozitinin işleme yüzeyini araştırmıştır. Taguchi metodu ve ANOVA analizi ile efektif işleme için ASJ işleme parametreleri optimize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için aşındırıcı malzeme, hidrolik basınç ve ilerleme hızı önemli kontrol faktörü olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için en önemli kontrol faktörü aşındırıcı malzeme çeşidi olmuştur. Hidrolik basınç ve ilerleme hızının eşit öneme sahip olduğu ifade edilmiştir.



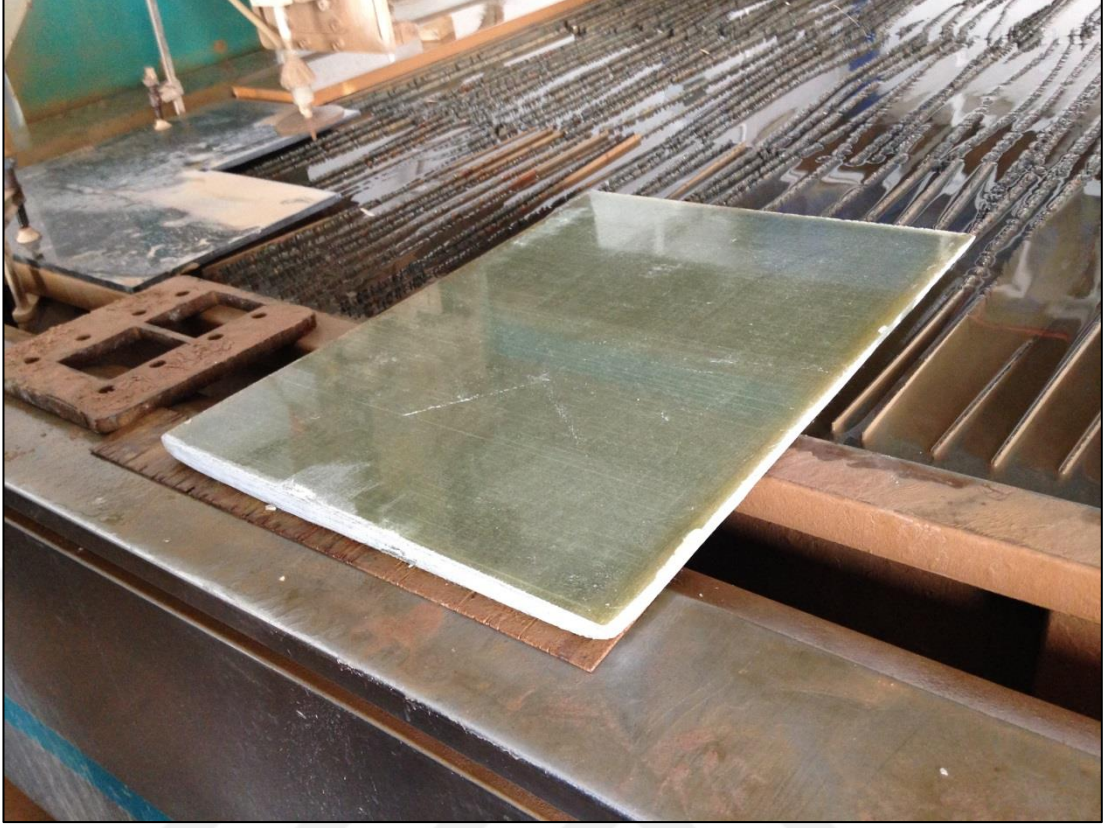
2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhalar kullanılmıştır. Takviyeli elemanı olan cam fiberin çeşidi E-camı olarak seçilmiş ve Metyx kompozit marka 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 levhalar el yatırması yöntemi ile Sirena Marine Denizcilik Sanayi ve Ticaret A.Ş.' de üretilmiştir. El yatırma yönteminin şematik anlatımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Dörtlü dikişli örme fiberler (600x400) mm'lik dikdörtgen biçiminde kesilmiş ve levhalar yaklaşık bu boyutta üretilmiştir (Şekil 2.2). Levhalarda kalınlık etkisini araştırmak için üç farklı kalınlığa sahip levha hazırlanmıştır. Her levhanın kalınlığına göre, 9, 14 ve 19 parça kat için dörtlü dikişli örme cam fiberleri yığılmış ve plakaların son kalınlıkları 18, 28 ve 38 mm olarak ölçülmüştür. Plakanın son cam fiber ağırlık oranı 0,63 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.1. El yatırması yönteminin şematik gösterimi (Ball, 1994)



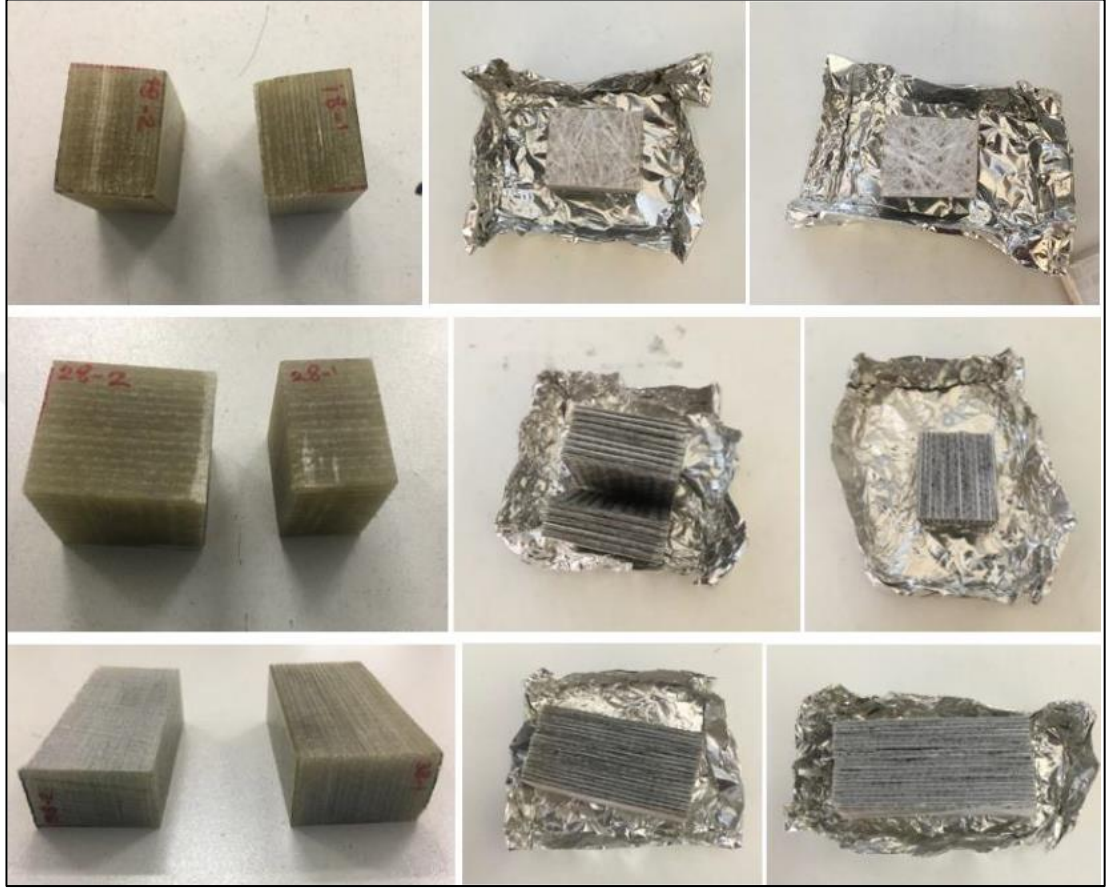
Şekil 2.2. Üretilen levhalardan örnek görüntü

El yatırması ile üretilen levhaların karakterizasyonunda, kül yakma fırınında gerçekleştirilen yakma işlemi ile fiber oranı tayini Teleteks A.Ş.-Metyx Composites'de yapılmıştır. Şekil 2.3'te levhalardan numune alınan bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Fiber oranı tayini için numune alınan bölgeler

EN ISO 1172 test standardına uygun olarak 600 ± 5 °C test sıcaklığında her bir numuneden iki adet numune alınarak yakma metodu uygulanmıştır. Yakma sonrası kalan cam fiber kalıntıları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Numunelerin yakma öncesi ve sonrası görüntüleri

Yakma sonuçları Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Tabloya göre 18 ve 28 mm kalınlığa sahip numunelerde sapma düşük çıkmıştır. 38 mm kalınlığına sahip numunelerdeki sapma diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır. Sapma oranları düşük bulunmuştur. Sonuç olarak cam fiber oranı $\%63\pm 3$ olarak tayin edilmiş, levhaların deneysel çalışmalar için uygun olduğu şeklinde yorumlanmış ve kabul edilmiştir.

Malzeme karakterizasyonuna ait diğer bir test olan üç nokta eğme testi TS EN ISO 178 standardına uygun olarak Tübitak MAM'da yapılmıştır. Test koşulları: E-modülü tespit hızı 2 mm/dak, test hızı 10 mm/dak, 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.

Tablo 2.1. Yakma testi sonuçları

	18	28	38
1.Numune	%62,99	%60,37	%63,53
2.Numune	%63,02	%59,71	%65,44
Ortalama	%63,01	%60,04	%64,49
Standart Sapma	0	0,5	1,4
Varyans	0	%1	%2

2.2 Yöntem

ASJ ile kesme işlemleri Robjet RJP 50 HP marka-modelli (Şekil 2.5) yüksek basınçlı aşındırıcılı su jeti tezgâhında yapılmıştır (Şekil 2.6). Çalışmada nozul darbe açısı ilk aşamada sabit tutulmuş ve 90° olarak ayarlanmıştır. Nozul çapı 1,02 mm olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında nozul darbe açısının etkilerini inceleyebilmek için 90°, 87,5°, 85°, 82,5°, 80°, 77,5° ve 75° olacak şekilde yedi farklı nozul darbe açısı seçilmiş ve eğimli (farklı nozul darbe açılı) ASJ kesimleri yapılmıştır (Şekil 2.7). Çalışmada aşındırıcı malzeme olarak ticari adı Supreme Garnet olan garnet aşındırıcısı kullanılmış ve garnet boyutu 80 mesh seçilmiştir.



Şekil 2.5. ASJ kesme işleminde kullanılan cihaz (URL-5)



Şekil 2.6. ASJ ile kesme işlemi



Şekil 2.7. Nozul eğimli ASJ kesimleri

2.3 Deneş Düzeni

Çalışmanın ilk aşamasında beş faktörlü ve üç seviyeli (3^5) deneş parametreleri belirlenmiş (Tablo 2.2), buna göre deneş düzeni planlanmıştır.

Tablo 2.2. Deneş parametrelerinin faktörleri ve seviyeleri

Deneş Parametrelerinin Belirlenmesi				
Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Birim
Basınç	260	290	320	MPa
Aşındırıcı Kütle Akışı Hızı	200	250	350	g/dak
İlerleme Hızı	8	2,5	4	mm/s
Standoff Mesafesi	5	7	10	mm
Malzeme Kalınlığı	18	28	38	mm

Seçilen deney parametrelerinin faktörleri ve seviyelerine göre Taguchi ortogonal dizi tasarımı dizayn edilmiş (Tablo 2.3) ve Taguchi L_{27} (3^5) deney deseni kullanılmıştır. Deney desenine göre 27 adet ASJ kesme deneyi yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, bulunan optimum deney parametrelerine (yüzey pürüzlülüğü için) göre ASJ nozuluna eğim verilerek eğim açısının kerf yüzeyine etkisi araştırılmıştır. Uygulan nozul eğim açıları Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. L_{27} Taguchi ortogonal dizi tasarımı

Deney No	Basınç	Aşındırıcı Kütle Akışı Hızı	İlerleme Hızı	Standoff Mesafesi	Malzeme Kalınlığı
	Mpa	(g/dak)	(mm/s)	mm	mm
1	260	200	8	5	18
2	260	200	8	5	28
3	260	200	8	5	38
4	260	250	2,5	7	18
5	260	250	2,5	7	28
6	260	250	2,5	7	38
7	260	350	4	10	18
8	260	350	4	10	28
9	260	350	4	10	38
10	290	200	2,5	10	18
11	290	200	2,5	10	28
12	290	200	2,5	10	38
13	290	250	4	5	18
14	290	250	4	5	28
15	290	250	4	5	38
16	290	350	8	7	18
17	290	350	8	7	28
18	290	350	8	7	38
19	320	200	4	7	18
20	320	200	4	7	28
21	320	200	4	7	38
22	320	250	8	10	18
23	320	250	8	10	28
24	320	250	8	10	38
25	320	350	2,5	5	18
26	320	350	2,5	5	28
27	320	350	2,5	5	38

Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan ASJ nozulu eğim açıları

Parametre	Deney	Deney	Deney	Deney	Deney	Deney	Deney
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7
Eğim açısı (Jet darbe açısı)	90°	87,5°	85°	82,5°	80°	77,5°	75°

2.4. Ölçüm ve Analiz

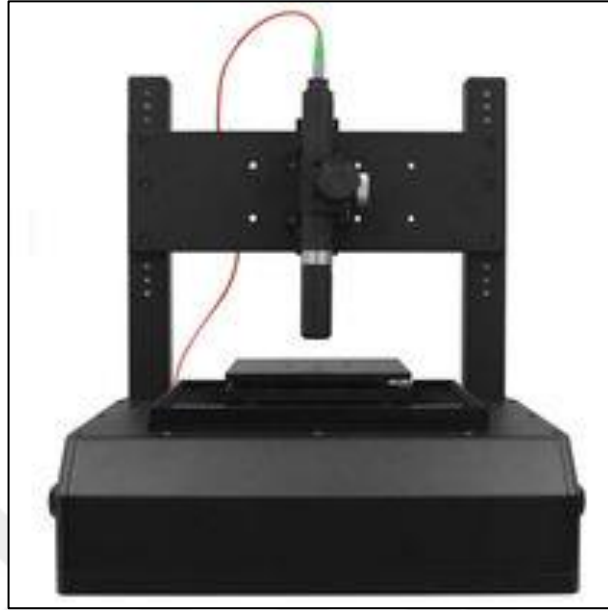
Seçilen parametreler ve tasarlanan deney tasarımına göre cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhaların ASJ ile kesilmesinde kesme performanslarını belirleyebilmek için kesim sonrasında üst kerf genişlikleri ve kesme yüzeyi pürüzlülükleri (başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri) ölçülmüştür. Kesme yüzeyinde iki noktadan pürüzlülük ölçümü alınmıştır. İlk ölçüm, malzeme üst yüzeyinden 3-6 mm arası bir aralıktan alınmış ve buna başlangıç yüzey pürüzlülüğü denmiştir. İkinci ölçüm, malzeme kalınlığının tam ortasından alınmıştır. Birinci ve ikinci ölçümlerin ortalaması bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak isimlendirilmiştir. Üst kerf genişlikleri Nikon MA100 optik mikroskop cihazında (Şekil 2.8) ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülükleri (Ra) Nanovea PS503D optik profilometri cihazı (Şekil 2.9) ile ölçülmüştür.



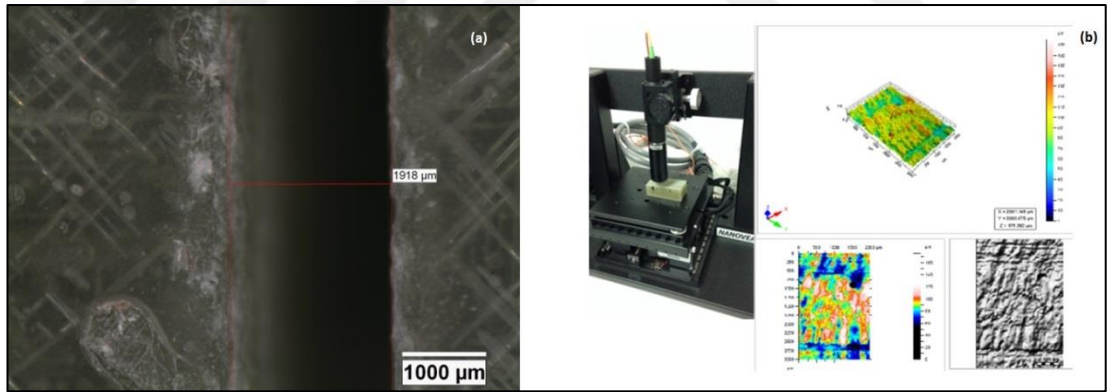
Şekil 2.8. Nikon MA100 optik mikroskop cihazı (URL-6)

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, aritmetik ortalama pürüzlülük (R_a) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler (Şekil 2.10 (a) ve (b)) en az üç kez tekrarlanmış

ve ortalamaları alınmıştır. Genel lineer modeller (regresyonlar) uygulanmış ve Minitab 17 istatistik yazılımı ile ANOVA analizi yapılmıştır.

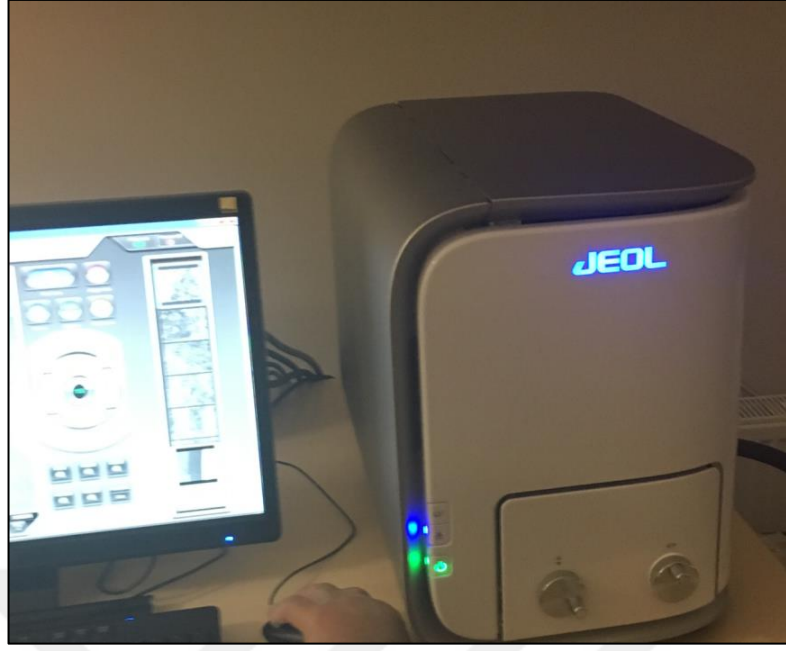


Şekil 2.9. Nanovea PS503D optik profilometri cihazı (URL-7)



Şekil 2.10. Ölçüm işlemleri: (a) Üst kerf genişliği; (b) yüzey pürüzlülüğü

ASJ ile kesilen numunelerin kesme performanslarını ve kesilme mekanizmalarını inceleyebilmek için Jeol JCM-6000 Benchtop masaüstü SEM cihazı (Şekil 2.11) aracılığı ile kesme yüzeyleri görüntüleri alınmıştır. Görüntülerin alınmasından önce kesme yüzeylerinin karbon kaplaması yapılmıştır.



Şekil 2.11. Jeol JCM-6000 Benchtop masaüstü SEM cihazı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bulgular

3.3.1. Taguchi deney düzenine göre yapılan kesimler

Cam fiber takviyeli vinil ester kompozitinin ASJ ile kesilmesinde deney parametrelerinin kesme performansına etkisi ANOVA analizi ile gerçekleştirilmiştir. Kesme performansları: üst kerf genişliği (W_t), başlangıç (R_{ai}) ve bölge ortalama (R_{az}) yüzey pürüzlükleri, olarak belirlenmiştir. ANOVA analizinde tüm aralıklar için %95 güven seviyesi, iki taraflı güven aralığı türü ve karelerin toplamı testleri için tip III seçilmiştir. Tablo 2.3'te belirlenen L27 Taguchi ortogonal dizi tasarımındaki deney parametreleri seviyelerine göre yapılan ASJ kesimlerinde kesme performansları sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmiştir. P değerlerini değerlendirmede Rosner'ın (2010) anlamlılık yargılama ilkeleri kullanılmıştır.

Üst kerf genişliği için ANOVA sonuçları Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere standoff mesafesi en etkili (%73,35) deneysel parametre olarak bulunmuştur. Standoff mesafesinin p değeri 0,001'den küçük olduğu için çok yüksek istatistiksel anlamlılık değeri gösterdiği ifade edilmiştir. İlerleme hızı ikinci en yüksek (%10,55) deney parametresi olarak bulunmuş ve ilerleme hızı p değeri istatistiksel anlamlılığın yüksek bir seviyesini ($0,001 < p\text{-değeri} < 0,01$) göstermiştir. Malzeme kalınlığı üçüncü en yüksek (%4,42) deney parametresi olarak bulunmuş ve malzeme kalınlığı istatistiksel anlamlılık ($0,01 < p\text{-değeri} < 0,05$) göstermiştir. Basınç deney parametresi sınırda istatistiksel anlamlılık ($0,05 < p\text{-değeri} < 0,10$) göstermiş ve bu nedenle önemsiz (%2,80) kabul edilmiştir. Ayrıca aşındırıcı kütle akış hızı deney parametresi de önemsiz ($p\text{-değeri} > 0,10$) olarak kabul edilmiştir.

Başlangıç yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere standoff mesafesi çok yüksek ($p\text{-değeri} < 0,001$) istatistiksel anlamlılık göstermiş ve en etkili (%35,11) deneysel parametre olarak bulunmuştur. Basınç ve aşındırıcı kütle akışı hızı deney parametreleri istatistiksel anlamlılığın yüksek

bir seviyesini ($0,001 < p\text{-değeri} < 0,01$) göstermiştir. Basınç (%18,12) ve aşındırıcı kütle akışı hızı (%22,83) deney parametreleri neredeyse eşit derecede anlamlı olduğu bulunmuştur. İlerleme hızı ve malzeme kalınlığı deney parametreleri önemsiz ($p\text{-değeri} > 0,10$) olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1. Taguchi deney düzenine göre ASJ kesme sonuçları

Deney No	Üst Kerf Genişliği (W_t)	Başlangıç Yüzey Pürüzlülüğü (R_{ai})	Bölge Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_{az})
	μm	μm	μm
1	1400,5	4,60	4,30
2	1378,0	4,15	3,70
3	1217,5	3,28	3,89
4	1602,5	3,43	3,99
5	1933,5	3,77	3,55
6	1634,5	4,11	3,66
7	1849,0	3,72	3,92
8	1983,5	4,19	3,75
9	1883,5	3,36	3,24
10	1842,5	28,51	16,53
11	1949,0	4,35	3,85
12	1887,5	8,78	7,48
13	1300,0	3,21	3,64
14	1379,0	3,56	4,58
15	1382,5	4,46	19,05
16	1378,0	37,33	24,78
17	1565,5	12,87	8,16
18	1551,0	17,01	16,71
19	1409,5	33,63	46,18
20	1577,0	37,08	20,15
21	1474,5	36,62	21,48
22	1788,0	4,35	3,78
23	1787,5	4,52	4,48
24	1661,5	4,93	4,59
25	1443,0	3,46	3,68
26	1439,5	4,37	3,25
27	1548,5	9,83	6,61

Tablo 3.2. Üst kerf genişliği için varyans analizi

Kaynak	Toplam Serbestlik Derecesi	Karelerin Ardışık Toplamları	Karelerin Ayarlanmış Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Yüzdesi
Basınç	2	36972	36972	18486	2,89	0,085	%2,80
Aşındırıcı Kütle Akışı Hızı	2	14673	14673	7337	1,15	0,342	%1,11
İlerleme Hızı	2	139211	139211	69605	10,88	0,001	%10,55
Standoff Mesafesi	2	967779	967779	483890	75,64	0	%73,35
Malzeme Kalınlığı	2	58376	58376	29188	4,56	0,027	%4,42
Hata	16	102363	102363	6398			%7,76
Toplam	26	1319374					%100,00

Tablo 3.3. Başlangıç yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi

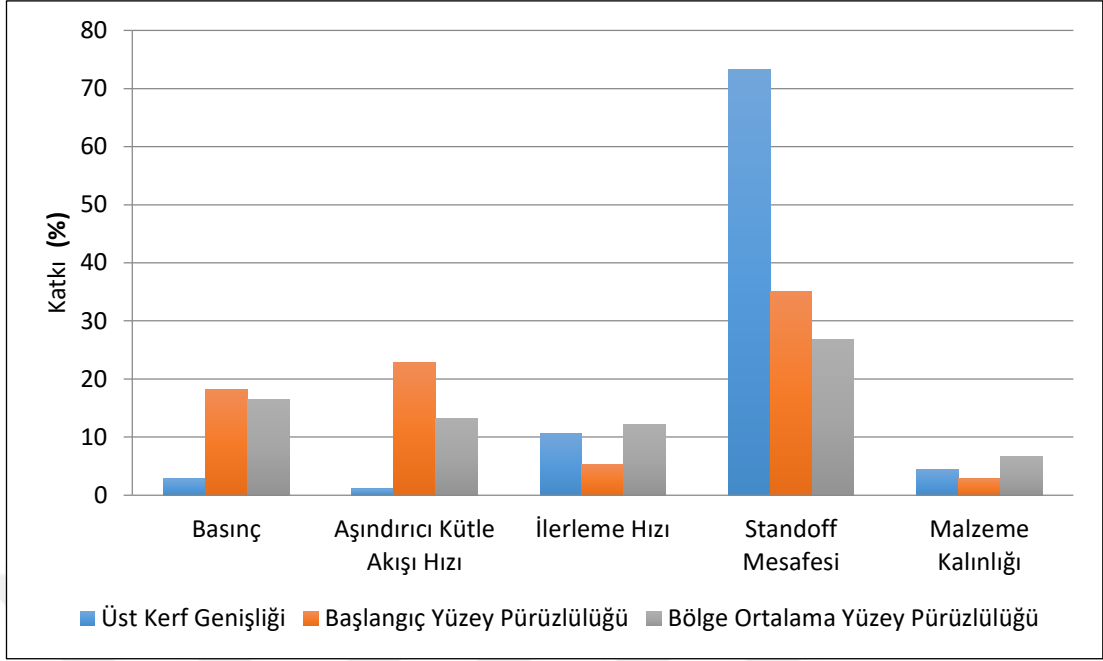
Kaynak	Toplam Serbestlik Derecesi	Karelerin Ardışık Toplamları	Karelerin Ayarlanmış Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Yüzdesi
Basınç	2	685,5	685,5	342,75	9,18	0,002	%18,12
Aşındırıcı Kütle Akışı Hızı	2	863,8	863,8	431,91	11,57	0,001	%22,83
İlerleme Hızı	2	198,7	198,7	99,33	2,66	0,101	%5,25
Standoff Mesafesi	2	1328,3	1328,3	664,15	17,79	0	%35,11
Malzeme Kalınlığı	2	109,5	109,5	54,75	1,47	0,26	%2,89
Hata	16	597,4	597,4	37,34			%15,79
Toplam	26	3783,2					%100,00

Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları Tablo 3.4’de gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere standoff mesafesi istatistiksel anlamlılığın yüksek bir seviyesini ($0,001 < p\text{-değeri} < 0,01$) göstermiş ve en etkili (%26,71) deney parametresi olarak bulunmuştur. Basınç, aşındırıcı kütle akışı hızı ve ilerleme hızı deney parametreleri istatistiksel anlamlılık ($0,01 < p\text{-değeri} < 0,05$) göstermiştir. Basınç (%16,53), aşındırıcı kütle akış hızı (%13,18) ve ilerleme hızı (%12,22) deney parametrelerinin neredeyse aynı derecede anlamlı olduğu bulunmuştur. Malzeme kalınlığı deney parametresi anlamsız ($p\text{-değeri} > 0,10$) olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3.4. Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi

Kaynak	Toplam Serbestlik Derecesi	Karelerin Ardışık Toplamları	Karelerin Ayarlanmış Toplamları	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F-Değeri	P-Değeri	Katkı Yüzdesi
Basınç	2	427,1	427,1	213,53	5,35	0,017	% 16,53
Aşındırıcı Kütle Akışı Hızı	2	340,3	340,3	170,17	4,26	0,033	% 13,18
İlerleme Hızı	2	315,7	315,7	157,84	3,95	0,04	% 12,22
Standoff Mesafesi	2	689,9	689,9	344,93	8,64	0,003	% 26,71
Malzeme Kalınlığı	2	171	171	85,51	2,14	0,15	% 6,62
Hata	16	639,1	639,1	39,94			% 24,74
Toplam	26	2583,1					% 100,00

Her faktörün üst kerf genişliğine, başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin grafiksel gösterimi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Standoff mesafesi deney parametresi söz konusu kesme performansı çıktıları için en etkili parametre olduğu daha açık bir şekilde görülmüştür. Söz konusu şekle göre standoff mesafesi, basınç ve aşındırıcı kütle akışı hızı parametrelerinin yüzde katkısı davranışına bakıldığında başlangıç yüzey pürüzlülüğünün bölge ortalama yüzey pürüzlülüğüne göre bu parametrelerinin yüzde katkısı daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 3.1. Deney parametrelerinin etkileri

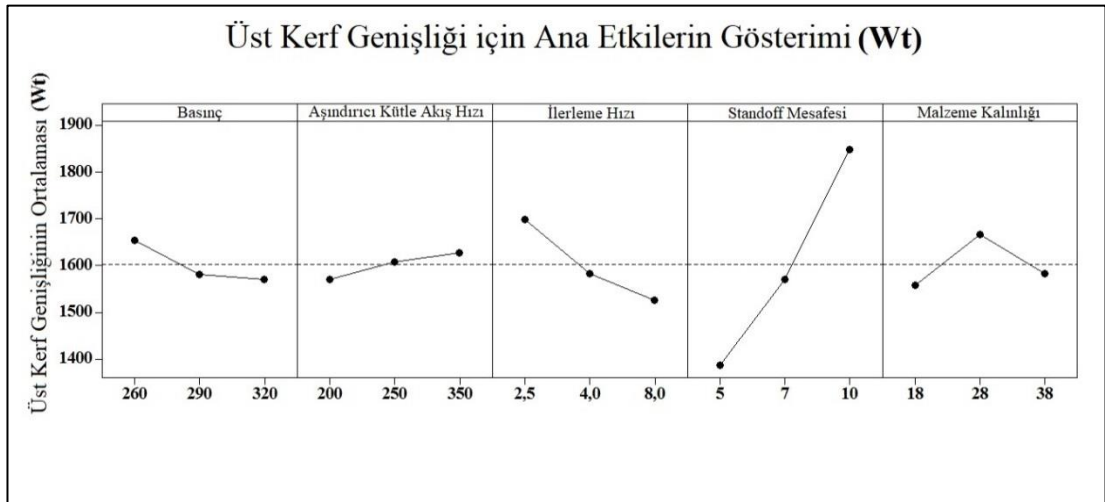
Üst kerf genişliği için ANOVA analizi yapılmış olup Şekil 3.2’de deneysel parametre seviyelerinin etkisi gösterilmiştir. Standoff mesafesi önceden de bahsedildiği üzere en etkili deney parametresi bulunmuştur ve söz konusu mesafe 5 mm’den 10 mm’ye arttığı zaman üst kerf genişliği önemli derecede artmıştır. Wang (1999), Wang ve Wong (1999) bu davranışı, su jetinin karıştırma borusundan çıkışı sonrası yayılması ile açıklamıştır. Su jeti yayılması, standoff mesafesi ile artmaktadır ve bu da üst kerf genişliğini aynı yönde etkilemektedir. Ayrıca, Ma ve Deam (2006) standoff mesafesi ve kesme hızının kerf şeklini değiştiren iki kesme parametresi olduğunu bildirmiştir. Sonuç olarak, bahsedilen çalışmalar ve Sreekesh ve Govindan (2014)’ın çalışması ile standoff mesafesinin kerf genişliğine etkisi sonuçlarımız ile uyumlu bulunmuştur.

İlerleme hızı, üst kerf genişliği için ikinci en yüksek etkili deneysel parametre olarak bulunmuş ve son derece etkili olmuştur. İlerleme hızı üst kerf genişliğine ters etki göstermiş ve ilerleme hızı 2,5 mm/s’den 8 mm/s’ye çıktığında üst kerf genişliği böylece azalmıştır. Deney malzemesi üzerine çarpan parçacık sayısının ilerleme hızının artması ile azaldığı düşünülmüştür. Böylece, kesme verimliliği azalarak farklı kerf genişliklerine neden olmuştur (Gupta ve diğ., 2014), (Wang, 1999), (Wang ve Wong, 1999). Ayrıca Gudimetla ve diğ. (2002) azalma durumunun partikül parçalanma etkisi ile jetin kesme verimliliği ve hedef malzemeye jetin

penetrasyonunun (nüfus etmesinin) malzemenin enerji absorpsiyonu ile olduğunu bildirmiştir. Sonuç olarak, yüksek ilerleme hızının daha dar bir yarığı oluşturduğu ifade edilmiştir (Ay ve diğ., 2010).

Malzeme kalınlığı üçüncü en etkili deneysel parametre olarak bulunmuştur. Malzeme kalınlığı 18 mm'den 28 mm'ye çıktığında üst kerf genişliği artmıştır. Malzeme kalınlığı arttığında, jet akışına karşı direnç kuvveti biraz artmış ve bundan dolayı da üst kerf genişliği artmıştır. Sonra malzeme kalınlığı 28 mm'den 38 mm'ye çıktığında üst kerf genişliği düşmüştür. Malzeme kalınlığı diğer işleme parametrelerine (eşik değerin üzerinde) bağlı olarak daha fazla arttığında üst kerf genişliğine ters yönde etkilediği düşünülmüştür.

Aşındırıcı kütle akış hızı ve basınç parametreleri anlamsız ve etkisiz (üst kerf genişliğine) olarak kabul edilmiştir. Her iki parametre 1. seviyeden 3. seviyeye kadar arttığında üst kerf genişliği üzerine değişik davranış göstermiştir. Basınç parametresi artarken üst kerf genişliği hafifçe azalmış, aşındırıcı kütle akış hızı artarken ise üst kerf genişliği hafifçe artmıştır. Wang ve Wong (1999), Gupta ve diğ. (2014) diğer işleme parametreleriyle bağlı bir eşik değeri üzerinde basıncın ASJ'ye daha az etkili olduğunu açıklamıştır.



Şekil 3.2. Deneysel parametreleri seviyelerinin üst kerf genişliğine etkileri

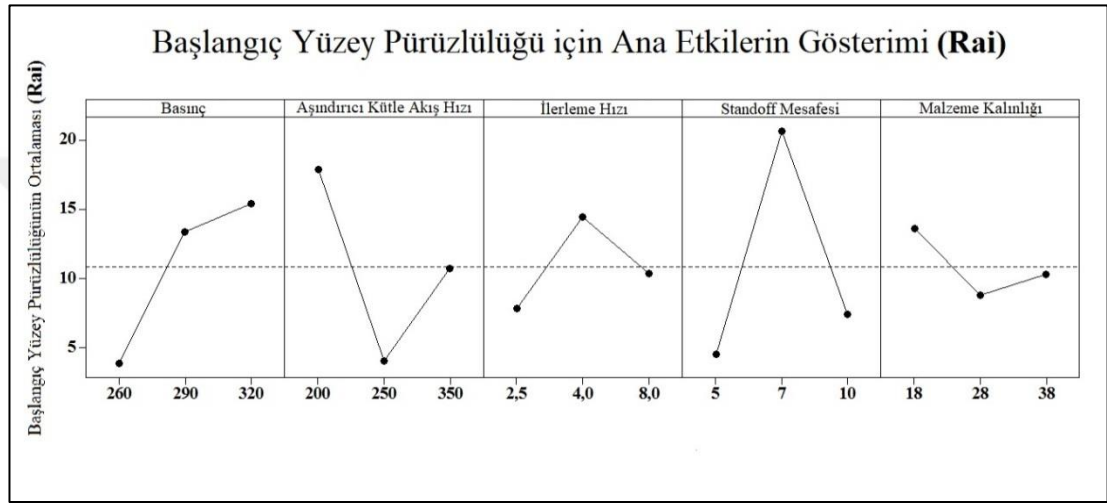
Başlangıç yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi yapılmış olup Şekil 3.3'te deneysel parametre seviyelerinin etkileri gösterilmiştir. Standoff mesafesinin 5 mm'den 7 mm'ye çıkmasında en etkili deneysel parametre olduğu gözlemlenmiştir.

Başlangıç yüzey pürüzlülüğü bu aşamada önemli ölçüde artmıştır. Burada yüzey pürüzlülüğünün artış davranışına jet yayılımı neden olmuştur (Santhanakumar ve diğ., 2015). Jet yayılımı etkisi ile aşındırıcı partiküller jetin uç kısmına yayılmıştır. Böylece hedef malzeme üzerine birim zamanda birim alana gelen partikül sayıları azalmıştır. Ayrıca aşındırıcı partiküller jetin kritik açılma (yayılma) mesafesine kadar ve su jetinin çarpma etkisi ile saçılma göstermiştir. Saçılma artmış, jetin ve partiküllerin etkisi azalmış ve bu nedenle yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ancak başlangıç yüzey pürüzlülüğü standoff mesafesinin 7 mm'den 10 mm'ye çıkmasıyla önemli ölçüde azalmıştır. Burada standoff mesafesinin daha fazla artmasıyla birim zamanda birim alana düşen partikül sayıları azalmıştır. Kritik açılma (yayılma) mesafesi değerleri aşıldığında su jeti ve çarpma saçılma etkileri azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün bu durum ile geliştiği düşünülmüştür.

Aşındırıcı kütle akış hızı ve basınç ikinci en yüksek etkiye sahip deney parametreleri olarak bulunmuştur (başlangıç yüzey pürüzlülüğü için). Aşındırıcı kütle akış hızı 200 g/dak'dan 250 g/dak'ya çıktığında başlangıç yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalmış ve bu deney parametresi 250 g/dak'dan 350 g/dak'ya çıktığında başlangıç yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Öncelikle aşındırıcı kütle akış hızı artması ile yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalmıştır bunun nedeni birim alan başına düşen partikül sayılarının artması ile kesim gelişmiştir. Ancak, ikinci aşamada partiküllerin kendileri arasında birbirleriyle çarpışmaları yüzey pürüzlülüğü gelişimini indirgemıştır (Aydın ve diğ., 2011). Başlangıç yüzey pürüzlülüğü, basınç parametresinin 260 MPa'dan 320 MPa'a kadar çıkması ile önemli ölçüde artmıştır. Benzer durum Jani ve diğ.'nin (2016) çalışmalarında gözlemlenmiştir. Wang ve Wong (1999) ayrılmış jetin dış kenarının malzemenin kesilmesi için yüzeydeki düzensizliği ve pürüzlülüğü arttırmaya yetecek kadar enerji kazanacağı şeklinde artma trendini açıklamıştır. Basınç arttığında, her partikülün kinetik enerjisi artar ve böylece malzeme kaldırma kabiliyeti gelişir. Ayrıca, hızlanma ile partiküller arası çarpışmalar rastgele görülebilir. Aşındırıcıların etkileri ile su jeti hedef malzeme üzerinde daha fazla enerji harcar. Sonuç olarak daha pürüzlü bir yüzey elde edildiği ifade edilmiştir (Aydın ve diğ., 2011).

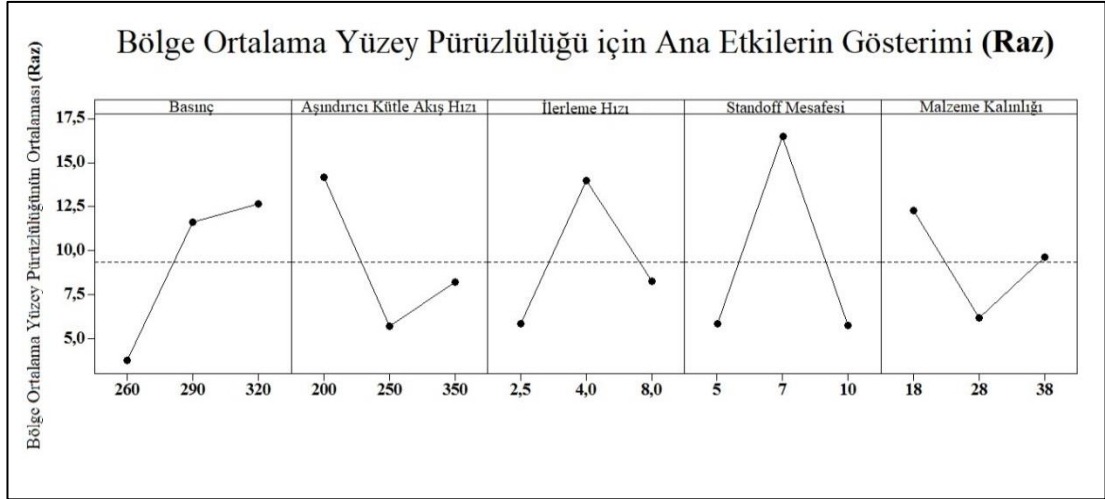
Başlangıç yüzey pürüzlülüğü için ilerleme hızı ve malzeme kalınlığı parametreleri anlamsız ve etkisiz kabul edilmiştir. İlerleme hızı 2,5 mm/s'den 4 mm/s'ye çıktığında

başlangıç yüzey pürüzlülüğü artmış ve ilerleme hızı 4 mm/s'den 8 mm/s'ye çıktığında ise başlangıç yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Bu trend benzer çalışmalarda (Boud ve diğ., 2014), (Santhanakumar ve diğ., 2015), (Jani ve diğ., 2016), (Lima ve diğ., 2016) gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığı 18 mm'den 28 mm'ye çıktığında başlangıç yüzey pürüzlülüğü azalmış ve yine malzeme kalınlığı 28 mm'den 38 mm'ye çıktığında ise başlangıç yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Bu trend benzer bir çalışmada (Cojbašić ve diğ., 2016) gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3. Deneysel parametreleri seviyelerinin başlangıç yüzey pürüzlülüğüne etkileri

Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi yapılmış olup Şekil 3.4'te deneysel parametre seviyelerinin etkisi gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere, bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü davranışı başlangıç yüzey pürüzlülüğü davranışı (Şekil 3.3) ile neredeyse aynı bulunmuştur. Standoff mesafesi her ikisi içinde en yüksek katkı oranını vermekle birlikte bölge ortalama yüzey pürüzlülüğündeki katkısı daha düşüktür. Çünkü malzemedeki kesme derinliği boyunca jetin yayılımı ve çarpmaya bağlı saçılımı etkili olmuştur. Basınç parametresi aşındırıcı kütle akış hızı parametresinden daha etkili olmuştur. Kesme partiküllerinin kinetik enerjisi ve keskinliği kesme derinliği boyunca azalmıştır. Bundan başka ilerleme hızı parametresi de yüzey pürüzlülüğünü etkilemiştir. İlerleme hızının artmasıyla birim zamanda birim alan başına partiküllerin sayısı azalmıştır.



Şekil 3.4. Deneysel parametre seviyelerinin bölge ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri

Elde edilen verilere göre ASJ ile kesmede işleme faktörlerinin optimum kombinasyonları Tablo 3.5'te gösterilmiştir. Söz konusu tabloya göre doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.5. Yanıt (Tepki) parametresi için deneysel parametrelerinin optimum seviyeleri

Yanıt (Tepki) parametresi	Deneysel parametrelerinin optimum seviyeleri				
	Basınç	Aşındırıcı kütle akış hızı	İlerleme hızı	Standoff mesafesi	Malzeme kalınlığı
Üst kerf genişliği (W_t)	320	200	8	5	18
Başlangıç yüzey pürüzlülüğü (R_{ai})	260	250	2,5	5	28
Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_{az})	260	250	2,5	5	28

Minitab 17 istatistik yazılımı ile, tahmini üst kerf genişliği (W_t), başlangıç (R_{ai}) ve bölge ortalama (R_{az}) yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bulunması için aşağıdaki regresyon denklemleri (Denklem 3.1, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3) bulunmuş ve bu denklemler kullanılarak tahminleri değerler belirlenmiştir.

$$\begin{aligned}
W_t = & 1601,7 + (51,9^{P-260}) - (20,1^{P-290}) - (31,8^{P-320}) \\
& - (31,1^{A-200}) + (5,9^{A-250}) + (25,1^{A-350}) + (96,1^{T-2,5}) \\
& - (19,7^{T-4,0}) - (76,4^{T-8,0}) - (214,1^{S-5}) - (32,2^{S-7}) \\
& + (246,3^{S-10}) - (44,7^{M-18}) + (64,1^{M-28}) - (19,4^{M-38})
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
R_{ai} = & 10,87 - (7,02^{P-260}) + (2,47^{P-290}) + (4,55^{P-320}) \\
& + (7,02^{A-200}) - (6,83^{A-250}) - (0,19^{A-350}) - (3,02^{T-2,5}) \\
& + (3,56^{T-4,0}) - (0,53^{T-8,0}) - (6,32^{S-5}) + (9,78^{S-7}) \\
& - (3,46^{S-10}) + (2,71^{M-18}) - (2,11^{M-28}) - (0,61^{M-38})
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
R_{az} = & 9,37 - (5,59^{P-260}) + (2,27^{P-290}) + (3,32^{P-320}) \\
& + (4,80^{A-200}) - (3,67^{A-250}) - (1,14^{A-350}) - (3,53^{T-2,5}) \\
& + (4,63^{T-4,0}) - (1,10^{T-8,0}) - (3,51^{S-5}) + (7,15^{S-7}) \\
& - (3,63^{S-10}) + (2,94^{M-18}) - (3,21^{M-28}) + (0,26^{M-38})
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Burada W_t , üst kerf genişliğini, R_{ai} , başlangıç yüzey pürüzlülüğünü, R_{az} , bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünü, P_{260} , P_{290} , P_{320} , basıncın seviyeleri için tüm sabitleri, A_{200} , A_{250} , A_{350} , aşındırıcı kütle akışının seviyeleri için tüm sabitleri, $T_{2,5}$, $T_{4,0}$, $T_{8,0}$, ilerleme hızının seviyeleri için tüm sabitleri, S_5 , S_7 , S_{10} , standoff mesafesinin seviyeleri için tüm sabitleri ve M_{18} , M_{28} , M_{38} , malzeme kalınlığının seviyeleri için tüm sabitleri ifade etmektedir. Yapılan kesme işleminde kullanılan parametrelere göre ilgili sabitler kullanılarak hesaplama yapılmalıdır. Örneğin; basınç 260 MPa, aşındırıcı kütle akışı hızı 350 g/dak, ilerleme hızı 4 mm/s, standoff mesafesi 5 mm ve malzeme kalınlığı 18 mm alınarak bir kesim yapılırsa hesaplama W_t için;

$$W_t = 1601,7 + (51,9^{P-260}) + (25,1^{A-350}) - (19,7^{T-4,0}) - (214,1^{S-5}) - (44,7^{M-18}) \tag{3.4}$$

denklemini kullanılarak yapılmalıdır.

Burada tüm denklemler için parametrelerin seviyesine göre sabitlerin değerleri hesaba katılmıştır. Bu parametreleri kullanarak, tahmini doğrulama değerleri (regresyon için tahmin aralığı) Minitab 17 ile hesaplanmıştır. Üst kerf genişliğinin,

başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün yanıt (tepki) parametreleri için doğrulama testleri sonuçları Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için bölge davranışları benzer çalışmada gözlemlenmiştir (Hreha ve diğ., 2014), (Hloch ve Valíček, 2012), (Kinik ve diğ, 2015). Deneysel ve tahmini sonuçlar arasında çok az farklılık olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, doğrulama işlemleri kabul edilmiştir.

Tablo 3.6. Yanıt (Tepki) parametresi için doğrulama testleri değerleri

Yanıt (Tepki) parametresi	Doğrulama testi değerleri		
	Deneysel	Tahmini	% Hata
Üst kerf genişliği (W_t)	1050,5	1037,89	1,20
Başlangıç yüzey pürüzlülüğü (R_{ai})	3,01	2,823	6,21
Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_{az})	3,54	3,39	4,24

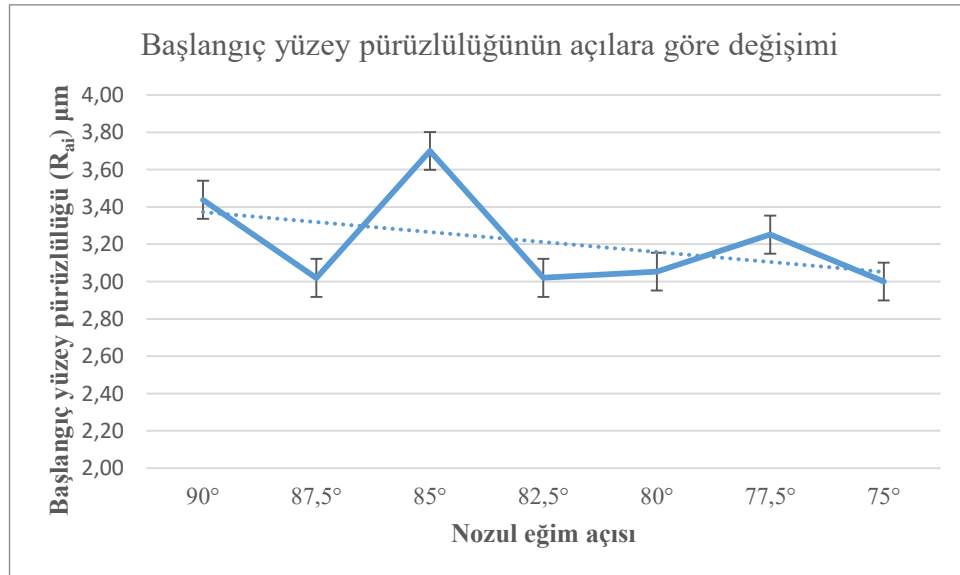
3.3.2. ASJ nozulunun eğimli kesimleri

Çalışmanın bu aşamasında, ASJ nozuluna eğim verilerek farklı eğim (nozul darbe) açılarında gerçekleştirilen kesimler ile oluşan kerf yüzeyleri incelenmiştir. Tablo 3.7'de nozul eğimli ASJ kesimlerine göre başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri değerleri gösterilmiştir.

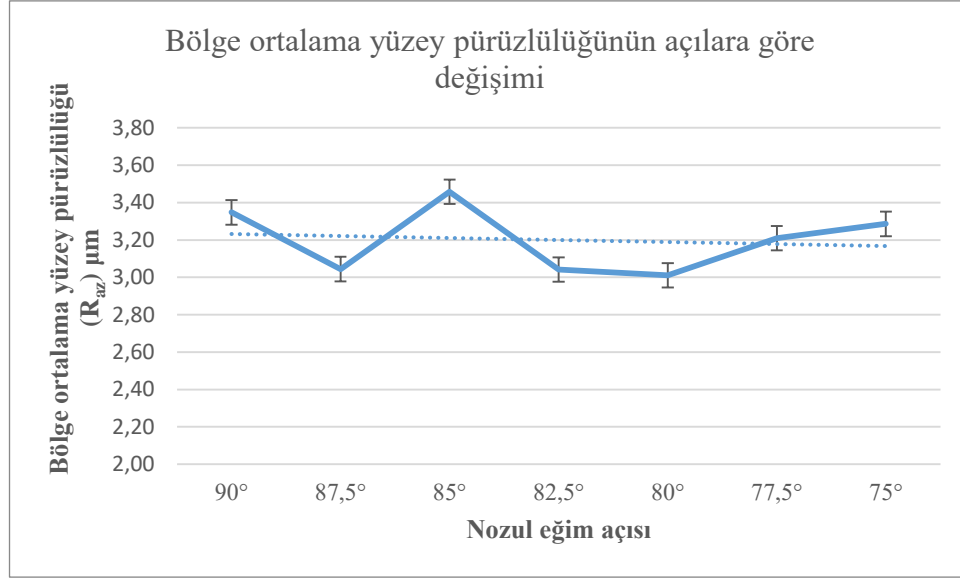
Tablo 3.7. Nozul eğimli kesimlerde başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri

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 açlarına göre değişimi Şekil 3.5'te ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açlarına göre değişimi ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Her iki şekle göre 87,5° ve 82,5° nozul eğimleri yüzey pürüzlüklerine iyileştirici etkide bulunmuştur. Bu durumun ortaya çıkmasında ASJ 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 ve diğ. (1996), Wang ve diğ. (2003), Chen ve diğ. (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 ve diğ. (2003) polimer matrisli kompozitlerin 90° yerine 80° jet darbe açısı kullanıldığında jet penetrasyonu derinliği ve işleme yüzeyini geliştirmede marjinal etki gösterdiğini ifade etmiştir.



Şekil 3.5. Başlangıç yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açlarına göre değişimi

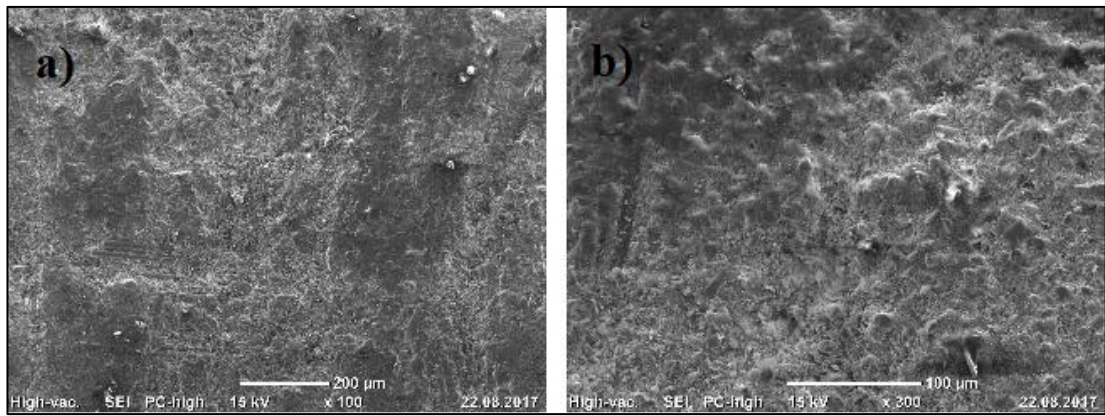


Şekil 3.6. Bölge ortalama yüzey pürüzlülüğünün nozul eğim açlarına göre değişimi

3.2. ASJ ile Kesilen Yüzeylerin SEM İncelemeleri

3.2.1. ASJ nozulunun dik pozisyonda tutulduğu kesme işlemlerine ait yüzey incelemesi

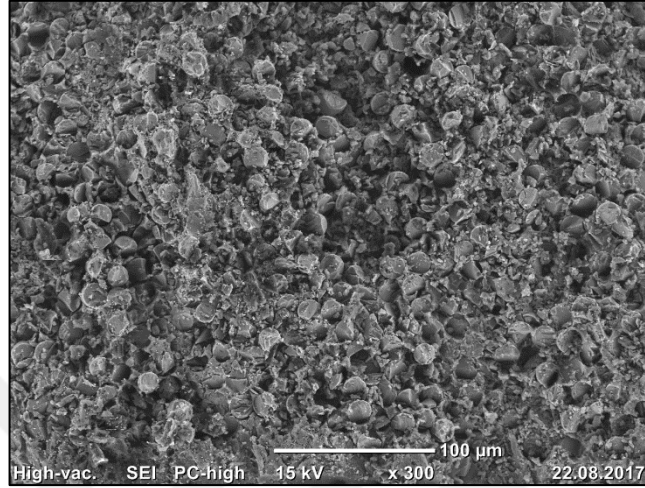
Cam fiber takviyeli vinil ester kompozitin, farklı parametrelerle kesilmesi sonucu oluşan kesme yüzeylerine ait SEM incelemeleri bu bölümde gösterilmiştir. Öncelikle kesme yüzeylerinden elde edilen farklı kesme görüntüleri sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.7. 17 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin kaplanması

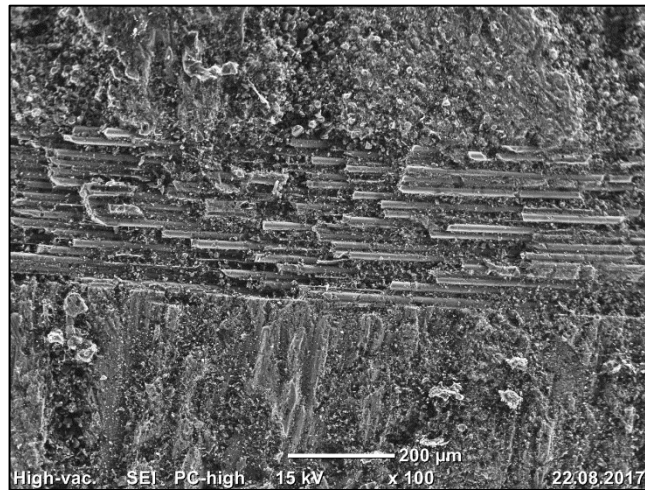
Tablo 2.3'te belirtilen 17 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeyinin üst bölgesinden alınan SEM görüntüleri Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.7 (a) görüntüsünde, fiberlerin belli belirsiz görüldüğü ve kesme yüzeyinin matrisle kaplı

olduğu görülmüştür. Şekil 3.7 (b)'de ise aynı kesme yüzeyinden alınan detay görüntüsünde fiberlerin yüzeye açılı olduğu, kesilen fiberlerin büyük çoğunluğunun matris içine gömülü oldukları, parçalanan fiberlerin küçük taneler Şeklinde matris içerisinde kaldığı ve sol üst köşede de matris sıvanmasının olduğu görülmüştür.



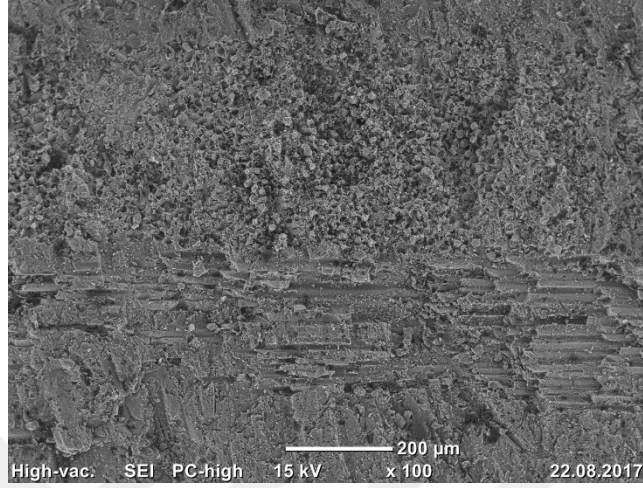
Şekil 3.8. 10 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin kesilmesi

Tablo 2.3'te belirtilen 10 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeyinin alt bölgesinden alınan görüntü Şekil 3.8'de verilmiştir. Fiberlerin yüzeye dik olduğu, kesilen fiberlerin matris içine gömülü oldukları ancak matris sıvanması olmadığı görülmüştür.



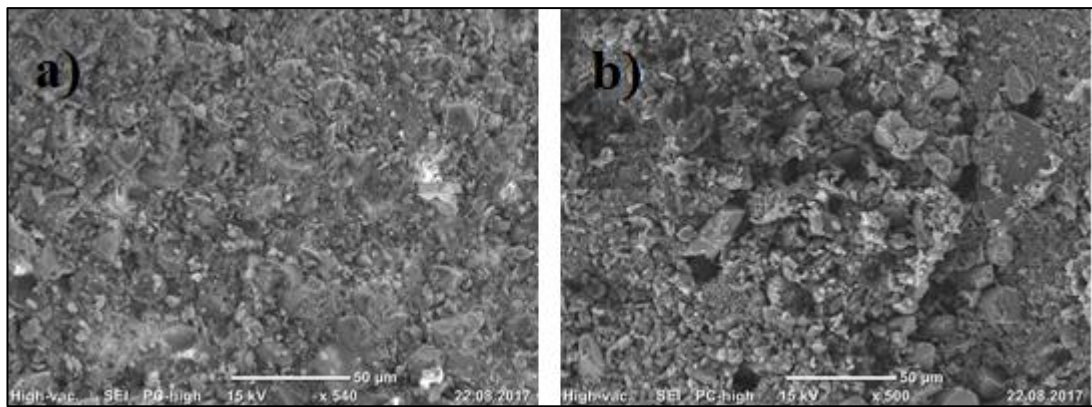
Şekil 3.9. 26 nolu deneyin kesme yüzeyinde fiberlerin çekilmesi

Tablo 2.3'te belirtilen 26 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeyinin orta bölgesinin üstünden alınan görüntü Şekil 3.9'da verilmiştir. Fiberlerin yüzeye paralel olduğu kısımda fiber yüzeylerinin matrisle kaplı olmadığı görülmüştür.



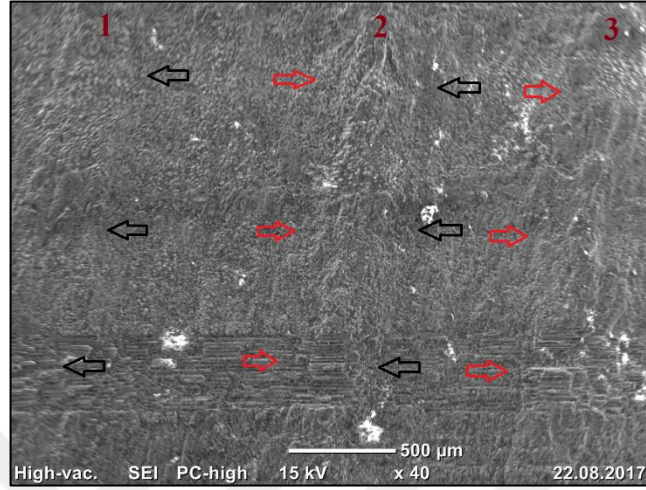
Şekil 3.10. 10 nolu deneyin kesme yüzeyinde oluşan fiber boşlukları

Tablo 2.3'te belirtilen 10 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeyinin alt bölgesinden alınan görüntü Şekil 3.10'da verilmiştir. Fiberlerin yüzeye paralel olduğu kısımda, iki farklı bölgenin ortaya çıktığı, sağ taraftaki bölgede kesilmiş fiberlerin yüzeyinin kısmen matrisle kaplı olduğu ancak sol taraftaki bölgede ise kesilme sonrası fiberlerin mevcut pozisyonlarını kaybettiği ve boş fiber yerlerinin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.11. Fiber ufalanması görünümü: (a) 17 nolu deney; (b) 16 nolu deney

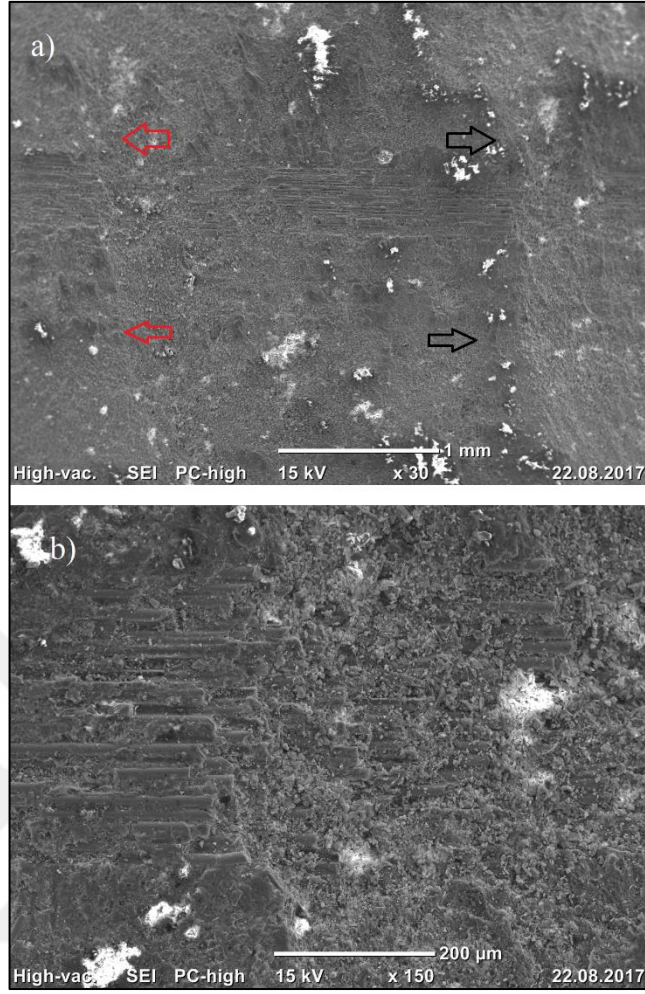
Tablo 2.3'te belirtilen 17 ve 16 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeylerine ait görüntüler Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu yüzeylerde, daha önce Şekil 3.7'de ifade edilen parçalanmış fiberlere ait küçük taneli yapılar görülmüştür.



Şekil 3.12. Doğrulama deneyi kesme yüzeyinde çiziklenmelerin gösterimi

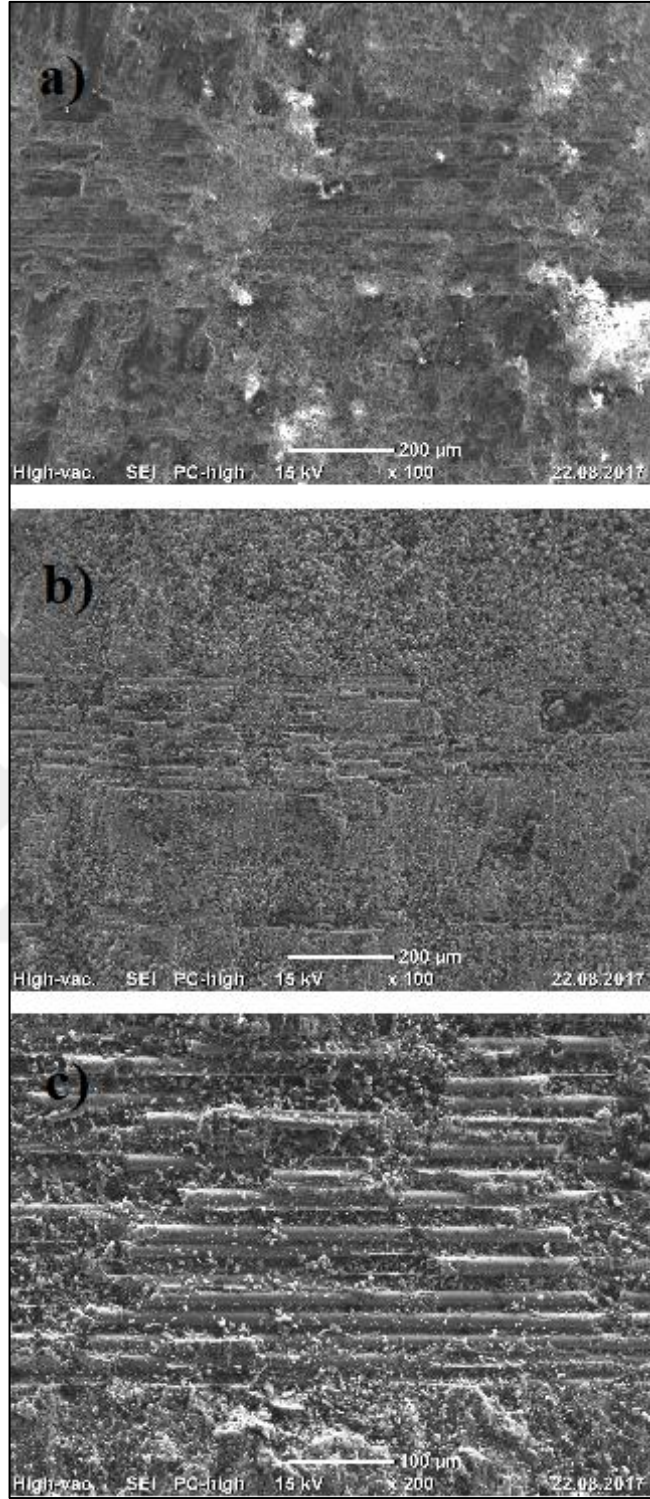
Tablo 3.5'te yüzey pürüzlülüğü doğrulama deneyi için yapılan ASJ kesim işlemine ait görüntü Şekil 3.12'de verilmiştir. Aşındırıcı partikül içeren su jetinin parça yüzeyinden daha derine inmesi sırasında enerji dağılımında ortaya çıkan dalgalanmaya bağlı olarak yiv şeklinde görülen akış kanalları görülmüştür. Kesme yüzeyinde görülen bu davranış daha önce belirtildiği gibi çiziklenme olarak adlandırılmıştır. '2' ile ifade edilen kısımda, kırmızı ve siyah oklar arasındaki bölge çizici ifade etmektedir. Şekilde üç adet çizgi oluşumu görülmüştür. Kesme yüzeyi orta bölgesinin altından alınan bu görüntüye göre deformasyon aşınma bölgesine geçildiği anlaşılmıştır.

Tablo 2.3'te belirtilen 17 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeyine ait görüntüler Şekil 3.13 (a) ve (b)'de verilmiştir. Görüntü, parçanın orta bölgesinin alt kısmından alınmıştır. Şekil 3.12'de belirtilen çiziklenme davranışı burada da görülmüştür. Ancak oklarla gösterilen iki çizik arasındaki mesafe diğerinin yaklaşık 3 katıdır. Deney koşulları karşılaştırıldığında, bu mesafe farklılığına ilerleme hızı parametresinin etki ettiği anlaşılmıştır. Şekil 3.13 (b)'de, fiberlerin yüzeye paralel olduğu kısımdaki çizikten alınan detay görüntü verilmiştir. Çizik üzerinde matrisle kaplı fiberler görülürken akış kanalında ise fiberlerin parçalandığı görülmüştür.



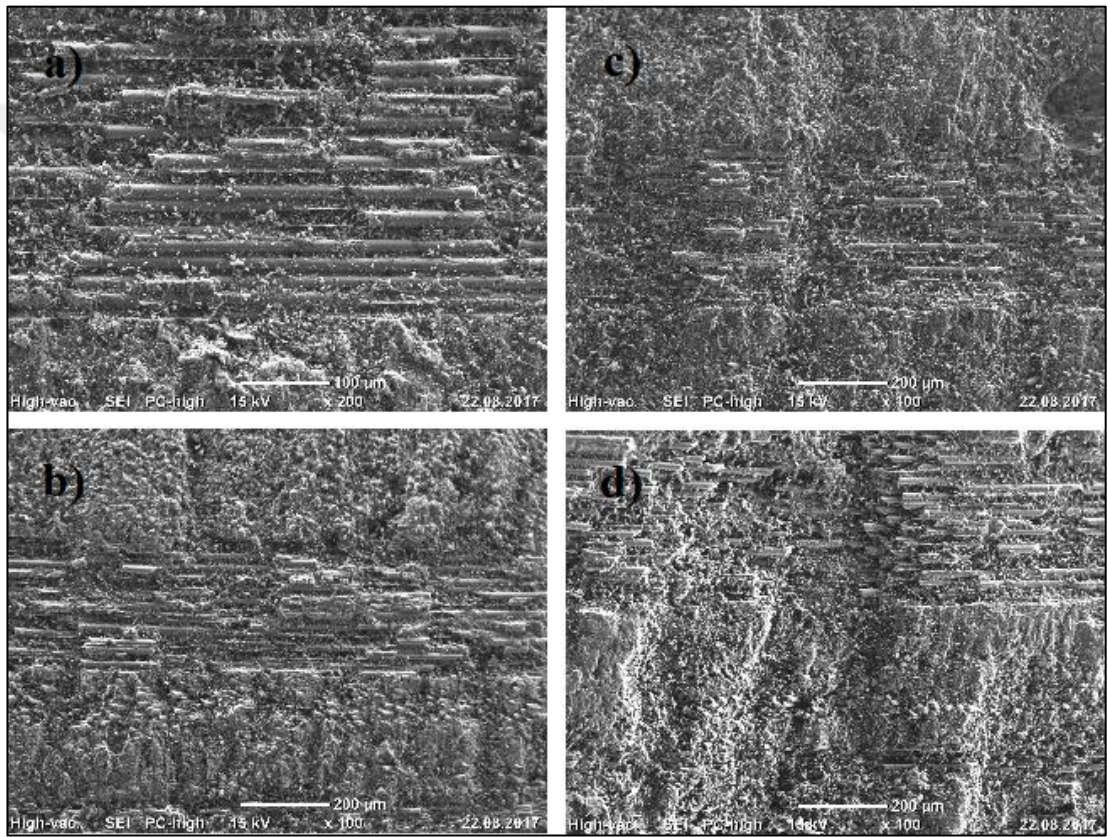
Şekil 3.13. 17 nolu deneyin kesme yüzeyinde çiziklenme oluşumu: (a) genel görünüm; (b) detay görünüm

Doğrulama deneyi (yüzey pürüzlülüğüne ait), 13 ve 26 nolu deneylerden elde edilen kesme yüzey görüntüleri Şekil 3.14’de incelenmiştir. Şekil 3.14’de her üç deneye ait SEM görüntüleri kesme yüzeylerinin üst bölgelerinden alınmıştır. Şekil 3.14 (a)’da yüzeye paralel uzanan fiberlerin matrisle kaplı olduğu ve bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Oysa Şekil 3.14 (b)’de, yüzeye paralel uzanan fiberlerin kısmen parçalandığı ve fiber yüzeylerinin kısmen açıkta olduğu görülmüştür. Her iki görüntü arasındaki farkın basınç parametresinden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Basıncın daha yüksek olduğu 13 nolu deneyde, fiber ve matrisin daha fazla aşındığı görülmüştür. Basıncın daha da yüksek tutulduğu 26 nolu deneye ait Şekil 3.14 (c)’de verilen görüntüsünde ise, yine yüzeye paralel uzanan fiberlerin kısmen parçalandığı ve fiber yüzeylerinin çoğunlukla açıkta olduğu görülmüştür. Bu davranışta, diğerlerine göre daha yüksek değerlerde olan aşındırıcı kütle akış hızı da etkili olmuştur.



Şekil 3.14. Basınç parametrelerinin kesme yüzeyleri üst bölgelerine etkisi: (a) doğrulama deneyi; (b) 13 nolu deney; (c) 26 nolu deney

Tablo 2.3'te belirtilen 26 nolu deney koşullarına göre gerçekleşen kesme yüzeylerine ait görüntüler Şekil 3.15'de verilmiştir. Bu görüntülerde, fiberlerin yüzeye paralel uzanmış bölgeler esas alınarak parça yüzeyinden alt bölgeye doğru inilerek bir inceleme yapılmıştır. Buna göre, parçanın giriş ile giriş altı bölgelerini gösteren sırasıyla Şekil 3.15 (a) ve (b) görüntülerinde aşındırıcı partikül içeren su jetinin enerjisinde yeterli bir azalma olmadığından çiziklenme görülmemiştir. Ancak orta bölge ve alt bölgeden alınan sırasıyla Şekil 3.15 (c) ve (d) görüntülerinde, enerjideki azalmaya bağlı olarak çiziklenmenin varlığı görülmüştür.

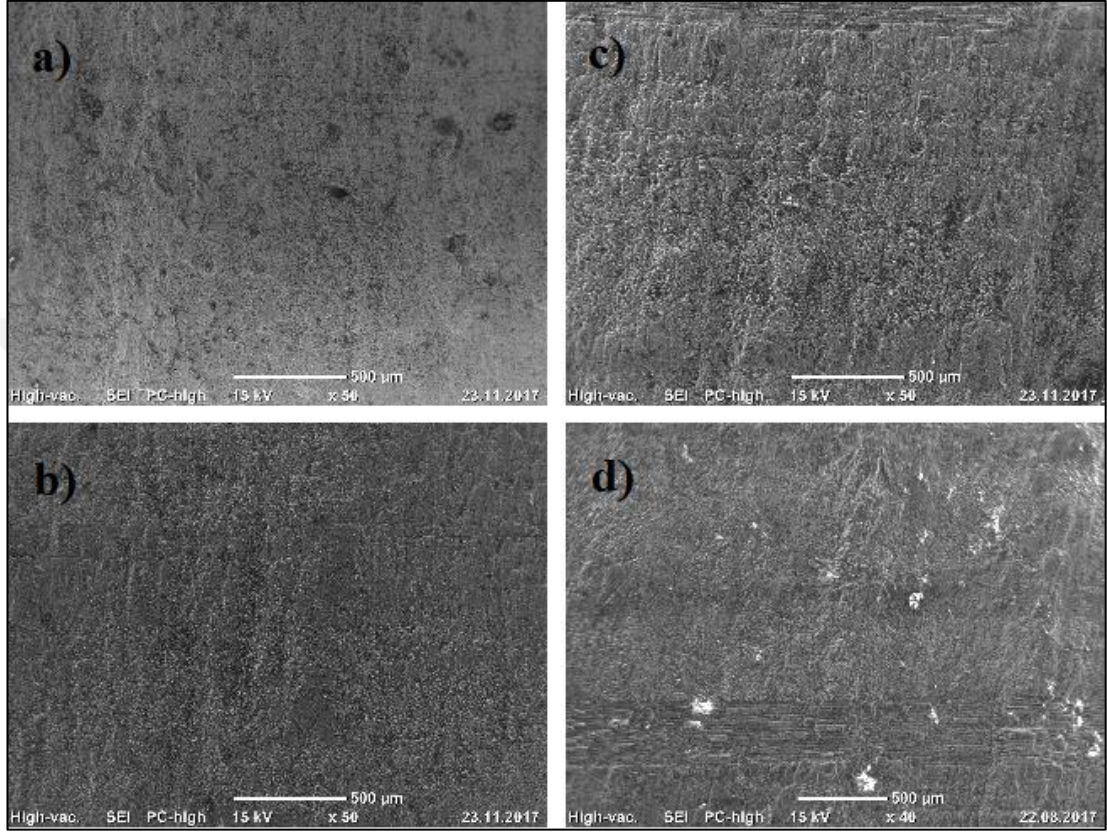


Şekil 3.15. 26 nolu deneyde çiziklenme oluşumu: çiziklenme görülmeyen bölgeler (a) ve (b); çiziklenme görülen bölgeler (c) ve (d)

3.2.2. ASJ nozulunun eğimli pozisyonda tutulduğu kesme işlemlerine ait yüzey

ASJ nozulunun belirlenmiş eğimli pozisyonlarında tutulduğu, kesme işlemleri yüzeylerine ait alt bölge görüntüleri $87,5^\circ$ için Şekil 3.16 (a)'da, 85° için Şekil 3.16 (b)'de, $82,5^\circ$ için Şekil 3.16 (c)'de gösterilmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğüne ait doğrulama numunesi kesme yüzeyinin alt bölge görüntüsü de Şekil 3.16 (d)'de verilmiştir. Şekil 3.16'da doğrulama deneyi yüzeyinde görülen (Şekil 3.16 (d))

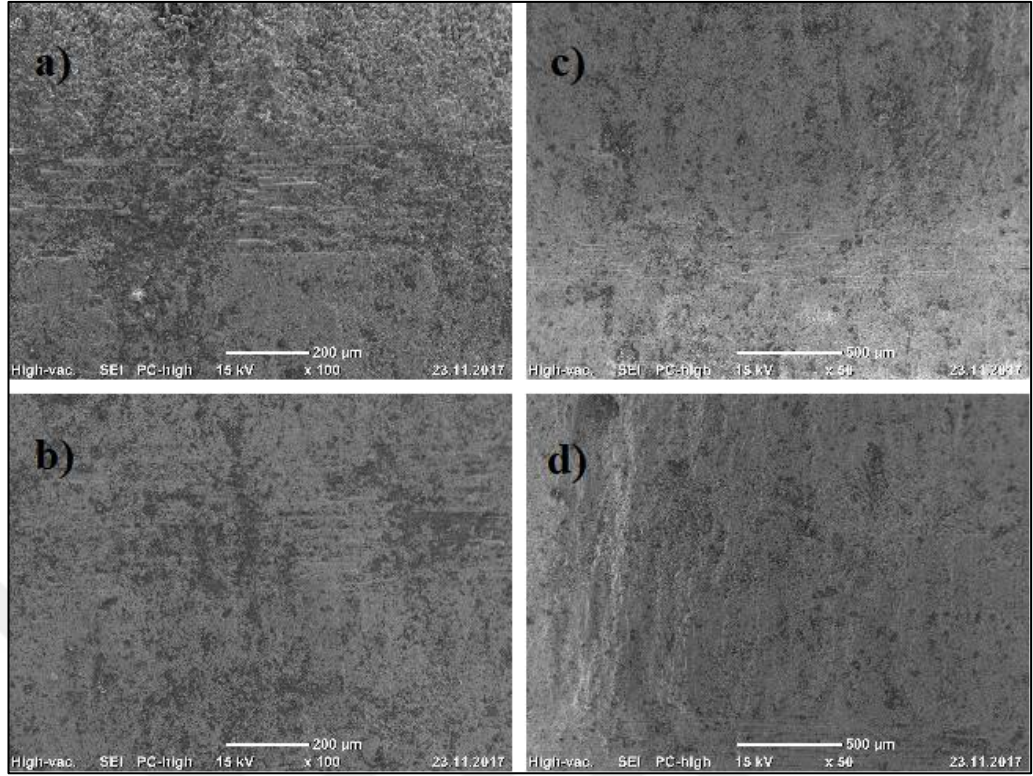
çiziklenme davranışı, 87,5°, 85° ve 82,5° eğimli deneylerin kesme yüzeylerinde görülmediği anlaşılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olan çiziklenmelerin oluşmaması sebebiyle yüzey pürüzlülüğünün eğimli numunelerde bir miktar iyileştirme gösterdiği söylenebilir.



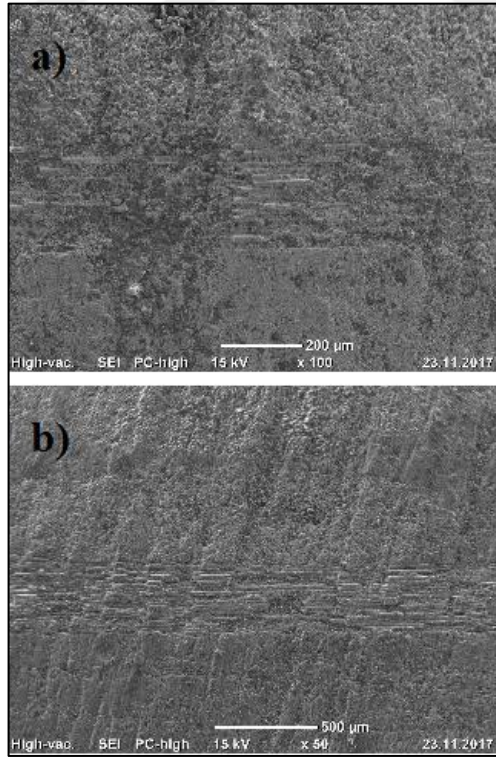
Şekil 3.16. ASJ kesme yüzeylerinin alt bölgeleri: (a) 87,5° eğimli deneyi; (b) 85° eğimli deneyi; (c) 82,5° eğimli deneyi; (d) yüzey pürüzlülüğüne ait doğrulama deneyi

87,5° nozul eğimine sahip ASJ kesme yüzeyinin üst bölgesinden alt bölgesine doğru alınan görüntüler Şekil 3.17 (a-d)'de verilmiştir. Şekle göre paralel fiberlerin matrisle hemen hemen kaplı olduğu görülmüş ve kesme derinliği boyunca genel davranışını devam ettirdiği anlaşılmıştır.

87,5° ve 82,5° nozul eğimlerine sahip kesme yüzeylerinin üst bölgeleri görüntüleri sırasıyla Şekil 3.18 (a) ve 3.18 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.18 (b)'de paralel fiberlerin matrisle daha az kaplı olduğu ve fiberlerin katmanlı olarak kesildiği görülmüştür. Fiber davranışının değişiminde eğim etkisinin olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.17. 87,5° nozul eğimine sahip kesme yüzeyi boyunca paralel fiberlerin durumu (a-d)



Şekil 3.18. Nozul eğimlerine sahip kesme yüzeylerinin üst bölgeleri: (a) 87,5; (b) 82,5°

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu Doktora Tezinde, cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhaların ASJ İle kesilmesi araştırılmış ve ASJ kesme işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilk aşamasında Taguchi deney düzenine göre testler gerçekleştirilmiştir. ANOVA analizine göre deney parametrelerinin etki yüzdeleri, anlamlılıkları ve parametre seviyelerinin kesme performansına etkileri bulunmuştur. Çıkan sonuçlara göre optimum deney parametreleri bulunmuştur. Regresyon denklemleri oluşturularak optimum deney parametrelerine göre tahmini kesme performansı çıktıları bulunmuş ve söz konusu parametrelere göre ASJ kesimleri yapılarak doğrulama deneyleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ASJ nozulunun eğimli olarak malzeme kesimini gerçekleştirebilmesi için yedi farklı eğim açısı belirlenmiş ve optimum deney parametrelerine göre eğimli (açılı) kesimleri gerçekleştirilmiştir. Tezin son aşamasında ise ASJ ile kesilen yüzeylerin SEM görüntüleri alınarak deney parametrelerinin kesme yüzeyine etkileri incelenmiştir.

Tezin ilk aşamasına göre, standoff mesafesinin kesme performansı için en etkili deney parametresi olduğu bulunmuştur. Standoff mesafesi parametresi üst kerf genişliğini çok fazla (% 73,35) etkilemiştir. Etki yüzdesinin fazla olması su jetinin diverjans (yayıma) etkisinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca ilerleme hızı parametresi de üst kerf genişliğini biraz etkilemiştir. Malzemeye çarpan (vuran) kesme partiküllerinin sayısının azalması ve partikül parçalanma etkisi birincil nedenler olarak açıklanmıştır.

Başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülükleri için parametrelerin etkileri neredeyse aynı olarak bulunmuştur. Standoff mesafesi en etkili deney parametresi olmasına rağmen diğer deney parametrelerinin de etkisi görülmüştür. Basınç ve aşındırıcı kütle akış hızı etkili parametreler olmuş, bu duruma ek olarak bölge ortalama yüzey pürüzlülüğü için ilerleme hızı deney parametresi de diğer bir etkili parametre olarak bulunmuştur. Kinetik enerjinin değişkenliği ve kesme derinliği

boyunca aşındırıcı partiküllerin keskinliğinin değişimi her iki yüzey pürüzlülüğü çıktısının oluşumuna neden olmuştur.

Tezin ikinci aşamasına göre, ASJ nozulunun eğimli kesimlerinde başlangıç ve bölge ortalama yüzey pürüzlülüğüne $87,5^\circ$ ve $82,5^\circ$ eğim açısının iyileştirici etkisi bulunmuştur. Böylece geleneksel ASJ kesim yöntemine göre kesme nozuluna eğim verilmesi ile kesme işleminin geliştirebileceği anlaşılmıştır.

Tezin son aşamasında ise ASJ ile kesilen yüzeylerin SEM görüntüleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve optimum deney koşulları ile bu koşullardan farklı parametre seviyelerinde kesim yapıldığında her iki yüzey yapısında farklılıklar tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü doğrulama deneyinde görülen çiziklenme oluşumu yüzey pürüzlülüğünü iyileştirici eğimli kesim yüzeylerinde görülmemiştir.

Sonuç olarak cam fiber takviyeli vinil ester kompozit levhaların ASJ kesme performansları incelenmiş, optimum parametreler belirlenerek eğimli kesim ile performansları geliştirilmiştir.

Bu Doktora Tezi çalışmasında yapılan araştırmalar ve elde edilen bilgilere göre ileride yapılacak araştırmalara yönelik olarak şu öneriler sıralanabilir:

- 1- Polimer matrisli kompozitlerin ASJ ile kesilmesinde deney parametrelerinin kesme derinliği ve penetrasyonuna etkileri araştırılabilir.
- 2- ASJ kesme performansının tahmini sonuçlarını belirlemede yapay sinir ağı, bulanık mantık ve diğer tahmini yöntemler ile bulunan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilir. Deneysel sonuçlara en uygun tahmini yöntem belirlenebilir veya hibrid bir tahmini yöntem oluşturulabilir.
- 3- ASJ nozulunun eğimli kesimi metal, seramik, polimer ve diğer kompozit malzemelerde uygulanarak kesme performansları incelenebilir.
- 4- Bulunan optimum deney parametrelerine göre maliyet analizi yapılabilir.
- 5- ASJ kesme nozuluna eğim (açı) ile çeşitli frekanslarda salınım hareketi verilerek kesme performansları incelenebilir.
- 6- Kesme yüzeylerinde bulunan aşındırıcı partiküllerin deney parametrelerine göre SEM analizi yapılarak kirleticiliğine etkileri araştırılabilir.
- 7- Ülkemiz madenlerinde bulunan aşındırıcı partiküller ile ASJ kesme işlemleri yapılabilir.

8- Farklı pompa sistemlerinin ASJ kesme performansına etkileri araştırılabilir.



KAYNAKLAR

Akkurt A., Kulekci M. K., Seker U., Ercan F., Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **147**(3), 389-396.

Anwar S., Axinte D. A., Becker A. A., Finite element modelling of abrasive waterjet milled footprints, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013a, **213**(2), 180-193.

Anwar S., Axinte D. A., Becker A. A., Finite element modelling of overlapping abrasive waterjet milled footprints, *Wear*, 2013b, **303**(1), 426-436.

Arola D., Ramulu M., Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of Metals Surface Integrity and Texture, *Wear*, 1997, **210**(1), 50-58.

Axinte D. A., Srinivasu D. S., Kong M. C., Butler-Smith P. W., Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, **49**(10), 797-803.

Ay M., Çaydaş U., Haşçalık A., Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining of Age Hardened Inconel 718 Nickel-Based Superalloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, **25**(10), 1160-1165.

Aydin G., Karakurt I., Aydiner K., An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet, *Bulletin of Materials Science*, 2011, **34**(4), 985.

Aydin G., Karakurt I., Hamzacebi C., Artificial Neural Network and Regression Models for Performance Prediction of Abrasive Waterjet in Rock Cutting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **75**(9), 1321-1330.

Azmir M. A., Ahsan A. K., A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(20), 6168-6173.

Azmir M. A., Ahsan A. K., Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **198**(1), 122-128.

Ball P., Manufacturing processes, Editor: Hollaway L., *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, 1st ed., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 73-76, 1994.

Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Mehmedovic M., Djelmic A., Experimental Study on Surface Roughness in Abrasive Water Jet Cutting, *Procedia Engineering*, 2015, **100**, 394-399.

Boud F., Murray J. W., Loo L. F., Clare A. T., Kinnell P. K., Soluble Abrasives for Waterjet Machining, *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, **29**(11-12), 1346-1352.

Chen F. L., Siores E., Patel K., Momber A. W., Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002b, **42**(13), 1385-1390.

Chen F. L., Siores E., Patel K., Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscillation techniques, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002a, **42**(6), 717-722.

Chen F. L., Siores E., The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, **41**(10), 1479-1486.

Chen L., Siores E., Wong W. C. K., Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **74**(1), 251-254.

Ćojbašić Ž., Petković D., Shamshirband S., Tong C. W., Ch S., Janković P., Dučić N., Baralić J., Surface roughness prediction by extreme learning machine constructed with abrasive water jet, *Precision Engineering*, 2016, **43**(C), 86-92.

Dandekar C. R., Shin Y. C., Modeling of Machining of Composite Materials: A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, **57**, 102-121.

Dong Y., Liu W., Zhang H., Zhang, H., On-line Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cleaning, *Procedia CIRP*, 2014, **15**, 278-282.

Ferenc K., Cutting with Water Jet, *Welding International*, 2007, **21**(10), 730-735.

Folkes J., Waterjet—An Innovative Tool for Manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(20), 6181-6189.

Geiger M., Kach A., Hohenstein R., Maros Z., Fuzzy-Logic Based Knowledge Representation for Water Jet Cutting of Light-Weight Composites, *Machining Science and Technology*, 2003, **7**(3), 349-360.

Gudimetla P., Wang J., Wong W., Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **128**(1), 123-129.

Gupta V., Pandey P. M., Garg M. P., Khanna R., Batra N. K., Minimization of Kerf Taper Angle and Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble, *Procedia Materials Science*, 2014, **6**, 140-149.

Hascalik A., Çaydaş U., Gürün H., Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy, *Materials & Design*, 2007, **28**(6), 1953-1957.

Hashish M., A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1989a, **111**(2), 154-162.

Hashish M., A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1984, **106**(1), 88-100.

Hashish M., An Investigation of Milling With Abrasive-Waterjets, *Journal of Engineering for Industry*, 1989b, **111**(2), 158-166.

Hashish M., Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive-Waterjets, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1991, **113**(3), 354-362.

Hashish M., duPlessis M.P., Prediction Equations Relating High Velocity Jet Cutting Performance to Stand Off Distance and Multipasses, *Journal of Engineering for Industry*, 1979, **101**(3), 311-318.

Hashish M., duPlessis M.P., Theoretical and Experimental Investigation of Continuous Jet Penetration of Solids, *Journal of Engineering for Industry*, 1978, **100**(1), 88-94.

Hashish M., Pressure Effects in Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1989c, **111**(3), 221-228.

Hashish M., Visualization of the abrasive-waterjet cutting process, *Experimental Mechanics*, 1988, **28**(2), 159-169.

Hassan A. I., Kosmol J., Dynamic elastic-plastic analysis of 3D deformation in abrasive waterjet machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **113**(1), 337-341.

Hloch S., Valíček J., Topographical anomaly on surfaces created by abrasive waterjet, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, **59**(5), 593-604.

Hreha P., Radvanská A., Cárach J., Lehocká D., Monková K., Krolczyk G., Ruggiero A., Samardzić I., Kozak D., Hloch S., Monitoring of focusing tube wear during abrasive waterjet (AWJ) cutting of AISI 309, *Metalurgija*, 2014, **53**(4), 533-536.

Jai Aultrin K. S., Dev Anand M., Jerald Jose P., Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Water jet Machining Using Genetic-Fuzzy Approach, *Procedia Engineering*, 2012, **38**(C), 4013-4020.

Jani S. P., Kumar A. S., Khan M. A., Kumar, M. U., Machinability of Hybrid Natural Fiber Composite with and without Filler as Reinforcement, *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, **31**(10), 1393-1399.

Jegaraj J. J. R., Babu N. R., A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, **45**(12), 1443-1450.

John Rozario Jegaraj J., Ramesh Babu N., A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive waterjet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **185**(1), 217-227.

Johnston C.E., Waterjet/Abrasive Waterjet Machining, Editors: Davis J.R., Lampman S.R., Zorc T. B., Crankovic G.M., Ronke A. W., *Metals Handbook (Volume 16 Machining)*, 9th ed., ASM International, Ohio, 520-527, 1989.

Junkar M., Jurisevic B., Fajdiga M., Grah M., Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining, *International Journal of Impact Engineering*, 2006, **32**(7), 1095-1112.

Kantha Babu M., Krishnaiah Chetty O. V., A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining, *Wear*, 2003, **254**(7), 763-773.

Karakurt I., Aydin G., Aydiner K., An Experimental Study on The Depth of Cut of Granite in Abrasive Waterjet Cutting, *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, **27**(5), 538-544.

Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A., Recent Advances in Fiber/Matrix Interphase Engineering for Polymer Composites, *Progress in Materials Science*, 2015, **73**, 1-43.

Kechagias J., Petropoulos G., Vaxevanidis N., Application of Taguchi Design for Quality Characterization of Abrasive Water Jet Machining of TRIP Sheet Steels, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, **62**(5), 635-643.

Khan A. A., Haque M. M., Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **191**(1), 404-407.

Kinik D., Gánovská B., Hloch S., Monka P., Monková K., HutYROVÁ Z., On-line monitoring of technological process of material abrasive water jet cutting, *Technical Gazette*, 2015, **22**(2), 351-357.

Krajcarz D., Comparison Metal Water Jet Cutting With Laser and Plasma Cutting, *Procedia Engineering*, 2014, **69**, 838-843.

Kumar N., Shukla M., Finite element analysis of multi-particle impact on erosion in abrasive water jet machining of titanium alloy, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2012, **236**(18), 4600-4610.

Lebar A., Junkar M., Poredoš A., Cvjeticanin M., Method for Online Quality Monitoring of AWJ Cutting by Infrared Thermography, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010, **2**(3), 170-175.

Lee J., Park K., Kang M. C., Kang B. S., Shin B. S., Experiments and computer simulation analysis of impact behaviors of micro-sized abrasive in waterjet cutting of thin multiple layered materials, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**(3), 864-869.

Lemma E., Chen L., Siores E., Wang J., Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002a, **42**(7), 781-789.

Lemma E., Chen L., Siores E., Wang J., Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation, *Composite Structures*, 2002b, **57**(1), 297-303.

Lemma E., Deam R., Chen L., Maximum depth of cut and mechanics of erosion in AWJ oscillation cutting of ductile materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **160**(2), 188-197.

Lima C.E.A., Lebrón R., Souza A.J., Ferreira N.F., Neis P.D., Study of influence of traverse speed and abrasive mass flowrate in abrasive water jet machining of gemstones, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **83**(1), 77-87.

Ma C., Deam R. T., A correlation for predicting the kerf profile from abrasive water jet cutting, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, **30**(4), 337-343.

Momber A. W., Kovacevic R., Kwak H., Alternative method for the evaluation of the abrasive water-jet cutting of grey cast iron, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **65**(1), 65-72.

Momber A. W., Kovacevic R., Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, **34**(1), 17-25.

Norwood L. S., Fibre Reinforced Polymers, Editor: Hollaway L., *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, 1st ed., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 1-63, 1994.

Orbanic H., Junkar M., Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting, *Wear*, 2008, **265**(5), 821-830.

Palleda M., A study of taper angles and material removal rates of drilled holes in the abrasive water jet machining process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **189**(1), 292-295.

Paul S., Hoogstrate A. M., van Luttervelt C. A., Kals H. J. J., Analytical and experimental modelling of the abrasive water jet cutting of ductile materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998a, **73**(1), 189-199.

Paul S., Hoogstrate A. M., van Luttervelt C. A., Kals H. J. J., Analytical modelling of the total depth of cut in the abrasive water jet machining of polycrystalline brittle material, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998b, **73**(1), 206-212.

Rosner B., *Fundamentals of Biostatistics*, 7th ed., Brooks/Cole, Canada, 2010.

Santhanakumar M., Adalarasan R., Rajmohan M., Experimental Modelling and Analysis in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Tiles Using Grey-Based Response Surface Methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, **40**(11), 3299-3311.

Sarasini F., Santulli C., Vinylester Resins as a Matrix Material in Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites, Editor: Bai J., *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 69-87, 2013.

Selvam R., Karunamoorthy L., Arunkumar N., Investigation on performance of abrasive water jet in machining hybrid composites, *Materials and Manufacturing Processes*, DOI: 10.1080/10426914.2016.1198039.

Shanmugam D. K., Masood S. H., An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(8), 3887-3893.

Shanmugam D. K., Wang J., Liu H., Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**(14), 1527-1534.

Sheikh-Ahmad J.Y., Hole Quality and Damage in Drilling Carbon/Epoxy Composites by Electrical Discharge Machining, *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, **31**(7), 941-950.

Sheikh-Ahmad J.Y., *Machining of Polymer Composites*, 1st ed., Springer Science+Business Media, New York, 2009.

Siores E., Wong W. C. K., Chen L., Wager J. G., Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques, *CIRP Annals*, 1996, **45**(1), 327-330.

Sreekesh K., Dr. Govindan P., A Review on Abrasive Water Jet Cutting, *International Journal of Recant advances in Mechanical Engineering*, 2014, **3**(3), 153–158.

Srinivas S., Ramesh Babu, N., Penetration Ability of Abrasive Waterjets in Cutting of Aluminum-Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composites, *Machining Science and Technology*, 2012, **16**(3), 337-354.

Srinivasu D. S., Ramesh Babu N., A neuro-genetic approach for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle, *Applied Soft Computing*, 2008, **8**(1), 809-819.

Summers D.A., *Waterjetting Technology*, 1st ed., E & FN Spon, London, 1995.

Totuk O. H., Polimerler ve Kompozit Malzemeler, Editörler: Yurdakul M., İç Y. T., *Modern İmalatın Prensipleri*, 1. Basım, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 154, 2015.

URL-1: <http://www.compositeturkey.org.tr/component/flippingbook/book/51-mart-2017-sayi15/2-composites-turkey>, (Ziyaret Tarihi: 12 Mart 2017).

URL-2: <https://www.omax.com/learn/history-of-waterjet>, (Ziyaret Tarihi: 27 Mart 2017).

URL-3: <https://www.omax.com/learn/how-does-waterjet-work>, (Ziyaret Tarihi: 28 Mart 2017).

URL-4: <http://www.techniwaterjet.com/pumps/>, (Ziyaret Tarihi: 29 Mart 2017).

URL-5: <http://robjet.com/wp-content/uploads/2016/01/pompa.jpg>, (Ziyaret Tarihi: 31 Ekim 2017).

URL-6:

http://www.lin.com.tw/menu/products/Measuring/2008_Measuring/IM/metallograph/MA100/MA100_clip_image007.jpg, (Ziyaret Tarihi: 31 Ekim 2017).

URL-7: http://img.directindustry.com/images_di/photo-m/147949-11760783.jpg, (Ziyaret Tarihi: 31 Ekim 2017).

Vundavilli P. R., Parappagoudar M. B., Kodali S. P., Benguluri S., Fuzzy logic-based expert system for prediction of depth of cut in abrasive water jet machining process, *Knowledge-Based Systems*, 2012, **27**(C), 456-464.

Wang J., A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **94**(1), 30-35.

Wang J., Guo D. M., A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **121**(2), 390-394.

Wang J., Guo D. M., The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **133**(3), 371-377.

Wang J., Kuriyagawa T., Huang C. Z., An Experimental Study to Enhance the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining, *Machining Science and Technology*, 2003, **7**(2), 191-207.

Wang J., Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, **49**(3), 306-316.

Wang J., Wong W. C. K., A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, **39**(6), 855-870.

Wang J., Zhong Y., Enhancing the Depth of Cut in Abrasive Waterjet Cutting of Alumina Ceramics by Using Multipass Cutting with Nozzle Oscillation, *Machining Science and Technology*, 2009, **13**(1), 76-91.

Witten E., Composites Market Report 2016, *European Composites Industry*, 4-6, 2016.

Yuvaraj N., Kumar M. P., Investigation of Process Parameters Influence in Abrasive Water Jet Cutting of D2 Steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 2017a, **32**(2), 151-161.

Yuvaraj N., Kumar M. P., Multiresponse Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Process Parameters Using TOPSIS Approach, *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, **30**(7), 882-889.

Yuvaraj N., Kumar M. P., Surface integrity studies on abrasive water jet cutting of AISI D2 steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 2017b, **32**(2), 162-170.

Zain A. M., Haron H., Sharif S., Estimation of the minimum machining performance in the abrasive waterjet machining using integrated ANN-SA, *Expert Systems with Applications*, 2011a, **38**(7), 8316-8326.

Zain A. M., Haron H., Sharif S., Optimization of process parameters in the abrasive waterjet machining using integrated SA-GA, *Applied Soft Computing*, 2011b, **11**(8), 5350-5359.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Armağın M., Arici, A. A., Cutting performance of glass-vinyl ester composite by abrasive water jet, *Materials and Manufacturing Processes*, 2017, **32**(15), 1715-1722.



ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2009-2011 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2013 yılından beri İstanbul Medeniyet Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda Makine Yüksek Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

