

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KARBON FİBER
TAKVİYELİ PLASTİK (CFRP) KOMPOZİT
MALZEMENİN DELİNMESİ VE KESİLMESİ**

**2018
DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

Meltem ALTIN KARATAŞ

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK
(CFRP) KOMPOZİT MALZEMENİN DELİNMESİ VE KESİLMESİ**

Meltem ALTIN KARATAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Temmuz 2018

Meltem ALTIN KARATAŞ tarafından hazırlanan “AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK (CFRP) KOMPOZİT MALZEMENİN DELİNMESİ VE KESİLMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 13/07/2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Muammer NALBANT (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK (BÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Okan Ünal (KBÜ)

.....

...../...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Meltem ALTIN KARATAŞ

ÖZET

Doktora Tezi

AŞINDIRICILI SU JETİ İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK (CFRP) KOMPOZİT MALZEMENİN DELİNMESİ VE KESİLMESİ

Meltem ALTIN KARATAŞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Temmuz 2018, 232 sayfa

Bu çalışmada; Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP) kompozit malzemelerin modern imalat yöntemlerinden olan Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ) ile delinmesi ve kesilmesi araştırılmıştır. CFRP kompozit malzemenin delinmesi veya dairesel kesilmesi işlemleri esnasında oluşan, fiber kopması, reçine-fiber ayrılması, gerilme yoğunlaşması, mikro çatlaklar ve delik bölgesinde deformasyon gibi hasarların oluşmaması için işleme parametrelerinin optimum olanının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada; uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$, $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$, $[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}]_s$ fiber oryantasyon açılarında (FOA) üretilmiş olan 6 adet CFRP kompozit malzeme kullanılmıştır. Deneylerde işleme parametresi olarak; dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapı (8, 10, 12 ve 14 mm) kullanılmıştır. Delme işlemi öncesinde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek hasarları minimum değere indirebilmek için plakaların üç

tanesine pilot delikler (\varnothing 5,5 mm) açılmıştır. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucunda iş parçası üzerinde meydana gelen delaminasyon faktörü (F_d), kerf açısı (T), dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri analiz edilmiştir. Delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü Minitab 17.0 paket programı kullanılarak Taguchi analizi ile yapılmıştır. Genel olarak; delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en düşük değerleri, yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde, en yüksek değerler ise; düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde elde edilmiştir. Ayrıca; en düşük değerlerin pilot delik açılan malzemelerde elde edilmesinden dolayı bu yöntemin başarıyla sonuçlandığı tespit edilmiştir. En düşük delaminasyon faktörü (1,021) pilot delik delinmiş $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede, en yüksek delaminasyon faktörü (1,572) ise; $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede elde edilmiştir. En düşük kerf açısı ($0,870^\circ$), pilot delik delinmiş $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede, en yüksek kerf açısı ($3,337^\circ$) değeri ise; $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede elde edilmiştir. En düşük dairesellik hatası ($0,618$ mm), pilot delik delinmiş $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede, en yüksek dairesellik hatası ($1,902$ mm) ise; $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede elde edilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü ($0,580$ μ m) değeri; pilot delik delinmiş $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü ($2,708$ μ m) değeri ise; $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki malzemede elde edilmiştir. Buna ilaveten; işleme parametrelerinin etki derecelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Ele alınan tüm malzemelerde; delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde su basıncı ve nozul yaklaşma mesafesinin etkili olduğu, delik çapı ve nozul ilerleme hızının daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozit, aşındırıcı su jeti (ASJ), işleme (delme, kesme), yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon.

Bilim Kodu : 914.3.029

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC (CFRP) COMPOSITE MATERIALS DRILLING AND CUTTING WITH ABRASIVE WATER JET

Meltem ALTIN KARATAŞ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

July 2018, 232 pages

In this study; Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composite materials have been investigated by using Abrasive Water Jet (AWJ), one of the modern manufacturing methods, for drilling and cutting. It is aimed to determine the optimum machining parameters in order to prevent damages such as fiber breakage, resin-fiber separation, stress condensation, micro cracks and deformation in the hole region, which occur during drilling or circular cutting of CFRP composite material. In the experiments, four different water pressures (3600, 4300, 4800 and 5300 bar), nozzle feed rate (750, 1500, 2000 and 3000 mm/min), stand-off distance (1, 2, 3 and 4 mm) and hole diameter (8, 10, 12 and 14 mm) were used. Pilot holes (\varnothing 5,5 mm) were drilled in three of the plates to reduce damages to CFRP composite materials prior to drilling. As a result of drilling of CFRP composite materials with AWJ; delamination factor (F_d), kerf angle (T), circularity error and average surface roughness (Ra) were evaluated on the workpiece. Analysis of the AWJ machining parameters for the mean

values of delamination factor, kerf angle, circularity error and average surface roughness were done by Taguchi analysis using Minitab 17.0 program. Generally; the lowest values for delamination factor, kerf angle, circularity error and average surface roughness were obtained at high water pressure and low stand-off distance. Also; it has been found that this method has been successfully accomplished since the lowest values are obtained in pilot drilled materials. The highest values were obtained with low water pressure and high stand-off distance. The lowest delamination factor (1,021) value was obtained in the $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material (pilot hole drilled), and the highest delamination factor (1,572) value was obtained $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material. The lowest kerf angle (0,870°) value was obtained in the $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material (pilot hole drilled), and the highest kerf angle (3,337°) value was obtained in the $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material. The lowest circularity error (0,618 mm), value was obtained in the $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material (pilot hole drilled), and the highest circularity error (1,902 mm) was obtained in the $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material. The lowest average surface roughness (0,580 μm) value was obtained in the $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material (pilot hole drilled) and the highest average surface roughness (2,708 μm) value was obtained in the $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ FOA's material. In addition, variance analysis (ANOVA) was applied to determine the effect levels of the processing parameters. In all materials; while water pressure and stand-off distance are effective on average surface roughness, delamination factor, kerf angle, circularity error; the hole diameter and nozzle feed rate are less effective.

Key Word : Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composite, Abrasive Water Jet (AWJ), machining (drilling, cutting), surface roughness, delamination.

Science Code : 914.3.029

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren Sayın Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yardım ve desteklerinden dolayı, Sayın Prof. Dr. Muammer NALBANT ve Dr. Öğretim Üyesi Gökhan SUR hocalarıma çok teşekkür ederim.

Bu alıőmayı KBÜ-BAP-16/2-DR-101 numaralı proje kapsamında finansal olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Yönetimi Koordinatörlüğü çalıőanlarına çok teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен sabırla yanımda oldukları için sevgili aileme, tez çalıőmam boyunca desteğini esirgemeyen eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxx
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1.1. CFRP Kompozit Malzemeler.....	6
2.1.2. CFRP Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	8
2.1.3. CFRP Kompozit Malzemelerin Kullanıldığı Alanlar	8
2.1.4. CFRP Kompozit Malzemelerin İşlenmesi Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları	11
2.1.5. CFRP Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	15
2.2. AŞINDIRICILI SU JETİ İLE İŞLEME YÖNTEMİ.....	15
2.2.1. ASJ Tarihçesi.....	17
2.2.2. ASJ Tezgâhı.....	18
2.2.3. ASJ İle İşlemenin Kullanıldığı Alanlar	20
2.2.4. ASJ İle İşlemenin Avantajları ve Dezavantajları.....	20
2.3. CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN ASJ İLE İŞLENMESİ	22
BÖLÜM 3	24
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	24

3.1. CFRP KOMPOZİT MALZEMENİN ASJ İLE İŞLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	25
3.2. DİĞER ÇALIŞMALAR	33
3.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ....	55
BÖLÜM 4	56
MATERYAL VE METOD	56
4.1. DENEY NUMUNESİ.....	57
4.2. İŞLEME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE ÖN DENEYLERİN YAPILMASI	57
4.3. ASJ TEZGÂHI İLE DELME İŞLEMİ	59
4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ	60
4.5. DELAMİNASYON FAKTÖRÜ ÖLÇÜMÜ	61
4.6. KERF AÇISI ÖLÇÜMÜ.....	62
4.7. KOORDİNAT ÖLÇÜM MAKİNALARI (CMM, COORDINATE MEASURING MACHINES) İLE DELİK ÇAPINDA OLUŞAN DAİRESELLİK HATASININ ÖLÇÜMÜ	62
4.8. MİKRO YAPI GÖRÜNTÜLERİ	63
4.9. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROMETRE (EDS).....	64
4.10. TAGUCHI DENEYSEL TASARIM YAKLAŞIMI	65
4.10.1. Kontrol Faktörleri ve Ortogonal Dizi	66
4.11. VARYANS ANALİZİ (ANOVA).....	67
BÖLÜM 5	68
BULGULAR VE TARTIŞMA	68
5.1. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK DELAMİNASYON FAKTÖRÜNDEKİ DEĞİŞİM.....	69
5.1.1. İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Tabaka Girişinde (Üst) Oluşan Delaminasyon Faktöründeki Değişim	69
5.1.2. İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Tabaka Çıkışında (Alt) Oluşan Delaminasyon Faktöründeki Değişim	80
5.2. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK KERF AÇISINDAKİ DEĞİŞİM.....	90
5.3. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK DELİK ÇAPINDA OLUŞAN DAİRESELLİK HATASI DEĞERİNDEKİ DEĞİŞİM.....	100

Sayfa

5.4. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNDEKİ DEĞİŞİM	108
5.5. EDS (ENERGY-DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY) ANALİZİ İLE ELEMENT TANIMLAMA	118
5.6. PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU.....	120
5.6.1. Delaminasyon Faktörü İçin Doğrulama Deneyleri.....	120
5.6.2. Kerf Açısı İçin Doğrulama Deneyleri.....	121
5.6.3. Delik Çapında Oluşan Dairesellik Hatası İçin Doğrulama Deneyleri	122
5.6.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Doğrulama Deneyleri.....	124
BÖLÜM 6	126
SONUÇLAR	126
ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR	144
EK AÇIKLAMALAR A	157
EK AÇIKLAMALAR B	171
EK AÇIKLAMALAR C	197
EK AÇIKLAMALAR D	211
EK AÇIKLAMALAR E.....	225
ÖZGEÇMİŞ	232

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.2.	Takviye elemanına göre sınıflandırılan kompozit malzeme türlerinin gösterimi.	4
Şekil 2.3.	Fiber takviyeli kompozit malzemelerin oryantasyon görüntüleri....	5
Şekil 2.4.	Karbon fiber kumaş örgü çeşitlerinin gösterimi	5
Şekil 2.5.	a) Fiber takviyeli plastik kompozit çubuğun kesit görünüşü, b) Karbon lifi ve insan saç teli kalınlığının görüntüsü.....	6
Şekil 2.6.	CFRP kompozit malzeme görüntüsü	6
Şekil 2.7.	Otoklav kalıplama yöntemi ile CFRP kompozit malzeme üretiminin görüntüsü	8
Şekil 2.8.	B787 uçağında kullanılan malzemeler.....	9
Şekil 2.9.	Airbus 350 uçağında kullanılan CFRP kompozit parçalar	10
Şekil 2.10.	Uçakların uçuşu ile uçuş sırasında kontrolünü sağlayan ve etkileyen kuvvetlerin gösterimi	10
Şekil 2.11.	Kompozit malzemelerde oluşan çatlak büyüme hasarlarının görüntüsü a) soyulma b) kesilme ve c) yırtılma	11
Şekil 2.12.	Tabaka toklaştırma kavramında homojen ve heterojen tabaka oluşturma tekniklerinin gösterimi.....	12
Şekil 2.13.	Fiber takviyeli polimerlerin delinmesinde esas alınan temel öğeler	13
Şekil 2.14.	Delaminasyon faktörünün gösterimi.....	14
Şekil 2.15.	CFRP malzemelerin geleneksel kesici takımlarla işlenmesi sonucu oluşan yüzey hasarları.....	14
Şekil 2.16.	Su Jeti ile kesme sistemi ve temel elemanları	18
Şekil 2.17.	ASJ delme işlemi a) Delme aşaması b) Kesme aşaması.....	19
Şekil 2.18.	Aşındırıcılı tip nozul (kesme kafası) kesit görünüşü ve kesme parametrelerinin gösterimi.....	19
Şekil 2.19.	ASJ ile işleme sonucu oluşan geometrik özelliklerin gösterimi	21
Şekil 2.20.	ASJ ile işleme sonucu oluşan kerf genişliğinin şematik gösterimi 22	22

Şekil 3.1.	P=210 MPa basınç ile işlenen CFRP kompozit malzeme yüzeyinin yandan görünüşü a) Saf SJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü b) m=3 g/s ASJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü c) m=3 g/s ve aşındırıcıların 3 saniye sonra eklenmesi sonucu ASJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü	26
Şekil 3.2.	ASJ hızının artışına bağlı olarak jet-lag açısı değişim görüntüsü..	27
Şekil 3.3.	CFRP kompozit malzemenin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu oluşan deliklerin görüntüsü.....	28
Şekil 3.4.	ASJ ile CFRP kompozit malzemenin 200 MPa su basıncı, iki farklı nozul yaklaşma mesafesi (2 ve 3 mm) ve iki farklı aşındırıcı akış oranında (8.88 ve 9.7 g/s) delinmesi sonucu oluşan deliğinin çıkış biçiminin görüntüsü	29
Şekil 3.5.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilme anı görüntüsü.....	29
Şekil 3.6.	İşlenen CFRP kompozit malzemenin 2B çizimi ve görüntüsü	32
Şekil 3.7.	a) Sekiz ağızlı PCD matkap ile delinmiş deliklerin dairesel testere ile kesilmesi sonucu elde edilen deney numunesinin şematik görüntüsü b) Yüzey pürüzlülüğü ölçüm bölgeleri için kesme kenarı ve fiber oryantasyonunun etkileşiminin gösterimi.....	34
Şekil 3.8.	Sekiz ağızlı PCD matkap ile delinmiş deliklerin görünümü.	34
Şekil 3.9.	CFRP kompozit malzemenin delinmesinde kullanılan beş farklı matkap ucunun gösterimi a) 120° helisel b) 85° helisel c) brad d) dagger e) step matkap ucunun görüntüleri.....	35
Şekil 3.10.	CFRP iş parçasının içerisine termokupulların yerleştirilme anı ve termokupulla sıcaklık ölçüm metodolojisinin gösterimi	36
Şekil 3.11.	CFRP kompozit malzemelerin delinmesi işleminde temel alanların etkileşim açıları, dört temel kesme mekanizması ve talaş biçimlerinin gösterimi.....	38
Şekil 3.12.	CFRP kompozit malzemenin delme deneylerinde kullanılan matkap uçlarının görüntüsü	40
Şekil 3.13.	CFRP kompozit malzemenin a) Kanal frezelenmesi, b) Frezeleme işleminde kullanılan PCD freze takımı görüntüsü.....	41
Şekil 3.14.	Geliştirilen elektrokaplama takımının şematik görüntüsü.....	42
Şekil 3.15.	CFRP kompozit malzemenin yüksek hızda kesilme testinin gösterimi a) İşleme yönü, b) Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızına göre değişimi, c) Kesme işlemi sonrası oluşan yüzey görüntüsü	43
Şekil 3.16.	CFRP kompozit malzemenin kesilmesi anı a) İşleme yönü, b) Ortalama yüzey pürüzlülüğünün mesafeye bağlı olarak değişim grafiği görüntüsü.....	43
Şekil 3.17.	CFRP kompozit malzemenin UFFD ile işlenmiş delik içinin şematik görüntüsü	45

Şekil 3.18.	UFFD, UVD ve ASJ ile işlenmiş delik yüzeylerinin mikroskopik görüntüleri.....	46
Şekil 3.19.	Ti6Al4V/CFRP tabakalarının ASJ ile kesilmesi sonucu oluşan kerf profilinin şematik gösterimi.....	47
Şekil 3.20.	[Cam ₁₀ /Aramid ₁₀ /Karbon ₁₀] 30 tabakalı hibrit polyester reçine matrisli numunelerin yapı şeması	48
Şekil 3.21.	Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi	49
Şekil 3.22.	Kısa giriş kayma testi ve üç nokta eğme cihazının görüntüsü.....	50
Şekil 3.23.	CTP kompozit malzeme ve vurucunun SEM modellerinin görüntüsü	52
Şekil 3.24.	Aşınma deney düzeneğinin şematik gösterimi	53
Şekil 4.1.	500×300×6 mm ölçülerinde üretimi gerçekleştirilen CFRP kompozit malzeme görüntüsü.	57
Şekil 4.2.	Bystronic marka Byjet Flex 8030 model ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemenin delme anı görüntüsü.	59
Şekil 4.3.	Her bir delik için ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılan bölgelerin gösterimi.	60
Şekil 4.4.	Mitutoyo marka SJ-410 model pürüzlülük ölçüm cihazı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümünün gösterimi.	60
Şekil 4.5.	Nikon ShuttlePix mikroskobun genel görünümü.	61
Şekil 4.6.	Delaminasyon faktörünün gösterimi.....	61
Şekil 4.7.	ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemelerin delinme işlemi sonrasında kompozit malzemeler üzerinde oluşan kerf açısının gösterimi.	62
Şekil 4.8.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ tezgâhı ile delme işlemi sonrası ölçü doğruluklarının Faro marka Edge model taşınabilir CMM ile ölçüm anı görüntüsü.	63
Şekil 4.9.	Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü.	64
Şekil 4.10.	Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü.	65
Şekil 5.1.	Bulgular ve tartışma bölümünün akış şeması.	68
Şekil 5.2.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki değişim grafiği.....	71

- Şekil 5.3. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki değişim grafikleri a) $P=3600$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=4$ mm, $D=14$ mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri b) $P=5300$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=1$ mm, $D=12$ mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri. 73
- Şekil 5.4. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu tabakanın üst kısmında oluşan en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü değerlerine sahip deliklerin mikroskopik görüntüleri a) M2 malzemesi ($P=3600$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=4$ mm, $D=14$ mm) b) M3pd malzemesi ($P=5300$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=1$ mm, $D=12$ mm). 74
- Şekil 5.5. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması..... 76
- Şekil 5.6. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği. 78
- Şekil 5.7. M1 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği. 78
- Şekil 5.8. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki değişim grafiği..... 81
- Şekil 5.9. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki değişim grafikleri a) $P=3600$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=4$ mm, $D=14$ mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri b) $P=5300$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=1$ mm, $D=12$ mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri. 83
- Şekil 5.10. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu oluşan en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerine sahip deliklerin mikroskopik görüntüleri a) M2 malzemesi ($P=3600$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=4$ mm, $D=14$ mm) b) M2pd malzemesi ($P=5300$ bar, $f=3000$ mm/dak, $L=1$ mm, $D=12$ mm). 84
- Şekil 5.11. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması..... 86
- Şekil 5.12. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği. 88

Şekil 5.13.	M1 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.	88
Şekil 5.14.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerindeki değişim grafiği.	92
Şekil 5.15.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen kerf açısı değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen kerf açısı değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen kerf açısı değerleri.	93
Şekil 5.16.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerine sahip deliklerin mikroskobik görüntüleri a) M2 malzemesi (P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm) b) M3pd malzemesi (P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm).	94
Şekil 5.17.	M1 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	96
Şekil 5.18.	M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen kerf açısı değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.	98
Şekil 5.19.	M1 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.	99
Şekil 5.20.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük dairesellik hatası değerlerindeki değişim grafiği.	102
Şekil 5.21.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen dairesellik hatasındaki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen dairesellik hatası değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen dairesellik hatası değerleri.	103
Şekil 5.22.	M1 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	105
Şekil 5.23.	M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen dairesellik hatası değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.	106
Şekil 5.24.	M1 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.	107
Şekil 5.25.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim grafiği.	110

Şekil 5.26.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.	112
Şekil 5.27.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen a) en yüksek ve b) en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip delik yüzeylerinin SEM görüntüleri.	113
Şekil 5.28.	M1 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	115
Şekil 5.29.	M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.	117
Şekil 5.30.	M1 malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği.	117
Şekil 5.31.	CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesi sonrası 1 ve 2 nolu nesnelerin EDS analizi için 250x büyütme SEM görüntüsü (P=3600 bar, L=1 mm, f=750 mm/dak, D=10 mm)	118
Şekil 5.32.	1 nolu CFRP kompozit malzemeye ait EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü	119
Şekil 5.33.	2 nolu aşındırıcı numune üzerinde yapılan EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü	119
Şekil Ek A.1.	M2 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	159
Şekil Ek A.2.	M2 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği	160
Şekil Ek A.3.	M3 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	161
Şekil Ek A.4.	M3 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği	162
Şekil Ek A.5.	M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	164
Şekil Ek A.6.	M1pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği	165

Şekil Ek A.7.	M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	166
Şekil Ek A.8.	M2pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği	167
Şekil Ek A.9.	M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	169
Şekil Ek A.10.	M3pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği	170
Şekil Ek A.11.	M2 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	171
Şekil Ek A.12.	M2 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği	172
Şekil Ek A.13.	M3 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	174
Şekil Ek A.14.	M3 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği	175
Şekil Ek A.15.	M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	176
Şekil Ek A.16.	M1pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği	177
Şekil Ek A.17.	M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	179
Şekil Ek A.18.	M2pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.	180
Şekil Ek A.19.	M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	181
Şekil Ek A.20.	M3pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.	182
Şekil Ek B.1.	M2 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	185
Şekil Ek B.2.	M2 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği. .	186
Şekil Ek B.3.	M3 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	187

Şekil Ek B.4.	M3 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği..	188
Şekil Ek B.5.	M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	190
Şekil Ek B.6.	M1pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.	191
Şekil Ek B.7.	M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	192
Şekil Ek B.8.	M2pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.	193
Şekil Ek B.9.	M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	195
Şekil Ek B.10.	M3pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.	196
Şekil Ek C.1.	M2 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	199
Şekil Ek C.2.	M2 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.....	200
Şekil Ek C.3.	M3 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	201
Şekil Ek C.4.	M3 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.....	202
Şekil Ek C.5.	M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	204
Şekil Ek C.6.	M1pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.....	205
Şekil Ek C.7.	M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	206
Şekil Ek C.8.	M2pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.....	207
Şekil Ek C.9.	M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.	209
Şekil Ek C.10.	M3pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.....	210
Şekil Ek D.1.	M2 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.....	213

Sayfa

Şekil Ek D.2.	M2 malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	214
Şekil Ek D.3.	M3 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	215
Şekil Ek D.4.	M3 malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	2216
Şekil Ek D.5.	M1pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	218
Şekil Ek D.6.	M1pd malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	219
Şekil Ek D.7.	M2pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	220
Şekil Ek D.8.	M2pd malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	221
Şekil Ek D.9.	M3pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması	223
Şekil Ek D.10.	M3pd malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	224

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Modern imalat yöntemlerinin gösterimi	16
Çizelge 2.2.	ASJ ile işlemede kullanılan parametreler	20
Çizelge 3.1.	CFRP kompozit malzemenin SJ ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	25
Çizelge 3.2.	Farklı kalınlıklardaki CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	26
Çizelge 3.3.	CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	27
Çizelge 3.4.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesi işleminde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	30
Çizelge 3.5.	İki farklı CFRP kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gösterimi.....	31
Çizelge 3.6.	CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilme deneyi için seçilen takım değerlerinin gösterimi.....	31
Çizelge 3.7.	CFRP kompozit malzemenin ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.....	32
Çizelge 3.8.	CFRP kompozit malzemenin delinmesinde kullanılan deney parametrelerinin gösterimi.....	33
Çizelge 3.9.	DeneySEL testlerde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi... ..	35
Çizelge 3.10.	CFRP kompozit malzemelerin matkap ile delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	35
Çizelge 3.11.	CFRP kompozit malzemelerin PCD, karbür takımlarla frezeleme ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi	37
Çizelge 3.12.	CFRP kompozitlerin karbür matkap ile yüksek hızda delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi	39
Çizelge 3.13.	CFRP kompozit malzemenin delinme işleminin ön testlerinde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi.	40
Çizelge 3.14.	CFRP kompozit malzemenin delinme işleminin dENEYSEL testlerinde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi.	40
Çizelge 3.15.	CFRP kompozit malzemelerin UFFD, UVD ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	44
Çizelge 3.16.	CFRP/Ti6Al4V tabakalarının ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.	46

Çizelge 3.17.	Kompozit numunelerin konfigürasyonu	48
Çizelge 3.18.	Cam fiber ve karbon fiber kompozit çubukların teknik özellikleri.	53
Çizelge 4.1.	CFRP kompozit malzemeler için tanımlanan kodların gösterimi.	56
Çizelge 4.2.	CFRP kompozit malzemeye ait teknik özellikler.	57
Çizelge 4.3.	CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesi için belirlenen işleme parametreleri.....	58
Çizelge 4.4.	Bystronic marka Byjet Flex 8030 model ASJ tezgâhına ait teknik özellikler.	59
Çizelge 4.5.	Ortogonal dizi $L_{16}(4^4)$	66
Çizelge 4.6.	ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemeleri delme esnasında kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri.	66
Çizelge 5.1.	CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	69
Çizelge 5.2.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki iyileşme sonuçları.....	70
Çizelge 5.3.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki iyileşme sonuçları	71
Çizelge 5.4.	M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	75
Çizelge 5.5.	M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	76
Çizelge 5.6.	M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.....	77
Çizelge 5.7.	CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında oluşan delaminasyon faktörü (üst) değerleri.	80
Çizelge 5.8.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki iyileşme sonuçları.....	81
Çizelge 5.9.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki iyileşme sonuçları.	82
Çizelge 5.10.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	86

Çizelge 5.11.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	87
Çizelge 5.12.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	88
Çizelge 5.13.	CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında oluşan delaminasyon faktörü (alt) değerleri	91
Çizelge 5.14.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki iyileşme sonuçları.	92
Çizelge 5.15.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki iyileşme sonuçları	93
Çizelge 5.16.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	96
Çizelge 5.17.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değerinin S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	97
Çizelge 5.18.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	98
Çizelge 5.19.	CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen kerf açısı (T) değerleri.	101
Çizelge 5.20.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen kerf açısı değerlerindeki iyileşme sonuçları	102
Çizelge 5.21.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerindeki iyileşme sonuçları	103
Çizelge 5.22.	M1 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları	106
Çizelge 5.23.	M1 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerleri tepki tablosu.....	107
Çizelge 5.24.	M1 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	108
Çizelge 5.25.	CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen dairesellik hatası değerleri	111
Çizelge 5.26.	CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen dairesellik hatası değerlerindeki iyileşme sonuçları	112
Çizelge 5.27.	CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük dairesellik hatası değerlerindeki iyileşme sonuçları.....	113

Çizelge 5.28.	M1 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.....	115
Çizelge 5.29.	M1 malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerleri tepki tablosu.....	116
Çizelge 5.30.	M1 malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.	117
Çizelge 5.31.	M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	121
Çizelge 5.32.	M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	123
Çizelge 5.33.	M1 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.....	124
Çizelge 5.34.	M1 malzemesinin dairesellik hatası değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	125
Çizelge Ek A.1.	M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	158
Çizelge Ek A.2.	M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	158
Çizelge Ek A.3.	M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	159
Çizelge Ek A.4.	M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	160
Çizelge Ek A.5.	M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	161
Çizelge Ek A.6.	M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	162
Çizelge Ek A.7.	M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	163
Çizelge Ek A.8.	M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	163
Çizelge Ek A.9.	M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	164
Çizelge Ek A.10.	M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	165
Çizelge Ek A.11.	M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	166
Çizelge Ek A.12.	M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	167

Sayfa

Çizelge Ek A.13. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.....	168
Çizelge Ek A.14. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	168
Çizelge Ek A.15. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.....	169
Çizelge Ek A.16. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	170
Çizelge Ek A.17. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	171
Çizelge Ek A.18. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	172
Çizelge Ek A.19. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	173
Çizelge Ek A.20. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	173
Çizelge Ek A.21. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	174
Çizelge Ek A.22. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	175
Çizelge Ek A.23. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	176
Çizelge Ek A.24. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	177
Çizelge Ek A.25. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	178
Çizelge Ek A.26. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	178
Çizelge Ek A.27. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	179
Çizelge Ek A.28. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.....	180
Çizelge Ek A.29. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	181
Çizelge Ek A.30. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.....	182
Çizelge Ek B.1. M2 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.....	184
Çizelge Ek B.2. M2 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	184

Sayfa

Çizelge Ek B.3. M2 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	185
Çizelge Ek B.4. M3 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.	186
Çizelge Ek B.5. M3 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	187
Çizelge Ek B.6. M3 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	188
Çizelge Ek B.7. M1pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.	189
Çizelge Ek B.8. M1pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	189
Çizelge Ek B.9. M1pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	190
Çizelge Ek B.10. M2pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.	191
Çizelge Ek B.11. M2pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	192
Çizelge Ek B.12. M2pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	193
Çizelge Ek B.13. M3pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.	194
Çizelge Ek B.14. M3pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	194
Çizelge Ek B.15. M3pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.....	195
Çizelge Ek C.1. M2 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.....	198
Çizelge Ek C.2. M2 malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	198
Çizelge Ek C.3. M2 malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.	199
Çizelge Ek C.4. M3 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.....	200
Çizelge Ek C.5. M3 malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	201
Çizelge Ek C.6. M3 malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.	202
Çizelge Ek C.7. M1pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları... ..	203
Çizelge Ek C.8. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	203
Çizelge Ek C.9. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları ..	204
Çizelge Ek C.10. M2pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları... ..	205
Çizelge Ek C.11. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	206
Çizelge Ek C.12. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları .	207
Çizelge Ek C.13. M3pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları... ..	208
Çizelge Ek C.14. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.....	208

Sayfa

Çizelge Ek C.15. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları .	209
Çizelge Ek D.1. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	212
Çizelge Ek D.2. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	212
Çizelge Ek D.3. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.....	213
Çizelge Ek D.4. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	214
Çizelge Ek D.5. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	215
Çizelge Ek D.6. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.....	216
Çizelge Ek D.7. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	217
Çizelge Ek D.8. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	217
Çizelge Ek D.9. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.	218
Çizelge Ek D.10. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	219
Çizelge Ek D.11. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	220
Çizelge Ek D.12. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.	221
Çizelge Ek D.13. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.....	222
Çizelge Ek D.14. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.	222
Çizelge Ek D.15. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.	223
Çizelge Ek E.1. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	226
Çizelge Ek E.2. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	226
Çizelge Ek E.3. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	226

Sayfa

Çizelge Ek E.4. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	226
Çizelge Ek E.5. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	226
Çizelge Ek E.6. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	227
Çizelge Ek E.7. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	227
Çizelge Ek E.8. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	227
Çizelge Ek E.9. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	227
Çizelge Ek E.10. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	227
Çizelge Ek E.11. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	228
Çizelge Ek E.12. M2 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	228
Çizelge Ek E.13. M3 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	228
Çizelge Ek E.14. M1pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	228
Çizelge Ek E.15. M2pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	228
Çizelge Ek E.16. M3pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	229
Çizelge Ek E.17. M2 malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	229
Çizelge Ek E.18. M3 malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	229
Çizelge Ek E.19. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	229

Sayfa

Çizelge Ek E.20. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	229
Çizelge Ek E.21. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	230
Çizelge Ek E.22. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	230
Çizelge Ek E.23. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	230
Çizelge Ek E.24. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	230
Çizelge Ek E.25. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	230
Çizelge Ek E.26. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.	231

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

°C	: Santigrat derece
°	: Derece
%	: Yüzde oran
MPa	: Mega paskal
Ø	: Çap (mm)
m	: Metre
mm	: Milimetre
µm	: Mikron metre
g	: Gram
s	: Saniye
dev	: Devir
dak	: Dakika
P	: Basınç (bar)
f	: İlerleme hızı
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
SiO ₂	: Silisyum oksit
Cu	: Bakır
C	: Karbon
O	: Oksijen
Au	: Altın
Si	: Silisyum
Al	: Alüminyum
Fe	: Demir
Mg	: Magnezyum
Ca	: Kalsiyum
Ti	: Titanyum
Mn	: Manganez

- M_a : Aşındırıcı akış oranı
 L_{16} : Taguchi L_{16} deney düzeni sırası
 R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
 F_d : Delaminasyon faktörü (mm)
 T : Kerf açısı ($^\circ$)
 $W_{\text{üst}}$: Üst kerf genişliği
 W_{alt} : Alt kerf genişliği
 t : Tabaka kalınlığı (mm)
 pd : Pilot delik
 max : Maksimum



KISALTMALAR

- CFRP : Karbon Fiber Takviyeli Plastik (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
CTP : Cam Elyaf Takviyeli Plastik
SJ : Su Jeti
ASJ : Aşındırıcılı Su Jeti
AWJ : Aşındırıcılı Su Jeti (Abrasive Water Jet)
SB : Su Basıncı
NİH : Nozul İlerleme Hızı (mm/dak)
NYM : Nozul Yaklaşma Mesafesi (Stand-off Mesafesi)(mm)
NÇ : Nozul Çapı (mm)
D : Delik Çapı (mm)
AAO : Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)
UYB : Ultra Yüksek Basıncı
ÜKG : Üst Kerf Genişliği
AKG : Alt Kerf Genişliği
FOA : Fiber Oryantasyon Açısı (°)
MRR : Talaş Kaldırma Oranı (Material Removal Rate)
CMM : Koordinat Ölçüm Makinaları (Coordinate Measuring Machines)
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
EDS : Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi (Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy)
NIJ : Ulusal Adalet Enstitüsü (National Institute of Justice)
ILSS : Tabakalararası Kayma Dayanımı (Interlaminar Shear Strength)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Genel olarak malzeme yapısının birçok fazda (atomik, mikroskobik, vb.) olmasına rağmen, günümüzde bir malzeme hakkında bilgi sahibi olabilmek için malzemenin yapısı incelenebilmektedir. Bu durum, malzemenin fiziksel özelliklerinin ve malzemeyi oluşturan atomların türü ve dizilişleri ile ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır [1]. Mühendislik uygulamalarında kullanılan ürünlerin tasarımı ve üretimi için 50000 den fazla malzeme bulunmaktadır [2,3]. Bu malzemeler; geleneksel malzemeler (bakır, dökme demir, pirinç, vb.) ile son yıllarda geliştirilen gelişmiş (kompozitler, seramik ve yüksek performanslı çelikler vb.) malzemelerdir. Malzemelerin çeşitliliği nedeniyle, mühendislik uygulamalarında malzemenin ve işleme sürecinin doğru seçimi büyük bir önem arz etmektedir [3].

Kompozit malzemeler; performans, yapısal yeterlilik ve maliyet açısından sağladıkları avantajlar nedeniyle uzay ve havacılık, denizcilik ve diğer birçok sektörlerde artan uygulama alanı bulmaktadır. Ancak, yıllardır dünya çapında yaygın araştırmalar yapılmasına rağmen, kompozit yapıların hasar etkilerini de içeren bu tür malzemelerin davranışlarını tahmin etmek için tam ve doğrulanmış bir metodoloji henüz elde edilememiştir. Bu durum, herhangi bir kompozit yapının geometri, yükleme koşulları ve hasar türlerini içeren çeşitli parametrelere bağlı olmasından kaynaklanmaktadır [4].

Karbon fiberin takviye elemanı olarak kullanıldığı karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler; polimer matrisli, metal matrisli, seramik matrisli veya karbon matrisli olabilmektedir. Bunların arasından polimer matrisli olan karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozit malzemelerde polimerlerin düşük sıcaklıkta kolay şekil almaları ve amaca uygun üretilibilmeleri nedeniyle her alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1].

Tabakalı kompozitler sınıfındaki CFRP kompozit malzemeler farklı katmanlardan oluşmaktadır. Katmanlar farklı malzemelerden veya farklı yönelimlerdeki aynı malzemedir olabilmektedir. Tüm tabakalı kompozit malzemelerin hangi üretim yöntemiyle üretilmiş olursa olsun geleneksel (torna, freze, matkap, vb.) veya geleneksel olmayan (SJ (su jeti), ASJ (aşındırıcılı su jeti), USM (ultrasonik işleme), ECM (elektrokimyasal işleme), EDM (tel erozyon ile işleme), LM (lazer ile işleme), CHM (kimyasal işleme), PCM (fotokimyasal işleme), vb.) metodlarla işlenmesi esnasında matris hataları (boşluk, porozite), fiber çatlakları, ara yüzey çatlakları, delaminasyon, safsızlıklar gibi birtakım hasarlar meydana gelmektedir. Genel olarak; modern imalat yöntemleri, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında yüksek spesifik enerji ve düşük talaş oranı ile nitelendirilmektedir. Modern imalat yöntemleri ile elde edilen yüksek doğruluk, karmaşık geometrilerde iyi yüzey elde edilmesi, iş takımının olmaması ve bitmiş iş parçasında çapak oluşmaması modern imalat yöntemlerinin geleneksel yöntemlere olan üstünlükleri olarak bilinmektedir [5].

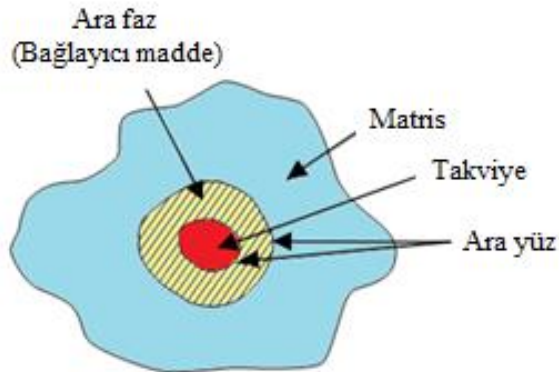
Bu çalışmada; CFRP kompozit malzemelerin modern imalat yöntemlerinden olan ASJ ile delinmesi ve kesilmesi araştırılmıştır. CFRP kompozit malzemenin delinmesi veya dairesel kesilmesi işlemleri esnasında oluşan fiber kopması, reçine-fiber ayrılması, mikro çatlaklar ve delik bölgesinde deformasyon gibi hasarlarının oluşmaması için işleme parametrelerinden optimum olanının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Delme işleminin uygulandığı plakalar; uzay ve havacılık sanayisinde en fazla kullanılan, twill dokuma 3K karbon fiber içeren prepreg malzeme olarak seçilmiş olup minimum hacimsel fiber yoğunluğunun % 50 olarak üretiminin üç farklı fiber oryantasyonunda $[(0^{\circ}/90^{\circ})_s, (+45^{\circ}/-45^{\circ})_s$ ve $(0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ})_s]$ üretilmesi sağlanmıştır. Malzemeler; daha hafif ve daha sağlam olmasıyla birlikte kararlı yapısından dolayı vakum torbalama yöntemiyle imal ettirilmiştir. ASJ ile delme ve kesme işlemi sonrası numune yüzey hasarlarının tespit edilebilmesi için SEM (Scanning Electron Microscope- Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri alınmıştır. Yapılan çalışmada, tasarım ve analiz yöntemi olarak Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak Varyans analizi (ANOVA) yapılmış olup kontrol faktörlerinin delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki seviyeleri tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2

2.1. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, fiziksel biçiminde ve kimyasal bileşiminde farklılık gösteren iki ya da daha fazla mikro bileşenin sinerjik (birbirinin etkisini arttıran) bileşimi olarak tanımlanmaktadır. İki ya da daha fazla bileşenin olmasının amacı, her iki bileşenin üstün özelliklerinden faydalanılmasıdır [6,7]. Bu tür malzemeler; belirgin anizotropik, homojen olmayan yapıları ve plastik deformasyona uğramayan özellikleri ile nitelendirilmektedir [6,8-10].

Kompozit malzemelerin yapı ve bileşenleri olan matris ve takviye arasında kalan bölge ara faz olarak tanımlanmış olup, bu bölge kendine ait özellikler ve bileşenler arasında üç boyutlu bir alanı kapsamaktayken; bileşenler arasında ortak sınır alanı olan ara yüz, iki boyutlu bir yapıda olmaktadır (Şekil 2.1) [1]. Matrisler; metal, plastik, cam veya seramik olabilmekte iken takviyeler; fiberler, parçacıklar veya kristal flamanlar (whiskers) olmaktadır [3]. Bunların içerisinde fiber takviyeli kompozit malzemelerde matris olarak; farklı tür reçine (epoksi, fenolik, polyester, vinilester, vb.) kullanılırken takviye olarak; cam, karbon ya da aramid (kevlar) kullanılabilir.



Şekil 2.1. Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi [1,11].

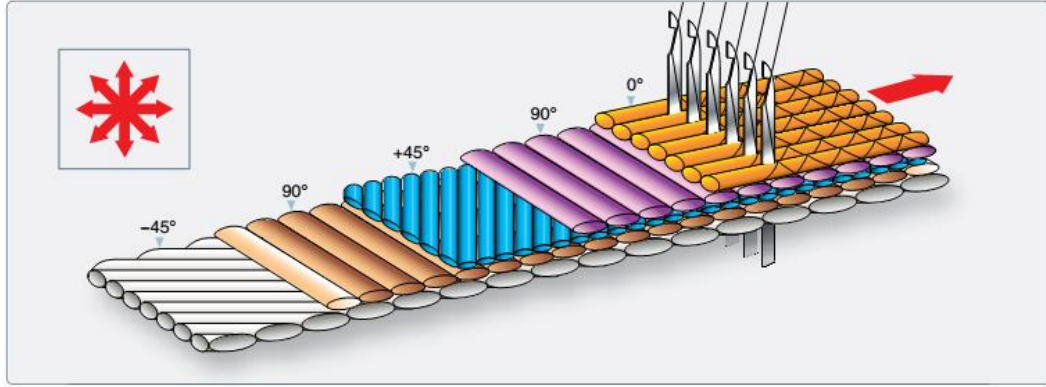
Kompozit malzemelerde ana malzemeler metaller, seramikler, cam ve polimerler olmak üzere dört sınıfa ayrılabilir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler bu dört grup malzemeden herhangi birinin fiberle takviye edilmesiyle elde edilirler. Fiberlerin gömüldüğü ana malzeme matris malzemesi olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemelerde matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar; fiberleri bir arada tutmak, yükü fiberlere dağıtmak ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi, düşük viskoziteli yapıda iken daha sonra fiberleri sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir [12,13].

Genel olarak; fiberler, ana yük taşıma ögesi iken matris, fiberleri istenilen doğrultu ve konumda muhafaza ederek çevrelemektedir. Matrisler, fiberler arasında yük aktarım ögesi olarak hareket ederek yüksek sıcaklık ve nemli ortam gibi çevresel zararlardan korumaktadır. Bu nedenle, fiberler, matris için hem takviye oluşturup hem de fiber takviyeli kompozit malzemeler için faydalı olan birçok işlevi de yerine getirmektedir [14]. Takviye elemanı olarak fiberlerin kullanıldığı, uzunluk-çap oranı 10:1'den büyük olan kompozit malzemeler fiber takviyeli kompozit sınıfına girmekte olup cam fiber, karbon fiber veya aramid fiber gibi türleri bulunmaktadır. Tanecikli, parçacık takviyeli, tabakalı ve dolgulu kompozit çeşitleri de bulunmaktadır (Şekil 2.2) [1].



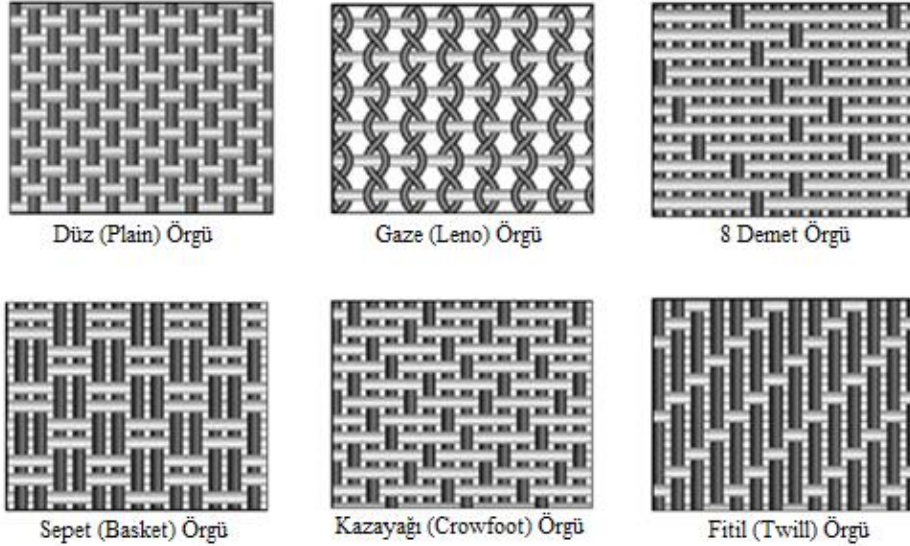
Şekil 2.2. Takviye elemanına göre sınıflandırılan kompozit malzeme türlerinin gösterimi [1,11].

İstenilen mekanik özelliklere göre üretilen fiber takviyeli plastik (FRP) kompozit malzemelerin oryantasyonunun, kullanılacak alana uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu yüzden 0° oryantasyonu aksenal yükleri, $\pm 45^\circ$ oryantasyonu kayma yükleri ve 90° oryantasyonu yanal yükleri karşılamaktadır (Şekil 2.3). Diğer bir ifadeyle 0° oryantasyonu çekme mukavemetinin en yüksek olduğu, çelik kadar sağlam ve bükülmesi zor, $\pm 45^\circ$ oryantasyonu bükülebilir ve 90° oryantasyonu çekme mukavemetinin olmadığı doğrudan kopan oryantasyonu ifade etmektedir [15].



Şekil 2.3. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin oryantasyon görüntüleri [15].

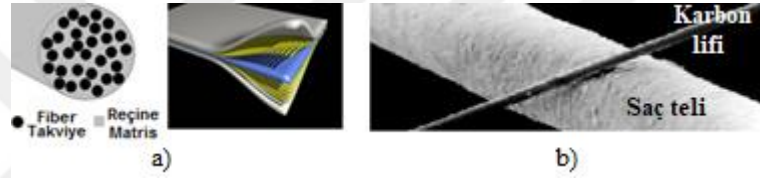
Fiber takviyeleri; son derece sert, güçlü ve hafif olup mükemmel yapı malzemeleri oluşturmak için birçok işlemden kullanılmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan bu takviye elemanları farklı tür fiberler olabilirken (cam, karbon, aramid vs.) matris malzemeleri metal, seramik veya plastik olmaktadır [10,16,17]. Önemli fiber takviyelerinden olan karbon fiberler; iplik, tek yönlü dokuma ya da farklı örgü türlerinde olmaktadır (Şekil 2.4) [3,14,15,18]. Karbon fiberlerin tek halleri ipçik (filament) olarak adlandırılmakta ve 3K, 6K, 12K veya 24K olarak sembolize edilmektedir (K=1000 adet ipçik) [15].



Şekil 2.4. Karbon fiber kumaş örgü çeşitlerinin gösterimi [18].

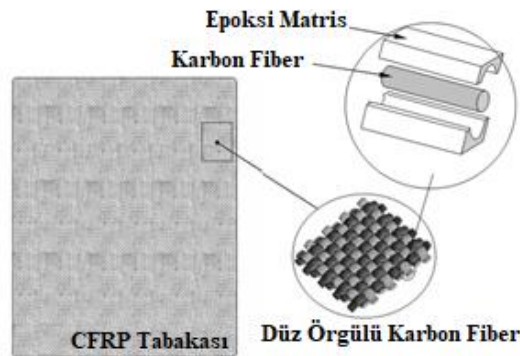
2.1.1. CFRP Kompozit Malzemeler

Karbon fiber lifi, Edison'un elektrik lambalarında kullanımının uygun olduğu karbon fiber lifinin imali için patent almasıyla 1879 yılında ortaya çıkmıştır [19]. Karbon fiberler; düşük yoğunluk, yüksek çekme modülü ve dayanımı, düşük termal genleşme katsayısı, 3000 °C üzerinde oksijen varlığında termal kararlılık, mükemmel sürünme dayanımı, güçlü asitlerde daha iyi kimyasal kararlılık, biyoyumluluk, yüksek termal iletkenlik ile birlikte düşük elektrik özdirenç özelliklerine sahiptir [20]. Karbon fiber lifinin yetişkin bir insan saçı (çap 70-100 µm) ile mukayesesinde karbon lifinin insan saç teli çapından yaklaşık olarak 7 kat daha düşük olduğu Şekil 2.5'te rahatlıkla görülmektedir [21].



Şekil 2.5. a) Fiber takviyeli plastik kompozit çubuğun kesit görünüşü [22], b) Karbon lifi ve insan saç teli kalınlığının görüntüsü [23].

CFRP kompozit malzemeler düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen en fazla yük taşıyan malzeme olup, mükemmel ısıl (bakırdan bile daha yüksek) ve elektriksel iletkenliğe, yüksek yorulma dayanımına, 145000 - 220000 MPa değerinde yüksek elastikiyet modülüne, 800 - 1200 MPa çekme mukavemetine sahip kompozit malzemeler sınıfındadır (Şekil 2.6) [14,17,24].



Şekil 2.6. CFRP kompozit malzeme görüntüsü [25].

Korozif endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin yüksek mukavemetli, yüksek özgül sertlikte, düşük termal genleşmeye sahip ve yüksek süspansiyon sağlaması gerekmektedir. CFRP kompozit malzemeler bu tür özellik sergilemekte ve böylece uzay ve havacılık, savunma, gemi, otomobil, takım tezgâhları, spor ekipmanları, ulaşım yapıları, elektrik üretimi, petrol ve gaz endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır [6,8,26].

CFRP kompozit malzemelerin; düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen titanyuma göre daha sert olması, iyi yorulma dayanımına, sürünme direncine, düşük sürtünme katsayısına ve iyi aşınma direncine, yüksek tokluk değerine ve uygun fiber oryantasyonları kullanıldığı takdirde düşük hasar toleransına, kimyasal ve boyutsal kararlılığa, korozyon direncine, düşük elektrik direncine ve titreşim sönümleme yeteneklerine sahip olması bu malzemeyi çekici hale getirmektedir [20,27]. Kimyasal bileşiminde % 90 - 95 oranında karbon içeren (bileşiminde % 99' un üzerinde karbon içermesi durumunda grafit olarak adlandırılmaktadır) ve 1.6 g/cm^3 değerinde düşük yoğunluğa sahip olan CFRP kompozit malzemeler; çelik malzemelere kıyasla % 60 - 80, alüminyum parçalara kıyasla ise % 20 - 50 oranında ağırlıktan tasarruf sağladığından dolayı günümüzde birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir [3,17,28]. CFRP kompozit malzemeler, pratikte ilk olarak golf sopaları, balık oltaları ve diğer spor malzemelerinde kullanılmıştır. Ancak son yıllarda daha geniş olarak uçak malzemelerinde ve tıbbi malzeme gibi endüstriyel amaçlar için de kullanılmaktadır [29].

Uzay ve havacılık endüstrisindeki en önemli koşullardan biri karbondioksit emisyonlarını ve yakıt tüketimini azaltmak için hafif yapılar elde etmektir. CFRP kompozit malzemeler, titanyum alaşımları (Ti6Al4V) ve CFRP / Ti6Al4V istifleri gibi yüksek mukavemet - yoğunluk oranı olan malzemeler bu gereksinimin karşılanması için bu sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.2. CFRP Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın kullanılan CFRP kompozit malzemelerin üretim yöntemleri:

- Elle yatırma (Hand Lay-Up)
- Püskürtme
- Fiber sarma
- Torba (otoklav) ile kalıplama
- Reçine transfer kalıplama
- Pultrüzyon
- Hazır kalıplama

CFRP kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinden olan otoklav kalıplama işlemi, yüksek mukavemet ve kararlı performansından dolayı daha sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 2.7). Ayrıca havacılık endüstrisinde kullanılan bazı CFRP kompozit malzemeler, uçağın büyük ve karmaşık şekilli ana parçalarının, ağırlığı azaltmaya katkıda bulunacak ve parça sayısını azaltacak şekilde imal edilebilmektedir [29].

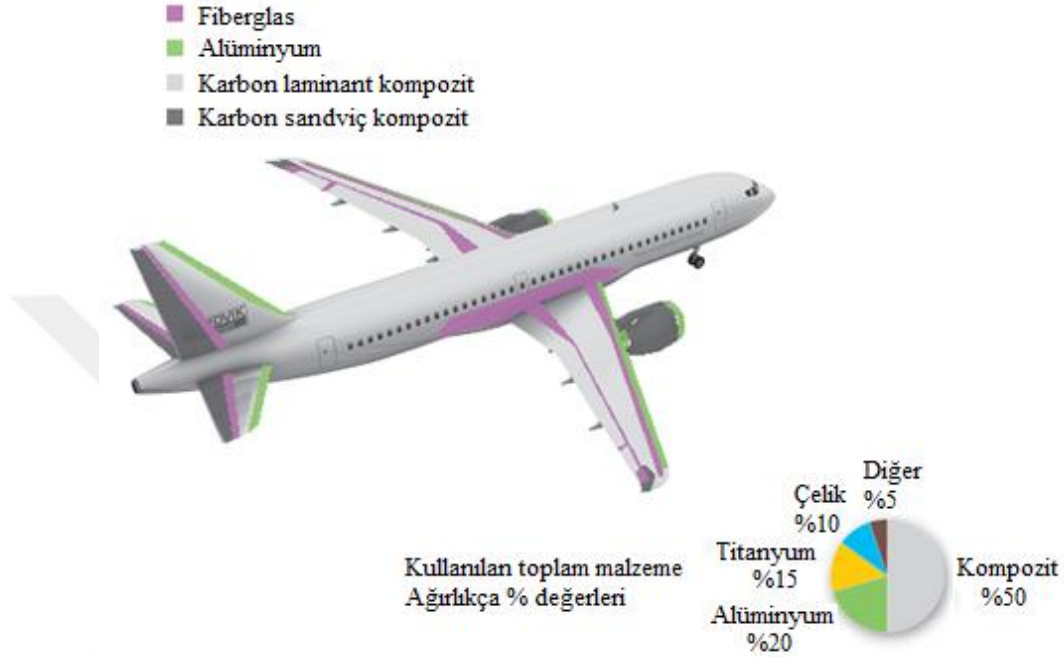


Şekil 2.7. Otoklav kalıplama yöntemi ile CFRP kompozit malzeme üretiminin görüntüsü [29].

2.1.3. CFRP Kompozit Malzemelerin Kullanıldığı Alanlar

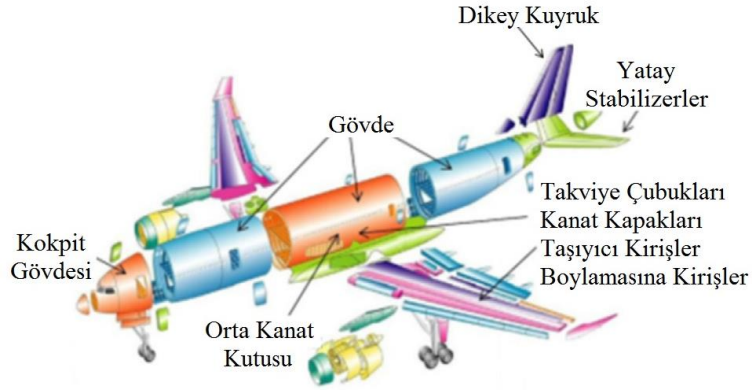
Kompozit malzemeler 1960'larda ilk olarak askeri hava araçlarında kullanılmakta olup daha sonra 1970'lerde sivil havacılık uygulamalarıyla genişletilmiştir [30,31]. Ancak, 2000'li yıllara kadar sivil hava aracı üreticileri başlıca yapısal uygulamalarda az miktarda kompozit malzeme kullanmaktaydı [30,32]. Son dönemlerde ise; CFRP kompozit malzemeler ürün kategorilerinden biri olan uçak parçalarında yaygın olarak

kullanılmaya başlanmıştır. Daha önce sadece uçakların kuyruk takımlarında veya zemin yapı malzemelerinde kullanılmış, ancak gelişmiş malzemelerin getirdiği yüksek güvenilirlik sayesinde, en son Boeing 787 (B787) modeldeki yapısal bölümler gibi tüm yapılarda kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.8) [29].



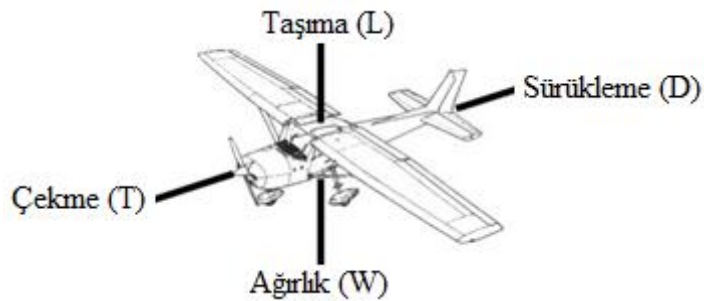
Şekil 2.8. B787 uçağında kullanılan malzemeler [33].

Uçak parçalarında yüksek dayanım, hafiflik ve daha üstün özellikler nedeniyle çok daha fazla parça CFRP kompozit malzemelerden yapılmaktadır [34,35]. Bu parçalar, kelepçeler ve kapılar gibi küçük parçalar olabilirken kanat kapakçıkları ve gövde gibi, nispeten daha büyük boyutlu parçalar da olabilmektedir. Airbus 350 uçağında karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden imal edilmiş parçalar belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 2.9). Ayrıca Boeing 787 ve Airbus 350 uçaklarında kompozit malzemelerin kullanılması yaklaşık olarak ağırlıkça % 50 ve hacimce % 90 olmaktadır [19,34-38].



Şekil 2.9. Airbus 350 uçağında kullanılan CFRP kompozit parçalar [34].

Uçakların uçmasını ve uçuş sırasında kontrolünü sağlayan ve etkileyen dört ana kuvvet vardır. Bu kuvvetler; taşıma kuvveti (lift), ağırlık (weight/gravity), itme/çekme (thrust), sürüklenme (drag) kuvvetleridir. Bu kuvvetler karşılıklı çiftler halinde birbirlerini zıt yönde etkilemektedirler (Şekil 2.10). Taşıma kuvveti, uçak ve helikopterlerin havalanmasını ve havada tutunmasını sağlayan kuvvettir. Tüm uçaklarda asıl taşıma kuvveti kanatlardan elde edilmektedir. Ağırlık kuvveti, taşıma kuvvetinin ters yönünde olup normal yatay uçuşta taşıma ağırlık kuvvetine eşit olmaktadır. Uçağın kanatlarında taşıma oluşması için kanadın etrafından belli bir hava akımı geçmesi gerektiğinden dolayı itme/çekme gücü oluşmaktadır. Sürüklenme kuvveti ise uçağın hava akımına karşı gösterdiği direnç olup itme/çekme yönünün zıt yönünde oluşmaktadır. Geri sürüklenme kuvveti arttıkça uçağın öne doğru hareket etmesini sağlayan motor gücünün de artması gerekmekte, bununla birlikte yakıt sarfiyatı artmakta sonuç olarak da hız kaybı oluşmaktadır [39].

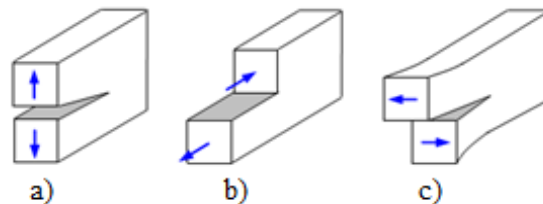


Şekil 2.10. Uçakların uçması ile uçuş sırasında kontrolünü sağlayan ve etkileyen kuvvetlerin gösterimi [39].

Uçaktaki yapısal bileşenlerin ağırlığını azaltmak için yaygın olarak kullanılan karbon fiberler, geliştirilmiş yakıt tasarrufu sağlarken emisyonları azaltmakta ve uçakların yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. CFRP kompozit malzemeler, otomobil gövdesi, şasi, kaput, tavan, otobüs gövde panelleri, kardan mili (şaft), sıkıştırılmış doğal gaz tankı, radyatör kelepçesi gibi otomobil parçalarında da kullanılmaktadır. Ayrıca; kayak, bisiklet, olta takımı, golf sopası, badminton racketleri ve hokey sopaları gibi spor malzemeleri de CFRP kompozit malzemedir yapılmaktadır. CFRP, rüzgâr enerjisi pervane kanatları, gel-git enerjisi araç-gereçleri, yakıt hücreleri, boru römork tankı, akü şarj volanı ve elektrik kablosu gibi çevre ve enerji ile ilgili uygulamalar için de yaygın olarak kullanılmaktadır [40].

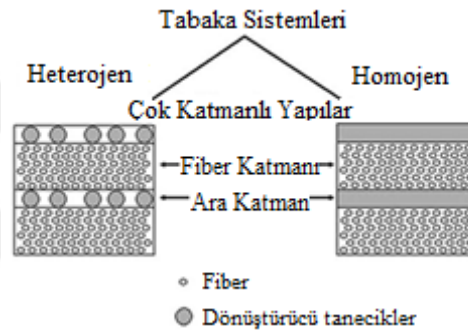
2.1.4. CFRP Kompozit Malzemelerin İşlenmesi Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları

Kompozit malzemelerin homojen olmayan yapılarından dolayı işlenmesi zor malzeme türleri arasındadır. Geleneksel işleme yöntemleri (torna, vargel, freze, matkap, vb.) bu tür kompozit malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır [41]. Kompozit malzemelerin anizotropik ve heterojen yapısı nedeniyle bu tür malzemelerin geleneksel işleme yöntemleri ile işlenmesinde matris çatlakları, fiber çekilmesi, kabarma ve delaminasyon (delik yüzey hasarı) gibi hasarlar oluşmaktadır [6,41-45]. Bozulma davranışı, sadece heterojen ve anizotropik yapısına bağlı olmamakta aynı zamanda muhtemel bozuk yapılar ve bunların etkileşimlerinden kaynaklı olabilmektedir [4,30,46]. Kompozit malzemelerde oluşan çatlakların yayılmasında açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi genellikle soyulma, kesilme ve yırtılma gibi farklı büyüme mekanizmalarına ayrılmaktadır (Şekil 2.11) [4].



Şekil 2.11. Kompozit malzemelerde oluşan çatlak büyüme hasarlarının görüntüsü a) Soyulma b) Kesilme ve c) Yırtılma [4].

Kompozit malzemelerin geleneksel veya modern imalat yöntemleriyle işlenmesi esnasında oluşan en ciddi hasar, delaminasyon olarak tanımlanmış olup, darbe esnasında oluşan delaminasyonu engellemek için, ticari ve temel yapılarda kullanılmaya uygun, termoset-matris kompozit sistemlerinde başarılı bir sertleştirme tekniği geliştirilmiştir. Bu sertleştirme tekniği kompozit içinde oldukça yüksek gerilim altında tabaka içindeki bölgeleri sertleştirmek için katman kullanılarak tokluk sorununa bir mühendislik yaklaşımı ortaya koymaktadır. Sonunda çok tabakalı bir laminant yapıyla sonuçlanan tabaka oluşturma işlemi, kompozit yapının katları arasında reçine bakımından zengin, sert bir katman kullanılarak elde edilmektedir. Bu tabaka oluşturma teknikleri, homojen ya da heterojen olarak uygulanabilmektedir (Şekil 2.12) [47-49].



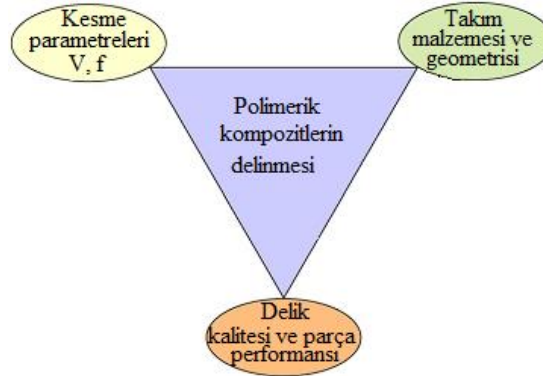
Şekil 2.12. Tabaka toklaştırma kavramında homojen ve heterojen tabaka oluşturma tekniklerinin gösterimi [47-49].

Havacılık sanayisinde küçük bir uçakta 100.000'den fazla, daha büyük uçaklarda ise milyonlarca delik olduğu bilinmektedir [8,50-52]. Bununla bağlantılı olarak imalat işlemleri açısından kıyaslama yapıldığında, delme işlemi, parçaların montajı (perçinli, civatalı vb.) esnasında en sık kullanılan işleme yöntemlerinden biri olup tüm işleme operasyonlarının % 40'ını oluşturmaktadır [52-55]. Ancak, iki ya da daha fazla fazın varlığı nedeniyle CFRP kompozit malzemenin işlenmesi esnasında fiber kopması, reçine-fiber ayrılması, gerilme yoğunlaşması, mikro çatlaklar ve delik bölgesinde deformasyon gibi hasarlar oluşmaktadır [50,56]. Bu nedenle, kompozit malzemelerin işleme mekanizması geleneksel malzemelerin homojen talaş kaldırılmasından farklı bir işlem olarak kabul edilmektedir [6,57-59]. Malzeme üzerinde oluşan bu tür yüzey hasarlarının, ürün kalitesi üzerinde önemli etkisi olmakta birlikte, yüzey hasarlarını engellemek veya azaltmak için sürekli çalışmalar yapılmaktadır [50,52,54,60-63].

Yapılan araştırmalarda da, yzeye kalitesinin, kesme parametreleri, takım geometrisi ve kesme kuvvetlerine bağlı olduğu belirtilmiştir [9,53]. Bu nedenle, kesme parametrelerinin doğru seçimi plastik matrisli kompozitlerin işlenmesinde bryk bir önem arz etmektedir [50,53,54].

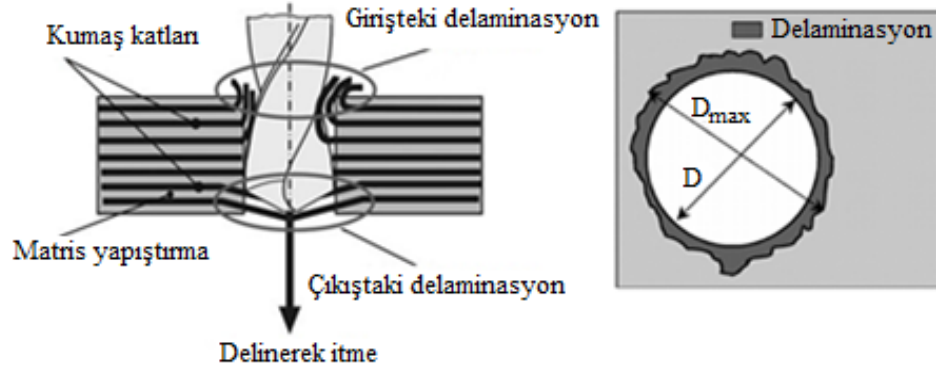
Gunumuzde iş parçalarının delinmesinde, konvansiyonel delme daha sık kullanılmaktadır. Ancak; taşlamalı delme, titreşim yardımlı brykum delme ve yksek hızlı delme, yksek verimlilik kadar delinmiş deliklerin kalitesini daha iyi sağlamaktadır. Özel matkap ucu, destek plakası, önceden delinmiş pilot deliği, titreşim yardımlı brykum delme ve yksek hızlı delme uygulamaları delinmiş deliklerin önemli lde iyileştirilmesini sağlar. İlerleme hızı, kompozit plakaların delinmesi sırasında delaminasyon, itme kuvveti ve takım aşınmasına en bryk katkıyı yapmaktadır [64,65].

Delme işlemi esnasındaki unsurların; kesme parametreleri, delaminasyon faktry (yzey hasar faktry), kesici takım malzemesi ve geometrisi olduğu belirtilmiştir (şekil 2.13).



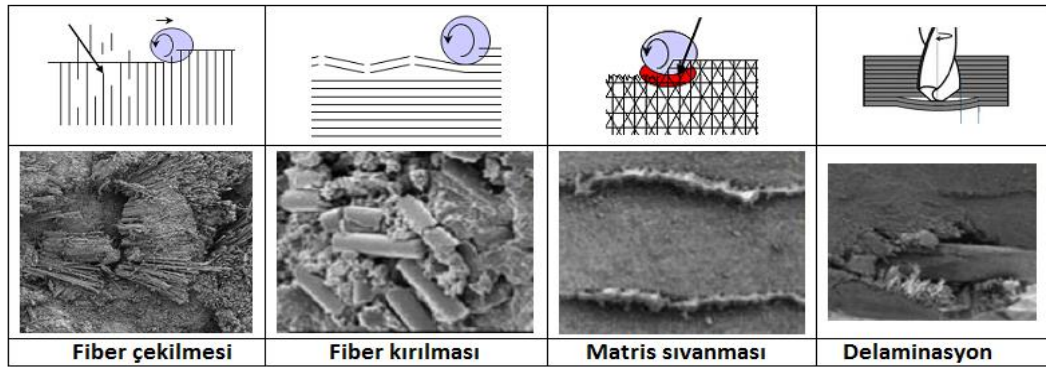
şekil 2.13. Fiber takviyeli polimerlerin delinmesinde esas alınan temel geler [56].

CFRP kompozit malzemelerin işlenmesi sırasındaki hasarların, malzemenin dayanımını ve yorulma ömrünü azalttığı gözlenmektedir [6,66]. Ayrıca, montaj için gerekli olan delme işleminin montaj esnasında yapılması zor olmaktadır [29]. Bununla birlikte, kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan en ciddi hasar, delik yzey hasarı (delaminasyon) olarak belirtilmiştir (şekil 2.14) [9,53].



Şekil 2.14. Delaminasyon faktörünün gösterimi [62,67].

Geleneksel yekpare takımlar ile CFRP kompozit malzemeler işlenirken hem bitirmede hem de yüzey bütünlüğü ile ilişkili olan tipik sorunlara rastlanmaktadır. Fiber çekilmesi, fiber kırılması, matris sıvanması ve delaminasyon gibi farklı hasar çeşitlerinin oluşması birçok parçanın reddedilmesine neden olmaktadır (Şekil 2.15) [59]. Uçak endüstrisinde, son montaj sırasında delaminasyon hasarından dolayı parçaların % 60'ı gibi yüksek bir oranın reddedildiği bildirilmiştir [6,25,40,52,59,65,68-70]. Ayrıca, yekpare takımların iş millerinin büyüklükleri nedeniyle gerektiği gibi dar alanlara erişmeleri mümkün olmamakla birlikte freze ve matkap aşınmasından kaynaklanan takım değişikliği de işin aksamasına neden olmaktadır [34].



Şekil 2.15. CFRP malzemelerin geleneksel kesici takımlarla işlenmesi sonucu oluşan yüzey hasarları [71,72].

2.1.5. CFRP Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

CFRP kompozit malzemeler, aşağıda belirtilen özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir:

- Düşük yoğunluk (alüminyumdan % 40 daha düşük yoğunluğa sahiptirler)
- Yüksek mukavemet (yüksek mukavemetli çelikler kadar)
- Yüksek rijitlik (titanyum kadar)
- İyi yorulma ve sürünme dayanımı
- Düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma dayanımı (karbon fiber-naylon kompozitleri teflon kadar düşük sürtünme katsayısına sahiptirler)
- Tokluk ve darbe toleransı (metallerden daha iyi darbe toleransına sahiptirler)
- İyi kimyasal ve korozyon dayanımı
- Boyutsal kararlılığı (karbon fiberin termal genişleme katsayısı sıfırdır)
- Metallerle oranla mükemmel titreşim (vibrasyon) azaltıcı özelliği
- Düşük elektrik direnci
- Yüksek termal iletkenlik [20].

CFRP kompozit malzemelerin dezavantajları ise;

- Yüksek maliyet (çelik levhalarından daha pahalıdır).
- Mekanik hasar (çelik plakalara göre hasara karşı daha hassastır) [73].
- Anizotropik yapıda olması (farklı yönlerde farklı malzeme özelliklerine sahiptir) [74].
- Sıcak/ıslak koşullarda ve darbe gerilmeleri altında mekanik özelliklerinin bozulması [75].

2.2. AŞINDIRICILI SU JETİ İLE İŞLEME YÖNTEMİ

Geleneksel imalat yöntemlerinde mekanik kuvvet kullanılırken, modern imalat yöntemlerinde ise; mekanik, kimyasal, elektrokimyasal ve ısı enerjisi gibi enerji türleri kullanılmaktadır [5,76-78]. Günümüzde modern mikro ve makro işleme süreçleri, tüm gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, uzay ve havacılık, otomotiv, kalıplama

süreçlerinde büyük önem taşımaktadır [5]. Ülkemizde tamamının kullanılmamasına rağmen dünyada uygulama alanı bulan birçok modern imalat yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Modern imalat yöntemlerinin gösterimi [79].

No	Alışılmamış İmalat Yöntemi	Simge	İngilizce isim
1	Aşındırıcı Akış ile işleme	AFM	Abrasive Flow Machining
2	Aşındırıcı Jet ile işleme	AJM	Abrasive Jet Machining
3	Basınçlı Su Jeti ile işleme	WJM	Water Jet Machining
4	Hidrodinamik işleme	HDM	Hydrodynamic Machining
5	Aşındırıcı Su Jeti ile işleme	AWJM	Abrasive Water Jet Machining
6	Aşındırıcı Su Jeti ile Tornalama	AWJT	Abrasive Water Jet Turning
7	Düşük Gerilmeli Taşlama	LSG	Low Stress Grinding
8	Sünek İlerlemeli Taşlama	CFG	Creep Feed Grinding
9	Isıl Yardımlı İşleme	TAM	Thermally Assisted Machining
10	Tümünden Şekil İşleme	TFM	Total Form Machining
11	Ultrasonik (Ses Ötesi) İşleme	USM	Ultrasonic Abrasive Machining
12	Dönel Ultrasonik İşleme	RUM	Rotary Ultrasonic Machining
13	Toz Parçacıkları ile İşleme	PPM	Powder Particle Machining
14	Elastik Emisyon ile İşleme	EEM	Elastic Emission Machining
15	Manyetik Aşındırıcı Toz ile Parlatma	MAP	Magnetic Abrasive Polishing
16	Elektro Kimyasal İşleme	ECM	Electrochemical Machining
17	Elektro Kimyasal Çapak Temizleme	ECDB	Electrochemical Deburring
18	Elektro Kimyasal Delik Delme	ECD	Electrochemical Drilling
19	Elektro Kimyasal Taşlama	ECG	Electrochemical Grinding
20	Elektro Kimyasal Erozyon Taşlama	ECDG	Electrochemical Discharge Grinding
21	Elektro Kimyasal Honlama	ECH	Electrochemical Honing
22	Elektro Kimyasal Lepleme	ECL	Electrochemical Lapping
23	Elektro Kimyasal Parlatma	ECP	Electrochemical Polishing
24	Elektro Kimyasal Bileme	ECS	Electrochemical Sharpening
25	Elektro Kimyasal Dilme	ECS	Electrochemical Slitting
26	Elektro Kimyasal Tornalama	ECT	Electrochemical Turning
27	Elektro Kimyasal Sıvı Jeti	ES	Electrochemical Stream
28	Şekilli Boru ile Elektrolitik İşleme	STEM	Shaped Tube Electrolytic Machining
29	Telli Elektro Kimyasal Kesme	WECM	Wire Electrochemical Machining
30	Vurumlu Elektro Kimyasal İşleme	PECM	Pulsed Electrochemical Machining
31	Telli Elektrokimyasal Erozyon İşleme	WECDM	Wire Electrochemical Discharge Machining
32	Elektro Parlatma	ELP	Electro-Polishing
33	Kimyasal İşleme (Frezeleme)	CHM	Chemical Machining (Milling)
34	Fotokimyasal İşleme	PCM	Photochemical Machining
35	Kimyasal Boşaltma	CHB	Chemical Blanking
36	Kimyasal Dağlama	CHE	Chemical Etching
37	Isıl Kimyasal İşleme	TCM	Thermo Chemical Machining
38	Lazer Yüklemeli Kimyasal İşleme	LCP	Laser Loaded Chemical Machining
39	Patlamalı Kimyasal İşleme	CM	Combustion Machining
40	Isıl Enerji Yöntemi	TEM	Thermal Energy Method
41	Elektron Işını ile İşleme	EBM	Electron Beam Machining
42	Elektro Erozyon ile İşleme	EDM	Electric Discharge Machining
43	Elektro Erozyon ile Taşlama	EDG	Electric Discharge Grinding
44	Elektro Erozyon Testere	EDS	Electric Discharge Sawing
45	Telli Elektro Erozyon ile Kesme	WEDM	Electric Discharge Wire Cutting
46	Dönel Elektro Erozyon	REDM	Rotary Electric Discharge Machining
47	Lazer Işını ile İşleme	LBM	Laser Beam Machining
48	Lazerli Hamlac	LBT	Laser Beam Torch
49	Lazer Yüklemeli Kimyasal İşleme	LCP	Laser Induced Chemical Processing
50	Plazma ile İşleme	PAM	Plasma Beam (Arc) Machining
51	Plazma Yardımlı İşleme	PaM	Plasma Assisted Machining
52	Elektro Temas ile İşleme	EcM	Electro Contact Machining
53	İyon Işını ile İşleme	IBM	Ion Beam Machining
54	İyon Işını ile Sıçratma İşleme	IBSM	Ion Beam Sputter Machining
55	Tepkimeli İyon Işını ile İşleme	RIBE	Reactive Ion Beam Etching
56	İyon Işını ile Tohumlama	IBIP	Ion Beam Implantation Process

Geleneksel olmayan gelişmiş hibrit işleme süreçlerinden olan Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile işleme, geleneksel işleme süreçlerine kıyasla malzeme türüne bakılmaksızın

geniş yelpazede malzemeleri işleme potansiyeline sahiptir. ASJ ile işleme, farklı malzeme ve aşındırıcı kombinasyonları ile kendine has çeşitli kesme özelliklerine sahiptir [80]. ASJ ile işleme, aşınma yoluyla malzemenin çıkartıldığı bir işleme sürecidir [40]. ASJ ile işleme prosesi SJ (su jeti) ile işleme esasları ve AJ (aşındırıcı jet) işleme esaslarının birleşimidir [80,81]. ASJ ile işlemede malzeme, aşındırıcı eklenmiş yüksek hızlı su jeti ile kademeli aşınma, kırılma mekanizması ve plastik deformasyon altında aşındırılmaktadır [80,82-87]. Alüminyum oksit, silikon dioksit ve garnet tipik aşındırıcılardandır [85].

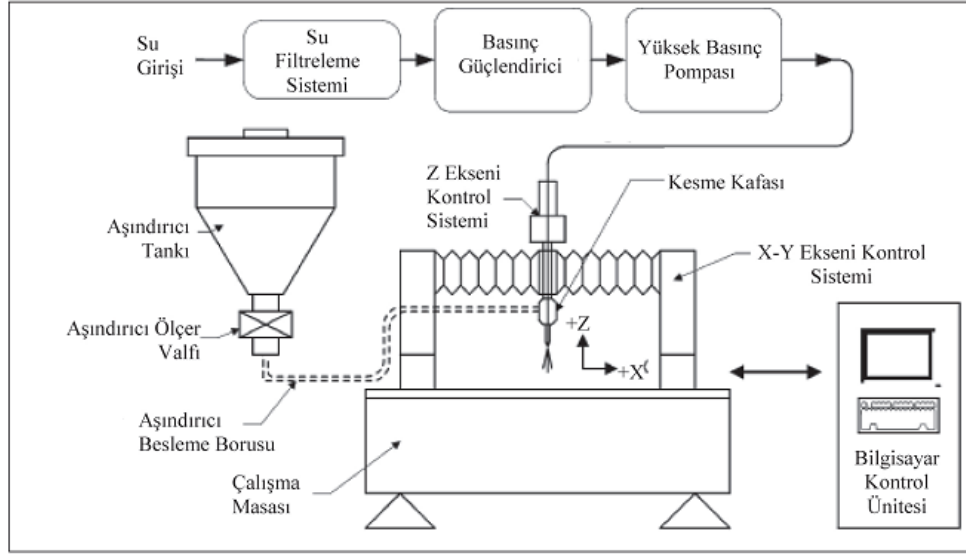
2.2.1. ASJ Tarihçesi

1970' li yıllarda saf su jeti ile ve 1983 yılında aşındırıcı su jeti ile kesim işleminin başarıyla sonuçlanmasının ardından endüstride kullanılan mevcut sistemlerinin maksimum basıncı 400 MPa ile sınırlı kalmıştır [87,88].

Yüksek esneklik, yüksek işleme çeşitliliği, düşük işleme kuvvetleri, termal bozulmanın olmaması ve ısıdan etkilenmeyen işleme yöntemi olan ASJ ile işleme "soğuk" işleme yöntemi olarak tanımlanmakta, özellikle iletken olmayan-kesilmesi zor malzemelerin işlenmesinde (kesme, tornalama, delme, frezeleme işlemlerine göre) çok fazla avantaja sahip olduğu bilinmektedir [80]. ASJ, herhangi bir doğrultuda hareket ettirilebilen ve hemen hemen her türlü malzemeyi kesme kapasitesine sahip tek noktalı bir takımdır [89-95]. Ayrıca; kesilen malzemeye hasarı çok az olmaktadır [89]. İki ve üç boyutlu kesme, freze, torna ve delme uygulamaları gibi geleneksel işleme süreçleri ile karşılaştırıldığında, ASJ farklı işleme prosedürleri için kullanılabilir [5,96]. CAD/CAM sistemi yardımı ile de ASJ karmaşık üç boyutlu parçaları şekillendirme kapasitesine de sahiptir [89,97-99]. ASJ uygulanması ile ilgili bir dizi araştırma yapıldığı ve bu araştırmaların arasında, tornalama, frezeleme, delme ve çapak alma işlemlerinin test edildiği ve başarılı sonuçların elde edildiği belirtilmiştir [89,95,100].

2.2.2. ASJ Tezgâhı

Endüstride kullanımları artmakta olan ASJ, 1980'lerin başlarından itibaren kompozit malzemelerin kullanımının hızlandırılmasını büyük ölçüde katkı sağlayan güncel kesici takımlardan biri olmaktadır (Şekil 2.16).



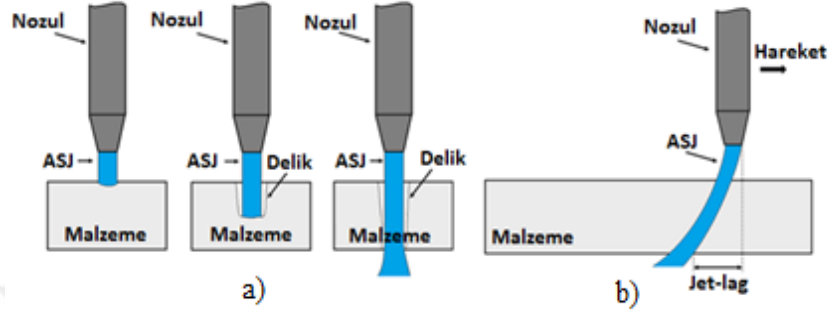
Şekil 2.16. Su Jeti ile kesme sistemi ve temel elemanları [101,102].

Plaka delme için bir alternatif olan ASJ teknolojisinin, diğer teknikler ile karşılaştırıldığında birçok avantajı olduğu bilinmektedir. Bu avantajlar, yüksek oranda çok yönlü ve esnek işleme, çok çeşitli malzeme ve kalınlıkları kesme yeteneği, termal hasarın olmaması, düşük takım aşınması ve düşük kesme kuvvetlerinin olmasıdır. Elektro erozyon (EDM) ve lazer ile işleme gibi diğer geleneksel olmayan teknolojilerin, delme sonrası kalan ısıdan etkilenen büyük bir bölge olması ve sınırlı yüzey kalitesi nedeniyle, delmede etkili bir çözüm olmadıkları bilinmektedir [59,103,104].

ASJ ile malzemeye şekil verme;

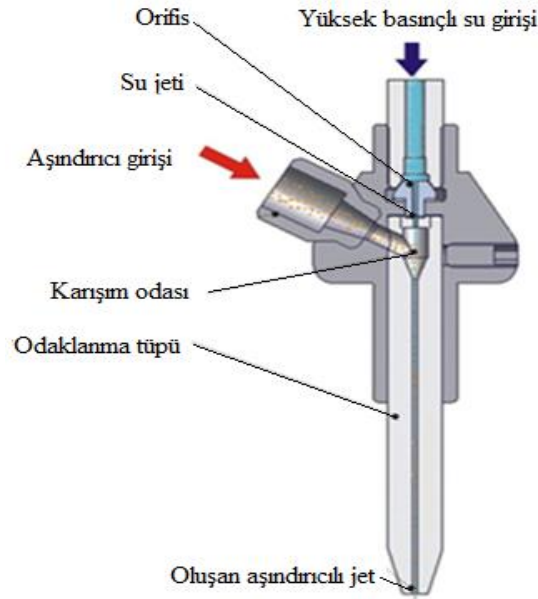
- Delme ve
- Kesme şeklindedir.

Delme işleminde (Şekil 2.17a); ASJ'nin jeti malzeme kalınlığı boyunca tek pozisyonda malzeme üzerine çarpar. Daha sonraki kesme aşaması (Şekil 2.17b) sırasında ise; su jeti istenilen çapta bir delik elde edilene kadar malzemenin dairesel bir yol üzerinde kesilmesi şeklinde hareket eder [59].



Şekil 2.17. ASJ delme işlemi a) Delme aşaması b) Kesme aşaması [59].

ASJ ile işleme yönteminin çok fazla parametre içermesi nedeniyle, bu parametrelerin optimizasyonu önemli olmaktadır (Şekil 2.18) (Çizelge 2.2). Bu optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için; donanım kapasitesi, işleme parametreleri ve çeşitli fiziksel olgular gibi pek çok faktörün dikkate alınması gerekmektedir [105].



Şekil 2.18. Aşındırıcılı tip nozul (kesme kafası) kesit görünüşü [106].

Çizelge 2.2. ASJ ile işlemede kullanılan parametreler [106].

Parametre türü	Değişkenler
Kesme	Nozul yaklaşma mesafesi, nozul ilerleme hızı ve çarpma açısı
Hidrolik	Nozul çapı, nozul uzunluğu, orifis çapı, pompa basıncı ve polimer katkı maddeleri
Aşındırıcı	Aşındırıcı akış oranı, aşındırıcı boyutları, aşındırıcının partikül şekli ile partikül boyut dağılımı ve aşındırıcı partikül sertliği
Malzeme	Kesilecek ya da işlenecek malzemenin sünek ya da gevrek olması, malzemenin sertlik mukavemet değeri

2.2.3. ASJ İle İşlemenin Kullanıldığı Alanlar

İmalatçılar tarafından kullanımları artmakta olan ASJ ile işleme; otomobil, uçak, kimyasal işleme ekipmanı, uzay aracı, denizcilik ve spor malzemeleri endüstrisi ile ilgili uygulamalarda kullanılan geleneksel olmayan bir işleme süreci olup diğer işleme yöntemlerine kıyasla soğuk kesme işlemidir [107].

ASJ teknolojisi, kompozit malzemelerin işlenmesinde kendine özgü avantajları nedeniyle uzay, uçak, tekne ve otomotiv sektörleri için ilginç bir üretim süreci olarak gösterilmektedir. Ancak; kompozit laminantların ASJ ile kesiminde birtakım zorluklar bulunmaktadır. Makine üreticileri hala, ASJ kesim işlemlerinin kompozit malzemeler üzerinde kolayca yapıldığı, kompozit kesim için iyi veri tabanları vermediğinden dolayı, her tür FRP (Fiber Takviyeli Plastik) & CFRP kompozit malzemesi işlem parametrelerini uyarlamak için bir metodoloji geliştirilmesi gerekmektedir [108]. Ayrıca; son yıllarda işleme sürecini anlamaya ve kesme derinliği gibi işleme performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [82,109-111].

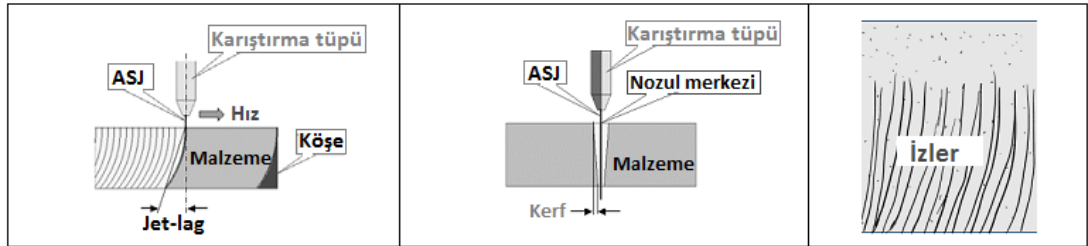
2.2.4. ASJ İle İşlemenin Avantajları ve Dezavantajları

ASJ ile işlemenin geleneksel işleme metotlarına göre birçok avantajı bulunmaktadır [27, 34, 80, 112-114]. Bu avantajlar:

- Frezeden daha yüksek kesim hızlarının olması

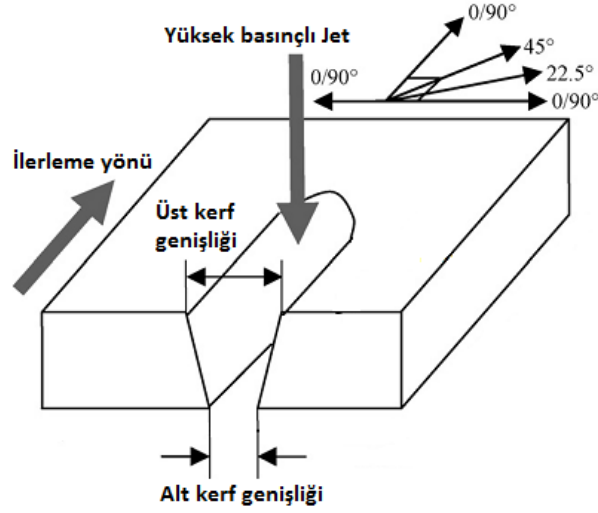
- Sınırlı jet kuvvetleri ve hassas işlemleri sonucu malzemede bozulma olmaması
- Isıdan etkilenen bölgelerin olmaması
- Delaminasyon, parçalara ayrılma, yıpranmış kenar veya herhangi bir bütünlük probleminin olmaması
- Boyut tutturma ve şekillendirmenin azaltılmış olması
- Otomatik sürecin ve çoklu işlemlerin mümkün olması
- Kesme esnasında toz ve duman oluşmaması
- Farklı kompozit ve tabakalı yapılar için esnek olmasıdır [34].

ASJ yönteminin avantajlarının yanı sıra birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. ASJ kesme parametrelerine bağlı olarak değişen yüzey özellikleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. ASJ ile işleme sonucu oluşan geometrik özelliklerin gösterimi [34].

ASJ ile işlemede kerf geometrisi oluşumu kaçınılmazdır. Bunun sebebi ASJ ile işlemede genellikle üst kerf genişliğinin alt kerf genişliğine göre daha geniş olan konik bir delik açılmaktadır. Kerf konikliği veya kerf koniklik açısı genellikle bu durumu göstermek için kullanılmaktadır (Şekil 2.20) [115].



Şekil 2.20. ASJ ile işlemede oluşan kerf genişliğinin şematik gösterimi [116].

2.3. CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİN ASJ İLE İŞLENMESİ

Polimer matrisli fiber takviyeli plastik malzemelerin hasar görmeden işlenmesi; heterojenite ve termal hassasiyet nedeniyle, uygun koşullar sağlanmış olsa bile, delme, kesme, frezeleme, taşlama, vb. gibi konvansiyonel işlemlerle işlendiğinde oldukça zordur. Aşındırıcı su jeti işleme teknolojisi, hemen hemen her malzemeyi kesme kabiliyetine sahip olup kompozit malzemeleri de içeren çok sayıda malzemede başarıyla uygulanmaktadır. ASJ ile kesme işleminin 'soğuk' kesim, kendiliğinden temizleme, özel veya ilave takımın olmaması, son derece hızlı kurulum, minimum sabitleme vb. gibi temel özelliklerinden dolayı, endüstriyel ve evsel uygulamalarla birlikte polimer matrisli kompozit malzemeler için daha iyi bir alternatif işleme süreci olarak için yaygın olarak kullanılmaktadır [117].

ASJ ile işleme, delaminasyonla ilgili olarak lazerle işleme ve saf SJ ile işleme ile karşılaştırıldığında daha iyi bir işleme tekniğidir [40,114,118]. Ayrıca, su jetli kesicilerin tabakalı kompozitlerin işlenmesi için uygun olduğu, ayrıca; ASJ kullanarak delaminasyon hasarının önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir [40,114,119]. ASJ, yüksek işleme çeşitliliği, nispeten küçük kesme kuvveti ve yüksek esneklik gibi avantajlara sahiptir [40,120]. Lazerle kesme ve konvansiyonel işleme prosesi gibi diğer işleme süreçleriyle karşılaştırıldığında, iş parçasında ısıdan etkilenen bölge oluşmaz [40,121]. Konvansiyonel işlemede yüzey bütünlüğü zayıftır; lazer ışını

işleme, ciddi termal hasara neden olur ve tel erozyon işlemi ise sadece iletken malzemelerle sınırlıdır [40]. ASJ ile işleme, CFRP kompozit malzemenin lazer ve SJ ile işleme yöntemleriyle karşılaştırıldığında gürültülü pompa ve daha yüksek işletme maliyetine rağmen daha iyi bir işleme tekniğidir [40,114,122].



BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Araştırmacılar, birbirinden farklı geleneksel (demir, bakır, alüminyum, pirinç, vb.) ve geliştirilmiş (alaşım, kompozit, vb.) malzemeyi geleneksel veya modern imalat yöntemleriyle kesme veya delme işlemine tabi tutarak elde ettikleri sonuçları yorumlamışlardır [115]. Araştırmacılar, üretim teknolojisinde maliyeti azaltmaya ve çeşitli yararlı sonuçları elde edebilmek için veri toplamaya ve en uygun metodolojiyi sağlamaya çalışmaktadır.

Bazı araştırmacılar, ASJ ile farklı malzemeleri işlemenin parametrik etkilerini incelemişlerdir [115]. Araştırmalarında, aşındırıcı boyutunun küçülmesiyle yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini tespit etmişlerdir [123-128]. Ancak; aşındırıcı boyutunun aynı zamanda talaş kaldırma oranını da etkilediği belirtilmiştir [123]. Hashish, hacimsel talaş kaldırma oranının, büyük boyutlu aşındırıcılar için aşındırıcı tanecik boyutundan bağımsız olduğunu ancak aşındırıcı tanecik boyutunun 100 µm'nin altına düşmesiyle talaş kaldırma oranının azalacağını da belirtmiştir [123,129]. Ayrıca araştırmalarda, jetin çarpma açısının azalmasının yüzey pürüzlülüğü ve dalgalanmaların azalmasına neden olduğunu belirtilmiştir [123,125,130,131]. Talaş kaldırma (üç kat kadar) oranındaki gelişmelere bağlı olarak; malzeme üzerine çarpan jet açısının klasik olarak kullanılan 90° ve daha küçük jet çarpma açısında gerçekleşeceği belirtilmiştir [123,130].

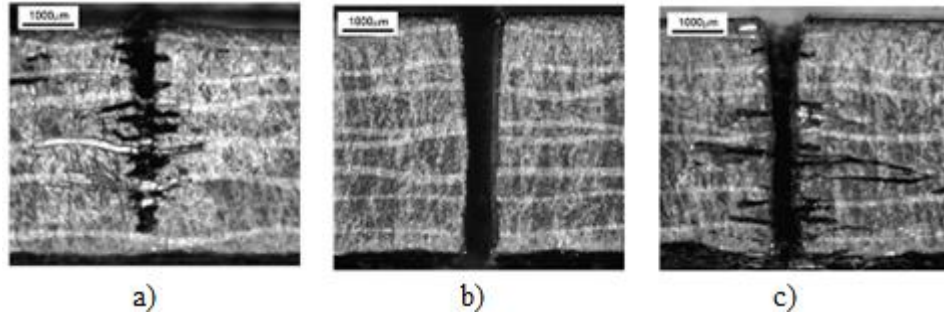
3.1. CFRP KOMPOZİT MALZEMENİN ASJ İLE İŞLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Shanmugam vd., CFRP kompozit malzemeleri saf SJ ve ASJ ile farklı işleme parametreleri altında kesme işlemine tabi tutmuşlardır (Çizelge 3.1). Kesme işlemi sonucu oluşan delaminasyon hasarını 3D dijital mikroskop kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, 0/+45/-45/90 oryantasyonunda, tek yönlü, grafit (GY70-karbon fiber) ve epoksi (934 tipi) reçineden oluşan 6 mm kalınlıkta 20 tabakalı kompozit malzeme kullanmışlardır. Kesme işlemi; iş parçasının içinden ve dışından başlayarak (iki koşul altında) gerçekleştirmişlerdir [114].

Çizelge 3.1. CFRP kompozit malzemenin SJ ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

İlerleme oranı (mm/s)	0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30
Su basıncı (MPa)	140, 175, 210 ve 345
Aşındırıcı akış oranı (g/s)	3 ve 6
Orifis (safir) çapı (mm)	0.254
Nozul çapı (mm)	0.762
Nozul uzunluğu (mm)	76.2
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	4
Aşındırıcı	80 mesh endüstriyel tip garnet
Erteleme süresi (s)	3

345 MPa basınç, 0.5 mm/s ilerleme hızı ve 6 g/s aşındırıcı akış oranında yaptıkları deney sonucunda, CFRP numuneleri üzerinde delaminasyon oluşmadığını 210 MPa basınç altında yaptıkları kesme işlemi sonucunda ise maksimum çatlak uzunluğunun nozul çapının 4.5 ile 6.5 katı arasında değişmekte olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.1) [114].



Şekil 3.1. P=210 MPa basınç ile işlenen CFRP kompozit malzeme yüzeyinin yandan görünüşü a) Saf SJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü b) m=3 g/s ASJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü c) m=3 g/s ve aşındırıcıların 3 saniye sonra eklenmesi sonucu ASJ ile işlenen yüzeyin görüntüsü [114].

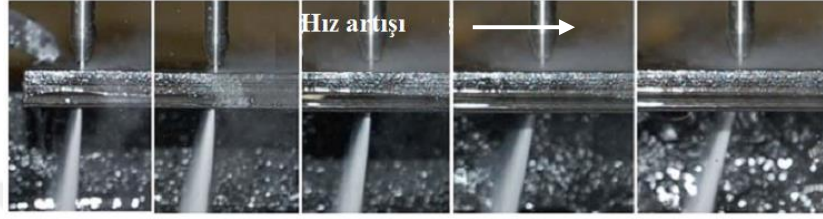
Yapmış oldukları çalışma sonucunda, jetin hareket hızındaki artışın maksimum çatlak uzunluğunu arttıracığını; buna karşılık jetin basıncındaki artışın, maksimum çatlak uzunluğunu azaltacağını tespit etmişlerdir. Bu durumu, ilk olarak su basıncının artmasına bağlı olarak jetin kinetik enerjisinin artması ve çatlaklar içindeki jet sapmasının azalmasıyla birlikte maksimum çatlak uzunluğunda azalma, ikinci olarak ise jetin hareket hızındaki bir azalmanın, birim alan başına düşen aşındırıcı akış hızının artmasıyla birlikte artan kesme hareketi ile sonuçlanacağını ve kesme derinliğinin çatlaklara daha az parçacık gireceğinden dolayı artacağını belirtmişlerdir [114].

Hashish, CFRP kompozit uçak parçalarının kesilmesi adlı çalışmasında Airbus 350 ve Boeing 787 uçaklarında kullanılan beş farklı kalınlıktaki CFRP kompozit malzemeyi belirlenen işleme parametreleri altında ASJ tezgâhında kesme işlemine tabi tutmuştur (Çizelge 3.2). Araştırmacı; çalışma sonucunda yüzeyde delaminasyon görülmeden ortalama yüzey pürüzlülüğünün 10 µm değerini aşmayacağı, maksimum 0,25 ölçü hatası ile kesim işlemi gerçekleştirmek olduğunu belirtmektedir [34,72].

Çizelge 3.2. Farklı kalınlıklardaki CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

Orifis çapı (mm)	0.33
Nozul çapı (mm)	1.0
Nozul uzunluğu (mm)	100
Su basıncı (MPa)	400
Kesme hızı (mm/s)	10, 20, 30, 40, 50 ve 60
Aşındırıcı	80 mesh garnet
Aşındırıcı akış oranı (g/s)	7.5
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	2.5
CFRP kompozit malzeme kalınlığı (mm)	5.1, 5.2, 20.2, 25.2 ve 27.12

Araştırmacının yapmış olduğu çalışma sonrası; kesme hızının artmasıyla malzemede oluşan kerf genişliğinin arttığını, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının, üst yüzeyde (alt yüzeye kıyasla) etkisinin olmadığını tespit etmiştir. Ayrıca; ASJ hızının artmasıyla jet-lag açısının arttığını belirtmiştir (Şekil 3.2). Hashish, CFRP kompozit malzeme kullanımının sürekli arttığını ve ASJ ile kesme işleminin, bu malzemeyi kesmek için ideal bir kesme yöntemi olduğunu vurgulamıştır [34].



Şekil 3.2. ASJ hızının artmasına bağlı olarak jet-lag açısı değişim görüntüsü [34].




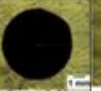
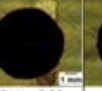
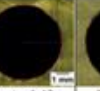
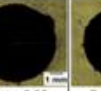
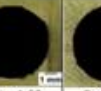



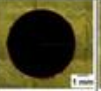
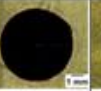
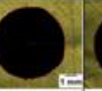
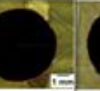
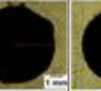
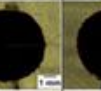




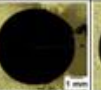
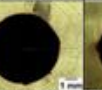
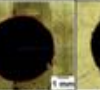



Phapale vd., 6 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sırasında işleme parametrelerinin delaminasyon oluşumuna etkisini tespit etmek ve aynı zamanda ASJ ile delme işleminde delaminasyonun kontrol edilmesi için destek plakası, önceden delinmiş delik ve suya daldırma (su altında) gibi dört farklı parametrenin geliştirilmesini sağlamak üzerine kapsamlı bir deneysel çalışma yapmışlardır (Çizelge 3.3) [107].

Çizelge 3.3. CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

Su basıncı (MPa)	100, 200 ve 250
Aşındırıcı türü	80 mesh Garnet
Aşındırıcı akış oranı (g/s)	5.4, 8.88 ve 9.7
Nozul çapı (mm)	0.7 - 0.8
Orifis çapı (mm)	0.2 - 0.3
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	1, 2 ve 3
CFRP kompozit malzeme ölçüleri (mm)	150x20x6
CFRP kompozit malzeme konfigürasyonu	[0°/90°] ₁₆

Araştırmacıların yapmış oldukları deney sonucunda, düşük su basıncı (100 MPa), aşındırıcı akış oranı (5.4 g/s) ve nozul yaklaşma mesafesinin (1 mm ve 2 mm) kullanılmasıyla delaminasyonun görülmediğini; yüksek su basıncı (250 MPa), aşındırıcı akış oranı (9.7 g/s) ve nozul yaklaşma mesafesinin (3 mm), 13.81 mm değerinde daha yüksek delaminasyona sebep olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.3).

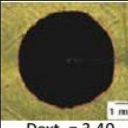

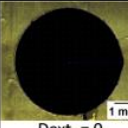



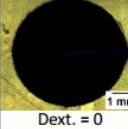
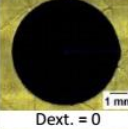
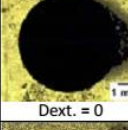

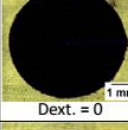

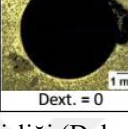
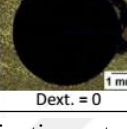
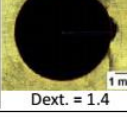

Ayrıca; aşındırıcı akış oranının delaminasyon oluşumuna etkisinin çok belirgin olmadığını belirtmişlerdir [107].

Su basıncı (MPa)	100	200	250	100	200	250	100	200	250	
Aşındırıcı akış oranı (g/5)	5.4	5.4	5.4	8.88	8.88	8.88	9.7	9.7	9.7	
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	1									
	2									
	3									
	Dext.=0	Dext.=2.30	Dext.=7.72	Dext.=0.82	Dext.=2.36	Dext.=1.42	Dext.=0.58	Dext.=1.60	Dext.=0.52	
	Dext.=0	Dext.=1.58	Dext.=8.96	Dext.=0.68	Dext.=3.40	Dext.=2.44	Dext.=1.06	Dext.=2.20	Dext.=4.50	
	Dext.=0.28	Dext.=3.02	Dext.=12.38	Dext.=2.82	Dext.=9.84	Dext.=12.38	Dext.=0.86	Dext.=12.76	Dext.=13.81	

D_{ext} =Delaminasyon genişliği (Delamination extent).

Şekil 3.3. CFRP kompozit malzemenin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu oluşan deliklerin görüntüsü [107].

Araştırmacılar, su basıncının 100 MPa'dan 250 MPa'a çıkarıldığında veya nozul yaklaşma mesafesinin 1 mm'den 3 mm'ye çıkarılması durumunda delaminasyon oluşumunda 4 kattan daha büyük bir artış olduğunu; çıkış deliği çapında % 43'lük bir artış olduğunu ve ayrıca nozul yaklaşma mesafesinin 1 mm'den 3 mm'ye çıkarılması durumunda çıkış deliği boyutunda % 46'lık bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Delaminasyon kontrol teknikleri kullanıldığında ise, delaminasyon boyutunun önemli ölçüde azaltıldığını, deliklerin geometrik doğruluğunun daha iyi olduğunu, en iyi delaminasyon kontrol tekniğinin destek plakaya önceden delinmiş delik ve suda daldırma (su altında) teknikleri olduğunu belirtmişlerdir. Düşük su basıncı değeri, nozul yaklaşma mesafesi ve aşındırıcı akış oranı kullanıldığında ASJ ile delinen deliklerin yüzey kalitesinin iyileştiği, destek plaka ile delmede en düşük pürüzlülük değerlerine ulaşıldığı sonucuna varmışlardır (Şekil 3.4) [107].

Delaminasyon kontrol teknikleri	Su basıncı (MPa)		200	200	Delaminasyon kontrol teknikleri	Su basıncı (MPa)		200	200
	Aşındırıcı akış oranı (g/ s)		8.88	9.7		Aşındırıcı akış oranı (g/ s)		8.88	9.7
a. Normal ASJ ile delme	Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	2	 Dext. = 3.40	 Dext. = 2.20	c. Önceden delinmiş delik	Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	2	 Dext. = 0	 Dext. = 0
		3	 Dext. = 9.84	 Dext. = 12.76			3	 Dext. = 0	 Dext. = 0
b. Destek plakası ile delme	Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	2	 Dext. = 0	 Dext. = 0	d. Suya daldırma ile	Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	2	 Dext. = 0	 Dext. = 0
		3	 Dext. = 0	 Dext. = 0			3	 Dext. = 1.4	 Dext. = 3.38

Dext=Delaminasyon genişliği (Delamination extent).

Şekil 3.4. ASJ ile CFRP kompozit malzemenin 200 MPa su basıncı, iki farklı nozul yaklaşma mesafesi (2 ve 3 mm) ve iki farklı aşındırıcı akış oranında (8.88 ve 9.7 g/s) delinmesi sonucu oluşan deliğinin çıkış biçiminin görüntüsü [107].

Mayuet vd., ASJ ile işlenmiş CFRP numuneler üzerinde meydana gelen delaminasyonun Taramalı Optik Mikroskop (SOM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) tabanlı karakterizasyonu adlı çalışmalarında, 4 mm kalınlığında, 0° ve 90° oryantasyonlarında, düz örgülü CFRP kompozit malzemeleri ASJ makinesinde farklı işleme parametreleri altında kesme işlemine tabi tutmuşlardır (Şekil 3.5) (Çizelge 3.4). CFRP kompozit malzemelerde meydana gelen delaminasyon hasarını SEM/SOM cihazları ile ölçmüşlerdir [132].



Şekil 3.5. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilme anı görüntüsü [132].

Çizelge 3.4. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilmesi işleminde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

Su basıncı (MPa)	450
İlerleme oranı (m/dak)	300, 900, 1500 ve 2100
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	1.5, 3 ve 4.5
Aşındırıcı akış oranı (g/s)	5 ve 10
Aşındırıcı türü	Garnet
Aşındırıcı boyutu (μm)	120 (80 mesh)
Orifis çapı (mm)	0.3048
Nozul çapı (mm)	0.8

ASJ ile kesme işlemi sırasında çatlakların tabakalar arasında boşluk oluşturduğu, aşındırıcı parçacıkların bu boşluklara nüfuz ederek tabakalar arasında daha fazla hasara neden olduğu ve aşındırıcı parçacıkların bu boşluklar arasına yerleştiğini tespit etmişlerdir. Aşındırıcı parçacıkların işleme parametrelerine bağlı olarak oluşturmuş olduğu tabakalar arasındaki hasarları incelediklerinde; 10 g/s aşındırıcı akış oranında tabakalar arasında daha az boşlukların oluştuğu aynı zamanda delaminasyon oluşumunun sadece aşındırıcı akış oranına bağlı olunmadığı aşındırıcı boyutunun da etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Aşındırıcı boyutunun büyük olmasının kesme kuvvetini arttırdığı belirtilmiştir. Araştırmacıların yapmış oldukları deneyler sonucunda; ASJ ile işlenmiş parçaların SEM/SOM analizlerinin delaminasyon oluşum mekanizmasını belirlemede kullanılabileceğini, aşındırıcının delaminasyon oluşumunda en etkili parametre olduğunu, daha yüksek basınçlarda daha kalın tabakaların işlenebileceğini ve ortalama hız aralığı ile daha yüksek aşındırıcı akış oranında daha az hasarların oluşabileceğini belirtmişlerdir [132].

Alberdi vd., ASJ ile CFRP kompozit malzemelerin kesilmesinde, işleme parametrelerinin kesme kalitesi (kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü) üzerindeki etkisi ile ilgili çalışmalarında, iki farklı kalınlıkta iki farklı CFRP kompozit malzeme (M1 ve M2) kullanarak ASJ ile kesme işlemine tabi tutmuşlardır (Çizelge 3.5). Kesme işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kerf açısı ile ilgili elde ettikleri sonuçları ANOVA tekniğini kullanarak analiz etmişlerdir [108].

Çizelge 3.5. İki farklı CFRP kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gösterimi [108].

Malzeme türü	M1 ve M2
Malzeme kalınlığı (mm)	6 ve 12
Tabaka oryantasyonu (°)	0 ve 90
Tabaka tipi (Hexcel)	F593 ve 8552
Tabaka yoğunluğu (g/m ²)	193 ve 168
Fiber hacim oranı (%)	45-53 ve 60
Gerilme modülü (GPa)	51.7 ve 135

Deneysel çalışmalarında, sabit 360 MPa basınç ve 2 mm nozul yaklaşma mesafesi ile birlikte Çizelge 3.6'da gösterilen 2 farklı takım kombinasyonu (T1 ve T2) kullanılmışlardır [108].

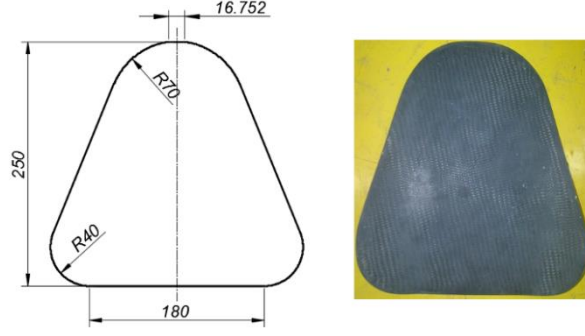
Çizelge 3.6. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile kesilme deneyi için seçilen takım değerlerinin gösterimi [108].

Takım	T1 ve T2
d _o (mm)	0.35 ve 0.25
d _f (mm)	1.02 ve 0.76
R _d	2.91 ve 3.04
A _a (g/dak)	330 ve 200
A _w (g/dak)	2915 ve 1481
R (%)	11 ve 14

d_o= Orifis çapı, d_f= Nozul çapı, R_d= Nozul çapı ile orifis çapı arasındaki oran, A_a= Aşındırıcı akış hızı, A_w= Su akış hızı, R= aşındırıcı yükleme oranı.

Deneysel çalışmaları sonucunda, M1 malzemesinin M2 malzemesinden daha hızlı kesilebildiğini ve bu durumun malzemelerin lif hacim oranı ve/veya gerilme modülü ile ilişkili olabileceğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar; işlenebilirlik modeli ile deneysel sonuçlar arasında yüksek bir korelasyon katsayısı olduğu sonucuna varmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar ile farklı kompozit malzemelerin tek bir grup halinde gruplandırılmayacağını ve farklı bileşimdeki kompozitlerin ASJ kesme tezgahları veri tabanlarını oluştururken farklı şekilde ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir [108].

Miron vd., Formula-1 araçlarında kullanılan CFRP kompozit malzemeye yüksek boyutsal kararlılık ve minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri elde etmek üzere ASJ ile kesme işlemi uygulamışlardır (Şekil 3.6) [133].



Şekil 3.6. İşlenen CFRP kompozit malzemenin 2B çizimi ve görüntüsü [133].

Araştırmacılar yaptıkları analizden sonra, ± 0.05 değerinde yüksek ölçü tamlığı ve $7,243 \mu\text{m}$ ortalama yüzey pürüzlülüğü elde etmişler ve malzeme içinde aşındırıcı kalıntıları ile delaminasyon gözlememişlerdir. Sonuçların, ASJ ile kesme yönteminin, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesi için iyi bir teknik olduğunu, katmanlı kompozit malzeme işlemede oluşabilecek delaminasyon hasarlarını en aza indirmenin proses kontrolünde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [133].

Unde vd., farklı fiber oryantasyonlarında ve 8 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemeyi farklı işleme parametreleri altında ASJ ile kesme işlemine tabi tutarak, işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına (Material Removal Rate/MRR), delaminasyon faktörüne, kerf genişliğine ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır (Çizelge 3.7) [40].

Çizelge 3.7. CFRP kompozit malzemenin ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

İlerleme oranı (m/dak)	2	4	6	8	10
Su basıncı (MPa)	80	160	240	320	400
Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	10	15	20	25	30
Fiber oryantasyonu ($^{\circ}$)	45	45	60	90	90

Nozul yaklaşma mesafesi ve ilerleme hızının; MRR, kerf genişliği, delaminasyon faktörünü; fiber oryantasyonu ve su basıncının da ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilediği sonucuna varmışlardır. 45° fiber oryantasyonundaki CFRP kompozit malzemenin, 60° ve 90° oryantasyonundakilere kıyasla üstün sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [40].

45° fiber oryantasyonundaki CFRP kompozit malzemede, 0.029 mm kerf genişliği gözlemlerken, 60° fiber oryantasyonunda 0.036 mm ve 90° fiber oryantasyonunda 0.038 mm kerf genişliği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 45° fiber oryantasyonundaki CFRP kompozit malzemede 18.95 mm³/s MMR, 60° fiber oryantasyonunda 18.26 mm³/s ve 90° fiber oryantasyonunda 17.4 mm³/s MRR tespit etmişlerdir. 45° fiber oryantasyonundaki CFRP kompozit malzemede elde ettikleri 2.238 delaminasyon faktörü ve 4.911 µm ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin, 60° (2.029 delaminasyon faktörü, 4.927 µm ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri) ve 90° (2.196 delaminasyon faktörü, 4.974 µm ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri) fiber oryantasyonundaki CFRP kompozit malzemelere kıyasla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [40].

3.2. DİĞER ÇALIŞMALAR

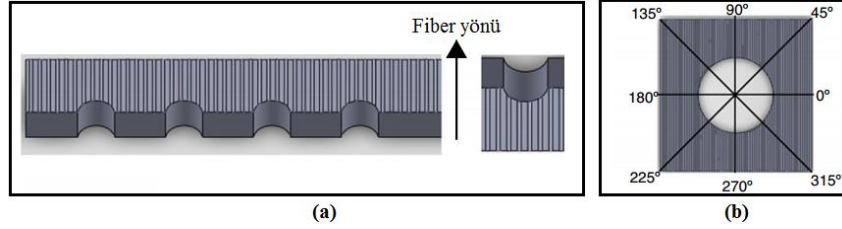
Eneyew ve Ramulu, CFRP kompozit malzemenin, dört farklı kesme hızı ve beş farklı ilerleme hızında, sekiz ağızlı çok kristalli elmas uçlu (PCD) matkap ile delinmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Delinmiş delik yüzeyinin kalitesini, yüzey pürüzlülük ölçümlerini ve yüzey hasarını taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Deney parametreleri Çizelge 3.8’de gösterilmiştir [134].

Çizelge 3.8. CFRP kompozit malzemenin delinmesinde kullanılan deney parametrelerinin gösterimi.

Teçhizat	Kistler Tip 5223 sinyal konumlandırma cihazlı Kistler Tip 9123C dönen dinamometre ile donatılmış Haas TM1P freze makinesi
İş parçası	Ortalama katman kalınlığının 0.192 mm olduğu 33 katmandan oluşan 6.35 mm kalınlığında tek yönlü CFRP kompozit tabaka
Kesici takım	6.35 mm çapında sekiz ağızlı PCD matkap
Kesme hızı (dev/dak)	1500, 3000, 4500 ve 6000
İlerleme oranı (mm/dev)	0.064, 0.128, 0.192, 0.256 ve 0.32

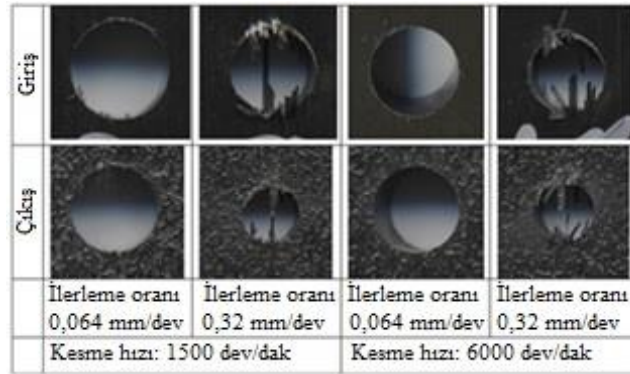
Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda, itme kuvvetinin ilerleme hızının artması ile arttığını ve kesme hızının artışı ile azaldığını tespit etmişlerdir. İtme kuvvetinin matkap dönme yönünde önemli ölçüde değiştiğini ve itme kuvvetinin en düşük değerinin 135° ve 315° dönme açıları etrafında gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Maksimum ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini 135° ve 315° açılarındaki deliğin

çevresi boyunca oluştuğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.7). Maksimum girinti-çıkıntı yüksekliğinin (fiber çekilmesi) ise 135° - 175° ve 315° - 355° fiber oryantasyonunda görüldüğünü belirtmişlerdir [134].



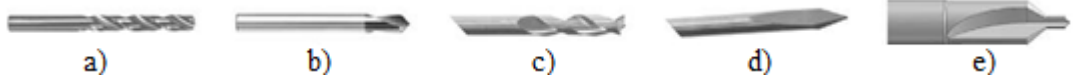
Şekil 3.7. a) Sekiz ağızlı PCD matkap ile delinmiş deliklerin dairesel testere ile kesilmesi sonucu elde edilen deney numunesinin şematik görüntüsü b) Yüzey pürüzlülüğü ölçüm bölgeleri için kesme kenarı ve fiber oryantasyonunun etkileşiminin gösterimi [134].

Araştırmacılar, daha iyi delik yüzey kalitesinin yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızı ile elde edileceğini; minimum itme kuvveti, delaminasyon faktörü ve düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, $0,064$ mm/dev ilerleme hızı ve 4500 - 6000 dev/dak kesme hızında olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.8) [134].



Şekil 3.8. Sekiz ağızlı PCD matkap ile delinmiş deliklerin görünümü [134].

Durão vd., CFRP kompozit tabakalar için matkap uç geometrisinin değerlendirilmesi adlı çalışmalarında, CFRP kompozit malzemeyi beş farklı uç geometrisine sahip matkap kullanarak farklı kesme parametreleri altında delme işlemine tabi tutmuşlar ve delme sırasında izledikleri maksimum itme kuvvetini, delik ortalama yüzey pürüzlülüğünü ve delaminasyon oluşumunu araştırmışlardır (Şekil 3.9) (Çizelge 3.9) [55].



Şekil 3.9. CFRP kompozit malzemenin delinmesinde kullanılan beş farklı matkap ucunun gösterimi a) 120° helisel b) 85° helisel c) brad d) dagger e) step matkap ucunun görüntüleri [55].

Çizelge 3.9. Deneysel testlerde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi.

Matkap çapı (mm)	6
Kesme hızı (m/dak)	53
İş mili hızı (dev/dak)	2800
İlerleme oranı (mm/dev)	0.02, 0.06, 0.12
İlerleme hızı (mm/dak)	56, 168, 336

Araştırmacıların yapmış oldukları deneyler sonucunda; düşük ilerleme oranlarının, aksenal kuvveti ve dolayısıyla delaminasyon başlama riskini azalttığını ve bu nedenle kompozit tabakaların delinmesi için uygun olduğunu, ayrıca; daha yüksek ilerleme oranları için en uygun takımın 120° helisel uç açısına sahip matkap olduğunu tespit etmişlerdir. Takım geometrisinin delaminasyon sonuçlarını etkilediğini ve minimum delaminasyon için 120° uç açısına sahip helisel matkap ucunun kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır [55].

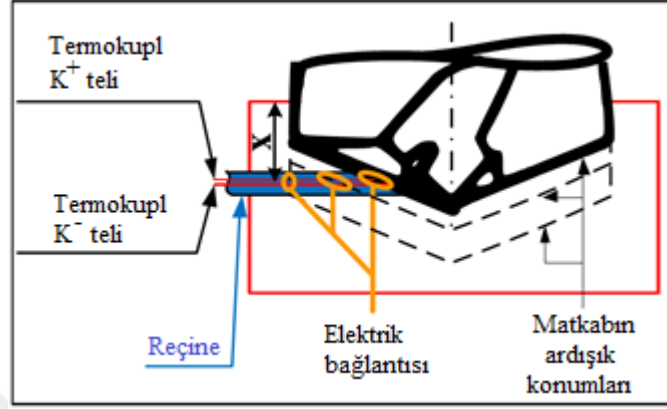
Ramirez vd., CFRP kompozit malzemenin delme işlemi sırasındaki delik yüzey kalitesinin ve takım aşınmasının izlenmesi adlı çalışmalarında, 30 mm kalınlığında tek yönlü CFRP kompozit plakaları, 12 mm çapında ve 140° uç açısına sahip karbür matkapla dikey CNC işleme merkezinde delme işlemine tabi tutarak, kesme sıcaklıkları, delik yüzey topografisi ve delme kuvvetlerinin gelişimiyle bağlantılı olarak aşınma kriterlerini ölçmüşlerdir (Çizelge 3.10) [135].

Çizelge 3.10. CFRP kompozit malzemelerin matkap ile delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

İlerleme oranı (m/dak)	0.05
Delik derinliği (m/dak)	100
İş mili hızı (kHz)	40
Kesme yöntemi	Kuru

Delme sıcaklıklarını, iş parçasının içerisine üç farklı derinlikte (5, 15 ve 25 mm) termokupullar yerleştirerek ölçmüşlerdir (Şekil 3.10). Ölçümlerinde termokupul

olarak K tipi (Kromel/Alumel) telleri kullanmışlardır. Delme kuvvetlerinin ölçümünde ise piezoelektrik döner dinamometre kullanılmış ve F_x , F_y ve F_z kuvvetleri ile M_z torkunu ölçmüşlerdir [135].



Şekil 3.10. CFRP iş parçasının içerisine termokupulların yerleştirilme anı ve termokupulla sıcaklık ölçüm metodolojisinin gösterimi [135].

Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda, optik mikroskop ile yanak aşınması ve çapak oluşumunu gözlemişlerdir. Abrasyon aşınmasının, CFRP kompozit malzemenin delinmesi esnasındaki ana aşınma mekanizması olduğunu belirtmişlerdir. Takım aşınmasının, itme kuvvetinin üç kat büyümesiyle (işlenmiş yüzey ile yan yüzün sürtünme etkisinden dolayı), kenarların geometri değiştirmesi nedeniyle tork değerinin iki katına çıkan kuvvetleri de etkilediğini tespit etmişlerdir [135].

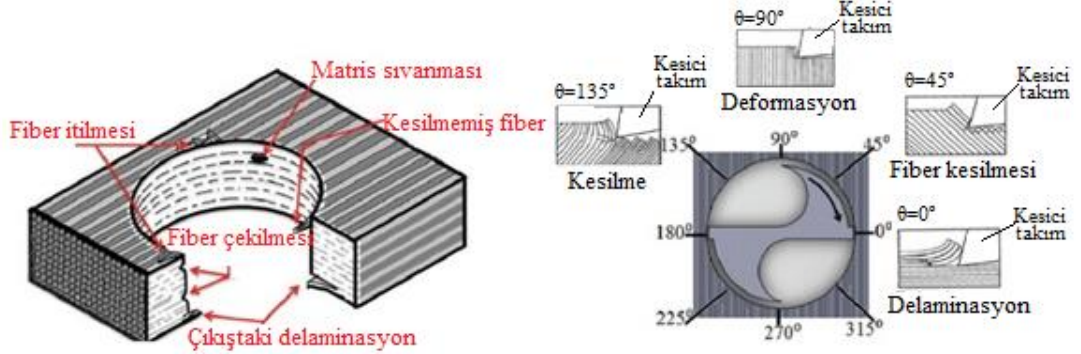
Miller vd., CFRP kompozit malzemenin kesilmesi ve delinmesi adlı çalışmalarında; 6.35 mm kalınlığında, farklı dizilimde CFRP kompozit malzeme kullanarak kuru ortamda dikey frezeleme işleminde (PCD (çok kristalli elmas), DA (elmas aşındırıcı) ve karbür takımlarla) ve ASJ ile kesme ve delme işlemindeki zorluklar ve hasarlar ile ilgili araştırma yapmışlardır. Deneplerinde, 10 katlı simetrik dizilimde [0/-45/90/45/0], 20 katlı simetrik dizilimde [0/45/90/45/0] ve tek yönlü CFRP kompozit tabakalarına farklı işleme parametreleri altında kesme ve delme işlemi uygulayarak ortalama yüzey pürüzlülüğünü ve oluşan delaminasyon hasar miktarını ölçmüşlerdir (Çizelge 3.11) [71].

Çizelge 3.11. CFRP kompozit malzemelerin PCD, karbür takımlarla frezeleme ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

<u>PCD ve Karbür Takım</u>	
Radyal kesme derinliği (mm)	0.72
Eksenel kesme derinliği (mm)	6.35
Matkap türü	12 mm çapında 2 ağızlı PCD parmak freze
Matkap çapı (mm)	12.7, 19 ve 25.4
Elmas aşındırıcı boyutu	30, 50, 80 ve 125 mesh
İlerleme oranı (mm/dev)	0.064, 0.128, 0.256 ve 0.32
Kesme hızı (dev/dak)	1500, 3000, 4500 ve 6000
Kesme yöntemi	Kuru
<u>ASJ</u>	
Su basıncı (MPa)	240
Aşındırıcı türü	80 mesh Garnet
Aşındırıcı akış oranı (g/s)	3.53 ve 9.78
İlerleme oranı (mm/dak)	60 ve 720

Tek yönlü CFRP kompozit malzemenin yüzey şeklinin fiber oryantasyonuna bağlı olduğunu, ciddi hasarın -45 derece fiber oryantasyonunda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. 10 katlı çok yönlü (0/45/90/-45/0) tabakanın kenar kesilmesinde de fiber çekilmesi ve fiber hasarının sürekli -45 derecede görülebileceğini, tek yönlü tabakada elde edilen hasara benzer şekilde çok yönlü tabakanın kesme kuvvetlerinin de periyodik olduğunu belirtmişlerdir. Pozitif fiber oryantasyonlu tabakaların, negatif fiber oryantasyonlu tabakalara göre çok daha yüksek kuvvetlere neden olduğu sonucuna varmışlardır. PCD ve karbür kesici kullandıkları kenar kesmede fiber/matris ara yüzeyi boyunca oluşan delaminasyonun kompozit malzeme üretiminde kenar kesmede oluşan en yaygın ve en ciddi hasar türü olduğunu belirtmişlerdir. Dört farklı tane boyutunda aşındırıcılı elmas kesiciler ile yaptıkları kesme işleminde, kesilmiş tabakaların kalitesinin; takım ilerleme hızı, takım çapı, takım türü ve talaş derinliği gibi değişkenlerden nispeten etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Bu elmas aşındırıcıların delaminasyona sebep olmasına rağmen, yapılan deneylerde kesme işleminin delaminasyona sebep olmadığını belirtmişlerdir. Yapmış oldukları kompozit malzemelerin delinmesi deneyinde; delaminasyon, fiber çekilmesi, matris çatlakları, matris erimesi, fiber kırılması gibi yapısal bütünlüğü bozan hasar mekanizmalarına

neden olduğunu belirtmişlerdir. Her 90°'de bir her kesme mekanizmasının tekrarlandığını belirtmişlerdir (Şekil 3.11) [71].



Şekil 3.11. CFRP kompozit malzemelerin delinmesi işleminde temel alanların etkileşim açıları, dört temel kesme mekanizması ve talaş biçimlerinin gösterimi [71].

Delme sürecinde ortaya çıkan kesme kuvvetlerinin, uygulanan kesme hızı ve ilerleme hızının kombinasyonuna bağlı olarak değiştiğini; CFRP kompozit malzemenin delinmesinde, itme kuvveti ve torkun; artan ilerleme hızıyla arttığını ve artan kesme hızı ile düştüğünü belirtmişlerdir. Elde edilen kesme kuvvetlerinin kesme hızından ziyade ilerleme hızından etkilendiği, düşük ilerleme hızı ve daha yüksek bir kesme hızı kombinasyonunun; ortaya çıkan kesme kuvvetlerini azalttığı ve delik kalitesini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Delaminasyonun, genellikle matris ağırlıklı hasar olarak kabul edildiğini ve çoğunlukla katmanların arasındaki bölgede görüldüğünü; ayrıca üst tabakanın soyulması, matkap çıkışında kesilmemiş fiber katmanı ve ısıl gerilimden kaynaklanan üç mekanizma ile ifade edildiğini belirtmişlerdir. Çıkıştaki delaminasyonun kesme hızından ziyade ilerleme hızından etkilendiği; delaminasyon uzunluğunun, ilerleme hızının artmasıyla arttığı ve kesme hızının artmasıyla da küçük bir azalma gösterdiği sonucuna varmışlardır. Daha küçük çıkış delaminasyonunun düşük ilerleme hızı ve daha yüksek kesme hızının bir kombinasyonu ile bulunacağını belirtmişlerdir [71].

Düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün değerlerini; yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızının kombinasyonu ile ölçüldüğünü belirtmişlerdir. CFRP kompozit malzemelerin geleneksel metotla kesilmesi ve delinmesinde en önemli konulardan birinin takım aşınması olduğunu belirtmişlerdir. CFRP kompozit malzemelerin yapısal

olarak aşındırıcı olduğu değerlendirildiğinde, karbür takımların, geleneksel HSS ile karşılaştırıldığında üstün kesim kalitesi gösterdiği ve PCD kesici takımlar ile CFRP malzemelerin kesilmesinin ekonomiklik ve kalite açısından mümkün olduğu sonucuna varmışlardır [71].

ASJ ile yaptıkları kesme deneyinde ise, ASJ ile işlenmiş kenarların, aşındırıcı akış oranı ve tabaka kalınlığı ile yakından ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. ASJ ile kesme zamanı ve talaş derinliğinin önemli ölçüde ilerleme hızına bağlı olduğu, en hızlı kesme ve en yüksek ilerleme hızı değerinin 720 mm/dak değerinde elde edildiğini belirtmişlerdir. Ancak, yüksek ilerleme hızının (720 mm/dak), düşük aşındırıcı akış oranı (3.53 g/s) ile kullanıldığında; nispeten düzensiz yüzey bitirme işlemi oluştuğunu, en iyi yüzey bitirme işleminin 60 mm/dak ilerleme hızı ve 9.78 g/s aşındırıcı akış oranı kullanılarak elde edildiğini tespit etmişlerdir [71].

Gaitonde vd., CFRP kompozitlerin yüksek hızda delinmesiyle oluşan delaminasyonun parametrik etkisinin analizi adlı çalışmalarında; 2.5 mm kalınlığında, 0°/90° fiber oryantasyonunda CFRP kompozit malzemeyi 5 mm çapında sementit karbür (K20) helisel matkapla üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap uç açısında delme işlemine tabi tutmuşlardır (Çizelge 3.12). Delme işlemi sonrasında delik giriş ve çıkışlarında oluşan delaminasyon hasarını ölçmüşlerdir [6].

Çizelge 3.12. CFRP kompozitlerin karbür matkap ile yüksek hızda delinmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

Kesme hızı (m/dak)	60, 120 ve 600
İlerleme oranı (m/dak)	1, 3 ve 6
Matkap uç açısı (°)	85, 115 ve 130

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, yüksek kesme hızında delme işleminin deliğin girişinde oluşan delaminasyon hasarının azaltılmasında önemli bir rol oynadığını gözlemişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları deneyler sonucunda kesme hızı artışı ile delaminasyon eğiliminde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca delaminasyon hasarını azaltmak için düşük ilerleme hızı ve uç açısı kombinasyonunun kullanılmasını önermişlerdir [6].

Grilo vd., farklı matkap uç geometrisi kullanarak CFRP kompozit malzemenin delaminasyon analizlerinin deneysel araştırması adlı çalışmalarında, 3 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemeyi üç farklı matkap ucu (SPUR, R950, R415) ile farklı ilerleme hızı ve iş mili hızı altında delme işlemine tabi tutarak delaminasyon hasarı ölçümü yapmışlardır. Deneyselerde kullanılan 5 mm çapındaki üç farklı matkap uçları Şekil 3.12’de gösterilmiştir [136].



Şekil 3.12. CFRP kompozit malzemenin delme deneylerinde kullanılan matkap uçlarının görüntüsü [136].

Araştırmacılar, optimum delme parametrelerini elde edebilmek için, üç farklı matkap ucunu kullanarak üç farklı iş mili hızı ve her iş mili hızı için beş farklı ilerleme oranlarında ön testler yapmışlardır (Çizelge 3.13) [136].

Çizelge 3.13. CFRP kompozit malzemenin delinme işleminin ön testlerinde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi.

İş mili hızı (dev/dak)	2250, 4500 ve 6750
İlerleme oranı (mm/dak)	112.5, 225, 337.5, 450, 675, 900, 1012.5, 1350 ve 2025

Ön testlerden elde ettikleri sonuçların delme parametreleri ve delaminasyon arasındaki ilişki hakkında tatmin edici sonuçlar vermediğini ve bundan dolayı ön testlerden sonra deneysel testleri daha yüksek ilerleme oranları ile yaptıklarını belirtmişlerdir (Çizelge 3.14) [136].

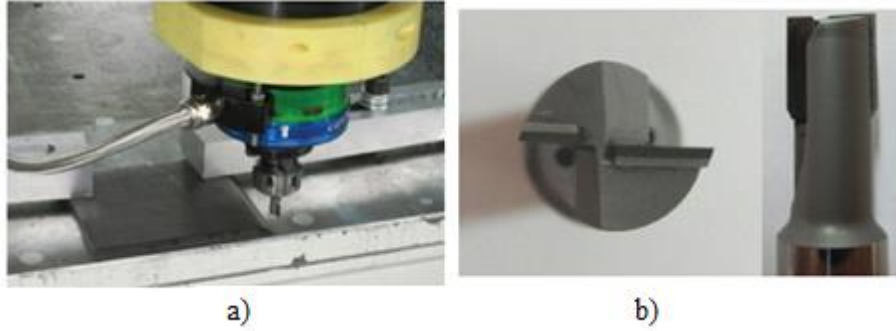
Çizelge 3.14. CFRP kompozit malzemenin delinme işleminin deneysel testlerinde kullanılan delme parametrelerinin gösterimi.

İş mili hızı (dev/dak)	6750
İlerleme oranı (mm/dak)	3000, 4000 ve 5000

Yapmış oldukları deneyler sonucunda R950 matkap ucuyla delinmiş deliklerin giriş yüzeyinde delaminasyon gözlenmezken çıkış yüzeyinde kesilmemiş fiberler tespit

etmişlerdir. R950 matkap ucuyla delinmiş deliklerin çoğunda giriş ve çıkış yüzeylerinde daha az delaminasyon oluştuğu belirtilmiştir. En düşük delaminasyon oluşumu SPUR matkap ucuyla delme de elde edildiği belirtilmiştir [136].

Karpat vd., 72 tabakadan oluşan 10 mm kalınlığındaki iki farklı (0° ve 45° fiber yönünde) CFRP kompozit malzemeyi 10 mm çapında PCD freze (0° helis açısı, 0° talaş açısı ve 20° boşluk açısı) takımı kullanarak 5 eksenli işleme merkezinde (dönüş hızı 3500 dev/dak) kanal frezeleme işlemine tabi tutmuşlardır (Şekil 3.13). Araştırmacılar, frezeleme yönünü değiştirerek CFRP numunelerinin 90° ve 135° fiber oryantasyonunda işlenebileceklerini belirtmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda elde ettikleri frezeleme kuvvetlerini ve tabaka oryantasyonuna bağlı olarak frezeleme denge sınırlarını hesaplayarak freze kesme kuvveti modeli sunmuşlardır [137].

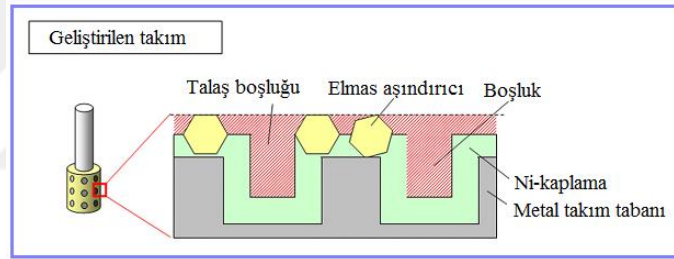


Şekil 3.13. CFRP kompozit malzemenin a) Kanal frezelenmesi, b) Frezeleme işleminde kullanılan PCD freze takımı görüntüsü [137].

Frezeleme testlerinin (kesicinin sıfır helis açısı nedeniyle), düşey yöndeki kuvvetlerinin tüm frezelemede oldukça küçük olduğu ve düşey kuvvetlerin küçük tutulmasının delaminasyon sorunu nedeniyle önemli bir husus olduğunu belirtmişlerdir. 0° fiber yönlü kompozit malzemelerin frezelenmesinde oluşan radyal kuvvetlerin 45° fiber yönlü malzemeler işlenirken oluşan radyal kuvvetlerden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. En büyük teğetsel kuvvetlerin ise 135° fiber yönlü malzeme işlenirken gözlemlenen kuvvetler olduğunu; en küçük teğetsel kuvvetlerin de 45° fiber yönlü malzemenin işlenmesinde görüldüğü sonucuna varmışlardır. Geliştirmiş oldukları CFRP kompozitlerin frezelenmesinde oluşan kesme kuvveti ile

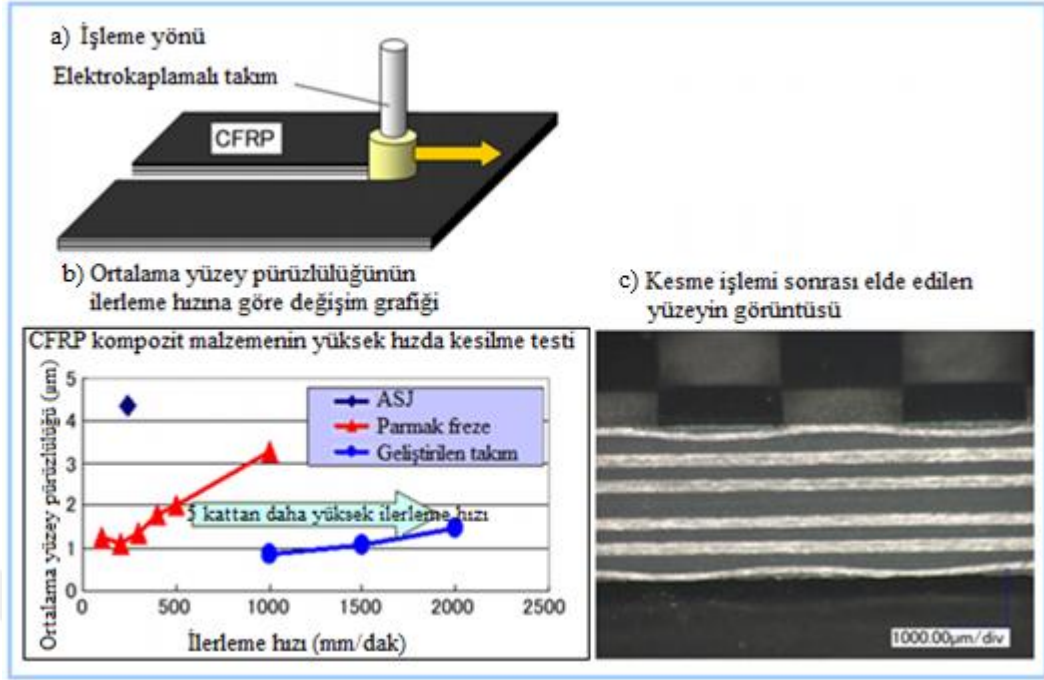
deneysel çalışma sonucu ölçülen kesme kuvvetleri arasında yüksek oranda uyumluluk gözlemlenmiştir [137].

Arisawa vd., CFRP kompozit malzemelerde yüksek performanslı kesme ve taşlama teknolojisi adlı çalışmalarında, farklı işleme parametreleri altında mevcut herhangi bir işleme teknolojisinin (ASJ, parmak freze, klasik elektro kaplamalı elmas takım ile araştırmacıların geliştirdiği elektro kaplamalı elmas takım) işleme verimliliği ve takım ömrü açısından daha başarılı bir şekilde yapılabilme durumunu araştırmışlardır. Geliştirdikleri elektro kaplamalı takımın; metal tabanlı yüzey üzerine ince elmas aşındırıcı taneciklerin nikel ile elektro kaplama yoluyla sabitlendiği boşluklu taşlama yüzeyli bir takım olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.14). Yaptıkları çalışmada CFRP kompozit malzemesine 10 mm derinlikte kanal açma işlemini uygulayarak elde ettikleri yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülüğünü tespit etmişlerdir [29].



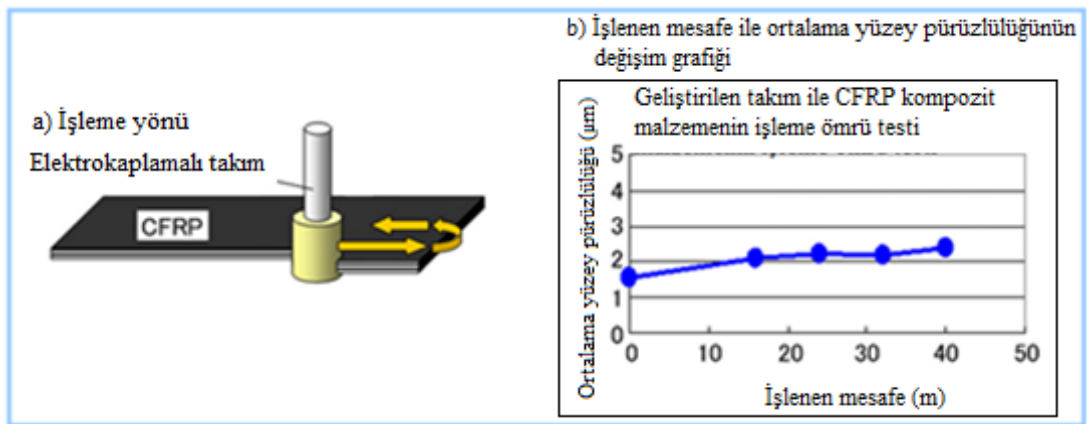
Şekil 3.14. Geliştirilen elektrokaplamalı takımın şematik görüntüsü [29].

Araştırmacılar, CFRP kompozit malzemenin kesilmesinin ve delinmesinin yüksek verimlilik ile yapılabilmesinde, hem takım hem de kesme/taşlama yöntemlerin her ikisindeki gelişime sahip olduklarını belirtmişlerdir. Parmak frezeleme ile yaptıkları işlemede, 200 mm/dak ilerleme hızının 1000 mm/dak ilerleme hızına çıkarılmasıyla ortalama yüzey pürüzlülüğünün 3 μm 'yi aşarak kademeli bir şekilde kötüleştiğini gözlemlenmiştir. Ayrıca, geliştirdikleri takım ile yaptıkları işlemede, 2000 mm/dak ilerleme hızında 1.5 μm ortalama yüzey pürüzlülüğüne ulaşmışlardır. ASJ ile işlenmiş yüzeylerde ise delaminasyonun gözlenmediğini, iyi kalitede yüzey elde edilirken ortalama yüzey pürüzlülüğünün 4 μm civarında ölçüldüğünü belirtmişlerdir (Şekil 3.15) [29].



Şekil 3.15. CFRP kompozit malzemenin yüksek hızda kesilme testinin gösterimi a) İşleme yönü, b) Ortalama yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızına göre değişimi, c) Kesme işlemi sonrası oluşan yüzey görüntüsü [29].

Araştırmacılar, takım ömrü testleri için, CFRP kompozit plakaları 2000 mm/dak ilerleme hızında ileri ve geri kenar frezeleme işlemine tabi tutmuşlar ve işlemenin başlamasıyla birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğünün 40 metrenin sonunda 2,4 µm değerine kadar kademeli olarak arttığını ve ardından CFRP tabakasının ortalama yüzey pürüzlülüğünde hiçbir değişiklik gözlemediklerini belirtmişlerdir (Şekil 3.16) [29].



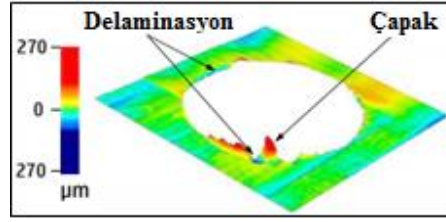
Şekil 3.16. CFRP kompozit malzemenin kesilmesi anı a) İşleme yönü, b) Ortalama yüzey pürüzlülüğünün mesafeye bağlı olarak değişim grafiği görüntüsü [29].

Araştırmacıların geliştirdikleri optimum şekilli matkap ile yapmış oldukları çalışma sonucunda; yüzey kalitesinde daha önceki işlemelere göre maksimum 22 kata kadar işlem verimliliği elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda takım ömrünün de delik sayısı kadar uzatılabileceğini, mevcut matkaplardan dört veya daha fazla kat arttırılabileceğini tespit etmişlerdir [29].

Kakinuma vd., CFRP kompozit malzemenin ultra hızlı delinmesi adlı çalışmalarında, CFRP kompozit malzemelerin, farklı işleme parametreleri altında ultra hızlı ilerlemeli (UFFD), ultrasonik titreşim destekli (UVD) ve ASJ ile delinmesinde malzeme özellikleri açısından işlenebilirliğini deneysel olarak analiz ederek üç bileşenli dinamometre ile kesme kuvvetlerini ve optik mikroskop ile de delaminasyon hasarını ölçmüşlerdir (izelge 3.15). Elde ettikleri sonuçlarda yüksek hızlı delme işlemi sırasında ilerleme hızının 3000 mm/dak'dan yüksek ayarlanmasıyla delik çıkış yüzeyindeki delaminasyonun önemli ölçüde azaltılabileceğini tespit etmişlerdir. n delme testlerinde ise, delaminasyon ve apak oluşumunun deliğin girişinden ziyade çıkışında gerçekleştiği sonucuna varmışlardır (şekil 3.17) [138].

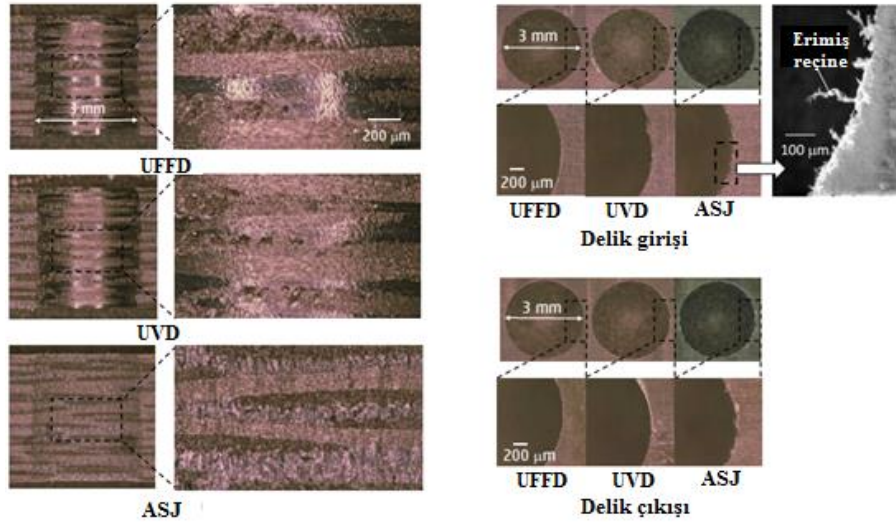
Çizelge 3.15. CFRP kompozit malzemelerin UFFD, UVD ve ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

<u>UFFD ve UVD</u>	
Matkap apı (mm)	3
Delik derinliği (mm)	3
İş mili hızı (1/dak)	3000, 5000 ve 7000
Ultrasonik titreşim genliği (μm)	6~10
Ultrasonik titreşim sıklığı (kHz)	70
Kesme yöntemi	Kuru
İşleme süresi (s)	3 (İlerleme oranı=3000 mm/dak için)
<u>ASJ</u>	
Su basıncı (MPa)	50 ve 300
Delik derinliği (mm)	3
Nozul apı (mm)	0.84
Aşındırıcı türü	Garnet
Aşındırıcı akış oranı (g/dak)	50 ve 150
İlerleme oranı (mm/dak)	100
İşleme süresi (s)	14



Şekil 3.17. CFRP kompozit malzemenin UFFD ile işlenmiş delik içinin şematik görüntüsü [138].

Araştırmacılar, CFRP kompozit malzemenin delme işlemi için aksenal ultrasonik titreşim uygulamışlar ve ultrasonik titreşime göre kesintili kesmenin, iş parçası ve takım arasındaki sürtünmeyi azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, ASJ ile yaptıkları delme işleminde ise daha yüksek su basıncı uygulandığında, yüksek basınç sonucu CFRP kompozit malzemede geniş çapta hasar oluşacağını belirtmişlerdir [138]. 3000 mm/dak itme kuvvetinin, 50 mm/dak'dan 6 kat daha yüksek olsa ve 22 N'a yaklaşırsa bile, 3000 mm/dak işleme zamanını 50 mm/dak işleme zamanının yaklaşık 1/60'ı kadar olduğunu tespit etmişlerdir. 3000 mm/dak'daki toplam itme kuvvetinin 50 mm/dak'dakinden 1/10 oranında daha düşük olduğunu, bu nedenle de UFFD ile işleminin enerji azaltma açısından önemli bir avantaja sahip olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ilerleme hızını 3000 mm/dak olarak ayarladıklarında iş mili hızı ne olursa olsun hiçbir delaminasyon gözlemlenmemişlerdir. İlerleme oranı 3000 mm/dak'dan daha yüksek olduğunda, delaminasyon hacminin 20000 dak⁻¹'ya kadarki iş mili hızlarında ilerleme hızının artmasıyla arttığını, 5000 mm/dak ve 7000 mm/dak ilerleme oranlarında aşırı itme kuvveti veya darbe kuvvetinden dolayı delaminasyon alanının genişlemesine neden olabileceğini belirtmişlerdir. 3000 mm/dak ilerleme hızının delaminasyon alanını önlemek için optimum olduğu sonucuna varmışlardır. Çapak hacminin mil hızının artması ile azalma eğiliminde olduğunu; ayrıca çapak hacminin 3000 mm/dak ilerleme hızı ve 20000 dak⁻¹ iş mili hızında önemli ölçüde önlenebileceğini belirtmişlerdir. UFFD ile işlemede delik yüzeyinde her karbon fiber katmanı açıkça gözlenirken, UVD ve ASJ ile işlenmiş yüzeyin erimiş reçine ile kaplanmasından dolayı her tabakanın bulanık görüldüğünü gözlemlenmişlerdir (Şekil 3.18) [138].



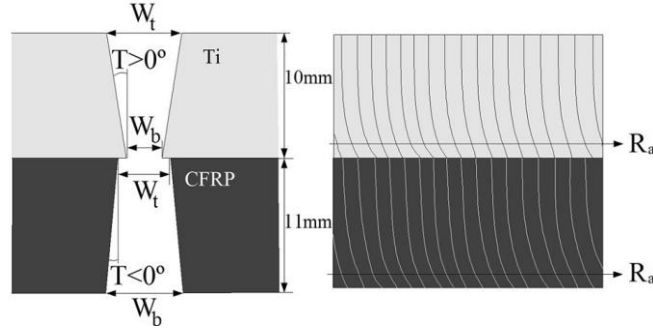
Şekil 3.18. UFFD, UVD ve ASJ ile işlenmiş delik yüzeylerinin mikroskobik görüntüleri [138].

Delik ortalama yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi ile ilgili olarak, UFFD ile işlemede ASJ ile işlemeye göre daha kısa bir süre içinde, daha iyi bir yüzey elde etmişlerdir. Yüzey kalitesi, şekil doğruluğu ve işleme süresi açısından, CFRP kompozit malzemenin delinmesi için UFFD ile işleme yönteminin uygun olduğunu belirtmişlerdir [138].

Alberdi vd., iki farklı dizilimdeki CFRP/Ti6Al4V tabakalarının farklı işleme parametreleri altında ASJ ile kesilmesinde, işleme parametrelerinin yüzey kalitesine (pürüzlülük ve kerf profili) etkisini incelemişlerdir (Çizelge 3.16) (Şekil 3.19) [59].

Çizelge 3.16. CFRP/Ti6Al4V tabakalarının ASJ ile kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin gösterimi.

İlerleme oranı (mm/dak)	5, 20, 35, 50, 65, 80 ve 95
Su basıncı (MPa)	250 ve 360
Aşındırıcı türü	Garnet (80 mesh)
Aşındırıcı akış oranı (g/dak)	350 ve 450
Nozul çapı (mm)	0.76 ve 1.02
Orifis çapı (mm)	0.25 ve 0.35
Tabaka konfigürasyonu	Ti6Al4V/CFRP ve CFRP/Ti6Al4V

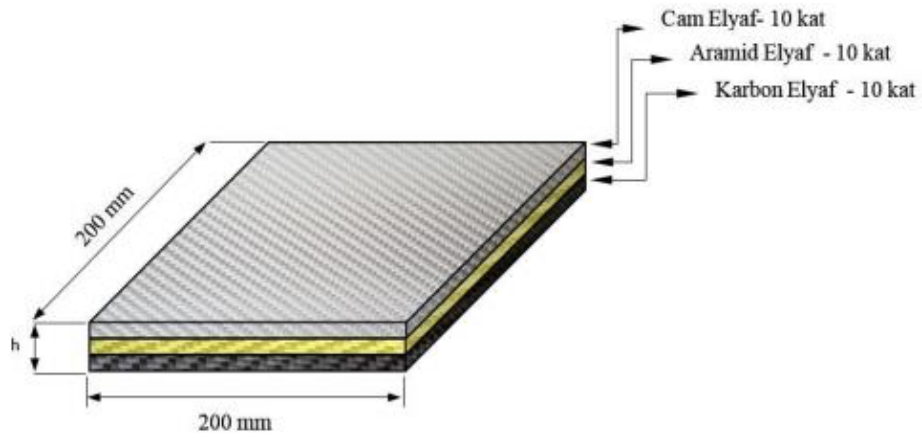


Şekil 3.19. Ti6Al4V/CFRP tabakalarının ASJ ile kesilmesi sonucu oluşan kerf profilinin şematik gösterimi [59].

Araştırmacıların yapmış oldukları çalışma sonucunda Şekil 3.19’da gösterildiği gibi her iki konfigürasyondaki (Ti6Al4V/CFRP ve CFRP/Ti6Al4V) malzemeler için kerf genişliği açısından en önemli faktörün su basıncı ve ardından nozul ilerleme hızı olduğunu tespit etmişlerdir. Su basıncının artmasıyla kerf genişliğinin azaldığını, Ti6Al4V/CFRP konfigürasyonundaki tabakanın ASJ ile işlenmesinde CFRP/Ti6Al4V konfigürasyonundaki tabakaya göre daha düşük kerf genişliği elde edildiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, CFRP/Ti6Al4V konfigürasyonundaki tabakada nozul ilerleme hızının artmasıyla kerf genişliğinin arttığını tespit etmişlerdir. CFRP/Ti6Al4V konfigürasyonu kullandıklarında, her iki malzeme için de ortalama pürüzlülük değerini 250 MPa basınçla 10 μm 'nin altında ve 360 MPa'lık bir basınçta 6.5 μm 'nin altında çıktığını; Ti6Al4V/CFRP konfigürasyonu kullandıklarında ise, CFRP kompozit malzemenin ortalama pürüzlülük değerinin 18 μm 'ye ulaştığını belirtmişlerdir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için en önemli faktörün; hareket ilerleme hızı ve ardından su basıncı ve tabaka konfigürasyonu olduğunu tespit etmişlerdir. Hareket ilerleme hızının artmasıyla pürüzlülük değerinin katlanarak arttığını, daha düşük basınç kullanıldığında daha yüksek pürüzlülük değerlerinin elde edileceğini belirtmişlerdir. Kerf açısı ve pürüzlülük değerlerini en aza indirmek için, yüksek basınç, düşük ilerleme oranlarının kullanılması gerektiğini; su ve aşındırıcı maliyetinden tasarruf için, 0,25 mm orifis çapı, 0,76 nozul çapı ve 350 g/dak aşındırıcı akış oranından oluşan takım kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır [59].

Yanen vd.’nin tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi adlı çalışmalarında, farklı fiber takviye açılarına, tabaka sayılarına ve kalınlıklara sahip cam fiber/aramid fiber/karbon fiber

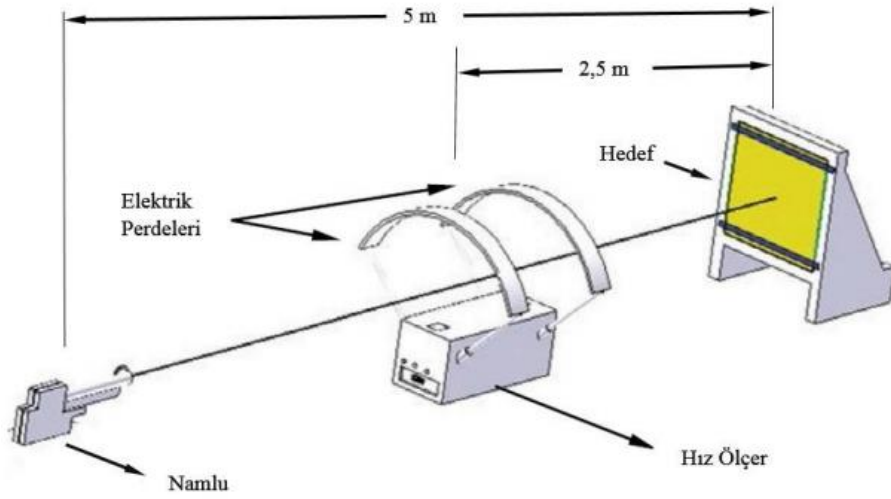
tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, 200x200 mm boyutlarındaki 30 tabakalı farklı kalınlıkta 4 adet plaka elle yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3.20) (Çizelge 3.17). Farklı fiber takviye açılarının balistik performansının incelenebilmesi için 0°, 45°, plain ve twill kumaşlar kullanılmıştır. Çalışmada, NIJ (National Institute of Justice/ Ulusal Adalet Enstitüsü) standartlarına uygun olarak 5 m mesafeden 9 mm mermiler kullanılarak atış testleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir (Şekil 3.21) [139].



Şekil 3.20. 30 tabakalı [Cam₁₀/Aramid₁₀/Karbon₁₀] hibrit polyeşter reçine matrisli numunelerin yapı şeması [139].

Çizelge 3.17. Kompozit numunelerin konfigürasyonu [139].

Numune Özellikleri						
Numune Adı	Malzeme	Kat Sayısı	Boyut (mm)	Ağırlık (gr)	Kalınlık (mm)	Üretim Sonrası Ağırlık (gr)
B1	Karbon Fiber 45°(400gr/m ²)	10	200*200	172.94	13	818
	Aramid Fiber Plain (410gr/m ²)	10	200*200	155.29		
	Cam Fiber 45° (460gr/m ²)	10	200*200	197.82		
B2	Karbon Fiber 0° (300gr/m ²)	10	200*200	125.87	11	656
	Aramid Fiber Plain (410gr/m ²)	10	200*200	166.60		
	Cam Fiber 0° (300gr/m ²)	10	200*200	125.30		
B3	Karbon Fiber Plain (200gr/m ²)	10	200*200	79.13	9	550
	Aramid Fiber Plain (410gr/m ²)	10	200*200	160.91		
	Cam Fiber Plain (200gr/m ²)	10	200*200	81,16		
B4	Karbon Fiber Twill (245gr/m ²)	10	200*200	81.63	9.5	598
	Aramid Fiber Plain (410gr/m ²)	10	200*200	160.73		
	Cam Fiber Twill (282gr/m ²)	10	200*200	98.45		



Şekil 3.21. Balistik test düzeneğinin şematik gösterimi [139].

B1, B2, B3 ve B4 olarak kodlanan numunelere yapılan tüm atışlar tabaka içerisinde tutularak balistik testler başarı ile sonuçlanmıştır. En arkada sert yapısıyla destek tabakası görevi gören karbon fiber kumaşa, B1 kompozit malzemenin merminin uyguladığı kuvvetle karbon fiber kumaşın 45° olması sebebiyle $\pm 45^\circ$ yönünde fiber hasarı meydana gelirken, B2 kompozit malzemenin 0° olması sebebiyle merminin etkisiyle karbon fiber üzerinde yatay fiber hasarı meydana geldiği belirtilmiştir. B3 kompozit malzemede en arkada olan karbon fiber kumaşın plain olması sebebiyle hem yatay hem dikey yönde fiber hasarı meydana gelirken, B4 kompozit malzemede en arkada destek tabakası olarak kullanılan karbon fiber kumaşa herhangi bir hasar meydana gelmediği gözlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde balistik testlerde en başarılı olan numunenin en ağır ve en kalın numune olan B1 adlı [Cam(45°)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Karbon(45°)₁₀] dizilimine sahip numunenin değil, [Cam(Twill)₁₀/Aramid(Plain)₁₀/Karbon(Twill)₁₀] dizilimli olan B4 adlı numunenin olduğu ve bu sonuçlar neticesinde twill dokuma yapısına sahip kumaşların balistik dayanımının daha iyi olduğu tespit edilmiştir [139].

Patel ve Shaikh, FRP kompozit malzemelerin ASJ ile işlenmesi ile ilgili derleme çalışmaları yapmışlardır. ASJ ile kesme işleminin temel özelliklerinden dolayı, endüstriyel ve evsel uygulamalar için yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozit malzemelerin kesilmesi için ASJ tekniğinin uygulanmasını değerlendirmişlerdir [117]. Hemen hemen her malzemeyi kesmek için uygun olan ASJ

teknolojisinin çok yönlülüğünün, benzer işlemler için kullanılan diğer konvansiyonel ve alışılmamış işleme proseslerine göre ekstra takım ve sabitleme gerektirmemesi, bunun yanında soğuk kesim ve kendinden temizlemenin sağlanması gibi avantajlarına sahip olduğunu açıklamışlardır. Bu avantajlara dayanarak, ASJ işleme yönteminin FRP malzemeleri işlemek için en iyi alternatif metod olabileceğini, fakat ASJ teknolojisinin, her işleme sürecinde olduğu gibi, arzu edilmeyen konik ve pürüzlü kerf duvarları oluşması gibi kısıtlamalara neden olduğunu ve sözü edilen bu hasarların, işleme için optimal ASJ parametrelerinin seçilmesiyle mümkün olan en iyi düzeye indirgenebileceğini belirtmişlerdir [117].

Acar vd.' nin CFRP kompozit malzemelerde ara yüzey mekaniğinin karbon nanoyapı katkısıyla iyileştirilmesi adlı çalışmalarında, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin ara yüzey dayanımına etki eden kimyasal bağlanma performansını, nanoteknolojik yöntemler ile arttırmaya çalışmışlardır [140]. Deneylerinde, polimerik reçine içine kütlece % 0,1 oranında, iki ayrı kimyasal işlem (Hummers Metodu ve Kimyasal Metot) görmüş “Grafen” bazlı nanopartiküller (GO) takviye etmişlerdir. Bu kapsamda GOk+epoksi/karbon fiber, GOH+epoksi/karbon fiber ve epoksi/karbon fiber kompozit malzeme olarak üç ayrı tip karbon fiber/epoksi prepreg kompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin ILSS (Interlaminar Shear Strength - Tabakalararası Kayma Dayanımı) değerini hesaplamak için ASTM 2344 (Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite and Their Laminates – Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin ve Tabakaların Kısa-Kiriş Mukavemeti için Standart Test Yöntemi) standardını kullanmışlardır. Ayrıca bu testleri üç nokta eğme cihazında gerçekleştirmişlerdir (Şekil 3.22) [140].

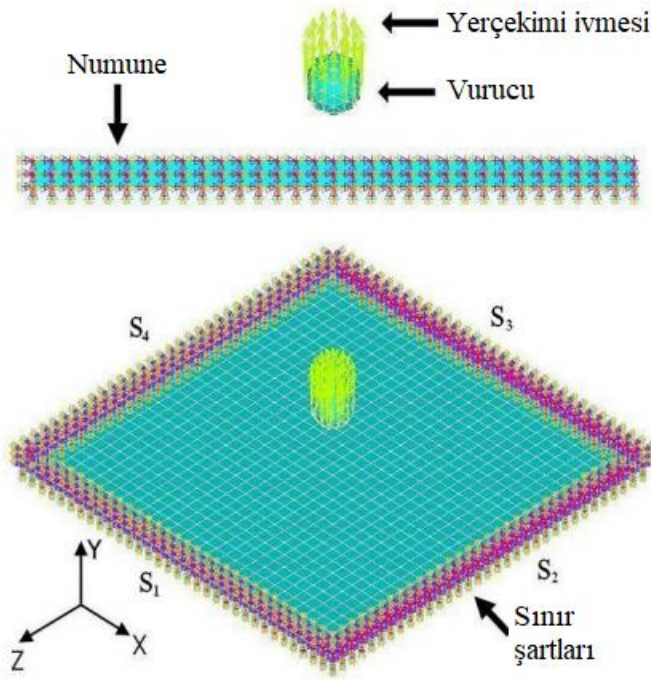


Şekil 3.22. Kısa kiriş kayma testi ve üç nokta eğme cihazının görüntüsü [140].

Yaptıkları testler sonucunda, ILSS değerinde ciddi artışlar sağlayarak kompozitin ara yüzey dayanımını arttırmışlardır. GOk katkılı prepreglerde %17 oranında bir artış gözlerken, GOh katkılı prepreglerde %58 oranında artış sağlamışlardır. Artan bu ILSS değerlerinin, epoksinin mekanik özelliklerinin iyileşmesinden, karbon fiber ile epoksi arasındaki yapışma derecesinin artmasından veya her ikisinin birlikte var olmasından kaynaklanabileceğini tespit etmişlerdir [140].

Bayraktar ve Turgut, kompozit parçaların montajında genellikle pimli bağlantıların kullanılmasından dolayı delik delme işlemine ihtiyaç duyulduğunu; delme işleminde, delik giriş ve çıkışında oluşan yüzey hasarlarının oluştuğunu belirterek farklı araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar üzerine bir derleme yapmışlardır [53]. Yaptıkları araştırmalar sonucunda, delaminasyon faktörünün kesme parametreleri (kesme hızı ve ilerleme hızı) ve kesici uç geometrisi gibi delme parametrelerinden etkilendiğini, kesme parametrelerinden özellikle ilerleme hızının artması ile delaminasyon faktöründe artış olduğunu, matkap uç açısı ve helis açısının artması ile de delaminasyonda artış olduğunu belirtmişlerdir. Kesme hızının düşük seviyelerde kullanılmasının, delaminasyonun azaltılması için gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışmalarda maliyeti ve harcanan zamanı azaltmak için Taguchi optimizasyonunun ayrıca en etkili parametrenin tespiti için ANOVA analizinin kullanıldığını tespit etmişlerdir [53].

Akbulut vd.'nin CTP (cam fiber takviyeli plastik) kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışlarının nümerik analizi adlı çalışmalarında, CTP kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin ve malzeme geometrisinin darbe yüklerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırma kapsamında, ANSYS yazılımı kullanarak düşük hızlı darbe yükü altında, takviye açısı, tabaka sayısı, tabaka kalınlığı ve tabaka geometrisi gibi faktörlerin kompozit tabakanın darbe davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada çeşitli geometriye ve hıza sahip vurucuların etkileri dikkate alınmış, SEM modellemelerinde; tabakalı kompozit malzemeler için SHELL 163 ve vurucu için ise SOLID 164 elemanı kullanılmıştır (Şekil 3.23) [141].



Şekil 3.23. CTP kompozit malzeme ve vurucunun SEM modellerinin görüntüsü [141].

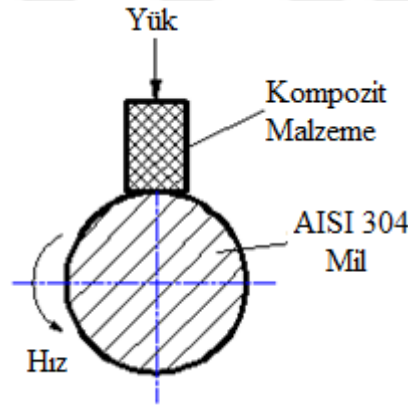
Yapılan deneysel çalışma sonucu, darbe hızının artışına bağlı olarak kontak kuvvetlerin arttığı belirlenmiştir. Kontak kuvvetinin ve absorbe (yutulan) edilen enerjinin hız artışıyla birlikte artış gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca hızın artışıyla birlikte reaksiyon süresinin de azaldığı tespit edilmiştir. Tabaka alanının artışıyla birlikte, tabaka merkezinin yer değiştirme miktarının artış gösterdiği, tabaka merkezindeki gerilme miktarının azaldığı gözlenmiştir. Tabakada meydana gelen kontak kuvveti tabaka alanının artışıyla azalırken, absorbe edilen enerji miktarının artış gösterdiği, ayrıca; tabaka alanının artışıyla birlikte reaksiyon süresinin de arttığı sonucuna varılmıştır [141].

Çelik ve Kılıçkap, “cam ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin aşınma davranışlarının araştırılması” adlı çalışmalarında, 10 mm çapında ve 25 mm uzunluğunda cam ve karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı yük (5, 10 ve 15 N) ve kayma mesafelerinde (245, 490 ve 730 m) ağırlık kayıpları belirlenerek, aşınma bölgeleri optik mikroskopla incelenmiştir (Çizelge 3.18) [142].

Çizelge 3.18. Cam fiber ve karbon fiber kompozit çubukların teknik özellikleri [142].

Ürün	Cam Fiber Malzeme	Karbon Fiber Malzeme	Birim
Elyaf Cinsi	E Cam	TENAX STS40	
Reçine Cinsi	Vinil Epoksi	Vinil Epoksi	
Ağırlıkça Elyaf İçeriği	>76	>76	%
Hacimce Elyaf İçeriği	>65	>65	%
Çekme Dayanımı	>1000	>2080	MPa
Basma Dayanımı	>550	>1450	MPa
Çekme Modülü	>38	>145	GPa
Yoğunluk	>1,80	>1,51	g/cm ³

Cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 1.2 µm ve 1.9 µm elde edilmiştir (aşındırıcı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 2.3 µm olan 30 mm çapında AISI 304 paslanmaz çelik tercih edilmiştir) (Şekil 3.24) [142].



Şekil 3.24. Aşınma deney düzeneğinin şematik gösterimi [142].

Hem yükün hem de kayma mesafesinin ağırlık kaybının artmasına neden olduğu görülmüştür. Karbon fiber takviyeli malzemede meydana gelen ağırlık kaybının cam fiber takviyeli malzemede meydana gelen ağırlık kaybından daha az olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yükün ağırlık kaybı için oldukça önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Kompozit malzemelerin teknik özelliklerine bağlı olarak aynı aşınma parametrelerinde cam fiber takviyeli kompozit malzemeler, karbon fiber takviyeli kompozit malzemelere göre oldukça fazla aşınmıştır. Bu yüzden, aşınmaya maruz kalan yerlerde özellikle mukavemeti yüksek olan karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir [142].

Sarıbyık vd., fiber hacim oranlarının CTP kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri adlı çalışmalarında; deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda malzemenin maksimum çekme gerilmesini, elastisite modülünü, poisson oranını ve yüzde uzamalarını (sünekliğini) tespit etmişlerdir [143]. CTP kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak üniversal çekme test makinesinde iki yönde hareket sabitliği veren çeneler arasına yerleştirilmiş numunelere 2 mm/s hızla aksel çekme kuvveti uygulamışlardır. Çekme deneyi sonrası deney numunesinin lineer elastik bir davranış gösterdiğini ve gevrek kırılma sergilediğini tespit etmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda fiber hacim oranının artmasıyla, elastisite modülünün arttığı, poisson oranının ve yüzde uzamanın (sünekliğin) azaldığını tespit etmişlerdir. Nümerik hesaplamalarda da deneysel çalışmada elde ettikleri sonuçlara benzer şekilde fiber hacim oranının artmasıyla elastisite modülünün arttığı, poisson oranının ve yüzde uzamanın (sünekliğin) azaldığı sonucuna varmışlardır. Deney numunesi elastisite modülünün elde edilmesine yönelik olarak yaptıkları deneysel çalışmalardan elde ettikleri değerlerin, teorik hesaplarla buldukları değerlerden yaklaşık %10 daha düşük çıktığını belirtmişlerdir [143].

Koenig vd.; FRP kompozit malzemelerin frezeleme, tornalama, delme ve ASJ ile kesme yönünden işlenmelerini araştırmışlardır. Bu araştırmanın sonucunda, FRP kompozit malzemelerin işlenmesi esnasında fiber ayrılması, fiber çekilmesi, yüzey çatlaması, matris kırılması gibi çeşitli hasar olaylarını gözlemlemişlerdir [10,57].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin işleme davranışlarını anlamaya yönelik ilk çalışmalardan biri olan; Koplev vd.' nin, CFRP kompozit malzemelerin kesme işleminde kesme parametreleri, talaş yapısı ve kesme kuvvetleri adlı çalışmalarında kesme yönüne 90° dik ve kesme yönüne 0° paralel fiber yönelimlerinde iki farklı CFRP kompozit malzemeye dik işleme testleri uygulamışlar ve iki farklı fiber yöneliminin talaş yapısını, yüzey kalitesini ve kesme kuvvetlerini gözlemlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda; talaş oluşum mekanizmasında fiberlerde birtakım kırılmaların gözlemlendiğini ve iki farklı fiber yönelimindeki CFRP kompozit malzemenin (0° ve 90°) birbiriyle karşılaştırılmasında 90° fiber yönelimindeki CFRP kompozit malzemenin daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [10,144].

3.4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Polimer matrisli kompozitler için ASJ teknolojisi altında aşındırma veya kesme işleminin eşsiz bir mekanizmaya sahip olduğu tespit edilmiştir [145,146]. ASJ uygulamaları; kesme, delme ve frezelemeden sert malzemelerin şekillendirilmesine kadar uzanmaktadır. Termal bozulmanın olmaması, yüksek işleme çeşitliliği, yüksek esneklik ve düşük kesme kuvvetleri olmak üzere farklı avantajları sayesinde 'soğuk' kesim teknolojisi olan ASJ, polimer matrisli kompozit malzemelerin işlenmesinde büyük bir potansiyele sahiptir [145-147].

ASJ ile delme işleminde; su basıncı, nozul ilerleme hızı, nozul yaklaşma mesafesi, aşındırıcı tipi ve boyutu, nozul çapı, aşındırıcı akış oranı gibi parametreler kullanılarak yapılan delme, kesme ve frezeleme işlemleri sonrasında elde edilen iş parçalarının delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada; uçakların son montaj esnasında kullanılan delme işleminin diğer işlemlere kıyasla en sık kullanılan işleme yöntemi olmasından dolayı, CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesi ve kesilmesi konusu incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, araştırmacılar genellikle $(0^{\circ}/90^{\circ})_s$ oryantasyonunda malzeme kullanılarak araştırmalar yapmış olup, $(\pm 45^{\circ})_s$ oryantasyonlarında ASJ ile delme veya kesme işlemi yapılmadığından dolayı bu çalışmanın literatüre katkı sağladığı düşünülmektedir. CFRP kompozit malzemeler; hafif ve daha sağlam olmasıyla birlikte kararlı yapısından dolayı vakum torbalama yöntemiyle imal ettirilmiştir. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası deliklerde meydana gelebilecek hasarı gözlemlemek için deliklerin mikroskobik, SEM, EDS görüntüleri alınarak açılan deliklerin mikro yapısal incelemeleri ve ayrıntılı analizleri gerçekleştirilmiştir. Delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değerleri için ASJ işleme parametrelerinin hangi değerde olması gerektiğinin analizi Minitab 17.0 paket programı kullanılarak Taguchi analizi ile yapılmıştır. Ayrıca işleme parametrelerinin etki derecelerini belirlenmek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

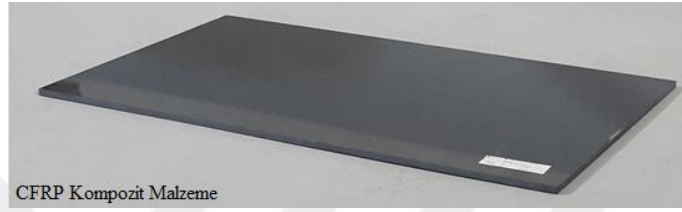
Bu çalışmada, $[0^\circ/90^\circ]_s$, $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ ve $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'daki CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinebilmesi ve kesilebilmesi araştırılmıştır. Delme işlemi öncesi CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek hasarları minimum değere indirebilmek için plakaların üç tanesine pilot delikler (pd) açılmıştır. ASJ ile delme deneyinde kullanılan CFRP kompozit malzemeler için belirlenen kodlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Delme işlemi sonrası delik iç yüzey ortalama yüzey pürüzlülüğü ile kerf açısı ölçülmüştür. Delme işlemi sonrası deliklerde meydana gelebilecek delaminasyon faktörünü gözlemlemek için deliklerin mikroskobik, SEM, EDS görüntüleri alınarak açılan deliklerin mikro yapısal incelemeleri ve ayrıntılı analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, maliyeti azaltmak için parametreleri belirlemede Taguchi optimizasyonu metodu kullanılmıştır. Ayrıca işleme parametrelerinin etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.1. CFRP kompozit malzemeler için tanımlanan kodların gösterimi.

No	CFRP Kompozit Malzeme	FOA
1	M1	$[0^\circ/90^\circ]_s$
2	M2	$[+45^\circ/-45^\circ]_s$
3	M3	$[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$
4	M1pd	$[0^\circ/90^\circ]_s$
5	M2pd	$[+45^\circ/-45^\circ]_s$
6	M3pd	$[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$

4.1. DENEY NUMUNESİ

Deneysel çalışmalarda; uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan $[0^\circ/90^\circ]_s$, $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ ve $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ farklı fiber oryantasyon açılarında (FOA) üretilmiş CFRP kompozit malzemeler (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) iş parçası olarak kullanılmıştır. 500×300×6 mm ölçülerinde üretimi gerçekleştirilen CFRP kompozit malzemenin görüntüsü aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. 500×300×6 mm ölçülerinde üretimi gerçekleştirilen CFRP kompozit malzeme görüntüsü.

ASJ ile delme işleminde kullanılan CFRP kompozit malzemeye ait teknik özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. CFRP kompozit malzemeye ait teknik özellikler.

Dokuma tipi	Twill 2×2
Kumaş ağırlığı	200 gr/m ²
Fiber hacim oranı	% 50
Tabaka sayısı	24
Her bir tabakanın kalınlığı	~ 0.2 - 0.5 mm
Reçine tipi	Epoksi
Demet sayısına göre filamentlerin sayısı	3K
Üretim yöntemi	Vakum torbalama

4.2. İŞLEME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE ÖN DENEYLERİN YAPILMASI

Deneysel çalışmalara başlamadan önce CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinebilirliği araştırılmıştır. CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin belirlenmesinde ön deneyler yapılmıştır. Literatür

araştırmasında, yüksek su basıncı, düşük ilerleme hızı, düşük nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında malzemede daha az hasar olduğu tespit edilmiştir. Ön deneyler max. 4000 bar su basıncına sahip ASJ tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön delme deneylerinde yüksek su basıncı altında az hasara rastlanmıştır. Bu sebeple deneyler; max. 5300 bar su basıncı uygulanabilen ASJ tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür çalışması sonucunda tespit edilen olumsuzluklar göz önünde bulundurularak bu çalışmada;

- Literatür araştırmasına göre ön deneyler yapıldı,
- Parametreler (dört seviyeli) seçildi,
- Taguchi ortogonal dizisi oluşturuldu,
- Deneyler gerçekleştirildi,
- Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ölçüldü,
- Delaminasyon faktörü (F_d) ölçüldü,
- Kerf açısı (T) ölçüldü,
- CMM ile dairesellik hatası ölçümü yapıldı,
- Veriler MS Excel programına aktarıldı,
- Minitab 17.0 paket programına veri girişi yapıldı,
- Taguchi ve Anova analizleri yapıldı,
- SEM görüntüleri alındı ve EDS ile element analizi gerçekleştirildi.

İşleme parametreleri, ASJ tezgâhı değişkenlerinden su basıncı (SB), nozul yaklaşma mesafesi (NYM), nozul ilerleme hızı (NİH) ve delik çapı (DÇ) olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.3). Deneylerde aşındırıcı akış oranı (350 g/dak), nozul çapı (0,80 mm) ve aşındırıcı türü (80 mesh garnet) sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.3. CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesi için belirlenen işleme parametreleri.

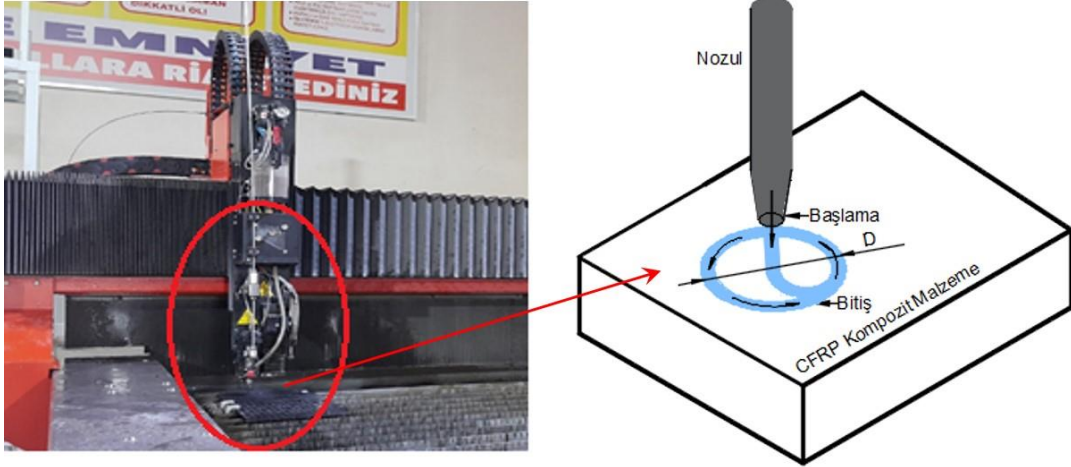
Sembol	Parametreler	Değerler
SB	Su basıncı (bar)	3600, 4300, 4800 ve 5300
NİH	Nozul ilerleme hızı (mm/dak)	750, 1500, 2000 ve 3000
NYM	Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	1, 2, 3 ve 4
DÇ	Delik çapları (mm)	8, 10, 12 ve 14

4.3. ASJ TEZGÂHI İLE DELME İŞLEMİ

Deney numunelerinin delme işlemleri Bystronic marka Byjet Flex 8030 model max. su basıncı 5300 bar olan 3 eksenli ASJ tezgâhında gerçekleştirilmiştir. ASJ tezgâhına ait teknik özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesinde nozul çapı (0,80 mm), aşındırıcı akış oranı (350 gr/dak), aşındırıcı türü ve boyutu (80 mesh garnet) sabit tutulmuştur. Delme işlemleri arasında karıştırma tüpünde biriken garnet aşındırıcının malzemeye zarar vermesini önlemek amacıyla delme işlemi 3 sn ertelemeli olarak delik merkezinden başlayıp gittikçe artarak yapılmak suretiyle hasarın minimuma indirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 4.2).

Çizelge 4.4. Bystronic marka Byjet Flex 8030 model ASJ tezgâhına ait teknik özellikler.

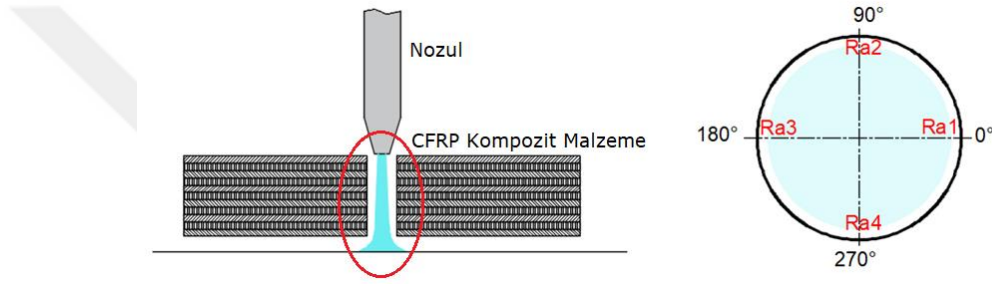
Özellik	Değer
Su basıncı (bar)	max. 5300
Orifis türü	Safir
Orifis çapı (mm)	0.28
Nozul uzunluğu (mm)	75
Çarpma açısı (°)	90



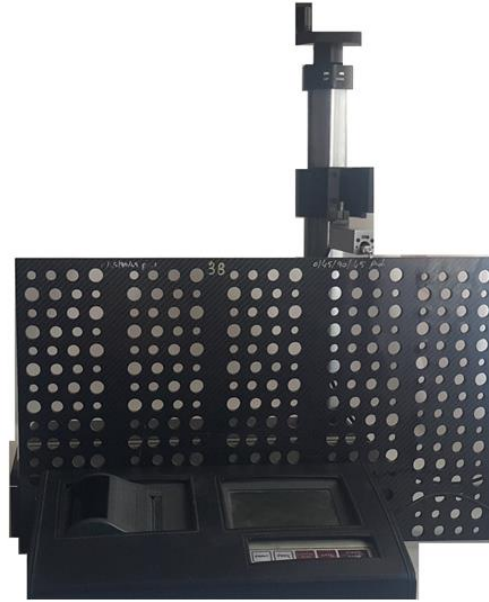
Şekil 4.2. Bystronic marka Byjet Flex 8030 model ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemenin delme anı görüntüsü.

4.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Delme deneyi sonrasında ölçümü yapılan ortalama yüzey pürüzlülüğü muayenesi ASTM A802 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınan bölgeler Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Her bir delik için, Mitutoyo marka SJ-410 model pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak 4 adet (Ra1, Ra2, Ra3 ve Ra4) ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.4). 4 ayrı bölgeden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak her bir delik için ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri tespit edilmiştir.



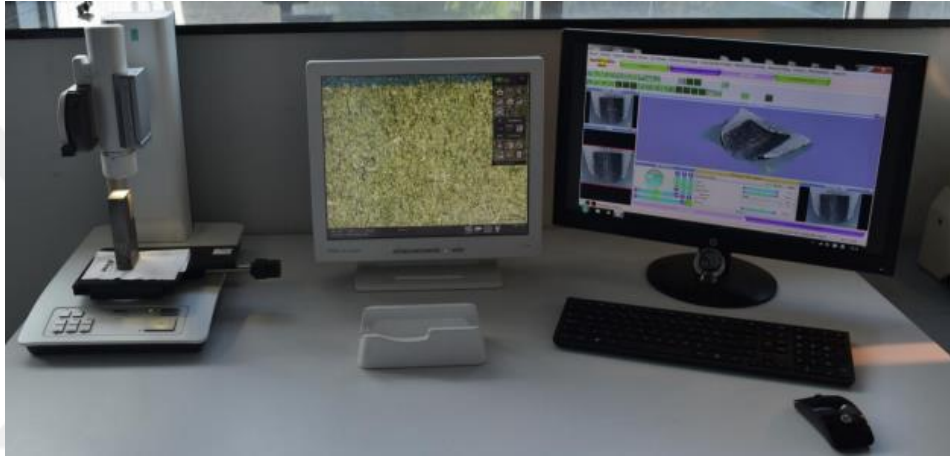
Şekil 4.3. Her bir delik için ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılan bölgelerin gösterimi.



Şekil 4.4. Mitutoyo marka SJ-410 model pürüzlülük ölçüm cihazı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümünün gösterimi.

4.5. DELAMİNASYON FAKTÖRÜ ÖLÇÜMÜ

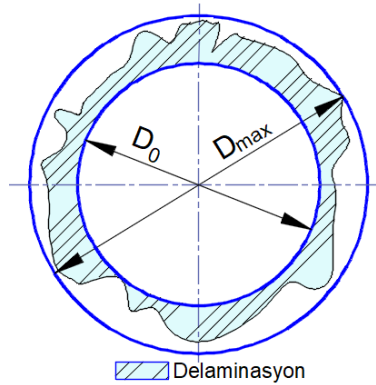
CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası malzemede oluşabilecek hasarı görebilmek için deliklerin mikro yapı görüntüleri 20x-400x arası büyütme sağlayabilen Nikon ShuttlePix mikroskop ile çekilmiştir (Şekil 4.5). Aşındırıcılı su jeti ile işlemenin yapısından kaynaklı tabaka giriş ve çıkışında oluşabilecek hasar miktarı farklı olabileceği için görüntüler tabaka girişi (üst) ve tabaka çıkışında (alt) olacak şekilde iki farklı yönden alınmıştır.



Şekil 4.5. Nikon ShuttlePix mikroskopun genel görünümü.

Delaminasyon faktörü (F_d), deliğin çevresindeki en büyük çap (D_{max}) ile delik çapı (D_0) arasındaki oran olarak belirtilmiş olup Eşitlik 4.1’de gösterilmiştir (Şekil 4.6).

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (4.1)$$

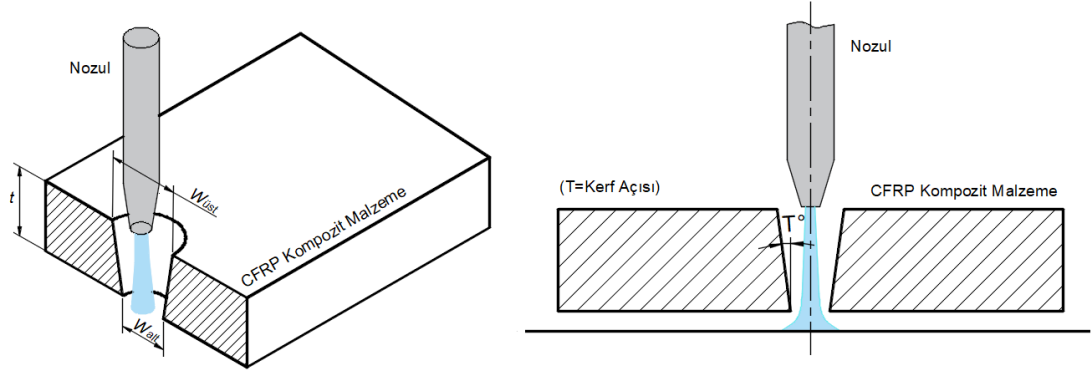


Şekil 4.6. Delaminasyon faktörünün gösterimi.

4.6. KERF AÇISI ÖLÇÜMÜ

ASJ ile delme işlemi esnasında yüksek basınçlı su ve aşındırıcıların malzeme içine girmesi ve sonrasında su basıncının malzeme içerisinde azalmaya başlamasıyla malzemede bir koniklik (kerf) oluşmaktadır. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası oluşan bu kerf açısı Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Üst kerf genişliği ($W_{üst}$) ve alt kerf genişliği (W_{alt}) 20x büyütülerek Nikon ShuttlePix mikroskop ile ölçülmüştür (Şekil 4.7).

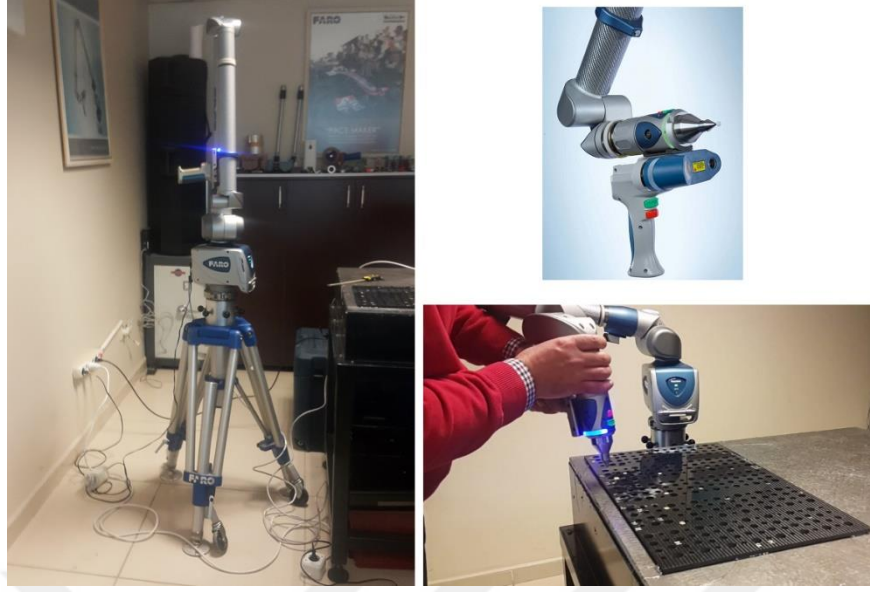
$$T = \arctan\left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{2.t}\right) \quad (4.2)$$



Şekil 4.7. ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemelerin delinme işlemi sonrasında kompozit malzemeler üzerinde oluşan kerf açısının gösterimi.

4.7. KOORDİNAT ÖLÇÜM MAKİNALARI (CMM, COORDINATE MEASURING MACHINES) İLE DELİK ÇAPINDA OLUŞAN DAİRESELLİK HATASININ ÖLÇÜMÜ

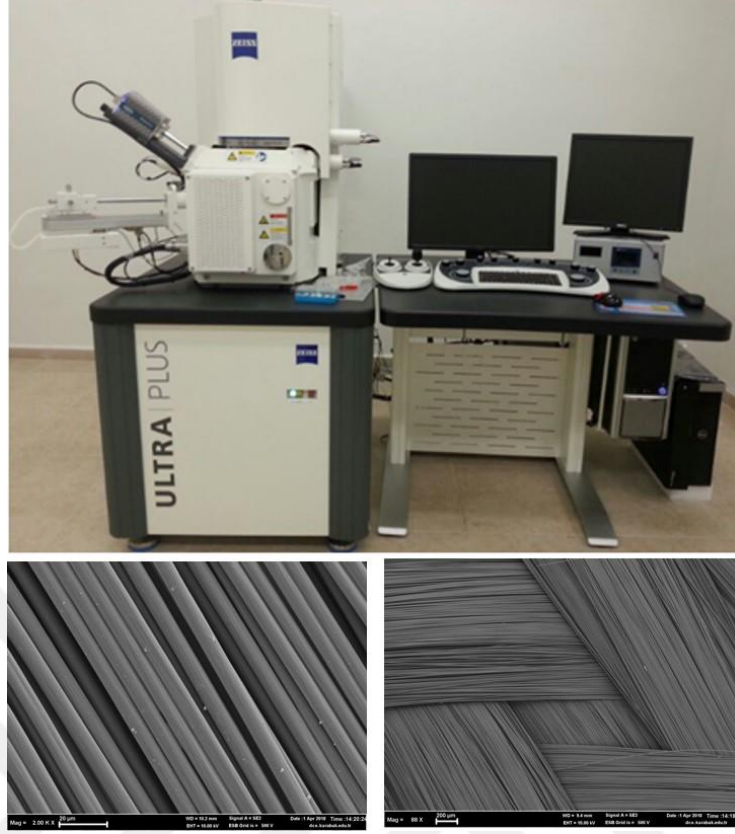
Koordinat ölçüm makinaları (CMM) ile ölçüm belli geometrilere sahip parçaların üretim veya montaj sonrası ölçü doğruluklarının kontrol edilmesi amacıyla kullanılmakta olup CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası ölçü doğrulukları Faro marka Edge model taşınabilir CMM cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. CFRP kompozit malzemelerin ASJ tezgâhı ile delme işlemi sonrası ölçü doğruluklarının Faro marka Edge model taşınabilir CMM ile ölçüm anı görüntüsü.

4.8. MİKRO YAPI GÖRÜNTÜLERİ

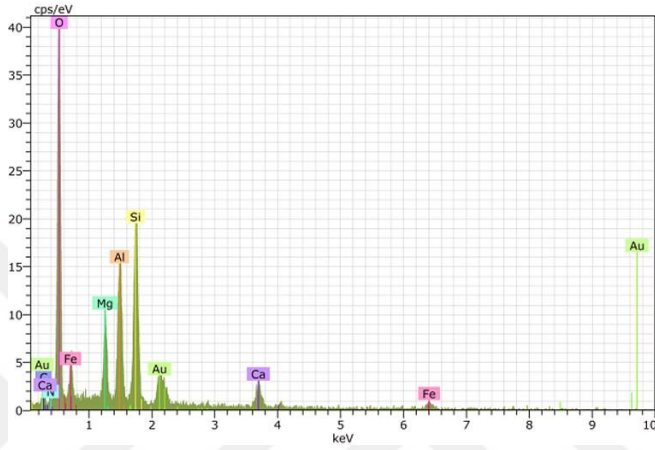
CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası malzeme içine girmesi muhtemel aşındırıcı parçacıkların etkisini görebilmek için deliklerin mikro yapı görüntüleri çekilmiştir. Delik içlerinin mikro yapı görüntüleri Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM (Scanning Electron Microscope, taramalı elektron mikroskop) cihazında çekilmiştir. Mikro yapı görüntülerinin çekildiği SEM cihazı Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü.

4.9. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROMETRE (EDS)

ASJ ile delinen CFRP kompozit malzemelerin içerisine saplanan aşındırıcı partiküllerin element tanımlaması ve dağılımı enerji dağılımlı x-ışınları analizi (EDS/ Energy-dispersive X-ray spectroscopy) Carl Zeiss Ultra Plus Fesem marka cihaz ile yapılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü.

4.10. TAGUCHI DENEYSEL TASARIM YAKLAŞIMI

Taguchi deneysel tasarım yaklaşımında işleme parametrelerinin optimizasyonu; maliyeti arttırmadan yüksek kalite elde etmek amacıyla yapılmaktadır. Bu yöntemde, deneyleri tasarlamak ve yürütmek için mümkün olan en az tekrarla önemli verilerin toplanabileceği ortogonal diziler oluşturulmaktadır. Taguchi yönteminde nominal en iyidir, daha küçük iyidir ve daha büyük iyidir şeklinde kalite değerleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, en iyi delaminasyon faktörü (F_d), kerf açısı (T), dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için minimum değer alınmış olup daha iyi ürün kalitesi ve en düşük maliyet için en uygun olan S/N oranını hesaplamak için "daha küçük daha iyidir" seçilmiştir (Eşitlik 4.3) [148].

$$\text{Daha küçük daha iyidir (Smaller is better): } S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4.3)$$

4.10.1. Kontrol Faktörleri ve Ortogonal Dizi

Optimum delme parametrelerini belirlemek ve belirlenen delme parametrelerinin delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerini analiz etmek için en uygun ortogonal dizi olan $L_{16} (4^4)$ seçilmiştir. Seçilen ortogonal dizi için kullanılan delme parametreleri ve bunların 16 kombinasyonu Çizelge 4.5'te gösterildiği gibi uygulanmıştır. ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemeleri delme esnasında kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Ortogonal dizi $L_{16} (4^4)$.

Deney sayısı	Delme parametreleri ve seviyeleri			
	A	B	C	D
	Su basıncı	Nozul ilerleme hızı	Nozul yaklaşma mesafesi	Delik çapı
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Çizelge 4.6. ASJ tezgâhı ile CFRP kompozit malzemeleri delme esnasında kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Parametreler	Seviye1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	P, Su basıncı (bar)	3600	4300	4800	5300
B	f, Nozul ilerleme hızı (mm/dak)	750	1500	2000	3000
C	L, Nozul yaklaşma mesafesi (mm)	1	2	3	4
D	D, Delik çapları (mm)	8	10	12	14

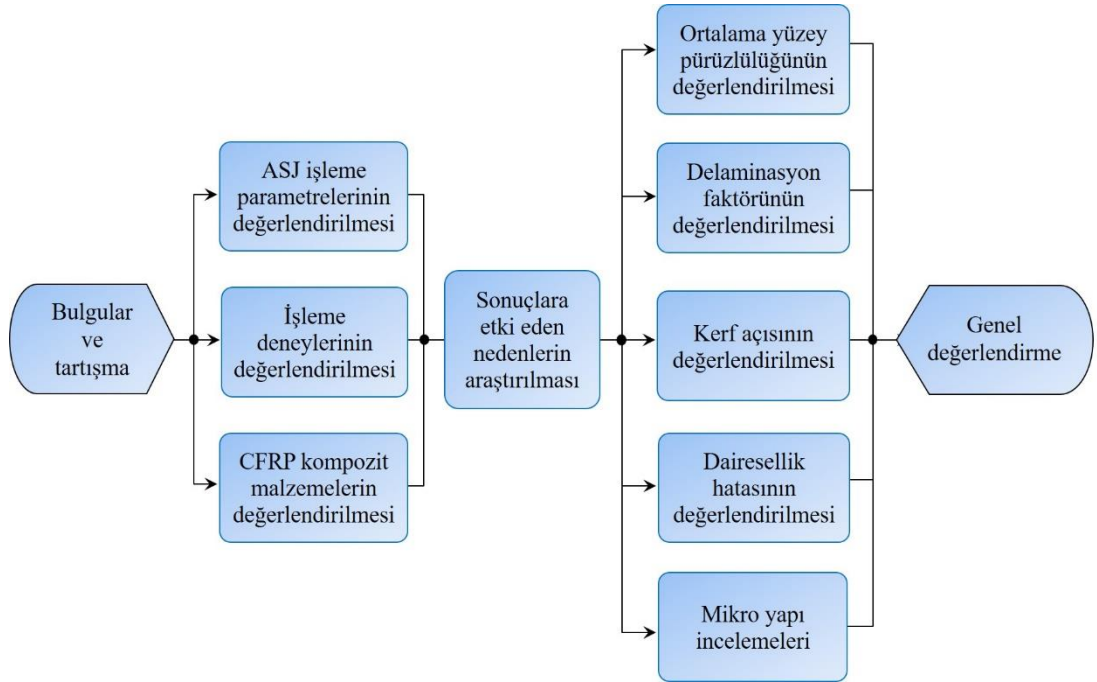
4.11. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, nozul ilerleme hızı ve delik çapıdır. Bu faktörlerden hangilerinin delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinde etki derecelerinin sıralamaları ve faktörlerin etki yüzdeleri belirlenmiştir. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası işleme parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini belirlemek için Varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Analiz, % 5 anlamlılık seviyesi ve % 95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin etki derecelerinin sıralaması ve faktörlerin etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizleri Minitab 17 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

Üç farklı ($[0^\circ/90^\circ]_s$, $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ ve $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$) fiber oryantasyon açısında (FOA) üretilmiş olan altı adet CFRP kompozit malzemenin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) ASJ ile delinebilirliğinin ve kesilebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada; CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesinde işleme performansına etki eden parametreler araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan delme işlemi sonucunda, malzemelerin giriş (üst) ve çıkışında (alt) oluşan delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası, ortalama yüzey pürüzlülüğü, mikro yapı görüntüleri ve EDS analizleri incelenerek işleme parametreleri (su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, nozul ilerleme hızı ve delik çapı) optimize edilmiştir. İşleme performanslarını etkileyen parametreler ANOVA testi ile analiz edilerek en etkili işleme parametreleri tespit edilmiştir. Bulgular ve tartışma bölümünün akış şeması Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Bulgular ve tartışma bölümünün akış şeması.

5.1. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK DELAMİNASYON FAKTÖRÜNDEKİ DEĞİŞİM

5.1.1. İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Tabaka Girişinde (Üst) Oluşan Delaminasyon Faktöründeki Değişim

CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapında (8, 10, 12 ve 14 mm) ASJ ile delinmesi sonucu tabaka girişinde (üst) oluşan delaminasyon faktörü (F_d) değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında oluşan delaminasyon faktörü (üst) değerleri.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CFRP Kompozit Malzemeler					
	A	B	C	D	M1	M2	M3	M1pd	M2pd	M3pd
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)	F_d (üst)	F_d (üst)	F_d (üst)	F_d (üst)	F_d (üst)	F_d (üst)
1	3600	750	1	8	1,245	1,283	1,170	1,182	1,194	1,166
2	3600	1500	2	10	1,247	1,294	1,184	1,192	1,218	1,168
3	3600	2000	3	12	1,264	1,431	1,206	1,199	1,304	1,169
4	3600	3000	4	14	1,383	1,572	1,306	1,265	1,343	1,177
5	4300	750	2	12	1,203	1,258	1,165	1,157	1,164	1,125
6	4300	1500	1	14	1,193	1,219	1,157	1,150	1,155	1,121
7	4300	2000	4	8	1,219	1,269	1,166	1,181	1,182	1,165
8	4300	3000	3	10	1,209	1,264	1,165	1,163	1,172	1,147
9	4800	750	3	14	1,142	1,203	1,123	1,136	1,119	1,101
10	4800	1500	4	12	1,166	1,204	1,140	1,140	1,153	1,118
11	4800	2000	1	10	1,116	1,167	1,096	1,111	1,091	1,085
12	4800	3000	2	8	1,137	1,192	1,114	1,127	1,109	1,096
13	5300	750	4	10	1,107	1,138	1,085	1,106	1,087	1,083
14	5300	1500	3	8	1,132	1,171	1,101	1,120	1,104	1,087
15	5300	2000	2	14	1,105	1,133	1,081	1,082	1,084	1,061
16	5300	3000	1	12	1,091	1,130	1,080	1,071	1,083	1,050

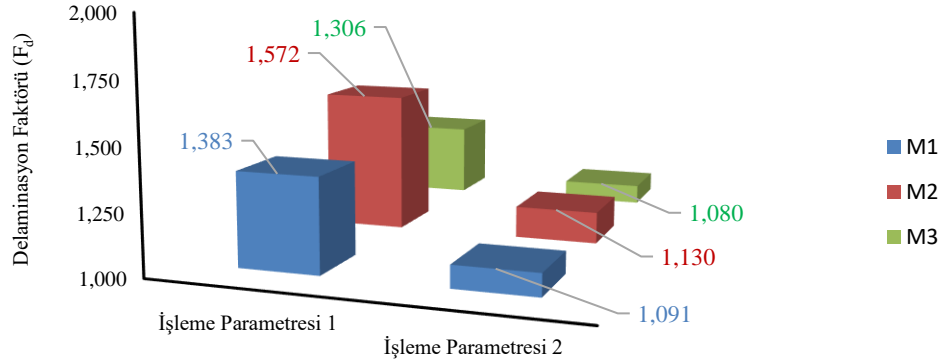
Çizelge 5.1'deki veriler incelendiğinde; tüm malzemeler için tabakanın üst tarafında meydana gelen en yüksek delaminasyon faktörü (üst) 1,572 değeri ile M2 malzemesinde elde edilirken en düşük delaminasyon faktörü (üst) 1,050 değeri ile M3pd malzemesinde elde edilmiştir. M1 malzemesi için 1,383 değerindeki en yüksek delaminasyon faktörü (üst), 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilirken, 1,091 değerindeki en düşük delaminasyon faktörü (üst) 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilmiştir. Bu durum, diğer parametrelere bakılmaksızın nozul yaklaşma mesafesindeki 4 kat azalmayla birlikte su basıncındaki % 47,22 oranında artışın delaminasyon faktöründe (üst) % 21,11 oranında iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 5.2). Aynı parametreler ile elde edilen delaminasyon faktöründeki (üst) bu iyileşme; M2 malzemesi için % 28,12 ve M3 malzemesi için % 17,30 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Bu değerler, su basıncının ve nozul yaklaşma mesafesinin tabakanın üst tarafında oluşan delaminasyon faktörü üzerindeki etkisini göstermektedir. Su basıncının artması ve nozul yaklaşma mesafesinin azalmasıyla birlikte tabakanın üst tarafında oluşan delaminasyon faktöründe azalma gözlenmiştir.

Çizelge 5.2. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi 1 (F _d) (üst)	İşleme Parametresi 2 (F _d) (üst)	Fark	% (iyileşme)
M1	1,383	1,091	0,292	21,11
M2	1,572	1,130	0,442	28,11
M3	1,306	1,080	0,226	17,30

İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm

İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm



İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm
 İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm

Şekil 5.2. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki değişim grafiği.

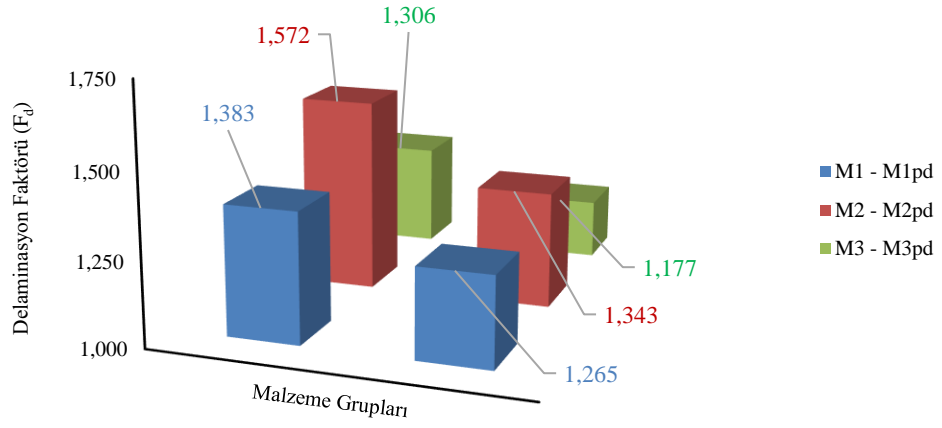
CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametrelerinde ASJ ile delinmesi sonucu oluşabilecek hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalardan elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki iyileşme sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki iyileşme sonuçları.

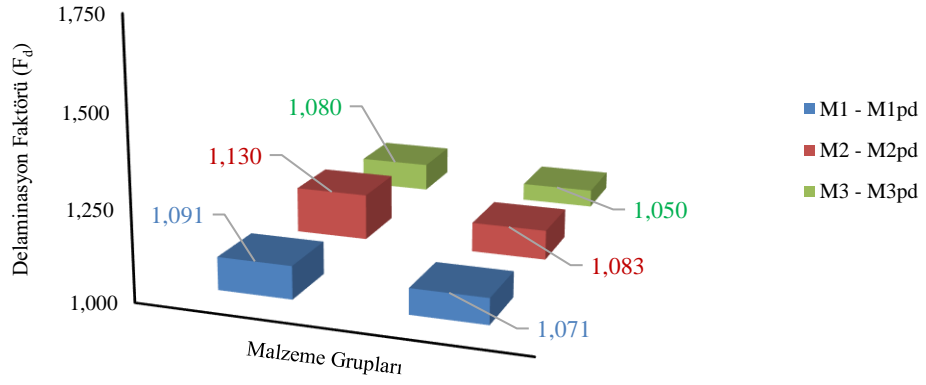
Malzemeler	İşleme Parametresi	Düz tabakalar (F _d) (üst)	Pilot delikli tabakalar (F _d) (üst)	Fark	% (iyileşme)
M1-M1pd	P=3600 bar f=3000 mm/dak L=4 mm D=14 mm	1,383	1,265	0,118	8,53
M2-M2pd		1,572	1,343	0,229	14,57
M3-M3pd		1,306	1,177	0,129	9,88
M1-M1pd	P=5300 bar f=3000 mm/dak L=1 mm D=12 mm	1,091	1,071	0,020	1,83
M2-M2pd		1,130	1,083	0,047	4,16
M3-M3pd		1,080	1,050	0,030	2,78

P=Su basıncı, f=Nozul ilerleme hızı, L=Nozul yaklaşma mesafesi, D=Delik çapı.

ASJ ile delme işleminde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek muhtemel hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalarda da delaminasyon faktörünün (üst) iyileştiği görülmektedir (Şekil 5.3). M1 malzemesi için, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (üst) 1,383 iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (üst) 1,265 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,118 değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır (Çizelge 5.3). Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,229 ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,129 değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.3a). M1 malzemesi için, 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (üst) 1,091 iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (üst) 1,071 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,020 değerinde az miktarda da olsa iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,047 ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,030 değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.3b). Delaminasyon faktörünün (üst) minimum değere indirgenmesi için pilot deliklerin açılmıştır. Pilot deliklerin açılması sonucu elde edilen iyileşmenin, ASJ ile delme işlemleri arasında karıştırma tüpünde biriken garnet aşındırıcının malzemeye zarar vermesini önlemek amacıyla delme işleminin 3 sn ertelemeli olarak delik merkezinden başlayıp gittikçe artarak yapılmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



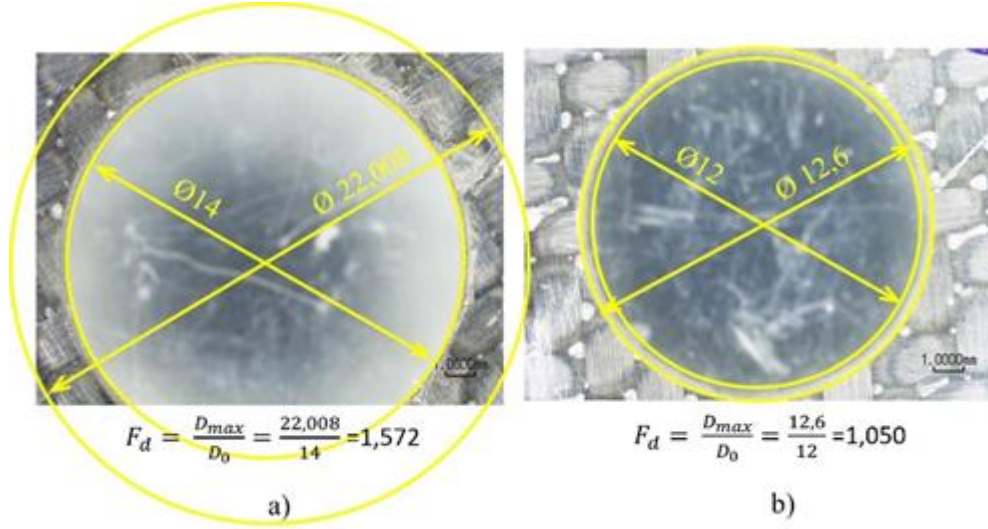
a)



b)

Şekil 5.3. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri.

Yapılan deneylerde, CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan delaminasyon faktörünün etkisini görebilmek için deliklerin mikro yapı görüntüleri alınmıştır. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (üst) değerlerine sahip delik yüzeylerinin mikroskobik görüntüleri Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu tabakanın üst kısmında oluşan en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü değerlerine sahip deliklerin mikroskopik görüntüleri a) M2 malzemesi (P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm) b) M3pd malzemesi (P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm).

Şekil 5.4'teki mikroskopik görüntülerde deliklerde oluşan delaminasyon faktörü (üst) görülmektedir. Tabakanın üst tarafında oluşan en yüksek delaminasyon faktörü değeri M2 malzemesinde 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 14 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.4a). En düşük delaminasyon faktörü değeri ise; M3pd malzemesinde 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 12 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.4b).

Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için elde edilen S/N oranı tepki tabloları Çizelge 5.4'te verilmiştir. Deneysel çalışmada, delaminasyon faktörü (üst) değerlerinin aritmetik ortalaması 1,185 olarak ölçülmüş olup delaminasyon faktörü (üst) değerleri için S/N oranının aritmetik ortalaması -1,457 dB olarak elde edilmiştir.

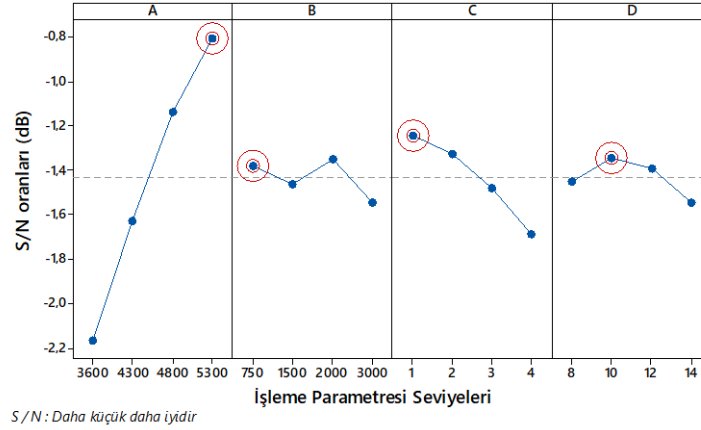
Çizelge 5.4. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (üst) (F _d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,245	-1,900
2	3600	1500	2	10	1,247	-1,914
3	3600	2000	3	12	1,264	-2,037
4	3600	3000	4	14	1,383	-2,814
5	4300	750	2	12	1,203	-1,603
6	4300	1500	1	14	1,193	-1,536
7	4300	2000	4	8	1,219	-1,723
8	4300	3000	3	10	1,209	-1,651
9	4800	750	3	14	1,142	-1,151
10	4800	1500	4	12	1,166	-1,331
11	4800	2000	1	10	1,116	-0,950
12	4800	3000	2	8	1,137	-1,113
13	5300	750	4	10	1,107	-0,883
14	5300	1500	3	8	1,132	-1,076
15	5300	2000	2	14	1,105	-0,867
16	5300	3000	1	12	1,091	-0,756

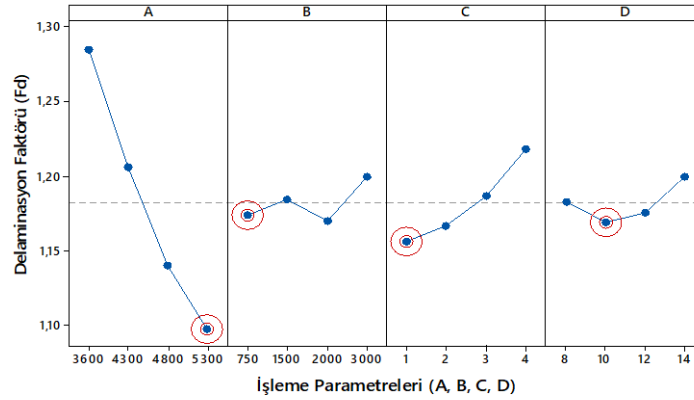
Her bir işleme parametresinin (A, B, C ve D) delaminasyon faktörüne (üst) etkisi, sinyal/gürültü oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan işleme parametrelerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur. Delaminasyon faktörü (üst) için işleme parametrelerinin belirlenen seviyeleri Çizelge 5.5'te verilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Tabakanın üst tarafında meydana gelen delaminasyon faktörü için optimum seviye, A4B1C1D2 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.5b).

Çizelge 5.5. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-2,166	-1,384	-1,286	-1,453
2	-1,628	-1,464	-1,374	-1,349
3	-1,136	-1,394	-1,479	-1,432
4	-0,896	-1,584	-1,688	-1,592
Delta	1,271	0,200	0,402	0,243
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,284	1,174	1,161	1,183
2	1,206	1,184	1,173	1,170
3	1,140	1,176	1,187	1,181
4	1,109	1,205	1,219	1,206
Delta	0,176	0,031	0,057	0,036
Rank	1	4	2	3



a)



b)

Şekil 5.5. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

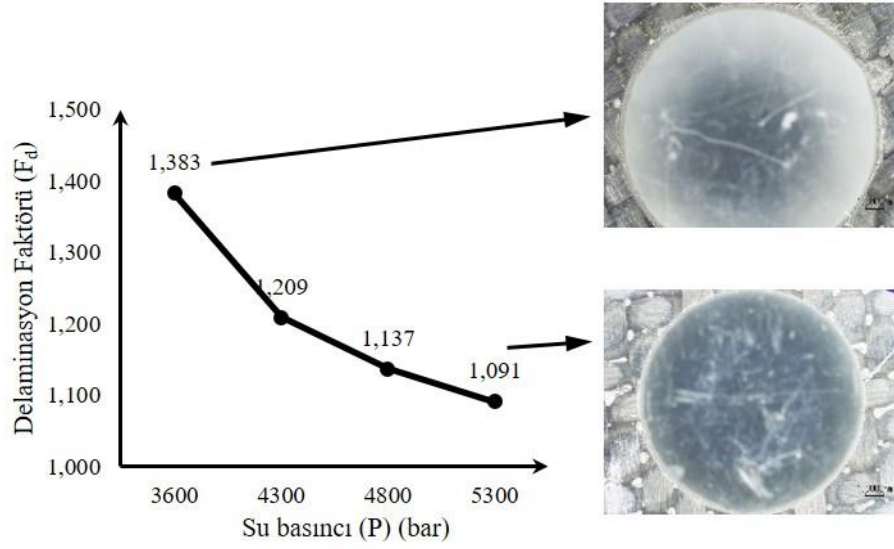
Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörü (üst) üzerindeki etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda delaminasyon faktörü (üst) için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Çizelge 5.6'da gösterildiği gibi, A, B, C ve D işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) olan katkı yüzdeleri sırasıyla % 82,39, % 2,71, % 8,40 ve % 3,10 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, delaminasyon faktörü (üst) üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, delik çapı ve nozul ilerleme hızı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.6. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0728	0,0243	24,21	0,013	82,39
B	3	0,0024	0,0008	0,8	0,572	2,71
C	3	0,0074	0,0025	2,47	0,239	8,40
D	3	0,0027	0,0009	0,91	0,530	3,10
Hata	3	0,0030	0,0010	-	-	3,40
Toplam	15	0,0884	-	-	-	100

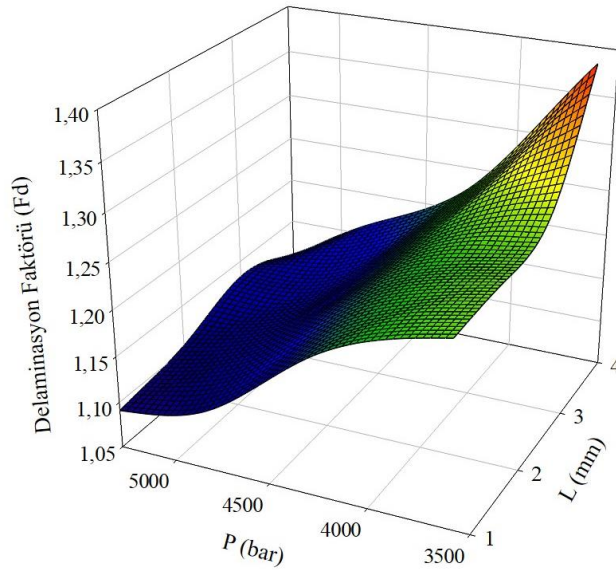
S = 0,032 R-Sq = % 96,60 R-Sq (adj) = % 82,99

M1 malzemesi için farklı delik çaplarında gerçekleştirilen delme işlemi sonucu tabakanın üst kısmındaki en düşük delaminasyon faktörü değeri (1,091), yüksek su basıncı (5300 bar) ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde (1 mm) tespit edilmiştir (Şekil 5.6). En yüksek delaminasyon faktörü değeri (1,383) ise; düşük su basıncı (3600 bar) ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde (4 mm) elde edilmiştir.



Şekil 5.6. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.

M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sonrasında işleme parametrelerinden su basıncı ve nozul yaklaşma mesafesinin (ANOVA analizinden elde edilen en etkili parametreler) delaminasyon faktörü (üst) değerlerini belirlemek için yüzey grafik analizi yapılmıştır. Yapılan yüzey grafik analizi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. M1 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Şekil 5.7'deki yüzey grafiği incelendiğinde; M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en düşük delaminasyon faktörü (üst) değeri elde edilirken, düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en yüksek delaminasyon faktörü (üst) değerinin elde edildiği görülmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin tabakanın üst kısmında oluşan delaminasyon faktörü için deney sonuçları (sinyal/gürültü (S/N) oranı, S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu, işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne etkisi, ANOVA analizi ve yüzey grafikleri) ise; Ek Açıklamalar A.'da verilmiştir.

5.1.2. İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Tabaka Çıkışında (Alt) Oluşan Delaminasyon Faktöründeki Değişim

CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapında (8, 10, 12 ve 14 mm) ASJ ile delinmesi sonucu tabaka çıkışında (alt) oluşan delaminasyon faktörü (F_d) değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında oluşan delaminasyon faktörü (alt) değerleri.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CFRP Kompozit Malzemeler					
	A	B	C	D	M1	M2	M3	M1pd	M2pd	M3pd
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)	Fd (alt)	Fd (alt)	Fd (alt)	Fd (alt)	Fd (alt)	Fd (alt)
1	3600	750	1	8	1,146	1,148	1,145	1,138	1,136	1,123
2	3600	1500	2	10	1,162	1,157	1,163	1,147	1,152	1,128
3	3600	2000	3	12	1,223	1,315	1,230	1,167	1,161	1,134
4	3600	3000	4	14	1,241	1,380	1,243	1,169	1,166	1,138
5	4300	750	2	12	1,125	1,126	1,136	1,118	1,118	1,115
6	4300	1500	1	14	1,124	1,114	1,128	1,103	1,106	1,115
7	4300	2000	4	8	1,142	1,143	1,139	1,135	1,136	1,121
8	4300	3000	3	10	1,135	1,133	1,137	1,118	1,125	1,119
9	4800	750	3	14	1,099	1,097	1,106	1,087	1,095	1,078
10	4800	1500	4	12	1,120	1,105	1,107	1,088	1,100	1,112
11	4800	2000	1	10	1,081	1,080	1,076	1,067	1,071	1,076
12	4800	3000	2	8	1,097	1,091	1,080	1,086	1,086	1,076
13	5300	750	4	10	1,081	1,068	1,075	1,061	1,061	1,076
14	5300	1500	3	8	1,088	1,084	1,080	1,075	1,083	1,076
15	5300	2000	2	14	1,075	1,037	1,069	1,056	1,033	1,059
16	5300	3000	1	12	1,055	1,029	1,058	1,039	1,021	1,028

Çizelge 5.7’deki veriler incelendiğinde; tüm malzemeler için tabakanın alt tarafında meydana gelen en yüksek delaminasyon faktörü (alt) 1,380 değeri ile M2 malzemesinde elde edilirken; en düşük delaminasyon faktörü (alt) 1,021 değeri ile M2pd malzemesinde elde edilmiştir. M1 malzemesi için 1,241 değerindeki en yüksek delaminasyon faktörü (alt) 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilirken; 1,055 değerindeki delaminasyon faktörü (alt) 5300 bar su basıncı, 3000

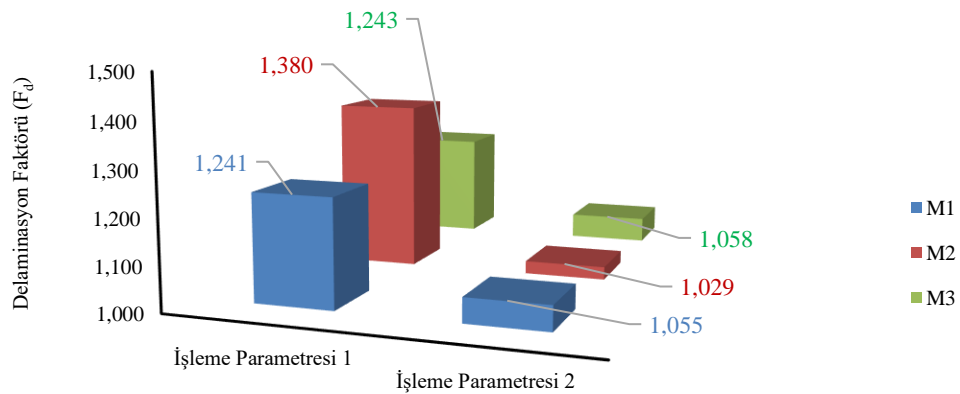
mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilmiştir. Bu durum, diğer parametrelere bakılmaksızın nozul yaklaşma mesafesindeki 4 kat azalmayla birlikte su basıncındaki % 47,22 oranında artışın delaminasyon faktöründe (alt) % 14,99 oranında iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 5.8). Aynı parametreler ile elde edilen delaminasyon faktöründeki bu iyileşme; M2 malzemesi için % 25,43 ve M3 malzemesi için % 14,88 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.8). Bu değerler, su basıncının ve nozul yaklaşma mesafesinin delaminasyon faktörü üzerindeki etkisini göstermektedir. Su basıncının artması ve nozul yaklaşma mesafesinin azalmasıyla birlikte delaminasyon faktöründe azalma gözlenmiştir.

Çizelge 5.8. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi 1 (F _d) (alt)	İşleme Parametresi 2 (F _d) (alt)	Fark	% (iyileşme)
M1	1,241	1,055	0,186	14,99
M2	1,380	1,029	0,351	25,43
M3	1,243	1,058	0,185	14,88

İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm

İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm



İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm

İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm

Şekil 5.8. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki değişim grafiği.

CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametrelerinde ASJ ile delinmesi sonucu oluşabilecek hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalardan elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki iyileşme sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir.

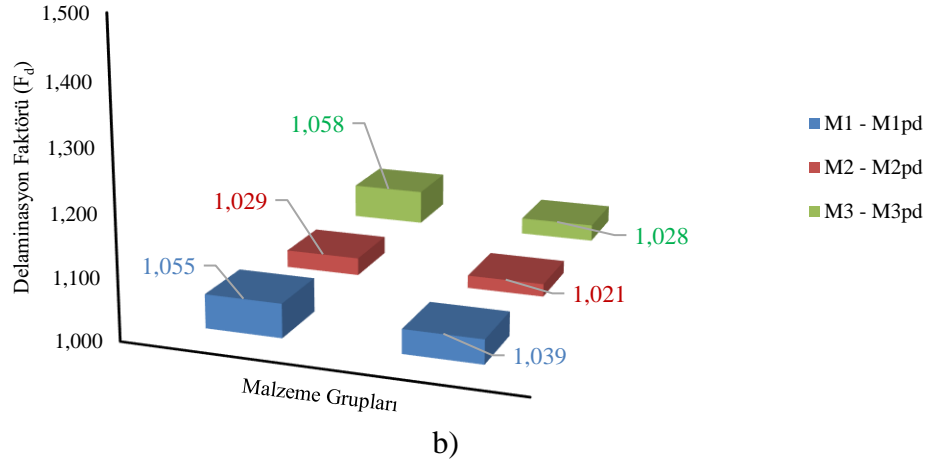
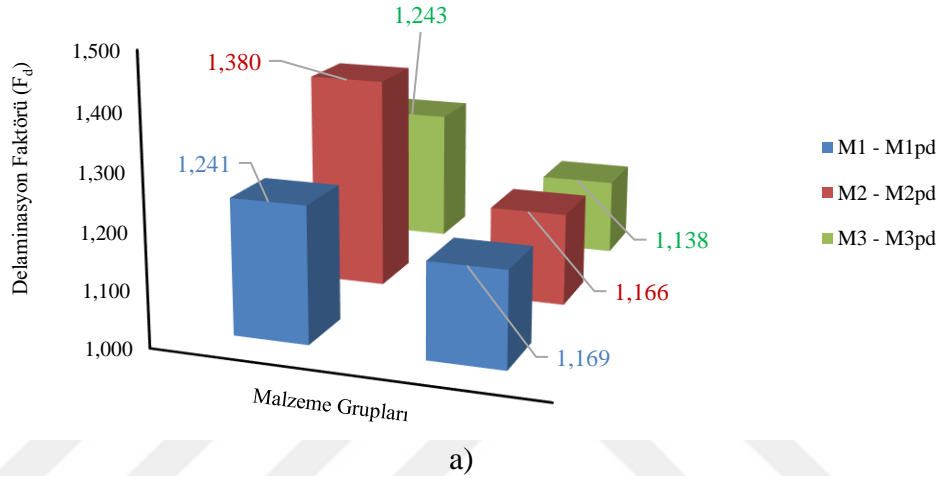
Çizelge 5.9. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi	Düz tabakalar (F _a) (alt)	Pilot delikli tabakalar (F _a) (alt)	Fark	% (iyileşme)
M1-M1pd	P=3600 bar	1,241	1,169	0,072	5,80
M2-M2pd	f=3000 mm/dak	1,380	1,166	0,214	15,51
M3-M3pd	L=4 mm D=14 mm	1,243	1,138	0,105	8,45
M1-M1pd	P=5300 bar	1,055	1,039	0,016	1,52
M2-M2pd	f=3000 mm/dak	1,029	1,021	0,008	0,78
M3-M3pd	L=1 mm D=12 mm	1,058	1,028	0,030	2,84

P=Su basıncı, f=Nozul ilerleme hızı, L=Nozul yaklaşma mesafesi, D=Delik çapı.

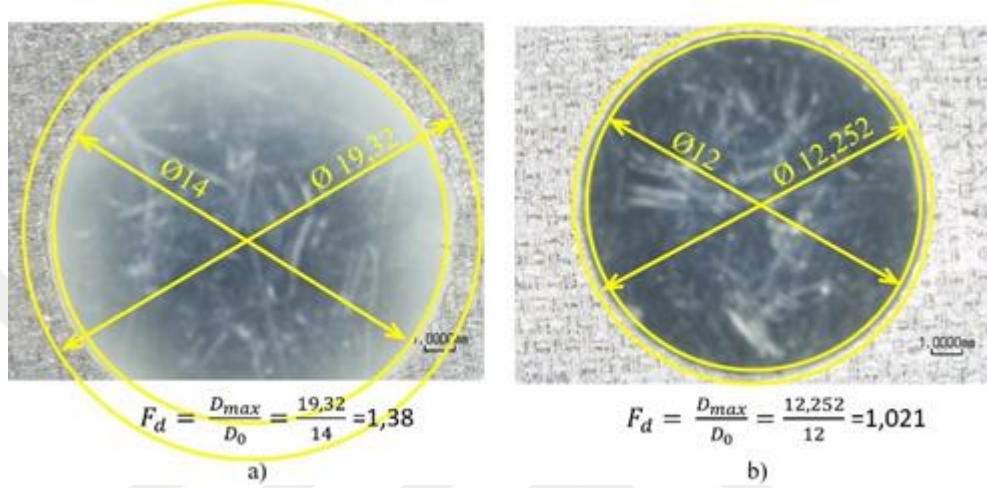
ASJ ile delme işleminde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek muhtemel hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalarda da delaminasyon faktörünün (alt) iyileştiği görülmüştür (Şekil 5.9). M1 malzemesi için, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değeri 1,241 iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değeri 1,169 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,072 değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,214 ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,105 değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.9a). M1 malzemesi için, 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (alt) 1,055 iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü (alt) 1,039 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,016 değerinde az miktarda da olsa iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,008 ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla

0,030 değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.9b). Delaminasyon faktörünün (alt) minimum değere indirgenmesi için pilot deliklerin açılmıştır. Pilot deliklerin açılması sonucu elde edilen iyileşmenin, ASJ ile delme işlemleri arasında karıştırma tüpünde biriken garnet aşındırıcının malzemeye zarar vermesini önlemek amacıyla delme işleminin 3 sn ertelemeli olarak delik merkezinden başlayıp gittikçe artarak yapılmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.9. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen delaminasyon faktörü değerleri.

Şekil 5.9'daki grafik incelendiğinde; su basıncının artmasıyla tabakanın alt kısmında oluşan delaminasyon faktörü değerlerinde azalma görülmüştür. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerine sahip delik yüzeylerinin mikroskopik görüntüleri Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu oluşan en yüksek ve en düşük delaminasyon faktörü (alt) değerlerine sahip deliklerin mikroskopik görüntüleri a) M2 malzemesi (P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm) b) M2pd malzemesi (P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm).

Şekil 5.10'daki mikroskopik görüntülerde deliklerde oluşan delaminasyon faktörü (alt) görülmektedir. Tabakanın alt kısmında oluşan en yüksek delaminasyon faktörü M2 malzemesinde 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 14 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.10a). En düşük delaminasyon faktörü ise; M2pd malzemesinde 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 12 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.10b).

Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin tabakanın alt kısmında delaminasyon faktörü için elde edilen S/N oranı tepki tabloları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Deneysel çalışmada, tabakanın alt kısmındaki delaminasyon hasarlarının aritmetik ortalaması 1,125 olarak ölçülmüş olup tabakanın alt kısmındaki delaminasyon hasarları için S/N oranının aritmetik ortalaması -1,012 dB olarak elde edilmiştir.

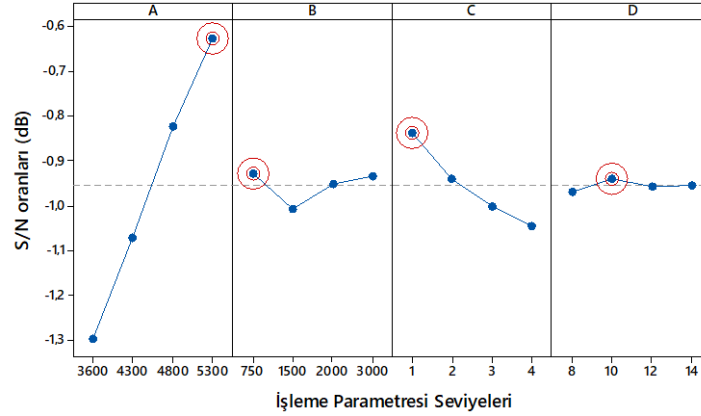
Çizelge 5.10. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (Fd)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,146	-1,184
2	3600	1500	2	10	1,162	-1,304
3	3600	2000	3	12	1,223	-1,749
4	3600	3000	4	14	1,241	-1,875
5	4300	750	2	12	1,125	-1,023
6	4300	1500	1	14	1,124	-1,015
7	4300	2000	4	8	1,142	-1,153
8	4300	3000	3	10	1,135	-1,100
9	4800	750	3	14	1,099	-0,820
10	4800	1500	4	12	1,120	-0,984
11	4800	2000	1	10	1,081	-0,677
12	4800	3000	2	8	1,097	-0,804
13	5300	750	4	10	1,081	-0,677
14	5300	1500	3	8	1,088	-0,733
15	5300	2000	2	14	1,075	-0,628
16	5300	3000	1	12	1,055	-0,465

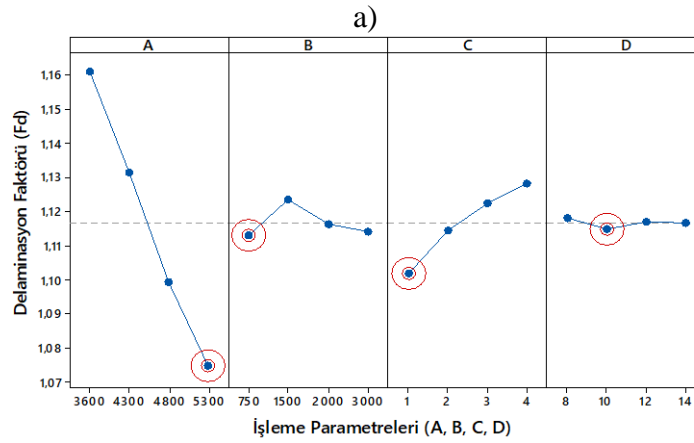
Her bir işleme parametresinin (A, B, C ve D) tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörüne etkisi, sinyal/gürültü oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan işleme parametrelerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur. Tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü için işleme parametrelerinin belirlenen seviyeleri Çizelge 5.11'de verilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü için optimum seviye, A4B1C1D2 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.11b).

Çizelge 5.11. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değerinin S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,528	-0,926	-0,835	-0,968
2	-1,073	-1,009	-0,940	-0,939
3	-0,821	-1,052	-1,100	-1,055
4	-0,626	-1,061	-1,172	-1,085
Delta	0,902	0,135	0,337	0,146
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,193	1,113	1,101	1,118
2	1,132	1,123	1,115	1,115
3	1,099	1,130	1,136	1,131
4	1,075	1,132	1,146	1,135
Delta	0,118	0,019	0,044	0,020
Rank	1	4	2	3



S/N : Daha küçük daha iyidir



b)

Şekil 5.11. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

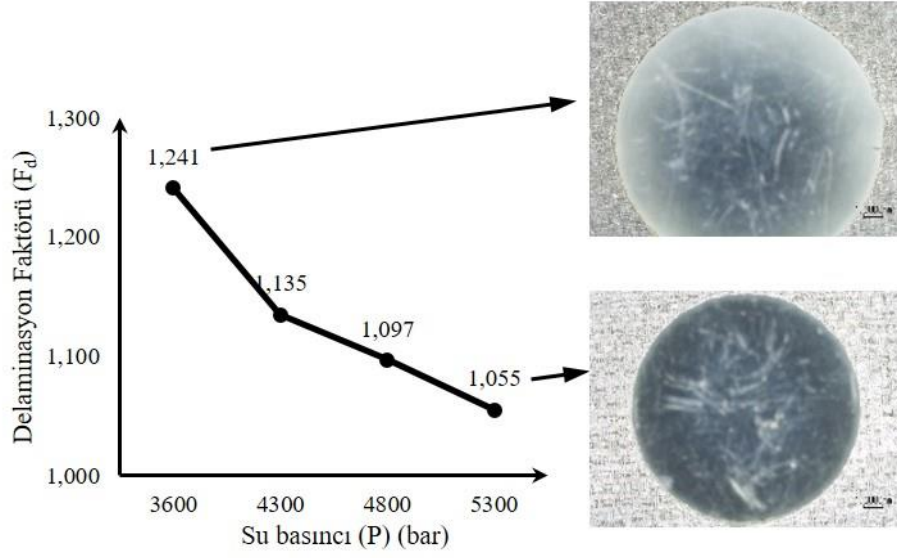
Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin işleme parametrelerinin tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda delaminasyon faktörü (alt) için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 5.12'de gösterilmiştir. Çizelge 5.12'de gösterildiği gibi, A, B, C ve D işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) olan katkı yüzdeleri sırasıyla % 79,77, % 2,32, % 12,43 ve % 2,83 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, delik çapı ve nozul ilerleme hızı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.12. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0314	0,0105	30,06	0,010	79,77
B	3	0,0009	0,0003	0,87	0,543	2,32
C	3	0,0049	0,0016	4,69	0,118	12,43
D	3	0,0011	0,0004	1,06	0,480	2,83
Hata	3	0,0010	0,0003	-	-	2,65
Toplam	15	0,0394	-	-	-	100

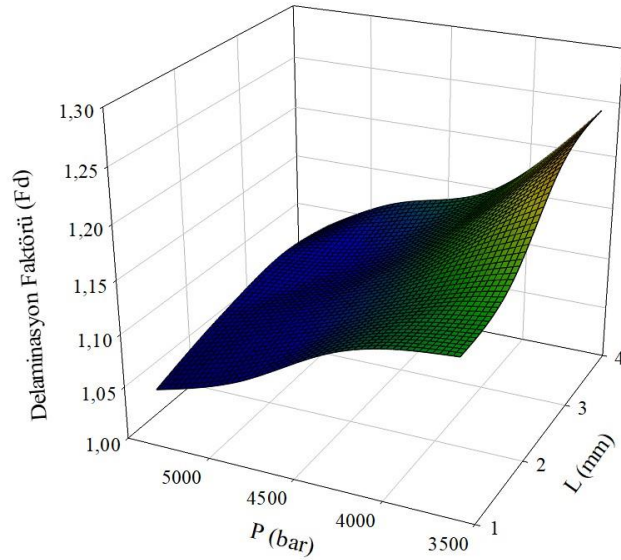
S = 0,019 R-Sq = % 97,35 R-Sq (adj) = % 86,73

M1 malzemesi için farklı delik çaplarında gerçekleştirilen delme işlemi sonucu tabakanın alt kısmındaki en düşük delaminasyon faktörü değeri (1,055), yüksek su basıncı (5300 bar) ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde (1 mm) tespit edilmiştir (Şekil 5.12). En yüksek delaminasyon faktörü değeri (1,241) ise; düşük su basıncı (3600 bar) ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde (4 mm) elde edilmiştir.



Şekil 5.12. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen delaminasyon faktörü (alt) değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.

M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında işleme parametrelerinin tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü değerlerini belirlemek için yüzey grafik analizi yapılmıştır. Yapılan yüzey grafik analizi Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. M1 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

Şekil 5.13'teki yüzey grafiği incelendiğinde; M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en düşük delaminasyon faktörü (alt) değeri elde edilirken, düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en yüksek delaminasyon faktörü (alt) değerinin elde edildiği görülmektedir.

CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucunda işleme parametrelerine bağlı olarak tabaka girişinde (üst) ve tabaka çıkışında (alt) elde edilen delaminasyon faktörü değerine genel olarak bakılacak olursa; bütün malzemeler için tabaka girişinde (üst) elde edilen delaminasyon faktörü değerinin tabaka çıkışına (alt) göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü 1,572 iken tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü 1,380 olarak elde edilmiştir. Bu durum, tabaka çıkışında (alt) tabaka girişine (üst) göre % 12,21 oranında bir azalma gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü ise; 1,050 iken tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü 1,021 olarak elde edilmiştir. Bu durum, tabaka çıkışında (alt) tabaka girişine (üst) göre % 2,76 oranında bir azalma gerçekleştiğini göstermiştir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin tabakanın alt kısmındaki delaminasyon faktörü için deney sonuçları (sinyal/gürültü (S/N) oranı, S/N oranları ve ortalama değerler için tepki tablosu, işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne etkisi, ANOVA analizi ve yüzey grafikleri) ise; Ek Açıklamalar A.'da verilmiştir.

5.2. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK KERF AÇISINDAKİ DEĞİŞİM

ASJ ile delme işlemi esnasında yüksek basınçlı su ve aşındırıcıların malzeme içine girmesi ve sonrasında su basıncının malzeme içerisinde azalmaya başlamasıyla malzemede koniklik (kerf) oluşmaktadır. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası oluşan bu kerf açısı Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T = \arctan\left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{2.t}\right) \quad (4.2)$$

CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapında (8, 10, 12 ve 14 mm) ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen kerf açısı (T) değerleri Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13. CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen kerf açısı (T) değerleri.

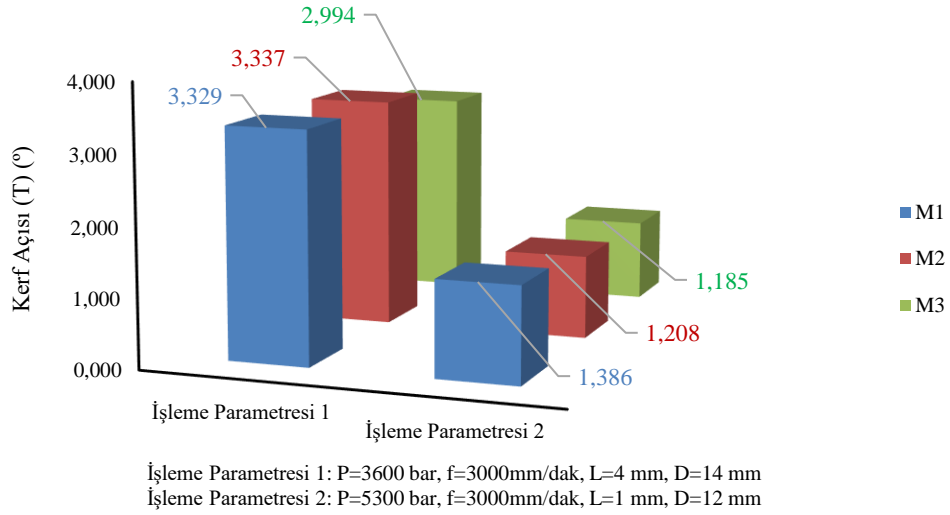
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CFRP Kompozit Malzemeler					
	A	B	C	D	M1	M2	M3	M1pd	M2pd	M3pd
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)	T (°)	T (°)	T (°)	T (°)	T (°)	T (°)
1	3600	750	1	8	2,665	2,702	2,705	2,541	2,423	2,260
2	3600	1500	2	10	2,666	2,753	2,928	2,552	2,530	2,323
3	3600	2000	3	12	2,991	3,066	2,964	2,666	2,691	2,519
4	3600	3000	4	14	3,329	3,337	2,994	3,172	2,900	2,724
5	4300	750	2	12	2,465	2,354	2,206	2,158	2,188	2,092
6	4300	1500	1	14	2,275	2,330	2,187	2,106	2,177	2,043
7	4300	2000	4	8	2,534	2,689	2,349	2,413	2,374	2,211
8	4300	3000	3	10	2,497	2,682	2,267	2,412	2,361	2,167
9	4800	750	3	14	2,095	2,031	2,039	1,966	2,023	1,674
10	4800	1500	4	12	2,129	2,116	2,102	2,032	2,074	1,923
11	4800	2000	1	10	1,921	1,673	1,850	1,684	1,508	1,340
12	4800	3000	2	8	2,082	1,998	1,997	1,905	1,902	1,669
13	5300	750	4	10	1,902	1,346	1,457	1,684	1,288	1,297
14	5300	1500	3	8	2,016	1,860	1,922	1,778	1,834	1,475
15	5300	2000	2	14	1,846	1,397	1,385	1,248	0,985	0,975
16	5300	3000	1	12	1,386	1,208	1,185	1,116	0,951	0,870

Çizelge 5.13'teki veriler incelendiğinde; tüm malzemeler için en yüksek kerf açısı 3,337° ile M2 malzemesinde elde edilirken, en düşük kerf açısı 0,870° ile M3pd malzemesinde elde edilmiştir. M1 malzemesi için 3,329° değerindeki en yüksek kerf açısı değeri, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delikten elde edilirken, 1,386° değerindeki en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delikten elde edilmiştir. Bu durum, diğer parametrelere bakılmaksızın nozul yaklaşma mesafesindeki 4 kat azalmayla birlikte su basıncındaki % 47,22 oranında artışın kerf açısı değerinde % 58,37 oranında iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 5.14). Aynı parametreler ile elde edilen kerf açısı değerindeki bu iyileşme; M2 malzemesi için % 63,80 ve M3 malzemesi için % 60,42 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.14). Bu değerler, su basıncının ve nozul yaklaşma mesafesinin kerf açısı değeri üzerindeki etkisini göstermektedir. Su basıncının artması ve nozul yaklaşma mesafesinin azalmasıyla birlikte kerf açısı değerinde azalma gözlenmiştir.

Çizelge 5.14. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen kerf açısı değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi 1 (T) (°)	İşleme Parametresi 2 (T) (°)	Fark (°)	% (iyileşme)
M1	3,329	1,386	1,943	58,37
M2	3,337	1,208	2,129	63,80
M3	2,994	1,185	1,809	60,42

İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm
İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm



Şekil 5.14. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerindeki değişim grafiği.

CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametrelerinde ASJ ile delinmesi sonucu oluşabilecek hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalardan elde edilen kerf açısı değerlerindeki iyileşme sonuçları Çizelge 5.15'te verilmiştir.

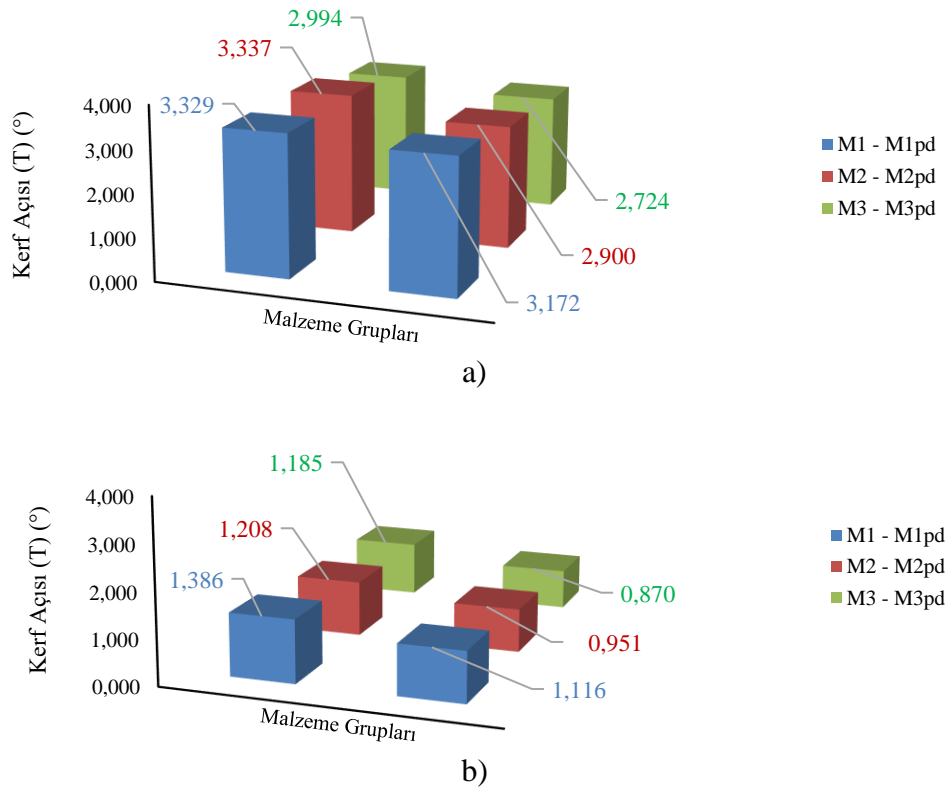
Çizelge 5.15. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi	Düz tabakalar (T) (°)	Pilot delikli tabakalar (T) (°)	Fark (°)	% (iyileşme)
M1-M1pd	P=3600 bar f=3000 mm/dak L=4 mm D=14 mm	3,329	3,172	0,157	4,72
M2-M2pd		3,337	2,900	0,437	13,10
M3-M3pd		2,994	2,724	0,270	9,02
M1-M1pd	P=5300 bar f=3000 mm/dak L=1 mm D=12 mm	1,386	1,116	0,270	19,48
M2-M2pd		1,208	0,951	0,257	21,27
M3-M3pd		1,185	0,870	0,315	26,58

P=Su basıncı, f=Nozul ilerleme hızı, L=Nozul yaklaşma mesafesi, D=Delik çapı.

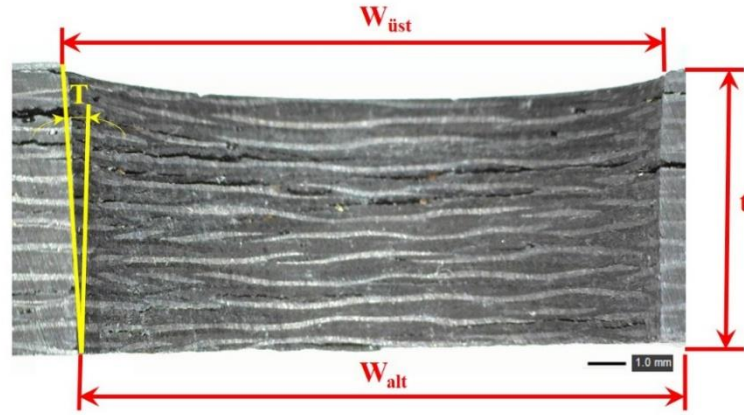
ASJ ile delme işleminde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek muhtemel hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli tabakalarda da kerf açısı değerlerinin iyileştiği görülmektedir (Şekil 5.15). M1 malzemesi için, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delikten elde edilen kerf açısı değeri 3,329° iken aynı işleme

parametrelerinde M1pd malzemesindeki delikten elde edilen kerf açısı değeri $3,172^{\circ}$ olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla $0,157^{\circ}$ değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla $0,437^{\circ}$ ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla $0,270^{\circ}$ değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.15a). M1 malzemesi için, 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delikten elde edilen kerf açısı değeri $1,386^{\circ}$ iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delikten elde edilen kerf açısı değeri $1,116^{\circ}$ olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla $0,270^{\circ}$ değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla $0,257^{\circ}$ ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla $0,315^{\circ}$ değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.15b).



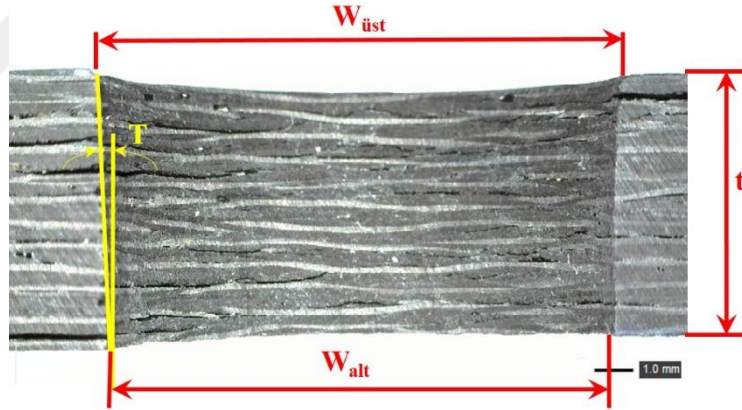
Şekil 5.15. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen kerf açısı değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen kerf açısı değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen kerf açısı değerleri.

Şekil 5.15'teki grafik incelendiğinde; su basıncının artmasıyla kerf açısında azalma görülmektedir. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerine sahip delik yüzeylerinin mikroskobik görüntüleri Şekil 5.16'da gösterilmektedir.



$$T = \arctan\left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{2.t}\right) = \arctan\left(\frac{14,295 - 13,599}{2.6}\right) = 3,337$$

a)



$$T = \arctan\left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{2.t}\right) = \arctan\left(\frac{12,204 - 12,036}{2.6}\right) = 0,807$$

b)

Şekil 5.16. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu en yüksek ve en düşük kerf açısı değerlerine sahip deliklerin mikroskobik görüntüleri a) M2 malzemesi (P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm) b) M3pd malzemesi (P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm).

Şekil 5.16'daki mikroskobik görüntülerde deliklerde oluşan kerf açısı görülmektedir. En yüksek kerf açısı değeri M2 malzemesinde 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 14 mm çapındaki delik yüzeyinde 3,337° olarak elde edilmiştir (Şekil 5.16a). En düşük kerf açısı değeri ise; M2pd

malzemesinde 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 12 mm çapındaki delik yüzeyinde 0,807° olarak elde edilmiştir (Şekil 5.16b).

Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin kerf açısı için elde edilen S/N oranı tepki tabloları Çizelge 5.16'da verilmiştir. Deneysel çalışmada, kerf açısı değerlerinin aritmetik ortalaması 2,300° olarak ölçülmüş olup kerf açısı değerleri için S/N oranının aritmetik ortalaması -7,053 dB olarak elde edilmiştir.

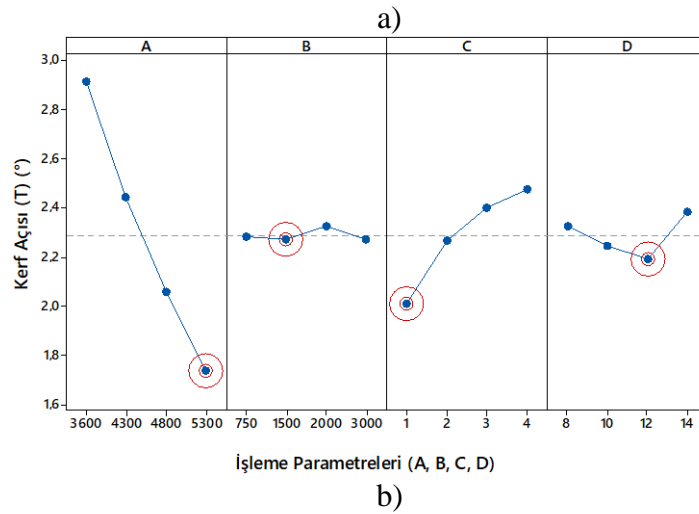
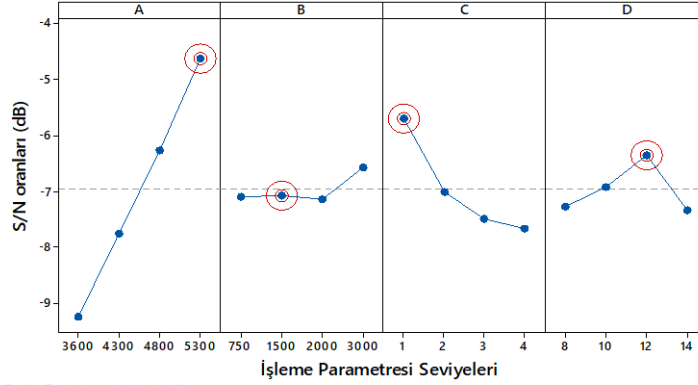
Çizelge 5.16. M1 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,665	-8,514
2	3600	1500	2	10	2,666	-8,517
3	3600	2000	3	12	2,991	-9,516
4	3600	3000	4	14	3,329	-10,446
5	4300	750	2	12	2,465	-7,836
6	4300	1500	1	14	2,275	-7,140
7	4300	2000	4	8	2,534	-8,076
8	4300	3000	3	10	2,497	-7,948
9	4800	750	3	14	2,095	-6,424
10	4800	1500	4	12	2,129	-6,564
11	4800	2000	1	10	1,921	-5,671
12	4800	3000	2	8	2,082	-6,370
13	5300	750	4	10	1,902	-5,584
14	5300	1500	3	8	2,016	-6,090
15	5300	2000	2	14	1,846	-5,325
16	5300	3000	1	12	1,386	-2,835

Her bir işleme parametresinin (A, B, C ve D) kerf açısına etkisi, sinyal/gürültü oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan işleme parametrelerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur. Kerf açısı için işleme parametrelerinin belirlenen seviyeleri Çizelge 5.17'de verilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin kerf açısına etkisi Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Kerf açısı için optimum seviye, A4B2C1D3 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.17b).

Çizelge 5.17. M1 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T) (°)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-9,248	-7,090	-6,040	-7,262
2	-7,750	-7,078	-7,012	-6,930
3	-6,257	-7,147	-7,495	-6,688
4	-4,958	-6,900	-7,668	-7,334
Delta	4,290	0,247	1,628	0,646
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	2,913	2,282	2,062	2,324
2	2,443	2,272	2,265	2,247
3	2,057	2,323	2,400	2,243
4	1,788	2,324	2,473	2,386
Delta	1,125	0,052	0,412	0,144
Rank	1	4	2	3



Şekil 5.17. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda kerf açısı için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 5.18'de gösterilmiştir. Çizelge 5.18'de gösterildiği gibi; A, B, C ve D işleme parametrelerinin kerf açısına katkı yüzdeleri sırasıyla % 82,78, % 0,26, % 11,31 ve % 1,63 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, delik çapı ve nozul ilerleme hızı olduğunu göstermektedir.

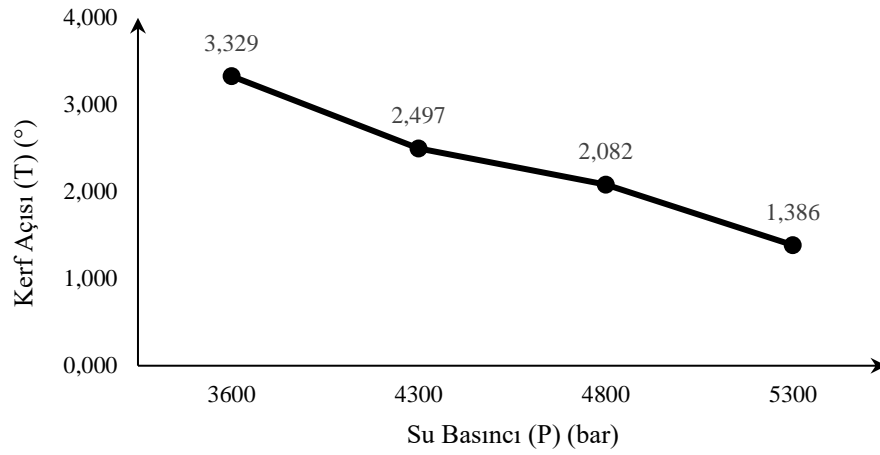
Çizelge 5.18. M1 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	2,8707	0,9569	20,59	0,017	82,78
B	3	0,0089	0,0030	0,06	0,975	0,26
C	3	0,3922	0,1307	2,81	0,209	11,31
D	3	0,0567	0,0189	0,41	0,761	1,63
Hata	3	0,1395	0,0465	-	-	4,02
Toplam	15	3,4679	-	-	-	100

S = 0,2156 R-Sq = % 95,98 R-Sq (adj) = % 79,89

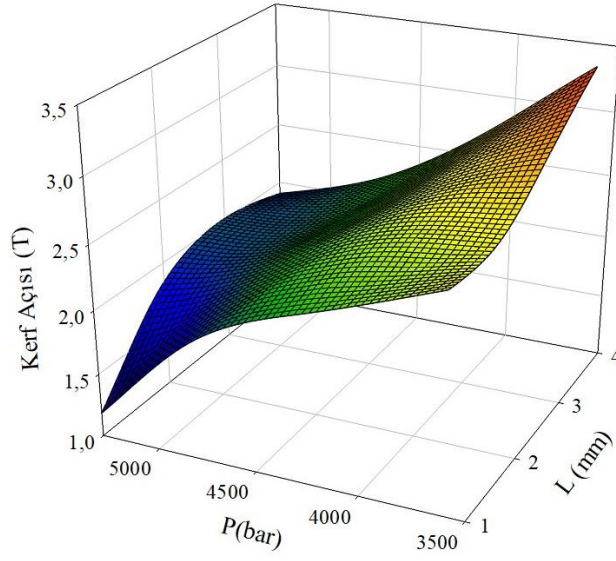
M1 malzemesi için farklı delik çaplarında gerçekleştirilen delme işlemi sonucu minimum kerf açısı değeri (1,386°), yüksek su basıncı (5300 bar) ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde (1 mm) tespit edilmiştir (Şekil 5.18). En yüksek kerf açısı değeri (3,329°) ise; düşük su basıncı (3600 bar) ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde (4 mm) elde edilmiştir. Literatürde su basıncının artmasının kerf açısını azalttığı belirtilmiştir [115,149,150]. Yapılan araştırmalar, nozul ilerleme hızının artması ile kerf açısının da arttığını ortaya koymaktadır [115,150,151]. Bazı araştırmacılar ise nozul ilerleme hızının artmasıyla kerf açısının azaldığını tespit etmiş olup bu durumun işlenen farklı malzeme türlerine, farklı basınç ve hız aralıklarının seçimine, aynı zamanda işlenecek malzemeye gereken jet enerjisinin kullanılan orandan farklı olmasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [115,147]. Nozul yaklaşma mesafesinin artmasının kerf açısının artmasına yol açtığını tespit etmişlerdir [149-151]. Ayrıca su basıncının artmasıyla üst kerf genişliğinin (ÜKG) az miktarda arttığı tespit edilmiştir [147,150-152]. Bazı araştırmalar, yüksek su basıncının malzeme üzerine jetin daha büyük bir kinetik enerjiyle çarpmasıyla daha geniş bir delik oluşturduğunu göstermektedir [115]. Buna rağmen; bazı araştırmacılar su basıncı ile ÜKG arasında

herhangi bir ilişki bulmadıklarını belirtmişlerdir [115,153]. Ayrıca; daha yavaş bir geçişin malzeme üzerine daha çok aşındırıcı parçacığın etki edeceği ve daha büyük bir delik açacağı için ÜKG'nin nozul ilerleme hızıyla ters orantılı olduğu belirtilmiştir [115,147,151]. Bu durum, bazı araştırmacılar tarafından desteklenmiştir [115,154]. Ancak; bazı araştırmacılar ise kırılmal malzemelerin işlenmesinde nozul ilerleme hızının ÜKG üzerinde çok az etkisinin olduğunu belirtmişlerdir [115,152].



Şekil 5.18. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen kerf açısı değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.

M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında işleme parametrelerinin kerf açısı değerlerini belirlemek için yüzey grafik analizi yapılmıştır. Yapılan yüzey grafik analizi Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. M1 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

Şekil 5.19'daki yüzey grafiği incelendiğinde; M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en düşük kerf açısı değeri elde edilirken, düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en yüksek kerf açısı değerinin elde edildiği görülmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin kerf açısı için deney sonuçları (sinyal/gürültü (S/N) oranı, S/N oranları ve ortalama değerler için tepki tablosu, işleme parametrelerinin kerf açısına etkisi, ANOVA analizi ve yüzey grafikleri) ise; Ek Açıklamalar B.'de verilmiştir.

5.3. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK DELİK ÇAPINDA OLUŞAN DAİRESELLİK HATASI DEĞERİNDEKİ DEĞİŞİM

CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapında (8, 10, 12 ve 14 mm) ASJ ile delinmesi sonucu; üretim veya montaj sonrası ölçü doğruluklarının kontrol edilmesi amacıyla, delik çaplarının ölçü doğrulukları (delik çapında oluşan sapma değerleri) CMM (Coordinate Measuring Machines-Koordinat Ölçüm Makinaları) cihazı ile ölçülmüştür. CMM ile ölçülen dairesellik hatası değerleri Çizelge 5.19’da verilmiştir.

Çizelge 5.19. CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen dairesellik hatası değerleri.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CFRP Kompozit Malzemeler					
	A	B	C	D	M1	M2	M3	M1pd	M2pd	M3pd
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)	CMM (mm)	CMM (mm)	CMM (mm)	CMM (mm)	CMM (mm)	CMM (mm)
1	3600	750	1	8	0,941	1,489	0,916	0,907	0,898	0,788
2	3600	1500	2	10	1,440	1,536	1,482	0,913	0,909	0,837
3	3600	2000	3	12	1,517	1,594	1,520	0,972	0,937	0,838
4	3600	3000	4	14	1,553	1,902	1,565	1,063	1,001	0,873
5	4300	750	2	12	0,861	0,847	0,794	0,799	0,790	0,759
6	4300	1500	1	14	0,859	0,846	0,777	0,784	0,762	0,745
7	4300	2000	4	8	0,899	0,896	0,829	0,825	0,840	0,785
8	4300	3000	3	10	0,874	0,890	0,803	0,824	0,802	0,760
9	4800	750	3	14	0,828	0,827	0,743	0,742	0,750	0,727
10	4800	1500	4	12	0,836	0,837	0,755	0,763	0,758	0,744
11	4800	2000	1	10	0,813	0,793	0,722	0,710	0,723	0,711
12	4800	3000	2	8	0,826	0,821	0,738	0,731	0,746	0,726
13	5300	750	4	10	0,804	0,753	0,705	0,700	0,718	0,695
14	5300	1500	3	8	0,823	0,808	0,738	0,722	0,746	0,723
15	5300	2000	2	14	0,742	0,731	0,683	0,661	0,672	0,677
16	5300	3000	1	12	0,718	0,719	0,659	0,636	0,649	0,618

Çizelge 5.19’deki veriler incelendiğinde; tüm malzemeler için en yüksek dairesellik hatası 1,902 mm ile M2 malzemesinde elde edilirken, en düşük dairesellik hatası 0,618 mm ile M3pd malzemesinde elde edilmiştir. M1 malzemesi için 1,553 mm değerindeki

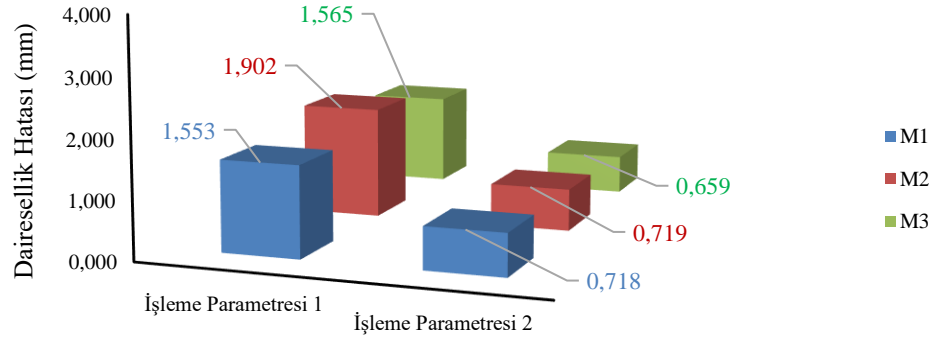
en yüksek dairesellik hatası, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delikten elde edilirken, 0,718 mm değerindeki en düşük dairesellik hatası 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delikten elde edilmiştir. Bu durum, diğer parametrelere bakılmaksızın nozul yaklaşma mesafesindeki 4 kat azalmayla birlikte su basıncındaki % 47,22 oranında artışın dairesellik hatası değerinde % 53,77 oranında iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 5.20). Aynı parametreler ile elde edilen dairesellik hatası değerindeki bu iyileşme; M2 malzemesi için % 62,20 ve M3 malzemesi için % 57,89 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.20). Bu değerler, su basıncının ve nozul yaklaşma mesafesinin dairesellik hatası üzerindeki etkisini göstermektedir. Su basıncının artması ve nozul yaklaşma mesafesinin azalmasıyla birlikte dairesellik hatasında azalma gözlenmiştir. Literatürde farklı kompozit malzemelerin geleneksel işleme yöntemleriyle delinmesi sonucu elde edilen delik çapları CMM ile ölçülmüş ve boyutsal tamlık değerleri analiz edilmiştir [155,156].

Çizelge 5.20. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen dairesellik hatası değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi 1 (CMM) (mm)	İşleme Parametresi 2 (CMM) (mm)	Fark (mm)	% (iyileşme)
M1	1,553	0,718	0,835	53,77
M2	1,902	0,719	2,183	62,20
M3	1,565	0,659	0,906	57,89

İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm

İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm



İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm
 İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm

Şekil 5.20. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük dairesellik hatası değerlerindeki değişim grafiği.

CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametrelerinde ASJ ile delinmesi sonucu oluşabilecek hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli malzemelerden elde edilen dairesellik hatası değerlerindeki iyileşme sonuçları Çizelge 5.21’de verilmiştir.

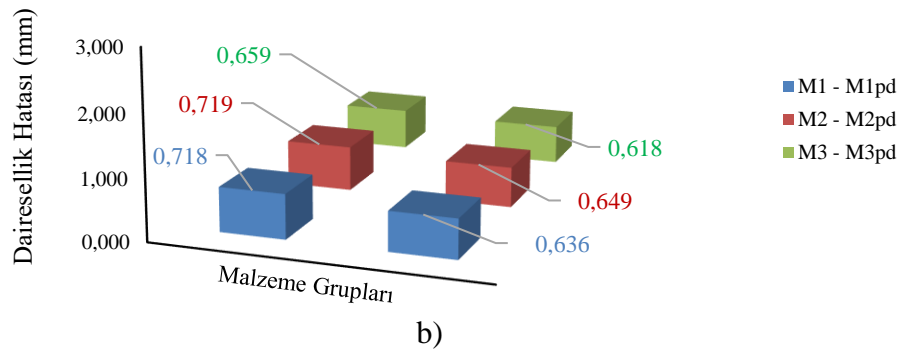
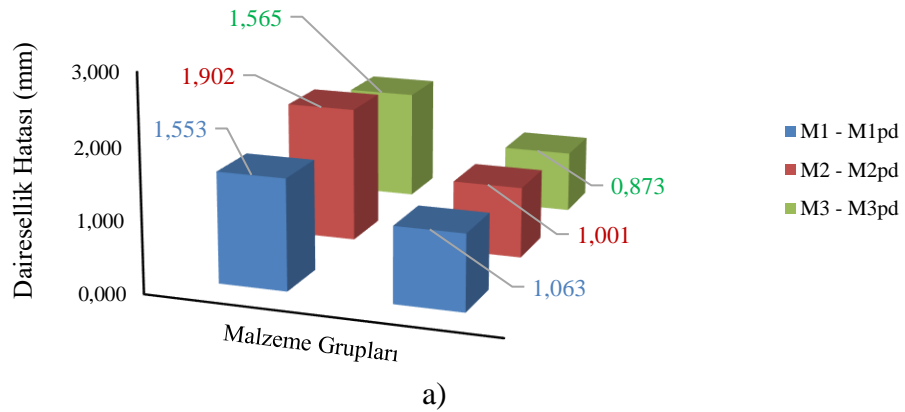
Çizelge 5.21. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük dairesellik hatası değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi	Düz tabakalar (CMM) (mm)	Pilot delikli tabakalar (CMM) (mm)	Fark (mm)	% (iyileşme)
M1-M1pd	P=3600 bar f=3000 mm/dak L=4 mm D=14 mm	1,553	1,063	0,490	31,55
M2-M2pd		1,902	1,001	0,901	47,37
M3-M3pd		1,565	0,873	0,692	44,22
M1-M1pd	P=5300 bar f=3000 mm/dak L=1 mm D=12 mm	0,718	0,636	0,082	11,42
M2-M2pd		0,719	0,649	0,070	9,74
M3-M3pd		0,659	0,618	0,041	6,22

P=Su basıncı, f=Nozul ilerleme hızı, L=Nozul yaklaşma mesafesi, D=Delik çapı.

ASJ ile delme işleminde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek muhtemel hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli malzemelerde de dairesellik hatası değerlerinin iyileştiği görülmektedir (Şekil 5.21). M1 malzemesi için, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delikten elde edilen dairesellik hatası 1,553 mm iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delikten elde edilen dairesellik hatası 1,063

mm olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,490 mm değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,901 mm ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,692 mm değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.21a). M1 malzemesi için, 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delikten elde edilen dairesellik hatası 0,718 mm iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delikten elde edilen dairesellik hatası 0,636 mm olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,082 mm değerinde az miktarda da olsa iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,070 mm ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,041 mm değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.21b).



Şekil 5.21. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen dairesellik hatasındaki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen dairesellik hatası değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delikten elde edilen dairesellik hatası değerleri.

Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin dairesellik hatası değeri için elde edilen S/N oranı tepki tabloları Çizelge 5.22'de verilmiştir. Deneysel çalışmada, dairesellik hatası değerlerinin aritmetik ortalaması 0,958 mm olarak ölçülmüş olup dairesellik hatası değerleri için S/N oranının aritmetik ortalaması 0,646 dB olarak elde edilmiştir.

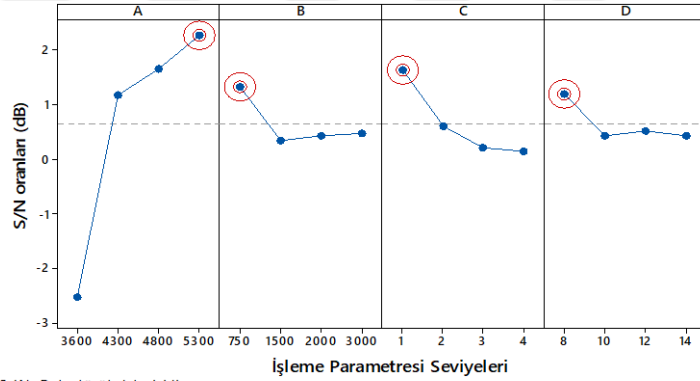
Çizelge 5.22. M1 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	0,941	0,528
2	3600	1500	2	10	1,440	-3,167
3	3600	2000	3	12	1,517	-3,620
4	3600	3000	4	14	1,553	-3,823
5	4300	750	2	12	0,861	1,300
6	4300	1500	1	14	0,859	1,320
7	4300	2000	4	8	0,899	0,925
8	4300	3000	3	10	0,874	1,170
9	4800	750	3	14	0,828	1,639
10	4800	1500	4	12	0,836	1,556
11	4800	2000	1	10	0,813	1,798
12	4800	3000	2	8	0,826	1,660
13	5300	750	4	10	0,804	1,895
14	5300	1500	3	8	0,823	1,692
15	5300	2000	2	14	0,742	2,592
16	5300	3000	1	12	0,718	2,878

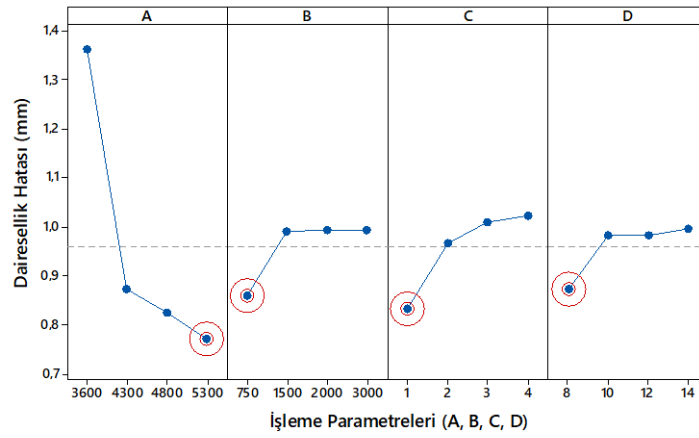
Her bir işleme parametresinin (A, B, C ve D) dairesellik hatasına etkisi, sinyal/gürültü oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan işleme parametrelerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur. Dairesellik hatası için işleme parametrelerinin belirlenen seviyeleri Çizelge 5.23'te verilmiştir. İşleme parametrelerinin ve seviyelerinin dairesellik hatasına etkisi Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Dairesellik hatası için optimum seviye, A4B1C1D1 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.22b).

Çizelge 5.23. M1 malzemesinin dairesellik hatası değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-2,5205	1,3406	1,6310	1,2014
2	1,1787	0,3502	0,5963	0,4239
3	1,6635	0,4238	0,2204	0,5284
4	2,2641	0,4711	0,1380	0,4320
Delta	4,7846	0,9904	1,4930	0,7775
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,3627	0,8585	0,8327	0,8722
2	0,8732	0,9895	0,9673	0,9828
3	0,8257	0,9928	1,0105	0,9830
4	0,7717	0,9928	1,0230	0,9955
Delta	0,5910	0,1342	0,1903	0,1232
Rank	1	3	2	4



a)



b)

Şekil 5.22. M1 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

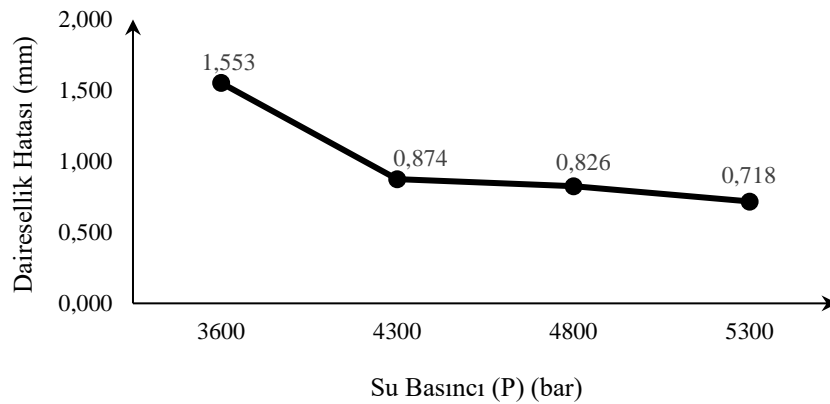
Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası değeri üzerindeki etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda dairesellik hatası için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 5.24'te gösterilmiştir. Çizelge 5.24'te gösterildiği gibi, A, B, C ve D işleme parametrelerinin dairesellik hatası değerine katkı yüzdeleri sırasıyla % 76,54, % 0,87, % 14,32 ve % 1,63 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası değeri üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, delik çapı ve nozul ilerleme hızı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.24. M1 malzemesinin dairesellik hatası değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,8927	0,2976	13,07	0,031	76,54
B	3	0,0532	0,0177	0,78	0,579	0,87
C	3	0,0910	0,0303	1,33	0,41	14,32
D	3	0,0400	0,0133	0,59	0,665	1,63
Hata	3	0,0683	0,0228	-	-	6,73
Toplam	15	1,1453	-	-	-	100

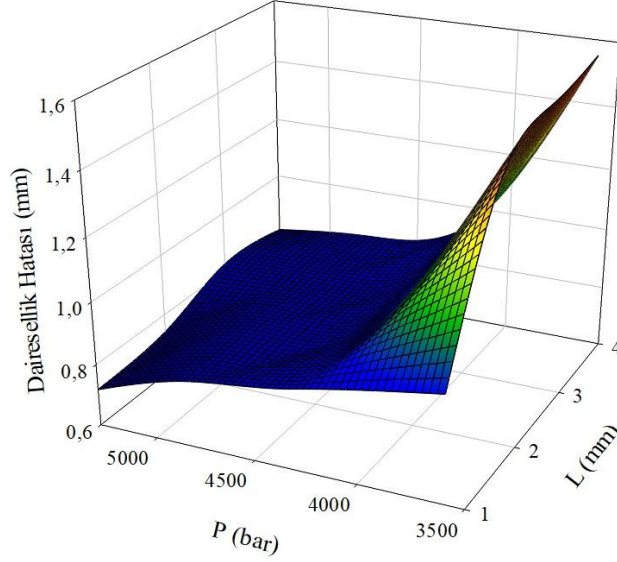
S = 0,151 R-Sq = % 94,03 R-Sq (adj) = % 70,17

M1 malzemesi için farklı delik çaplarında gerçekleştirilen delme işlemi sonucu minimum dairesellik hatası (0,718 mm), yüksek su basıncı (5300 bar) ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde (1 mm) tespit edilmiştir (Şekil 5.23). En yüksek dairesellik hatası (1,553 mm) ise; düşük su basıncı (3600 bar) ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde (4 mm) elde edilmiştir.



Şekil 5.23. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen dairesellik hatası değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.

M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında işleme parametrelerinin dairesellik hatası değerlerini belirlemek için yüzey grafik analizi yapılmıştır. Yapılan yüzey grafik analizleri Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. M1 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin dairesellik hatası değerleri için deney sonuçları (sinyal/gürültü (S/N) oranı, S/N oranları ve ortalama değerler için tepki tablosu, işleme parametrelerinin dairesellik hatası değerine etkisi, ANOVA analizi ve yüzey grafikleri) ise; Ek Açıklamalar C.'de verilmiştir.

5.4. İŞLEME PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNDEKİ DEĞİŞİM

CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) dört farklı su basıncı (3600, 4300, 4800 ve 5300 bar), nozul ilerleme hızı (750, 1500, 2000 ve 3000 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1, 2, 3 ve 4 mm) ve delik çapında (8, 10, 12 ve 14 mm) ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri Çizelge 5.25'te verilmiştir.

Çizelge 5.25. CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delme işlemi sonrasında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CFRP Kompozit Malzemeler					
	A	B	C	D	M1	M2	M3	M1pd	M2pd	M3pd
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)	Ra (µm)	Ra (µm)	Ra (µm)	Ra (µm)	Ra (µm)	Ra (µm)
1	3600	750	1	8	2,080	2,153	1,758	1,790	1,965	1,716
2	3600	1500	2	10	2,163	2,188	2,400	1,965	2,000	2,066
3	3600	2000	3	12	2,441	2,598	2,423	2,292	2,050	2,371
4	3600	3000	4	14	2,606	2,708	2,617	2,593	2,558	2,536
5	4300	750	2	12	1,863	1,746	1,543	1,400	1,168	1,413
6	4300	1500	1	14	1,788	1,678	1,468	1,390	1,118	1,395
7	4300	2000	4	8	2,063	1,950	1,703	1,643	1,427	1,695
8	4300	3000	3	10	1,966	1,838	1,637	1,543	1,330	1,532
9	4800	750	3	14	1,658	1,508	1,205	1,005	0,873	0,988
10	4800	1500	4	12	1,675	1,563	1,413	1,275	1,111	1,178
11	4800	2000	1	10	1,200	1,238	0,998	0,805	0,678	0,745
12	4800	3000	2	8	1,445	1,473	1,090	0,858	0,863	0,925
13	5300	750	4	10	1,265	1,368	1,003	0,840	0,680	0,873
14	5300	1500	3	8	1,353	1,385	1,018	0,850	0,795	0,893
15	5300	2000	2	14	1,058	1,080	0,948	0,690	0,590	0,638
16	5300	3000	1	12	1,013	0,990	0,920	0,650	0,585	0,580

Çizelge 5.25'teki veriler incelendiğinde; tüm malzemeler için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 2,708 µm ile M2 malzemesinde elde edilirken, en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,580 µm ile M3pd malzemesinde elde edilmiştir. M1 malzemesi için 2,606 µm değerindeki en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilirken, 1,013 µm

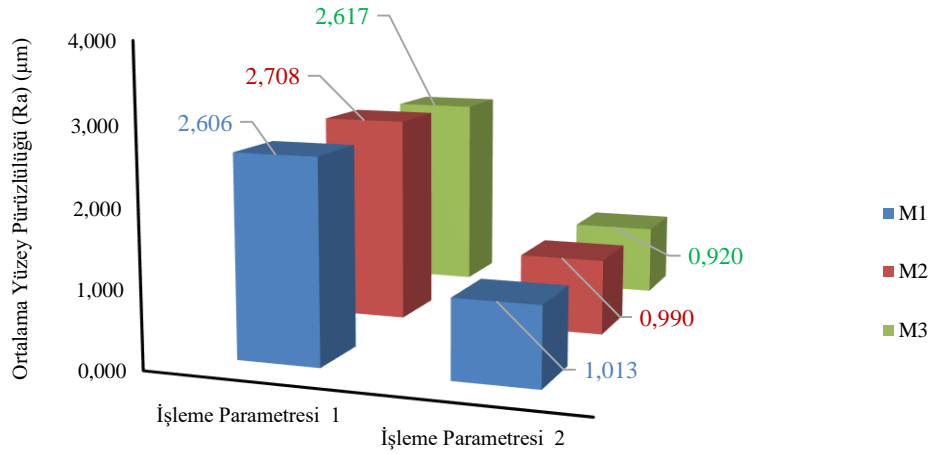
değerindeki en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilmiştir. Bu durum, diğer parametrelere bakılmaksızın nozul yaklaşma mesafesindeki 4 kat azalmayla birlikte su basıncındaki % 47,22 oranında artışın ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinde % 61,13 oranında iyileşme sağladığını ortaya koymaktadır (Çizelge 5.26). Aynı parametreler ile elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerindeki bu iyileşme; M2 malzemesi için % 63,44 ve M3 malzemesi için % 64,85 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler, su basıncının ve nozul yaklaşma mesafesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri üzerindeki etkisini göstermektedir (Şekil 5.25). Su basıncının artması ve nozul yaklaşma mesafesinin azalmasıyla birlikte ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinde azalma gözlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerindeki bu azalma literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermektedir [59, 107, 116]. Farklı FOA'daki CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde görülen değişim FOA'nın, elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. FOA'nın ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi; Unde vd.'nin yapmış olduğu çalışma ile benzerlik göstermektedir [40].

Çizelge 5.26. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı parametreler altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki iyileşme sonuçları.

Malzemeler	İşleme Parametresi 1 (Ra) (μm)	İşleme Parametresi 2 (Ra) (μm)	Fark (μm)	% (iyileşme)
M1	2,606	1,013	1,593	61,13
M2	2,708	0,990	1,718	63,44
M3	2,617	0,920	1,697	64,85

İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm

İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm



İşleme Parametresi 1: P=3600 bar, f=3000mm/dak, L=4 mm, D=14 mm
 İşleme Parametresi 2: P=5300 bar, f=3000mm/dak, L=1 mm, D=12 mm

Şekil 5.25. CFRP kompozit malzemelerin (M1, M2 ve M3) farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen en yüksek ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim grafiği.

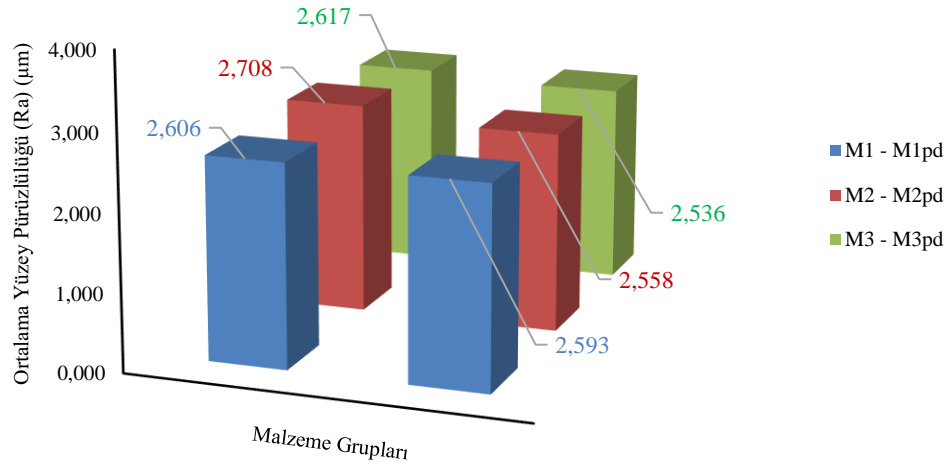
Yapılan deneylerde, CFRP kompozit malzemelerin farklı işleme parametrelerinde ASJ ile delinmesi sırasında jetin malzemeye ilk temasında oluşan kinetik enerjinin azalması ve buna bağlı olarak oluşabilecek hasarların önlenmesi amacıyla malzemelere pilot delikler açılmıştır. Delme işlemi sonucunda pilot delikli CFRP kompozit malzemelerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki iyileşme sonuçları Çizelge 5.27’de verilmiştir.

Çizelge 5.27. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen en yüksek ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki iyileşme sonuçları.

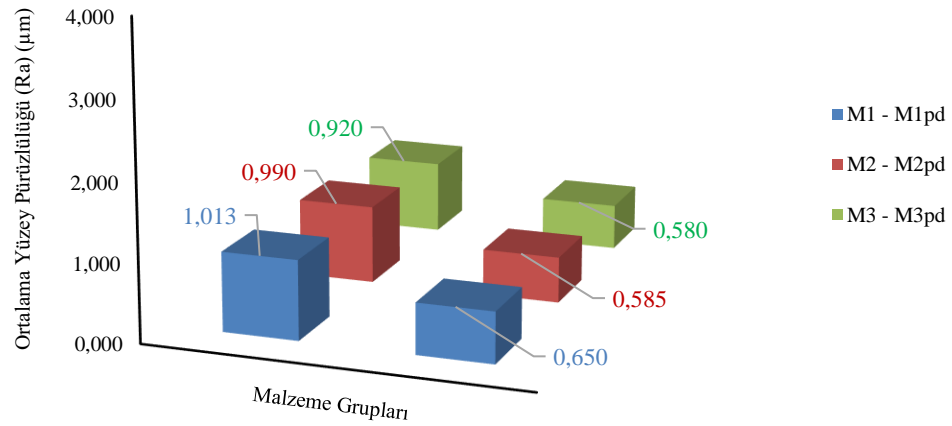
Malzemeler	İşleme Parametresi	Düz tabakalar (Ra) (µm)	Pilot delikli tabakalar (Ra) (µm)	Fark (µm)	% (iyileşme)
M1-M1pd	P=3600 bar f=3000 mm/dak L=4 mm D=14 mm	2,606	2,593	0,013	0,50
M2-M2pd		2,708	2,558	0,150	5,54
M3-M3pd		2,617	2,536	0,081	3,10
M1-M1pd	P=5300 bar f=3000 mm/dak L=1 mm D=12 mm	1,013	0,650	0,363	35,83
M2-M2pd		0,990	0,585	0,405	40,91
M3-M3pd		0,920	0,580	0,340	36,96

P=Su basıncı, f=Nozul ilerleme hızı, L=Nozul yaklaşma mesafesi, D=Delik çapı.

ASJ ile delme işleminde CFRP kompozit malzemelerde oluşabilecek muhtemel hasarların önlenmesi amacıyla açılan pilot delikli malzemelerde de ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyileştiği görülmektedir (Şekil 5.26). M1 malzemesi için, 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 14 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 2,606 μm iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 2,593 μm olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,013 μm değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,150 μm ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,081 μm değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.26a). M1 malzemesi için, 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesinde açılan 12 mm çapındaki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1,013 μm iken aynı işleme parametrelerinde M1pd malzemesindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,650 μm olarak tespit edilmiştir. Bu durum, M1 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,363 μm değerinde iyileşme görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı durum M2 malzemesine pilot delik açılmasıyla 0,405 μm ve M3 malzemesinde pilot delik açılmasıyla 0,340 μm değerinde iyileşme ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.26b). Pilot deliklerin açılmasıyla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki azalma literatürle örtüşmektedir [107].



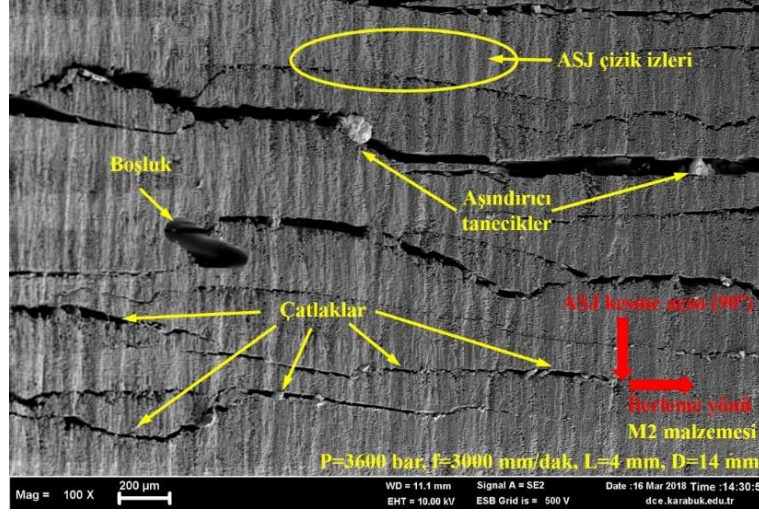
a)



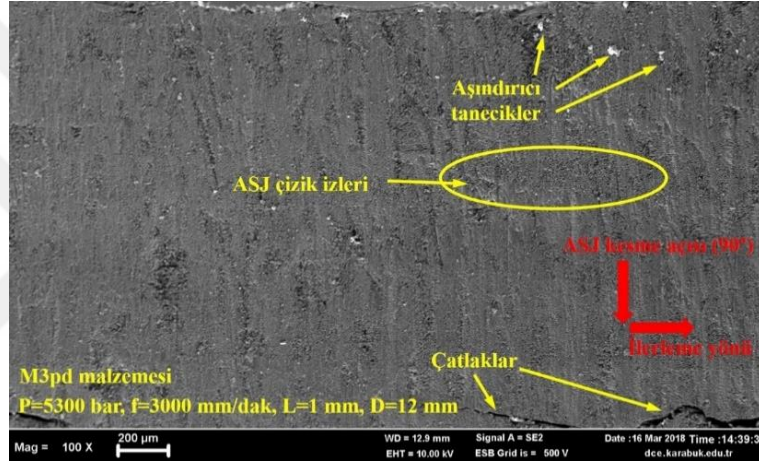
b)

Şekil 5.26. CFRP kompozit malzemelere pilot delik açılmasıyla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim grafikleri a) P=3600 bar, f=3000 mm/dak, L=4 mm, D=14 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri b) P=5300 bar, f=3000 mm/dak, L=1 mm, D=12 mm işleme parametrelerindeki delik yüzeyinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Yapılan deneylerde, CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası malzeme tabaka arasına girmesi muhtemel aşındırıcı parçacıkların etkisini görebilmek için deliklerin SEM görüntüleri alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen en yüksek ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip delik yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 5.27’de gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 5.27. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen a) en yüksek ve b) en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip delik yüzeylerinin SEM görüntüleri.

Şekil 5.27'deki SEM görüntülerine bakıldığında delik yüzeyleri arasındaki fark belirgin olarak görülmektedir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (2,708 μm) M2 malzemesinde 3600 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 14 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.27a). En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (0,580 μm) ise; M3pd malzemesinde 5300 bar su basıncı, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 12 mm çapındaki delik yüzeyinde elde edilmiştir (Şekil 5.27b).

Taguchi yönteminde nominal en iyidir, daha küçük daha iyidir ve daha büyük daha iyidir şeklinde kalite değerleri bulunmaktadır. Bu deneyde, en iyi ortalama yüzey

pürüzlülüğü değeri için en düşük değer alınmış olup en küçük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ile daha iyi ürün kalitesi ve en düşük maliyet için en uygun olan S/N (sinyal/gürültü) oranını hesaplamak için "daha küçük daha iyidir" seçilmiştir. Yapılan deneysel analizde, M1 [(0°/90°)_s FOA] malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için elde edilen S/N oranı tepki tabloları Çizelge 5.28'de verilmiştir. Deneysel çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalaması 1,727 µm olarak ölçülmüş olup ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için S/N oranının aritmetik ortalaması -4,416 dB olarak elde edilmiştir.

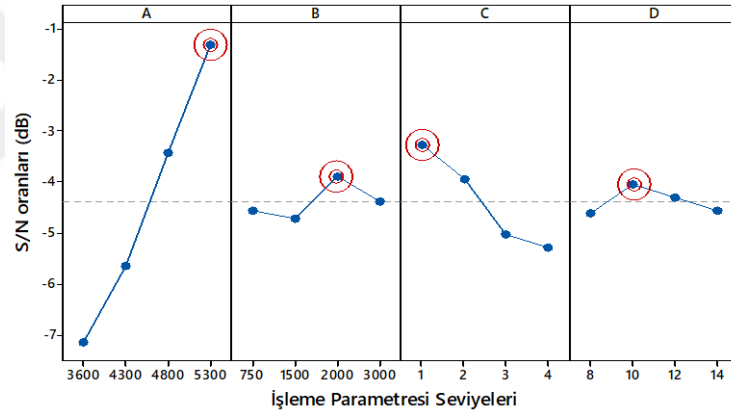
Çizelge 5.28. M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A Su basıncı (P)	B Nozul ilerleme hızı (f)	C Nozul yaklaşma mesafesi (L)	D Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,080	-6,361
2	3600	1500	2	10	2,163	-6,699
3	3600	2000	3	12	2,441	-7,751
4	3600	3000	4	14	2,606	-8,318
5	4300	750	2	12	1,863	-5,402
6	4300	1500	1	14	1,788	-5,045
7	4300	2000	4	8	2,063	-6,288
8	4300	3000	3	10	1,966	-5,873
9	4800	750	3	14	1,658	-4,393
10	4800	1500	4	12	1,675	-4,480
11	4800	2000	1	10	1,200	-1,584
12	4800	3000	2	8	1,445	-3,199
13	5300	750	4	10	1,265	-2,042
14	5300	1500	3	8	1,353	-2,623
15	5300	2000	2	14	1,058	-0,486
16	5300	3000	1	12	1,013	-0,108

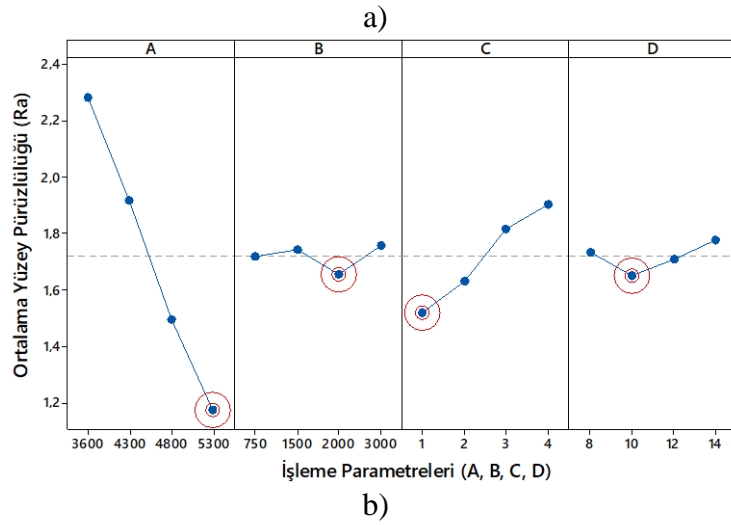
Her bir işleme parametresinin (A, B, C ve D) ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi, sinyal/gürültü oranı tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiştir. Optimum seviyeler, ortogonal dizide oluşturulan işleme parametrelerinin tüm kombinasyonlarından elde edilen farklı seviyeler değerlendirilerek bulunmuştur. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için işleme parametrelerinin belirlenen seviyeleri Çizelge 5.29'da gösterilmiştir. İşleme parametreleri ve seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi Şekil 5.28'de verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için optimum seviye, A4B3C1D2 olarak elde edilmiştir (Şekil 5.28b).

Çizelge 5.29. M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-7,282	-4,550	-3,274	-4,618
2	-5,652	-4,712	-3,946	-4,049
3	-3,414	-3,891	-5,023	-4,299
4	-1,315	-4,374	-5,282	-4,560
Delta	5,968	0,821	2,008	0,568
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,322	1,716	1,520	1,735
2	1,920	1,744	1,632	1,648
3	1,495	1,690	1,854	1,748
4	1,172	1,757	1,902	1,777
Delta	1,150	0,067	0,382	0,129
Rank	1	4	2	3



S / N : Daha küçük daha iyidir



Şekil 5.28. M1 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

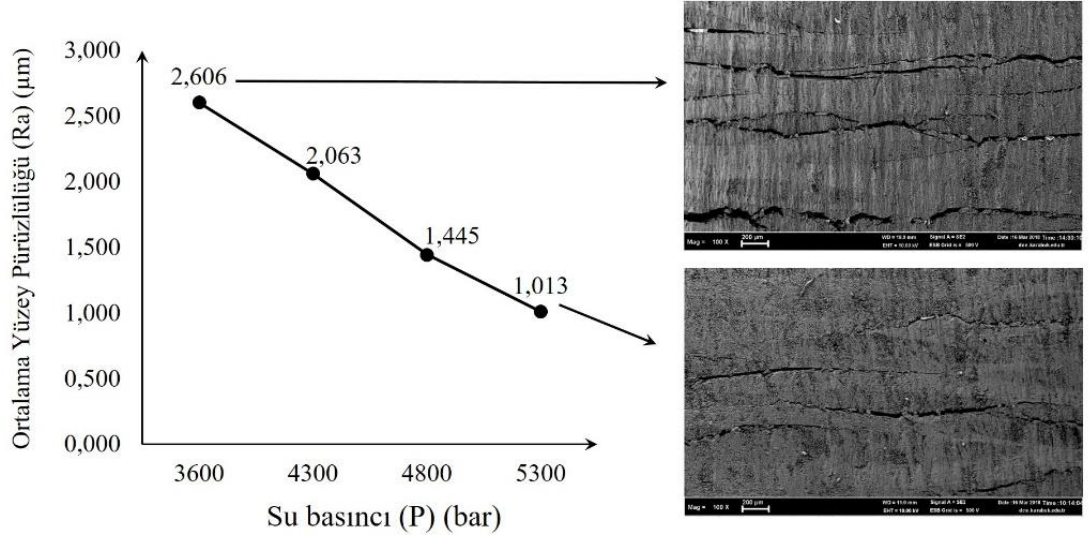
Yapılan deneysel analizde, M1 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri üzerindeki etki derecelerini belirlemek için ANOVA analizi uygulanmıştır. Yapılan delme işlemi sonucunda, ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için elde edilen ANOVA değerleri Çizelge 5.30'da verilmiştir. Çizelge 5.30'da gösterildiği gibi A, B, C ve D işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla % 87,01, % 0,31, % 11,40 ve % 1,06 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla; su basıncı, nozul yaklaşma mesafesi, delik çapı ve nozul ilerleme hızı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.30. M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	3,0145	1,0048	395,9	0,000	87,01
B	3	0,0108	0,0036	1,41	0,392	0,31
C	3	0,3951	0,1317	51,89	0,004	11,40
D	3	0,0368	0,0123	4,83	0,114	1,06
Hata	3	0,0076	0,0025	-	-	0,22
Toplam	15	3,4646	-	-	-	100

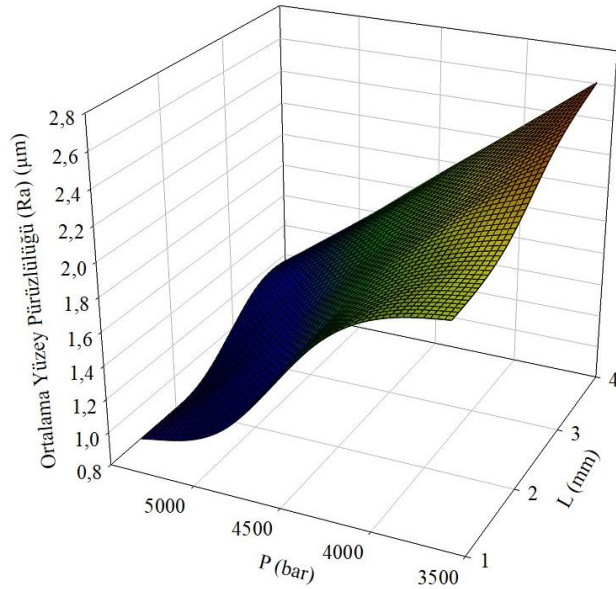
S = 0,050 R-Sq = % 99,78 R-Sq (adj) = % 98,90

M1 malzemesi için farklı delik çaplarında gerçekleştirilen delme işlemi sonucu en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (1,013 μm), yüksek su basıncı (5300 bar) ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde (1 mm) tespit edilmiştir (Şekil 5.29). En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (2,606 μm) ise; düşük su basıncı (3600 bar) ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde (4 mm) elde edilmiştir. Elde edilen bulgular literatürle benzerlik göstermektedir [116,117].



Şekil 5.29. M1 malzemesinin farklı işleme parametreleri altında ASJ ile delinmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin su basıncına bağlı değişim grafiği.

M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sonrasında işleme parametrelerinden su basıncı ve nozul yaklaşma mesafesinin (ANOVA analizinden elde edilen en etkili parametreler), ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini belirlemek için yüzey grafik analizi yapılmıştır. Yapılan yüzey grafik analizi Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



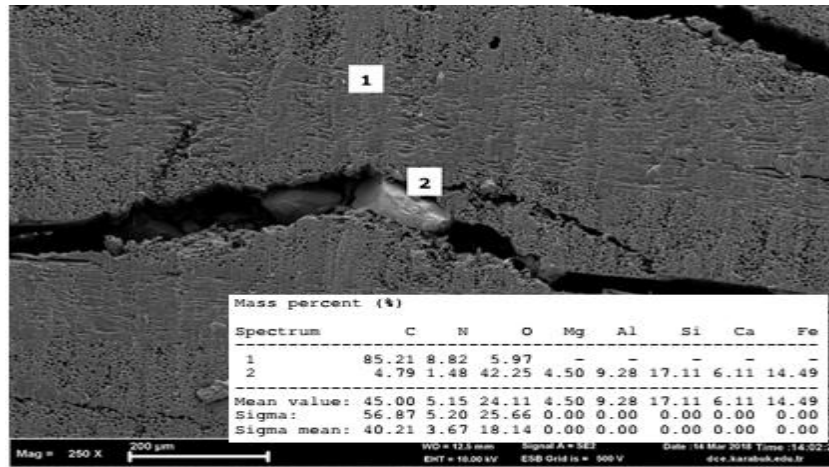
Şekil 5.30. M1 malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği.

Şekil 5.30'daki yüzey grafiği incelendiğinde; M1 malzemesinin ASJ ile delinmesi sırasında yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilirken, düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesi kullanıldığında en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edildiği görülmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için deney sonuçları (sinyal/gürültü (S/N) oranı, S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu, işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi, ANOVA analizi ve yüzey grafikleri) ise; Ek Açıklamalar D.'de verilmiştir.

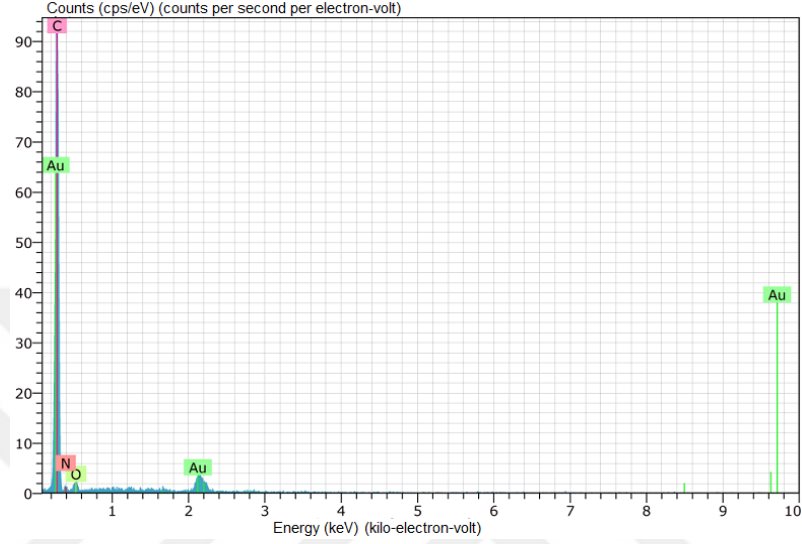
5.5. EDS (ENERGY-DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY) ANALİZİ İLE ELEMENT TANIMLAMA

CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinme işlemi sonrasında, ASJ işleme yönteminin genel yapısı sebebiyle yüksek basınç ve kinetik enerjili aşındırıcı parçacıkların iş parçası yüzeyine saplanmış olabileceği düşünüldüğünden, iş parçası yüzeyine saplanan aşındırıcıların tespiti için iş parçası yüzeyinin SEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 5.31). Şekil 5.31'de verilen M1 malzemesinin 250x büyütme SEM görüntüsünde nesnenin element tanımlaması EDS analizi ile yapılmıştır.



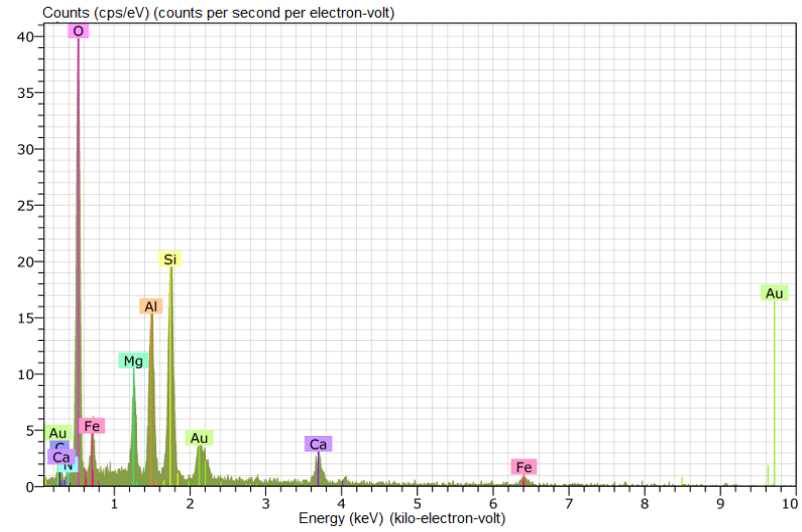
Şekil 5.31. CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinmesi sonrası 1 ve 2 nolu nesnelerin EDS analizi için 250x büyütme SEM görüntüsü (P=3600 bar, L=1 mm, f=750 mm/dak, D=10 mm)

Şekil 5.31’de verilen SEM görüntüsünde; 1 nolu nesne deney numunesi olan CFRP kompozit malzeme, 2 nolu nesne ise aşındırıcı (garnet) malzemedir. Yapılan EDS spektrum analizi sonucunda, 1 numara ile gösterilen nesneye ait element dağılımı Şekil 5.32’de, 2 numaralı nesneye ait element dağılımı ise Şekil 5.33’te gösterilmiştir.



Şekil 5.32. 1 nolu CFRP kompozit malzemeye ait EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.

Şekil 5.32’de görüldüğü gibi C (karbon) elementinin en yüksek pik değerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 1 nolu malzemenin CFRP kompozit malzeme olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.33. 2 nolu aşındırıcı numune üzerinde yapılan EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.

Şekil 5.33'te görüldüğü gibi O (oksijen) elementinin en yüksek pik değerinde olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda; Si (silisyum), Al (alüminyum), Mg (magnezyum), Au (altın), Fe (demir), Ca (kalsiyum) ve C (karbon) elementleri de bulunmaktadır. Bu durum 2 nolu malzemenin garnet malzeme olduğunu göstermektedir.

5.6. PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU

Taguchi tekniğinde, optimizasyonun güvenilirliği optimum sonuçlar sonrasında deneysel olarak teyit edilmekte ve işleme parametreleri ile seviyeleri belirlenmektedir. Delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değerleri için ASJ işleme parametrelerinin hangi değerde olması gerektiğinin analizi Minitab 17.0 paket programı kullanılarak Taguchi analizi ile yapılmıştır. Taguchi analizi ile yapılan doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar bazen Taguchi ortogonal dizisindeki deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen ise yapılan deneylerin dışında bir deney sonucu olabilmektedir. Bu sebeple, optimum parametreler sonucunda belirlenen işleme parametrelerinde yeniden deney yapılarak optimizasyonun güvenilirliği ve başarısı tespit edilmektedir.

5.6.1. Delaminasyon Faktörü İçin Doğrulama Deneyleri

CFRP kompozit malzemelerin her birinin hem tabakanın üst kısmı için hem de tabakanın alt kısmı için ölçülen delaminasyon faktörü (F_d) değerlerinin doğrulama deneyleri yapılmıştır. M1 malzemesi için yapılan on altı farklı deneysel parametrede, gerçek verilerle elde edilen optimum delaminasyon faktörü (üst) değeri 1,091 olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon işlemi ile tahmin edilen optimum delaminasyon faktörü (üst); A4, B1, C1 ve D2 parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.5). Optimum delaminasyon faktörü (üst) değerleri Taguchi analizinin tahmini kombinasyonunda 1,059 olarak elde edilmiştir. Ancak; Taguchi ortogonal dizisi oluşturularak yapılan gerçek deneyler içerisinde A4, B1, C1 ve D2 parametreleri kullanılarak yapılan bir deney bulunmamaktadır. Bundan dolayı bu işleme parametrelerinde yeniden deney yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda delaminasyon faktörü (üst) değeri 1,080 olarak tespit edilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen delaminasyon faktörü (üst) değerlerinin birbirine çok yakın çıkmasından

dolayı Taguchi yönteminin kullanılmasının delaminasyon faktörünün (üst) doğrulama testi sonuçlarının optimizasyonunun doğru olduğunu göstermiştir. Delaminasyon faktörü (üst) değerleri için optimal olan (A4, B1, C1 ve D2) ve tahmin edilen (A4, B1, C1 ve D2) kombinasyonları karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.31). Bu karşılaştırmalara göre, tahmin edilen delaminasyon faktörü (üst) değeri 1,059 iken deneysel çalışma sonucunda delaminasyon faktörü (üst) değeri 1,080 olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen delaminasyon faktörü (üst) ile Taguchi yöntemiyle tahmin edilen delaminasyon faktörü değeri arasında % 1,94 fark bulunmaktadır ki bu da yaklaşımın başarısını göstermektedir.

Çizelge 5.31. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,091	-0,756
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,080	-0,668
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,059	-0,545

Delaminasyon faktörünün (üst) en düşük değerleri için 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızı değerinde olduğu tespit edilmiştir. Önerilen bu işleme parametresi değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin hem tabakanın üst kısmında hem de tabakanın alt kısmında oluşan delaminasyon faktörü için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin sonuçları ise; Ek Açıklamalar E.'de verilmiştir.

5.6.2. Kerf Açısı İçin Doğrulama Deneyleri

CFRP kompozit malzemelerin her birinin kerf açısı (T) değerleri için doğrulama deneyleri yapılmıştır. M1 malzemesi için yapılan on altı farklı deneysel parametrede, gerçek verilerle elde edilen optimum kerf açısı değeri $1,386^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon işlemi ile tahmin edilen optimum kerf açısı; A4, B2, C1 ve D3

parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.17). Optimum kerf açısı değerleri Taguchi analizinin tahmini kombinasyonunda 1,464° olarak elde edilmiştir. Yapılan deney sonucunda, kerf açısı değeri 1,464° olarak tespit edilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen kerf açısı değerlerinin birbirine çok yakın çıkmasından dolayı Taguchi yönteminin kullanılmasının kerf açısının doğrulama testi sonuçlarının optimizasyonunun doğru olduğunu göstermektedir. Kerf açısı değerleri için optimal olan (A4, B2, C1 ve D3) ve tahmin edilen (A4, B2, C1 ve D3) kombinasyonları karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.32). Bu karşılaştırmalara göre, tahmin edilen kerf açısı değeri 1,530° iken deneysel çalışma sonucunda kerf açısı değeri 1,464° olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen kerf açısı ile Taguchi yöntemiyle tahmin edilen kerf açısı değeri arasında % 4,51 fark bulunmaktadır ki bu da yaklaşımın başarısını göstermektedir.

Çizelge 5.32. M1 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,586	-2,835
Optimum kombinasyon (deney)	A4B2C1D3	1,464	-3,603
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B2C1D3	1,530	-4,211

Kerf açısının en düşük değerleri için 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 1500 mm/dak nozul ilerleme hızı değerinde olduğu tespit edilmiştir. Önerilen bu işleme parametresi değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin kerf açısı değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin sonuçları ise; Ek Açıklamalar E.'de verilmiştir.

5.6.3. Delik Çapında Oluşan Dairesellik Hatası İçin Doğrulama Deneyleri

CFRP kompozit malzemelerin her birinin dairesellik hatası değerleri için doğrulama deneyleri yapılmıştır. M1 malzemesi için yapılan on altı farklı deneysel parametrede,

gerçek verilerle elde edilen optimum dairesellik hatası 0,718 mm olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon işlemi ile tahmin edilen optimum dairesellik hatası; A4, B1, C1 ve D1 parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.23). Optimum dairesellik hatası değerleri Taguchi analizinin tahmini kombinasyonunda 0,460 mm olarak elde edilmiştir. Yapılan deney sonucunda dairesellik hatası 0,438 mm olarak tespit edilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen dairesellik hatası değerlerinin birbirine çok yakın çıkmasından dolayı Taguchi yönteminin kullanılmasının dairesellik hatasının doğrulama testi sonuçlarının optimizasyonunun doğru olduğunu göstermektedir. dairesellik hatası değerleri için optimal olan (A4, B1, C1 ve D1) ve tahmin edilen (A4, B1, C1 ve D1) kombinasyonları karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.33). Bu karşılaştırmalara göre, tahmin edilen dairesellik hatası 0,460 mm iken deneysel çalışma sonucunda dairesellik hatası 0,438 mm olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen dairesellik hatası değeri ile Taguchi yöntemiyle tahmin edilen dairesellik hatası değeri arasında % 5,02 fark bulunmaktadır ki bu da yaklaşımın başarısını göstermektedir.

Çizelge 5.33. M1 malzemesinin dairesellik hatası değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,718	2,878
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	0,438	7,171
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	0,460	4,498

Dairesellik hatasının en düşük değerlerinin 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızı değerinde olduğu tespit edilmiştir. Önerilen bu işleme parametresi değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin dairesellik hatası değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin sonuçları ise; Ek Açıklamalar E.'de verilmiştir.

5.6.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Doğrulama Deneyleri

CFRP kompozit malzemelerin her birinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için doğrulama deneyleri yapılmıştır. M1 malzemesi için yapılan on altı farklı deneysel parametrede, gerçek verilerle elde edilen optimum ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1,013 μm olarak tespit edilmiştir. Optimizasyon işlemi ile tahmin edilen optimum ortalama yüzey pürüzlülüğü; A4, B3, C1 ve D2 parametreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır (Bkz. Çizelge 5.29). Optimum ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Taguchi analizinin tahmini kombinasyonunda 0,849 μm olarak elde edilmiştir. Ancak Taguchi ortogonal dizisi oluşturularak yapılan gerçek deneyler içerisinde A4, B3, C1 ve D2 parametreleri kullanılarak yapılan bir deney bulunmamaktadır. Bundan dolayı, bu işleme parametrelerinde yeniden deney yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,890 μm olarak tespit edilmiştir. Tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine çok yakın çıkmasından dolayı Taguchi yönteminin kullanılmasının ortalama yüzey pürüzlülüğünün doğrulama testi sonuçlarının optimizasyonunun doğru olduğunu göstermektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri için optimal olan (A4, B3, C1 ve D2) ve tahmin edilen (A4, B3, C1 ve D2) kombinasyonları karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.34). Bu karşılaştırmalara göre, tahmin edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,849 μm iken deneysel çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,890 μm olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ile Taguchi yöntemiyle tahmin edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri arasında % 4,61 fark bulunmaktadır ki bu da yaklaşımın başarısını göstermektedir.

Çizelge 5.34. M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,013	-0,108
Optimum kombinasyon (deney)	A4B3C1D2	0,890	1,012
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B3C1D2	0,849	0,582

Ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değerleri için 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızı değerinde olduğu tespit

edilmiştir. Önerilen bu işleme parametresi değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

M2, M3 malzemeleri ile birlikte pilot delik delinmiş olan M1pd, M2pd ve M3pd malzemelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin sonuçları ise; Ek Açıklamalar E.'de verilmiştir.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

CFRP kompozit malzemelerin, heterojenite ve termal hassasiyet nedeniyle, uygun koşullar sağlanmış olsa bile; delme, kesme, frezeleme, taşlama, vb. gibi konvansiyonel işlemlerle hasar görmeden işlenmesi oldukça zor olmaktadır. Modern imalat yöntemleri ile elde edilen yüksek doğruluk, karmaşık geometrilerde iyi yüzey elde edilmesi, iş takımının olmaması ve dolayısıyla çapaksız yüzey oluşturması gibi avantajlı yönleri modern imalat yöntemlerinin geleneksel imalat yöntemlerine göre üstünlükleri olduğunu göstermektedir.

ASJ ile işleme teknolojisi, hemen hemen her malzemeyi işlemek için uygun olan, ekstra takım ve sabitleme gerektirmeyen, kendinden temizlemenin sağlandığı soğuk işleme yöntemidir [117]. Bu avantajlarından dolayı, CFRP kompozit malzemeleri işlemek için de iyi bir alternatif işleme yöntemi olmaktadır [34,117,133]. ASJ ile işleme yöntemlerinde eritme/buharlaştırma olmadan kesme gerçekleştirildiği için, malzemede ısıdan etkilenen bölge oluşmamakta ve kesilen malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinde değişme gözlenmemektedir. Bu nedenle, ASJ çok yüksek sıcaklıklarda ve patlayıcı atmosferik ortamlarda tercih edilmektedir. ASJ ile kesilen yüzeylerde aşırı cüruf oluşmasına neden olmadığı için ikincil işlem ihtiyaçlarını ortadan kaldırmaktadır. Bu avantaj, maliyeti oldukça azaltmaktadır. Ayrıca; ASJ ile işleme yönteminin çok fazla parametre içermesi nedeniyle, bu parametrelerin optimizasyonu önemli olmaktadır. Bu optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için; donanım kapasitesi, işleme parametreleri ve çeşitli fiziksel olgular gibi pek çok faktörün dikkate alınması gerekmektedir.

CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonucunda, ASJ tezgâhının çok fazla parametre içermesi (su basıncı, nozul ilerleme hızı, nozul çapı, nozul yaklaşma

mesafesi, orifis türü, orifis çapı, aşındırıcı türü, aşındırıcı boyutu, delik çapı, vb.) her bir parametrenin ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilemesine neden olmaktadır. Bu parametrelerin yanı sıra işlenecek malzemenin kalınlığı ve FOA da ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir [40]. Ayrıca; fiber hacim oranı az bir oranda da olsa ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir [118].

CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile işlenmesinde optimum kesme parametrelerinin kullanılması durumunda malzeme içerisinde küçük boyutlarda da olsa bir takım çatlaklar meydana gelmektedir. Oluşan bu çatlaklar derinleşerek tabakalar arasında boşluk oluşturmaktadır. ASJ ile işleme esnasında aşındırıcı parçacıklar, oluşan bu boşluklara nüfuz ederek tabakalar arasında daha fazla hasara neden olmaktadır. Tabakalarda oluşan bu çatlaklar, artan su basıncına bağlı olarak suyun kinetik enerjisinin arttırmasından kaynaklanmaktadır. Jetin hareket hızındaki azalma, birim alan başına düşen aşındırıcı akış hızını arttırmakta, buna bağlı olarak da kesme hareketi gerçekleşmektedir. Geleneksel matkap ile delme esnasında delme işlemini gerçekleştiren itme kuvveti, ASJ ile delmede ise jet basıncıdır [114]. Ayrıca; ASJ ile işleme teknolojisi, arzu edilmeyen konik ve pürüzlü kerf duvarları oluşması gibi hasarlara da neden olmaktadır. Oluşan bu hasarlar, işleme için optimum ASJ parametrelerinin seçilmesiyle mümkün olan en iyi düzeye indirgenebilmektedir [117]. ASJ ile işlenmiş malzeme yüzeyinin pürüzlü olmasının nedeni; düşük su basıncından dolayı istenilen oranda malzeme kaldırılamamasından kaynaklanmaktadır. Buna ilaveten; yüksek nozul ilerleme hızı ve düşük aşındırıcı akış oranı kullanılmasıyla da ortalama yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenirken düşük nozul ilerleme hızı ve yüksek aşındırıcı akış oranı kullanılmasıyla ortalama yüzey pürüzlülüğünde iyileşme gözlenmektedir [71].

Yapılan çalışmalarda; CFRP kompozit malzemelerin geleneksel veya modern imalat yöntemleriyle işlenmelerinde birtakım hasar mekanizmaları gözlenmiş olup elde edilen sonuçlar varyans analizi (ANOVA), yapay sinir ağları modeli, bulanık çıkarım sistemi, harmoni araştırma algoritması, genetik algoritma, Taguchi optimizasyonu, çok amaçlı optimizasyon, analitik modelleme, gerilme analizi, sonlu elemanlar metodu, veri analizi, doğrusal regresyon tekniği ile analiz edildiği tespit edilmiştir.

Literatürdeki ve uygulamadaki bulgulardan yola çıkılarak yapılan bu çalışmada, CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinmesi sonucu oluşabilecek yüzey hasarları izlenmiştir. Deneylerde $[0^\circ/90^\circ]_s$, $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ ve $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$ FOA'da altı farklı CFRP kompozit malzeme (M1, M2, M3, M1pd, M2pd ve M3pd) kullanılmıştır. İşleme parametreleri olarak, dört farklı su basıncı, nozul ilerleme hızı, nozul yaklaşma mesafesi ve delik çapı kullanılarak CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delinme işlemi sonrasında işleme parametrelerinin delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmada maliyeti ve harcanan zamanı azaltmak amacıyla Taguchi optimizasyonu kullanılmıştır. Optimum işleme parametrelerini belirlemek ve işleme parametrelerinin delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerini analiz etmek için en uygun ortogonal dizi olan $L_{16} (4^4)$ seçilmiştir. En iyi delaminasyon faktörü (F_d), kerf açısı (T), dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri için en düşük değer alınmış olup daha iyi ürün kalitesi ve en düşük maliyet için en uygun olan S/N oranını hesaplamak için "daha küçük daha iyidir" seçilmiştir. CFRP kompozit malzemelerin ASJ ile delme işlemi sonrası işleme parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini belirlemek için Varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Analiz, % 5 anlamlılık seviyesi ve % 95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

Bu araştırmadan elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- M1 malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,78 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1 malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 87,01), nozul yaklaşma mesafesi (% 11,40), delik çapı (% 1,06) ve nozul ilerleme hızı (% 0,31) olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,013 μm olarak tespit edilmiştir.

- M1 malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,606 μm olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 96,60 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,39), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,40), delik çapı (% 3,10) ve nozul ilerleme hızı (% 2,71) olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,091 olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,383 olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 97,35 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 79,77), nozul yaklaşma mesafesi (% 12,43), delik çapı (% 2,83) ve nozul ilerleme hızı (% 2,32) olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,055 olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,241 olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 95,98 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.

- M1 malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,78), nozul yaklaşma mesafesi (% 11,31), delik çapı (% 1,63) ve nozul ilerleme hızı (% 0,26) olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,386° olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 3,329° olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 94,03 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1 malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 76,54), nozul yaklaşma mesafesi (% 14,32), delik çapı (% 1,63) ve nozul ilerleme hızı (% 0,87) olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,718 mm olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,553 mm olarak tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 1500 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1 malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.

- M2 malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,58 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2 malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 87,68), nozul yaklaşma mesafesi (% 10,17), delik çapı (% 0,51) ve nozul ilerleme hızı (% 0,21) olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,990 μm olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,708 μm olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 93,65 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 70,90), nozul yaklaşma mesafesi (% 11,49), nozul ilerleme hızı (% 6,17) ve delik çapı (% 5,10) olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,130 olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,572 olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 91,95 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 66,82), nozul yaklaşma mesafesi (% 15,47), nozul ilerleme hızı (% 4,92) ve delik çapı (% 4,73) olduğu tespit edilmiştir.

- M2 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,029 olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,380 olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,25 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2 malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 87,62), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,53), delik çapı (% 1,61) ve nozul ilerleme hızı (% 1,49) olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,208° olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 3,337° olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,77 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2 malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 94,77), nozul yaklaşma mesafesi (% 2,00), nozul ilerleme hızı (% 1,14) ve delik çapı (% 0,86) olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,719 mm olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,902 mm olarak tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.

- M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M2 malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,26 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3 malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 88,15), nozul yaklaşma mesafesi (% 7,22), nozul ilerleme hızı (% 2,14) ve delik çapı (% 1,76) olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,920 μm olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,617 μm olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 95,43 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 74,99), nozul yaklaşma mesafesi (% 10,41), delik çapı (% 5,30) ve nozul ilerleme hızı (% 4,73) olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,080 olarak tespit edilmiştir.

- M3 malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,306 olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 97,71 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3 malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 81,55), nozul yaklaşma mesafesi (% 10,13), delik çapı (% 4,77) ve nozul ilerleme hızı (% 1,27) olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,058 olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,243 olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,10 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3 malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 91,29), nozul yaklaşma mesafesi (% 4,96), nozul ilerleme hızı (% 1,94) ve delik çapı (% 0,91) olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,185° olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,994° olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,98 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.

- M3 malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 81,07), nozul yaklaşma mesafesi (% 6,48), nozul ilerleme hızı (% 4,51) ve delik çapı (% 3,54) olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,659 mm olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,565 mm olarak tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3 malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,57 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 88,75), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,65), delik çapı (% 1,21) ve nozul ilerleme hızı (% 0,96) olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,650 µm olarak tespit edilmiştir.

- M1pd malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,593 μm olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 96,83 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 81,29), nozul yaklaşma mesafesi (% 11,47), nozul ilerleme hızı (% 2,44) ve delik çapı (% 1,63) olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,071 olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,265 olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 96,18 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 79,77), nozul yaklaşma mesafesi (% 10,82), nozul ilerleme hızı (% 2,87) ve delik çapı (% 2,72) olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,039 olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,241 olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,24 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.

- M1pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,91), nozul yaklaşma mesafesi (% 12,76), delik çapı (% 1,44) ve nozul ilerleme hızı (% 1,13) olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,116° olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 3,172° olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 97,86 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M1pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 88,81), nozul yaklaşma mesafesi (% 7,54), nozul ilerleme hızı (% 0,78) ve delik çapı (% 0,72) olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,636 mm olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,063 mm olarak tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M1pd malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.

- M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,43 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 92,45), nozul yaklaşma mesafesi (% 5,26), nozul ilerleme hızı (% 1,20) ve delik çapı (% 0,52) olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,585 μm olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,558 μm olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,01 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 80,07), nozul yaklaşma mesafesi (% 10,52), delik çapı (% 4,35) ve nozul ilerleme hızı (% 3,08) olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,083 olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,343 olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,57 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 87,54), nozul yaklaşma mesafesi (% 9,12), delik çapı (% 1,43) ve nozul ilerleme hızı (% 1,17) olduğu tespit edilmiştir.

- M2pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,021 olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,166 olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,79 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,29), nozul yaklaşma mesafesi (% 11,71), nozul ilerleme hızı (% 2,78) ve delik çapı (% 2,01) olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,870° olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,900° olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,26 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M2pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 88,99), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,20), delik çapı (% 0,92) ve nozul ilerleme hızı (% 0,16) olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,649 mm olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,001 mm olarak tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değer; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.

- M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M2pd malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 98,98 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 89,07), nozul yaklaşma mesafesi (% 7,88), nozul ilerleme hızı (% 1,64) ve delik çapı (% 0,39) olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,580 μm olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,617 μm olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,69 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka girişindeki (üst) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 88,89), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,65), delik çapı (% 1,86) ve nozul ilerleme hızı (% 0,29) olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,050 olarak tespit edilmiştir.

- M3pd malzemesi için tabaka girişindeki (üst) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,177 olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 96,51 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, tabaka çıkışındaki (alt) delaminasyon faktörü üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,43), nozul yaklaşma mesafesi (% 9,87), nozul ilerleme hızı (% 4,06) ve delik çapı (% 0,15) olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en düşük delaminasyon faktörü değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 1,028 olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için tabaka çıkışındaki (alt) en yüksek delaminasyon faktörü değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 1,138 olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısı üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 99,22 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.
- M3pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, kerf açısı üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 87,95), nozul yaklaşma mesafesi (% 8,91), nozul ilerleme hızı (% 1,61) ve delik çapı (% 0,75) olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en düşük kerf açısı değeri 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,951° olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en yüksek kerf açısı değeri 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 2,724° olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatası üzerindeki etki derecelerini belirlemek için uygulanan ANOVA analizinde % 97,43 oranında güvenilirlik seviyesi elde edilmiştir.

- M3pd malzemesi için elde edilen sonuçlar, dairesellik hatası üzerinde en etkili faktörün sırasıyla su basıncı (% 82,47), nozul yaklaşma mesafesi (% 12,30), nozul ilerleme hızı (% 1,60) ve delik çapı (% 1,06) olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en düşük dairesellik hatası; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 12 mm delik çapında 0,618 mm olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesi için en yüksek dairesellik hatası; 3600 bar su basıncı, 4 mm nozul yaklaşma mesafesi, 3000 mm/dak nozul ilerleme hızı ve 14 mm delik çapında 0,873 mm olarak tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst ve alt) için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 3000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin kerf açısı için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2000 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.
- M3pd malzemesinin dairesellik hatası için Taguchi tasarımına göre tahmin edilen en düşük değerin; 5300 bar su basıncı, 1 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 750 mm/dak nozul ilerleme hızında olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak; delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en düşük değerleri, yüksek su basıncı ve düşük nozul yaklaşma mesafesinde, en yüksek değerler ise; düşük su basıncı ve yüksek nozul yaklaşma mesafesinde elde edilmiştir. Ayrıca; en düşük değerlerin pilot delik açılan malzemelerde elde edilmesinden dolayı bu yöntemin başarıyla sonuçlandığı tespit edilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü (0,580 μm) değeri; M3pd malzemesinde, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü (2,708 μm) değeri ise; M2 malzemesinde elde edilmiştir. En düşük delaminasyon faktörü (1,021) M2pd malzemesinde, en yüksek delaminasyon faktörü (1,572) ise; M2 malzemesinde elde edilmiştir. En düşük kerf açısı (0,870°), M3pd malzemesinde, en yüksek kerf açısı (3,337°) değeri ise; M2 malzemesinde elde edilmiştir. En düşük dairesellik hatası

(0,618 mm), M3pd malzemesinde, en yüksek dairesellik hatası (1,902 mm) ise; M2 malzemesinde elde edilmiştir. Buna ilaveten; işleme parametrelerinin etki derecelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Ele alınan tüm malzemelerde; delaminasyon faktörü, kerf açısı, dairesellik hatası ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde su basıncı ve nozul yaklaşma mesafesinin etkili olduğu, delik çapı ve nozul ilerleme hızının daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

ÖNERİLER

Üç farklı ($[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$, $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$ ve $[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}]_s$) fiber oryantasyon açısında (FOA) üretilmiş olan altı adet CFRP kompozit malzemenin ASJ ile delinebilirliğinin ve kesilebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada; deneylerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında elde edilen veriler esas alınarak, bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından, aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Farklı FOA'daki CFRP kompozit malzemelerin delinebilirliği araştırılabilir,
- İşleme parametrelerinden, nozul ilerleme hızı daha düşük oranda kullanılabilir,
- Farklı kalınlıklarda ve daha küçük çaplardaki CFRP kompozit malzemelerin delinebilirliği araştırılabilir,
- İşleme parametrelerinin etkilerini belirleyebilmek amacıyla, deneylerde sabit tutulan aşındırıcı akış oranı (350 g/dak), nozul çapı (0,80 mm) ve aşındırıcı türü (80 mesh garnet) değiştirilerek CFRP kompozit malzeme üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Mitchell, B.S., *An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers*. 2004: **John Wiley & Sons**.
2. Ashby, M.F. and D.R.H. Jones, *Chapter 1 - Engineering Materials and Their Properties*, in **Engineering Materials 1 (Fourth Edition)**. 2012, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 1-12.
3. Mazumdar, S., *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. 2001: **CrC press**.
4. Orifici, A., I. Herszberg, and R. Thomson, *Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure*. **Composite structures**, 2008. 86(1): p. 194-210.
5. Shukla M, Davim, J Paulo, *Nontraditional machining processes*. Vol. 39. 2013: **Springer**.
6. Gaitonde, V., et al., *Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites*. **Journal of materials processing technology**, 2008. 203(1): p. 431-438.
7. Mohan, N.S., A. Ramachandra, and S.M. Kulkarni, *Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites*. **Composite Structures**, 2005. 71(3-4): p. 407-413.
8. Arul, S., et al., *The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2006. 46(3-4): p. 252-259.
9. Davim, J.P., Reis,P., *Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study*. **Materials&Design**, 2003: p. 24.
10. Dandekar, C.R. and Y.C. Shin, *Modeling of machining of composite materials: A review*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2012. 57: p. 102-121.
11. Schwartz, M.M., *Composite materials handbook*. 1984: **McGraw-Hill**.

12. Türkmen, İ. and N.S. Köksal, *Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi*. **Celal Bayar University Journal of Science**, 2012. **8(2)**.
13. Tolun, C., *Dikdörtgen Elasto-Plastik Kompozit Plakların Dinamik Analizi*. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 2008. 1.
14. Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites : Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd ed. ed. 2008, **Boca Raton: Taylor & Francis**.
15. *Advanced composite materials - Chapter 7*, http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch07.pdf
16. Rahman, M., et al., *Machinability study of carbon fiber reinforced composite*. **Journal of Materials Processing Technology**, 1999. **89–90**: p. 292-297.
17. Teti, R., *Machining of Composite Materials*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2002. 51(2): p. 611-634.
18. *HexForce Reinforcements Technical Fabrics Handbook, 2010*, http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/HexForce_Technical_Fabrics_Handbook.pdf.
19. *Lucintel Market Research. Growth opportunities in the Carbon Fiber Market 2010–2015*, **LUCINTEL**, **Dallas, Texas**. http://www.lucintel.com/carbon_fiber_market.aspx. 2010.
20. Chung, D.D., *Composite materials: science and applications*. 2010: **Springer Science & Business Media**.
21. Demircan, K., *Çözülen Saç*, **Bilim ve Teknik Dergisi**, *Ekim 2012*.
22. *Introduction and Market Status, What are composite materials?* <http://www.graphene-info.com/graphene-composites>.
23. *Carbon Fiber and Human Hair* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Cfaser_haarrp.jpg.
24. Chawla, K.K., *Composite materials: science and engineering*. 2012: **Springer Science & Business Media**.

25. Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Rubio, J.C., Correira, A.E., Abrao A.M., Davim, J.P., *Delamination Analysis in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Artificial Neural Network Model*. **Material and Design**, 2008: p. 29.
26. Guu, Y.H., et al., *Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites*. **Journal of Materials Science**. 36(8): p. 2037-2043.
27. Leone, C., S. Genna, and V. Tagliaferri, *Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique*. **Optics and Lasers in Engineering**, 2014. 53: p. 43-50.
28. Kaw, A.K., *Mechanics of composite materials*. 2005: **CRC press**.
29. Arisawa, H., S. Akama, and H. Niitani, *High-Performance Cutting and Grinding Technology for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)*. **Mitsubishi Heavy Industries Technical Review**, 2012. 49(3): p. 3.
30. Katnam, K., L. Da Silva, and T. Young, *Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities*. **Progress in Aerospace Sciences**, 2013. 61: p. 26-42.
31. Soutis, C., *Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction*. **Materials Science and Engineering: A**, 2005. 412(1): p. 171-176.
32. Edwards, T., *Composite materials revolutionise aerospace engineering*. **Ingenia**, 2008. **36**: p. 24-28.
33. *Machining carbon fibre materials, 2010*
<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/C-2920-30.pdf>.
34. Hashish, M., *Trimming of CFRP Aircraft Components*. **2013 WJTA-IMCA Conference and Expo**, Houston, Texas, 2013.
35. Saleem, M., et al., *Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes*. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 2013. 55: p. 169-177.
36. Norris, G., et al., *Boeing 787 Dreamliner--Flying Redefined*. 2005: **Aerospace Technical Publications International**.
37. Gunston, B., *Airbus: The complete story*. 2009: **Haynes Pub**.

38. Mouritz, A., et al., *Review of advanced composite structures for naval ships and submarines*. **Composite structures**, 2001. **53**(1): p. 21-42.
39. "uçak yapılarını etkileyen yükler" <http://slonder.tripod.com/govde/govde.htm>. 2015.
40. Unde, P.D., et al., *Experimental Investigations into Abrasive Waterjet Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic*. **Journal of Composites**, 2015. 2015.
41. Chouhan, H., et al., *Laser machining of Kevlar fiber reinforced laminates—Effect of polyetherimide versus polypropylene matrix*. **Composites Science and Technology**, 2016. 134: p. 267-274.
42. Woo, S.-C. and T.-W. Kim, *High-strain-rate impact in Kevlar-woven composites and fracture analysis using acoustic emission*. **Composites Part B: Engineering**, 2014. 60: p. 125-136.
43. Fu, S., et al., *Combined effect of interfacial strength and fiber orientation on mechanical performance of short Kevlar fiber reinforced olefin block copolymer*. **Composites Science and Technology**, 2015. 108: p. 23-31.
44. Hwang, H.-S., et al., *Increased interyarn friction through ZnO nanowire arrays grown on aramid fabric*. **Composites Science and Technology**, 2015. 107: p. 75-81.
45. Ghafarizadeh, S., J.-F. Chatelain, and G. Lebrun, *Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2016: p. 1-11.
46. Echaabi, J., F. Trochu, and R. Gauvin, *Review of failure criteria of fibrous composite materials*. **Polymer Composites**, 1996. 17(6): p. 786-798.
47. Drakonakis, V.M., et al., *Matrix hybridization in the interlayer for carbon fiber reinforced composites*. **Polymer Composites**, 2010. 31(11): p. 1965-1976.
48. Hoisington, M.A. and J.C. Seferis, **SAMPE Quart.**, 24,10. 1993.
49. Gilbert, E.N., B.S. Hayes, and J.C. Seferis, **Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.**, 34, 245. 2003.
50. Kılıçkap, E., *CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi*. **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, 2010: p. 77.

51. El-Sonbaty, I., U. Khashaba, and T. Machaly, *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*. **Composite structures**, 2004. 63(3): p. 329-338.
52. Abrao, A., et al., *The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite*. **Materials & Design**, 2008. 29(2): p. 508-513.
53. Bayraktar, Ş. and Y. Turgut, *Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma*. **3. Ulusal Talaşlı imalat Sempozyumu**, 2012.
54. Tsao, C. and H. Hocheng, *Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials*. **International journal of mechanical sciences**, 2007. 49(8): p. 983-988.
55. Durão, L.M.P., et al., *Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates*. **Composite Structures**, 2010. 92(7): p. 1545-1550.
56. Abrao, A., et al., *Drilling of fiber reinforced plastics: A review*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007. 186(1): p. 1-7.
57. König, W., et al., *Machining of Fibre Reinforced Plastics*. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 1985. 34(2): p. 537-548.
58. Velayudham, A., R. Krishnamurthy, and T. Soundarapandian, *Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform*. **Materials Science and Engineering: A**, 2005. 412(1-2): p. 141-145.
59. Alberdi, A., et al., *An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015: p. 1-14.
60. Hocheng, H. and C. Tsao, *Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003. 140(1): p. 335-339.
61. Mohan, N., S. Kulkarni, and A. Ramachandra, *Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007. 186(1): p. 265-271.
62. Davim, J.P., P. Reis, and C.C. Antonio, *Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up*. **Composites Science and Technology**, 2004. 64(2): p. 289-297.

63. Palanikumar, K., et al., *Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics*. **Journal of Composite Materials**, 2008. 42(24): p. 2585-2597.
64. Kavadi, B., et al., *A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic*. **Procedia Technology**, 2014. 14: p. 457-464.
65. Liu, D., Y. Tang, and W.L. Cong, *A review of mechanical drilling for composite laminates*. **Composite Structures**, 2012. 94(4): p. 1265-1279.
66. Persson, E., I. Eriksson, and L. Zackrisson, *Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates*. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 1997. 28(2): p. 141-151.
67. Krishnamoorthy, A., et al., *Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composite plates by Thermo graphic technique*. **Materials Today: Proceedings**, 2015. 2(4): p. 3132-3139.
68. Stone, R. and K. Krishnamurthy, *A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 1996. 36(9): p. 985-1003.
69. Wong, T., S. Wu, and G. Croy. *An analysis of delamination in drilling composite materials*. in **14th National SAMPE Technical Conference**. 1982.
70. Khashaba, U., *Delamination in drilling GFR-thermoset composites*. **Composite Structures**, 2004. 63(3): p. 313-327.
71. Miller, J., E.D. Eneyew, and M. Ramulu, *Machining and Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites*. **SAMPE Journal**, Volume 49, No.2, 2013.
72. Hashish, M., *Waterjet Trimming and Drilling of CFRP Components for Advanced Aircraft*. SME, 2014 **Technical Paper**, 2014.
73. Hollaway, L.C. and M. Leeming, *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1999: **Elsevier**.
74. Täljsten, B. and L. Elfgren, *Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods*. **Composites Part B: Engineering**, 2000. 31(2): p. 87-96.

75. Kolesnikov, B., L. Herbeck, and A. Fink, *CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints*. **Composite Structures**, 2008. **83**(4): p. 368-380.
76. Jain, V.K., *Advanced machining processes*. 2009: **Allied publishers**.
77. Weller, E., *Nontraditional machining processes*. 1984: **Society of manufacturing engineers**.
78. Cogun, C., *Computer-aided system for selection of nontraditional machining operations*. **Computers in industry**, 1993. 22(2): p. 169-179.
79. Şahin, M.S., *Aşındırıcı parçacık akış metodu ile işlem parametrelerinin hidrolik valflerin yağ kanallarının yüzey kalitesine etkisinin incelenmesi*. 2012, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**.
80. Aich, U., et al., *Abrasive water jet cutting of borosilicate glass*. **Procedia Materials Science**, 2014. 6: p. 775-785.
81. Benedict, G.F., *Nontraditional manufacturing processes*. Vol. 19. 1987: **CRC press**.
82. AW, M. and R. KOVACEVIC, *Principles of abrasive water jet machining*. 1998, **Springer Ltd.**, London.
83. Zeng, J. and T.J. Kim, *An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting*. **Wear**, 1996. 193(2): p. 207-217.
84. Zeng, J. and T.J. Kim, *An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics*. **Wear**, 1996. 199(2): p. 275-282.
85. Ferraris, E., et al., *Shaping of engineering ceramics by electro, chemical and physical processes*. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2016. 65(2): p. 761-784.
86. Lebar, A., et al., *AWJ Cutting Process Control by Means of Process Visualisation*. **Procedia Engineering**, 2016. 149: p. 224-228.
87. Hoogstrate, A., T. Susuzlu, and B. Karpuschewski, *High performance cutting with abrasive waterjets beyond 400 MPa*. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2006. 55(1): p. 339-342.
88. Hoogstrate, A., et al., *Opportunities in abrasive water-jet machining*. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 1997. 46(2): p. 697-714.

89. Chung, Y., *Development of prediction technique for the geometry of the abrasive waterjet generated kerf*. 1992.
90. Neusen, K., et al. *Abrasive waterjet cutting of metal matrix composites*. in **Proceedings of the Fourth US Water Jet Conference**, ASME, New York. 1987.
91. Yie, G. *Cutting Hard Mater Abrasive Entrained Water jet—a Progress Report*. in **VII International Symposium on Jet Cutting Technology**. 1984.
92. Donnan, P. *Abrasive Jet Cutting Development for Specialist Industrial Applications*. in **Seventh International Symposium on Jet Cutting Technology**. 1984.
93. Vora, A., *Investigation of the Characteristics of the Kerf and the Surface Generated in the Course of Cutting Titanium with Abrasive Waterjets*. 1988.
94. Geskin, E.S., W. L. Chen, and W.Z. Le, " *Glass Shaping by the Use of Abrasive Waterjet*. " **Glass Digest**. November, pp. 60-64. 1989.
95. Hashish, M., " *Application of Abrasive Waterjet to Metal Cutting*". **Proceedings of Conference on Nontraditional Machining**, pp. 1-11. 1986.
96. Dittrich, M., et al., *Process analysis of water abrasive fine jet structuring of ceramic surfaces via design of experiment*. **Procedia Cirp**, 2014. 14: p. 442-447.
97. Shah, S.C., *Integration of CAD/CAM system into a waterjet cutting cell*. 1988.
98. Schroter, D.C., " *Motion Equipment Designs for Hydroabrasive Waterjet Systems*". **Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology**. Amsterdam, paper H1. 1990.
99. Johnson, S.T., " *Integration of Ultra-High Water Pressure Jet Cutting with Multi Axis Control Devices* ". **Proceedings of the 6th American Water Jet Conference**. Houston, pp. 263-274. 1990.
100. Ohya, H. and M. Hoshina., " *Research and Development into Ultra-high Pressure Jet Boring Machine* " **Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology**, Amsterdam, paper H4. 1990.
101. Karakurt, İ., G. Aydın, and K. Aydın, *Su jeti teknolojisinin madencilik sektöründeki uygulamalarının değerlendirilmesi*. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 2010. 16(1): p. 105-112.

102. Duflou, J., J.-P. Kruth, and E. Bohez, *Contour cutting of pre-formed parts with abrasive waterjet using 3-axis nozzle control*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2001. 115(1): p. 38-43.
103. Bandyopadhyay, S., et al., *Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd: YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2002. 127(1): p. 83-95.
104. Chen SL, Yan BH, and H. FY, *Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V*. **J Mater Process Technol** 87:107-111. 1999.
105. Akkurt, A., *Ticari Saf Alüminyum ve Al-6061 Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Aşındırıcı Su Jeti ile Kesilmesi Uygulamalarında Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi*. **Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi**, 2005. 8(1).
106. Kartal, F., *AISI 1050 çeliğinin aşındırıcı su jeti ile tornalanmasında farklı parametrelerin talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesi*, in *Doktora Tezi*, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**. 2015.
107. Phapale, K., et al., *Delamination Characterization and Comparative Assessment of Delamination Control Techniques in Abrasive Water Jet Drilling of CFRP*. **Procedia Manufacturing**, 2016. 5: p. 521-535.
108. Alberdi, A., et al., *Composite Cutting with Abrasive Water Jet*. **Procedia Engineering**, 2013. 63: p. 421-429.
109. Wang, J., *Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics*. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2007. 49(3): p. 306-316.
110. Yong, Z. and R. Kovacevic, *Effects of water-mixture film on impact contact in abrasive waterjet machining*. **International journal of mechanical sciences**, 1997. 39(6): p. 729-739.
111. Kovacevic, R., et al., *State of the art of research and development in abrasive waterjet machining*. **Journal of manufacturing science and engineering**, 1997. 119(4B): p. 776-785.
112. Miller, D., *Micromachining with abrasive waterjets*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2004. 149(1): p. 37-42.
113. Abrate, S. and D. Walton, *Machining of composite materials. Part II: Non-traditional methods*. **Composites manufacturing**, 1992. 3(2): p. 85-94.

114. Shanmugam, D.K., T. Nguyen, and J. Wang, *A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining*. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 2008. 39(6): p. 923-929.
115. Gupta, V., et al., *Minimization of kerf taper angle and kerf width using Taguchi's method in abrasive water jet machining of marble*. **Procedia Materials Science**, 2014. 6: p. 140-149.
116. Azmir, M.A. and A.K. Ahsan, *A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2009. 209(20): p. 6168-6173.
117. Patel, S. and A. Shaikh, *A Review on Machining of Fiber Reinforced Plastic using Abrasive Water jet*. **International Journal of Innovative Technology & Adaptive Management (IJITAM)**, 2013.
118. Azmir, M.A. and A.K. Ahsan, *Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining*. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008. 198(1-3): p. 122-128.
119. Rao, D.B., D. Baskey, and R. Rawat, *Water jet cutter: an efficient tool for composite product development*. 2009.
120. S. Libuse, et al., *Water jet Cutting and Surface Quality Nonconventional Technologies Review*, **Romanian Association of Nonconventional Technologies, Bucharest, Romania**. 2013.
121. Ramulu, M. and D. Arola, *Water jet and abrasive water jet cutting of unidirectional graphite/epoxy composite*. **Composites**, 1993. 24(4): p. 299-308.
122. Ho-Cheng, H., *A failure analysis of water jet drilling in composite laminates*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 1990. 30(3): p. 423-429.
123. Shipway, P., G. Fowler, and I. Pashby, *Characteristics of the surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets*. **Wear**, 2005. 258(1): p. 123-132.
124. Hashish, M., *Characteristics of surfaces machined with abrasive-waterjets*. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 1991. 113(3): p. 354-362.
125. Li, F., E. Geskin, and L. Tismenetskiy. *Feasibility study of abrasive waterjet polishing*. in *BHR Group Conference Series Publication*. 1996. **Mechanical Engineering Publications Limited**.

126. Ojmertz, K.M.C., M. Jonasson, and G. Holmqvist. *Analysis of surfaces produced by abrasive waterjet milling techniques*. in *BHR Group Conference Series Publication*. 1996. **Mechanical Engineering Publications Limited**.
127. Ojmertz, K.M.C., *A Study on Abrasive Water Jet Milling*, Ph.D. thesis, **Chalmers University of Technology**, Gotenborg, Sweden. 1997.
128. Hashish, M. *Milling with abrasive waterjets: a preliminary investigation*. in **Proceedings of 4th US Waterjet Conference**, Berkeley, CA. 1987.
129. Hashish, M., *Controlled-depth milling of isogrid structures with AWJs*. **Journal of manufacturing science and engineering**, 1998. **120**(1): p. 21-27.
130. Hashish, M., *The effect of beam angle in abrasive-waterjet machining*. **Journal of engineering for industry**, 1993. 115(1): p. 51-56.
131. Ojmertz, K. *Abrasive waterjet milling: an experimental investigation*. in **Proc. of 7th Am. Water Jet Conf.**, Seattle, USA. 1993.
132. Mayuet, P.F., et al., *SOM/SEM based Characterization of Internal Delaminations of CFRP Samples Machined by AWJM*. **Procedia Engineering**, 2015. 132: p. 693-700.
133. Miron, A.V., et al., *Studies on Water Jet Cutting of 2D Parts Made From Carbon Fiber Composite Materials*. **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, 2013. 11(2).
134. Eneyew, E.D. and M. Ramulu, *Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites*. **Journal of Materials Research and Technology**, 2014. 3(4): p. 354-362.
135. Ramirez, C., et al., *Tool Wear Monitoring and Hole Surface Quality During CFRP Drilling*. **Procedia CIRP**, 2014. 13: p. 163-168.
136. Grilo, T.J., et al., *Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries*. **Composites Part B: Engineering**, 2013. 45(1): p. 1344-1350.
137. Karpat, Y., O. Bahtiyar, and B. Değer, *Milling Force Modelling of Multidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates*. **Procedia CIRP**, 2012. 1: p. 460-465.
138. Kakinuma, Y., et al., *Ultrafast Feed Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastics*. **Procedia CIRP**, 2015. **35**: p. 91-95.

139. Yanen, C. and M.Y. Solmaz, *Tabakalı Hibrit Kompozitlerin Bireysel Zırh Malzemesi Olarak Üretimi Ve Balistik Performanslarının İncelenmesi*. **El-Cezeri Journal of Science and Engineering**, 2016. 3(2).
140. Acar, V., et al., *Karbon Elyaf Takviyeli Prepreg Kompozitlerde Arayüzey Mekaniğinin Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi*. **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 2013. 10(3): p. 43-51.
141. Akbulut, H., et al., *Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Nümerik Analizi*.
142. Çelik, Y.H. and E. Kılıçkap, *Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Çubukların Aşınma Davranışlarının Araştırılması*. **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 2016. 13(3): p. 69-75.
143. Sarıbyık, M., M. Turhan, and A. Sarıbyık, *Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Mekanik Özelliklerine Elyaf Hacim Oranlarının Etkileri Fiber Volume Fraction Effect To Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Plastics*. 2009.
144. Koplev, A., A. Lystrup, and T. Vorm, *The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP*. **Composites**, 1983. 14(4): p. 371-376.
145. Wang, J. and D. Guo, *A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites*. **Journal of materials processing technology**, 2002. 121(2): p. 390-394.
146. Wang, J., *Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites—cutting performance, erosive process and predictive models*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 1999. 15(10): p. 757-768.
147. Wang, J., *A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology*. **Journal of materials processing technology**, 1999. 94(1): p. 30-35.
148. Akıncıoğlu, G., et al., *Taguchi optimization of machining parameters in drilling of AISI D2 steel using cryo-treated carbide drills*. **Sādhanā**, 2017. 42(2): p. 213-222.
149. Khan, A.A. and M. Haque, *Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass*. **Journal of materials processing technology**, 2007. 191(1): p. 404-407.
150. Shanmugam, D. and S. Masood, *An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites*. **Journal of materials processing technology**, 2009. 209(8): p. 3887-3893.

151. Wang, J. and W. Wong, *A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 1999. 39(6): p. 855-870.
152. Chen, L., E. Siores, and W. Wong, *Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials*. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 1996. 36(11): p. 1201-1206.
153. Babu, M.K. and O.K. Chetty, *A study on the use of single mesh size abrasives in abrasive waterjet machining*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2006. 29(5-6): p. 532-540.
154. Hascalik, A., U. Çaydaş, and H. Gürün, *Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy*. **Materials & Design**, 2007. 28(6): p. 1953-1957.
155. Bilge, T., et al., *Kompakt laminatın delinmesinde boyutsal tamlık için delme parametrelerinin gri ilişkisel analiz ile optimizasyonu*. **Journal of Composite Materials**, 2016. 51(19).
156. Bilge, T. and A.R. Motorcu, *Kompakt laminat kompozitlerin parmak freze ile delinmesinde takım aşınmasının yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık üzerine etkileri*. **İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi**, 2017. 6(3): p. 180-192.

EK AÇIKLAMALAR A.

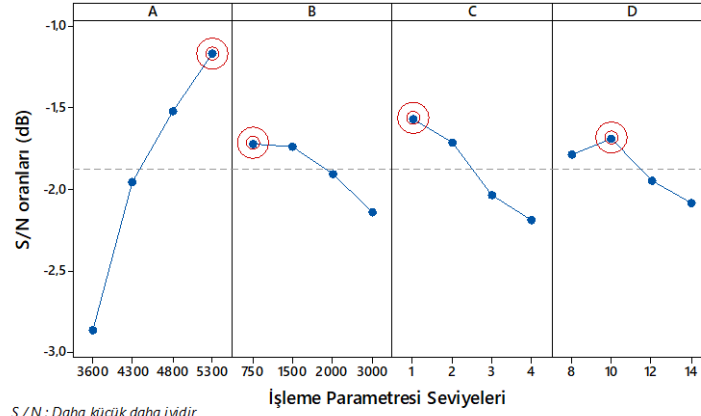
DELAMİNASYON FAKTÖRÜ İÇİN DENEY/TEST SONUÇLARI

Çizelge Ek A.1. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

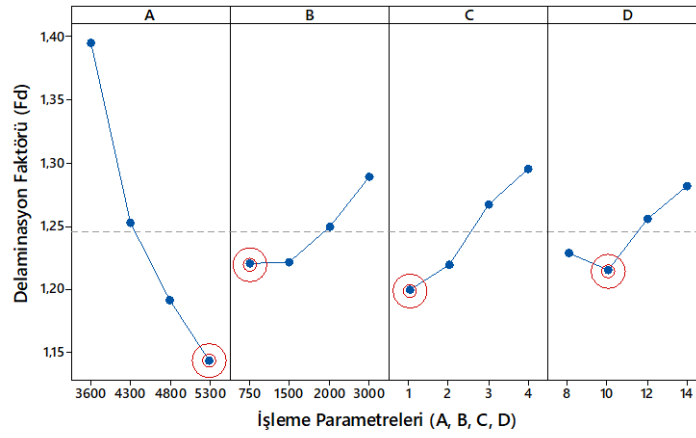
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (üst) (F _d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,283	-2,164
2	3600	1500	2	10	1,294	-2,242
3	3600	2000	3	12	1,431	-3,114
4	3600	3000	4	14	1,572	-3,928
5	4300	750	2	12	1,258	-1,996
6	4300	1500	1	14	1,219	-1,718
7	4300	2000	4	8	1,269	-2,071
8	4300	3000	3	10	1,264	-2,036
9	4800	750	3	14	1,203	-1,605
10	4800	1500	4	12	1,204	-1,612
11	4800	2000	1	10	1,167	-1,338
12	4800	3000	2	8	1,192	-1,523
13	5300	750	4	10	1,138	-1,126
14	5300	1500	3	8	1,171	-1,372
15	5300	2000	2	14	1,133	-1,088
16	5300	3000	1	12	1,130	-1,061

Çizelge Ek A.2. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F _d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-2,862	-1,723	-1,570	-1,783
2	-1,955	-1,736	-1,712	-1,685
3	-1,520	-1,903	-2,032	-1,946
4	-1,162	-2,137	-2,185	-2,085
Delta	1,700	0,414	0,614	0,399
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,395	1,221	1,200	1,229
2	1,253	1,222	1,219	1,216
3	1,191	1,250	1,267	1,256
4	1,143	1,289	1,296	1,282
Delta	0,252	0,069	0,096	0,066
Rank	1	3	2	4



a)



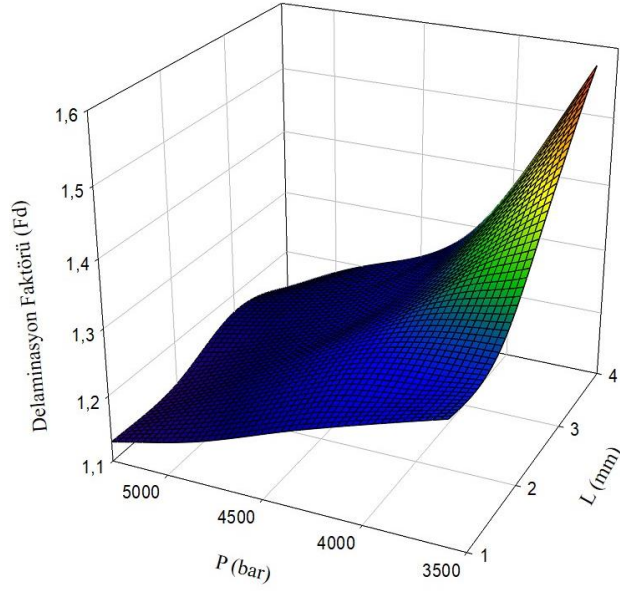
b)

Şekil Ek A.1. M2 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.3. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,1434	0,0478	11,17	0,039	70,90
B	3	0,0125	0,0042	0,97	0,509	6,17
C	3	0,0232	0,0077	1,81	0,319	11,49
D	3	0,0103	0,0034	0,80	0,569	5,10
Hata	3	0,0128	0,0043	-	-	6,35
Toplam	15	0,2022	-	-	-	100

S = 0,065 R-Sq = % 93,65 R-Sq (adj) = % 68,27



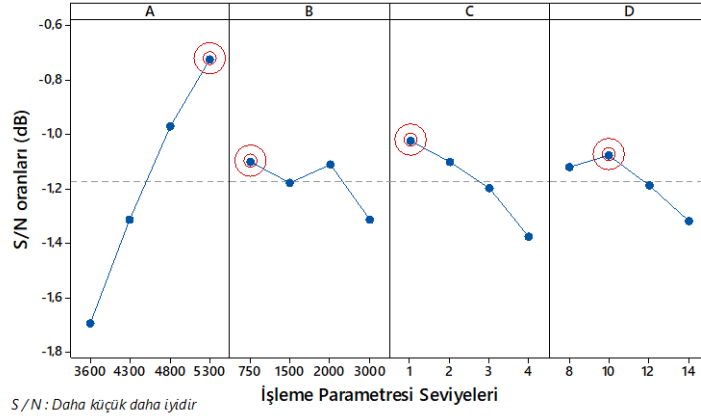
Şekil Ek A.2. M2 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.4. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

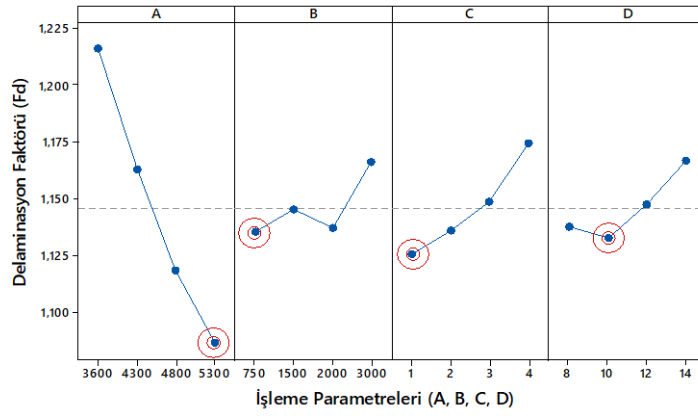
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (üst) (F_d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,170	-1,363
2	3600	1500	2	10	1,184	-1,466
3	3600	2000	3	12	1,206	-1,626
4	3600	3000	4	14	1,306	-2,320
5	4300	750	2	12	1,165	-1,323
6	4300	1500	1	14	1,157	-1,267
7	4300	2000	4	8	1,166	-1,337
8	4300	3000	3	10	1,165	-1,326
9	4800	750	3	14	1,123	-1,008
10	4800	1500	4	12	1,140	-1,136
11	4800	2000	1	10	1,096	-0,798
12	4800	3000	2	8	1,114	-0,941
13	5300	750	4	10	1,085	-0,711
14	5300	1500	3	8	1,101	-0,837
15	5300	2000	2	14	1,081	-0,673
16	5300	3000	1	12	1,080	-0,671

Çizelge Ek A.5. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,694	-1,101	-1,025	-1,120
2	-1,313	-1,177	-1,101	-1,075
3	-0,971	-1,109	-1,199	-1,189
4	-0,723	-1,315	-1,376	-1,317
Delta	0,971	0,213	0,351	0,241
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,216	1,136	1,126	1,138
2	1,163	1,145	1,136	1,133
3	1,118	1,137	1,149	1,148
4	1,087	1,166	1,174	1,167
Delta	0,130	0,031	0,049	0,034
Rank	1	4	2	3



a)



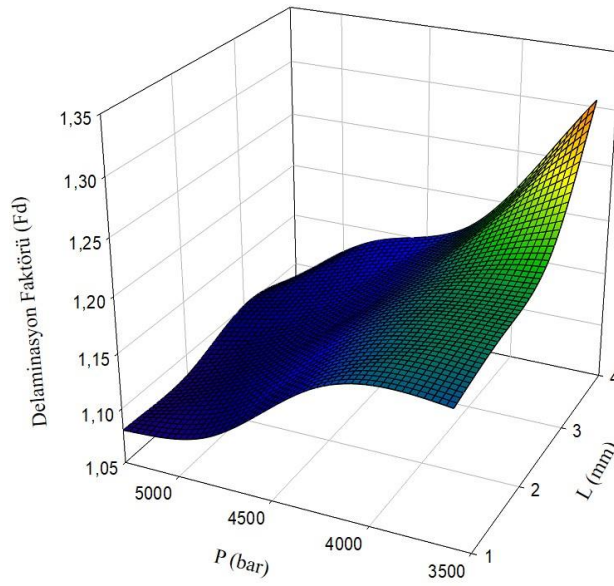
b)

Şekil Ek A.3. M3 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.6. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0381	0,0127	16,41	0,023	74,99
B	3	0,0024	0,0008	1,04	0,489	4,73
C	3	0,0053	0,0018	2,28	0,258	10,41
D	3	0,0027	0,0009	1,16	0,453	5,30
Hata	3	0,0023	0,0008	-	-	4,57
Toplam	15	0,0508	-	-	-	100

S = 0,028 R-Sq = % 95,43 R-Sq (adj) = % 77,16



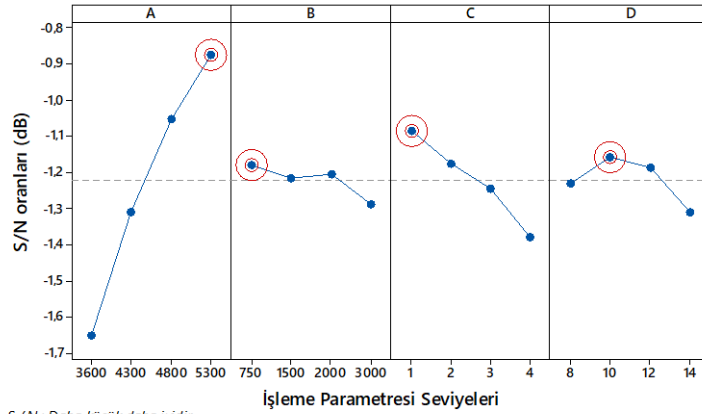
Şekil Ek A.4. M3 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.7. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (Üst) (F_d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,182	-1,450
2	3600	1500	2	10	1,192	-1,525
3	3600	2000	3	12	1,199	-1,579
4	3600	3000	4	14	1,265	-2,042
5	4300	750	2	12	1,157	-1,265
6	4300	1500	1	14	1,150	-1,212
7	4300	2000	4	8	1,181	-1,448
8	4300	3000	3	10	1,163	-1,311
9	4800	750	3	14	1,136	-1,111
10	4800	1500	4	12	1,140	-1,141
11	4800	2000	1	10	1,111	-0,914
12	4800	3000	2	8	1,127	-1,040
13	5300	750	4	10	1,106	-0,875
14	5300	1500	3	8	1,120	-0,982
15	5300	2000	2	14	1,082	-0,685
16	5300	3000	1	12	1,071	-0,759

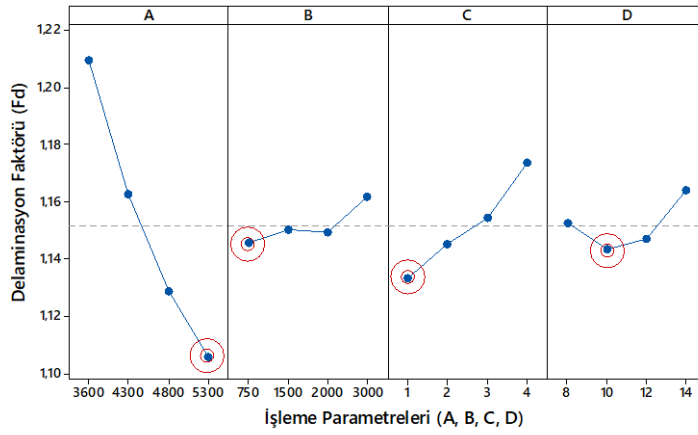
Çizelge Ek A.8. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,649	-1,175	-1,084	-1,230
2	-1,309	-1,215	-1,129	-1,156
3	-1,051	-1,156	-1,246	-1,186
4	-0,825	-1,288	-1,376	-1,262
Delta	0,824	0,132	0,292	0,106
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,209	1,143	1,133	1,153
2	1,163	1,150	1,139	1,143
3	1,129	1,145	1,155	1,147
4	1,100	1,162	1,173	1,158
Delta	0,110	0,018	0,040	0,015
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



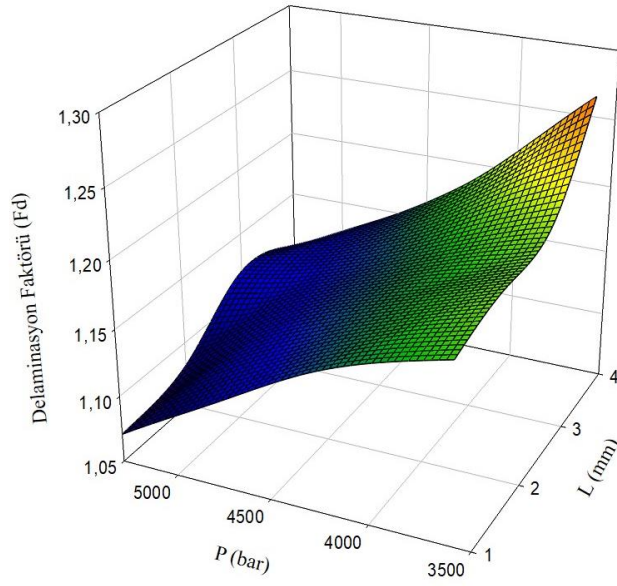
b)

Şekil Ek A.5. M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.9. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0267	0,0089	25,66	0,012	81,29
B	3	0,0008	0,0003	0,77	0,582	2,44
C	3	0,0038	0,0013	3,62	0,159	11,47
D	3	0,0005	0,0002	0,51	0,700	1,63
Hata	3	0,0010	0,0003	-	-	3,17
Toplam	15	0,0328	-	-	-	100

S = 0,019 R-Sq = % 96,83 R-Sq (adj) = % 84,16



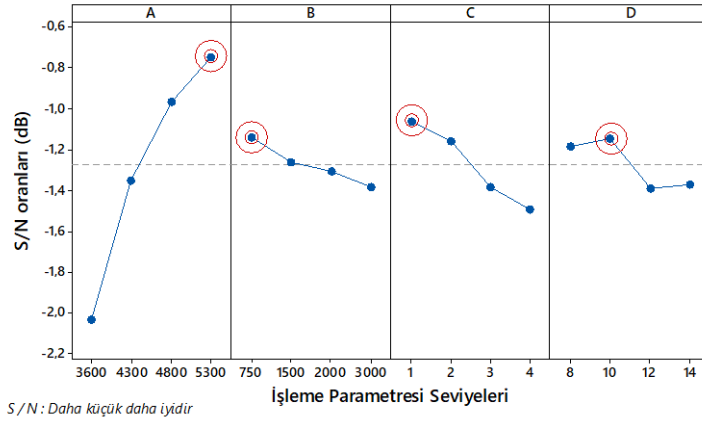
Şekil Ek A.6. M1pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.10. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

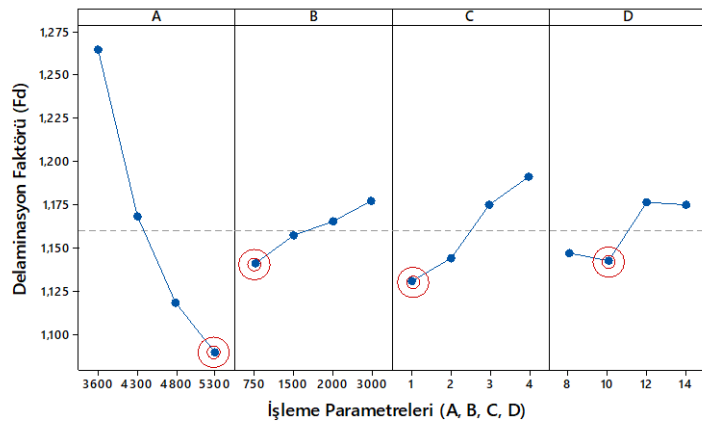
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (üst) (F_d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,194	-1,537
2	3600	1500	2	10	1,218	-1,711
3	3600	2000	3	12	1,304	-2,308
4	3600	3000	4	14	1,343	-2,564
5	4300	750	2	12	1,164	-1,318
6	4300	1500	1	14	1,155	-1,250
7	4300	2000	4	8	1,182	-1,451
8	4300	3000	3	10	1,172	-1,382
9	4800	750	3	14	1,119	-0,975
10	4800	1500	4	12	1,153	-1,235
11	4800	2000	1	10	1,091	-0,760
12	4800	3000	2	8	1,109	-0,897
13	5300	750	4	10	1,087	-0,728
14	5300	1500	3	8	1,104	-0,859
15	5300	2000	2	14	1,084	-0,697
16	5300	3000	1	12	1,083	-0,692

Çizelge Ek A.11. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-2,0299	-1,1394	-1,0596	-1,1858
2	-1,3499	-1,2636	-1,1556	-1,1453
3	-0,9668	-1,3038	-1,3808	-1,388
4	-0,7437	-1,3835	-1,4943	-1,3712
Delta	1,2862	0,2441	0,4347	0,2427
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,265	1,141	1,131	1,147
2	1,168	1,157	1,143	1,142
3	1,118	1,165	1,175	1,176
4	1,089	1,177	1,191	1,175
Delta	0,175	0,036	0,061	0,034
Rank	1	3	2	4



a)



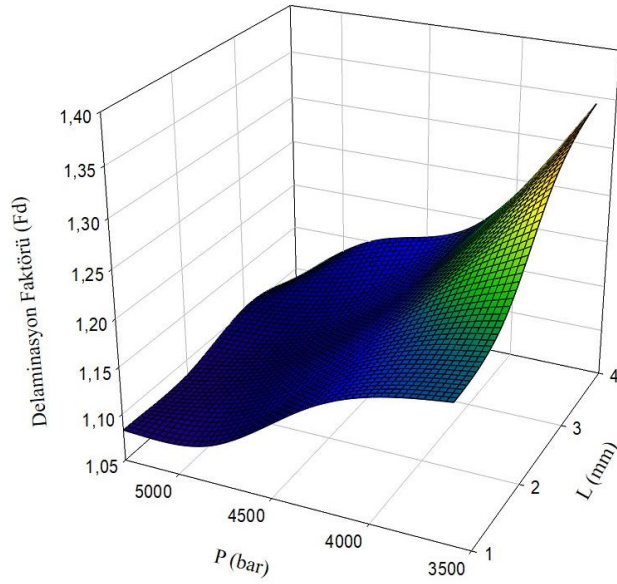
b)

Şekil Ek A.7. M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.12. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0711	0,0237	40,27	0,006	80,07
B	3	0,0027	0,0009	1,55	0,364	3,08
C	3	0,0093	0,0031	5,29	0,102	10,52
D	3	0,0039	0,0013	2,19	0,269	4,35
Hata	3	0,0018	0,0006	-	-	1,99
Toplam	15	0,0889	-	-	-	100

S = 0,024 R-Sq = % 98,01 R-Sq (adj) = % 90,06



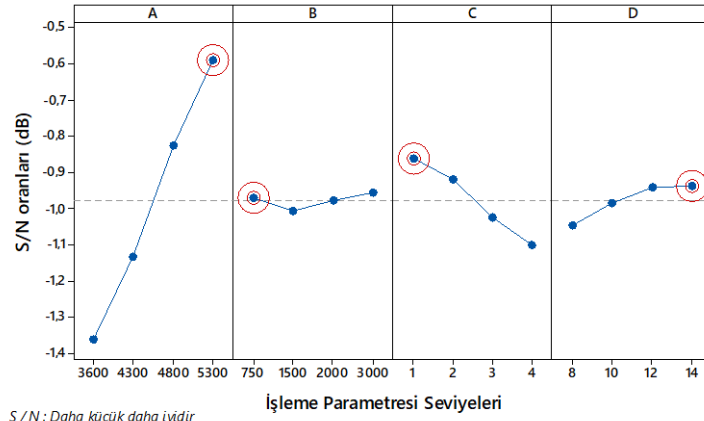
Şekil Ek A.8. M2pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.13. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları.

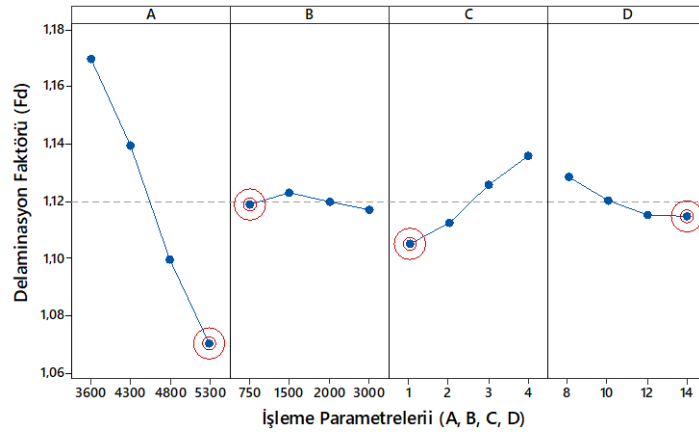
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (üst) (F _d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,166	-1,332
2	3600	1500	2	10	1,168	-1,345
3	3600	2000	3	12	1,169	-1,354
4	3600	3000	4	14	1,177	-1,412
5	4300	750	2	12	1,125	-1,024
6	4300	1500	1	14	1,121	-0,989
7	4300	2000	4	8	1,165	-1,329
8	4300	3000	3	10	1,147	-1,188
9	4800	750	3	14	1,101	-0,834
10	4800	1500	4	12	1,118	-0,967
11	4800	2000	1	10	1,085	-0,705
12	4800	3000	2	8	1,096	-0,796
13	5300	750	4	10	1,083	-0,695
14	5300	1500	3	8	1,087	-0,721
15	5300	2000	2	14	1,061	-0,515
16	5300	3000	1	12	1,050	-0,423

Çizelge Ek A.14. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F _d) (üst)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,361	-0,971	-0,862	-1,045
2	-1,132	-1,005	-0,920	-0,983
3	-0,825	-0,976	-1,024	-0,942
4	-0,589	-0,955	-1,101	-0,938
Delta	0,772	0,051	0,239	0,107
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,170	1,117	1,105	1,128
2	1,139	1,123	1,112	1,120
3	1,100	1,120	1,126	1,115
4	1,070	1,119	1,136	1,115
Delta	0,099	0,006	0,031	0,014
Rank	1	4	2	3



a)



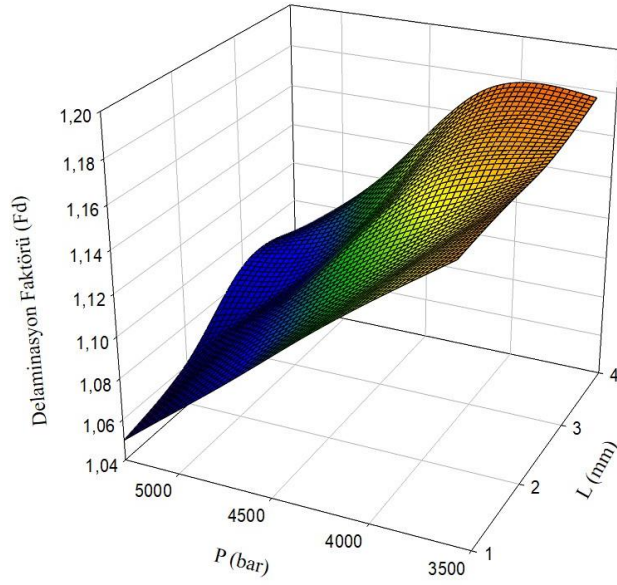
b)

Şekil Ek A.9. M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (üst) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.15. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0229	0,0076	290,57	0,000	88,89
B	3	0,0001	0,0000	0,94	0,519	0,29
C	3	0,0022	0,0007	28,28	0,011	8,65
D	3	0,0005	0,0002	6,08	0,086	1,86
Hata	3	0,0001	0,0000	-	-	0,31
Toplam	15	0,0258	-	-	-	100

S = 0,005 R-Sq = % 99,69 R-Sq (adj) = % 98,47



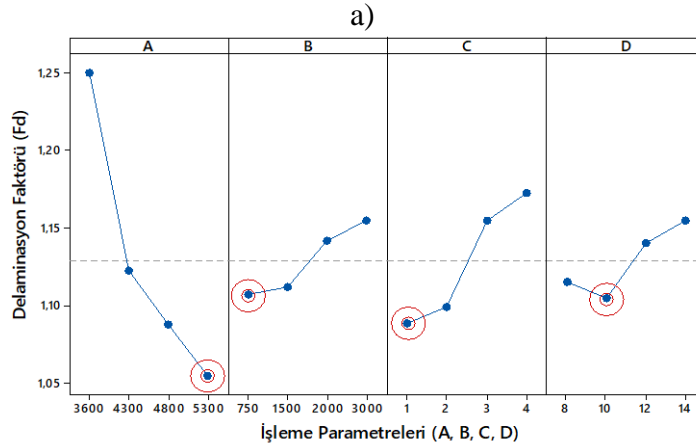
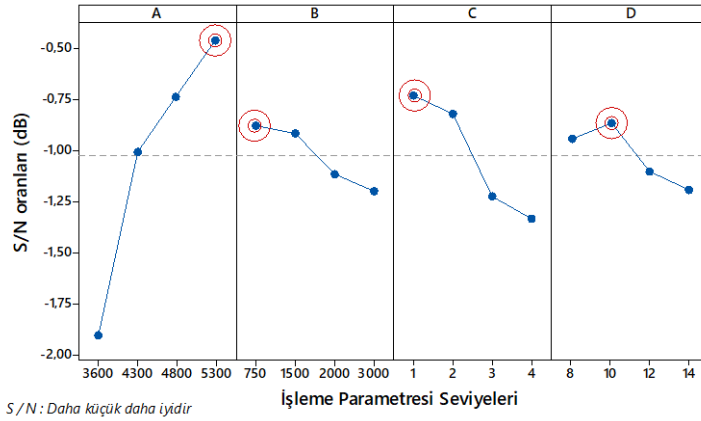
Şekil Ek A.10. M3pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (üst) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.16. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (F_d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,148	-1,197
2	3600	1500	2	10	1,157	-1,265
3	3600	2000	3	12	1,315	-2,380
4	3600	3000	4	14	1,380	-2,798
5	4300	750	2	12	1,118	-0,967
6	4300	1500	1	14	1,106	-0,878
7	4300	2000	4	8	1,143	-1,158
8	4300	3000	3	10	1,125	-1,022
9	4800	750	3	14	1,095	-0,791
10	4800	1500	4	12	1,100	-0,826
11	4800	2000	1	10	1,071	-0,597
12	4800	3000	2	8	1,086	-0,720
13	5300	750	4	10	1,068	-0,569
14	5300	1500	3	8	1,084	-0,701
15	5300	2000	2	14	1,037	-0,317
16	5300	3000	1	12	1,029	-0,247

Çizelge Ek A.17. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,910	-0,881	-0,730	-0,944
2	-1,006	-0,917	-0,817	-0,863
3	-0,733	-1,113	-1,223	-1,105
4	-0,459	-1,197	-1,338	-1,196
Delta	1,451	0,316	0,608	0,333
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,250	1,107	1,089	1,115
2	1,123	1,112	1,100	1,105
3	1,088	1,142	1,155	1,140
4	1,054	1,155	1,173	1,155
Delta	0,196	0,048	0,084	0,050
Rank	1	4	2	3

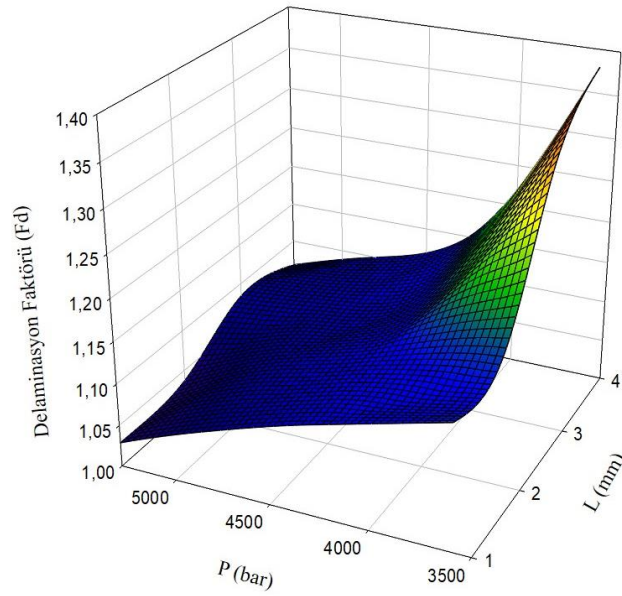


Şekil Ek A.11. M2 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.18. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0876	0,0292	8,30	0,058	66,82
B	3	0,0064	0,0021	0,61	0,652	4,92
C	3	0,0203	0,0068	1,92	0,303	15,47
D	3	0,0062	0,0021	0,59	0,663	4,73
Hata	3	0,0106	0,0035	-	-	8,05
Toplam	15	0,1310	-	-	-	100

S = 0,059 R-Sq = % 91,95 R-Sq (adj) = % 59,73



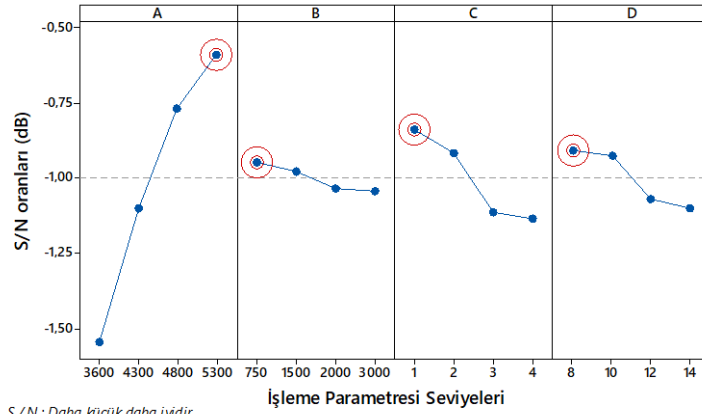
Şekil Ek A.12. M2 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.19. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (F_d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,145	-1,176
2	3600	1500	2	10	1,163	-1,315
3	3600	2000	3	12	1,230	-1,800
4	3600	3000	4	14	1,243	-1,892
5	4300	750	2	12	1,136	-1,104
6	4300	1500	1	14	1,128	-1,049
7	4300	2000	4	8	1,139	-1,129
8	4300	3000	3	10	1,137	-1,115
9	4800	750	3	14	1,106	-0,879
10	4800	1500	4	12	1,107	-0,885
11	4800	2000	1	10	1,076	-0,638
12	4800	3000	2	8	1,080	-0,669
13	5300	750	4	10	1,075	-0,628
14	5300	1500	3	8	1,080	-0,666
15	5300	2000	2	14	1,069	-0,577
16	5300	3000	1	12	1,058	-0,491

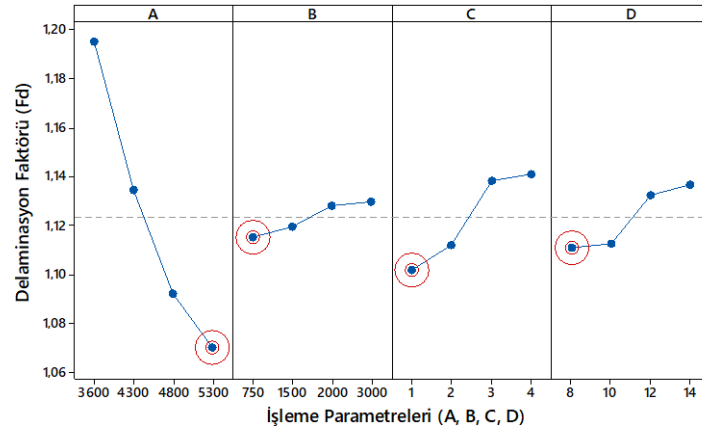
Çizelge Ek A.20. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,546	-0,947	-0,838	-0,910
2	-1,099	-0,979	-0,916	-0,924
3	-0,768	-1,036	-1,115	-1,070
4	-0,590	-1,042	-1,134	-1,099
Delta	0,955	0,095	0,295	0,189
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,196	1,115	1,102	1,111
2	1,135	1,120	1,112	1,113
3	1,093	1,128	1,138	1,133
4	1,070	1,130	1,141	1,137
Delta	0,125	0,014	0,039	0,026
Rank	1	4	2	3



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



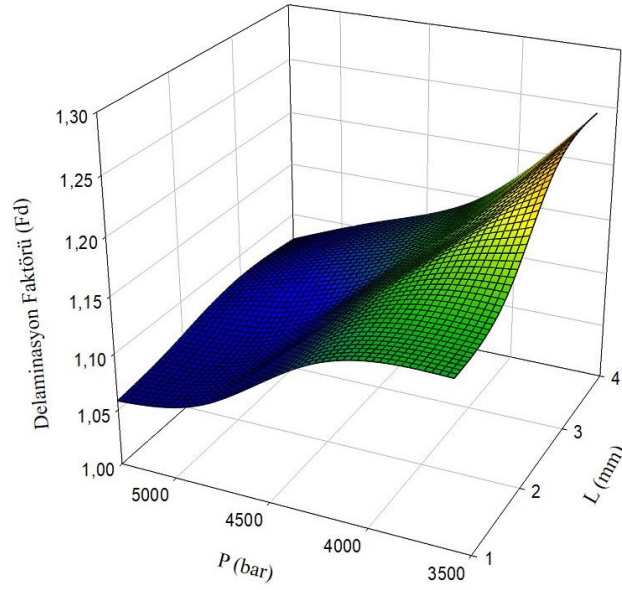
b)

Şekil Ek A.13. M3 malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.21. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0364	0,0121	35,63	0,008	81,55
B	3	0,0006	0,0002	0,55	0,680	1,27
C	3	0,0045	0,0015	4,43	0,127	10,13
D	3	0,0021	0,0007	2,08	0,281	4,77
Hata	3	0,0010	0,0003	-	-	2,29
Toplam	15	0,0447	-	-	-	100

S = 0,018 R-Sq = % 97,71 R-Sq (adj) = % 88,56



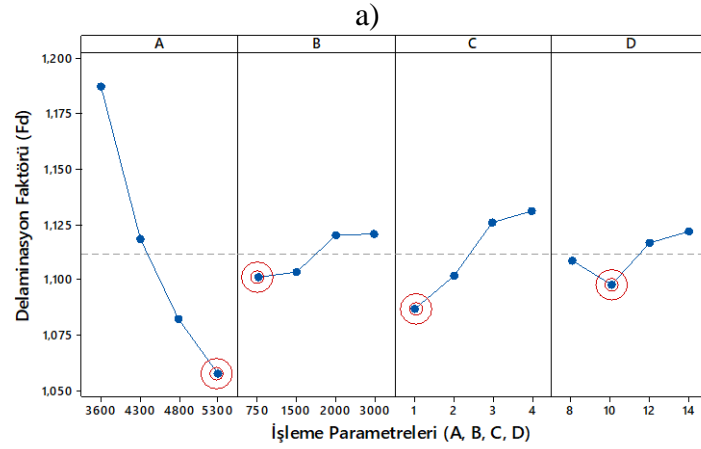
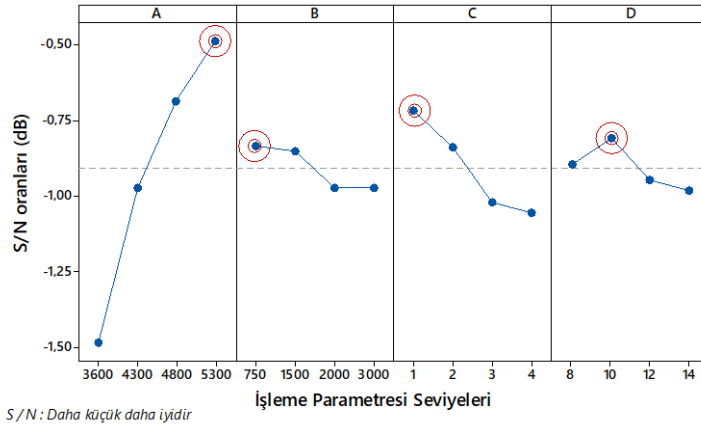
Şekil Ek A.14. M3 malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.22. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (F _d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,138	-1,126
2	3600	1500	2	10	1,147	-1,188
3	3600	2000	3	12	1,223	-1,748
4	3600	3000	4	14	1,241	-1,874
5	4300	750	2	12	1,118	-0,965
6	4300	1500	1	14	1,103	-0,853
7	4300	2000	4	8	1,135	-1,097
8	4300	3000	3	10	1,118	-0,967
9	4800	750	3	14	1,087	-0,726
10	4800	1500	4	12	1,088	-0,735
11	4800	2000	1	10	1,067	-0,564
12	4800	3000	2	8	1,086	-0,720
13	5300	750	4	10	1,061	-0,514
14	5300	1500	3	8	1,075	-0,630
15	5300	2000	2	14	1,056	-0,475
16	5300	3000	1	12	1,039	-0,333

Çizelge Ek A.23. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,484	-0,833	-0,719	-0,893
2	-0,971	-0,852	-0,837	-0,808
3	-0,686	-0,971	-1,018	-0,946
4	-0,488	-0,973	-1,055	-0,982
Delta	0,996	0,141	0,336	0,174
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	1,187	1,101	1,087	1,109
2	1,118	1,103	1,102	1,098
3	1,082	1,120	1,126	1,117
4	1,058	1,121	1,131	1,122
Delta	0,129	0,020	0,044	0,024
Rank	1	4	2	3

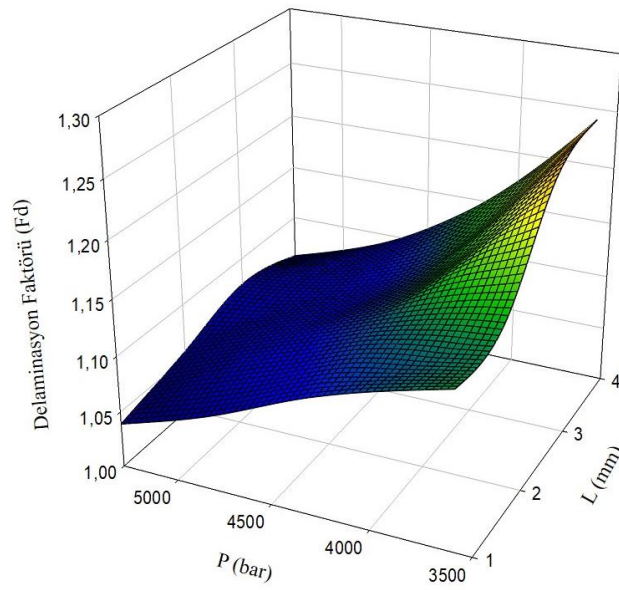


Şekil Ek A.15. M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.24. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0380	0,0127	20,88	0,016	79,77
B	3	0,0014	0,0005	0,75	0,590	2,87
C	3	0,0052	0,0017	2,83	0,208	10,82
D	3	0,0013	0,0004	0,71	0,607	2,72
Hata	3	0,0018	0,0006	-	-	3,82
Toplam	15	0,0477	-	-	-	100

S = 0,025 R-Sq = % 96,18 R-Sq (adj) = % 80,89



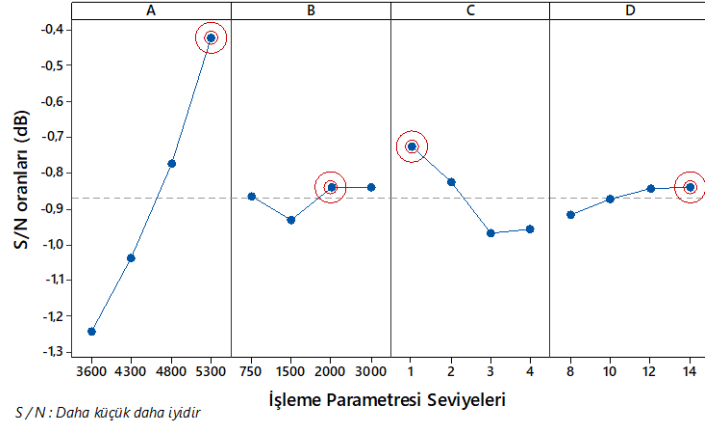
Şekil Ek A.16. M1pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.25. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

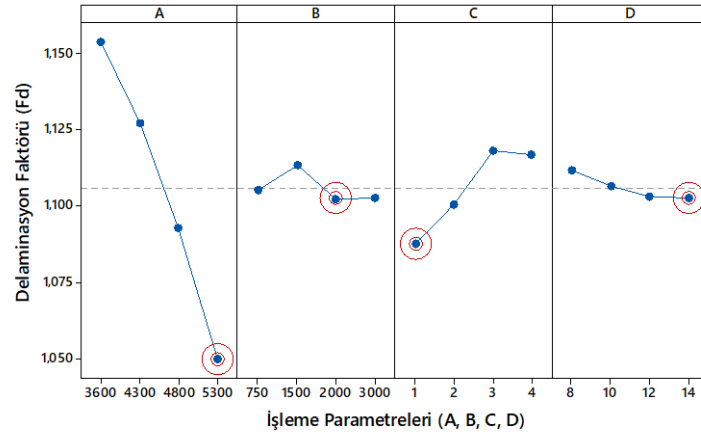
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (F _d)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,136	-1,111
2	3600	1500	2	10	1,152	-1,230
3	3600	2000	3	12	1,161	-1,293
4	3600	3000	4	14	1,166	-1,335
5	4300	750	2	12	1,126	-1,031
6	4300	1500	1	14	1,114	-0,936
7	4300	2000	4	8	1,136	-1,106
8	4300	3000	3	10	1,133	-1,082
9	4800	750	3	14	1,097	-0,802
10	4800	1500	4	12	1,105	-0,866
11	4800	2000	1	10	1,080	-0,668
12	4800	3000	2	8	1,091	-0,753
13	5300	750	4	10	1,061	-0,515
14	5300	1500	3	8	1,083	-0,695
15	5300	2000	2	14	1,033	-0,286
16	5300	3000	1	12	1,021	-0,183

Çizelge Ek A.26. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F _d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,242	-0,865	-0,724	-0,916
2	-1,038	-0,932	-0,825	-0,874
3	-0,772	-0,838	-0,968	-0,843
4	-0,420	-0,838	-0,956	-0,840
Delta	0,823	0,094	0,244	0,077
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,154	1,105	1,088	1,112
2	1,127	1,113	1,101	1,106
3	1,093	1,102	1,118	1,103
4	1,050	1,103	1,117	1,103
Delta	0,104	0,011	0,030	0,009
Rank	1	3	2	4



a)



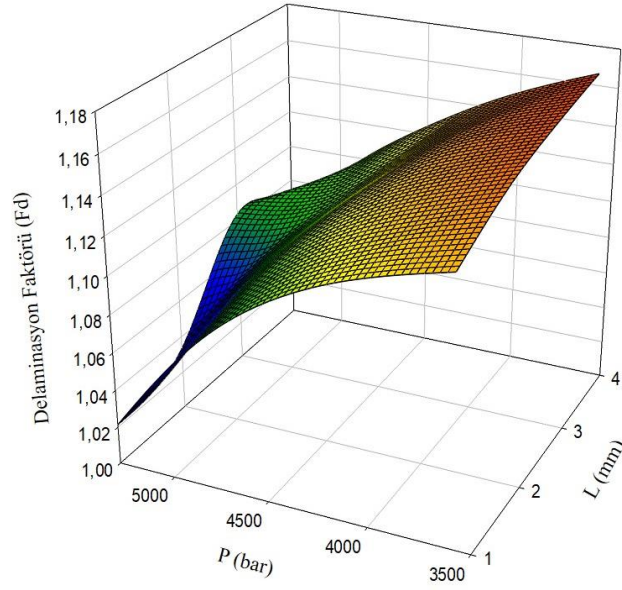
b)

Şekil Ek A.17. M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.27. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0242	0,0081	61,09	0,003	87,54
B	3	0,0003	0,0001	0,82	0,564	1,17
C	3	0,0025	0,0008	6,37	0,081	9,12
D	3	0,0002	0,0001	0,51	0,702	0,73
Hata	3	0,0004	0,0001	-	-	1,43
Toplam	15	0,0277	-	-	-	100

S = 0,011 R-Sq = % 98,57 R-Sq (adj) = % 92,84



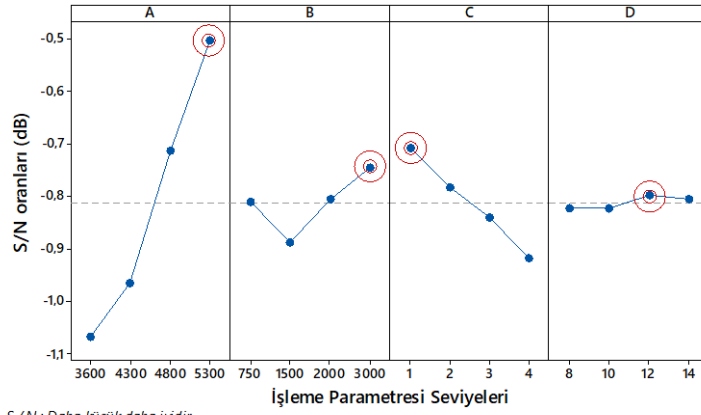
Şekil Ek A.18.M2pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

Çizelge Ek A.28. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları.

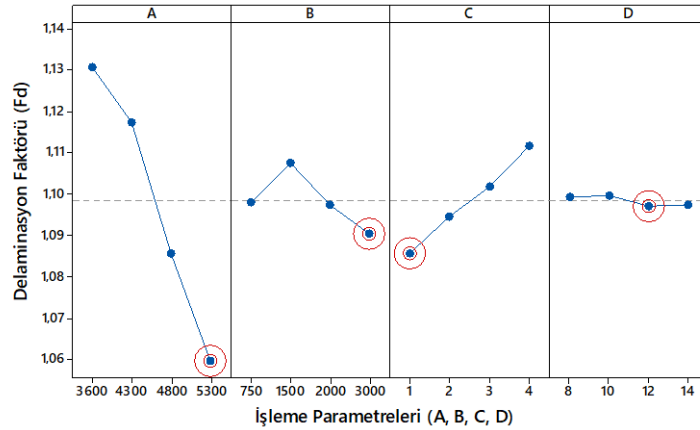
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Delaminasyon Faktörü (alt) (Fd)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,123	-1,011
2	3600	1500	2	10	1,128	-1,043
3	3600	2000	3	12	1,134	-1,089
4	3600	3000	4	14	1,138	-1,120
5	4300	750	2	12	1,115	-0,944
6	4300	1500	1	14	1,115	-0,942
7	4300	2000	4	8	1,121	-0,994
8	4300	3000	3	10	1,119	-0,979
9	4800	750	3	14	1,078	-0,654
10	4800	1500	4	12	1,112	-0,921
11	4800	2000	1	10	1,076	-0,638
12	4800	3000	2	8	1,076	-0,640
13	5300	750	4	10	1,076	-0,633
14	5300	1500	3	8	1,076	-0,639
15	5300	2000	2	14	1,059	-0,500
16	5300	3000	1	12	1,028	-0,240

Çizelge Ek A.29. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-1,066	-0,811	-0,708	-0,821
2	-0,965	-0,886	-0,782	-0,823
3	-0,713	-0,805	-0,840	-0,798
4	-0,503	-0,745	-0,917	-0,804
Delta	0,563	0,142	0,209	0,025
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,131	1,098	1,086	1,099
2	1,117	1,108	1,095	1,100
3	1,086	1,098	1,102	1,097
4	1,060	1,090	1,112	1,097
Delta	0,071	0,017	0,026	0,003
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir



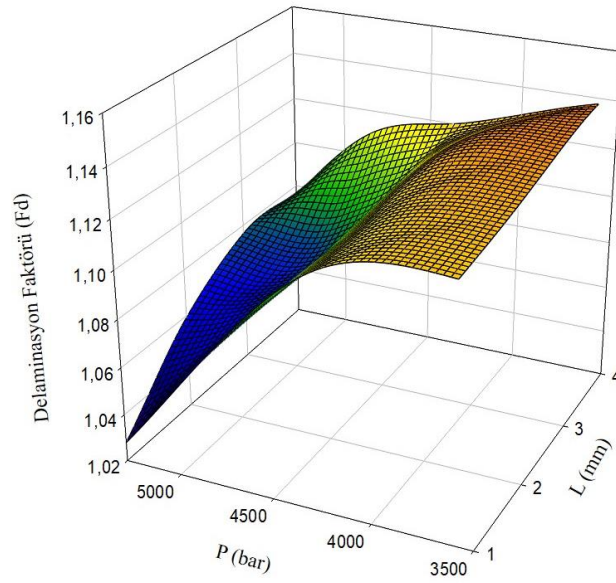
b)

Şekil Ek A.19. M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne (alt) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek A.30. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,0122	0,0041	23,59	0,014	82,43
B	3	0,0006	0,0002	1,16	0,452	4,06
C	3	0,0015	0,0005	2,83	0,208	9,87
D	3	0,0000	0,0000	0,04	0,987	0,15
Hata	3	0,0005	0,0002	-	-	3,49
Toplam	15	0,0148	-	-	-	

S = 0,013 R-Sq = % 96,51 R-Sq (adj) = % 82,53



Şekil Ek A.20. M3pd malzemesinin P/L değerine göre delaminasyon faktörü (alt) değişim grafiği.

EK AÇIKLAMALAR B.

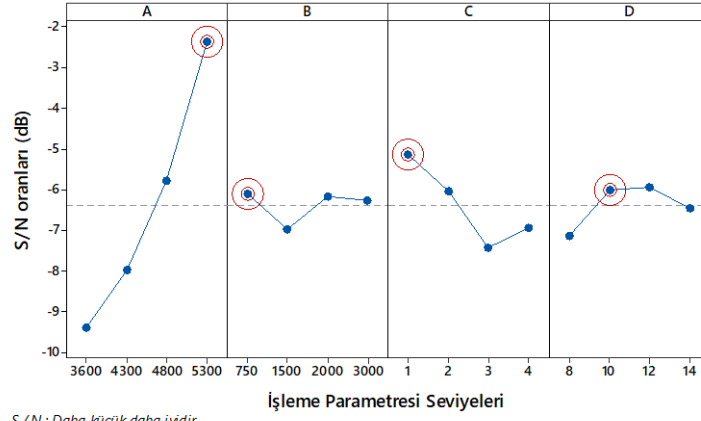
KERF AÇISI İÇİN DENEY/TEST SONUÇLARI

Çizelge Ek B.1. M2 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

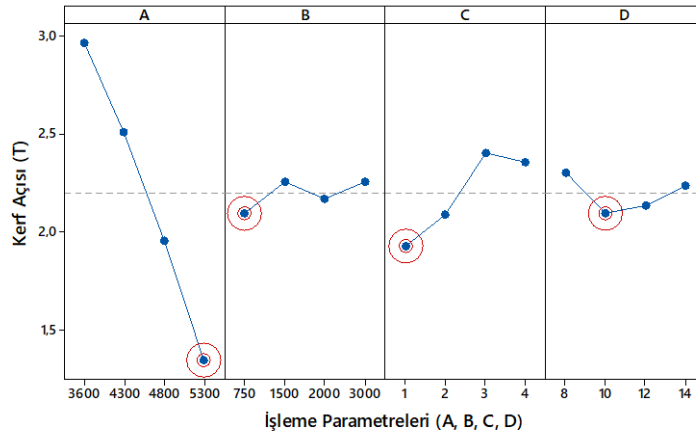
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,702	-8,634
2	3600	1500	2	10	2,753	-8,796
3	3600	2000	3	12	3,066	-9,731
4	3600	3000	4	14	3,337	-10,467
5	4300	750	2	12	2,354	-7,436
6	4300	1500	1	14	2,330	-7,347
7	4300	2000	4	8	2,689	-8,592
8	4300	3000	3	10	2,682	-8,569
9	4800	750	3	14	2,031	-6,154
10	4800	1500	4	12	2,116	-6,510
11	4800	2000	1	10	1,673	-4,470
12	4800	3000	2	8	1,998	-6,012
13	5300	750	4	10	1,346	-2,581
14	5300	1500	3	8	1,860	-5,390
15	5300	2000	2	14	1,397	-2,904
16	5300	3000	1	12	1,208	-1,641

Çizelge Ek B.2. M2 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-9,407	-6,201	-5,523	-7,157
2	-7,986	-7,011	-6,287	-6,104
3	-5,787	-6,424	-7,461	-6,330
4	-3,129	-6,672	-7,038	-6,718
Delta	6,278	0,810	1,938	1,053
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	2,965	2,108	1,978	2,312
2	2,514	2,265	2,126	2,114
3	1,955	2,206	2,410	2,186
4	1,453	2,306	2,372	2,274
Delta	1,512	0,198	0,431	0,199
Rank	1	4	2	3



a)



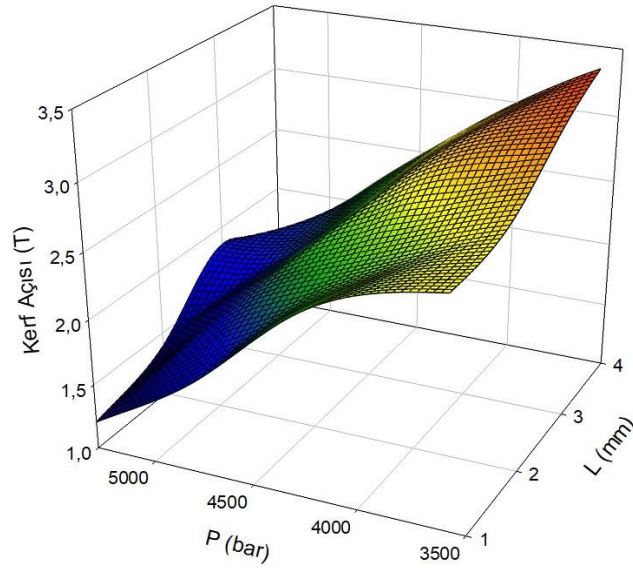
b)

Şekil Ek B.1. M2 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek B.3. M2 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	5,1989	1,73297	117,02	0,001	87,62
B	3	0,0884	0,02948	1,99	0,293	1,49
C	3	0,5059	0,16863	11,39	0,038	8,53
D	3	0,0956	0,03185	2,15	0,273	1,61
Hata	3	0,0444	0,01481	-	-	0,75
Toplam	15	5,9332	-	-	-	100

S = 0,122 R-Sq = % 99,25 R-Sq (adj) = % 96,26



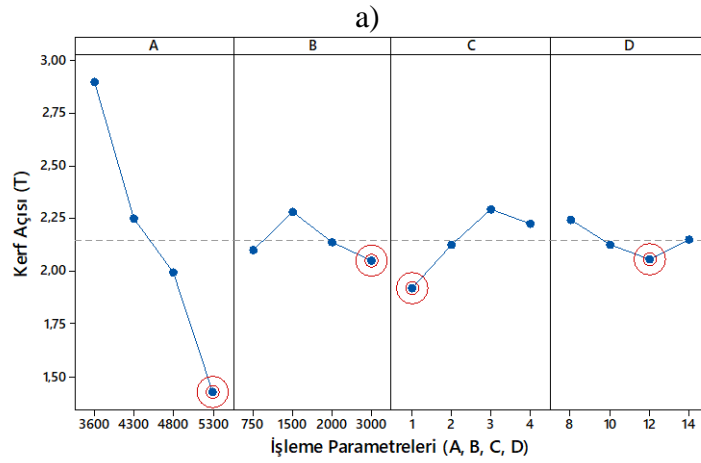
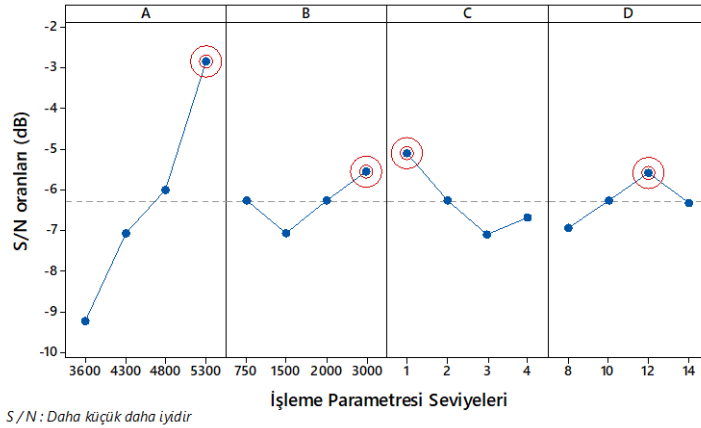
Şekil Ek B.2. M2 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

Çizelge Ek B.4. M3 malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A Su basıncı (P)	B Nozul ilerleme hızı (f)	C Nozul yaklaşma mesafesi (L)	D Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,705	-8,643
2	3600	1500	2	10	2,928	-9,331
3	3600	2000	3	12	2,964	-9,438
4	3600	3000	4	14	2,994	-9,525
5	4300	750	2	12	2,206	-6,872
6	4300	1500	1	14	2,187	-6,797
7	4300	2000	4	8	2,349	-7,418
8	4300	3000	3	10	2,267	-7,109
9	4800	750	3	14	2,039	-6,188
10	4800	1500	4	12	2,102	-6,453
11	4800	2000	1	10	1,850	-5,343
12	4800	3000	2	8	1,997	-6,008
13	5300	750	4	10	1,457	-3,269
14	5300	1500	3	8	1,922	-5,675
15	5300	2000	2	14	1,385	-2,829
16	5300	3000	1	12	1,185	-1,474

Çizelge Ek B.5. M3 malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-9,234	-6,243	-5,565	-6,936
2	-7,049	-7,064	-6,26	-6,263
3	-5,998	-6,257	-7,103	-6,059
4	-3,312	-6,029	-6,666	-6,335
Delta	5,922	1,035	1,538	0,877
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,898	2,102	1,982	2,243
2	2,252	2,285	2,129	2,126
3	1,997	2,137	2,298	2,114
4	1,487	2,111	2,226	2,151
Delta	1,41	0,183	0,316	0,129
Rank	1	3	2	4

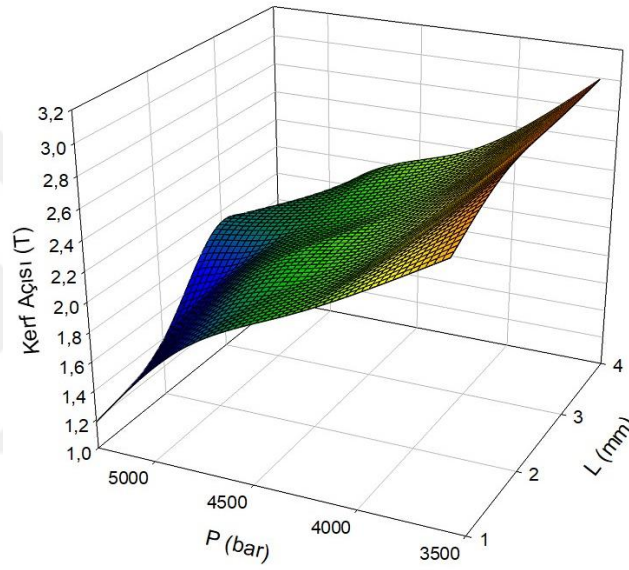


Şekil Ek B.3. M3 malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek B.6. M3 malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	4,12775	1,37592	101,05	0,002	91,29
B	3	0,08761	0,0292	2,14	0,273	1,94
C	3	0,22424	0,07475	5,49	0,098	4,96
D	3	0,04113	0,01371	1,01	0,498	0,91
Hata	3	0,04085	0,01362	-	-	0,90
Toplam	15	4,52158	-	-	-	100

S = 0,117 R-Sq = % 99,10 R-Sq (adj) = % 95,48



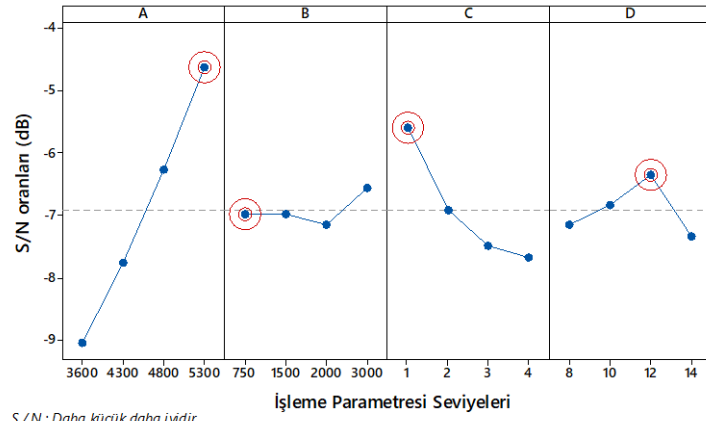
Şekil Ek B.4. M3 malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

Çizelge Ek B.7. M1pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

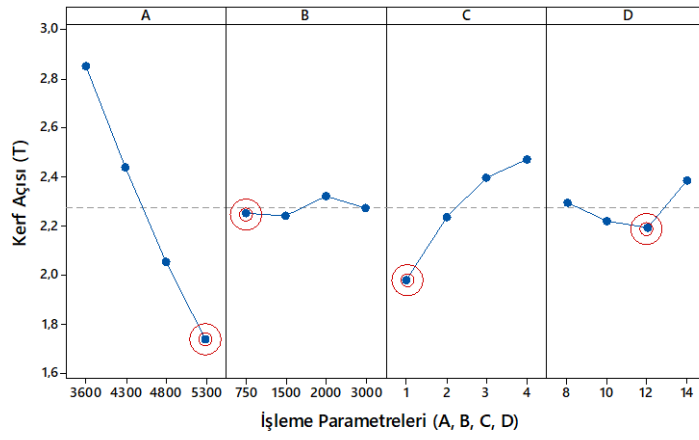
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,541	-8,100
2	3600	1500	2	10	2,552	-8,138
3	3600	2000	3	12	2,666	-8,517
4	3600	3000	4	14	3,172	-10,027
5	4300	750	2	12	2,158	-6,681
6	4300	1500	1	14	2,106	-6,469
7	4300	2000	4	8	2,413	-7,651
8	4300	3000	3	10	2,412	-7,648
9	4800	750	3	14	1,966	-5,872
10	4800	1500	4	12	2,032	-6,158
11	4800	2000	1	10	1,684	-4,527
12	4800	3000	2	8	1,905	-5,598
13	5300	750	4	10	1,684	-4,527
14	5300	1500	3	8	1,778	-4,999
15	5300	2000	2	14	1,248	-1,924
16	5300	3000	1	12	1,116	-0,953

Çizelge Ek B.8. M1pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-8,695	-6,295	-5,012	-6,587
2	-7,112	-6,441	-5,585	-6,21
3	-5,539	-5,655	-6,759	-5,577
4	-3,101	-6,056	-7,091	-6,073
Delta	5,595	0,786	2,078	1,009
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	2,733	2,003	1,862	2,159
2	2,272	2,117	1,966	2,083
3	1,897	2,087	2,205	1,993
4	1,457	2,151	2,325	2,123
Delta	1,276	0,149	0,463	0,166
Rank	1	4	2	3



a)



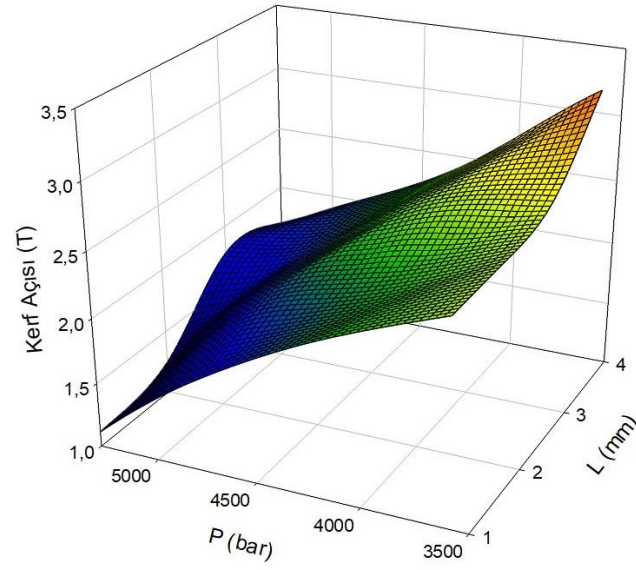
b)

Şekil Ek B.5. M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek B.9. M1pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	3,5400	1,18001	47,09	0,005	82,91
B	3	0,0484	0,01613	0,64	0,637	1,13
C	3	0,5449	0,18162	7,25	0,069	12,76
D	3	0,06137	0,02046	0,82	0,564	1,44
Hata	3	0,07518	0,02506	-	-	1,76
Toplam	15	4,2699	-	-	-	100

S = 0,158 R-Sq = % 98,24 R-Sq (adj) = % 91,20



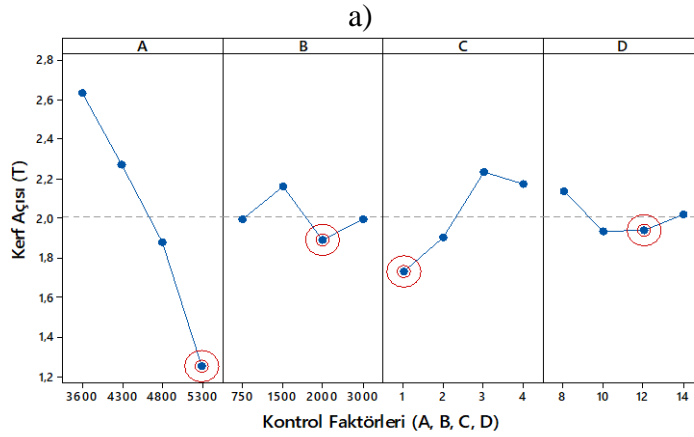
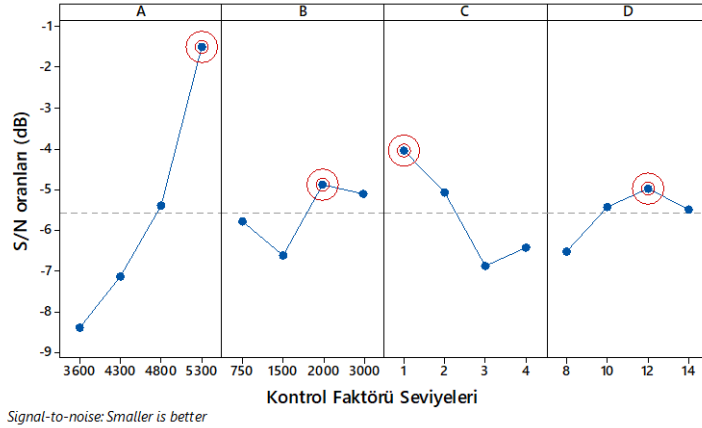
Şekil Ek B.6. M1pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

Çizelge Ek B.10. M2pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,423	-7,687
2	3600	1500	2	10	2,530	-8,062
3	3600	2000	3	12	2,691	-8,598
4	3600	3000	4	14	2,900	-9,248
5	4300	750	2	12	2,188	-6,801
6	4300	1500	1	14	2,177	-6,757
7	4300	2000	4	8	2,374	-7,510
8	4300	3000	3	10	2,361	-7,462
9	4800	750	3	14	2,023	-6,120
10	4800	1500	4	12	2,074	-6,336
11	4800	2000	1	10	1,508	-3,568
12	4800	3000	2	8	1,902	-5,584
13	5300	750	4	10	1,288	-2,198
14	5300	1500	3	8	1,834	-5,268
15	5300	2000	2	14	0,985	0,131
16	5300	3000	1	12	0,870	1,210

Çizelge Ek B.11. M2pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-8,399	-5,702	-4,201	-6,512
2	-7,132	-6,606	-5,079	-5,323
3	-5,402	-4,886	-6,862	-5,131
4	-1,531	-5,271	-6,323	-5,498
Delta	6,868	1,72	2,661	1,381
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,636	1,981	1,744	2,133
2	2,275	2,154	1,901	1,956
3	1,877	1,890	2,227	1,922
4	1,244	2,008	2,159	2,021
Delta	1,392	0,264	0,483	0,212
Rank	1	3	2	4

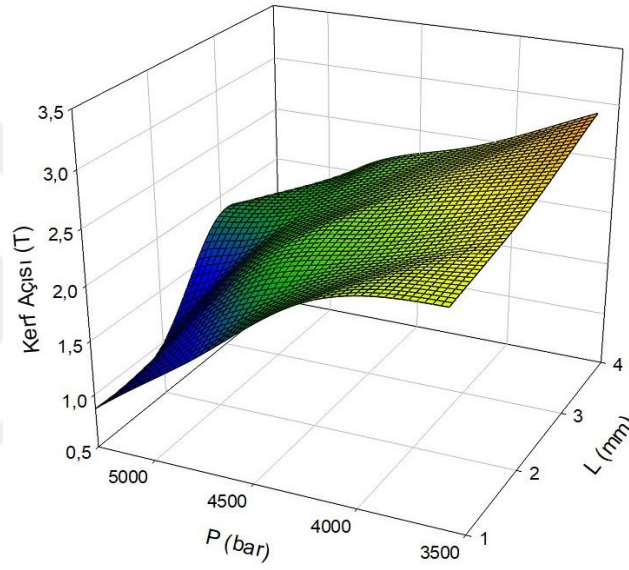


Şekil Ek B.7. M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek B.12. M2pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	4,26485	1,42162	68,23	0,003	82,29
B	3	0,14417	0,04806	2,31	0,255	2,78
C	3	0,6068	0,2023	9,71	0,047	11,71
D	3	0,1041	0,03471	1,67	0,343	2,01
Hata	3	0,06251	0,02084	-	-	1,21
Toplam	15	5,18245	-	-	-	100

S = 0,144 R-Sq = % 98,79 R-Sq (adj) = % 93,97



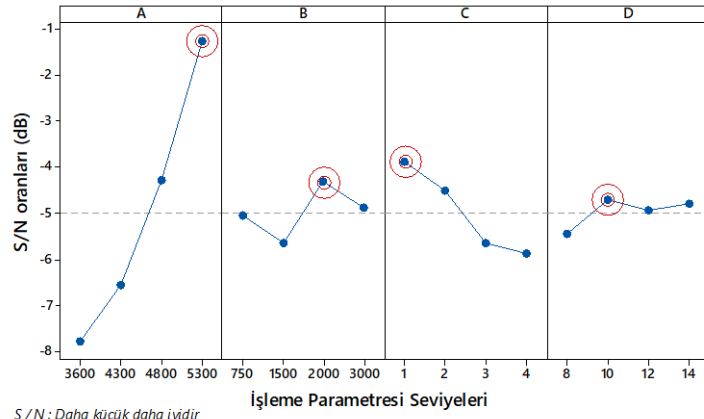
Şekil Ek B.8. M2pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

Çizelge Ek B.13. M3pd malzemesinin kerf açısı değerinin S/N oranları.

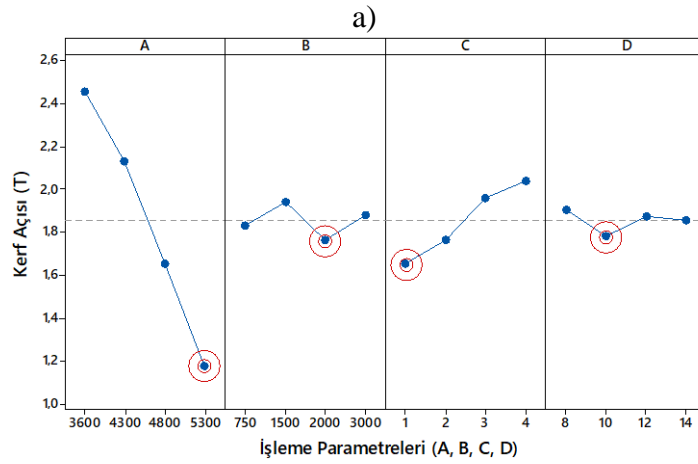
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Kerf Açısı (T) (°)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,260	-7,082
2	3600	1500	2	10	2,323	-7,321
3	3600	2000	3	12	2,519	-8,025
4	3600	3000	4	14	2,724	-8,704
5	4300	750	2	12	2,092	-6,411
6	4300	1500	1	14	2,043	-6,205
7	4300	2000	4	8	2,211	-6,892
8	4300	3000	3	10	2,167	-6,717
9	4800	750	3	14	1,674	-4,475
10	4800	1500	4	12	1,923	-5,680
11	4800	2000	1	10	1,340	-2,542
12	4800	3000	2	8	1,669	-4,449
13	5300	750	4	10	1,297	-2,259
14	5300	1500	3	8	1,475	-3,376
15	5300	2000	2	14	0,975	0,220
16	5300	3000	1	12	0,951	0,436

Çizelge Ek B.14. M3pd malzemesinin kerf açısı için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Kerf açısı (T)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-7,783	-5,057	-3,848	-5,450
2	-6,556	-5,645	-4,490	-4,710
3	-4,286	-4,310	-5,648	-4,920
4	-1,245	-4,859	-5,884	-4,791
Delta	6,538	1,336	2,035	0,740
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,457	1,831	1,648	1,904
2	2,128	1,941	1,765	1,782
3	1,652	1,761	1,959	1,871
4	1,175	1,878	2,039	1,854
Delta	1,282	0,180	0,390	0,122
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir



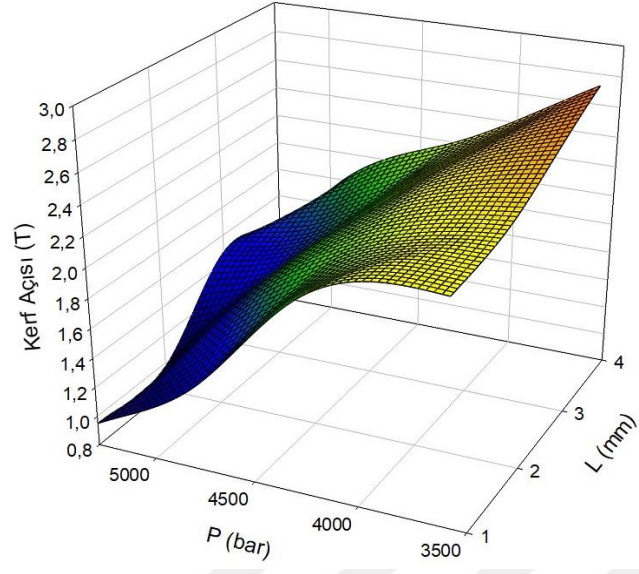
b)

Şekil Ek B.9. M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin kerf açısına (T) etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek B.15. M3pd malzemesinin kerf açısı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	3,76376	1,25459	113,21	0,001	87,95
B	3	0,06908	0,02303	2,08	0,282	1,61
C	3	0,38118	0,12706	11,46	0,038	8,91
D	3	0,03194	0,01065	0,96	0,513	0,75
Hata	3	0,03325	0,01108	-	-	0,78
Toplam	15	4,2792	-	-	-	100

S = 0,105 R-Sq = % 99,22 R-Sq (adj) = % 96,12



Şekil Ek B.10. M3pd malzemesinin P/L değerine göre kerf açısı değişim grafiği.

EK AÇIKLAMALAR C.

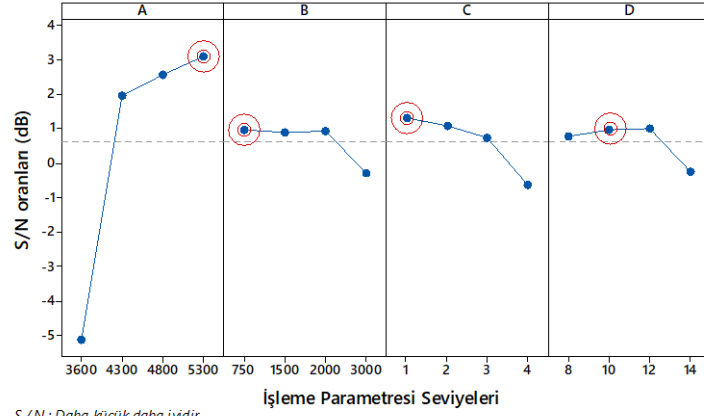
DAİRESELLİK HATASI DEĞERİ İÇİN DENEY/TEST SONUÇLARI

Çizelge Ek C.1. M2 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

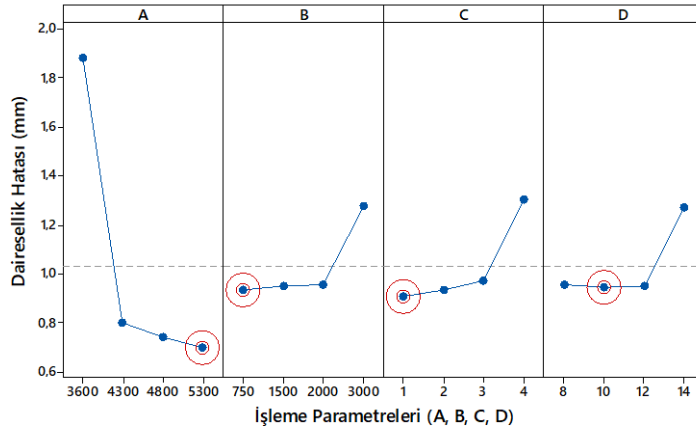
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,489	-3,458
2	3600	1500	2	10	1,536	-3,728
3	3600	2000	3	12	1,594	-4,050
4	3600	3000	4	14	1,902	-5,584
5	4300	750	2	12	0,847	1,442
6	4300	1500	1	14	0,846	1,453
7	4300	2000	4	8	0,896	0,954
8	4300	3000	3	10	0,890	1,012
9	4800	750	3	14	0,827	1,650
10	4800	1500	4	12	0,837	1,545
11	4800	2000	1	10	0,793	2,015
12	4800	3000	2	8	0,821	1,713
13	5300	750	4	10	0,753	2,464
14	5300	1500	3	8	0,808	1,852
15	5300	2000	2	14	0,731	2,722
16	5300	3000	1	12	0,719	2,865

Çizelge Ek C.2. M2 malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-4,2049	0,5246	0,7187	0,2652
2	1,2152	0,2805	0,5373	0,4408
3	1,7308	0,4101	0,1160	0,4509
4	2,4757	0,0016	-0,1552	0,0600
Delta	6,6807	0,5230	0,8739	0,3909
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,6303	0,9790	0,9617	1,0035
2	0,8698	1,0068	0,9837	0,9930
3	0,8195	1,0035	1,0297	0,9992
4	0,7527	1,0830	1,0970	1,0765
Delta	0,8775	0,104	0,1352	0,0835
Rank	1	3	2	4



a)



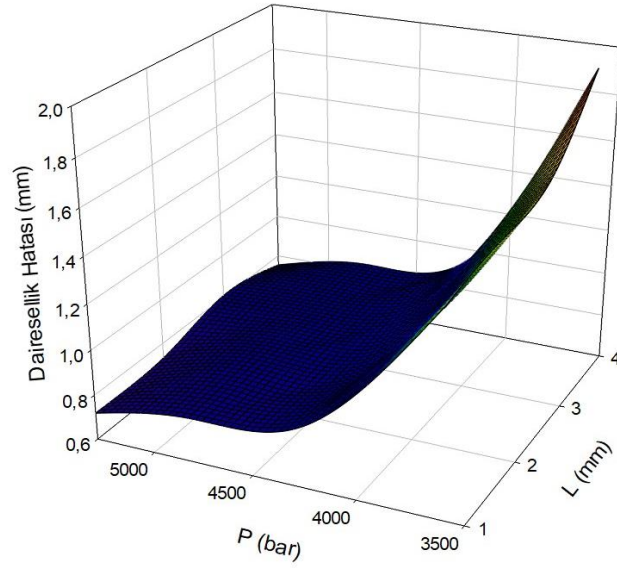
b)

Şekil Ek C.1. M2 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek C.3. M2 malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	2,02635	0,67545	77,11	0,002	94,77
B	3	0,02433	0,00811	0,93	0,524	1,14
C	3	0,04286	0,01429	1,63	0,349	2,00
D	3	0,01844	0,00615	0,7	0,611	0,86
Hata	3	0,02628	0,00876	-	-	1,23
Toplam	15	2,13826	-	-	-	100

S = 0,094 R-Sq = % 98,77 R-Sq (adj) = % 93,86



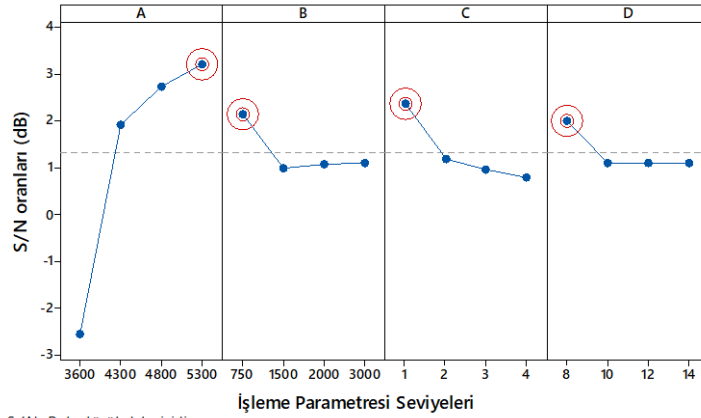
Şekil Ek C.2. M2 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.

Çizelge Ek C.4. M3 malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

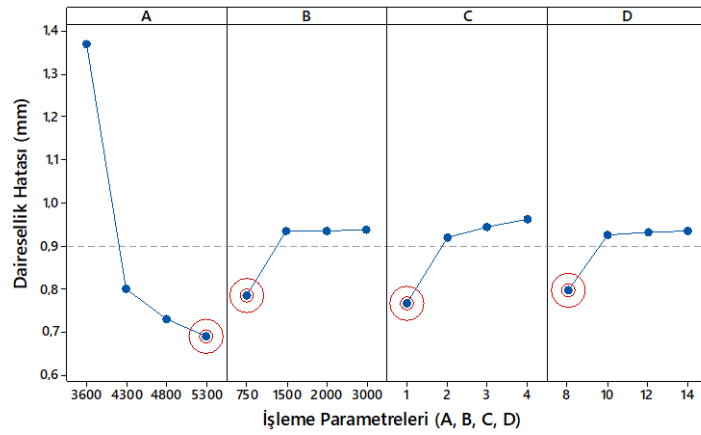
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	0,916	0,762
2	3600	1500	2	10	1,482	-3,417
3	3600	2000	3	12	1,520	-3,637
4	3600	3000	4	14	1,565	-3,890
5	4300	750	2	12	0,794	2,004
6	4300	1500	1	14	0,777	2,192
7	4300	2000	4	8	0,829	1,629
8	4300	3000	3	10	0,803	1,906
9	4800	750	3	14	0,727	2,769
10	4800	1500	4	12	0,755	2,441
11	4800	2000	1	10	0,711	2,963
12	4800	3000	2	8	0,726	2,781
13	5300	750	4	10	0,705	3,036
14	5300	1500	3	8	0,723	2,817
15	5300	2000	2	14	0,677	3,388
16	5300	3000	1	12	0,659	3,622

Çizelge Ek C.5. M3 malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-2,5455	2,1428	2,3846	1,9974
2	1,9324	1,0082	1,1890	1,1219
3	2,7386	1,0857	0,9638	1,1075
4	3,2160	1,1047	0,8040	1,1147
Delta	5,7615	1,1346	1,5807	0,8899
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	1,3708	0,7855	0,7658	0,7985
2	0,8008	0,9343	0,9198	0,9253
3	0,7298	0,9343	0,9433	0,9320
4	0,6910	0,9383	0,9635	0,9365
Delta	0,6798	0,1528	0,1978	0,1380
Rank	1	3	2	4



a)



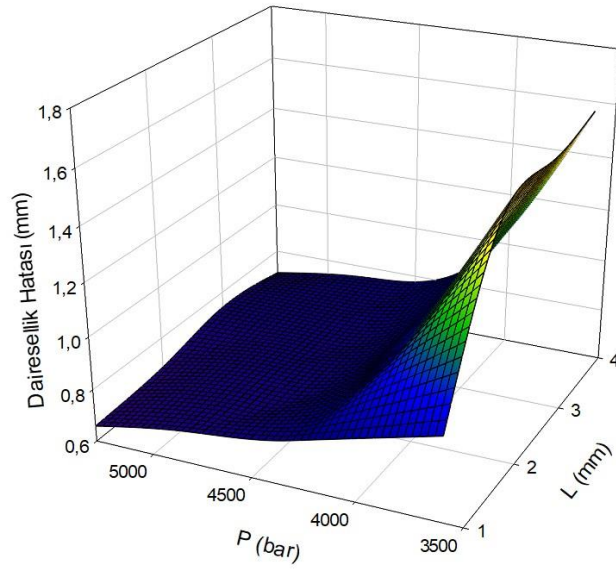
b)

Şekil Ek C.3. M3 malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek C.6. M3 malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	1,2164	0,40548	18,40	0,020	81,07
B	3	0,0676	0,02254	1,02	0,493	4,51
C	3	0,0972	0,0324	1,47	0,379	6,48
D	3	0,0531	0,01771	0,80	0,569	3,54
Hata	3	0,0661	0,02203	-	-	4,41
Toplam	15	1,5005	-	-	-	100

S = 0,148 R-Sq = % 95,59 R-Sq (adj) = % 77,97



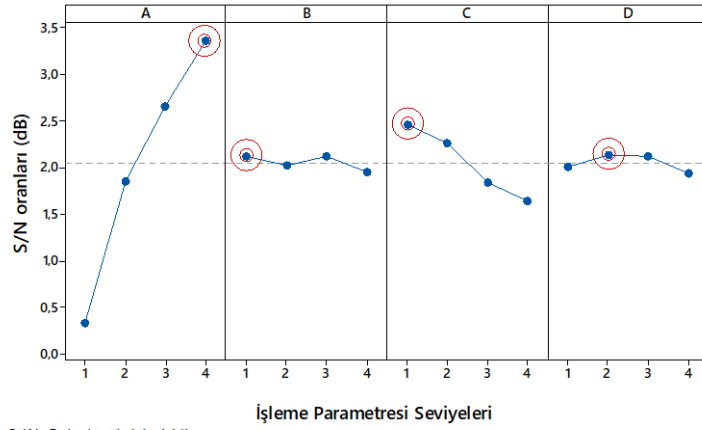
Şekil Ek C.4. M3 malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.

Çizelge Ek C.7. M1pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	0,907	0,848
2	3600	1500	2	10	0,913	0,791
3	3600	2000	3	12	0,972	0,247
4	3600	3000	4	14	1,063	-0,531
5	4300	750	2	12	0,799	1,949
6	4300	1500	1	14	0,784	2,114
7	4300	2000	4	8	0,825	1,671
8	4300	3000	3	10	0,824	1,681
9	4800	750	3	14	0,742	2,592
10	4800	1500	4	12	0,763	2,350
11	4800	2000	1	10	0,710	2,975
12	4800	3000	2	8	0,731	2,722
13	5300	750	4	10	0,700	3,098
14	5300	1500	3	8	0,722	2,829
15	5300	2000	2	14	0,661	3,596
16	5300	3000	1	12	0,636	3,931

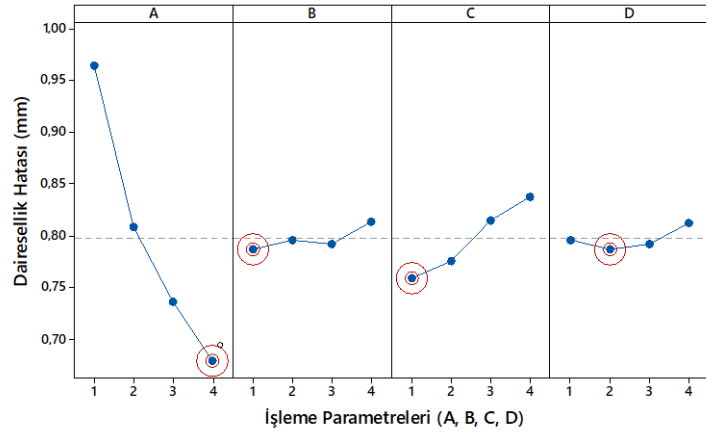
Çizelge Ek C.8. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	0,3386	2,1217	2,4668	2,0174
2	1,8538	2,0208	2,2643	2,1362
3	2,6595	2,1221	1,8373	2,1190
4	3,3635	1,9508	1,6470	1,9427
Delta	3,0249	0,1713	0,8199	0,1935
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	0,9637	0,7870	0,7592	0,7963
2	0,8080	0,7955	0,7760	0,7868
3	0,7365	0,7920	0,8150	0,7925
4	0,6798	0,8135	0,8377	0,8125
Delta	0,2840	0,0265	0,0785	0,0257
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



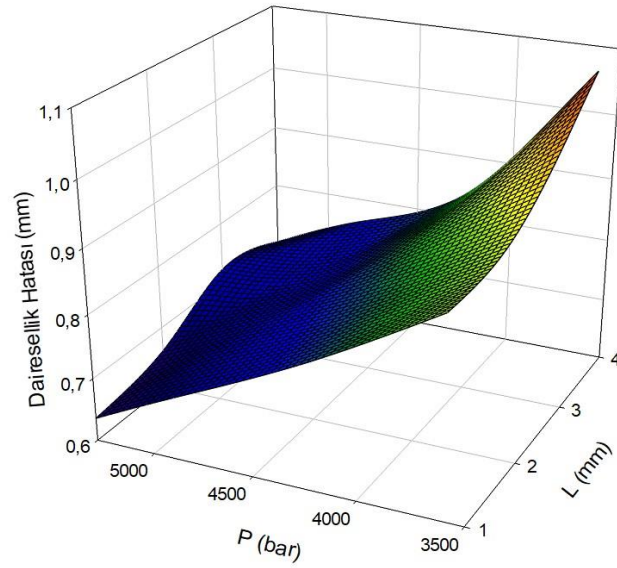
b)

Şekil Ek C.5. M1pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek C.9. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,18134	0,06045	41,42	0,006	88,81
B	3	0,0016	0,00053	0,37	0,785	0,78
C	3	0,0154	0,00513	3,52	0,165	7,54
D	3	0,00147	0,00049	0,33	0,804	0,72
Hata	3	0,00438	0,00146	-	-	2,14
Toplam	15	0,20418	-	-	-	100

S = 0,038 R-Sq = % 97,86 R-Sq (adj) = % 89,28



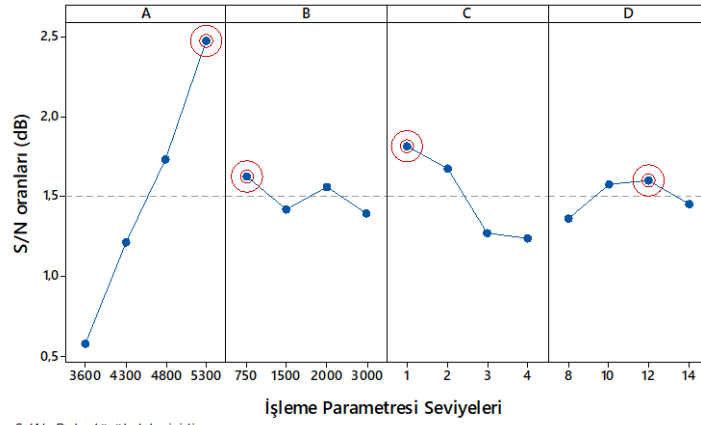
Şekil Ek C.6. M1pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.

Çizelge Ek C.10. M2pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	0,898	0,934
2	3600	1500	2	10	0,909	0,829
3	3600	2000	3	12	0,937	0,565
4	3600	3000	4	14	1,001	-0,009
5	4300	750	2	12	0,790	2,047
6	4300	1500	1	14	0,762	2,361
7	4300	2000	4	8	0,840	1,514
8	4300	3000	3	10	0,802	1,917
9	4800	750	3	14	0,750	2,499
10	4800	1500	4	12	0,758	2,407
11	4800	2000	1	10	0,723	2,817
12	4800	3000	2	8	0,746	2,545
13	5300	750	4	10	0,718	2,878
14	5300	1500	3	8	0,746	2,545
15	5300	2000	2	14	0,672	3,453
16	5300	3000	1	12	0,649	3,755

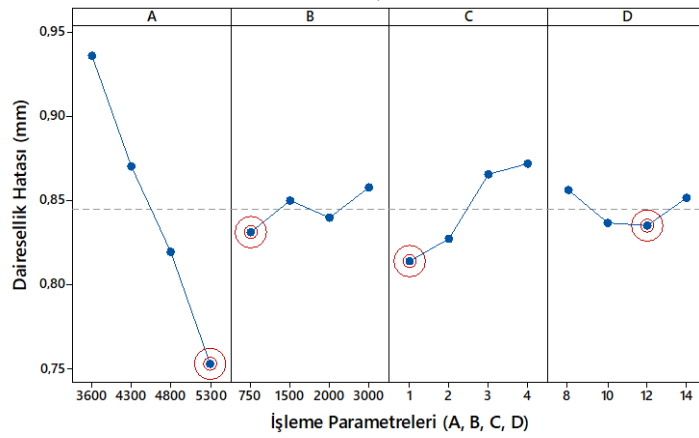
Çizelge Ek C.11. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	0,5799	2,0896	2,4669	1,8848
2	1,9598	2,0354	2,2185	2,1100
3	2,5670	2,0874	1,8814	2,1936
4	3,1576	2,0520	1,6975	2,0759
Delta	2,5777	0,0542	0,7695	0,3088
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	0,9362	0,7890	0,7580	0,8075
2	0,7985	0,7938	0,7793	0,7880
3	0,7442	0,7930	0,8087	0,7835
4	0,6963	0,7995	0,8292	0,7963
Delta	0,2400	0,0105	0,0712	0,024
Rank	1	4	2	3



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



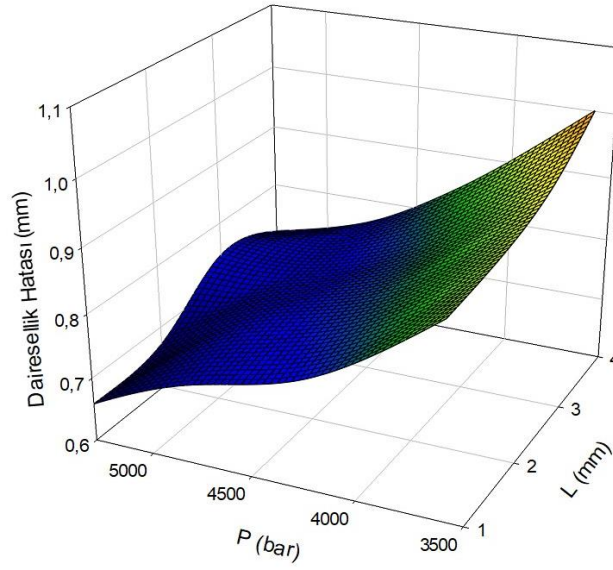
b)

Şekil Ek C.7. M2pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek C.12. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,12914	0,04305	51,03	0,004	88,99
B	3	0,00023	0,0001	0,09	0,961	0,16
C	3	0,0119	0,00397	4,70	0,118	8,20
D	3	0,00133	0,00045	0,53	0,694	0,92
Hata	3	0,00253	0,00084	-	-	1,74
Toplam	15	0,14512	-	-	-	100

S = 0,029 R-Sq = % 98,26 R-Sq (adj) = % 91,28



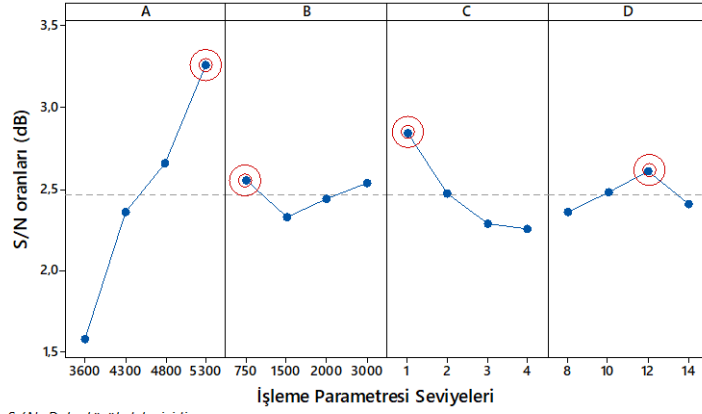
Şekil Ek C.8. M2pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.

Çizelge Ek C.13. M3pd malzemesinin dairesellik hatası değerinin S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				CMM (mm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	0,788	2,069
2	3600	1500	2	10	0,837	1,545
3	3600	2000	3	12	0,838	1,535
4	3600	3000	4	14	0,873	1,180
5	4300	750	2	12	0,759	2,395
6	4300	1500	1	14	0,745	2,557
7	4300	2000	4	8	0,785	2,103
8	4300	3000	3	10	0,760	2,384
9	4800	750	3	14	0,727	2,769
10	4800	1500	4	12	0,744	2,569
11	4800	2000	1	10	0,711	2,963
12	4800	3000	2	8	0,726	2,781
13	5300	750	4	10	0,695	3,160
14	5300	1500	3	8	0,723	2,817
15	5300	2000	2	14	0,677	3,388
16	5300	3000	1	12	0,618	4,180

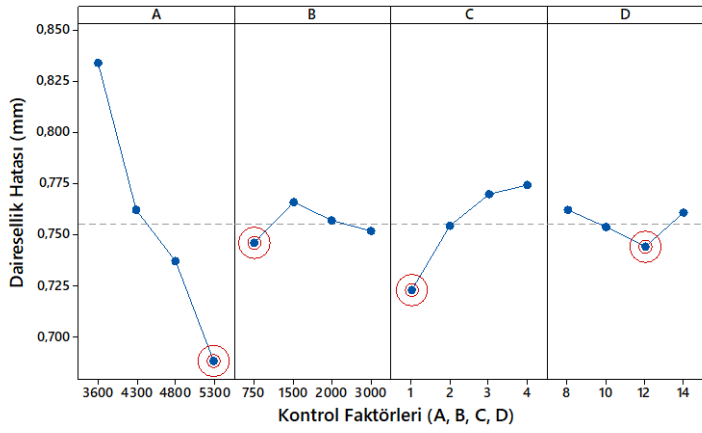
Çizelge Ek C.14. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Dairesellik Hatası (mm)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	1,5820	2,5990	2,9420	2,4430
2	2,3600	2,3720	2,5280	2,5130
3	2,7700	2,4970	2,3760	2,6700
4	3,3860	2,6310	2,2530	2,4740
Delta	1,8040	0,2590	0,6900	0,2270
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	0,8340	0,7422	0,7155	0,7555
2	0,7623	0,7622	0,7498	0,7507
3	0,7270	0,7528	0,7620	0,7398
4	0,6782	0,7442	0,7742	0,7555
Delta	0,1558	0,0200	0,0588	0,0157
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



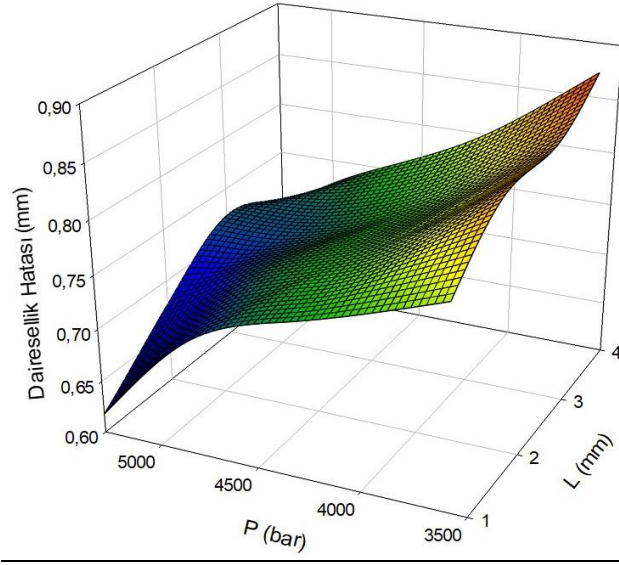
b)

Şekil Ek C.9. M3pd malzemesinin işleme parametrelerinin dairesellik hatasına etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek C.15. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	0,05153	0,01718	32,14	0,009	82,47
B	3	0,0010	0,00033	0,62	0,646	1,60
C	3	0,00769	0,00256	4,79	0,115	12,30
D	3	0,00066	0,00022	0,41	0,757	1,06
Hata	3	0,0016	0,00053	-	-	2,57
Toplam	15	0,06248	-	-	-	100

S = 0,023 R-Sq = % 97,43 R-Sq (adj) = % 87,17



Şekil Ek C.10. M3pd malzemesinin P/L değerine göre dairesellik hatası değişim grafiği.



EK AÇIKLAMALAR D.

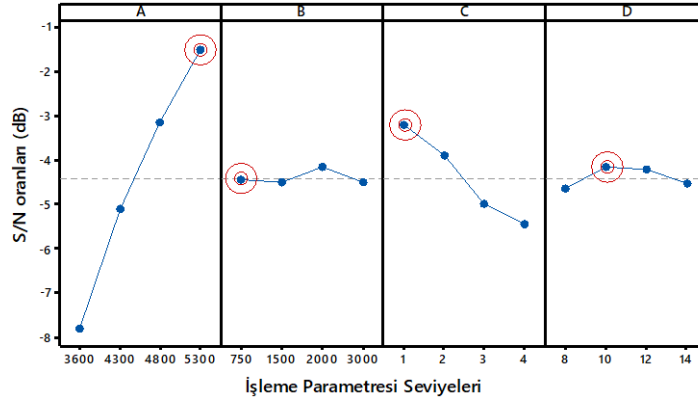
ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN DENEY/TEST SONUÇLARI

Çizelge Ek D.1. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	2,153	-6,661
2	3600	1500	2	10	2,188	-6,799
3	3600	2000	3	12	2,598	-8,293
4	3600	3000	4	14	2,708	-8,653
5	4300	750	2	12	1,746	-4,840
6	4300	1500	1	14	1,678	-4,493
7	4300	2000	4	8	1,950	-5,801
8	4300	3000	3	10	1,838	-5,285
9	4800	750	3	14	1,508	-3,565
10	4800	1500	4	12	1,563	-3,876
11	4800	2000	1	10	1,238	-1,851
12	4800	3000	2	8	1,473	-3,361
13	5300	750	4	10	1,368	-2,719
14	5300	1500	3	8	1,385	-2,829
15	5300	2000	2	14	1,080	-0,668
16	5300	3000	1	12	0,990	0,087

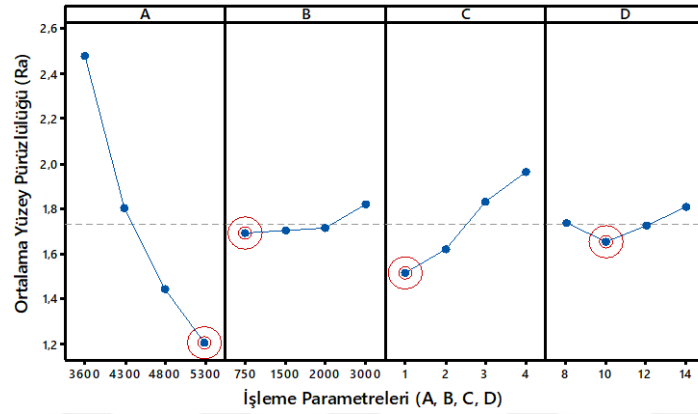
Çizelge Ek D.2. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-7,601	-4,446	-3,229	-4,663
2	-5,105	-4,499	-3,917	-4,163
3	-3,163	-4,153	-4,993	-4,230
4	-1,532	-4,303	-5,262	-4,345
Delta	6,069	0,346	2,033	0,500
Rank	1	4	2	3
Ortalamalar				
1	2,412	1,693	1,515	1,740
2	1,803	1,703	1,621	1,658
3	1,445	1,716	1,832	1,724
4	1,206	1,752	1,897	1,743
Delta	1,206	0,059	0,383	0,086
Rank	1	4	2	3



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



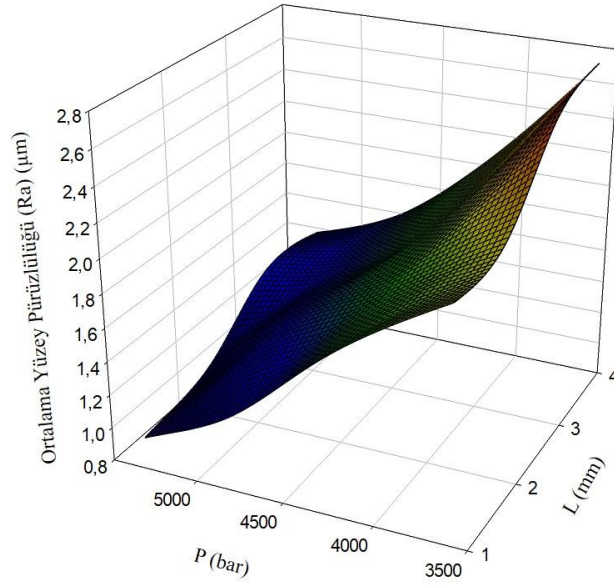
b)

Şekil Ek D.1. M2 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek D.3. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	3,3013	1,10044	61,68	0,003	87,68
B	3	0,0079	0,00263	0,15	0,925	0,21
C	3	0,3830	0,12768	7,16	0,07	10,17
D	3	0,0193	0,00642	0,36	0,788	0,51
Hata	3	0,0535	0,01784	-	-	1,42
Toplam	15	3,7650	-	-	-	100

S = 0,134 R-Sq = % 98,58 R-Sq (adj) = % 92,89



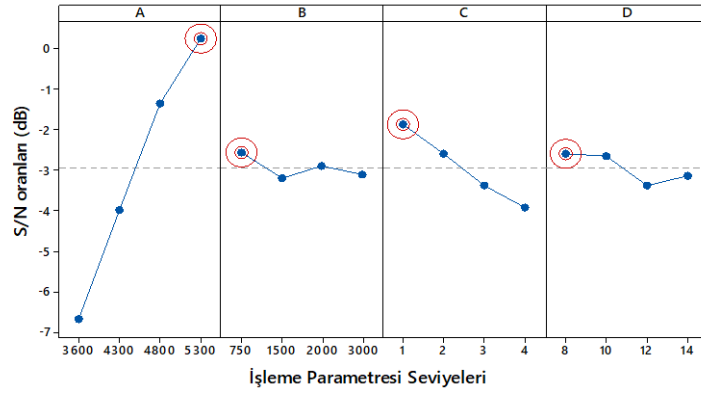
Şekil Ek D.2. M2 malzemesinin P/L değerine göre Ra değişim grafiği.

Çizelge Ek D.4. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A Su basıncı (P)	B Nozul ilerleme hızı (f)	C Nozul yaklaşma mesafesi (L)	D Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,758	-4,900
2	3600	1500	2	10	2,400	-7,604
3	3600	2000	3	12	2,423	-7,687
4	3600	3000	4	14	2,617	-8,356
5	4300	750	2	12	1,543	-3,767
6	4300	1500	1	14	1,468	-3,335
7	4300	2000	4	8	1,703	-4,624
8	4300	3000	3	10	1,637	-4,281
9	4800	750	3	14	1,205	-1,620
10	4800	1500	4	12	1,413	-3,003
11	4800	2000	1	10	0,998	0,017
12	4800	3000	2	8	1,090	-0,749
13	5300	750	4	10	1,003	-0,026
14	5300	1500	3	8	1,018	-0,155
15	5300	2000	2	14	0,948	0,464
16	5300	3000	1	12	0,920	0,724

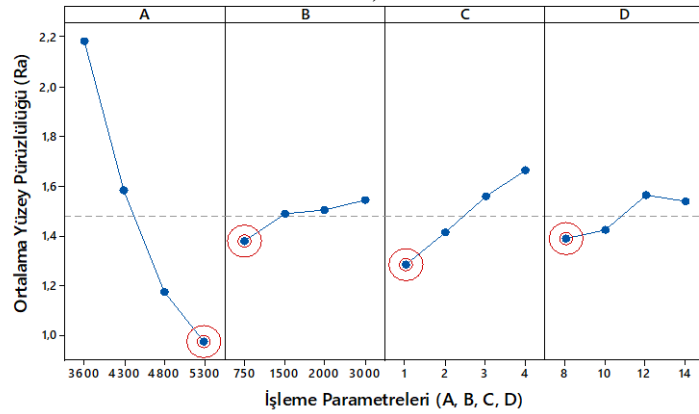
Çizelge Ek D.5. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-7,137	-2,578	-1,873	-2,607
2	-4,002	-3,524	-2,914	-2,974
3	-1,338	-2,958	-3,436	-3,433
4	0,252	-3,165	-4,002	-3,212
Delta	7,389	0,946	2,129	0,826
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,300	1,377	1,286	1,392
2	1,588	1,575	1,495	1,510
3	1,177	1,518	1,571	1,575
4	0,972	1,566	1,684	1,560
Delta	1,327	0,198	0,398	0,183
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



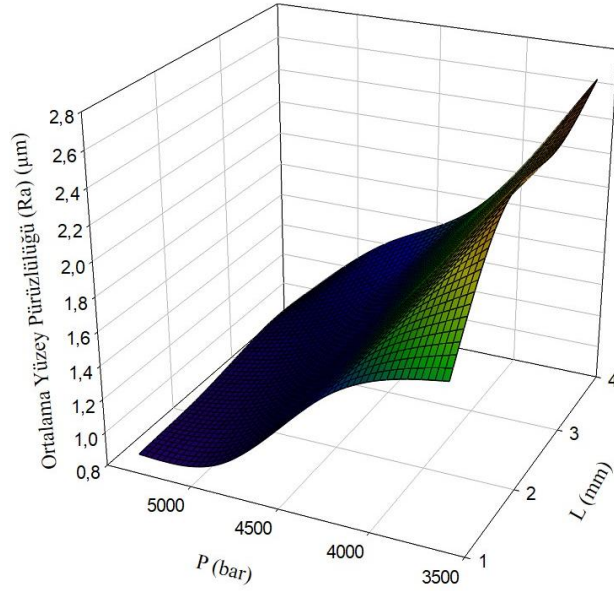
b)

Şekil Ek D.3. M3 malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek D.6. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	4,11899	1,373	119,77	0,001	88,15
B	3	0,10004	0,03335	2,91	0,202	2,14
C	3	0,33742	0,11247	9,81	0,046	7,22
D	3	0,08202	0,02734	2,38	0,247	1,76
Hata	3	0,03439	0,01146	-	-	0,74
Toplam	15	4,67287	-	-	-	100

S = 0,107 R-Sq = % 99,26 R-Sq (adj) = % 96,32



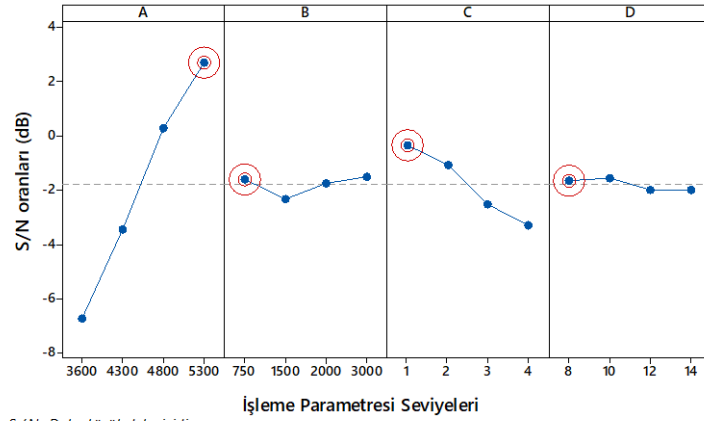
Şekil Ek D.4. M3 malzemesinin P/L değerine göre Ra değişim grafiği.

Çizelge Ek D.7. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,790	-5,055
2	3600	1500	2	10	1,965	-5,867
3	3600	2000	3	12	2,292	-7,205
4	3600	3000	4	14	2,593	-8,274
5	4300	750	2	12	1,400	-2,923
6	4300	1500	1	14	1,390	-2,860
7	4300	2000	4	8	1,643	-4,310
8	4300	3000	3	10	1,543	-3,769
9	4800	750	3	14	1,005	-0,043
10	4800	1500	4	12	1,275	-2,110
11	4800	2000	1	10	0,805	1,884
12	4800	3000	2	8	0,858	1,335
13	5300	750	4	10	0,840	1,514
14	5300	1500	3	8	0,850	1,412
15	5300	2000	2	14	0,690	3,223
16	5300	3000	1	12	0,650	3,742

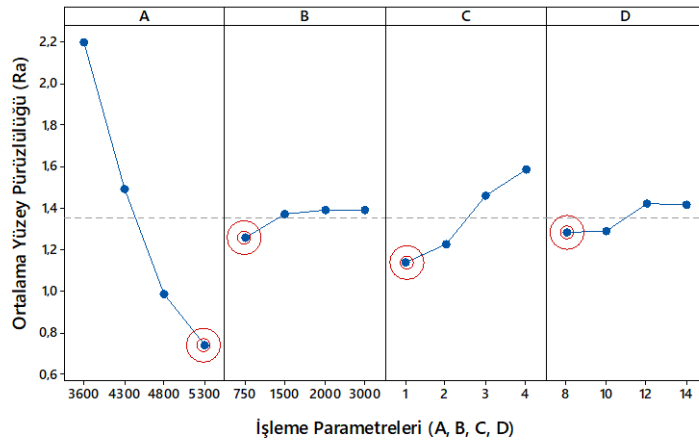
Çizelge Ek D.8. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-6,600	-1,627	-0,572	-1,655
2	-3,465	-2,357	-1,058	-1,559
3	0,267	-1,602	-2,401	-2,124
4	2,473	-1,742	-3,295	-1,989
Delta	9,073	0,755	2,723	0,565
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,160	1,259	1,159	1,285
2	1,494	1,370	1,228	1,288
3	0,986	1,357	1,423	1,404
4	0,758	1,411	1,588	1,419
Delta	1,402	0,152	0,429	0,135
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



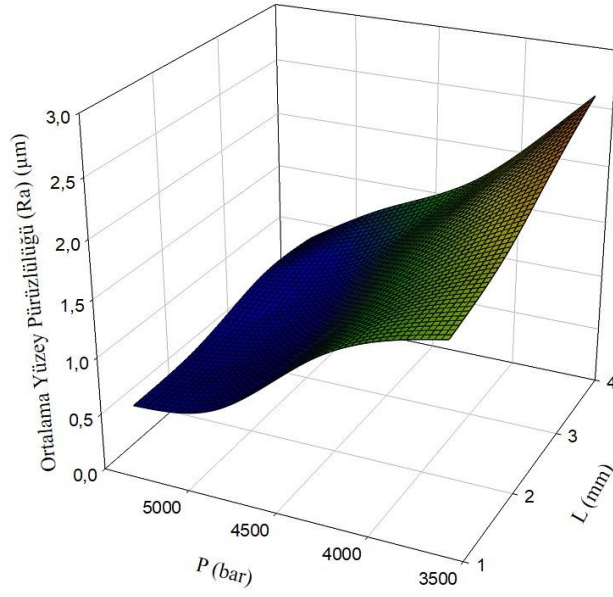
b)

Şekil Ek D.5. M1pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek D.9. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	4,64135	1,54712	204,04	0,001	88,75
B	3	0,0500	0,01667	2,20	0,267	0,96
C	3	0,45262	0,15087	19,90	0,018	8,65
D	3	0,06323	0,02108	2,78	0,212	1,21
Hata	3	0,02275	0,00758	-	-	0,43
Toplam	15	5,2300	-	-	-	100

S = 0,087 R-Sq = % 99,57 R-Sq (adj) = % 97,83



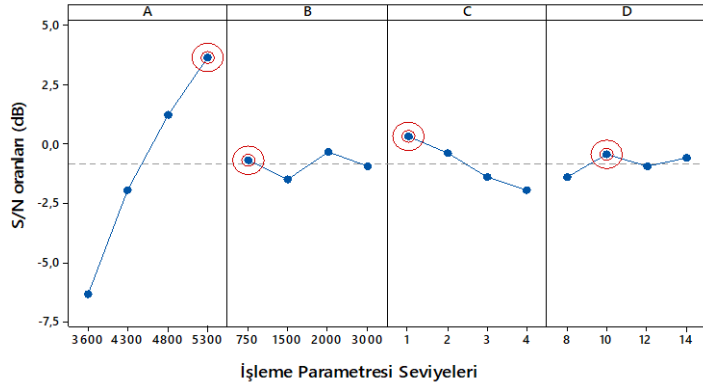
Şekil Ek D.6. M1pd malzemesinin P/L değerine göre Ra değişim grafiği.

Çizelge Ek D.10. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A Su basıncı (P)	B Nozul ilerleme hızı (f)	C Nozul yaklaşma mesafesi (L)	D Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,965	-5,867
2	3600	1500	2	10	2,000	-6,021
3	3600	2000	3	12	2,050	-6,236
4	3600	3000	4	14	2,558	-8,156
5	4300	750	2	12	1,168	-1,345
6	4300	1500	1	14	1,118	-0,965
7	4300	2000	4	8	1,427	-3,087
8	4300	3000	3	10	1,330	-2,477
9	4800	750	3	14	0,873	1,185
10	4800	1500	4	12	1,111	-0,910
11	4800	2000	1	10	0,678	3,382
12	4800	3000	2	8	0,863	1,285
13	5300	750	4	10	0,680	3,350
14	5300	1500	3	8	0,795	1,993
15	5300	2000	2	14	0,590	4,583
16	5300	3000	1	12	0,585	4,657

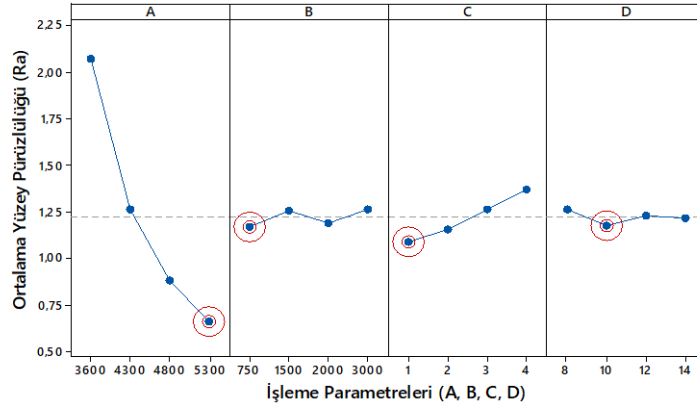
Çizelge Ek D.11. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-6,570	-0,670	0,302	-1,419
2	-1,969	-1,476	-0,375	-0,442
3	1,235	-0,340	-1,384	-0,959
4	3,646	-1,173	-2,201	-0,838
Delta	10,216	1,136	2,503	0,978
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,143	1,171	1,086	1,262
2	1,260	1,256	1,155	1,172
3	0,881	1,186	1,262	1,228
4	0,663	1,334	1,444	1,284
Delta	1,481	0,163	0,357	0,113
Rank	1	3	2	4



S/N : Daha küçük daha iyidir

a)



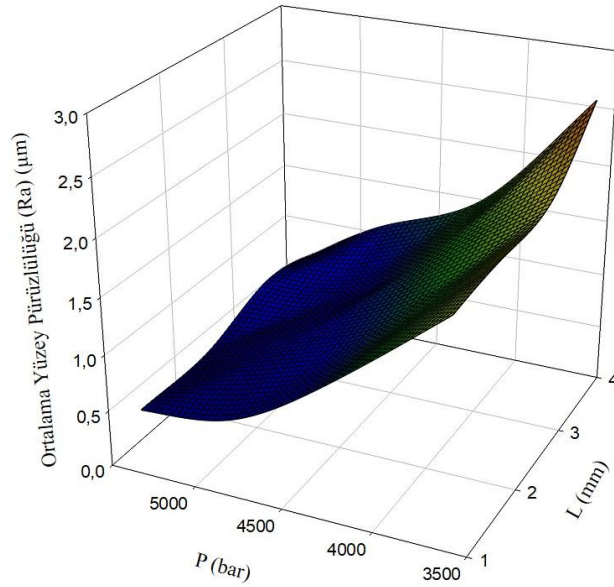
b)

Şekil Ek D.7. M2pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.

Çizelge Ek D.12. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	5,11476	1,70492	163,55	0,001	92,45
B	3	0,06649	0,02216	2,13	0,276	1,20
C	3	0,29116	0,09705	9,31	0,05	5,26
D	3	0,02881	0,0096	0,92	0,526	0,52
Hata	3	0,03127	0,01042	-	-	0,57
Toplam	15	5,53249	-	-	-	100

S = 0,102 R-Sq = % 99,43 R-Sq (adj) = % 97,17



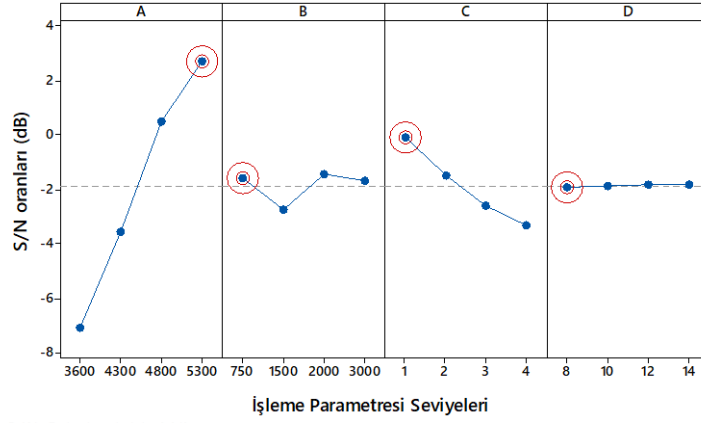
Şekil Ek D.8. M2pd malzemesinin P/L değerine göre Ra değişim grafiği.

Çizelge Ek D.13. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları.

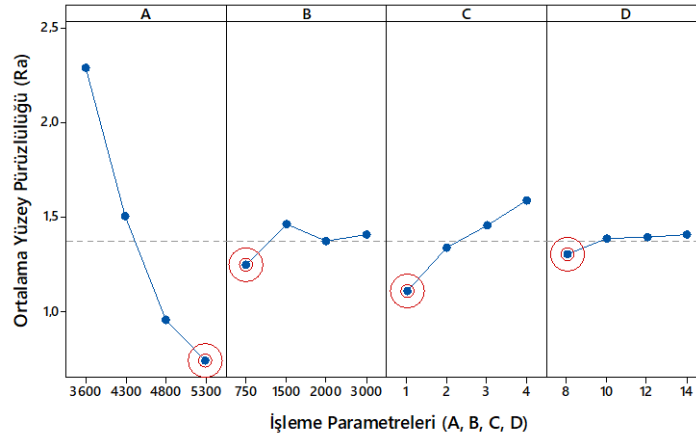
Deney Sayısı	İşleme Parametreleri				Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (µm)	Hesaplanan S/N oranı (dB)
	A	B	C	D		
	Su basıncı (P)	Nozul ilerleme hızı (f)	Nozul yaklaşma mesafesi (L)	Delik çapı (D)		
1	3600	750	1	8	1,716	-4,692
2	3600	1500	2	10	2,400	-7,604
3	3600	2000	3	12	2,423	-7,688
4	3600	3000	4	14	2,617	-8,354
5	4300	750	2	12	1,413	-3,000
6	4300	1500	1	14	1,395	-2,891
7	4300	2000	4	8	1,703	-4,622
8	4300	3000	3	10	1,532	-3,705
9	4800	750	3	14	0,988	0,109
10	4800	1500	4	12	1,178	-1,419
11	4800	2000	1	10	0,745	2,557
12	4800	3000	2	8	0,925	0,677
13	5300	750	4	10	0,873	1,185
14	5300	1500	3	8	0,893	0,988
15	5300	2000	2	14	0,638	3,910
16	5300	3000	1	12	0,580	4,731

Çizelge Ek D.14. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için S/N oranları ve ortalama değerlerin tepki tablosu.

Seviyeler	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			
	A	B	C	D
S/N oranları				
1	-7,085	-1,599	-0,074	-1,912
2	-3,555	-2,732	-1,504	-1,892
3	0,481	-1,461	-2,574	-1,844
4	2,704	-1,663	-3,303	-1,807
Delta	9,788	1,271	3,229	0,106
Rank	1	3	2	4
Ortalamalar				
1	2,289	1,247	1,109	1,309
2	1,511	1,466	1,344	1,387
3	0,959	1,377	1,459	1,398
4	0,746	1,413	1,592	1,409
Delta	1,543	0,219	0,483	0,100
Rank	1	3	2	4



a)



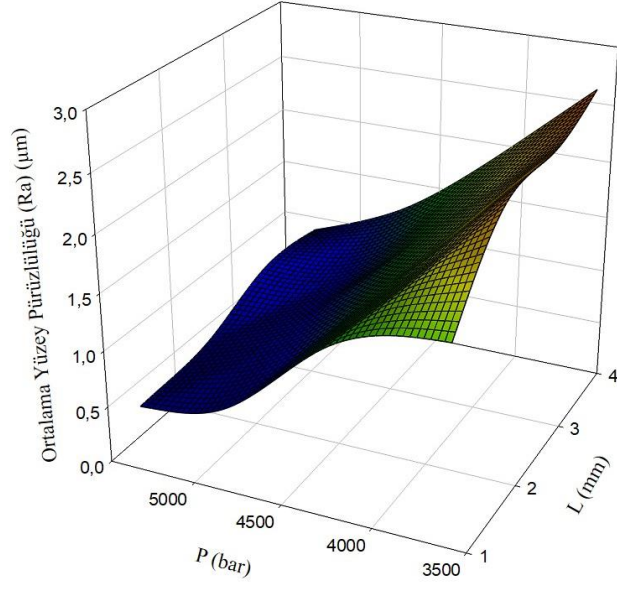
b)

Şekil Ek D.9. M3pd malzemesinin ASJ ile delinmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi a) S/N oranlarının ortalaması b) Ölçülen değerler ortalaması.


Çizelge Ek D.15. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
A	3	5,6925	1,8975	87,34	0,002	89,07
B	3	0,1045	0,0349	1,60	0,354	1,64
C	3	0,5037	0,1679	7,73	0,064	7,88
D	3	0,0248	0,0083	0,38	0,776	0,39
Hata	3	0,0652	0,0217	-	-	1,02
Toplam	15	6,3907	-	-	-	100

S = 0,147 R-Sq = % 98,98 R-Sq (adj) = % 94,90



Şekil Ek D.10. M3pd malzemesinin P/L değerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği.



EK AÇIKLAMALAR E.
PARAMETRELERİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Çizelge Ek E.1. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,130	-1,061
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,062	-0,522
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,043	-0,516

Çizelge Ek E.2. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,080	-0,671
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,057	-0,482
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,042	-0,399

Çizelge Ek E.3. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,071	-0,759
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,053	-0,449
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,070	-0,615

Çizelge Ek E.4. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,083	-0,692
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,030	-0,257
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,023	-0,270

Çizelge Ek E.5. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (üst) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (üst)	
		F_d (üst)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,050	-0,423
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D4	1,042	-0,357
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D4	1,049	-0,429

Çizelge Ek E.6. M1 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,055	-0,465
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,027	-0,231
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,030	-0,290

Çizelge Ek E.7. M2 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,029	-0,247
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,980	0,175
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,969	0,148

Çizelge Ek E.8. M3 malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,058	-0,491
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	1,015	-0,129
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	1,029	-0,283

Çizelge Ek E.9. M1pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,039	-0,333
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,992	0,070
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	1,010	-0,126

Çizelge Ek E.10. M2pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,021	-0,183
Optimum kombinasyon (deney)	A4B3C1D4	0,957	0,382
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B3C1D4	1,018	-0,155

Çizelge Ek E.11. M3pd malzemesinin delaminasyon faktörü (alt) için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Delaminasyon Faktörü (F_d) (alt)	
		F_d (alt)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,028	-0,240
Optimum kombinasyon (deney)	A4B4C1D3	0,983	0,149
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B4C1D3	1,013	-0,112

Çizelge Ek E.12. M2 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,208	-1,641
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	1,100	-0,828
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,989	-1,226

Çizelge Ek E.13. M3 malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,185	-1,474
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D3	0,982	0,158
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D3	1,009	-0,078

Çizelge Ek E.14. M1pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	1,116	-0,953
Optimum kombinasyon (deney)	A4B3C1D2	1,052	-0,440
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B3C1D2	1,045	-1,010

Çizelge Ek E.15. M2pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,870	1,210
Optimum kombinasyon (deney)	A4B3C1D3	0,754	2,453
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B3C1D3	0,776	0,908

Çizelge Ek E.16. M3pd malzemesinin kerf açısı için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Kerf açısı (T)	
		T (°)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,951	0,436
Optimum kombinasyon (deney)	A4B3C1D2	0,810	1,830
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B3C1D2	0,808	0,791

Çizelge Ek E.17. M2 malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,719	2,865
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,620	4,152
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,632	3,986

Çizelge Ek E.18. M3 malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,659	3,622
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	0,525	5,597
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	0,547	5,240

Çizelge Ek E.19. M1pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,636	3,931
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,414	7,660
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,622	4,124

Çizelge Ek E.20. M2pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,649	3,755
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D3	0,603	4,394
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D3	0,645	3,809

Çizelge Ek E.21. M3pd malzemesinin dairesellik hatası için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Dairesellik Hatası (mm)	
		CMM (mm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,618	4,180
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D3	0,514	5,781
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D3	0,562	5,005

Çizelge Ek E.22. M2 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,990	0,087
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,900	0,915
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,922	-0,320

Çizelge Ek E.23. M3 malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,920	0,724
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	0,530	5,514
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	0,501	2,362

Çizelge Ek E.24. M1pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,650	3,742
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	0,440	7,131
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	0,412	4,114

Çizelge Ek E.25. M2pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,585	4,657
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D2	0,400	7,960
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D2	0,382	5,580

Çizelge Ek E.26. M3pd malzemesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için ölçülen ve Taguchi tasarımına göre tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması.

	Seviye	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	
		Ra (μm)	S/N (dB)
Rastgele kombinasyon	A4B4C1D3	0,580	4,731
Optimum kombinasyon (deney)	A4B1C1D1	0,320	9,897
Optimum kombinasyon (tahmin)	A4B1C1D1	0,283	4,709



ÖZGEÇMİŞ

Meltem ALTIN KARATAŞ 1981 yılında Hatay ilinin İskenderun ilçesinde doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. İskenderun Anadolu Teknik/Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nin Makine Ressamlığı bölümünde aldığı eğitimin ardından, 2005 yılında Gazi Üniversitesi Makine Resim ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2005 ile 2012 yılları arasında İskenderun'da özel filtre üretimi yapan bir firmada çalıştı. 2008 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini Mustafa Kemal Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD'de 2010 yılında tamamladı. 2012 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Gerede Meslek Yüksekokulu, Makine Resim ve Konstrüksiyon Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.