

**INCONEL 718 NİKEL ALAŞIMININ ELEKTRO-
TERMAL İŞLEME YÖNTEMLERİYLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mustafa AY

**Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK**

OCAK - 2013

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**INCONEL 718 NİKEL ALAŞIMININ ELEKTRO-TERMAL İŞLEME
YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Mustafa AY

(04219203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07/01/2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 28/01/2013

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER (G.Ü)

Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü)

Doç. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK (F.Ü)

OCAK - 2013

ÖNSÖZ

Emek ve bilgisiyle bu tez çalışmasının ortaya çıkarılmasında tüm gücüyle yardımcı olan, hiçbir aşamasında beni yalnız bırakmayan tez danışmanım çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK' a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca daima her türlü ilgisini, desteğini eksik etmeyen ve görüşleriyle de beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ' a, manevi desteklerini esirgemeyen doktora tezimin tez izleme komitesi üyelerinden Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR ile Yrd. Doç. Dr. Cebeli ÖZEK hocalarıma da sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından maddi olarak desteklenen 1797 no' lu projemize katkıda bulunan bütün FÜBAP personeline de ayrıca teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mustafa AY

ELAĞIĞ - 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
TABLolar LİSTESİ	XVII
SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ	XIX
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Lazer ışını ile kesme alanında yapılan çalışmalar	5
2.2. Plazma ile kesme alanında yapılan çalışmalar	7
2.3. Tel erozyon ile kesme alanında yapılan çalışmalar	8
2.4. Inconel 718 alaşımının talaşlı işlenebilirliği alanında yapılan çalışmalar	9
2.4.1. Inconel 718 alaşımının İşlenebilirliği	10
2.4.2. Inconel 718 alaşımının sementit karbür takımlarla işlenebilirliği	11
2.4.3. Inconel 718 alaşımının seramik takımlarla işlenebilirliği	15
2.4.4. Inconel 718 alaşımının yardımcı teknikler kullanarak işlenebilirliği	17
3. SÜPER ALAŞIMLAR	20
3.1. Süper Alaşımların Gelişim Süreci	22
3.2. Süper Alaşımların Sınıflandırılması	23
3.2.1. Nikel esaslı süper alaşımlar	24
3.2.1.1. Nikel esaslı süper alaşımlardaki alaşım elementleri	25
3.2.1.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikroyapısı	27
3.2.2. Demir esaslı süper alaşımlar	28
3.2.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar	29
4. TERMAL KESME YÖNTEMLERİ	31
4.1. Lazer Işını İle Kesme Yöntemi	31
4.1.1. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensipleri	31
4.1.2. Endüstriyel Alanda Kullanılan Lazerler	34
4.1.2.1. Karbondioksit (CO ₂) Lazeri	34
4.1.2.2. Nd:YAG Lazeri	35

4.1.3.	Lazer Işınıyla Kesmenin Prensibi	37
4.1.4.	Lazer Kesme İşleminde Karakteristik Yapı	38
4.1.4.1.	Kerf Genişliği.....	39
4.1.4.2.	Yüzey Pürüzlülüğü.....	39
4.1.4.3.	Isıdan Etkilenen Bölge(IEB).....	40
4.1.5.	Lazer Kesme İşleminde İşlem Parametreleri	40
4.1.5.1.	Lazer Gücü.....	41
4.1.5.2.	Kesme Hızı.....	41
4.1.5.3.	Gaz Basıncı	42
4.1.5.4.	Lazer Işınının Frekansı	42
4.2.	Plazma Arkı İle Kesme Yöntemi	42
4.2.1.	Plazmanın Tanımı ve Çalışma Prensibi	42
4.2.2.	Plazma Yapıcı Ortamlar.....	44
4.2.3.	Endüstriyel Alanda Kullanılan Plazma Ark Sistemleri.....	47
4.2.3.1.	Geleneksel Plazma Kesim.....	47
4.2.3.2.	Çift Gazlı Plazma Kesim	48
4.2.3.3.	Su Korumalı Plazma Kesim.....	48
4.2.3.4.	Su Enjeksiyonlu Plazma Kesim	49
4.2.3.5.	Hassas Plazma Kesim	49
4.2.4.	Plazma Kesme İşleminde İşlem Parametreleri.....	50
4.2.4.1.	Gaz Parametreleri.....	50
4.2.4.2.	Amper	50
4.2.4.3.	Kesme Hızı.....	51
4.3.	Tel Erozyon İle Kesme Yöntemi	51
4.3.1.	Elektro Erozyonun Tanımı ve Çalışma Prensibi.....	51
4.3.2.	Tel Erozyon İle Kesme İşleminde İşlem Parametreleri	53
4.3.2.1.	Vurum Süresi (T_{on})	53
4.3.2.2.	Vurum Ara Süresi (T_{off})	54
4.3.2.3.	Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)	54
4.3.2.4.	Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)	55
4.3.2.5.	Aralık Voltajı (SV)	55
4.3.2.6.	Tel Gerilmesi (WT).....	55
4.3.2.7.	Tel İlerleme Hızı (WS)	55

4.3.2.8.	Tabla İlerleme Hızı (SF)	56
4.3.2.9.	Dielektrik Sıvısı Sirkülasyon Basıncı	56
5.	MATERYAL VE METOD.....	57
5.1.	Çalışmanın Amacı.....	57
5.2.	Deney malzemesi ve numunelerin hazırlanması.....	57
5.3.	Lazer Işını İle Kesme Deneyleri	59
5.3.1.	Lazer Işını İle Kesme Deneylerinde Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi	60
5.4.	Plazma Arkı İle Kesme Deneyleri	61
5.4.1.	Plazma Arkı İle Kesme Deneylerinde İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi	62
5.5.	Tel Erozyon (WEDM) İle Kesme Deneyleri	63
5.5.1.	Tel Erozyon (WEDM) İle Kesme Deneylerinde İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi	64
5.6.	Kerf Geometrisi Ölçümleri	64
5.7.	Metalografik İncelemeler.....	65
5.8.	Mikrosertlik Ölçümleri	66
5.9.	AFM Yüzey Morfolojisi İncelemeleri	66
5.10.	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri (Ra)	67
6.	DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	68
6.1.	Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri	68
6.2	Lazer Işını İle Kesme Deney Sonuçları	77
6.2.1.	Metallurjik İnceleme Sonuçları.....	77
6.2.1.1.	Yüzey Yapısı.....	77
6.2.1.1.1.	Lazer Işını İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi	78
6.2.1.2.	Isıdan Etkilenen Bölge	80
6.2.2.	Yeniden Katılaştıran Tabak Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları.....	85
6.2.2.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' ye Etkisi.....	85
6.2.2.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' ye Etkisi	88
6.2.2.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' ye Etkisi.....	90
6.2.3.	Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	92
6.2.4.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	93

6.2.4.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	94
6.2.4.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	96
6.2.4.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	98
6.2.5.	Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları	100
6.2.5.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	101
6.2.5.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	102
6.2.5.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	104
6.2.6.	Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları	106
6.2.6.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	106
6.2.6.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	109
6.2.6.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	111
6.3.	Plazma Arkı İle Kesme Deney Sonuçları	113
6.3.1.	Metallurjik İnceleme Sonuçları	113
6.3.1.1.	Yüzey Yapısı	113
6.3.1.1.1.	Plazma Arkı İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi	113
6.3.1.2.	Isıdan Etkilenen Bölge	116
6.3.2.	YKTK Ölçüm Sonuçları	120
6.3.2.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	120
6.3.2.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	123
6.3.2.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	125
6.3.3.	Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	127
6.3.4.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	128
6.3.4.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	128

6.3.4.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	130
6.3.4.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	132
6.3.5.	Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları	134
6.3.5.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi ...	134
6.3.5.2.	II. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	136
6.3.5.3.	III. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	137
6.3.6.	Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları	139
6.3.6.1.	I. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	139
6.3.6.2.	II. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	142
6.3.6.3.	III. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi	144
6.4.	Tel Elektro Erozyon İle Kesme Deney Sonuçları	146
6.4.1.	Metallurjik İnceleme Sonuçları	146
6.4.1.1.	Yüzey Yapısı	146
6.4.1.1.1.	Tel Elektro Erozyon İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi	147
6.4.1.2.	Isıdan Etkilenen Bölge	149
6.4.2.	YKTK Ölçüm Sonuçları	154
6.4.2.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	154
6.4.2.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	157
6.4.2.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK' na Etkisi	159
6.4.3.	Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	161
6.4.4.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	162
6.4.4.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	163
6.4.4.2.	II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	165

6.4.4.3.	III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	166
6.4.5.	Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları	168
6.4.5.1.	I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi ...	170
6.4.5.2.	II. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	171
6.4.5.3.	III. Gurup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi	173
7.	DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ.....	175
7.1.	Lazer Işını ile Kesme Deneylerinin İstatiksel Analizi	176
7.1.1.	YKTK' nın İstatiksel Analizi.....	176
7.1.2.	Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi	179
7.1.3.	Kerf Genişliği İstatiksel Analizi	182
7.1.4.	Kerf Eğim Açısı İstatiksel Analizi.....	184
7.2.	Plazma Arkı ile Kesme (PAK) Deneylerinin İstatiksel Analizi.....	187
7.2.1.	YKTK' nın İstatiksel Analizi.....	188
7.2.2.	Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi	190
7.1.3.	Kerf Genişliği İstatiksel Analizi	193
7.2.4.	Kerf Eğim Açısı İstatiksel Analizi.....	195
7.3.	Tel Erozyon İle Kesme Deneylerinin İstatiksel Analizi	198
7.3.1.	YKTK' nın İstatiksel Analizi.....	198
7.3.2.	Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi	200
7.1.3.	Kerf Genişliği İstatiksel Analizi	203
8.	DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ.....	206
8.1.	Lazer Işını İle Kesme Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi.....	206
8.2.	PAK Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi	209
8.3.	Tel Erozyon İle Kesme Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi.....	213
9.	ÇOKLU PERFORMANS ANALİZİ.....	217
9.1.	Lazer Işını ile Kesme Deneylerinin Çoklu Performans Analizi	219
9.2.	PAK Deneylerinin Çoklu Performans Analizi.....	222

9.3.	Tel Erozyon İle Kesme Deneylerinin Çoklu Performans Analizi.....	225
10.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	228
10.1.	Genel Sonuçlar	228
10.2.	Öneriler	231
	KAYNAKLAR	232
	ÖZGEÇMİŞ.....	244

ÖZET

Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımların çok yaygın kullanım alanı olmasına rağmen, düşük termal iletkenliği, sertliği, işleme sertleşmesi, gibi kendine has özelliklerinden dolayı işlenmesi zor malzeme sınıfına girmektedir. Bu alaşımların kullanım alanları dikkate alındığında, özellikle büyük ebatlarda plakalar halindeki bu alaşımlara karmaşık profillerin, yüksek yüzey ve ölçü tamlığında işlenmeleri klasik işleme yöntemleriyle sınırlıdır. Bu yüzden termal işleme yöntemleri, bu alaşımın daha ekonomik bir şekilde işlenebilirliğine olanak tanımaktadır. Bu gerekçelerden yola çıkarak, bu çalışmada, farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımı, lazer ışını ile işleme (LBM), plazma arkı ile kesme (PAC) ve tel erozyonu ile işleme (WEDM) olmak üzere toplam 3 farklı termal yöntem ile işlenmiş ve her bir işleme yönteminde kullanılan parametrelerin işleme kalitesi üzerindeki etkileri deneysel ve bilgisayar programı yardımıyla incelenmiştir. Deneyler neticesinde numunelerin yüzey ve ısıdan etkilenen tabakaları taramalı elektron mikroskobunda (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobunda (AFM) incelenmiş, noktasal analiz (EDS), X – ışınları analizi (XRD) ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerin yüzey formasyonları, pürüzlülük değerleri, mikroyapı değişimleri, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, kerf genişlikleri, kerf eğim açıları gibi karakteristik değişimler ve malzemelerin ısıl iletkenliklerinin işleme kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Her üç yöntemde de işleme etki eden parametrelerin bağıl etkileri istatistiki açıdan değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. Ayrıca yöntemler, lineer regresyon metodu kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen modellerin uygunlukları varyans analizi ve artık analiz yöntemleri ile kontrol edilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen modellerin her üç yöntemde de bundan sonraki uygulamalar için deney yapmadan tahmin amaçlı kullanılabileceği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Inconel 718, lazer kesme, plazma arkı ile kesme, tel erozyon ile kesme, varyans analizi, modelleme

SUMMARY

Investigation of The Machinability of The Inconel 718 Nickel Alloys by Electro - Thermal Machining Processes

Although a widespread usage area of Inconel 718 nickel based superalloys, these alloys are classified as difficult to cut materials due to the low thermal conductivity, hardness, work hardening. Considering the usage areas of these alloys, it is restricted to machine these alloys in high tolerances and complex shapes by traditional machining processes, especially for the big size plates. Thus, the thermal machining processes facilitate to machine this alloy by a more economical way. Owing to these reasons, in this study, the different age hardened Inconel 718 nickel based superalloy at different temperature and times was machined by there different thermal processes namely, laser beam machining (LBM), plasma arc cutting (PAC) and wire electrical discharge machining (WEDM). The effects of cutting parameters on the machining quality were investigated experimentally and by the help of computer programmers for the each processes. At the end of the experiments, the surface and heat affected zones of the samples were metallographically observed by scanning electron microscope (SEM), atomic force microscope (AFM), dispersive spectrograph (EDS), X – ray diffraction (XRD) and surface hardness measurements. Some characteristic changes such as the roughness of the machined surfaces, microstructural changes, recast layer thickness, kerf wides, kerf taper ratios and the effect of thermal conductivity factor of the material on the machining quality were the main performance characteristics under investigation. The relative effects of machining parameters were evaluated statistically and optimized for the three machining processes. Additionally, the processes were modeled by using the linear regression approach. The adequacies of models were checked by analysis of variance (ANOVA) and residual analysis techniques. As a consequence, it is concluded that the developed models could be used to predict the all machining processes without making experiments for the future works.

Keywords: Inconel 718, laser cutting, plasma arc cutting, wire electrical discharge machining, analysis of variance, modeling.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 YA veya yanaşma açısı.....	13
Şekil 2.2. Al ₂ O ₃ CVD kaplı sementit karbür takımında YA' nın takım ömrüne etkisi.....	13
Şekil 2.3 Inconel 718' in tornalanmasında kullanılan PVD–TiN, TiCN ve TiAlN takımların (a) takım ömürleri, (b) maksimum yanak aşınması.....	14
Şekil 2.4 Inconel 718 in Al ₂ O ₃ /TiC takımlarla işlenmesinde kesme hızının kesme sıcaklığına etkisi	15
Şekil 2.5 Inconel 718 in işlenmesi sonucunda seramik takımında meydana gelen abrasif aşınma görüntüsü	16
Şekil 2.6 (a) Inconel 718 in SiC takviyeli seramik takım ile frezelenmesinde 1.25 mm talaş derinliğinde takımda meydana gelen bozulmalar. (b) 1.25, 0.5 ve 0.25mm talaş derinliğinde takımda meydana gelen bozulmalar.....	17
Şekil 2.7 Yardımcı ısı kaynağı kullanılarak yapılan işleme prosesinin şematik gösterimi	18
Şekil 2.8 Inconel 718' in sıcaklığa bağlı akma gerilmesi değişim grafiği	18
Şekil 2.9 Sıvı nitrojen kaynağı yerleştirilmiş çift nozullu soğutma sisteminin şematik gösterimi	19
Şekil 3.1 Uçak motorunun bölümleri ve bu bölümlerde kullanılan süper alaşımlar	20
Şekil 3.2 Süper alaşımların sınıflandırılması	24
Şekil 4.1 Kendiliğinden ısıma ve soğurma	31
Şekil 4.2 Uyarılmış ısıma	31
Şekil 4.3 Basitleştirilmiş tipik bir lazer şeması	32
Şekil 4.4 Lazer ışığının oluşum aşamalarının şematik gösterimi	33
Şekil 4.5 Karbondioksit lazer mekanizmasının şematik görünümü	34
Şekil 4.6 Nd: YAG Lazer mekanizmasının şematik görünümü.....	36
Şekil 4.7 Lazer ışını ve malzeme etkileşimi.....	38
Şekil 4.8 Lazer kesme işleminde işleme performansını belirleyen karakteristiklerin şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.9 Lazer kesim işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölgenin şematik gösterimi ...	40
Şekil 4.10 Değişik çıkış gücündeki lazer kesme sistemlerinde (1200W, 1500W, 2200W ve 2600W) kesim yapılabilecek malzeme kalınlıkları	41
Şekil 4.11 Plazma arkının oluşum aşamalarının şematik gösterimi	44
Şekil 4.12 Geleneksel plazma kesim sisteminin şematik gösterimi	47
Şekil 4.13 Çift gazlı plazma kesim sisteminin şematik gösterimi	48
Şekil 4.14 Su korumalı plazma kesim sisteminin şematik gösterimi	48
Şekil 4.15 Su enjeksiyonlu plazma kesim sisteminin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.16 Düz ve dönen gaz plazma kesim sistemiyle yapılan kesimlerde meydana gelen kerf eğimlerinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.17 Dönen gaz plazma kesim sisteminin şematik gösterimi.....	50
Şekil 4.18 Tel elektro erozyon ile kesim sisteminin şematik gösterimi	52
Şekil 4.19 Tel elektro erozyonda deşarj işleminin safhaları.....	53
Şekil 5.1 Numunelere uygulanan ısıtma işlem şemaları (a:1. Isıl işlem, b:2. Isıl işlem)....	59
Şekil 5.2 Kesim sonrası numunelere ait şematik görünüm.....	60
Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan plazma ark kesim tezgahı.....	62
Şekil 5.4 Deneylerde kullanılan tel erozyon tezgahı.....	63

Şekil 5.5 Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi.....	65
Şekil 5.6 Metalografik incelemeler için hazırlanan numunelerin şematik gösterim.....	66
Şekil 6.1 Isıl işlem görmemiş numuneye ait SEM görüntüsü.....	68
Şekil 6.2 Isıl işlem görmemiş numuneye ait AFM görüntüsü.....	68
Şekil 6.3 I. Gurup (Isıl işlem görmemiş) numuneden alınan EDS analizi.....	69
Şekil 6.4 Isıl işlem görmemiş numuneden alınan XRD analizi.....	69
Şekil 6.5 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü.....	70
Şekil 6.6 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü.....	71
Şekil 6.7 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait AFM görüntüsü.....	71
Şekil 6.8 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneden alınan EDS analizi.....	72
Şekil 6.9 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneden alınan XRD analizi.....	72
Şekil 6.10 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü.....	73
Şekil 6.11 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.12 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait AFM görüntüsü.....	74
Şekil 6.13 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneden alınan EDS analizi.....	75
Şekil 6.14 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneden alınan XRD analizi.....	75
Şekil 6.15 Lazer ışını ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü.	77
Şekil 6.16 Gurup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey formasyonuna etkisi.....	80
Şekil 6.17 Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler.....	81
Şekil 6.18 Yeniden katılaştıran bölgenin, a) üstten (kesilen yüzey), b) yandan görüntüleri.....	81
Şekil 6.19 Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizleri (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,)	83
Şekil 6.20 Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,)	84
Şekil 6.21 Lazer kesme parametrelerinin YKTK’ na etkisi.....	86
Şekil 6.22 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK’ na etkisi	87
Şekil 6.23 Lazer kesme parametrelerinin YKTK’ na etkisi.....	88
Şekil 6.24 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK’ na etkisi.....	89
Şekil 6.25 Lazer kesme parametrelerinin YKTK’ na etkisi.....	90
Şekil 6.26 III.grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK’ na etkisi.....	91
Şekil 6.27 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	95
Şekil 6.28 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	96
Şekil 6.29 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	97

Şekil 6.30 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	98
Şekil 6.31 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	99
Şekil 6.32 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	100
Şekil 6.33 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	102
Şekil 6.34 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)	102
Şekil 6.35 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	103
Şekil 6.36 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)	104
Şekil 6.37 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	104
Şekil 6.38 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)	105
Şekil 6.39 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	107
Şekil 6.40 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi (a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar)	108
Şekil 6.41 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	109
Şekil 6.42 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi (a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar).....	110
Şekil 6.42 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi (a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar).....	111
Şekil 6.44 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	112
Şekil 6.45 Plazma arkı ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü.	113
Şekil 6.46 Plazma arkı ile kesmede işlem parametrelerinin yüzey yapısına etkisi	115
Şekil 6.47 Plazma arkı ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler.....	116
Şekil 6.48 a) kesme bölgesinin morfolojisi; b) A kesitinin mikro yapısı c) yeniden katılaştıran bölge (kesilen yüzeye dik) görüntüler.....	117
Şekil 6.49 Plazma arkı ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,).....	118
Şekil 6.50 Plazma arkı ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,)	119
Şekil 6.51 PAK parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	121
Şekil 6.52 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	122
Şekil 6.53 PAK parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	123
Şekil 6.54 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	124
Şekil 6.55 PAK parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	125
Şekil 6.56 III. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi	126
Şekil 6.57 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	129
Şekil 6.58 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	130
Şekil 6.59 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	131

Şekil 6.60 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	132
Şekil 6.61 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	133
Şekil 6.62 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	133
Şekil 6.63 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	135
Şekil 6.64 I. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf genişliği (a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar).....	136
Şekil 6.65 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	136
Şekil 6.66 II. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf genişliği (a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar).....	137
Şekil 6.67 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	138
Şekil 6.68 III. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf genişliği (a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar).....	138
Şekil 6.69 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	140
Şekil 6.70 I. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları (a: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar, b: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar).....	141
Şekil 6.71 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	142
Şekil 6.72 II. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları (a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar).....	143
Şekil 6.73 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi.....	144
Şekil 6.74 III. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları (a: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar, b: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar).....	145
Şekil 6.75 Tel erozyonu ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü.	146
Şekil 6.76 Tel erozyon ile kesmede işlem parametrelerinin yüzey yapısına etkisi	149
Şekil 6.77 Tel erozyon ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler.....	150
Şekil 6.78 Yeniden katılaştıran tabakanın, a) üstten (kesilen yüzey), b) yandan görüntüleri.....	151
Şekil 6.79 Tel erozyon ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,).....	152
Şekil 6.80 Tel erozyon ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi (a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune,).....	153
Şekil 6.81 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	155
Şekil 6.82 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi	156
Şekil 6.83 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	157
Şekil 6.84 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	158
Şekil 6.85 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	159
Şekil 6.86 III. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK' na etkisi.....	160
Şekil 6.87 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	163
Şekil 6.88 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	164
6.89 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	165

Şekil 6.90 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	166
Şekil 6.91 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	167
Şekil 6.92 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme (a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)	168
Şekil 6.93 Tel erozyonda kerf oluşumunun şematik gösterimi [148].....	169
Şekil 6.94 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	170
Şekil 6.95 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 8 A, 5 μ s, 13 kg/cm ² , b: 12 A, 9 μ s, 15 kg/cm ²)	171
Şekil 6.96 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	172
Şekil 6.97 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 8 A, 5 μ s, 13 kg/cm ² , b: 12 A, 9 μ s, 15 kg/cm ²)	172
Şekil 6.98 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.....	173
Şekil 6.99 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 8 A, 5 μ s, 13 kg/cm ² , b: 12 A, 9 μ s, 15 kg/cm ²)	174
Şekil 7.1. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	178
Şekil 7.2. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	179
Şekil 7.3. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).....	181
Şekil 7.4. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	181
Şekil 7.5. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	183
Şekil 7.6. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	184
Şekil 7.7. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin kerf eğim açısına etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).....	186
Şekil 7.8. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf eğim açısına etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	187
Şekil 7.9. PAK parametrelerinin seviyelerinin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	189
Şekil 7.10. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	190
Şekil 7.11. PAK parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	192
Şekil 7.12. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	192
Şekil 7.13. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	194
Şekil 7.14. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	195

Şekil 7.15. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf eğim açısına etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	197
Şekil 7.16. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf eğim açısına etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	197
Şekil 7.17. Tel erozyon ile kesme parametrelerinin seviyelerinin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	199
Şekil 7.18. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' na etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	200
Şekil 7.19. Tel erozyon ile kesme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler).	202
Şekil 7.20. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,)	202
Şekil 7.21. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)	204
Şekil 7.22. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler,).	205
Şekil 8.1. Lazer ışını ile kesmede elde edilen deneysel ve teorik a: yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (Ra), c: kerf genişliği (Kü), d: kerf eğim açılarının (Ke.a) karşılaştırılması.	209
Şekil 8.2. PAK' de elde edilen deneysel ve teorik a: yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (Ra), c: kerf genişliği (Kü), d: kerf eğim açılarının (Ke.a) karşılaştırılması.	213
Şekil 8.3. Tel erozyon ile kesme de elde edilen deneysel ve teorik a: yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (Ra), c: kerf genişliği (Kü) karşılaştırılması.	216
Şekil 9.1. Minimum yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) için gri ilişkisel derece.....	222
Şekil 9.2. Minimum yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) için gri ilişkisel derece.....	225
Şekil 9.3. Minimum yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kerf genişliği (Kü) için gri ilişkisel derece.....	227

TABLOLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. Süper alaşımların kimyasal bileşimleri.....	26
Tablo 3.2. Nikel esaslı süper alaşımlardaki bazı elementlerin etkileri	27
Tablo 4.1. CO ₂ ve Nd: YAG lazer sistemlerinin karşılaştırılması	37
Tablo 5.1. Inconel 718 nikel alaşımının kimyasal bileşimi(%)	58
Tablo 5.2. Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri...	61
Tablo 5.3. Taguchi L ₉ deney tasarımı.....	61
Tablo 5.4. Plazma kesme deneylerinde kullanılan parametreler ve seviyeleri.....	62
Tablo 5.5. Plazma kesim deneylerinde kullanılan Taguchi L ₉ deney tasarımı.....	63
Tablo 5.6. Tel erozyon kesim deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri.....	64
Tablo 5.7. Tel erozyon kesim deneylerinde kullanılan Taguchi L ₉ deney tasarımı.....	64
Tablo 6.1. Inconel 718 nikel alaşımının ısıtma işlemler sonucunda elde edilen sertlik ve ısı iletkenlik değerleri.....	76
Tablo 6.2. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri.....	85
Tablo 6.3. Lazer ışını ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri.....	93
Tablo 6.4. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	94
Tablo 6.5. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri.....	101
Tablo 6.6. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı değerleri.....	106
Tablo 6.7. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri.....	120
Tablo 6.8. Plazma arkı ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri.....	127
Tablo 6.9. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	128
Tablo 6.10. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri.....	134
Tablo 6.11. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı.....	139
Tablo 6.12. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri.....	154
Tablo 6.13. Tel erozyon ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri.....	162
Tablo 6.14. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri...	163
Tablo 6.15. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri.....	169
Tablo 7.1. Lazer ışını ile kesme parametreleri ve seviyeleri.....	176
Tablo 7.2. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	177
Tablo 7.3. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	180
Tablo 7.4. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	182
Tablo 7.5. I, II, III. grup numunelerde kerf eğim açısı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).....	185
Tablo 7.6. PAK parametreleri ve seviyeleri.....	187

Tablo 7.7. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin

etkisi (S/N değerleri).	188
Tablo 7.8. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	191
Tablo 7.9. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	193
Tablo 7.10. I, II, III. grup numunelerde kerf eğim açısı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	196
Tablo 7.11. Tel erozyon ile kesme parametreleri ve seviyeleri.	198
Tablo 7.12. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	198
Tablo 7.13. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	201
Tablo 7.14. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri).	203
Tablo 8.1. Lazer ışını ile kesme yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları.	206
Tablo 8.2. Lazer ışını ile kesme sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler.	207
Tablo 8.3. PAK yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları.	210
Tablo 8.4. PAK sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler.	211
Tablo 8.5. Tel erozyon ile kesme yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları.	213
Tablo 8.6. Tel erozyon ile kesme sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler.	214
Tablo 9.1. Lazer ışını ile kesme parametreleri ve seviyeleri.	219
Tablo 9.2. Lazer ışını ile kesme işleminde L9 ortogonal deney dizilimi ve deney sonuçları.	220
Tablo 9.3. Lazer ışını ile kesme işlemi için normalizasyon değerleri.	220
Tablo 9.4. Lazer ışını ile kesme işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi.	221
Tablo 9.5. Lazer kesme işleminde L9 deney dizisi için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceler ve tavsiye edilen sıralama.	222
Tablo 9.6. Lazer ışını ile kesme parametreleri ve seviyeleri.	222
Tablo 9.7. PAK işleminde L9 ortogonal deney dizilimi ve deney sonuçları.	223
Tablo 9.8. PAK işlemi için normalizasyon değerleri.	223
Tablo 9.9. PAK işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi.	224
Tablo 9.10. PAK işleminde L9 deney dizisi için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceler ve tavsiye edilen sıralama.	224
Tablo 9.11. Tel erozyon ile kesme parametreleri ve seviyeleri.	225
Tablo 9.12. Tel erozyon ile kesme işleminde L9 ortogonal deney dizilimi ve deney sonuçları.	225
Tablo 9.13. Tel erozyon ile kesme işlemi için normalizasyon değerleri.	226
Tablo 9.14. Tel erozyon ile kesme işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi.	226
Tablo 9.15. Tel erozyon ile kesme işleminde L9 deney dizisi için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceler ve tavsiye edilen sıralama.	227

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

KISALTMALAR LİSTESİ

PAC	: Plasma arc cutting
WEDM	: Wire electrical discharge machining
LBM	: Laser beam machining
AFM	: Atomic force microscope
ANOVA	: Analysis of variance
AMPs	: Advanced machining techniques
USM	: Ultrasonic machining
AWJM	: Abrasive water jet machining
WJM	: Water jet machining
CM	: Chemical machining
PCM	: Photo chemical machining
CCD	: Central composite design
RSM	: Response surface methodology
FD	: Factorial design
ANN	: Artificial neural network
YA	: Yanaşma açısı
YKTK	: Yeniden katılan tabaka kalınlığı
PAK	: Plazma arkı ile kesme

SEMBOLLER LİSTESİ

$K_{\bar{u}}$	: Kerf üst genişliği
K_a	: Kerf alt genişliği
T	: İş parçası kalınlığı
$K_{e.a.}$	: Kerf eğim açısı
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
S/N	: İşaret gürültü oranı
$\bar{y}$	: Ölçülen değerlerin ortalaması
y	: Ölçülen değer
n	: Deney sayısı
A, B, C	: İşlem parametreleri
a_0, a_1, a_2, a_3	: Matematiksel modellere ait regresyon katsayıları
P	: Lazerin gücü
V	: Kesme hızı
GPy	: Yardımcı gaz basıncı
IP	: Plazma arkı akım şiddeti
T_{on}	: Vurum süresi
Ps	: Sıvı sirkülasyon basıncı
x_i 	: Sıra serinin normalizasyon değeri
ε	: Gri ilişkisel katsayı
ξ	: Katsayı matris sabiti
$\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$	: Normalizasyon serisine ait minimum ve maksimum değerler
γ	: Gri ilişkisel derece

1. GİRİŞ

Üretim alanındaki gelişmelerle birlikte, modern imalat endüstrisi; yüksek dayanım ve sertlik, korozyon, ısı ve aşınma direncine sahip ileri mühendislik malzemelerine ihtiyaç duymaktadır. Seramikler, kompozitler ve süper alaşımlar çok yaygın kullanılan ileri mühendislik malzemeleridir [1]. Süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve fiziksel denge, kimyasal bozulmalara karşı direnç gerektiren parçaların imalatında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Süper alaşımlar demir esaslı, kobalt esaslı ve nikel esaslı olmak üzere 3 grupta sınıflandırılmaktadır [2]. Inconel 718 nikel esaslı alaşım süper alaşımlar içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu alaşım; yaşlandırma sertleştirilmesi sonrasında matris içerisinde düzenli bir şekilde dağılan $Ni_3(Al, Ti)$ bileşimine sahip γ' ve $Ni_3(Al, Ti, Nb)$ bileşimine sahip γ'' intermetalik fazların varlığından dolayı 500 C sıcaklığa kadar tokluk ve dayanım kabiliyetini korumaktadır. Bu nedenle uzay endüstrisinde, özellikle uçak, deniz ve endüstriyel gaz türbin motorlarının sıcak bölümlerinde, roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, denizaltılarda, basınç tanklarında, buhar türbin jeneratörlerinde ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [3-8].

Yaygın kullanım alanı olmasına karşın, bu alaşımın sahip olduğu düşük termal iletkenlik, sertlik, işleme anında sertleşmesi, mikro yapısındaki aşındırıcı karbür partiküllerinin varlığı gibi özellikler malzemenin işlenebilirliğinin zorlaştırmaktadır [5,9]. Dolayısıyla, klasik imalat yöntemleriyle yapılan işleme esnasında hızlı deformasyon sertleşmesinin oluşması ve mikro yapıdaki abrasif partiküller, kesilen yüzeyde çentik ve kesici takımında ise aşınmalara neden olmaktadır. Düşük termal iletkenliğinden dolayı, işleme esnasında takım-iş parçası ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıklar talaş ile kesici takım arasında adhezyon ve difüzyona neden olmakta, bunun sonucu olarak da, kesici takım yüzeyinde bozulma ve takım ömründe azalma meydana gelmektedir. Ayrıca işleme esnasında çıkan sürekli talaşların varlığı, talaş akma kontrolünü zorlaştırmakta ve takım akma yüzeyinde krater oluşumuna sebep olmaktadır [10-12]. Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kullanılacak kesici takımların; iyi aşınma direnci, yüksek mukavemet ve tokluk yüksek ısıl sertlik, termal şok özelliği ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığını koruyabilme özelliklerine sahip olması gereklidir. Bu alaşımın işlenmesinde genellikle sert metal karbürler, seramik takımlar (Al_2O_3 -TiC karışımı seramikler, Si_3N_4 seramikler ve SiC takviyeli Al_2O_3 seramikler), kübik bor nitrür (CBN) kesici takımlar, CVD tekniğiyle yüzeyleri kaplanan çok katmanlı ($TiN+TiCN+TiN$) kaplamalı karbür takımlar

sağlandığını belirtilmiştir [25]. Ancak talaş sıcaklığının geleneksel işlemedekine nazaran arttığını bunun da takım yanak aşınmasını arttırdığı ve 530 °C üzerindeki sıcaklık değerlerinde yüzeyde oksitlenmenin olduğunu ve bu problemin plazma arkının tam kontrolüyle çözülebileceği belirtilmiştir [24]. Sıcak işlemeye alternatif olarak, yüksek basınçlı su jetli soğutucular yardımıyla yapılan işlemler, bu alaşımların işlenmesinde tercihli hale gelmiştir [26]. Diğer bir çözüm ise soğutucu olarak sıvı azot kullanımıdır [27,28]. Bu yöntemde soğutucu akışkan direkt olarak kesme kenarına uygulanmaktadır. Z.Y.Wang vd. Inconel 718, titanyum alaşımı ve tantalyumun işlenmesinde takımı soğutmak amacıyla sıvı azot kullanmışlardır [27]. E.O. Ezugwu vd., Inconel 718 nikel alaşımını TiCN/Al₂O₃/TiN kaplı karbür kesici takımla malzemeyi geleneksel ve yüksek basınçlı soğutucu yardımıyla işleyerek, geleneksel işleme yöntemine nazaran basınçlı soğutma (200 bar) ile işlemenin takım ömrünü 7 kat arttırdığını belirtmiştir [29]. Kim vd., çalışmalarında Inconel 718 in işlenmesinde soğutma sisteminde basınçlı hava kullanmışlar ve bu sistemin takım ömrünü önemli bir şekilde arttırdığını belirtmişlerdir [30]. Çalışmalarda, azotun pahalı olması ve yenilenebilir kullanımının sınırlılığı nedeniyle, basınçlı hava ile soğutmada takım-talaş veya takım-iş parçası ara yüzüne sızmalar olduğundan soğutma tekniğinin avantajını düşürdüğünü rapor etmişlerdir.

Tüm bu araştırmalar neticesinde işlenmesi zor malzemeler sınıfına giren Inconel 718 nikel alaşımının geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesinde, kesme hızı, talaş derinliği, kesici takım cinsi, takım geometrisi vb. parametrelerin tamamının kontrol altında tutularak karmaşık ve düşük toleranslı parça imalatının zor olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu malzemelerin kompleks profillerde ve istenen ölçü aralığında işlenmesi için ileri işleme yöntemleri olarak bilinen (AMPs) bazı geleneksel olmayan imalat yöntemleri geliştirilmiştir.

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri alışılmış talaş kaldırma yöntemlerinden farklı olarak fiziksel temas ve göreceli hareket yerine mekanik kuvvet uygulamadan çeşitli enerji türlerini kullanarak malzeme işleyen, aşındıran veya şekillendiren yöntemlerdir. Genellikle kullanılan düşük yoğunluklu enerjiyi dar bir alanda odaklayarak ve denetleyerek işleme olayını gerçekleştirmek için uygun bir takım veya odaklayıcı düzen kullanılır. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri yaygın olarak malzemeyi işlemek için kullandıkları enerjiye göre sınıflandırılırlar. Mekanik enerji kullanan alışılmamış imalat yöntemleri: Ultrasonik işleme (USM), aşındırıcılı su jeti (AWJM) ve su jeti ile işleme (WJM), Kimyasal enerji kullanan alışılmamış imalat yöntemleri: Kimyasal işleme (CM), Foto

Kimyasal işleme (PCM), TCM, vb. Isı enerjisi kullanan alışılmamış imalat yöntemleri: İş parçasından malzeme kaldırmak için yoğunlaştırılmış ısı enerjisi kullanan yöntemlerdir. Isıl enerji kaynağı olarak elektrik boşalımı, elektron ışını (huzmesi), lazer ışını ve plazma ışını gibi çeşitli yöntemler kullanılır [31]. Bütün yöntemlerde malzeme yüzeyinde oluşan odak noktasında ulaşılan sıcaklıklar, bilinen bütün malzemelerin ergime ve buharlaşma sıcaklıklarının çok üzerindedir. Bu nedenle ısı enerjisi kullanan yöntemlerle bilinen bütün malzemeleri işlemek mümkündür. Bu gruba giren yöntemler, işleme mekanizması bakımından diğer gruplara göre daha fazla çeşitlilik gösterirler. Grup içinde özellikle Lazer ışını ile işleme (LBM), Elektro-Erozyon (EDM) ve plazma arkı ile işleme (PAM) ileri işleme yöntemleri olarak çağdaş teknolojide çok önemli bir yer almıştır. Bununla birlikte, bu yöntemlerin optimum işleme şartları ve işleme maliyeti detaylı bir şekilde araştırılmalıdır.

Bu çalışmada, Inconel 718 nikel alaşımının farklı mekanik ve fiziksel özelliklerini elde edebilmek için iki adımdan oluşan (çökeltiye alma ve yaşlandırma) ısı işlem mekanizması iki farklı ısı çevrim şartlarında yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, Lazer ışını ile işleme (LBM), Tel Erozyonu (WEDM) ve plazma ark ile işleme (PAM) olmak üzere 3 farklı termal yöntem kullanılarak işlenmiştir. Farklı işleme prosesleri malzemelerde işleme kalitesini belirleyen farklı yüzey karakteristiklerini ortaya çıkardığı için, işleme parametrelerine bağlı olarak elde edilen numunelere ait, kerf genişlikleri, kerf eğim açısı, yüzey pürüzlülüğü, yeniden katılaşan tabaka kalınlıkları (YKTK), yüzey çatlakları her bir yöntem için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Her bir yöntemde, işleme parametreleri belirli sınırlar içerisinde değiştirilerek Taguchi deneysel tasarım metodu ile deney sayıları ve her bir deneyde kullanılan parametrelerin etkinlik dereceleri belirlenmiş, deneyler sonucunda elde edilen veriler yardımıyla her bir yöntem, Lineer Regresyon yöntemiyle modellenmiştir. Ayrıca Varyans analizi yöntemi ile parametrelerin istatistikî etkinlikleri belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde optimum işleme koşulları tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Lazer ışını ile kesme alanında yapılan çalışmalar

Lazer ışını ile işleme alanında yapılan deneysel çalışmalarda, geometri (kerf genişliği, delik çapı, kerf veya delik eğim açısı), yüzey kalitesi (pürüzlülük, yüzey morfolojisi), metalurjik karakteristikler (yeniden katılaşmış tabaka, ısıdan etkilenen bölge) ve mekanik özellikler (sertlik, gerilim, vb.) gibi işleme performansını belirleyen karakteristikler üzerinde lazer gücü, tipi ve gaz basıncı, malzeme kalınlığı ve bileşeni, kesme hızı ve operasyon modu gibi işlem parametrelerinin etkili olduğu saptanmıştır.

Rajaram vd. [32] yapmış oldukları çalışmada, 4130 çeliğinin CO₂ lazer ile kesilmesinde güç ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutu üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, gücün kerf genişliği ve ısıdan etkilene bölgenin boyutu üzerinde büyük etkisi olduğu, düşük güç seviyelerinde daha dar kerf genişliği ve ısıdan etkilenen bölgenin oluştuğunu rapor etmişlerdir. Chen [33] 3mm kalınlığındaki yumuşak çeliği CO₂ lazer kullanarak kesmiştir. Çalışmada üç farklı yardımcı gaz (oksijen, nitrojen ve argon) kullanarak kerf genişliğini araştırmıştır. Sonuç olarak, lazer gücünün ve kesme hızının artmasıyla kerf genişliğinin arttığını ayrıca kerf genişliği soy gazlara nazaran oksijen veya havanın kullanımıyla da arttığı saptanmıştır. Ghany vd.[34] yaptıkları çalışmada, 1.2 mm kalınlıktaki östenitik paslanmaz çeliği kesmek için Nd:YAG lazer kullanmışlardır. Deneylerde, kesme hızı, lazer gücü, gaz basıncı gibi parametrelerin kerf genişliğine etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneysel sonuçlarda, frekansın artmasıyla kerf genişliğinin azaldığını belirtmişlerdir. Farklı kalınlıklardaki çelik plakanın CO₂ lazer ile kesilmesinde lazer gücü ve kesme hızının kerf genişliği üzerine aynı sonucu verdiğini diğer araştırmacılar da rapor etmişlerdir [35,36]. Karatas vd. [37] CO₂ lazer kullanarak kestikleri (HSLA) çeliğinde minimum kerf genişliğini, odak uzaklığını iş parçası yüzeyinden 1.5 mm üstte tutarak elde ettiklerini belirtmişlerdir. Lamikiz vd. [38] güç, gaz basıncı, kesme hızı ve odak pozisyonu gibi temel lazer kesme parametrelerinin kesme geometrisine ve kalitesine etkisini araştırmış ve 300W ın üzerinde ki güç değeriyle kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Bandyopadhyay vd. [39], farklı kalınlıklardaki titanyum ve nikel alaşımlarını Nd:YAG lazer ile delinmesinde malzeme tipi ve kalınlığın delik eğimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, delik giriş çapı ve delik eğim açısı malzeme kalınlığının azalmasıyla arttığını, vurum enerjisinin eğim açısı üzerinde etkisiz olduğunu

fakat vurum sıklığının artmasıyla eğim açısının azaldığını belirtmişlerdir. Z.I. Vitez [40], polyester ve fiber takviyeli epoksi plakanın CO₂ ve Nd:YAG lazer ile delinmesinde, lazer gücünün arttırılmasıyla delik çapının genişlediğini belirtmiştir. Ghany vd. [34], 1.2mm kalınlıktaki östenitik paslanmaz çeliği Nd:YAG lazer ile keserek frekansın, kesme hızının artmasıyla ve lazer gücü, gaz basıncının azalmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü rapor etmişlerdir. Wang vd. [41], CO₂ lazer ile kesilen çelik plakanın metalurjik incelenmesinde, ısıdan etkilenen bölge kalınlığı gücün düşmesi ve ilerlemenin artmasıyla azaldığı bununla birlikte oksijen basıncının artmasıyla bu bölgenin genişlediği belirtilmiştir. Araujo vd. [42] yaptıkları deneysel çalışmada, 2024 alüminyum alaşımını delmek için CO₂ lazer kullanmışlardır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, delik derinliğinin artmasıyla ısıdan etkilenen bölgenin kalınlaştığını belirtmişlerdir. Mathew vd. [43], fiber takviyeli plastik kompozit malzemeyi Nd:YAG lazer ile kesilmesi üzerine parametrik çalışma yapmışlardır. Deneysel tasarım için central composite design (CCD), ısıdan etkilenen bölge ve kerf eğim açısı response surface methodology (RSM) geliştirmişlerdir. Kuar vd. [44] yaptıkları çalışmada, Nd:YAG lazer sistemiyle 1mm kalınlığındaki ZrO₂ seramik levhaya mikro delik delme işleminde oluşan ısıdan etkilenen bölge ve eğim için CCD and RSM yanı sıra matematiksel model geliştirmişlerdir. Tam vd. [45], 4.5mm kalınlığındaki yumuşak çelik plakayı lazer ile kesme işleminde Taguchi metodunu kullanmışlardır. Kesme kalitesini belirleyen fonksiyonlar için kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve ısıdan etkilenen bölge kalınlığı karakteristiklerini ve çalışma parametresi olarak ta kesme hızı, gaz basıncı ve lazer gücünü kullanmışlardır. Lim vd. [46], paslanmaz çeliğin lazer ile kesilmesinde yüzey pürüzlülüğünün araştırılmasında benzer çalışmayı uygulamışlardır. Chen vd. [47] çalışmalarında, deneysel tasarım aşamasında factorial design (FD) metodunu, işlem parametrelerinin belirlenmesinde ise artificial neural network (ANN) kullanmışlardır. Yilbas [48] yaptığı çalışmada, farklı kalınlıklardaki (0.5–1.25 mm) paslanmaz çelik, titanyum ve nikel gibi üç farklı malzemenin farklı vurum süresi (1.5–2.5 ms), odak mesafesi (50.5–52 mm) ve enerji (15–21 J) kullanarak lazer ile delinmesi işleminde parametre optimizasyonu için Factorial design (FD) yöntemi kullanmıştır. Esposito vd. [49], çeliğin lazer ile kesilmesi işleminde kerf genişliğinin tahmini için analitik model geliştirmişlerdir. Tani vd. [50] lazer ışını ile çeliğin kesilmesinde erimiş film tabakasının ölçümü için matematiksel model geliştirmişlerdir. Sheng vd. [51] çalışmalarında, 304 paslanmaz çeliğinin lazer ile kesilmesi sonucunda ısıdan etkilenen bölgenin oluşmasında iç sıcaklıkların etkilerini belirlemek için 2-D finite element modelini

geliştirmişlerdir. Tsai vd. [52], lazer ile kesilen seramiklerde yüzeyde meydana gelen stres ve sıcaklık dağılımlarının ANSYS yazılımı kullanarak analiz etmişlerdir. Ahn vd. [53], çalışmalarında CW Nd:YAG Lazer kullanarak Inconel 718 alaşımını kesmişlerdir, kesme parametrelerinin kesme bölgesinde oluşan ısı dağılımlar, kerf genişliği ve kerf eğim açısı üzerindeki etkilerini analiz etmek için SYSWELD programını kullanmışlardır.

2.2. Plazma arkı ile kesme alanında yapılan çalışmalar

Güllü vd.[54], AISI 304 paslanmaz çelik ve St 52 karbonlu çeliği plazma arkı kullanarak yaptıkları kesme işleminde kesme parametrelerinin kesme bölgesinde meydana getirdiği yapısal değişiklikleri araştırmışlardır. Çalışmada, ilerlemenin artmasıyla yüzeyde oluşan ısının arttığı ve buna bağlı olarak ta ısıdan etkilenen bölgenin boyutunda ve sertlikte artış olduğunu belirtmişlerdir. Gariboldi vd.[55] yaptıkları çalışmada, 5mm kalınlıktaki saf titanyum plakayı kesmek için yüksek toleranslı plazma arkı kullanmışlardır. Çalışmada, ilerleme miktarının ve koruyucu gaz olarak kullanılan oksijen ve nitrojenin kesme kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır. Deney sonucunda, oksijen kullanılarak yapılan yüksek ilerlemedeki kesmelerde daha kötü kesme kalitesi elde edildiği belirtilmiştir. Atıcı vd.[56], plazma ve su altı plazma arkı ile AISI 304 paslanmaz çelik ve AISI 1050 karbon çeliği malzemeler kesilmiş ve kesme sonucunda malzemelerin kesme yüzeylerindeki pürüzlülük ve setlik değişimleri incelenmiştir. Çalışmada, su altı plazmada kesilen numunelerin kesme kenarlarına yakın bölgelerde plazmaya göre daha sert bir yapının oluştuğu, plazma ve su altı plazma ile kesilen malzemelerde ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri; Karbon çeliği malzemenin plazma ile kesiminde 1,10 - 2,25 μm , su altı kesiminde 2,5 - 2,78 μm arasında olup değişim % 61, paslanmaz çelik malzemelerde ise; plazma ile kesimde 2,07 - 2,21 μm , su altı kesimde 1,77 - 2,81 μm olup değişimin % 87 olduğu belirtilmiştir. Narimanyan [57] çalışmasında, plazma arkı ile kesme prosesinde, oluşan ısı alanı ve kesme profili ile ilgili matematiksel ve fiziksel model geliştirmiştir. Xu vd.[58] yaptıkları çalışmada, 6mm kalınlığındaki Al_2O_3 seramik plakayı kesmek için plazma arkı kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, en dar kerf genişliğini(4.6mm) 3mm çapındaki nozıl ile 0.9-1.2 m/dak. İlerleme ile elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Bini vd.[59] çalışmalarında, 15mm kalınlıktaki çeliği kesmek için 200A yüksek toleranslı plazma arkı kullanmışlardır. Kesme kalitesinin belirlenmesinde parametre optimizasyonun da DOE tekniğini kullanmışlardır.

2.3. Tel erozyon ile kesme alanında yapılan çalışmalar

Hasçalık ve Çaydaş [60] yapmış oldukları çalışmada, AISI D5 çeliğinin tel erozyon ile kesilmesinde, voltaj, vurum süresi, tel ilerleme hızı ve sıvı basıncı gibi parametrelerin işleme kalitesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda, vurum süresi ve voltajın artmasıyla beyaz tabakadaki çatlak yoğunluklarının arttığını ve çatlak derinliklerinin de vurum enerjisine bağlı olduğunu, vurum süresi ve voltajın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını, tel ilerleme hızının ve sıvı basıncının pürüzlülük üzerinde etkisinin olmadığını rapor etmişlerdir. Kanlayasiri vd.[61] çalışmalarında, DC53 kalıp çeliğinin tel erozyon ile işlenmesinde vurum süresi, vurum ara süresi, vurum şiddeti ve tel gerginliği gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünde parametre etkinliğini belirlemek için değişken analiz (ANOVA) kullanılmış. Sonuç olarak vurum süresinin ve vurum şiddetinin yüzey pürüzlülüğünün değişmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Newton vd. [62], tel erozyon ile Inconel 718 alaşımını işleyerek işleme parametrelerinin yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalar sonucunda kıvılcımın şiddeti ve vurum süresinin artmasıyla tabaka kalınlığının arttığını saptamışlardır. Tosun vd.[63], tel hızı, dielektrik sıvı basıncı, voltaj ve belirledikleri vurum süreleri ile iş parçası yüzey pürüzlülüğünün değişimini araştırmışlardır. Deney malzemesi olarak SAE 4140 çelik (DIN42CrMo4), tel elektrot olarak ise 0.25 mm çapında CuZn37 pirinç tel kullanılmıştır. Bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Scott vd. [64], tel erozyon ile işlemede etkili olan kesme parametrelerinin, işleme hızı ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda tel ilerleme hızı, akım ve vurum süresinin artışıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde de artış olduğunu tespit etmişlerdir. Özek vd.[65], çalışmalarında Ç8620 çeliğinin tel erozyon ile kesilmesinde tel elektrot olarak 0.25 mm çapında pirinç tel kullanmışlardır. Kesme işleminden önce ve sonra numuneler üzerinde ölçüm yapılarak sertlik değerleri belirlenmiştir. Deney sonucunda ısıtıl işlem uygulanmayan ve sertleştirilen numunelerin her iki kesme parametrelerine göre, kesme alanı büyüdükçe sertlik ve talaş kaldırma hızının düşmekte olduğu ve yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını belirtmişlerdir. Huang vd. [66], tel elektro erozyon tezgahında işleme performansı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Shajan vd.[66] çalışmalarında, tel erozyon de 0,25mm çapında çinko kaplı bakır tel ve kaplanmamış bakır tel kullanarak kestikleri Ti6Al4V alaşımının yüzey

karakteristiklerinin çinko kaplı telle yapılan işlemlerde daha düzgün olduğunu belirtmişlerdir. Chen vd. [67], Ni60Al24.5Fe15.5 ve Ti35.5Ni49.5Zr15 alaşımlarının EDM ile işlenmesinde talaş kaldırma oranının malzemelerin ergime sıcaklıkları ve ısı iletkenlikleriyle ilişkili olduğunu ve Ni60Al24.5Fe15.5 alaşımının işlenmesinde talaş kaldırma oranının Ti35.5Ni49.5Zr15 alaşımına nazaran daha yüksek olduğunu, bu özelliğin yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemede daha düşük ergime gerçekleştiği ve yüksek ısı iletkenlik nedeniyle yeterli ısı transferinin sağlanamamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. D.K. Aspinwal vd.[68], Ti-6Al-4V ve Inconel 718 malzemesi 200µm çapında çinko kaplı tel ve 205µm çapında kaplamasız bakır tel kullanılan iki farklı tezgahta işleyerek yüzey pürüzlülüğü ve oluşan yeni tabaka alınlığını karşılaştırmışlardır. Bu çalışma ile malzemelerin mikroyapı ve mikrosertlik gibi özelliklerinin önemli bir değişikliğe uğramadığı rapor etmişlerdir. Kinoshita vd. [69], tel erozyon da tel kırılmalarını araştırmışlardır, gözlemlerinde tel kırılma anında vurum frekansının yükseldiğini tespit etmişlerdir. Tel kırılmasını önlemek için vurum jeneratörünü kapayan servo sviç sistemi geliştirmişlerdir. Fakat bu sistemin makine verimliliğini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Tarng vd.[70], tel erozyon da tabla hızı, servo voltajı, vurum süresi ve vurum ara süresi parametrelerinin kesme hızı ve yüzey kalitesi tahminindeki en önemli parametreler olduğunu, yapay sinir ağları tekniğini kullanarak saptamışlardır. Lau vd. [71], metal matrisli kompozitlerin işlenmesinde tel erozyon ve Lazer yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmalar, en iyi yüzey kalitesi ve en düşük yüzey hasarlarının tel erozyon ile elde edildiğini ancak işleme süresinin bu yöntemde daha uzun olduğunu göstermiştir.

2.4. Inconel 718 alaşımının talaşlı işlenebilirliği alanında yapılan çalışmalar

Inconel 718'in talaşlı işlenebilirliğinde iş parçası yüzey bütünlüğü bozan ve takım aşınmasına neden olan mekanizmaları iyi kavramak gerekmektedir. Bu yüzden, çalışmanın bu bölümünde Inconel 718 alaşımının işlenebilirliğini mümkün hale getiren ve kolaylaştıran son gelişmeler ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. İlk bölümde, Inconel 718 alaşımının karakteristiği ve işlenebilirliğinde karşılaşılan problemler listelenmiştir. Daha sonra, Inconel 718 alaşımının ıslak ve kuru şartlarda kaplamasız ve kaplanmış karbür kesici takımlarla yapılan çalışmalar, ardından üretim ve kaliteyi arttırmak amacıyla yüksek kesme hızlarında kullanılan seramik takımlarla ilgili yapılan çalışmalar. Son bölümde,

Inconel 718'in geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle işlenebilirliği alanında yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

2.4.1. Inconel 718 alaşımının İşlenebilirliği

Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımın işlenebilirliğinde karşılaşılan güçlükler aşağıda özetlenmiştir [5].

- Yüksek ısııl özelliğinden dolayı işleme esnasında dayanımını korumaktadır.
- İşleme esnasında ani işleme sertleşmesinin oluşmasından dolayı hızlı takım aşınmasına neden olmaktadır.
- Düşük ısııl iletkenliği nedeniyle iş parçası takım yüzeyinde 1200 C ye kadar kesme sıcaklığının oluşmasına ve buda takım ömrünün düşmesine sebep olmaktadır.
- Nikel esaslı süper alaşımların yüksek kimyasal afinitesi birçok takım malzemesinde difüzyon aşınmasına yol açmaktadır.
- İşleme esnasında nikel alaşımının kesici takım üzerine kaynaması ve yapışması takım yüzeyinde çentik etkisi oluşturarak takım yüzeyinin bozulmasına sebep olmaktadır.
- Yüksek dayanımından dolayı, ortaya çıkan yüksek kesme kuvvetleri titreşimlerin oluşmasına, bu olay iş parçası yüzey kalitesini ve takım ömrünü düşürmektedir.

İşleme zorluğunda çözülmesi gereken iki temel problem vardır [72]. Bunlar işleme esnasında yüzeyde meydana gelen aşırı ısı oluşumu ve plastik deformasyondur. Yüzeyde meydana gelen aşırı ısı oluşumu genellikle alaşımın mikro yapısını değiştirir ve buda artık gerilmelere neden olmaktadır. Artık gerilmeler de yapıda plastik deformasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Isı ve deformasyon aynı zamanda mikro yapısal değişim ve çatlakların yanı sıra mikro sertlik farklılıklarına neden olmaktadır [73]. Artık gerilmeler malzemenin mekanik davranışları, özellikle iş parçasının yorulma ömrünü düşürmektedir [74]. Aynı zamanda artık gerilmeler, imalattan çıkan parçaların boyutsal tamlığını değiştirmekte bu olay montaj esnasında önemli problemlere yol açmaktadır [75,76]. Malzeme yüzey tamlığını sağlamak için işleme esnasındaki bileşenlere aşırı dikkat ve özen gösterme zorunluluğunu doğurmaktadır. Uygun takım ömrü ve yüzey tamlığını elde edebilmek için takım ve kaplama malzemesi, takım geometrisi, işleme metodu, kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği , yağlama gibi temel parametrelerin seçimi ve kontrol altında tutulması oldukça karmaşık bir durumdur [9,11].

Inconel 718`in işleminde kullanılan kesici takımlar;

Nikel esaslı alaşımların işlenmesinde kullanılacak herhangi bir kesici takım malzemesi aşağıdaki gereksinimleri karşılamalıdır [7] :

- Isı aşınma direnci
- Yüksek sertleşme sıcaklığı
- Yüksek dayanım ve tokluk
- İyi termal şok özelliği
- Yüksek sıcaklıklarda uygun kimyasal kararlılık

Gaz türbin disklerinin üretiminde, uçak motorlarının montaj parçasında ve kanatlarının üretiminde tornalama, frezeleme ve delme gibi işlemler kullanılan yoğun operasyonlardır. Nikel esaslı alaşımların işlenebilirliğiyle ilgili yayımlanmış çalışmaların birçoğu tornalama alanındadır, aksine frezeleme ve delme ile ilgili dikkate değer çalışma yoktur.

2.4.2. Inconel 718 alaşımının sementit karbür takımlarla işlenebilirliği

Nikel esaslı süper alaşımların, özellikle Inconel 718`in işlenmesinde sementit karbür takımlar hala büyük ölçüde kullanılmaktadır. Ancak, hızlı talaş kaldırma ve daha iyi yüzey kalitesini elde etmek için artan talepler yüksek hızda işleme tekniğini doğurmuş ve bu olay sementit karbür takımların kullanımını daha sorunlu hale getirmiştir. Nikel esaslı alaşımlar için yüksek hızda işleme kavramı yaklaşık 50m/dak üzerindeki hızlar ifade edebilmektedir. Yüksek kesme hızları elde edilebilmek için, kaplamalı sementit karbürler geliştirilmiştir. Aşağıda Inconel 718`in işlenmesinde kullanılan kaplamalı ve kaplamasız karbür takımların performansı sunulmaktadır.

Liao ve Shine [16], Inconel 718`in kuru tornalamasında K20 ve P20 sınıfına giren iki sementit karbür takımda meydana gelen aşınma mekanizmalarını analiz etmişlerdir. Deneylerde ilerleme ve kesme hızı 0,10mm/devir ve 1,5mm, kesme hızı 35-15m/dak olarak seçilmiştir. K20 karbür takımın aşınma yüzeyinde, kesme kenarına çok yakın bölgede bir yapışma tabakası, kesme kenarına kaynayan talaşlarla 35mm/dak kesme hızında yeni bir kenarın form aldığını gözlemlemişlerdir. P20 karbür takım kullanıldığında, yapışma tabakasının olmasının yanında nispeten aşınmanın daha düzensiz, yanak aşınma uzunluğunun daha geniş ve derin olduğu gözlemlenmiştir. Elektron prob mikro analiz(EPMA) kullanılarak yapılan takım elementlerinin ve yan yüzeydeki yapışmış olan iş parçasına ait elementlerin konsantrasyon analizlerinde V=35m/dak kesme hızı için, takım

elementinde bir değişikliğin olmadığı fakat iki sementit karbür takımında da Ni ve Fe elementlerinin difüzyonunun olduğunu bulmuşlardır. Kesici takıma difüzyon olan bu elementlerin deneyler esnasında çok yüksek kesme sıcaklıklarının(1000 C) oluşmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

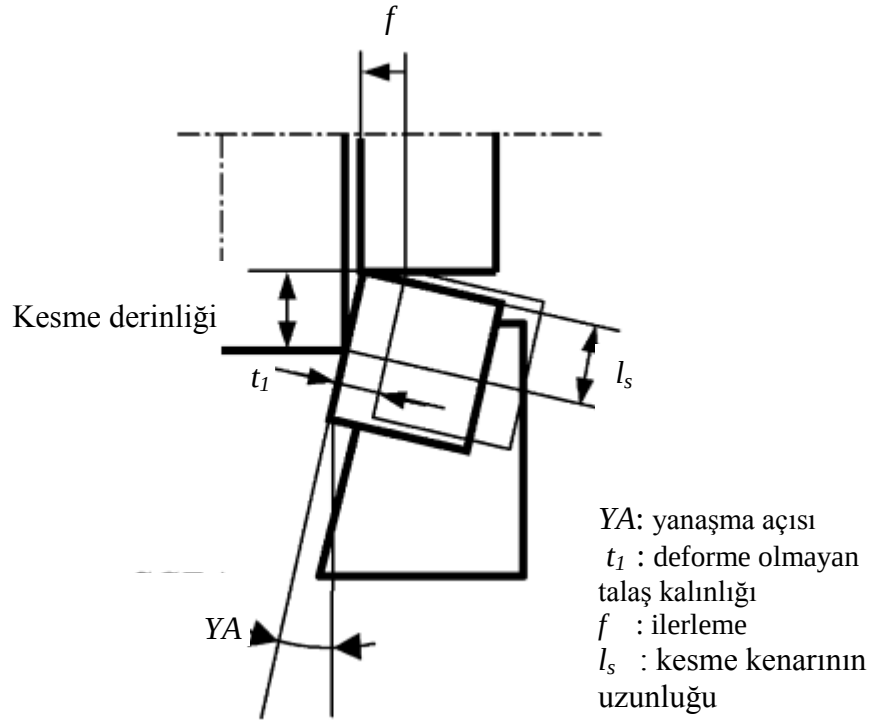
Alaudin vd. [77], Inconel 718'in frezelenmesi üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında kaplamasız K20 tungsten karbür kesici takım kullanarak kuru şartlarda, tam dalma ve yarı dalma (hem alt kesme hem de üst kesme) kesme yaparak takım ömrünü araştırmışlardır. Kesme testleri sonucunda, kesme hızı 19.32m/dak, ilerleme 0.09mm/dev ve talaş derinliği 1.0 mm şartlarında takım ömrünü 5-10 dak olarak belirtmişlerdir.

Derrien ve Vigneau [78], 200m/dak yüksek kesme hızı, 0.04mm/dev ilerleme hızı ve 0.5mm talaş derinliği şartlarında kaplamasız ve kaplamalı K20, CrN ve TiN takımlarını test etmişlerdir. Deney şartlarında en düşük aşınmanın TiN kaplı karbür takımında meydana geldiğini. Ek olarak, hava ve mikro pülverizasyon ile kuru kesme şartlarında karşılaştırmışlardır. Bunun sonucunda en iyi takım performansının kuru kesme şartlarında sağlandığını rapor etmişlerdir.

Rahman vd. [19], takım geometrisi, kesme hızı ve ilerleme oranı gibi farklı işleme parametrelere bağlı Inconel 718'in işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında takım ömrünün performansını takımdaki yanak aşınması, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri gibi bileşenlerle değerlendirmişlerdir. Deneyler ıslak şartta ve iki farklı kesici takım kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

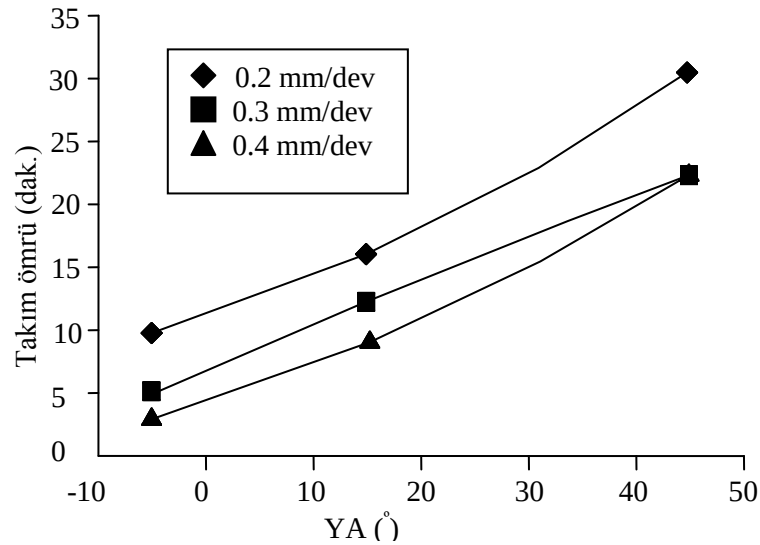
- K tipi, TiN PVD kaplı sementit karbür
- Al₂O₃ CVD kaplı sementit karbür takım

Şekil 2.1'de gösterilen yanaşma açısı (YA), ilerlemenin (0.2, 0.3, 0.4 mm/dev) ve kesme hızının (30, 40 ve 50m/dak) takım ömrüne olan etkilerine bakıldığında , yanaşma açısının 5 den 45 ye artmasıyla takım ömrünün arttığını tespit etmişlerdir.



Şekil 2.1. Yanaşma açısı

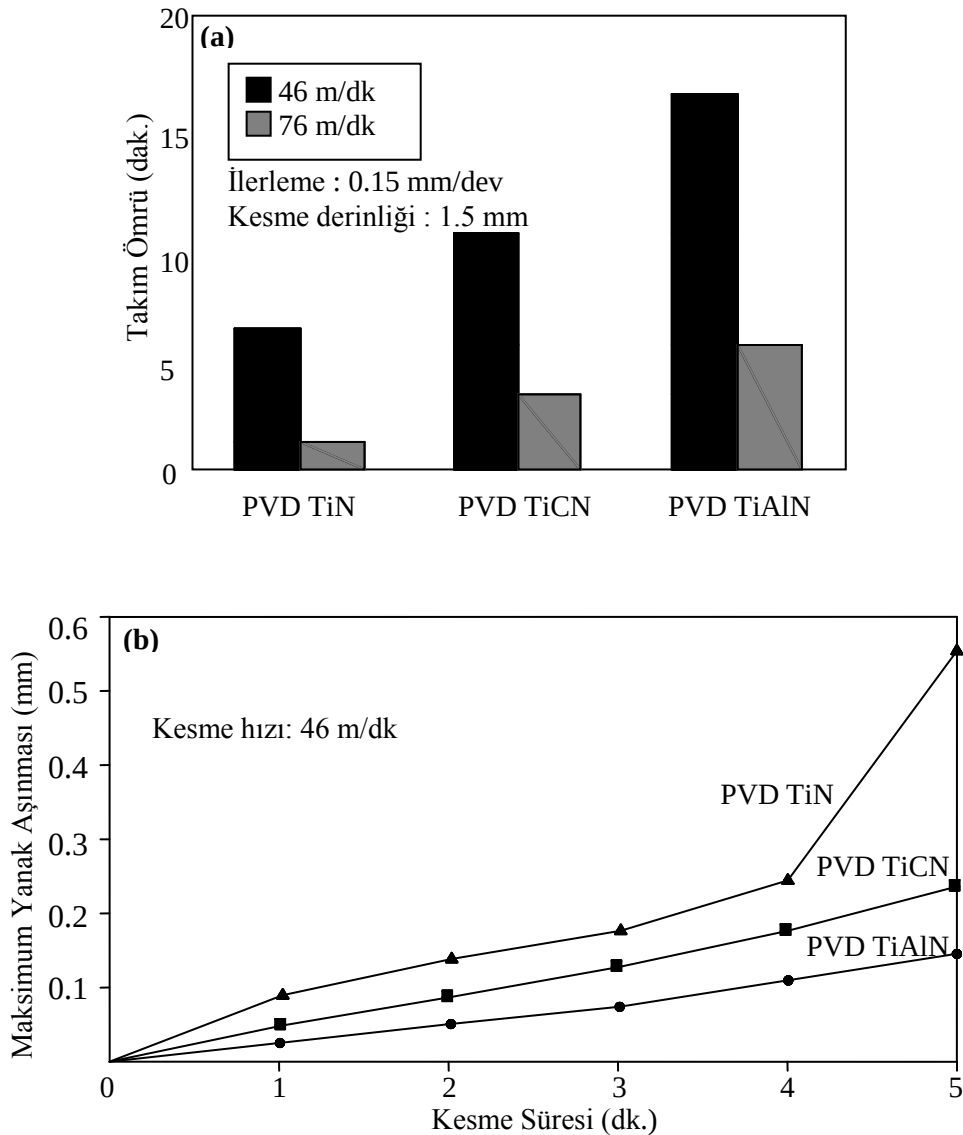
Şekil 2.2’de YA’ daki bu artış, takım talaş ara yüzeyinde oluşan ısının deforme olmayan talaş kalınlığını arttırdığını. Bunun yanı sıra, kesme esnasında üretilen ısının YA’ya bağlı genişleyen kesme kenarı l_s ’nin vasıtasıyla dağıtıldığını rapor etmişlerdir. Bu gelişme kesme kenarından ısının uzaklaştırılmasına, kesme kuvvetinin genişleyen kesme kenarına yayılmasına bunun sonucunda da takımda meydana gelebilecek çentik etkilerinin ortadan kalkmasına ve takım ömrünün uzamasına neden olmuştur.



Şekil 2.2. Al_2O_3 CVD kaplı sementit karbür takımda YA’ nın takım ömrüne etkisi (kesme hızı 30 m/dak) [19].

Deneyler süresince PVD-TiN kaplı karbür takımların en iyi direnci gösterdiğini, Al_2O_3 CVD kaplı sementit karbür takımlarda şiddetli çentik aşınmalarının yaşandığı ve Inconel 718'in işlenmesinde bu takımların uygun olmadığı belirtilmiştir.

Jindal vd. [79], Inconel 718'in soğutmalı tornalanmasında PVD-TiN, TiCN ve TiAlN kaplı sementit karbür takımların performanslarını araştırmışlardır. En düşük kesme hızında (46m/dk) en iyi performansın TiAlN kaplı takımda elde edildiğini belirtmişlerdir Şekil 2.3. Ayrıca TiAlN takımlarda TiCN ve TiN takımlara nazaran daha düşük burun ve krater aşınmasının olduğunu rapor etmişlerdir.



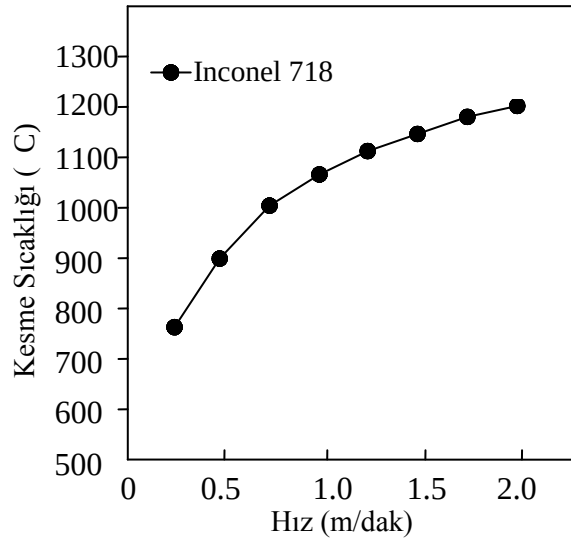
Şekil 2.3. Inconel 718' in tornalanmasında kullanılan PVD-TiN, TiCN ve TiAlN takımların (a) takım ömürleri, (b) maksimum yanak aşınması [79].

2.4.3. Inconel 718 alaşımının seramik takımlarla işlenebilirliği

Seramik takımlar aşağıdaki avantajları nedeniyle karbür takımlara nazaran daha uzun takım ömrüne sahiptirler.

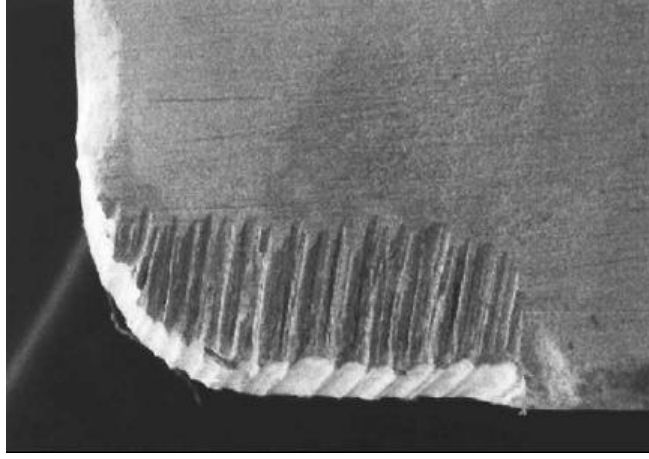
- Yüksek ısı dirençleri nedeniyle yüksek kesme hızlarında kullanımı.
- Aşınma ve korozyona karşı gösterdikleri yüksek direnç.
- Sıcak sertleşme ve düşük kimyasal eğilimleri.

Bununla birlikte, düşük termal iletkenliği, düşük kırılma tokluğu veya mekanik şok özellikleri seramik takımların temel dezavantajlarıdır. Nikel esaslı takımların seramik takımlarla işlenmesinde takım talaş ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklık kesme hızının artmasıyla alaşımın ergime sıcaklığına yakın dereceye ulaşmaktadır. Şekil 2.4' te görüldüğü gibi yüksek kesme hızlarında kesme kenarında oluşan ısı da artmakta buda iş parçasının takıma kaynamasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.4. Inconel 718 in Al_2O_3/TiC takımlarla işlenmesinde kesme hızının kesme sıcaklığına etkisi [80].

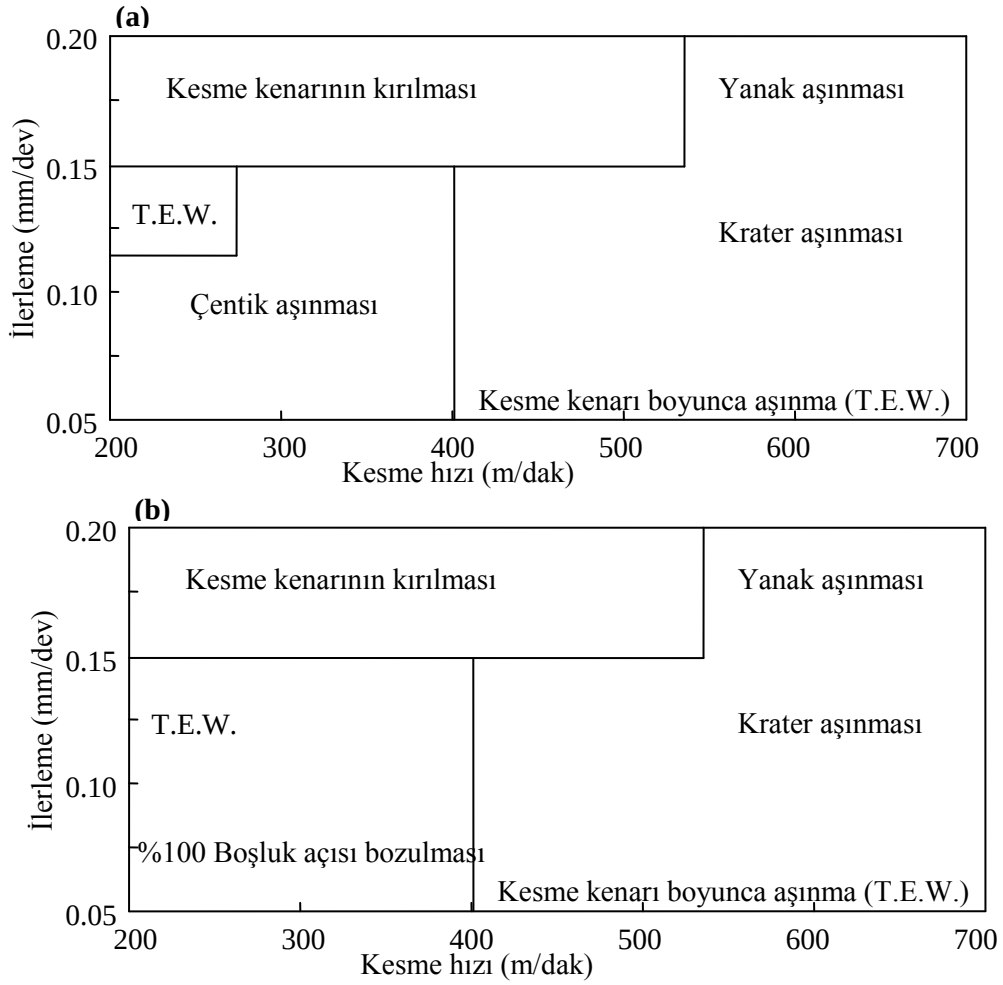
Takım üzerinde biriken kaynamış malzemenin kopması seramik takımlardaki aşınmayı hızlandırmaktadır. 500 m/dk kesme hızlarında Inconel 718'in tornalanmasında kullanılan nitrat esaslı seramik takımda yüksek sıcaklıklardan dolayı meydana gelen plastik deformasyon sonucu oluşan abrasif aşınma Şekil 2.5' de görülmektedir [80].



Şekil 2.5. Inconel 718 in işlenmesi sonucunda seramik takımda meydana gelen abrasif aşınma görüntüsü [81].

Narutaki ve dig. [82], SiC takviyeli Al_2O_3 , Si_3N_4 ve TiC eklenmiş Al_2O_3 -TiC seramik takımların Inconel 718'in tornalanmasında aşınma karakteristiklerini araştırmışlardır. Kesme kenarında oluşan çentik aşınması açısından en iyi sonucu SiC seramik takımın sergilediğini, ayrıca Al_2O_3 -TiC takımlarda ise en düşük yanak aşınmasının elde edildiğini belirtilmişlerdir. Ek olarak, Inconel 718 ve üç takımda da yapılan testler sonucunda, SiC seramik takıma Ni elementinin difüzyon olduğu ve Si_3N_4 seramik takıma Inconel 718 deki Cr ve Si elementlerinin difüzyon olduğu gözlenmiştir. Bu testler Al_2O_3 -TiC takımın 718'in işlenmesinde daha stabil olduğunu rapor etmişlerdir.

Elbestawi vd.[83], SiC takviyeli seramik takımlarla Inconel 718'in frezelenmesinde takım ömrü karakteristiklerini ve kesme performansını araştırmışlardır. Testler sonucunda, üç temel takım aşınma tipi gözlemlenmiştir Yanak aşınması, çentik aşınması ve serbest yüzey aşınması. 200 ile 400m/dak kesme hızı aralığında çentik aşınmasının daha baskın olduğunu Şekil 2.6.(a) ve yüksek kesme hızlarında (400-700m/dak) serbest yüzey aşınması ve yanak aşınmasının daha baskın olduğunu göstermişlerdir (Şekil2.6.b).



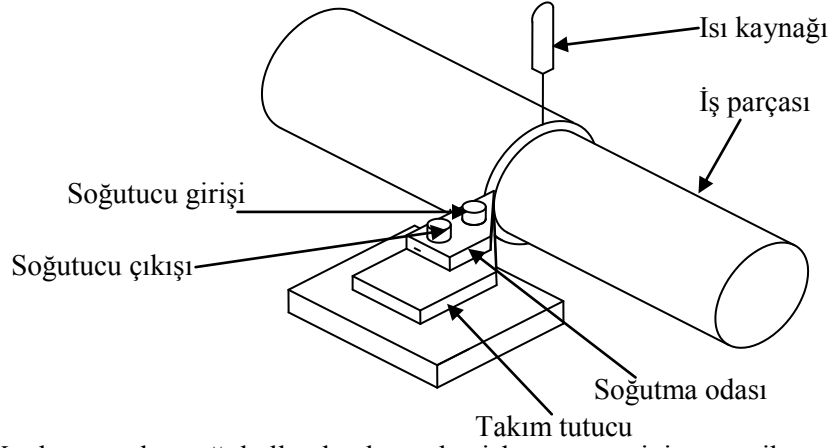
Şekil 2.6. (a) Inconel 718 in SiC takviyeli seramik takım ile frezelenmesinde 1.25 mm talaş derinliğinde takımda meydana gelen bozulmalar. (b) 1.25, 0.5 ve 0.25mm talaş derinliğinde takımda meydana gelen bozulmalar [83].

Çalışmalar değerlendirildiğinde seramik takımların mekanik tokluklarından dolayı kesme bölgesindeki kaynayan parçaların kopması neticesinde oluşan çentikler seramik takımların ömürlerini aşırı bir şekilde düşürmektedir. Buna ek olarak, seramikler düşük ısı iletkenlik özelliğinden dolayı yapılarında kolayca termal çatlamlar meydana gelmektedir. Bu olumsuzluklara karşın seramik takımlar kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlara nazaran yüksek kesme hızlarında (200m/dak üzeri) daha dayanıklıdır.

2.4.4. Inconel 718 alaşımının yardımcı teknikler kullanarak işlenebilirliği.

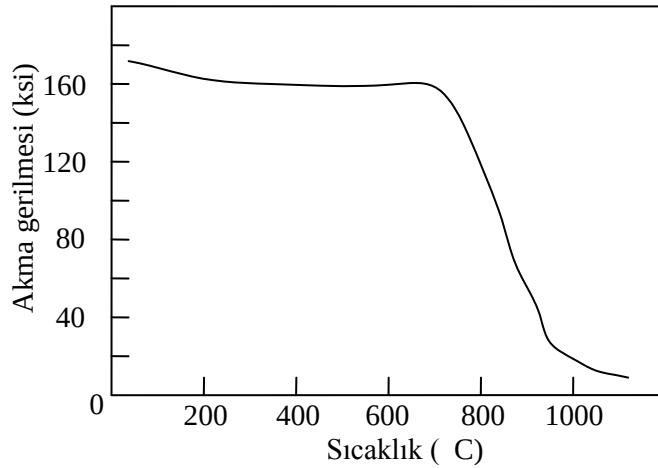
Inconel 718'in işlenmesinde işleme performansını arttırmak amacıyla geliştirilen metotlardan biri sıcak işlemdir. Şekil 2.7' de görüldüğü gibi yerleştirilmiş olan plazma

veya lazer gibi bir ısı kaynağından takımdan önce iş parçasını ısıtması esasına dayanmaktadır [23,24].



Şekil 2.7. Yardımcı ısı kaynağı kullanılarak yapılan işleme prosesinin şematik gösterimi [84].

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi 750 C üzerindeki sıcaklıklarda Inconel 718’in akma gerilmesinde önemli bir düşme görülmektedir. Bu yüzden, yerleştirilen bir ısı kaynağı malzemeyi yumuşatacak ve bu da talaş formasyonu ile ilişkili olan makaslama ve gerilme dayanımını düşürerek işleme performansını arttıracaktır.

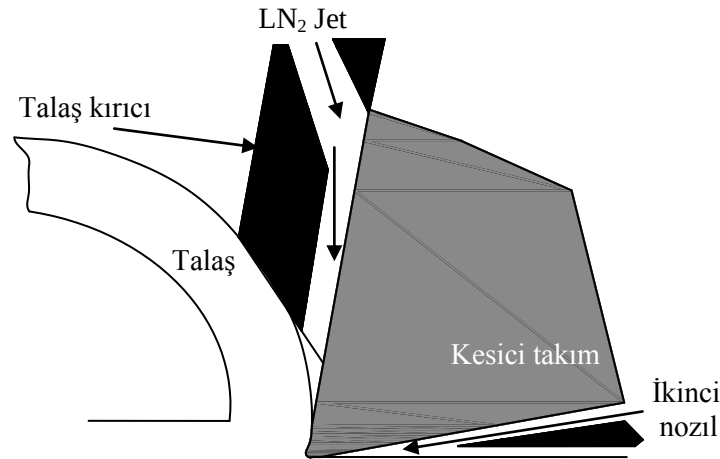


Şekil 2.8. Inconel 718’ in sıcaklığa bağlı akma gerilmesi değişim grafiği [24].

Leshock vd. [24] Inconel 718 alaşımının plazma ısı kaynağı destekli işlenebilirliğini çalışmalarında, yüzey sıcaklığının artmasıyla kesme kuvvetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 530 C nin üzerindeki sıcaklıkta malzeme yüzeyinde oksidasyon gözlemlenmiş; bu problemin plazma arkının kontrolüyle aşılabileceğini rapor etmişlerdir.

PEM ile, çentik etkisi elimine edilerek takım ömrü arttırılmış, fakat geleneksel işleme yöntemine nazaran bu yöntemde talaş ısısının artmasına bağlı olarak yanak aşınma oranında artma olmuştur.

İşlenmesi zor malzemelerin işleme performansını arttırmak amacıyla geliştirilen alternatif çözümlerden biri de, kesme sıcaklığını düşürmek için kullanılan yüksek basınçlı su jeti soğutma sistemidir [85]. Diğer bir yöntem de soğutma işleminde sıvı azot kullanımıdır [26,85]. Soğutucu akışkanda ki atığı minimize etmek için akışkan Şekil 2.9’ da görüldüğü gibi malzemenin kesildiği ve ısının olduğu bölge olan takım kesme kenarına direk uygulanır. Soğutucu sıvının akma oranı kesme prosesindeki ısı oluşumu ile orantılı olmalıdır, böylelikle aşırı ısınma ve soğumadan dolayı iş parçasında meydana gelecek bozulmalar önlenmiş olur. Bu yöntemle elde edilen etkili bir soğutma sujeti ile soğutma yönteminden daha güçlüdür ve Inconel 718’in işlenmesinde sıcaklığa bağlı aşınmaları önemli miktarda düşürmektedir.

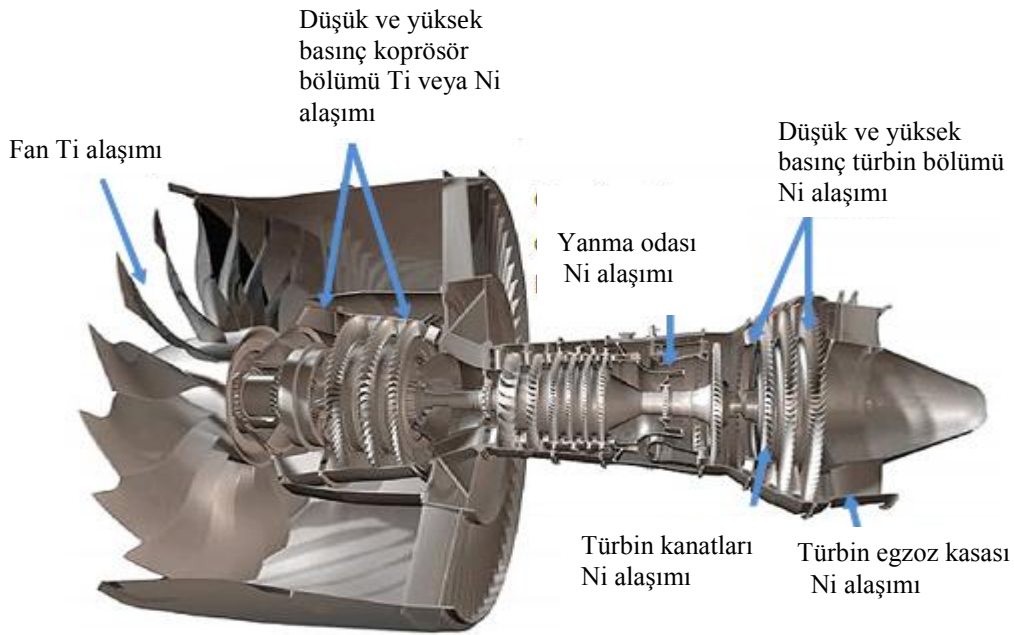


Şekil 2.9. Sıvı azot kaynağı yerleştirilmiş çift nozullu soğutma sisteminin şematik gösterimi [85].

Tüm bu araştırmalar neticesinde işlenmesi zor malzemeler sınıfına giren Inconel 718 nikel alaşımının geleneksel talaşlı imalat yöntemiyle yapılan işlemede, kesme hızı, talaş derinliği, kesici takım cinsi, takım geometrisi vb. işlenebilirlik parametrelerinin tamamının bir arada kontrol altında tutulmasının çok zor olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu malzemelerin geleneksel olmayan imalat yöntemlerinde işlenmesi tercihli hale gelmiştir. Ancak, Inconel 718 nikel alaşımının lazer, plazma ve tel erozyon ile işlenebilirliği hakkında yeterli çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu yönde yapılacak çalışmanın sanayideki bu tür uygulamalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

3. SÜPER ALAŞIMLAR

Günümüz teknolojisindeki gelişmeler; ekonomik yönden elverişli, teknik açıdan uygun özel malzemelerin elde edilmesi için yüksek mekanik özelliğe sahip, yüksek sıcaklıkta aşınma ve korozyona dayanıklı süper alaşımların üretimine neden olmuştur. Süper alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamalarında diğer tüm metalürjik malzemelerden daha çok tercih edilmektedir. Bu tercihe neden olan yüksek sıcaklıktaki mükemmel performans, sadece kimyasal bileşenlerle değil, en az bunlar kadar üretim prosesine bağlı olarak mikro yapılarına, elde edilen ikincil fazlara ve mikro yapısal hatasızlığa dayanır. Süper alaşım malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve metal alaşımlarına göre en önemli üstünlükleri; yüksek özgül mukavemet, yüksek spesifik elastik modülü, yüksek aşınma dayanımı ve bu özelliklerin yüksek sıcaklıkta bile muhafaza edilmesidir. Bu özelliklere bağlı olarak, süper alaşım malzemeler özellikle havacılık, uzay araçları, nükleer teknolojiler, enerji sistemleri, gaz türbin motorları, cam sanayisi, sıcak takımlar ve kalıpların yapımında kullanım imkânlarının oluşmasından dolayı bu malzemelere olan ilgi giderek artmıştır [80]. Süper alaşımlar; genellikle demir, nikel, kobalt ve daha az miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum, titanyum ve alüminyum alaşımlarla yapılan çeşitli bileşimleri içerirler [4]. Nikel esaslı ve titanyum alaşımlarla birlikte kompozit malzemeler gibi mühendislik malzemeleri uzay sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Uçak motorunun bölümleri ve bu bölümlerde kullanılan süper alaşımlar [87].

Bu malzemeler yüksek ısı uygulamaları ve aynı zamanda yüksek dayanma gücü ve ağırlık taşıma oranları için tasarlanmışlardır. Nikel esaslı alaşımlar uzay sanayinin ekonomik işletme giderleri için gerekli olan yüksek sürtünme ve korozyon direncine sahiptirler. Süper alaşımların en önemli özellikleri; 650 °C'nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve sıcaklığa bağlı korozyon ve erozyona dayanımlarıdır. Nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda (1500–1650 °C) yüksek dayanıma sahiptirler [86].

Nikel esaslı süper alaşımlardan Rene 95, 760 °C' de 1100 Mpa ve Udimet 700, 870 °C' de 635 Mpa akma dayanımına ayrıca sırasıyla % 15 ve % 27 uzama oranına sahiptirler. Kobalt esaslı S-816 süper alaşımı ise 870 °C' de 240 Mpa akma dayanımına ve %16 uzama oranına sahiptir. Bundan dolayı süper alaşımlar bir çok alaşım çeşidinin yerine geçmiştir. Bunların arasında krom ve nikel içeren demir esaslı alaşımlar, demir, nikel, krom, kobalt bileşikler, karbür takviyeli kobalt esaslı alaşımlar, katı solüsyon takviyeli bazı alaşımlar, çökeltme ve dağılım takviyeli nikel esaslı alaşımlar bulunmaktadır. Süper alaşımlar, işleyerek veya döküm yöntemiyle şekillendirilerek kullanılabilir. Genellikle demir esaslı alaşımların, demir, nikel, krom, kobalt bileşiklerin ve nikel esaslı katı solüsyon takviyeli alaşımların 650 °C' nin üstündeki sıcaklıklardaki dayanımları, nikel esaslı ikinci safha takviyeli ve kobalt esaslı alaşımlardan önemli derecede daha düşüktür. %16 Cr, %25 Ni ve % 6 Mo içeren 16-25-6 alaşımı gibi ilk demir esaslı süper alaşımlar ve küçük miktarlarda tungsten ile molibden içeren demir, nikel, krom, kobalt alaşımları (Fe - 20Ni - 20Cr - 20Co) esasen katı solüsyon takviyelidir. Düşük miktarlarda (%2 ile %3) alüminyum ve titanyum içeren demir esaslı alaşımlar, bir alüminyum-titanyum mukavemet kazandırma safhasının çökertilmesi yoluyla yüksek sıcaklıklara daha fazla dayanım gösterirler. Ergime noktası üstünlüğünden ötürü kobalt alaşımlar genellikle 1100 °C' den yüksek sıcaklıklarda nikel esaslı alaşımlardan daha fazla dayanım gösterirler. Karbür bileşikler içeren ve bir yüzey merkezli kübik (ymk) katı solüsyon matris ile nitelendirilen döküm kobalt esaslı alaşımlar, gaz türbin motorlarında hava folyoları olarak kullanılmaktadır. Dağılımla kuvvetlendirilmiş nikel esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanıma sahiptirler. Fakat orta sıcaklıklarda orta dayanım gösterirler. İkinci safha, ergime gerçekleşinceye kadar katı bir sertleştirme mekanizması görevinde bu alaşımların yapısında bulunur. Aksine, çökeltme ile kuvvetlendirilmiş alaşımlar, ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda katı solüsyon olarak dayanım kaybederler. Dağılımla kuvvetlendirilmiş alaşımlar bazı gaz türbinli motorların yanma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır [88]. İkinci çökeltme aşaması ile kuvvetlendirilen nikel esaslı süper alaşımlar en karışık ve bütün süper alaşımlar

içersinde en çok dikkati çekenidir. Bu alaşımların fiziksel metalürjisinin çözümü zor ve karışık olmasına rağmen iyi anlaşılmıştır. Yapı ilk mukavemet kazandırma aşamasında bir çökeltilmiş nikel-alüminyum-titanyum bileşiği ile bir yüzey merkezli-kübik austenitik matristen oluşur. Alaşım bileşiğine ve sıcaklık işlemine bağlı olarak çeşitli karbürler ikinci çökeltme aşamasında ortaya çıkarlar. Bu alaşımlar gaz türbinli motorlardaki gerilme ve sıcaklığa ilişkin yerlerde kullanılmaktadır [89].

3.1. Süper Alaşımların Gelişim Süreci

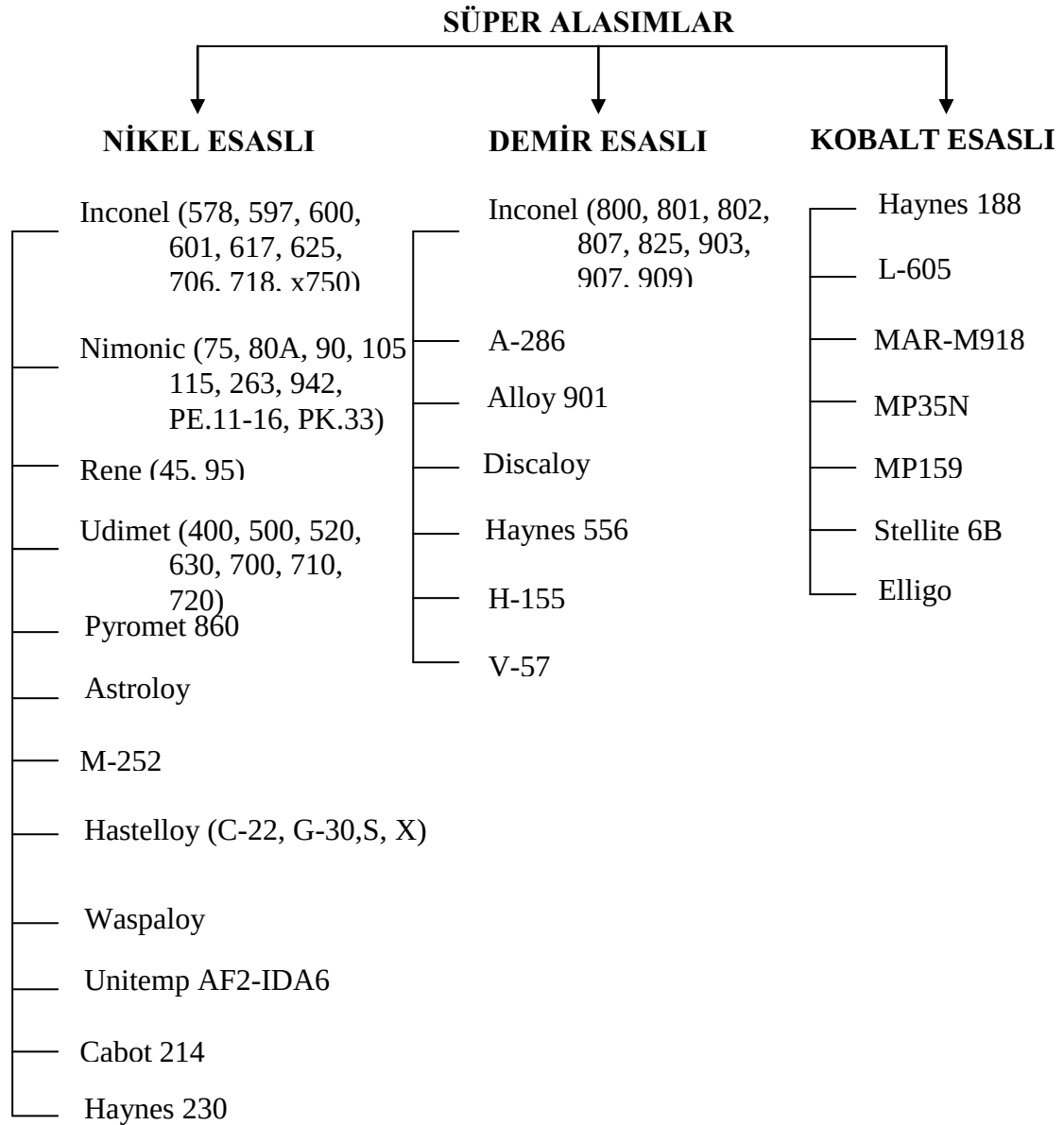
Süper alaşımlar ilk olarak 1940'lı yılların başlangıcında nikel-krom alaşımlarına ufak miktarlarda titanyum ve alüminyum ilaveleriyle yüksek oksidasyon ve deformasyon dayanımlarının arttırılabilmesi sayesinde türbin kanatlarında kullanılmaya başlanmıştır. İlk üretilen süper alaşım Nimonic 80'dir ve sonrasında Nimonic 80A geliştirilmiştir. Sonrasında Nimonic 80A'ya yapılan yaklaşık % 20 oranında kobalt ilavesi ile 50°C daha çok sıcaklık dayanımı olan Nimonic 90 elde edilmiştir. Türbin motoru üreticilerinden gelen yüksek sıcaklık dayanımı talebinin artmasıyla molibden ilaveli alaşımlar kullanılmış ve Nimonic 105 ve 115 elde edilmiştir. 1940'lı yılların sonunda Pratt and Whitney Aircraft ve General Electric Company tarafından Waspalloy ve MA252 adında iki yeni nikel esaslı dövme alaşım keşfedilmiştir. Bu iki alaşımı farklı yapan, katı eriyik ve karbür yapı mukavemeti sağlayan molibden'dir. Bu sayede türbin kanatlarında nikel esaslı dövme alaşımların kullanımı giderek yaygınlaşmıştır [80].

1950'lerin sonuna yaklaşıldığında türbin kanatları çalışma sıcaklıkları, büyük zahmetlerle elde edilen dövme alaşımların kapasiteleriyle sınırlıydı. Güçlendirilmiş alaşımların mevcut olmasına rağmen bu alaşımları dövme yöntemiyle elde etmek imkansızdı. Dökme süper alaşımlar, vakum ve döküm teknolojilerinin geliştirilmesine kadar fazla kabul görmüyordu. Bu yöntemlerin gelişmesiyle vakum yöntemiyle dökülen ilk alaşımlardan birisi Inco 713C'dir. Bu malzemenin yüksek karbon içeriği nedeniyle çok fazla karbür oluşturmaları ve düşük sıcaklıktaki kötü sünekliği bütün olarak dökülen ve parçalarda problemler yaşanmasına neden olmuştur. Bu problemi aşmak için düşük karbon içeriği olan versiyonu geliştirilmiş ve türbin kanatlarında kullanılmaya başlanmıştır [90]. Dövme alaşımlar gibi daha güçlü döküm alaşımlara talep, başlangıçta titanyum ve alüminyum miktarının arttırılması ile karşılandı ve IN 100 geliştirildi. 1960'ların ortalarında General Electric Rene 77'yi üretti. Daha sonra benzer titanyum ve alüminyum miktarları ile Rene 77'den daha yüksek sürünme gerilimi ve korozyon dayanımına sahip

Rene 80' i geliştirdi. Gelişmeler sonucunda titanyum ve alüminyumun miktar olarak arttırılması ile malzeme geriliminde bir artış sağladığı görüşü, 1960' ların sonunda ifade edilen bir yaklaşımdı. Titanyumun azlığı, döküm olayını elverişli kılıyordu. Bu da B-1900 gibi döküm olan süper alaşımı doğurdu. Titanyum ve alüminyum miktarları düşük tutularak daha büyük miktarda molibden ve tantalyum katılarak katı solüsyon gerilimi arttırıldı. Martin Metals firması, Mar-M 200 süper alaşımında molibden yerine tungsten kullanarak piyasaya sürdü, ancak sıcak sürünme ve dökölme işlemlerinde bir problem ortaya çıktı. 1969' larda Martin Metals firması bu problemi açan bir metot ile patent aldı. Bu gelişme % 2 hafniyumun metal kompozisyonuna katılımından oluşuyordu ve bütün bir döküm boyunca hafniyumun belirgin bir etkisi görölmekteydi. Inco 713 LC, B1900, IN 792 ve Mar-M 432 alaşımları, güçlerini, mükemmel sıcak korozyonu ile Udimet 500' deki yüksek krom kapsamında değişiklik yapılarak titanyum ve alüminyum oranının yükseltilmesi ile refraktör metallerin kullanımı sonucunda mükemmel olan IN100 süper alaşımında birleştirdi [91].

3.2. Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Nikel esaslı çökeltme takviyeli süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda gösterdiği dayanım bakımından daha fazla kullanılmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklarda oksit dağılım takviyeli alaşımların ve hatta bazı kobalt alaşımlarının çökeltme takviyeli nikel esaslı süper alaşımlara karşı aşırı dayanım gösterdiği bir gerçektir. Ancak, bu alaşım çeşitlerinin ikisi de daha düşük sıcaklıklarda nikel esaslı süper alaşımlardan çok daha güçsüzdür. Demir esaslı süper alaşımlar ve katı solüsyon takviyeli alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri düşük dayanım özelliğinden dolayı süper alaşımların en zayıflarıdır (6). Demir esaslı süper alaşımlar, yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda daha az kullanılmıştır. Bu, yaygın olarak kullanılan demir içeren nikel esaslı Inconel 718 alaşımı için geçerli değildir. Demir esaslı süper alaşımların başlıca üstünlüğü kaybolmuştur. Ancak, katı solüsyonlu alaşımlar, dayanımın önemli olmadığı durumlarda kullanılmaya devam etmiştir. Fakat, oksidasyon ve sıcak korozyon dayanımı gereklidir [7]. MAR-M 509 gibi kobalt alaşımlar yaygın olarak uçak motor türbin pervane dökümleri için kullanılmıştır ve kobalt esaslı Haynes 188, popüler bir yanma malzemesidir. Süper alaşımlar(Ni, Fe-Ni, Co-esaslı), yapılarındaki oluşum elementlerine göre farklı isimler alırlar. Bu alaşımların genel sınıflandırılması şekil 3.2.' de gösterilmiştir [92].



Şekil 3.2. Süper alaşımların sınıflandırılması [92].

3.2.1. Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar, başta nikel olmak üzere, önemli miktarlarda krom içeren alaşımlar olarak tanımlanmıştır. Temel alaşım elemanı olarak kobalt, demir, molibden, tungsten ve tantal içerebilirler. Katı solüsyon ve ikinci aşama intermetalik çökeltme ile kuvvetlendirilmişlerdir. Alüminyum, titanyum ve niyobyum intermetalik oluşum elementleridir. Nikel esaslı süper alaşımlar % 30 ila % 75 Ni ve % 30' a kadar Cr içerirler. Birçok Inconel, Nimonic ve Hastelloy gibi alaşımlarda demir içeriği, küçük miktarlardan yaklaşık % 35' e kadar değişen oranlarda bulunur. Birçok nikel esaslı alaşım,

dayanım veya korozyon direncini arttırmak için küçük miktarlarda alüminyum, titanyum, niyobyum, molibden ve tungsten içerir. Nikel ve krom kombinasyonu, bu alaşımlara önemli derecede oksidasyon dayanımı verir. Nikel esaslı süper alaşımlar özellikle 650 °C'yi geçen sıcaklıklarda mekanik dayanım olarak paslanmaz çeliği geçerler. Nikel esaslı süper alaşımlar; oksidasyon ve korozyona, yüksek dayanım ve direnç gerektiren uygulama alanlarında genişçe kullanılırlar [7]. Inconel 600, Inconel 601, ve RA 333 gibi katı solüsyon alaşımları, fırın parçalarında ve diğer sıcaklıkla ilgili uygulamalarda kullanılırlar. Bu alaşımlar aynı zamanda, hidrokarbon düzenleyicisi gibi yüksek sıcaklık gerektiren kimyasal işleme donanımlarında kullanılmaktadır. Enerji üretimi nikel esaslı süper alaşımların yaygın olarak kullanıldığı diğer bir alandır. Ayrıca nükleer santrallerde, buhar jeneratörü tesisatı ve reaktör yapısal parçalarında kullanılırlar. Bu alaşımlar fosil yakıtlı tesislerde, süper ısıtıcı tesisatında, atık sistemlerinde, gaz depolama ünitelerinde, sıcaklığa veya korozyona dayanım gerektiren parçalarda kullanılmaktadır [93].

3.2.1.1. Nikel esaslı süper alaşımlardaki alaşım elementleri

Genellikle nikel esaslı alaşımlar, %38 den %76 oranında nikel, %27 krom (Cr) ve %20 oranında kobalt (Co) dan oluşmaktadır. Ayrıca tungsten (W), tantal (Ta), molibden (Mo) gibi elementler dakika kontrollü oranlarda katılarak alaşımın dayanım ve oksidasyon özelliğini güçlendirir [80]. Tablo 3.1' de Nikel esaslı süper alaşımların bileşimleri görülmektedir. Nikel alaşımların doğasında, yapısındaki kromdan ötürü yüksek ısı oksidasyona dayanım mevcuttur. Oksijen ortamında ısıtıldığında, Cr_2O_3 malzeme yüzeyinde koruyucu bir tabaka gibi yapışır. Nikel krom alaşımında optimum oksidasyon dayanımı, krom miktarının %15-30 arasında tutulduğu zamandır. Krom aynı zamanda krom karbür formu oluşturur. Bu da yüksek sıcaklıklarda malzemenin gerilimini arttırmada önemli bir rol oynar. Malzemenin gama fazını oluşturması ve gerilimini arttırması için malzemeye alüminyum, titanyum, ve niyobyum katılır ve $Ni_3(Al, Ti)$ oluşturulur. Niyobyum, bir kısım titanyum ve alüminyumun yerine geçebilir. Yada niyobyum miktarı % 4' ten fazla ise sert bir faz olan Ni_3Nb oluşturur. Titanyum ve niyobyum, aynı zamanda karbür oluşturur. Oksidasyon mukavemeti üzerinde alüminyumun önemli bir katkısı vardır. Al_2O_3 formu yüksek sıcaklıklarda oluşmaktadır. Al_2O_3 ya da Cr_2O_3 formu alaşımdaki iki elementin miktarına bağlıdır. Yüksek ısıya dayanıklı alaşımlar geliştirilirken mikro yapıdaki kararlılığın devam etmesi için yapıda daha düşük miktarda krom olması gerekir.

Tablo 3.1. Süper alaşımların kimyasal bileşimleri [80].

Alaşım adı	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Cb	Al	Ti	Mn	Si	C	B	Zr
<i>Inconel 718</i>	53	18.3	0.23	3.04		0.005	0.23	0.50	09	0.08	0.08	0.04	0.004	
<i>Alaşım 713C</i>	74	12.5	-	4.2	-	-	2.0	0.8	-	-	-	0.12	0.012	0.10
<i>Alaşım 713LC</i>	75	12.0	-	4.5	-	-	2.0	0.6	-	-	-	0.05	0.010	0.10
<i>B-1900</i>	64	8.0	10.0	6.0	-	4.0	-	1.0	-	-	-	0.10	0.015	0.10
<i>FORT 406</i>	60	6.0	10.0	1.0	8.5	6.0	2.0	2.0	-	-	-	0.13	0.018	0.06
<i>IN-100</i>	60	10.0	15.0	3.0	-	-	-	4.7	-	-	-	0.18	0.014	0.06
<i>IN-162</i>	73	10.0	-	4.0	2.0	2.0	1.0	1.0	-	-	-	0.12	0.020	0.10
<i>IN-731</i>	67	9.5	10.0	2.5	-	-	-	4.6	-	-	-	0.18	0.015	0.06
<i>IN-738</i>	61	16.0	8.5	1.7	2.6	1.7	0.9	3.4	-	-	-	0.17	0.010	0.10
<i>IN-792</i>	61	12.4	9.0	1.9	3.8	3.9	-	4.5	-	-	-	0.12	0.020	0.10
<i>M22</i>	71	5.7	-	2.0	11.0	3.0	-	-	-	-	-	0.13	-	0.60
<i>MAR-M200</i>	60	9.0	10.0	-	12.0	-	1.0	2.0	-	-	-	0.15	0.15	0.05
<i>MAR-M200(DS)</i>	60	9.0	10.0	-	12.0	-	1.0	2.0	-	-	-	0.13	0.15	0.05
<i>MAR-M246</i>	60	9.0	10.0	2.5	10.0	1.5	-	1.5	-	-	-	0.15	0.15	0.05
<i>MAR-M421</i>	61	15.8	9.5	2.0	3.8	-	2.0	1.8	-	-	-	0.15	0.15	0.05
<i>MAR-M432</i>	50	15.5	20.0	-	3.0	2.0	2.0	4.3	-	-	-	0.15	0.15	0.05
<i>NX188(DS)</i>	74	-	-	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-
<i>Rene'77</i>	58	14.6	15.0	4.2	-	-	-	3.3	-	-	-	0.07	0.016	0.04
<i>Rene'80</i>	60	14.0	9.5	4.0	4.0	-	-	5.0	-	-	-	0.17	0.015	0.03
<i>Rene'100</i>	60	9.5	15.0	3.0	-	-	-	4.2	-	-	-	0.18	0.014	0.06
<i>SEL</i>	51	15.0	22.0	4.5	-	-	-	2.4	-	-	-	0.08	0.015	-
<i>SEL-15</i>	58	11.0	14.5	6.5	1.5	-	0.5	2.5	-	-	-	0.07	0.015	-
<i>TAZ-8A</i>	68	6.0	-	4.0	4.0	8.0	2.5	-	-	-	-	0.12	0.004	1.00
<i>TRW-NAZA VIA</i>	61	6.1	7.5	2.0	5.8	9.0	0.5	1.0	-	-	-	0.13	0.020	0.13
<i>UDIMET 500</i>	52	18.0	19.0	4.2	-	-	-	3.0	-	-	-	0.07	0.007	0.05
<i>WAZ-20(DS)</i>	72	-	-	-	20.0	-	-	-	-	-	-	0.20	-	1.50

Alüminyum, titanyum ve niyobyum gibi elementler sürünme özelliğini arttırmak için eklenir. Oksidasyon dayanımının azalmasını engellemek için daha düşük miktarlardaki krom ve alüminyumun miktarının artırılması ile bu durum telafi edilebilir. Inconel 718 ve Nimonic 901 gibi alaşımlar, %18-36 oranında demir kapsarlar. Demir oranının artması, nikel esaslı alaşımlarda oksidasyon dayanımının azalmasına neden olur [94]. Az miktarda kobalt ilavesi artı yönde solüsyon gerilimini, alüminyum ile titanyum ise, nikel-krom austenitik yüzey merkezli kübik yapının içerisinde çözünebilirliği azaltmaktadır. Bu durum ise çözünme sıcaklığını artırır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda gerilimin devam etmesine yardım eder. Kobaltın karbon içindeki çözünürlüğü nikelden daha iyidir. Bu durumda daha çok karbon tolere edilebilir. Molibden, tungsten ve tantalum, katı solüsyon gerilimini yüksek sıcaklıklarda artırır. Kompleks karbür formu ve tantalum, özellikle

çözelti içinde bulunurlar. Boron ve zirkonyum sürünme gerilimini ve akmayı artırmak için katılan elementlerdir. Bu elementler, tane sınırlarını ayırmada iyi görev yaparlar. Ancak boron ve zirkonyumun nikel alaşımı içinde bulunmaları tamamen faydalı değildir. Çünkü kaynak yapabilme özelliğini azaltmaktadırlar. Karbon, karbür formu nedeniyle sürünme gerilimini arttırmada sınırlı miktarda eklenebilmektedir. Diğer katık elementler ise işlenebilirliği ve oksidasyon dayanımını arttırmak içindir. Kalsiyum, magnezyum ve yitrium son yıllarda küçük miktarlarda ilave edilmektedir. Döküm alaşımlarda hafniyum başlıca katkı elementidir ve hem akıcılıkta hem de gerilim düşürmede faydalıdır. Hafniyum orta sıcaklıklarda sıcak kırılma dayanımını yükseltmede ve katılaştırmada yönlendirmeye yardımcı olmaktadır [7]. Süper alaşımlardaki bazı elementlerin etkileri Tablo 3.2.' de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Nikel esaslı süper alaşımlardaki bazı elementlerin etkileri [93].

Ni ESASLI	ETKİ
Co , Cr, Fe, Mo	Katı solüsyon güçlendiriciler
W, Ta Co	Yüzey merkezli kübik matris stabiller
....	Karbür formu
W, Ta, Ti, Mo, Nb	MC tip
Cr	M_7C_3
Cr, Mo, W	$M_{23}C_6$
Mo, W	M_6C
....	Azotlu karbon
C, N	M (CN) tip
....	Karbürlerin genel içeriğinin ilerleyişi
Al, Ti	γ' (Ni_3Al, Ti)
....	Hegzagonal μ (Ni_3Ti)
Co	γ' yükselen solvus sıcaklığı
Cr	Y' azalan solvus sıcaklığı
Al, Ti, Nb	Zorlanan ve/veya intermetaliklerin içeriği
Al, Cr, Ta	Paslanma mukavemeti
Cr	Sülfid mukavemeti
B, Zr	Sürünme-kopma morfolojisindeki değişikliklerle kanal sınır özelliklerini arttıranlar
Hf	Orta sıcaklık yumuşaklığını arttıranlar
B, C, Zr,	Sınır ayarlamasına yol açanlar

3.2.1.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Mikroyapısı

Nikel esaslı süper alaşımlardaki temel eriyik toplam konsantrasyondaki atomik yüzdesi 10'dan düşük olan alüminyum ve/veya titanyumdur. Bu, γ ve γ' den oluşan

dengeli bir iki fazlı mikroyapı oluşturur. Malzemenin yüksek sıcaklığa ve sürünme deformasyonuna dayanımı γ' fazı sayesinde. γ' fazının oranı kimyasal bileşene ve sıcaklığa bağlıdır.

Nikel esaslı süper alaşımlardaki ana faz mevcudiyeti aşağıdaki şekildedir

1-Alaşımlar matrisi: Yüzey merkezli kübik nikel esaslı austenitik faz olan sürekli matris, genelde katı eriyik elementleri olan Co, Cr, Mo, ve W yüksek oranda içerir.

2-Gama 1. faz (γ') : Austenit ile değişmeyen uygun bir çökeltme işlemi olması için yüksek hacimli yüzey merkezli kübik yapının fraksiyonunda, karşılıklı oranlarda alüminyum ve titanyum ilave edilir.

3-Karbür formu: 0.05-0.2%, oranında karbon katılarak oluşan bu formda, karbon sık sık reaktif ve refraktör olan elementler titanyum, tantalum ve hafniyum (TiC, TaC, HfC) ile ilişki içindedir ve birinci MC karbürleri oluşmaktadır. Isıl işlem esnasında bu durum bozulur ve daha düşük karbürli $M_{23}C_6$ ve M_6C formuna dönüşerek tane sınırlarına yerleşir. Oluşan bu karbürlerin tamamı yüzey merkezli kübik (fcc) kristal yapıya sahiptirler.

4-Tane sınırları fazı (γ'): Bir kaç alaşımlar için sürünme özelliklerini optimize etmek için tane sınırları boyunca (γ') fazının bir filmi oluşturmak için ısıtılma teknikleri geliştirilmiştir.

5-Kapalı paket topolojik faz: Belirli durumlar altında düz dairesel tip olan bu faz, düşük sürünme gerilimi ve akma özelliği sunmaktadır [95].

3.2.2. Demir esaslı süper alaşımlar

Bu alaşımlarda düşük maliyetli demir nikel kısmen yer değiştirmiştir. Düşük nikel içeriklerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda nikel esaslı süper alaşımlar kadar faydalı değildir. Demir esaslı süper alaşımların çoğu %25'ten %45'e kadar nikel ve %15'ten %60'a kadar demir içerirler. %15'ten %28'e kadar krom yüksek sıcaklık oksidasyon direnci için ilave edilirken %1'den %6'ya kadar molibden katı eriyik mukavemetleşmesi için ilave edilir [96].

Titanyum, alüminyum ve niobyum mukavemet artırıcı çökelti oluşturmak için nikel ile kombine edilir. Ayrıca alüminyum ve titanyum içermeleri nedeni ile çökeltme sertleşmesi işlemi ile sertleştirilebilirler. Kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahip matriste alaşımlar elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynarlar. Demir esaslı süper alaşımlar yaklaşık 650 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanım bulmaktadırlar. Demir esaslı süper alaşımların dayanımları, nikel esaslı alaşımlara göre daha düşüktür. Bu nedenle de, daha uzun ömür ve aynı

zamanda yüksek mekanik ve termik zorlamalarda nikel ve kobalt esaslı alaşımlar tercih edilir. Pek çok gaz türbin motorlarında, kanatlarında, diskler ve şaftlar ile buhar türbinlerindeki bazı parçalar demir esaslı süper alaşımlardan yapılabilir. Diğer süper esaslı alaşımlara kıyasla daha ucuzdurlar [97].

3.2.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, temel bileşen olarak kobalt ve önemli miktarlarda krom tungsten ve daha az miktarlarda molibden, niyobyum, tantal, titanyum ve duruma göre demir içeren alaşımlardır. Katı solüsyon ve karbür safhaları ile kuvvetlendirilmişlerdir. Karbür safhası kuvvetlendirilmesine bağlı olarak % 0,4 ila % 0,85 karbon içerirler.

Kobalt katı solüsyonlu alaşımlar kullanım alanına göre üç alt gruba ayrılırlar:

- (a) Haynes 25, Haynes 188, UMC0-50 ve S-816 dahil olmak üzere 650 ila 1150 °C arasında kullanılan alaşımlar,
- (b) 650 °C civarında kullanılan ve MP-35N ve MP-259 bağlayıcı alaşımlar,
- c) Aşınma dirençli Stellite 6B alaşımlar.

Sıcak işlenmiş bütün alaşımlar kübik yüzey merkezli kristal yapısına sahiptir. Fakat; MP-35N ve MP-159 alaşımları servis uygulamalarından önce tavsiye edilen termo mekanik işleme süresince kapalı hekzagonal yapılar geliştirirler. Kobalt esaslı süper alaşımların hiçbirisi tam bir katı solüsyon alaşımı değildir. Çünkü, hepsi ikinci karbür safhası veya intermetalik bileşikler içerirler. Yaşlanma, genellikle oda sıcaklığında kayba yol açan ilave ikinci safha çökeltmesine neden olur.

Haynes 25, yaygın olarak gaz türbinli motorların sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında ve soğuk çalışma şartlarında kullanılabilen işlenebilen kobalt esaslı bir alaşımdır. Haynes 188 ise özellikle gaz türbinlerindeki yaprak tabaka halindeki parçalar için tasarlanmış lantan, silikon, alüminyum ve manganez içeriklerini kontrol edebilen basit oluşumu ile 110 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda oksidasyon dayanımı olarak mükemmel kalite sunar. MP-35N ve MP-159, özellikle sertleştirilmiş olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve her iki alaşım da, zor çalışma şartlarında yüksek dayanıma sahiptir. MP-35N ve MP-159 daha çok bağlar için kullanılmıştır; MP-159, 650 °C' lik üst çalışma sınırına sahiptir. Yüksek sıcaklığa ait son grup olan, katı solüsyon takviyeli kobalt alaşımlar, Stellite 6B denilen tek bir alaşım içerir. Bu alaşım yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyona nispeten iyi dayanım gösterir. Sıcaklık sertliği, karmaşık karbür oluşumların sayesinde elde edildiği yüksek krom içeriğinden bu özellik türetilmiştir. Stellite 6B, buhar

türbinlerinde erozyon kalkanı, gaz türbinlerinde aşınma pedleri, yüksek sıcaklık ve yüksek hızlarda partikül taşıyan tüp sistemlerinde bağlantı parçası olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. X-40, WI-52, MAR-M 302 ve MAR-N509 gibi karbür safha takviyeli süper alaşımlar, öncelikle, statik pervane uygulamaları olmak üzere yoğun olarak türbin motor hava folyolarında kullanılmaktadır. Bu alaşımlar yeterli derecede yüksek sıcaklık dayanımına, oksidasyon ve kaynakla tamir edilebilme yeteneğine sahiptirler [89].

4. TERMAL KESME YÖNTEMLERİ

4.1. Lazer Işını İle Kesme Yöntemi

4.1.1. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi

Lazer “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ingilizce kelimelerinin ilk harflerinin alınmasından türetilmiş olup, uyarılmış ışın neşriyle ışık kuvvetlendirilmesi anlamına gelmektedir.

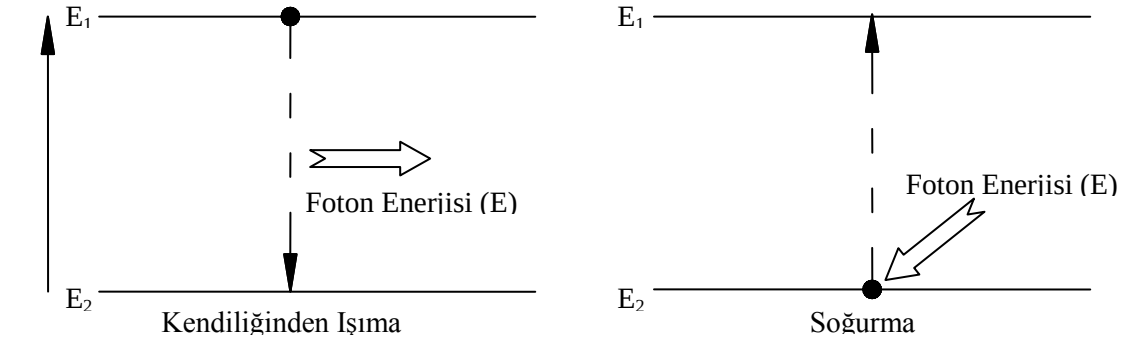
Lazerler, Einstein tarafından geliştirilen uyarılmış ışımaya prensibine dayanarak çalışır. Bu prensip; kendiliğinden ışımaya, soğurma ve uyarılmış ışımaya olmak üzere 3 temel esasa dayanır. Buna göre;

E_1 = Düşük seviyeli atomun enerjisi

E_2 = Yüksek seviyeli atomun enerjisi

$E = E_2 - E_1$

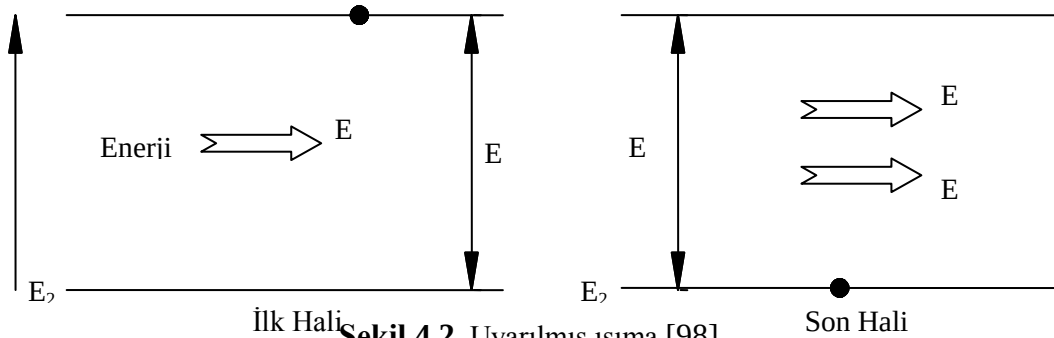
E = Foton enerjisi



Şekil 4.1. Kendiliğinden ışımaya ve soğurma [98].

Şekil 4.1’den de anlaşılacağı gibi kendiliğinden ışımaya olayı yüksek seviyede bulunan atomun, kendiliğinden foton yayarak düşük seviyeli atom haline geçmesidir.

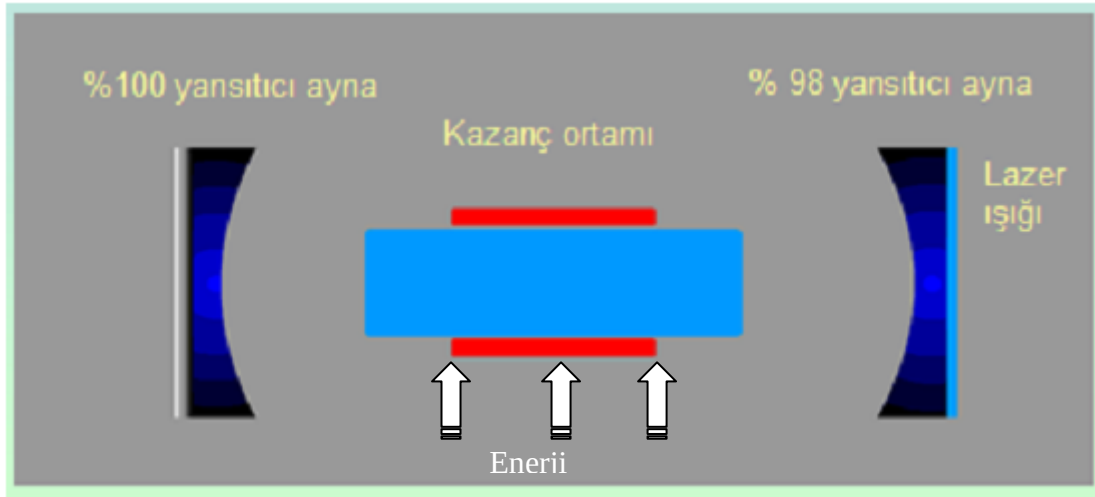
Soğurma olayı ise; düşük seviyedeki atomun foton soğurarak yüksek seviyeli atomun enerji seviyesine geçmesidir.



Şekil 4.2. Uyarılmış ışımaya [98].

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi uyarılmış ışımaya; yüksek seviyede bulunan atomun foton zorlanması ile düşük seviyeli atom seviyesine iner. Buradaki foton enerjisi iki seviye arasındaki enerji farkına eşittir. Bunun sonucu olarak atomdan iki foton uzaklaşır. İki fotonun hareketi eşzamanlı olduğundan ışık güçlenir [98].

İşte lazerin elde edilmesi de bu prensibe dayanarak optik olarak saydam bir lazer tüpü içerisinde gerçekleşir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi lazer tüpünün bir ucunda tam yansıtıcı ayna, diğer bir ucunda ise kısmen yansıtıcı ayna mevcuttur.

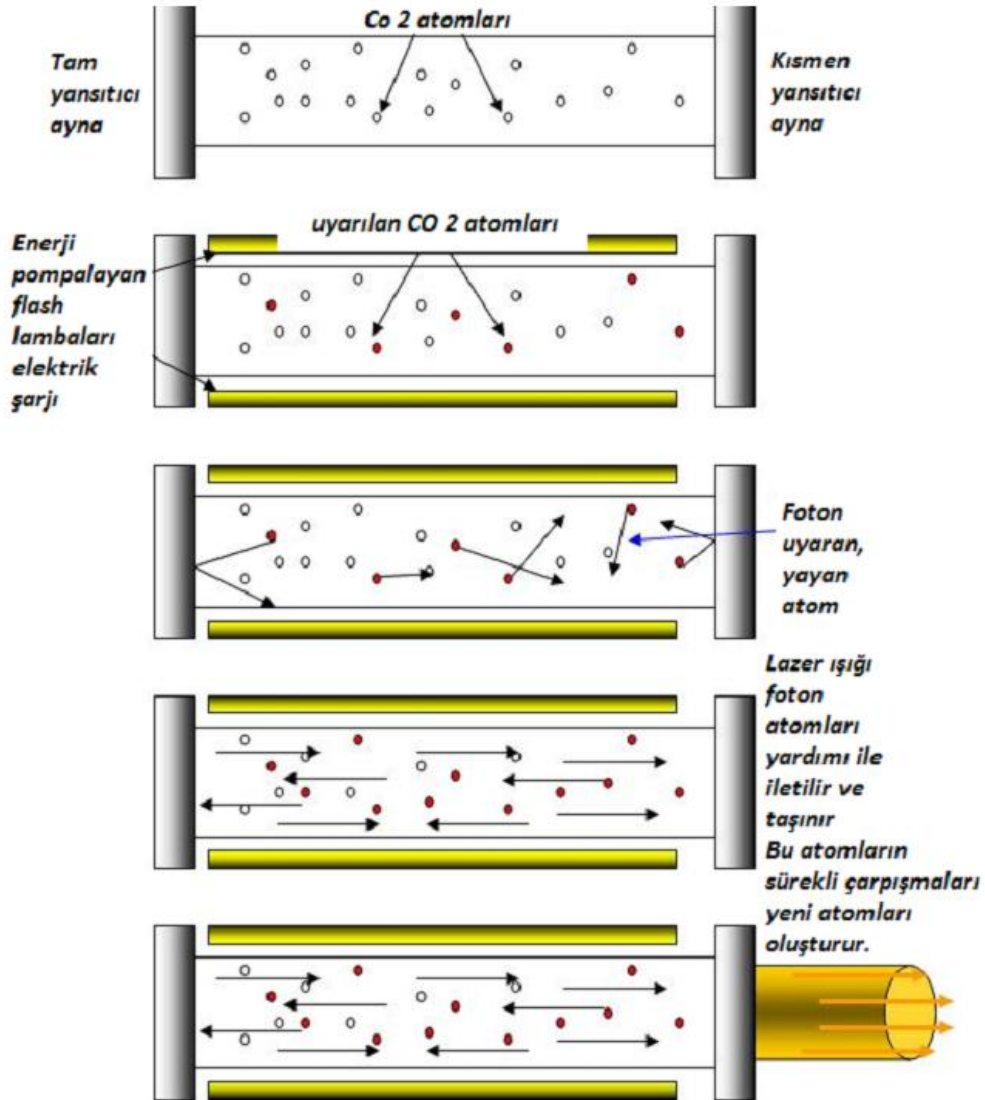


Şekil 4.3. Basitleştirilmiş tipik bir lazer şeması [99].

Lazer tüpünün içerisi katı, sıvı veya gaz bir madde ile doldurulur. Lazer tüpüne dışardan enerji verilerek ortamda bulunan atomlara ulaştırılır. Lazer tüpüne dışardan enerji verme olayı, ortamdan elektrik akımı geçirme veya dışardan ışık geçirme şeklinde gerçekleştirilebilir. Atomların bir kısmı bu enerjiyi absorbe ederler. Fazla enerji atomları kararsız bir hale getirir. Kararsız ve uyarılmış haldeki atomlara çarpan fotonlar sonucu bu atomlar da foton yayarlar ve kararlı hale geçmeye çalışırlar. Yayılan bu fotonlar tüpün içersindeki aynalardan yansıyarak döner ve reaksiyonu hızlandırır. Uyarılmalar sonucu ortamdaki fotonlar artar. Atomların büyük çoğunluğunun foton yaymasıyla kuvvetlenen ışık kısmen yansıtıcı aynalı uçtan dışarı çıkar. Foton enerjisi ile kuvvetlenip dışarıya çıkan bu ışık lazer ışımıdır [100].

Bir atom, alabileceği enerjiyle tamamen dolunca bünyesine daha fazla enerji alamaz. Böyle bir atom kendi enerjisine eşit enerjide bir ışık dalgasıyla çarpışınca, zorunlu olarak enerjisini ışık dalgası olarak verir ve çarpıştığı dalga ile aynı frekans ve seviyede iki ışık dalgası yayar. Çarpışmaların sayısını yükseltebilmek için, yani daha çok ışık

kazanabilmek için, lazerin karşılıklı iki kenarına paralel iki ayna yerleştirilir (Şekil 4.4.). Bu aynalardan birine rastlantısal olarak dik bir açıyla çarpan ışık dalgası, karşıdaki aynaya yansıtılır ve ardından ışık sürekli iki ayna arasında gidip gelir, dışarıya çıkamaz. Işık parçacıkları, lazerin yapımında kullanılan malzemenin içinden geçerken, yolunun üzerinde enerji dolu diğer atomlarla karşılaşır ve onları da, depolamış oldukları enerjiyi ışık olarak açığa çıkarmaları için zorlarlar. Böylece "parlayan" (ışıldayan) atomların sayısı ve bununla birlikte ışığın miktarı sürekli artar. İki ayna arasında tutsak olduğu sürece giderek yoğunlaşan ışınla bir şey yapmaksa mümkün değildir. O nedenle, bu iki yansıtıcıdan biri yarı geçirgen özelliğe sahiptir. Işğın bir bölümü onun aracılığıyla dışarıya lazer ışını olarak çıkar [101].



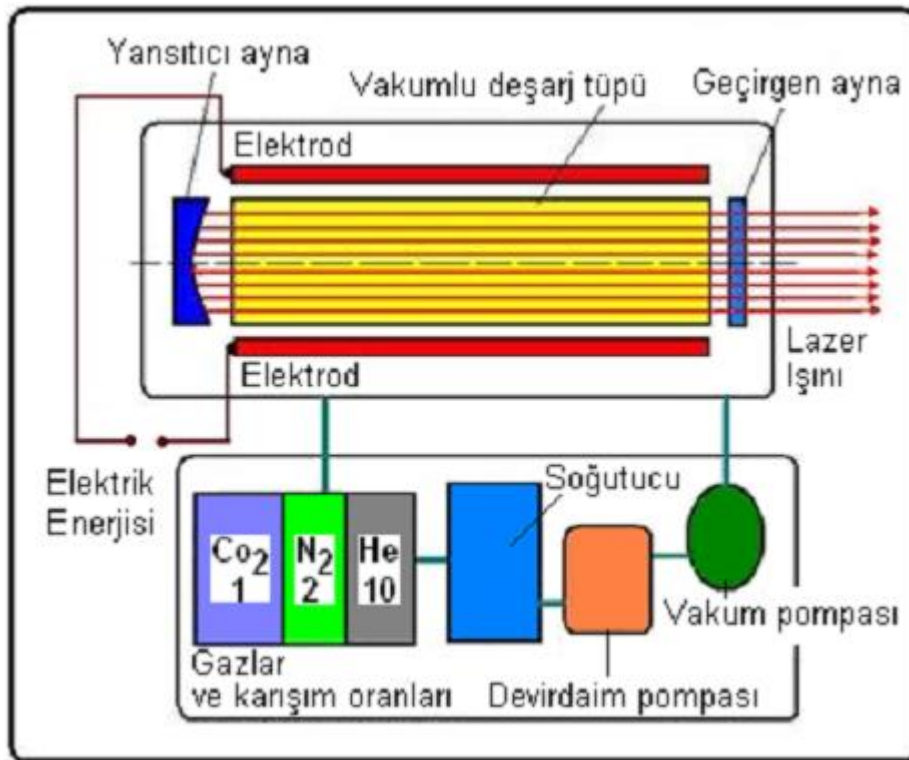
Şekil 4.4. Lazer ışığının oluşum aşamalarının şematik gösterimi [101].

4.1.2. Endüstriyel Alanda Kullanılan Lazerler

Endüstriyel alanda en çok kullanılan lazer, bir gaz lazeri olan karbondioksit (CO_2) lazeridir. Gaz lazerlerinde, lazer ışınının elde edilebilmesi için birtakım özel gazların kullanılması gerekmektedir. Fakat bu gazların belirli oranlarda karıştırılması gerekir. Ayrıca bu özel gazların saflıkları oldukça yüksektir. Karbondioksit lazerinden sonra en çok kullanılan lazer, bir katı hal lazeri olan Nd:YAG lazeridir.

4.1.2.1. Karbondioksit (CO_2) Lazeri

Karbondioksit (CO_2) lazeri, endüstriyel uygulamada en yüksek ortalama çıkış gücüne sahip ve dalga boyu $10,6 \mu\text{m}$ olan bir moleküler gaz lazeri sistemidir. Şekil 4.5'te CO_2 - Lazeri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Karbondioksit lazer mekanizmasının şematik görünümü [102].

Elektrodlar arasına bir gerilim uygulanmasıyla, düşük basınçlı bir gaz boşalımı tutuşturulur ve elektron darbeleri aracılığıyla inversiyon gerçekleşir, inversiyon oluşumu için CO_2 'e ek olarak azot ve helyum da gereklidir. Elektron darbeleri aracılığıyla CO_2 'nin uyarılması için iki yol mevcuttur:

- CO_2 moleküllerinin üst lazer seviyesine doğrudan uyarılmasıyla

- Azot ve CO₂ molekülleri arasında 2. türden darbelerle.

İkinci uyarma mekanizması daha yaygındır. Metastabil azotun uzun ömür süresi sayesinde, azot moleküllerinin çok yüksek konsantrasyonunun, enerji bakımından CO₂'nin üst lazer seviyesine benzeyen belirli bir duruma ulaştırılması mümkündür. Her iki molekülün darbelenmesiyle, bir enerji transferi oluşur.

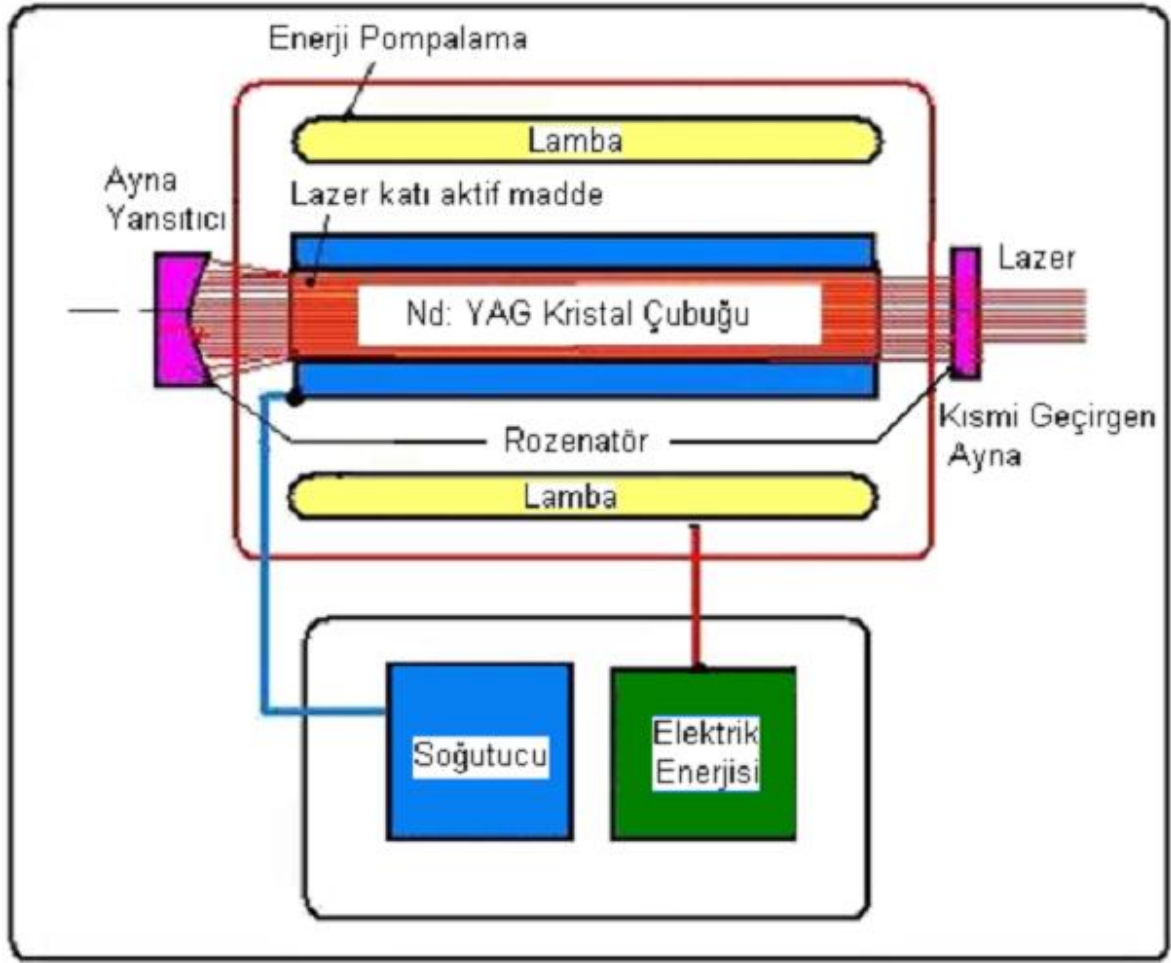
Elektron darbeleri ile karbondioksitin uyarılması; karbondioksit moleküllerinin üst seviyeye doğrudan uyarılması yada azot ve karbondioksit molekülleri arasındaki darbelerle meydana gelir. Azot'la karbondioksit molekülleri arasındaki, darbelerle uyarma daha çok kullanılır. Azotun yüksek konsantrasyonu ve uzun ömürlü olmasından dolayı enerji bakımından, karbondioksit üst bir lazer seviyesine ulaştırılabilir. Bu moleküllerin darbelenmesiyle enerji transferi meydana gelir [103].

Lazer işlemindeki üçüncü gaz olan helyum'un görevi, darbe boşalması sırasında alt lazer seviyesini hızla boşaltmak ve yüksek ısı iletkenliğiyle gaz karışımını soğutarak alt seviyenin termik bir yüklemeye maruz kalmasını engellemektir. Bu şekilde gaz boşalımı sırasında oluşan dissosiasyon ürünleri, çıkış gücü üzerine negatif bir etki yapmadığı gibi, gaza ilave bir soğutma etkisi oluşturarak gazın değişmeden kalmasına yardımcı olur. Gaz, ısı eşanjöründe soğutulur ($T_{\text{gaz}} < 150^{\circ}\text{C}$) ve kısmen yenilenir. Bu durum, özellikle yüksek güçlü üreteçlerdeki yüksek gaz dönüşümü uygulamasında zorunludur [104].

4.1.2.2. Nd:YAG Lazeri

Endüstriyel olarak kullanılan en önemli katı cisim lazeri, Neodim (Nd):YAG lazeridir. (Nd) YAG, Neodyum katkılı Yitrium-Alüminyum-Garnet ortama sahip ve lazer çıkışının dalga boyu 1,06 μm olan bir katı hal lazeridir. Şekil 4.6'da (Nd):YAG - Lazeri şematik olarak gösterilmiştir.

Bu lazer türünde lazer yayan eleman, Neodim'dir. Tipik verim halinde, kristalin % 1'i iyon haline geçer. Bir gaza göre katı bir cismin atomları çok daha yoğun şekilde dizildiklerinden, birim hacimde daha çok atom bulundurlar. Bu nedenle katı cisim lazerinin amplifikasyonu ve çıkış yoğunluğu daha yüksektir. Neodim'in uyarılması, yüksek güçlü ark lambalarının ışığıyla yapılır. Neodimin absorpsiyon spektrumunda iyi bir toplam etkinlik derecesi elde etmek üzere Nd: YAG kristali ışığa maruz bırakılırsa, neodim bu ışığı absorbe ederek uyarılmış hale gelir.



Şekil 4.6. Nd: YAG Lazer mekanizmasının şematik görünümü [102].

Bu uyarma seviyesinde geçen süre çok kısadır ve iyon, hızla üst lazer seviyesinin biraz üzerine çıkar. Bu sırada serbest kalan enerji, ısı enerjisi olarak kristale geçer. Uyarma bantlarının dışında bulunan ışın, uyarma işlemi için kullanılamaz ve sadece kristalin sıcaklığını yükseltir. Lazer işlemi sırasında kullanılamayan frekans kısmını oluşturan bu ısıtma, çıkış gücü ve ışın kalitesi bakımından, tüm lamba ile uyarılan katı cisim lazerlerinde önemli bir rol oynar. Lazer seviyesinin altı boştur: burada hiçbir termik kanun geçerli değildir veya olsa bile, kısa sürede tekrar boşaldığından etkisizdir. Bu nedenle lazer seviyesinin zerindeki ilk dolu bantda inversiyon başlar. Uyarmanın doğrudan gaz boşalımı şeklinde yapıldığı gaz lazer sistemlerinin tersine Nd: YAG sistemlerinde uyarma ışıkla yapılır. Yüksek ısı yayılımı nedeniyle, hem ark lambasında hem de lazer kristalinde, harcanan elektrik gücünün yaklaşık % 95-97' sinin, sisteme tekrar geri verilmesi gerekir. Bu nedenle lamba ve kristalin etkin şekilde su ile

soğutulması zorunludur[104]. Tablo 4.1’de CO₂ ve Nd: YAG lazer sistemleri karşılaştırılmaktadır.

Bir çok lazer çeşidi olmasına rağmen endüstride kullanılabilecek lazerler sınırlıdır. Bunlar dışında

- He-Ne lazeri
- Excimer lazeri
- Argon lazeri
- Karbonik oksit lazeri
- Azot lazeri

Çok fazla uygulama alanı olmamasına rağmen bazı uygulamalarda kullanılmaktadır [105].

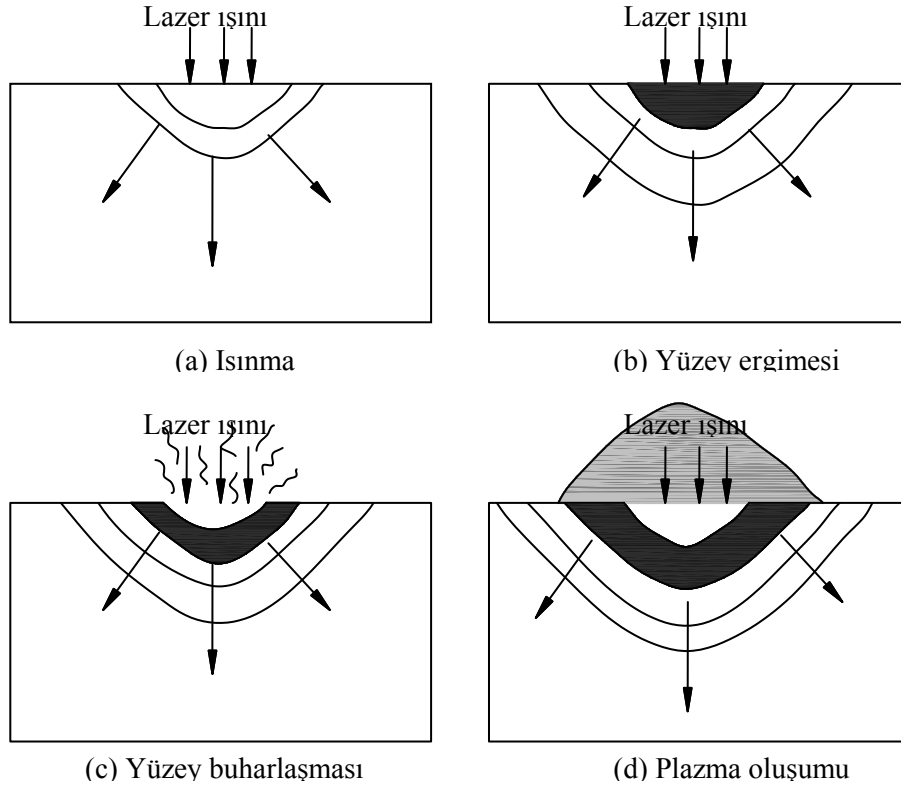
Tablo 4.1. CO₂ ve Nd: YAG lazer sistemlerinin karşılaştırılması

	CO ₂ Lazeri	Nd: YAG Lazeri
Dalga Boyu(μm)	10,6μm	1.06μm
Çalışma Şekli [CW (Sürekli), P (Darbeli)]	CW/P	CW/P
Maksimum Güç Pav (kW)	25	2
Darbe Gücü(kW)	10 kW’a Kadar	100 kW’a Kadar
Işın Kalitesi	Maksimum	Düşük
Verimlilik (%)	5-10	2-5
Kullanım Yerleri	Termik Prosesler Makro İşleme	Termik Prosesler Mikro İşleme

4.1.3. Lazer Işınıyla Kesmenin Prensibi

Lazer ünitesinden çıkan lazer ışını, bir yönlendirme sistemiyle işleme istasyonunda bulunan işleme başlığına gönderilir. Burada bir mercekle veya ayna sistemiyle işlenecek parçaya odaklanır. Endüstriyel lazerler için tipik bir güç olan 10^6 W/cm²’lik güç yoğunluğu altında, lazer ışınının odaklandığı noktada malzeme erir ve kısmen buharlaşma da görülür (Şekil 4.7.). Kesme yarığına giren odaklanmış elektromanyetik ışınım, kesme yüzeyinin normali ve ışın eksenini arasındaki açıya, malzeme yüzeyine ve kesme yarığının sıcaklığına bağlı olarak absorbe edilir, ısıyı absorbe edilmeyen kısmı yansır. Kesme yarığının orta ekseninde, malzeme kalınlığına ve kesme hızına bağlı olarak 20° ila 10° eğim oluşur. Kesme esnasında eriyen malzeme, kesme gazı tarafından hemen aşağıya doğru süpürülür. Bu sırada erimiş halde bulunan malzemenin lazer ışınının etki alanında kalmasından dolayı sıcaklıklar malzemenin erime sıcaklığının üzerine çıkar. Aşağıya doğru akma sonucu eriyen bölgenin kalınlığı artar. Kötü bir akma

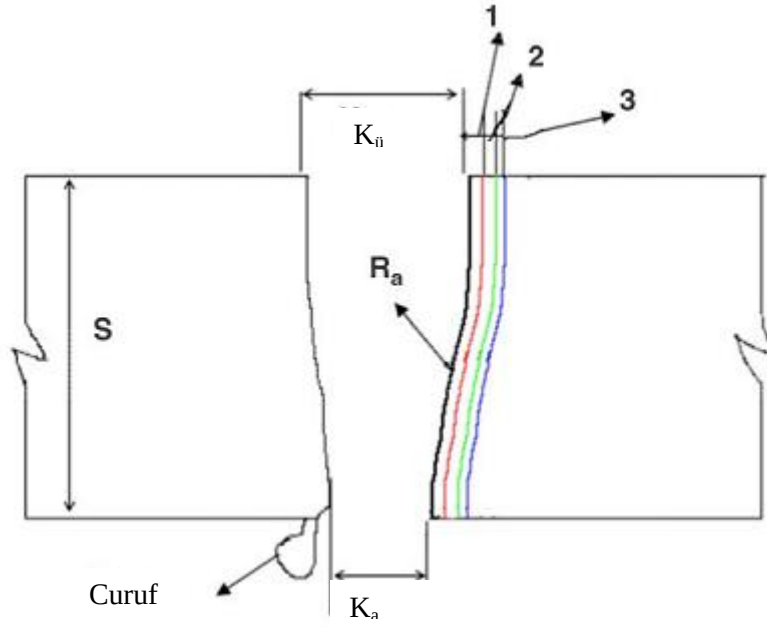
durumunda ise milimetrenin onda biri genişliğinde olan kesme yarığının tümünü doldurarak tıkanmaya yol açabilir. Kesme yarığının alt kenarında yüzey geriliminin etkisiyle damlacıklar oluşur. Bu damlacıklar, süpürme gazı tarafından ya tamamen uzaklaştırılır veya kesme yarığının alt kenarında katılaşır ve sakal denilen şekli oluşturur [104].



Şekil 4.7 Lazer ışını ve malzeme etkileşimi [106].

4.1.4. Lazer Kesme İşleminde Karakteristik Yapı

Lazerle kesim işleminde yapılan kesme işleminin kalitesi şekil 4.8’de gösterildiği gibi, geometri (kerf genişliği, delik çapı, kerf veya delik eğim açısı), yüzey kalitesi (prüzlülük, yüzey morfolojisi), metalurjik karakteristikler (yeniden katılaşmış tabaka, ısıdan etkilenen bölge) ve mekanik özellikler (sertlik, gerilim, vb.) gibi işleme performansını belirleyen karakteristikler üzerinde lazer gücü, tipi ve gaz basıncı, malzeme kalınlığı ve bileşeni, kesme hızı ve operasyon modu gibi işlem parametrelerinin etkili olduğu saptanmıştır.



K_g = Giriş kerf genişliği, K_a = Çıkış kerf genişliği
 R_a = Yüzey pürüzlülüğü, S = İş parçası kalınlığı
 1= Oksit tabakası, 2= Yeniden katılaştıran tabaka
 3= Isıdan etkilenen bölge

Şekil 4.8 Lazer kesme işleminde işleme performansını belirleyen karakteristiklerin şematik gösterimi [108].

4.1.4.1. Kerf Genişliği

Kesme genişliği; lazer ışınının parça üzerinde ısıtma suretiyle erittiği bölgenin, yardımcı gaz basıncı vasıtasıyla, basınç uygulayarak parça üzerinden dışarı atıldıktan sonra, kesim yapılan materyal üzerinde kalan boşluktaki iki yüzey arasındaki genişlik mesafesidir. Malzeme üzerinde kalan kesme boşluğu, hız ve güç ile alakalıdır. Hız ve gücün yanında yardımcı gaz basıncı, nozul mesafesi, odak noktasının da kesme boşluğuna etkileri vardır.

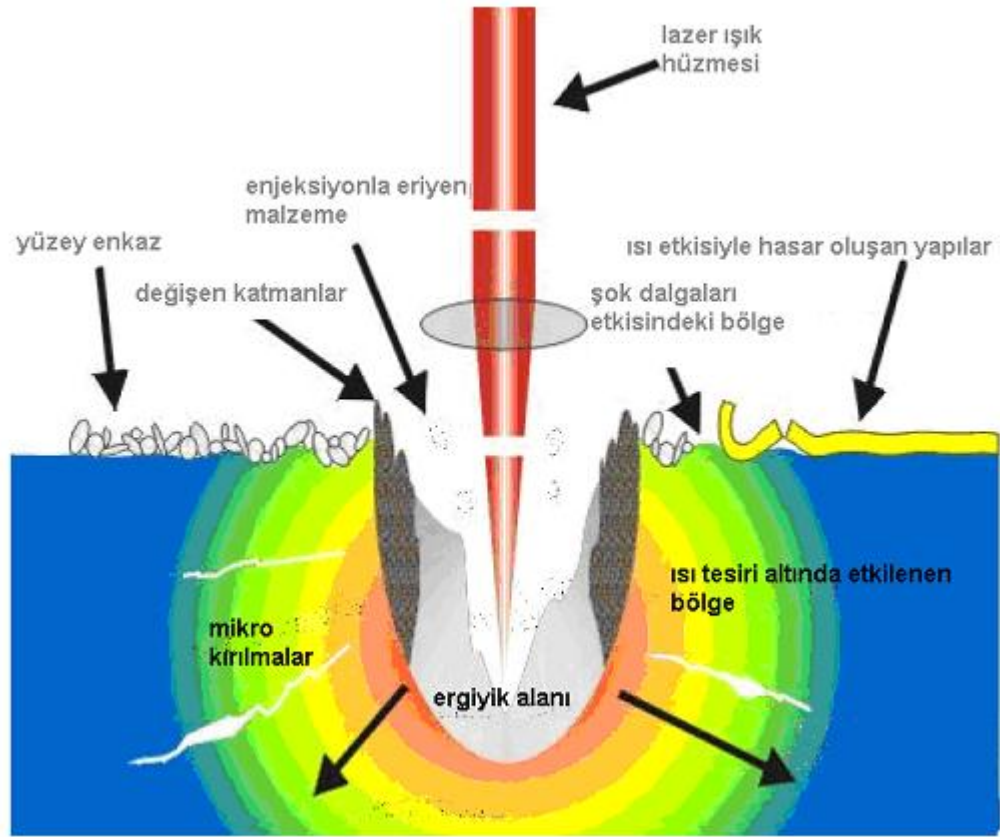
4.1.4.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Lazer kesim yüzeylerinde cüruf ve yüzey pürüzlülüğünün kalitesi, malzeme yapısıyla ve kesim işlemi esnasında seçilen lazer gücü, odak mesafesi ve yardımcı gaz basıncı gibi parametrelerin değişkenliği ile doğru orantılıdır. Lazer gücünü artırmak, erimiş malzemenin akıcılığını artırmak suretiyle, kesme boşluk bölgesinden dışarı atılmasını kolaylaştırır. Odak konum değişkenliği kesme yüzeyine yakınlığı ve uzaklığı cüruf yüksekliğini etkilemektedir. Ayarın uygun olarak yapılması cüruf yüksekliğini azaltmaktadır. Yardımcı gaz basıncının artması yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. Yardımcı gaz basıncının verimli olması cüruf yüksekliğini azaltmasına karşın, gaz basıncı

makine gücü ile alakalıdır. 2500W civarında makinelerde neredeyse cüruf bırakmaksızın kesim yapılabilir. 2500W civarında makinelerde neredeyse cüruf bırakmaksızın kesim yapılabilir.

4.1.4.3. Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ısı tesiri altında kalan bölge malzemenin mekanik özelliklerini azaltan bir yan etki görevi yapar. Isı tesirindeki bölgenin etkilerini azaltmak için seçilen parametrelerin uygun olarak seçilmesi çok önemlidir.



Şekil 4.9 Lazer kesim işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölgenin şematik gösterimi[101].

4.1.5. Lazer Kesme İşleminde İşlem Parametreleri

Lazer kesim kalitesi, bir malzemenin kesilmesi için sadece uygun lazer kaynağının seçilmesine bağlı değildir. Yapılan bir çok araştırmalar, çelik veya çelik dışı malzemelerin hem CO₂ hem de Nd:YAG lazer ile kesilmesinde aşağıdaki işlem parametrelerinin en etkin parametreler olduğunu saptamışlardır.

- Lazerin gücü
- Kesme hızı
- Yardımcı gaz basıncı

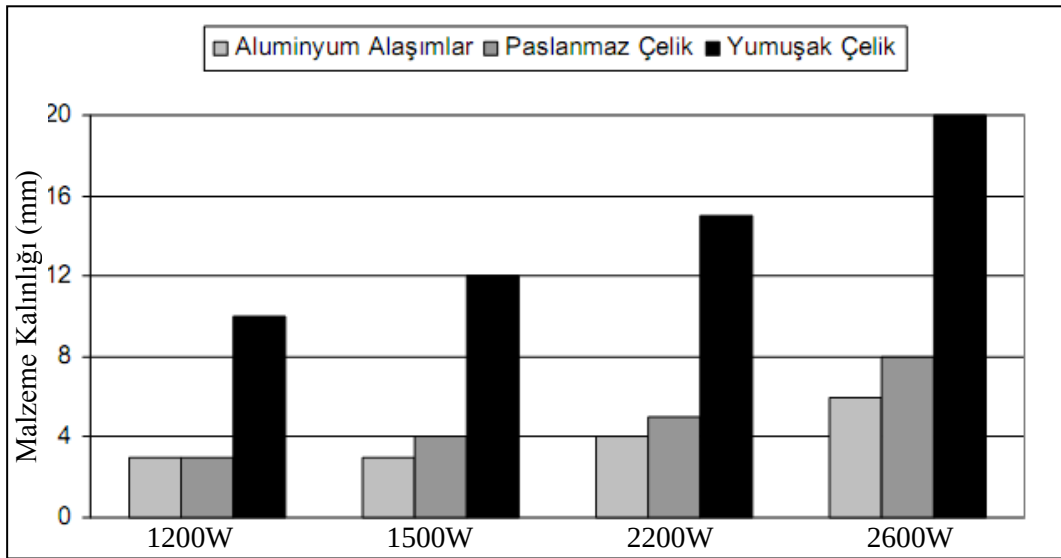
- Lazer ışınının frekansı

4.1.5.1. Lazer Gücü

Lazer ışının gücü önemli iki parametreye bağlı olarak ayarlanır. Bunlar;

- Malzeme Cinsi
- Malzeme Kalınlığı

Lazer ışınının gücü bu iki değişkene göre ayarlanmalıdır. Kesimi yapılacak malzemenin, maksimum kalınlıkta kesilebilmesi lazer çeşidine bağlıdır. Lazerin gücünün bilgisayar (otomasyon) ünitesi panelinden yüzde olarak ve Watt değerlerine göre ayarlanması mümkündür Şekil 4.10'da farklı lazer güçlerinde kesilebilecek bazı metalik malzeme kalınlıkları gösterilmiştir [105].



Şekil 4.10 Değişik çıkış gücündeki lazer kesme sistemlerinde (1200W, 1500W, 2200W ve 2600W) kesim yapılabilecek malzeme kalınlıkları [105].

4.1.5.2. Kesme Hızı

Kesim hızı malzeme kalınlığına ve malzeme çeşidine göre belirlenmelidir. Yüksek kesme hızı veya düşük kesme hızları malzemenin kesme bölgesinde ısınma, cürufkların fazlaşmasına ve pürüzlülüğe sebebiyet verebilir. Malzeme kalınlığıyla kesme hızı ters orantılıdır. Yani kalınlık azaldıkça hız artar, kalınlık arttıkça hız düşer [108].

4.1.5.3. Gaz Basıncı

Kesilecek olan malzemenin kalınlığına göre gaz basıncı ayarlanır. Temel olarak kalın malzemeler için gerekli gaz basıncı ince malzemelere göre daha düşüktür. Gaz basıncı çok dikkatli seçilmelidir, çünkü gaz basıncındaki küçük değişiklikler kesme kalitesini büyük oranda etkileyebilmektedir. Eğer basınç çok düşük seçilirse, eriyik haldeki malzeme kesilmiş yüzeyden uzaklaştırılmadan yapışıp kalacaktır, kalıcı çapak ve kapalı bir kerfin oluşmasına neden olacaktır. Eğer basınç çok yüksek seçilirse, kesme kenarının alt kısmında yanma ve uygunsuz bir kesmenin oluşmasına neden olacaktır [108].

4.1.5.4. Lazer Işınının Frekansı

Lazer frekansı güçte olduğu gibi yapılacak işleme göre uygun bir değerde seçilmelidir. Örneğin, dar ve küçük ölçekteki kesim bölgesinde vurum frekansının düşük olması gerekmektedir.

4.2. Plazma Arkı İle Kesme Yöntemi

4.2.1. Plazmanın Tanımı ve Çalışma Prensibi

Her madde gaz fazında bulunduğu türüne, özeliğine ve doğasına bağlı olarak değişen bir sıcaklığa kadar ısıtılınca, moleküllerindeki hareketlenme nedeni ile atomlar dış kabuk elektronlarını yitirerek pozitif yüklü iyonlar haline dönüşürler. Sıcaklık yükseldikçe, iyonlaşma derecesi yani iyonlanmış atomların toplam sayıya yüzde oranı artar, sıcaklık birkaç onbin derece gibi maddeye bağlı olarak değişen bir eşik değerden sonra ortamda yalnız pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlardan oluşmuş bir karışım bulunur. Elektriksel açıdan nötr ve yüklü parçacıklardan oluşması nedeni ile iletken olan bu karışıma plazma adı verilir.

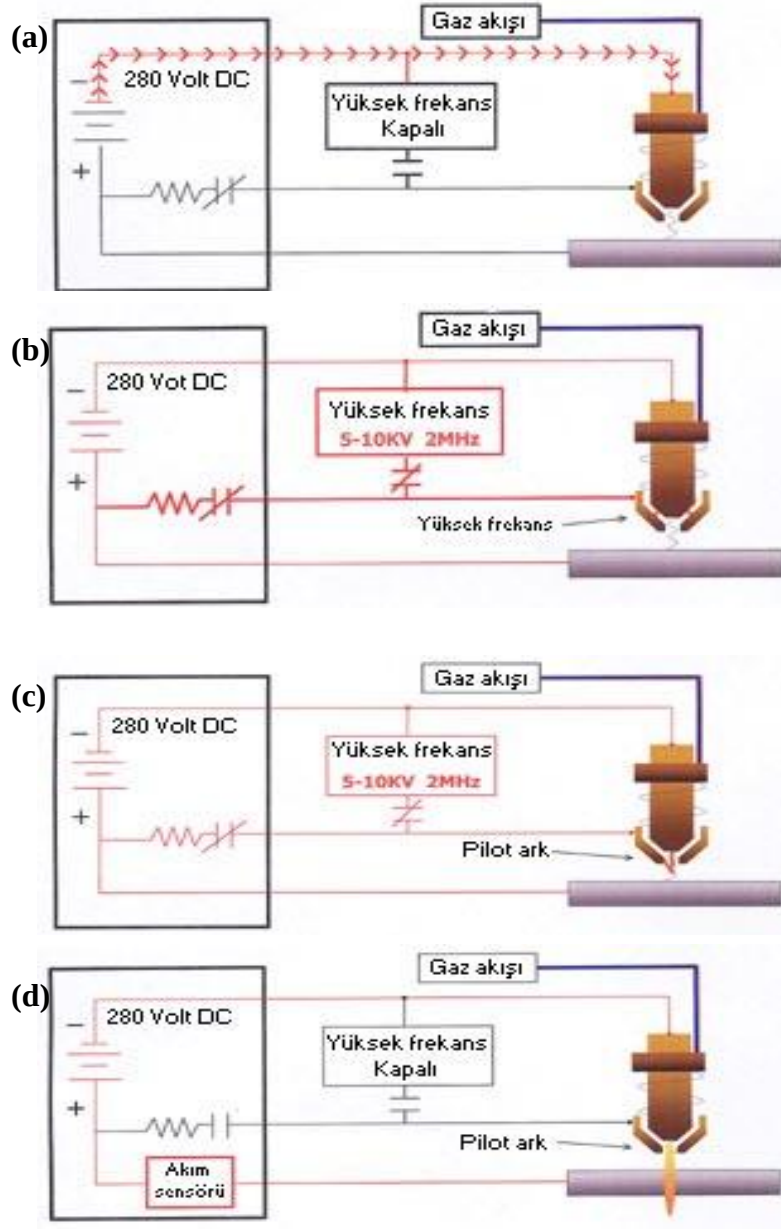
Evrende güneş, yıldızlar, kozmik ışınlar, yıldırım ve elektrik boşalmalarında görülen bu hal, özellikleri bakımından maddenin katı, sıvı ve gaz olarak bilinen üç halinin dışında kaldığından, maddenin sıcaklık ölçeğinde dördüncü hali olarak tanımlanır.

Bu tanımlamada açıklandığı gibi, her şiddetteki elektrik arkı plazma oluşturmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan plazma tanımlaması ile, çeşitli teknikler uygulayarak radyal doğrultuda sıkıştırılıp büzülerek enerji yoğunluğu dolayısı ile de sıcaklığı yükseltilmiş elektrik arkı olarak belirtilmektedir [109].

Plazma kesim işlemi elektriği ileten metalleri kesmek için kullanılır. Elektriği ileten plazma gazı, enerjiyi, elektrik kaynağından kesilen metale transfer eder. Bu, plazma kesim torcu üzerinde gerçekleşir. Plazma arkı kesim sistemi temel olarak bir güç kaynağı, bir ark başlatma ünitesi ve bir torçtan oluşur. Bu bileşenler, değişik metalleri yüksek hızda ve yüksek kalitede kesmek için gereken elektrik enerjisini, iyonlaştırma gücünü ve işlem kontrolünü sağlar. Güç kaynağı, sabit akım veren bir DC güç kaynağıdır. Açık devre gerilimi tipik olarak 240 - 400 VDC arasındadır. Güç kaynağının çıkış akımı (amperaj) sistemin hızını ve kesme kalınlığı kapasitesini belirler. Güç kaynağının temel görevi, iyonlaşmadan sonra plazma arkını korumak için doğru enerjiyi vermektir. Ark başlatma devresi, yaklaşık 2 megahertz'de 5,000 - 10,000 volt AC gerilim üreten bir yüksek frekans jeneratörüdür. Bu voltaj torcun içindeki gazı iyonlaştırmak yani plazmayı meydana getirmek için şiddetli bir ark oluşturur. Torç, sarf edilen meme ve elektrot için bir tutucu olarak çalışır ve bu parçalar için gaz veya suyla soğutma sağlar. Meme ve elektrot, plazma jetinin sürekliliğini ve yoğunlaşmasını sağlar.

Plazma arkı ile kesme işlemi Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, güç kaynağı ve ark başlatma devresi kablolar ve hortumlarla torca bağlıdır. Bu kablolar ve hortumlar, torca işlemi başlatmak ve sürdürmek için gerekli gaz akışını, elektrik akımını ve yüksek frekansı sağlar. Güç kaynağına gönderilen start sinyali açık devre gerilimini ve torca gaz akışını başlatır. Açık devre gerilimi elektrot (-) ve meme (+) arasında ölçülebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta; memenin bir direnç ve bir röle (pilot ark rölesi) üzerinden (+)'ya bağlı olması, kesilecek metalin (iş parçası) ise (+)'ya direk bağlı olmasıdır. Gaz memeden dışarı doğru akar. Bu sırada DC gerilim için akım yolu yoktur (Şekil 4.11-a-). Gaz akışı sabitlendikten sonra yüksek frekans devresi aktif olur. Yüksek frekans torcun içinde elektrot ve meme arasında bir ark oluşturur. Gaz memeden çıkmadan önce bu arkı geçmek zorundadır. Yüksek frekans arkından gaza geçen enerji gazın iyonlaşmasını ve elektriksel olarak iletken olmasını sağlar. Bu iletken gazın elektrot ve meme arasında bir akım yolu oluşturması sonucunda plazma arkı meydana gelir. Bu arkın gaz basıncıyla memenin ucundan dışarı çıkması pilot arkı oluşturur (Şekil 4.11-b-). İş parçasının memeye yakın durduğunu varsayarsak, memedeki elektrik direncinin daha yüksek olmasından dolayı akım pilot arkıdan iş parçasına doğru akacaktır. İş parçasına doğru akan akım, güç kaynağında elektronik olarak ölçülür. Bu akım ölçülünce yüksek frekans devresi devre dışı kalır ve pilot ark rölesi açılır. Gazın iyonlaşması oluşan DC arkın enerjisiyle sağlanır (Şekil

4.11-c-). Plazma arkının sıcaklığı metali eritir, iş parçasını deler ve yüksek hızlı gaz akışı erimiş malzemeyi kesim bölgesinden uzaklaştırır. Bu sırada torç hareket eder ve kesim işlemi başlar (Şekil 4.11-d-) [110].



Şekil 4.11 Plazma arkının oluşum aşamalarının şematik gösterimi [110].

4.2.2. Plazma Yapıcı Ortamlar

Plazma kesmenin kalitesi ve ekonomikliği üzerine en önemli etkiyi, kullanılan plazma yapıcı ortam yapar. Bu ortam, bir gaz, bir gaz karışımı ve özellikle hava ve su olabilir. Kesme yarığının oluşumunda, plazma gazının kimyasal özellikleri (oksitleyici, nötr veya redükleyici olması) büyük etki yapar. Bir plazma gazının seçiminde,

gazın atom veya molekül ağırlığı, özgül ağırlığı, ısı iletkenliği ve dissosiasyon ve iyonizasyon enerjileri etkili olur.

Argon

Diğer soygazlarla karşılaştırıldığında argon, havadaki % 0,9325'lik hacim yüzdesiyle en yüksek orana sahiptir. Bu nedenle maliyeti, diğer soy gazlara oranla daha düşüktür. Plazma kesme işlemindeki üstünlüğü olan kimyasal olarak nötr davranışı yanında, yüksek bir atom ağırlığına (39,95) sahip olması da diğer bir üstünlüğüdür. Plazma huzmesindeki yüksek impuls yoğunluğu, erimiş metalin kesme yarığında uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Yaklaşık 15.76 V' luk düşük iyonizasyon enerjisi ve iyi tutuşma özellikleri diğer üstünlükleridir.

Hidrojen

İki atomlu (diatomik) gazlarda ısı iletkenliğin maksimumu, dissosiasyon sıcaklık bölgesinde bulunur ve bir dissosiasyon-assosiasyon davranış sırası izler. Bu olay hidrojeninde özellikle daha yoğun olarak ortaya çıkar H_2 'nin dissosiasyonu 2000 $^{\circ}K$ 'de başlar ve 6000 $^{\circ}K$ 'de tamamlanır. Yaklaşık 25000 $^{\circ}K$ 'de atomik hidrojen tamamen iyonize olur. Hidrojenin bir gaz olarak bilinen fiziksel özellikleri, tek başına argon kadar plazma kesme işlemine uygun olmamasına yol açar. Ancak hidrojenin pozitif özellikleri (büyük enerji içeriği ve yüksek ısı iletkenliği) argonu'nun büyük atom ağırlığıyla birleştirilirse, hem yüksek kinetik enerjili ve hem de kesilecek malzemeye yeterli ısı enerjisi sağlayacak bir gaz karışımı elde edilir. Saf argon'a kıyasla yüzde birkaç hidrojen içeren karışım gaz kesme hızını arttırır ve kesme kalitesini iyileştirir. Ayrıca hidrojenin redükleyici etkisinden faydalanılır yani oksitsiz bir kesme yüzeyi elde edilir.

Azot

İlginç fiziksel özellikleriyle azot argon ile hidrojenin arasında yer alır. 14 olan atom ağırlığıyla, hidrojenin üzerinde ve argonun altındadır. Isı iletkenliği ve entalpisi hidrojeninkinden düşük argonunkinden yüksektir. Bu nedenle azot, prensip olarak tek başına bir plazma gazı oluşturabilir, ince cidarlı parçalar, plazma gazı olarak azotla, hızlı ve oksitsiz olarak kesilebilir. Azotun kesme gazları arasında ucuzluğu bir avantajken, izafi olarak daha fazla yiv oluşturması ise bir dezavantajdır. Ek olarak tam paralel kesme yarığı elde edilebilmektedir. Kesme yarığı açısı, her şeyden önce gaz debisine ve kesme hızına bağlıdır. Kalın parçaların kesilmesinde ve uygun yükseklikte güç çevriminde, duman oluşumu önemli oranda artar. Azot-argon karışımları, argon a göre daha yüksek kesme hızları sağlar. Azot-hidrojen karışımları, paralel ve negatif

açılı kesme yarığı oluşturur. Argon, azot ve hidrojen bileşimi ise, yüksek kesme gücünde kaliteli kesme işlemi sağlar. Azot içeren gazlarla yapılan kesme işlemlerinde, zararlı bir gaz olan azot oksit oluşumuna dikkat edilmelidir.

Hava

Hava esas olarak azot (hacimce % 78.8) ve oksijen'den (hacimce % 20.8) oluşur. Bu eşit entalpili ve her ikisi de diatomik gazlar, yüksek enerjili bir gaz karışımı oluşturur. Kuru ve yağsız basınçlı hava ile yapılan plazma kesme, altmışlı yılların başlarında ortaya çıkmıştır. Havanın argona göre önemli o-anda ucuz oluşu, plazma yöntemlerini ilk olarak alaşımsız çeliklerin kesilmesinde ilginç kılmıştır. Yapı çeliklerinin kesilmesinde, yüksek kesme hızlarına ve iyi kaliteye aynı anda ulaşılmış olur; kesme yarığının ait kenarında sarkma oluşmaz Son olarak, havanın oksijeni, eriyen malzemenin yüzey gerilimini ve viskozitesini etkilediğinden, eriyen parçacıklar parça alt kenarına yapışmazlar. 5-10 mm' lik saç kalınlığı bölgesinde, birkaç kat daha yüksek kesme hızlarına ulaşılabilir. Mevcut sıcaklıklar, oksijenin varlığına rağmen stabil oksit oluşumu için çok yüksek olduğundan, alevle kesme işlemindeki gibi bir yanma olayı meydana gelmez.

Demirin oksidasyon sınırı, 2200 °C civarındadır. Ancak bütün bunlar, hava'nın plazma yapıcı ortam olarak hiç dezavantaj taşımadığı anlamına gelmez. Hava ile plazma kesme işlemindeki gürültü oluşumu izafi olarak çok daha yüksektir; bu gazların kesme ağzından emilmesi ve mümkün olduğu kadar filtrasyondan geçirilmesi gerekir. Ayrıca cihazın filtre sisteminin, tüm azot oksitleri arıtıp arıtmadığı kontrol edilmelidir. Çoğu emme ve filtre sistemi, bu gazları ya çok az arıtır ya da hiç arıtmaz. Hava gibi oksijenli gazlarla kesmede, sadece alışılmış saf tungsten elektrotlar kullanılamamaktadır. Bu nedenle altmışlı yıllarda tungsten elektrotun alt kısmında, bakır memenin daraldığı bölgede azot-plazma demetinde hava ve oksijen gibi reaktif gazların kullanıldığı plazma torcu geliştirilmiştir. Bu tür torçlar tungsten elektrotun dayanma süresinde bir eksilme elmadan, oksijenin avantajlarından yararlanılmasını sağlamıştır. Bu torçların dezavantajı ise, saç üst yüzeyinde kesme yarığının hafifçe yuvarlaklaşması ve kesme yarığının tam paralel olmamasıdır. Bu çalışma tekniği, sekonder gazlı plazma tekniği olarak bilinir ve çok az kullanım alanı bulmuştur. Yapı çelikleri plazma gazı olarak oksijenle kesilir; bu şekilde biraz pürüzlü kesme yüzeyleri elde edilmektedir. Bunun dışında yüzeyler, metalik parlaklıkta ve sarkıntısız (sakalsız) oluşmaktadır. Kesme memesinin dayanım süresi, diğer gazların kullanımındaki

sürelerle kıyasla oldukça kısadır. Genellikle zirkonyum ve hafniyumla alaşımlandırılmış düz bakır elektrotlar kullanılmaktadır. Küçük cihazlarda gitgide artan oranda plazma gazı olarak basınçlı hava kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda gaz maliyetinden sağlanan tasarrufa kıyasla elektrot maliyeti daha da düşüktür; çünkü ömrü sadece birkaç saat olan ucuz elektrotlar kullanılmaktadır.

Su

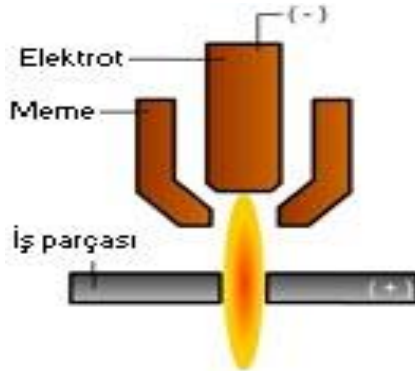
Yüksek sıcaklık bölgesinde, yeterli enerji girdisiyle dissosiyasyon ve aynı zamanda iyonize olabilen su, kendisini oluşturan hidrojen ve oksijene ayrışır. Bu tip birleşik plazmada, daha önceki bölümlerde oksijen ve hidrojen için belirtilen özelliklerin birleşimi avantajı elde edilebilmektedir. Ancak pratikte su, plazma yapıcı ortam olarak tek başına kullanılmaz. Pratikte plazma gazı olarak azotla yapılan kesme işleminde, eşzamanlı olarak plazma torcuna su da sevk edilir. "Su enjeksiyonlu" sistemin üstünlüğü, aşağıdaki bölümde ele alınmıştır [104].

4.2.3. Endüstriyel Alanda Kullanılan Plazma Ark Sistemleri

Günümüzde plazma kesme işlemlerinin büyük çoğunluğunda, parça ile erimeyen elektrot arasında; bir meme içerisinde ark oluşturulur. Farklılıklar kullanılan elektrotun tür ve şekline plazma gazının türünde ve su-enjeksiyonlu plazma kesmede ark huzmesine teğet olarak su iletilmesidir.

4.2.3.1. Geleneksel Plazma Kesim

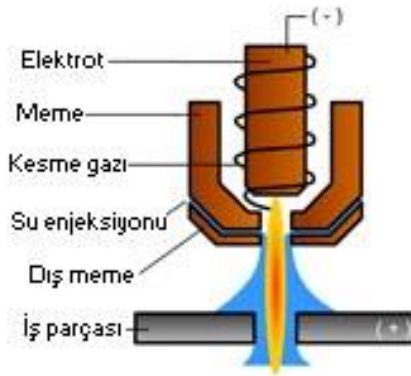
Sistem 1957 yılında Linde Division tarafından geliştirilmiştir. Bu sistem de torcu soğutmak ve plazmayı oluşturmak için tek bir gaz (genellikle hava veya nitrojen) kullanır (Şekil 4.12). Bu sistemlerin çoğu 100 Amperden düşük akımlarda çalışır ve 15 mm'ye kadar malzemelerin kesiminde kullanır. En çok elle yapılan uygulamalarda kullanır [111].



Şekil 4.12 Geleneksel plazma kesim sisteminin şematik gösterimi [110].

4.2.3.4. Su Enjeksiyonlu Plazma Kesim

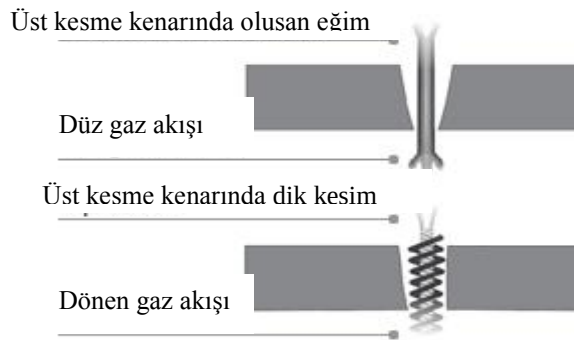
Su korumalı plazma kesimden farkı, plazma arkına enjekte edilen suyun arkın yoğunluğunu ve sıcaklığını büyük ölçüde artırmasıdır (Şekil 4.15). 260 amperden 750 ampere kadar değişik çeşitlerde ve kalınlıklarda malzemelerin yüksek kalitede kesiminde kullanılır. Su enjeksiyonlu plazma kesim prosesinde, su uniform bir şekilde arkın içine radyal enjekte edilir. Suyun arka radyal çarpması bakır nozılın iyi derecede soğutulmasını ve arkın daha da daralmasını sağlamış olur. Böylelikle kesme kalitesi yükseltilmiş, kesme hızı arttırılmış ve çapak oluşumu engellenmiş olur.



Şekil 4.15 Su enjeksiyonlu plazma kesim sisteminin şematik gösterimi [110].

4.2.3.5. Hassas Plazma Kesim

Bu teknolojinin özelliği yüksek enerji yoğunluğunda daha ufak çaplı, konsantre ve kararlı bir plazma arkı elde edilmesidir. Daha konsantre bir ark, kesme yüzeyindeki diklik toleranslarında ve pürüzlülük değerlerinde iyileşme ile sonuçlanır (Şekil 4.16). Dar çaplı ve yoğun enerjili plazma nedeni ile daha dar ve düzgün kesme ağızları elde edilir ve kesim sürati artar ki bu da kalitenin ve verimliliğin artması demektir [110].



Şekil 4.16 Düz ve dönen gaz plazma kesim sistemiyle yapılan kesimlerde meydana gelen kerf eğimlerinin şematik gösterimi [108].

Bu teknolojinin ayırt edici özelliği bilinen girdap şeklinde gaz akışına ek olarak mıknatıslama ile yaratılan Lorentz kuvvetleri ile, manyetik alan oluşumu ile, plazma arkını kararlı halde ve konsantre halde tutmasıdır. Bu manyetik kuvvetler plazma arkına iki şekilde etki eder. Birinci olarak plazma arkının kendisine etki eden Lorentz kuvvetleri arkın elektrot kısmından çıkışında kendi eksenini etrafında daha hızlı dönmesine olanak sağlar (Şekil 4.17). İkinci olarak ta etki eden manyetik alan dönerek inen plazma arkını hapsederek sürekli konsantre ve yoğun bir ark sağlar. Ayrıca nozul çıkışında da bu etki devam ettiği için çift ark tehlikesi de yalıtılmış bir dış kap kullanılmadan önlenir [112].



Şekil 4.17 Dönen gaz plazma kesim sisteminin şematik gösterimi [108].

4.2.4. Plazma Kesme İşleminde İşlem Parametreleri

Plazma ile kesmede önemli parametreler gaz parametreleri (basınç ve saflık), güç kaynağı parametreleri (voltaj ve amper) ve kesme hızıdır. Parametreler arasındaki ilişkiler kesmede elde edilecek kaliteyi tanımlar.

4.2.4.1. Gaz Parametreleri

Plazma kesmede gaz parametreleri, taşıyıcı (plazma) ve koruyucu gazın basıncı ve gazların karışım oranıdır. Plazma gazının basıncının artışı arkın kararlılığını etkileyen faktörlerden birisidir. Arkın yoğunluğunu artırır. Artan momentum nedeni ile eriyen malzemenin kesme bölgesinden püskürtülmesini kolaylaştırır.

4.2.4.2. Amper

Akım şiddeti, 'I', plazma sisteminin gücünü belirler. Malzemeye transfer edilen birim zamandaki enerji daha yüksek olduğundan aynı kalınlıktaki malzeme için kesme hızı akım şiddeti değeri ile artar. Değer yükseldikçe kesilebilecek malzeme kalınlığı da artar. Kesme hızının sabit kalması durumunda artan amper değeriyle kerf genişliği de artar.

Düşük amper değerlerinde malzeme kalınlığına bağlı olarak daha dar ve daha dik bir kerf elde edilir [108].

4.2.4.3. Kesme Hızı

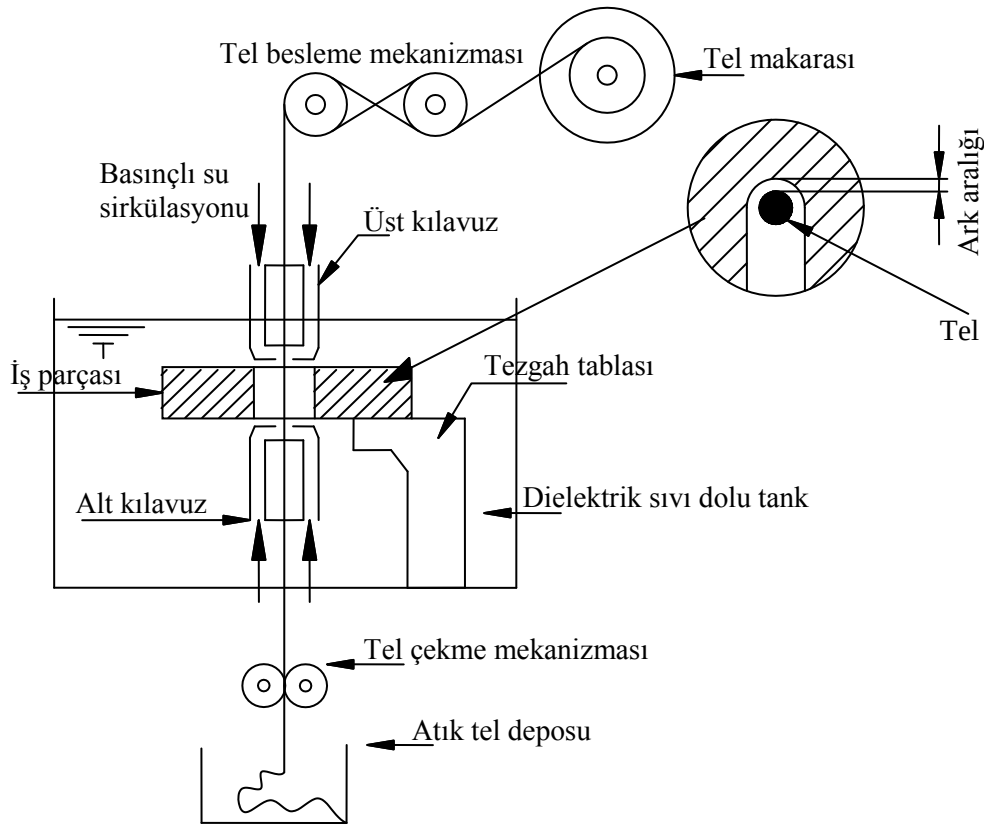
Kesme hızı, kesme sonrası metalin kesme yüzeylerinin kalitesini etkileyen parametrelerden biridir. Tavsiye edilen değerden yavaş hızlarda plazma arkı ergittiği bölgeden hemen uzaklaşmadığı için kerf aralığı değeri artar. Bu geriye doğru eğimli kesme çizgileri oluşturur. Daha yüksek hızlarda plazma arkı malzemeyi tüm kalınlık boyunca ergittiği fakat püskürtme işlemi tamamlanmadan torç hızla ilerlediği için alt kısımlarda malzeme tekrar katılaşarak yarığı doldurur ya da kalın çapak oluşumu gözlenir [112].

4.3. Tel Erozyon İle Kesme Yöntemi

4.3.1. Elektro Erozyonun Tanımı ve Çalışma Prensipleri

Tel erozyonla işleme, tel elektrot ve iş parçası arasındaki boşalıklar veya elektrik kıvılcıklarının rasgele dağılması sonucu dielektrik sıvı içerisine daldırılmış iletken malzemeden talaş kaldıran termal bir aşındırma yöntemidir. Tel erozyon, elektro erozyonla (EDM) işlemenin özel bir şeklidir. Elektro erozyonla işleme ile tel erozyonla işlemenin talaş kaldırma mekanizmaları benzerlik gösterse de, işlevsel karakteristikleri aynı değildir. Tel erozyon tezgahı, bir mikro işlemci tarafından ve iş parçası içinde kesintisiz olarak gezinen ince bir tel elektrot kullanılır. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi bu yöntemde, di elektrik sıvı içindeki tel elektrot ve iş parçası arasında fiziksel temas olmaksızın işleme prosesi boyunca tel, iş parçasını ardışık kıvılcıklarla aşındırmak suretiyle üretilecek parçaya istenilen boyutsal özellikleri kazandırır. Tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım boşluğu 0,025-0,05 mm arasında değişmektedir. Bu mevcut değerlerin bir bilgisayar kontrollü konum izleme sistemi vasıtasıyla sabit kalması sağlanmaktadır [113].

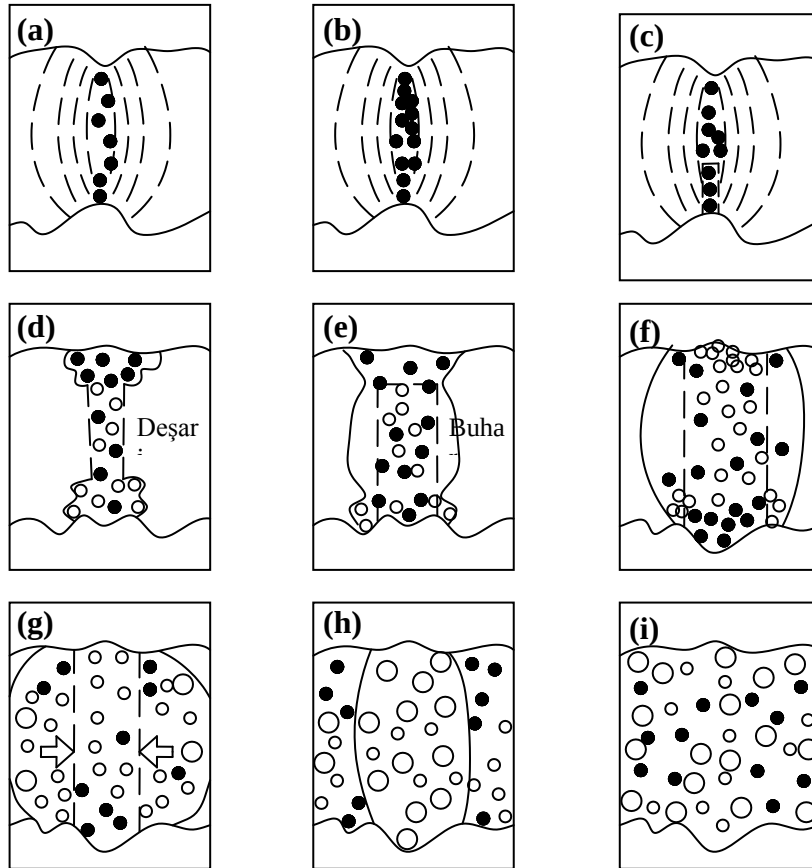
Tel elektro erozyondaki talaş kaldırmanın mekanizması, doğru akım vurumlu bir güç kaynağı vasıtasıyla oluşan elektrik kıvılcıklarından oluşan erozyonu içine alır. Kıvılcıklar, dielektrik sıvının etkisi altında birbirine yakın yerleştirilen iki elektrot arasında oluşacaktır.



Şekil 4.18 Tel elektro erozyon ile kesim sisteminin şematik gösterimi [114].

Güç kaynağı tarafından iki elektrotun neden olduğu şarj, güçlü bir elektrik alanı oluşturur. Bu elektrik alanı elektrotların birbirine en yakın olduğu yerde en güçlüdür (Şekil 4.19.a). Negatif yüklü partiküller negatif polariteli telden fırlatılır (Şekil 4.19.b). Bunlar malzeme üzerinde bir köprü oluşturur. Elektrot takımından fırlatılan negatif yüklü parçacıklar (elektronlar) aralıkta bulunan dielektrikteki nötr parçacıklarla çarpışır ve yeni pozitif ve negatif yüklü parçacıklar oluşur. Bu yüklü parçacıkların oluşumu sırasında dielektrik sıvının izolasyonu bozulur. Deşarjın ilk safhasını oluşturan akım akmaya başlar (Şekil 4.19.c). Dielektrik sıvının molekül ve iyonları iki ayrı noktada toplanır (kutuplaşır) ve bu iki uç arasında dar ve düşük dirençli bir kanal şeklinde yönlendirilir. Akımın esas akışına bir yol açar. Patlatma hızında negatif ve pozitif parçacık oluşumu devam eder ve pozitif parçacıklar negatif elektroda, negatif parçacıklar pozitif iş parçasına doğru taşınmaya başlar. İş parçasına çarpan negatif parçacıkların etkisiyle küçük bir alanı erimeye başlar (Şekil 4.19.d). Deşarj tüneli yanlamasına genişlemeye başlar ve akım akışı maksimuma ulaşır. Sıcaklık yükselirken bir buhar bölgesi oluşur ve bu buhar bölgesi içerisinde basınç yükselmesi olur. Dielektriğin buharlaşması nedeniyle, plazma kanalındaki basınç 20 atm gibi yüksek bir değere hızla ulaşır (Şekil 4.19.e). Akımın yüksek yoğunluğu

güçlü bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan iyonlaşmış kanalı sıkıştırır ve yerel ısıtma ile sonuçlanır. Buradaki sıcaklık yaklaşık olarak 8000 ila 12000 °C arasındadır. Buharlaşma hızlı bir biçimde genişlemeye devam eder (Şekil 4.19.f). Voltaj pulsunun sonunda, voltaj kesildiği zaman, basınçta birdenbire düşer ve süper ısıtılmış metal patlama şeklinde buharlaşır. İş parçası yüzeyinde daha büyük bir krater ve elektrot yüzeyinde daha küçük bir krater oluşur. Yüklü parçacıkların sayısında ani bir düşme olur. Deşarj kanalı yok olur ve işleme sonucu oluşan parçacıklar dielektrik sıvı içerisine karışır. Dielektrik sıvı kıvılcım aralığında talaşların birikmesini önlemek için sürekli püskürtülür (Şekil 4.19.g). Buhar tüneli söner ve malzeme çifti yüzeyleri hızla soğur (Şekil 4.19.h). Yeni bir elektriksel kıvılcım deşarjı üretmek için yeniden elektrik uygulamadan önce dielektrikteki iyonların tamamen yok olması için zaman tanınır (Şekil 4.19.i) [115].



Şekil 4.19 Tel elektro erozyonda deşarj işleminin safhaları [115].

4.3.2. Tel Erozyon İle Kesme İşleminde İşlem Parametreleri

4.3.2.1. Vurum Süresi (T_{on})

Tel erozyon yönteminde talaş kaldırma süreci vurum süresinde gerçekleşmektedir ve birimi mikro saniyedir. Bu safhada kıvılcım aralığı kurulmakta, akım oluşturulmakta ve

iş yapılmaktadır. Talaş kaldırma oranı vurum on süresi içinde uygulanan enerji miktarıyla direk orantılıdır. Bu enerji amper ve vurum süresinin uzunluğu ile kontrol edilmektedir. Bu yüzden, daha yüksek bir aralıkta vurum süresini ayarlamak daha büyük enerji üretimine sebep olmaktadır.

Vurum süresinin artmasıyla, iş parçasından daha fazla malzeme ergitilecektir. Ancak, bu da daha geniş ve derin kraterlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu geniş ve derin krater yapısıyla işlenmiş malzeme yüzeyinin daha pürüzlü olmasına neden olacaktır. Bunun yanı sıra geniş vurum süresi iş parçasının daha fazla ısı etkisi altında kalmasına neden olacak bunun sonucunda da iş parçasında yeniden katılaşan tabakanın daha geniş ve ısıdan etkilenen bölgenin daha derin olmasına neden olacaktır [116].

4.3.2.2. Vurum Ara Süresi (T_{off})

Kıvılcımın şarj zamanını ayarlayan parametredir. Elektrotlar arasında voltajın uygulanmadığı süre olarak da dikkate alınan bu parametre işleme üzerinde birinci derecede etkiye sahip olmaktadır [26].

Vurum ara süresi esnasında, iş parçasından koparılan parçacıklar kesme aralığının dışına püskürtüldüğünden, önemli bir parametredir. Vurum ara süresi işlem esnasında iyi kontrol edilmeyecek olursa, kesme kanalında birikecek olan parçacıklarla tel temas edecek ve kısa devre oluşarak telin kırılmasına sebep olacaktır. Artan vurum ara süresi, genellikle daha yavaş kesme, artan süreklilik ve daha az tel kırılması demektir. Genellikle vurum süresi ve vurum ara süresi yaptıkları etkilerden dolayı bir arada göz önüne alınır. Vurum ara süresi, vurum süresinden daha düşük olmalıdır.

4.3.2.3. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)

WEDM’ de kullanılacak gücün miktarını kontrol eden, birimi Amper olan işleme esnasında önem arz eden parametredir. WEDM uygulamalarında, akım değeri kesme yüzeyinin kalitesiyle ilişkilidir. Akım değerinin yüksek olması malzeme yüzeyinin daha pürüzlü ve kesme kanalının daha geniş olmasına neden olmaktadır. Yüksek akım değeri talaş kaldırma oranını arttırmaktadır, fakat yüzey kalitesini düşürmekte ve aşırı tel aşınmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar da tel erozyon operasyonları işleme performansı açısından büyük önem arz etmektedir [117].

4.3.2.4. Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)

Ana güç kaynağı voltajı (V) tele güç ekleyen bir faktördür. Ana güç kaynağı maksimum akım (IP) parametresi ile birlikte deşarj vurum enerjisini ayarlar. Tel için gerçek güç, ince ayarlamamanın bir yolu olarak vurum süresi ve kaba bir ayarlama için de voltajı düşünebiliriz. Voltaj aynı zamanda iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları için daha yüksek bir voltaj değeri, ince parçalar için daha düşük bir voltaj değeri kullanılması tavsiye edilmektedir [118].

4.3.2.5. Aralık Voltajı (SV)

SV servo voltaj anlamına gelir. Bu parametre tel ve iş parçası arasındaki aralık voltajını ayarlar. Düşürülen bu değer iş parçası kesme alanında daha düşük bir kanal meydana getirir, fakat bu parametre değerinin aşırı düşük olması kesmeyi kararsız hale getirir, çünkü kesme esnasında kopan parçacıklar kesme kanalının darlığı nedeniyle kanal içerisinde kalarak kısa devre oluşmasına neden olacaktır. Aynı zamanda bu parametre kesme performansını ve parçada meydana gelecek aşırı yanmayı kontrol eder.

4.3.2.6. Tel Gerilmesi (WT)

Kesme operasyonunun başlayabilmesi için, tel elektrot, iş parçası üzerindeki başlama deliğinden geçirilerek diğer makaraya sarılmakta ve tele gerginlik verilmektedir . Parametre aralığı 380-2200 gr arasında değişmektedir. WT otomatik bir tel çekici ile donatılan makinelerde tel gerilmesini ayarlar . Tel gerginliği, parça yüzey hassasiyeti ve düzgünlüğü büyük ölçüde etkilemektedir. Yüksek kesim hassasiyeti istendiğinde, tel gerginliği kopma seviyesinin altında kalmak şartıyla mümkün olduğu kadar arttırılmaktadır[119].

4.3.2.7. Tel İlerleme Hızı (WS)

Tel ilerleme hızının malzeme kalınlığına göre ayarlanması gerekmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça, tel kırılmasının önlenmesi ve tel düzgünlüğünün sağlanabilmesi için tel hızının artırılması gerekmektedir, tel hızının azalması iş parçasının kesme yüzeyinde konikliğin oluşmasına ve telin kopmasına neden olmaktadır [61].

4.3.2.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)

Bu parametre, verilen seviyede tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım deşarj aralığı sabit kalacak şekilde servo kumanda ile tablanın hareketinin hızına kumanda etmektedir. Tezgahın güç ünitesinin, işleme voltajının ayarlanan değer arasında kalacak şekilde parametreler ayarlandığında, en verimli işleme şartlarını sağlayacak şekilde tabla ilerleme hızını kontrol altında tutmaktadır.

4.3.2.9. Dielektrik Sıvısı Sirkülasyon Basıncı

Kesme anında, iş parçasından dökülen kırıntı ve katı metal partiküllerinin kıvılcım boşluğu boyunca hızlı bir şekilde akmasını sağlamak için kullanılan dielektrik sıvısına bir basınç vermek zorunludur. Bu basıncın bir amacı da teli soğutmak olduğu için ve tel boyunca uygulandığından dolayı olası bir titreşimin oluşmaması için basıncın uygun ayarlanması gerekir [118].

5. MATERYAL VE METOD

5.1. Çalışmanın Amacı

Termal işleme yöntemlerinin uygulama alanları günümüzde giderek artmaktadır. Buna karşın, bu yöntemlerle işlenmiş yüzey ve yüzey altı bölgelerdeki metalurjik değişimler, işlenen ürünün yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu yüzden, uygun işleme parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan makine elemanlarının yorulma, sürünme ve diğer sıcaklık etkisi altında oluşan hasarlara karşı mukavemetleri, işleme yöntemleri ile doğrudan ilişkilidir. Termal işleme yöntemlerinde, aşırı elektrik ve ısı enerjilerinden dolayı malzemenin yüzeyinde plastik deformasyon, mikro ve makro çatlaklar, rekristalizasyon, sertlik değişimi, faz dönüşümleri ve artık gerilmeler gibi birçok değişimler ortaya çıkarmaktadır.

Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımlar, sahip oldukları yüksek mukavemet, düşük termal iletkenlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerinden dolayı başta havacılık ve uzay sanayisi olmak üzere birçok yaygın kullanım alanına sahiptirler. Bu alaşımların uygulama alanları da dikkate alındığında, yüksek yüzey tamlığı ve kalitelerinde işlenmeleri gerekmektedir. Klasik işleme yöntemlerinde karşılaşılan problemler, alaşımın işlenebilirliğini sınırlamaktadır. Bu yüzden termal işleme yöntemleri, bu alaşımın daha ekonomik bir şekilde işlenebilirliğine olanak tanımaktadır. Bu gerekçelerden yola çıkarak, bu çalışmada, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşımı, Lazer ışını ile işleme (LBM), Plazma arkı ile kesme (PAC) ve tel erozyonu ile işleme (WEDM) olmak üzere toplam 3 farklı termal yöntem ile işlenmiş ve her bir işleme yönteminde kullanılan parametrelerin işleme kalitesi üzerindeki etkileri deneysel ve bilgisayar programı yardımıyla incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen verilerin, akademik ve sanayideki uygulamalara yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

5.2. Deney malzemesi ve numunelerin hazırlanması

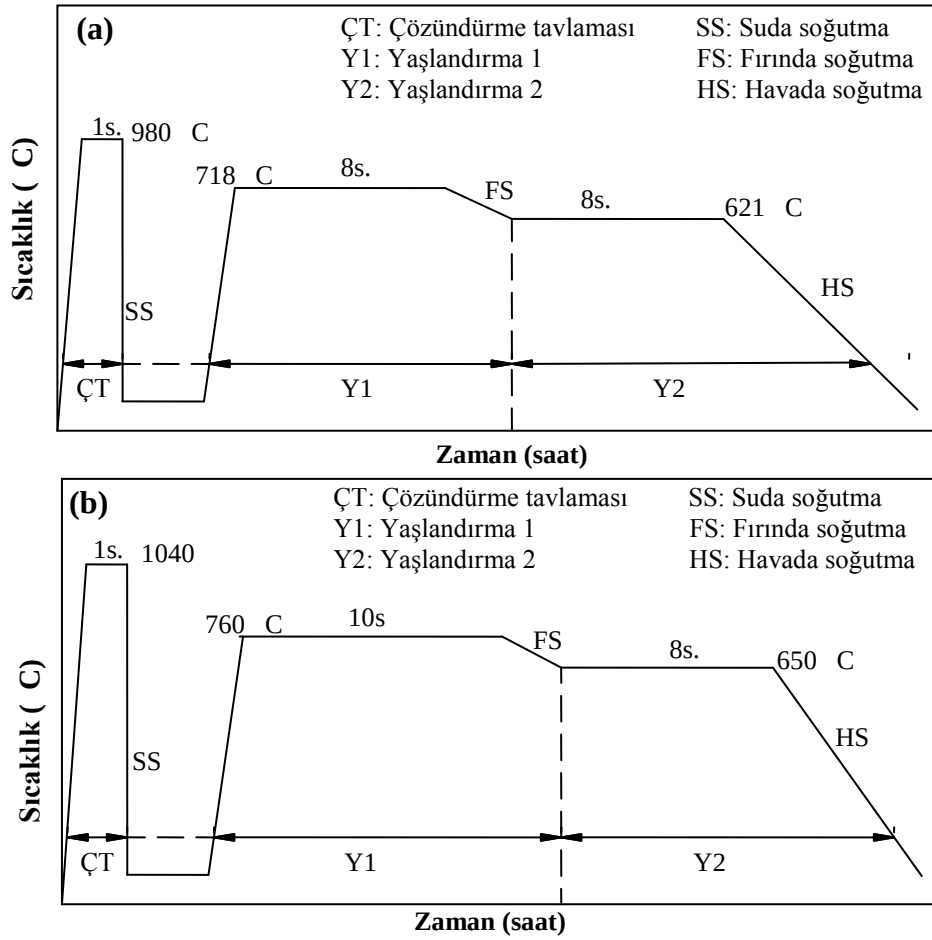
Bu çalışmada, AMS 5596 standart numaralı, Inconel 718 nikel alaşımı kullanılmıştır. Bu malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 5.1.' de verilmiştir.

Tablo 5.1. Inconel 718 nikel alaşımlarının kimyasal bileşimi(%)

Al	B	C	Nb	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni
0.44	0.003	0.052	5.07	0.09	18.20	0.08	BAL.	0.24	3.04	53.60
P	S	Si	Cb+Nb	Ti	Ta					
<0.005	<0.002	0.10	5.06	0.97	<0.05					

Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığında sahip olduğu mekanik özellikler, yaşlandırma ısı işlemi ile önemli derecede artırılabilir. Bunun için, ostenitik matris içerisinde önce γ' ($\text{Ni}_3(\text{AlTi})$) ve γ'' (Ni_3Nb) fazları çözündürülmekte, daha sonra yaşlandırma ısı işlemi uygulanarak sertleştirme sağlanmaktadır. γ' ve γ'' fazları malzemenin sertliğini, δ fazı ise tokluğu arttırmaktadır. Bu çalışmada iki farklı ısı işlemi uygulanmıştır. Bu ısı işlemleri için çözündürme ve yaşlandırma sıcaklıkları ve bekleme süreleri aşağıda özetlenmiştir

- 1. ısı işlem: Numuneler öncelikle, 980 °C sıcaklıkta bir saat bekletilerek yapı içerisindeki tüm fazların matris içerisinde çözündürülmesi sağlanmıştır. Ardından suda ani soğutulmuş aşırı doymuş katı çözeltisi elde edilmiştir. Aşırı doymuş katı çözeltiyi kararlı hale getirebilmek için numuneler 718 °C sıcaklığa tekrar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 8 saat bekletilerek fırın içerisinde 50°C/saat soğuma hızında 621 °C'ye soğutulmuştur. Bu sıcaklıkta 8 saat bekletilerek havada soğumaya alınmıştır. Böylece 18 saatlik yaşlandırma süresi ile yapı içerisinde karbürlerin ve ikincil fazların çökelmeleri sağlanmıştır.
- 2. ısı işlem: Numuneler, 1040 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilip ardından suda ani soğutulmuştur. Daha sonra, yaşlandırma işlemi için 760 °C sıcaklıkta 10 saat bekletilerek 650 °C' ye fırında soğutulup (55 °/saat) bu sıcaklıkta 8 saat bekletilmiştir. 20 saat yaşlandırma süresi sonunda havada soğumaya bırakılmıştır. Şekil 5.1' de numunelere uygulanan ısı işlemleri şematik olarak verilmiştir[120].



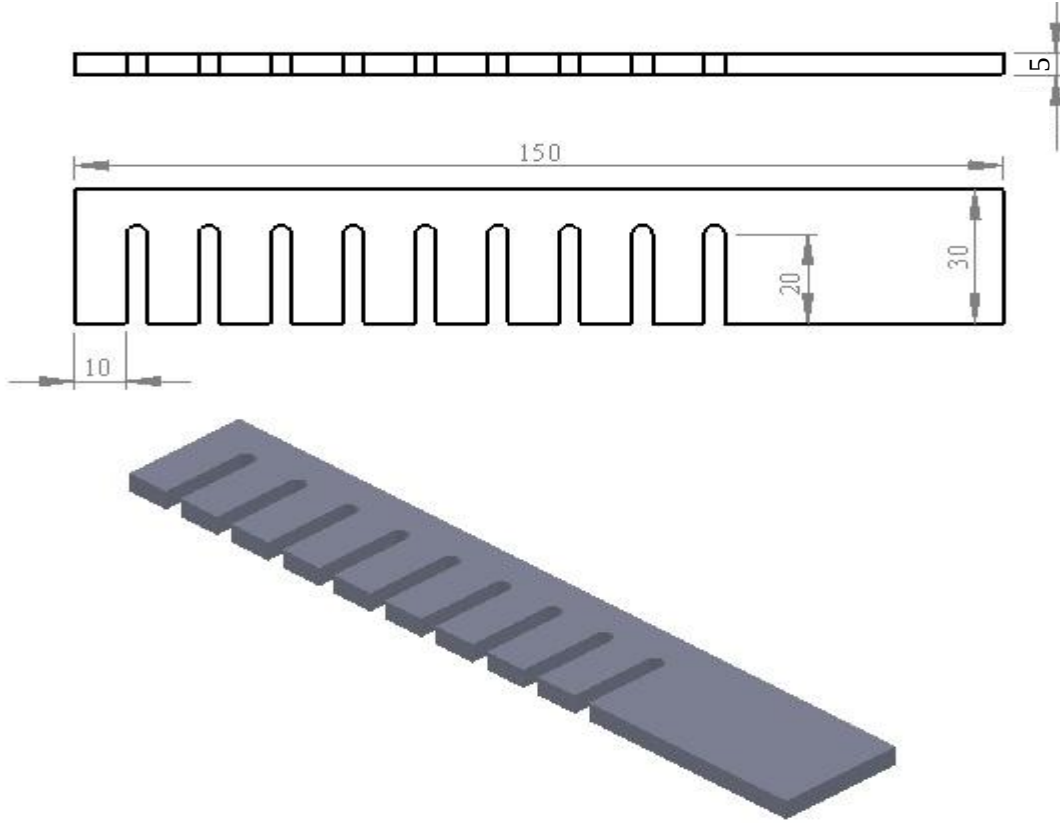
Şekil 5.1. Numunelere uygulanan ısıt işlemler şemaları (a:1. Isıt işlem, b:2. Isıt işlem)

Termal yöntemler ile kesme deneyleri için numuneler üç gruba (I, II, III) ayrılmıştır. Birinci grup numuneler, ticari olarak temin edilmiş ve ısıt işlem görmemiş numunelerdir. İkinci grup numunelere 1 nolu ısıt işlem, üçüncü grup numunelere ise 2 nolu ısıt işlem şartları uygulanmıştır. Kesme deneyleri için numunelerin hazırlanması sırasında, ısıdan etkilenen hasarlardan kaçınmak amacıyla, soğuk bir kesme yöntemi olan su jeti ile kesme yöntemi kullanılmıştır. Su jeti ile numune hazırlama işlemleri, Elazığ Messa Mermer A.Ş. fabrikasında bulunan CT (Cutting Technologies & Machinery) su jeti tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Numuneler, $180 \times 30 \times 4.76 \text{ mm}^3$ ölçülerinde hazırlanmıştır.

5.3. Lazer Işını İle Kesme Deneyleri

Lazer ışını ile kesme deneyleri, Bursa Ermaksan A.Ş. firmasında yapılmıştır. Deneylerde, 4000W gücünde bir Lazermak CO₂ tezgâh kullanılmıştır. Bu tezgâha ait gaz karışımı %71,7 CO₂ , %23,4 N₂ ve %4.9 helyum şeklindedir. Deneylerde, lens çapı (7,5”), lüle çapı (1,5 mm), yardımcı gaz tipi (N₂) ve kesme modu (sürekli rejim) sabit tutulmuştur.

Kesme işlemleri, şekil 5.2’de görüldüğü gibi aynı numune üzerinden her bir kesim için farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.2. Kesim sonrası numunelere ait şematik görünüm

5.3.1. Lazer Işını İle Kesme Deneylerinde Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi

CO₂ lazer ile kesme yönteminde, lazer gücü (Watt), kesme hızı (mm/dak.) ve yardımcı gaz basıncı (Bar) parametreleri belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiştir. Bu kesme parametrelerine ve seviyelerine bağlı olarak, Taguchi deneysel tasarım yöntemi esas alınmış ve toplam 9 deney gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.2.’de, deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri, tablo 5.3’te ise deney sıralaması verilmiştir.

Tablo 5.2. Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri

Kesme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Lazer Gücü (W)	3200	3600	4000
Puls frekansı (Hz)	2000		
Kesme Hızı (mm/dak)	1500	1700	1850
Operasyon modu	CW		
Yardımcı gaz	N ₂		
Gaz basıncı (Bar)	15	17	19
Nozul çapı (mm)	1.5		
Nozulun parçadan uzaklığı (mm)	1		
Lens çapı (mm)	127		
Odak pozisyonu (mm)	-4 (Yüzey altı)		

Tablo 5.3. Taguchi L₉ deney tasarımı

Deney No	Güç(Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)
1	3200	1500	15
2	3200	1700	17
3	3200	1850	19
4	3600	1500	17
5	3600	1700	19
6	3600	1850	15
7	4000	1500	19
8	4000	1700	15
9	4000	1850	17

5.4. Plazma Arkı İle Kesme Deneyleri

Plazma kesme deneyleri, Elazığ Özbaylar firmasında yapılmıştır. Deneylerde, Ermak CPP700 yüksek toleranslı plazma ark kesme (HTPAC) tezgâhı kullanılmıştır. Şekil 5.3'te bu tezgaha ait fotoğraf görülmektedir. Deneylerde, plazma olarak O₂, yardımcı olarak ise N₂ gazları kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Deneylerde kullanılan plazma ark kesim tezgahı

5.4.1. Plazma Arkı İle Kesme Deneylerinde İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Plazma ark ile kesme yönteminde, Akım şiddeti (Amper), Kesme hızı (mm/dak.) ve Yardımcı gaz basıncı, N₂ (Bar) parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler, belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiştir. Bu kesme parametrelerine ve seviyelerine bağlı olarak, Taguchi deneysel tasarım yöntemi esas alınmış ve toplam 9 deney gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.4.'te, deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri, tablo 5.5'te ise deney sıralaması verilmiştir.

Tablo 5.4. Plazma kesme deneylerinde kullanılan parametreler ve seviyeleri

Kesme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Akım şiddeti (A)	40	45	50
Ark voltajı (V)	132		
Kesme Hızı (mm/dak)	650	800	950
Kesme gazı	O ₂		
Yardımcı gaz	N ₂		
Ateşleme gazı	Hava		
Kesme gaz basıncı (Bar)	25		
Yardımcı gaz basıncı (Bar)	13	15	17
Nozıl çapı (mm)	1.2		
Nozılın parçadan uzaklığı (mm)	2		

Tablo 5.5. Plazma kesim deneylerinde kullanılan Taguchi L₉ deney tasarımı

Deney no	Akım Şiddeti (A)	Kesme Hızı (mm/dak)	Yardımcı Gaz basıncı (Bar)
1	40	650	13
2	40	800	15
3	40	950	17
4	45	650	15
5	45	800	17
6	45	950	13
7	50	650	17
8	50	800	13
9	50	950	15

5.5. Tel Erozyon (WEDM) İle Kesme Deneyleri

Tel erozyon ile kesme deneyleri, İstanbul Özen kalıp tel erozyon firmasında yapılmıştır. Deneylerde, Accutex marka bir tel erozyon tezgâhı kullanılmıştır. Şekil 5.4'te bu tezgaha ait fotoğraf görülmektedir. Yapılan deneylerde, çekme kuvveti 900 N/mm² olan 0.25 mm çapında CuZn₃₇ tel kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda işlem parametreleri olarak, güç kaynağı akımı IP (A), Puls süresi T_{on} (µs), dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm²) parametreleri değişken olarak alınırken tel ilerleme hızı WF (m/s), tel gerginliği WT (N), tel çapı Wd (mm), tabla ilerleme hızı FR (mm/dk) , puls ara süresi T_{off} (µs) sabit tutulmuştur.



Şekil 5.4 Deneylerde kullanılan tel erozyon tezgahı

5.5.1. Tel Erozyon İle Kesme Deneylerinde İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Tablo 5.6.'da, deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri, tablo 5.7'de ise deney sıralaması verilmiştir.

Tablo 5.6. Tel erozyon kesim deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri

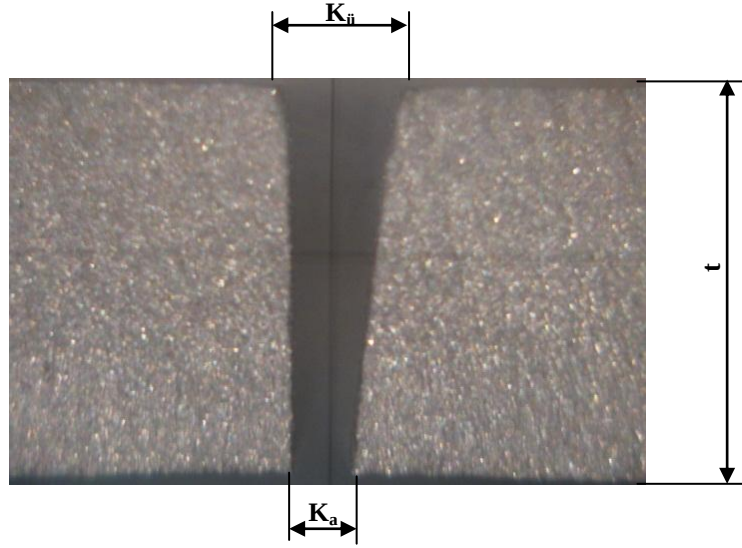
Kesme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Akım şiddeti IP (A)	8	10	12
Aralık voltajı (V)	39		
Vurum süresi T_{on} (μs)	5	7	9
Vurum ara süresi T_{off} (μs)	9		
Tel gerginliği WT (N)	10		
Tel ilerleme hızı WF (m/s)	15		
Dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı (kg/cm^2)	13	15	18
Tabla ilerleme hızı FR (mm/dk)	10		
Tel çapı (mm)	2.5		

Tablo 5.7. Tel erozyon kesim deneylerinde kullanılan Taguchi L_9 deney tasarımı

Deney No	Akım Şiddeti IP (A)	Vurum Süresi T_{on} (μs)	Sıvı sirkülasyon Basıncı (kg/cm^2)
1	8	5	13
2	8	7	15
3	8	9	18
4	10	5	15
5	10	7	18
6	10	9	13
7	12	5	18
8	12	7	13
9	12	9	15

5.6. Kerf Geometrisi Ölçümleri

Her bir yöntemle yapılan kesme deneyleri sonunda, şekil 5.5'te şematik olarak gösterilen kesme kalitesini belirleyen kerf genişliği ve eğim açısı karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla her bir kesime ait alt ve üst kerf genişlikleri kerf boyunca beş ayrı noktadan 0.002 hassasiyete sahip (Model 98-0001, SCHERR TUMICO, U.S.A) profil ölçüm mikroskobuyla ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak söz konusu kerf genişlik değeri saptanmıştır.



Şekil 5.5. Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi

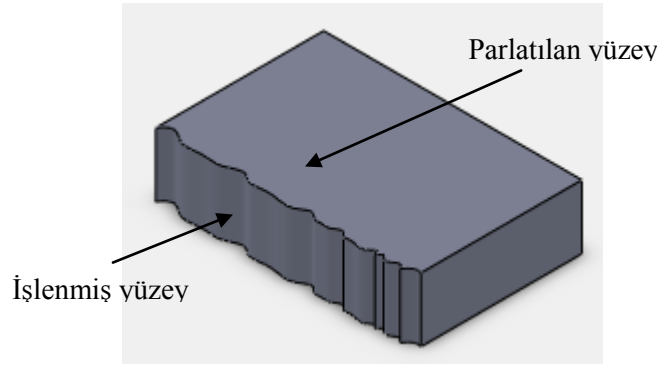
Elde edilen alt ve üst kerf genişliği değerlerine bağlı olarak aşağıdaki formül kullanılarak kerf eğim açısı ($K_{e.a.}$) hesaplanmıştır.

$$K_{e.a.} = \frac{K_u - K_a}{2\pi \times t} \times 180 \quad (5.1)$$

Burada K_u kerf üst genişliğini, K_a kerf alt genişliğini t ise iş parçası kalınlığını ifade etmektedir.

5.7. Metalografik İncelemeler

Kesme deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey görüntüleri, yüzeylere ait mikro yapıları ve ısıdan etkilenen bölgeleri belirlemek için, işlenen yüzeye dik komşu bir yüzey seçilerek bu yüzeyler sırasıyla, 200, 400, 600, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalarla ve daha sonra 3 μm 'luk elmas pasta kullanılarak çuhayla parlatılmıştır (Şekil 5.6). Parlatılan yüzeyler, elektrolitik dağlama yöntemiyle 50% HCl ve 50% Metanol çözeltisine 4.5 V akım kullanılarak çözeltide yaklaşık 10 saniye bekletilerek dağlanmıştır [121]. Dağlama işlemi sonrası, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 5.6. Metalografik incelemeler için hazırlanan numunelerin şematik gösterim

Numunelere ait SEM görüntüleri alınırken numunelerin işlenmiş yüzeylerinde oluşan elementer içerikleri ve fazları tespit etmek için EDS (energy dispersive spectrograph) ve XRD (X – ray diffraction) analizleri yapılmıştır. Tüm bu işlemler Elazığ Fırat Üniversitesi elektron mikroskop (FÜEM Lab.) laboratuvarında yapılmıştır.

5.8. Mikrosertlik Ölçümleri

Termal kesme sonrasında numunelerin mikrosertlik ölçümleri, Leica Q500/W mikrosertlik cihazında Vickers sertlik skalası ile 200 gr'lık yük kullanılarak yapılmıştır. Her bir numune üzerinde, yeniden katılaştıran tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme olmak üzere üç ayrı bölgeden, farklı noktalardan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin ortalama mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

5.9. AFM Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

AFM, yüzey topografisini angström seviyesinden 100-150 mikrona kadar ölçebilen bir tekniktir. Cantilever'in sonuna yerleştirilmiş birkaç mikron uzunluğunda ve atomik sivrilikte bir uç ile numune yüzeyi taranır. Tarama esnasında uç-yüzey arasındaki atomlar arası kuvvetler (10^{-11} - 10^{-6} N) Cantilever'in sapmasına sebep olur. Bu sapma bir sensörle ölçülerek numune yüzeyinde taranan alanın yüzey topografisi elde edilir. AFM ile incelenen numunenin yüzey topografisinden büyüme modu, numunenin yüzey pürüzlülüğü, numune yüzeyindeki kusur tipleri ve kusur yoğunluğu hakkında bilgi edinilebilir.

Numunelerin 2 ve 3 boyutlu AFM yüzey görüntülerinin elde edilmesi için Park System marka XE-100E model Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılmıştır.

Numune yüzeylerinden görüntü almak için non-kontak modda çalışılmış ve buna uygun cantilever kullanılarak $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ boyutunda tarama sınırlarında görüntüler alınmıştır.

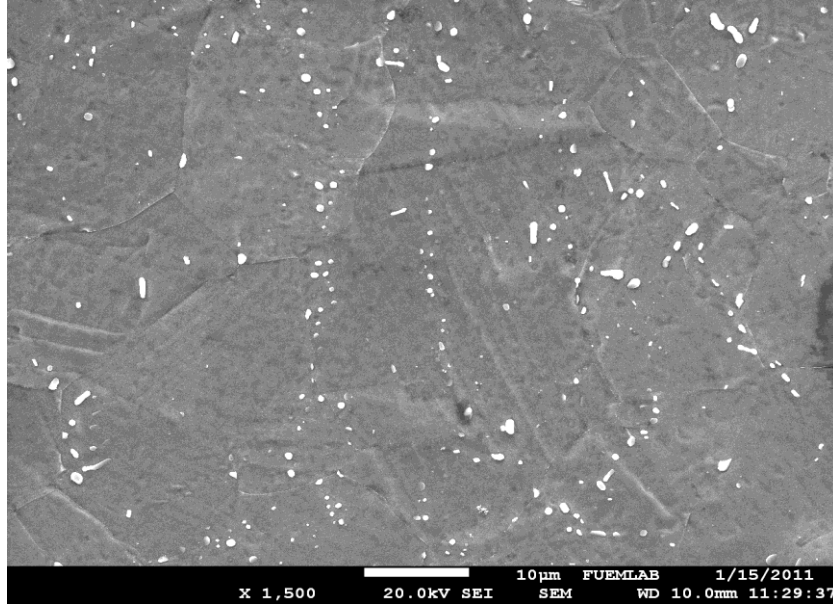
5.10. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri (Ra)

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo SJ – 201 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla her bir yüzey için kesme yönüne paralel doğrultuda toplam 5 ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmiştir.

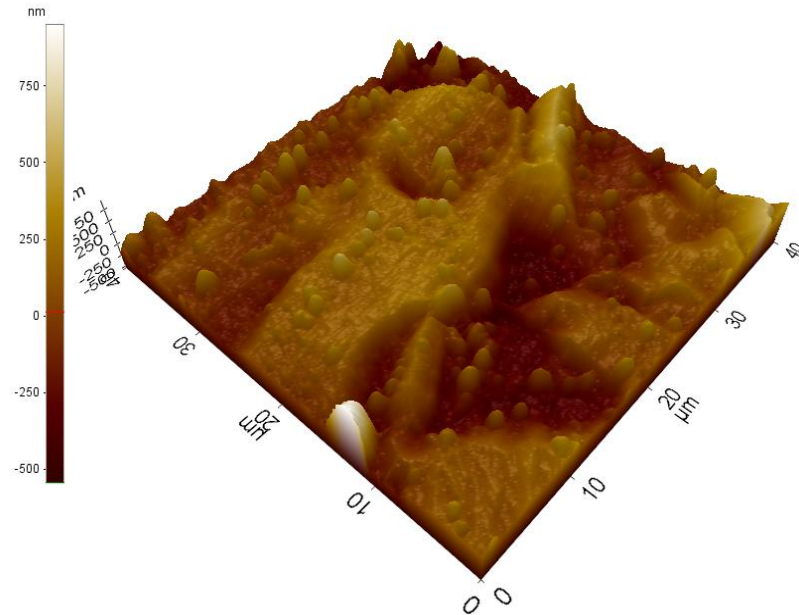
6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

6.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

I. grup numunenin SEM ve AFM fotoğrafları şekil 6.1 ve 6.2’de verilmiştir. Şekiller birlikte değerlendirildiğinde, mikro yapının tane içerisinde ve tane sınırlarında homojen olarak dağılmış olan karbürlerden ve ikincil fazlardan (beyaz noktalar) oluştuğu görülmektedir.

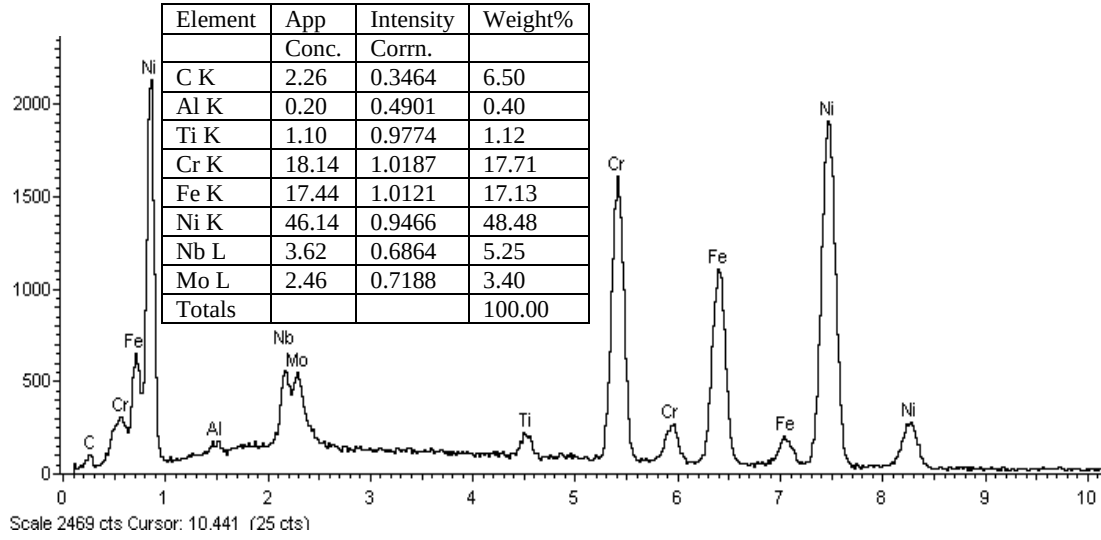


Şekil 6.1. Isıl işlem görmemiş numuneye ait SEM görüntüsü

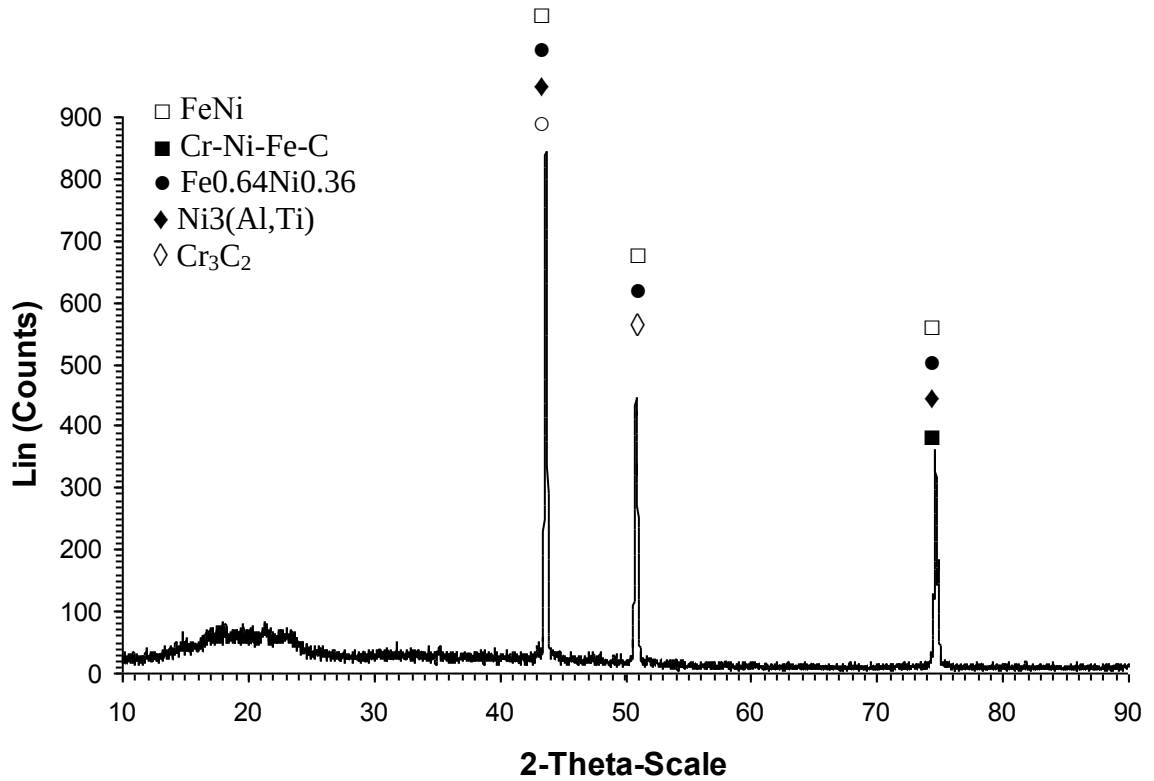


Şekil 6.2. Isıl işlem görmemiş numuneye ait AFM görüntüsü

Yapı içerisinde görülen bu karbürleri belirlemek amacıyla numuneye EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait grafikler sırasıyla Şekil 6.3 ve 6.4'te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bu karbürlerin MC ve Cr_3C_2 oldukları belirlenmiştir.

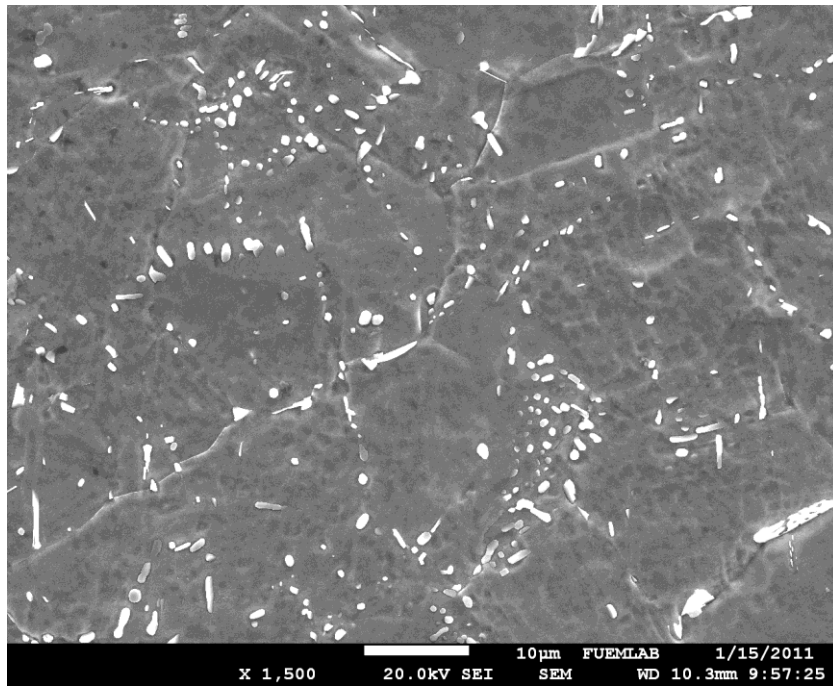


Şekil 6.3. I. Grup (Isıl işlem görmemiş) numuneden alınan EDS analizi

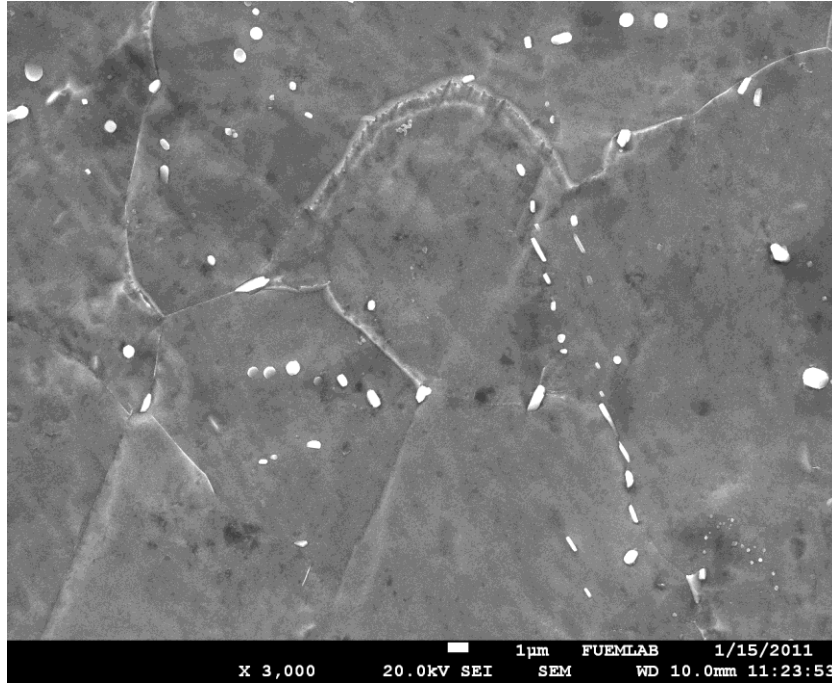


Şekil 6.4. Isıl işlem görmemiş numuneden alınan XRD analizi

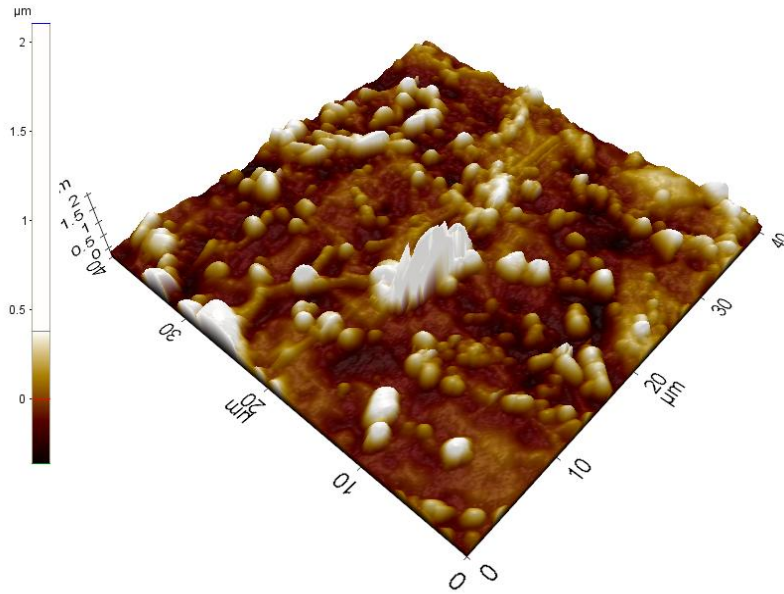
Şekil 6.5'te ve 6.7'de, II. grup numunelere ait SEM ve AFM fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflarda, ısıtım işlem şartlarına bağlı olarak mikro yapıda I. grup numuneden farklı olarak karbürlerin yanı sıra, tane sınırlarında ikincil fazların (γ' , γ'' , δ) tane sınırlarında çökelme olduğu görülmektedir. Bununla beraber, tane sınırına dal şeklinde çökelmiş olan δ fazı daha yüksek büyütmedeki fotoğrafta açıkça görülebilmektedir. Bu numuneden alınan EDS ve XRD analiz sonuçları ise sırasıyla şekil 6.8'de ve 6.9'da verilmiştir. Bu numunede de aynı tip karbürlerin oluştuğu tespit edilmiştir.



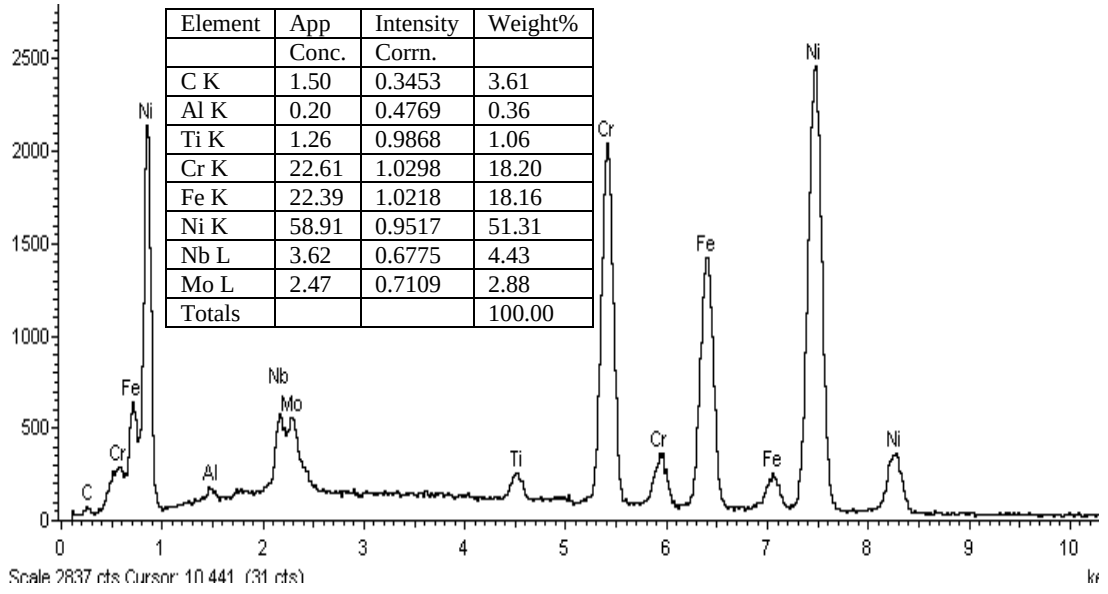
Şekil 6.5. 980 °C' de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıtım işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü



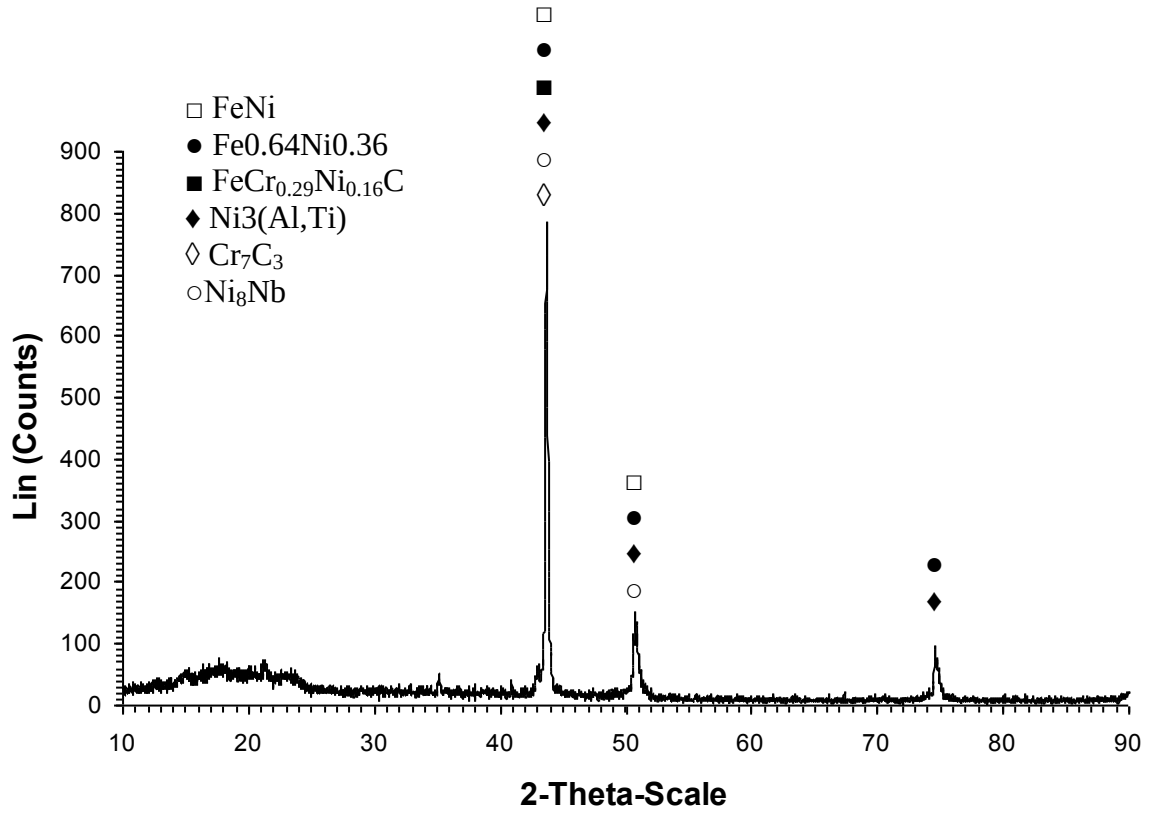
Şekil 6.6. 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü



Şekil 6.7. 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneye ait AFM görüntüsü

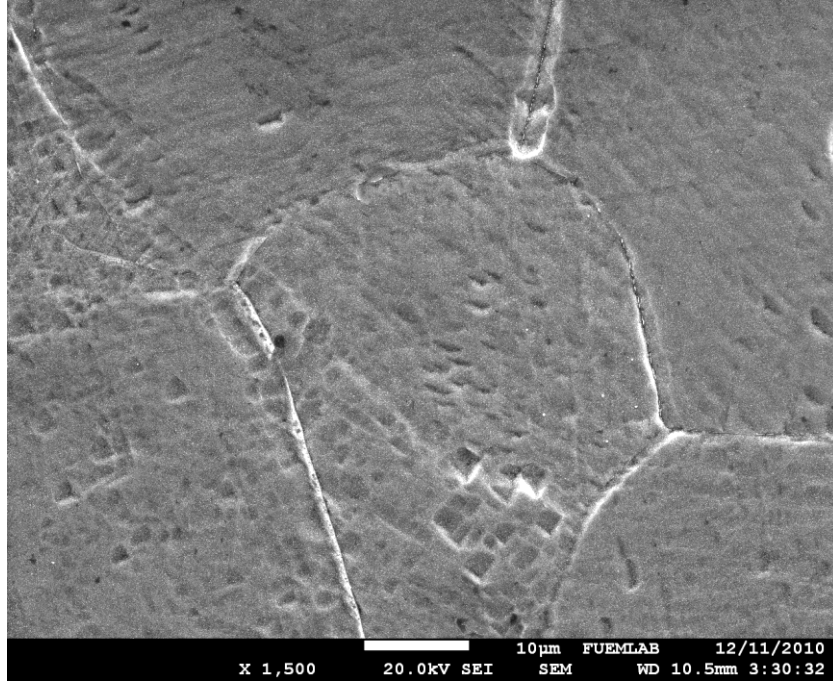


Şekil 6.8. 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısısal işlemi uygulanmış numuneden alınan EDS analizi

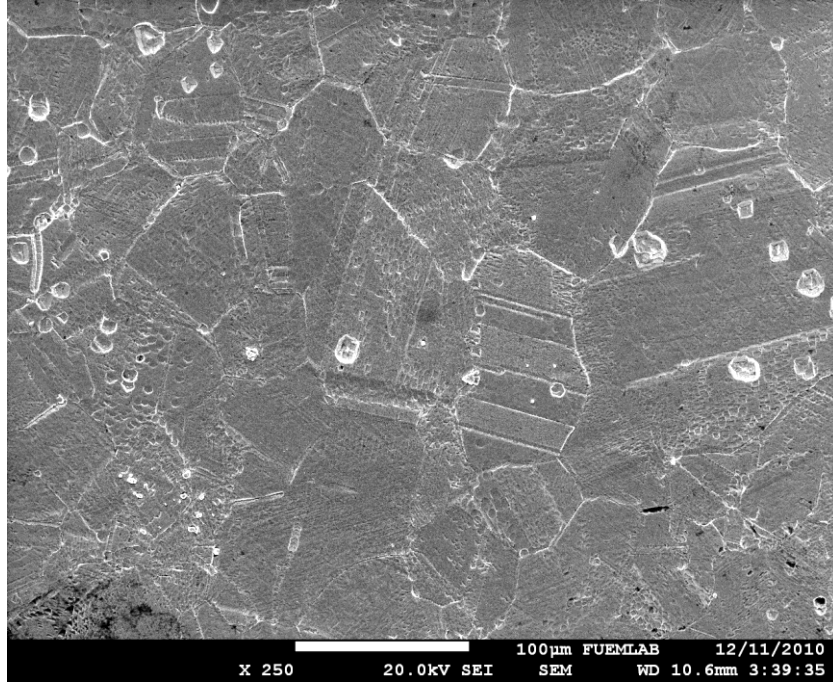


Şekil 6.9. 980 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısısal işlemi uygulanmış numuneden alınan XRD analizi

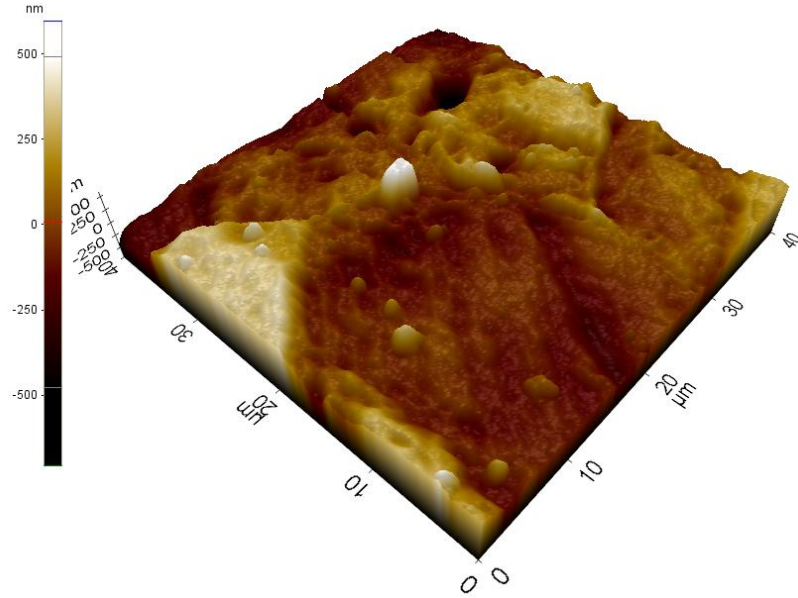
Şekil 6.10'da ve 6.12'de III. grup numuneye ait SEM ve AFM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 6.10'da, 2. ısıtım işlemi sonucunda tane boyutunun önemli derecede arttığı görülmektedir. Dolayısıyla sıcaklık ve bekleme sürelerinin mikroyapı üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Diğer yandan, yüksek sıcaklık ve süreye bağlı olarak, ikincil fazların matris içerisinde tekrar çözüldüğü, ancak bu fazların tane sınırlarında da nispeten dağıldıkları gözlemlenmektedir. Yapı içerisinde görülen bu karbürleri ve fazları belirlemek amacıyla numuneye EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait grafikler sırasıyla Şekil 6.13 ve 6.14'te verilmiştir. Ayrıca, tane büyümesi sonucunda yapıda ikizlenmelerin teşekkül ettiği görülmektedir. (şekil 6.11) .



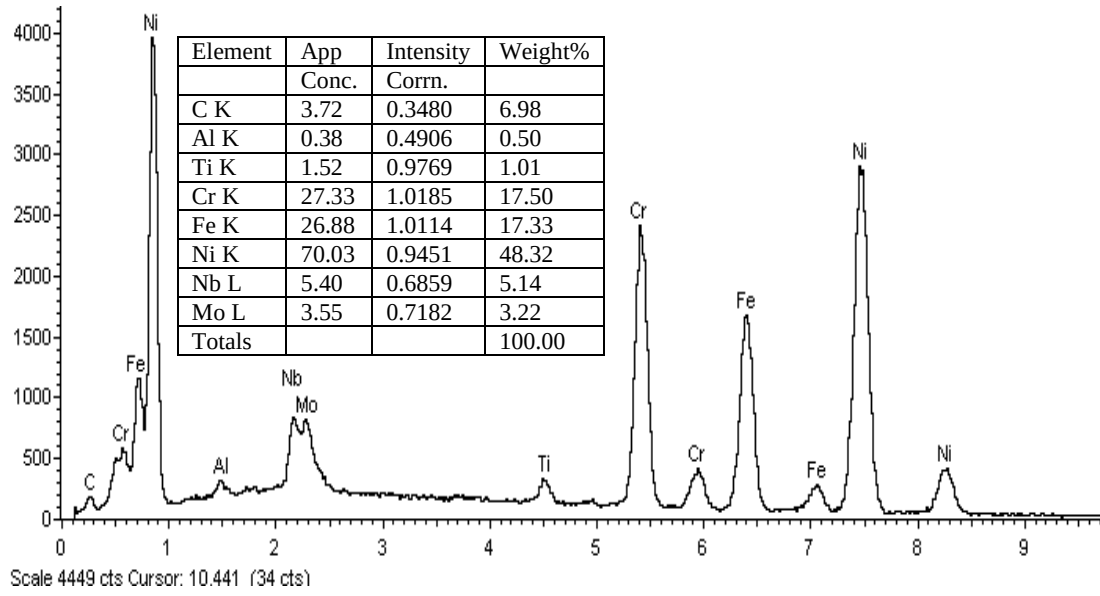
Şekil 6.10. 980 °C’ de çözüldürme ve ardından yaşlandırma ısıtım işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü



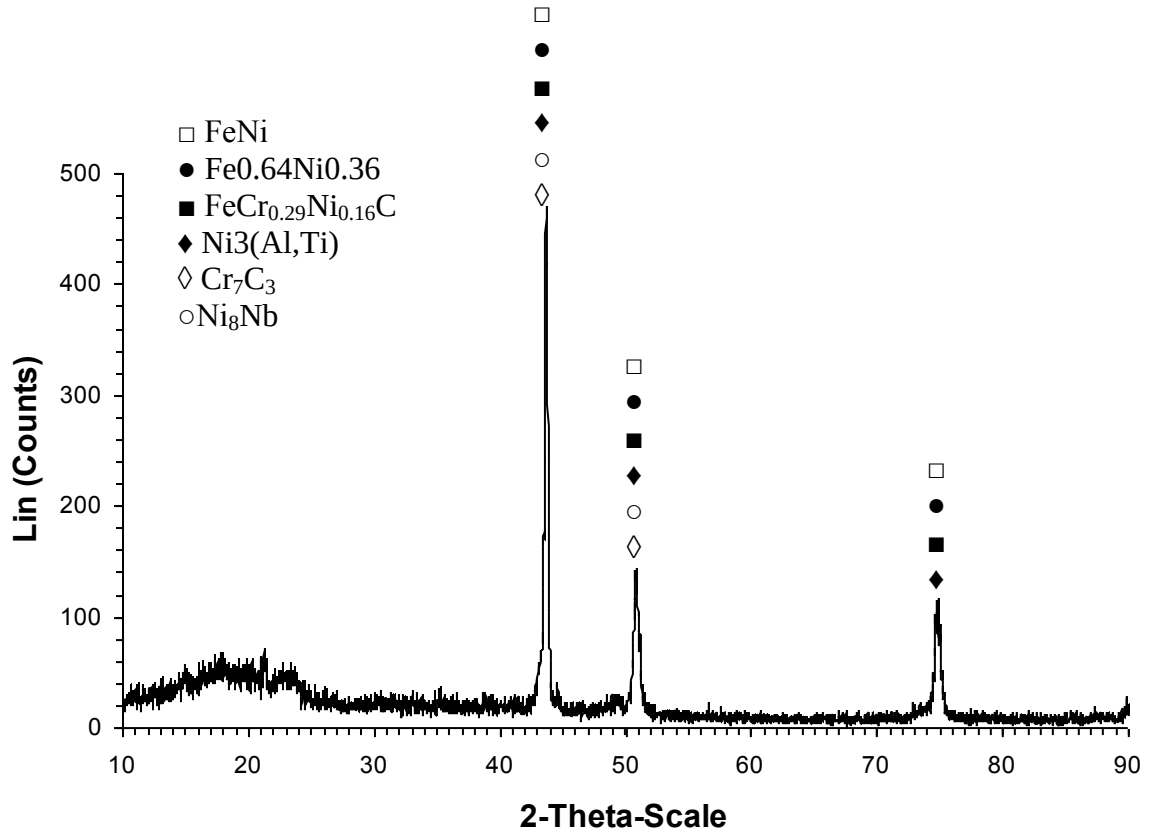
Şekil 6.11. 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısı işlemi uygulanmış numuneye ait SEM görüntüsü



Şekil 6.12. 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısı işlemi uygulanmış numuneye ait AFM görüntüsü



Şekil 6.13. 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıt işlemi uygulanmış numuneden alınan EDS analizi



Şekil 6.14. 1040 °C’ de çözündürme ve ardından yaşlandırma ısıt işlemi uygulanmış numuneden alınan XRD analizi

Tablo 6.1’de verilen numunelere ait sertlik ve ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde, numunelere uygulanan çökeltme sertleştirmesi ısı ışlemi sonucunda malzemenin sertliğinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, uygulanan ısı ışlemler neticesinde II. grup numunelerin ısı iletkenliğinin düştüğü, III. grup numunelerin ise diğerlerine nazaran arttığı yapılan ısı iletkenlik ölçümler sonucunda tespit edilmiştir. Isı iletkenlikteki düşüşün, yapılan ısı ışlemler neticesinde tane sınırlarına çökelen karbür ve ikincil fazların birer termal bariyer görevi görmesinin neden olduğu düşünölmektedir. Ayrıca, III. grup numunelere uygulanan ısı ışlemler neticesinde, tanelerin büyümesi ve tane sınırlarındaki karbür ve ikincil fazların çözünerek matris fazına geçmesi ısı iletkenliği arttırmıştır.

Tablo 6.1. Inconel 718 nikel alaşımının ısı ışlemler sonucunda elde edilen sertlik ve ısı iletkenlik değerleri

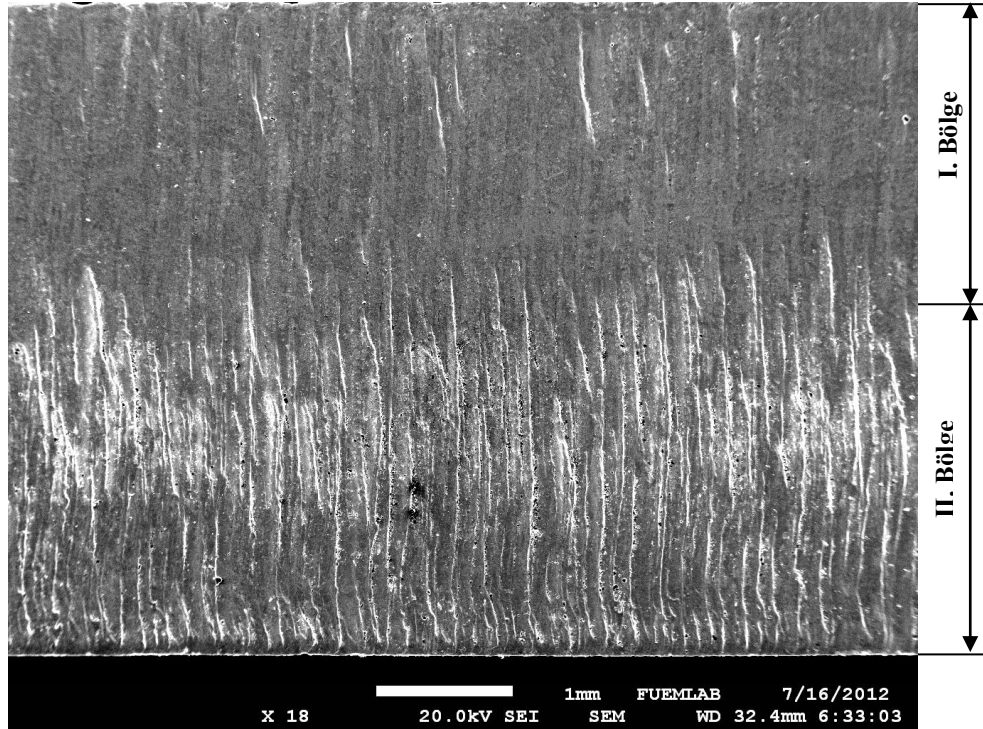
	I. Grup umuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
Sertlik (HRC)	20	42	46
Isı İletkenlik (W/mK)	12.6	11.4	14,3

6.2 Lazer Işını İle Kesme Deney Sonuçları

6.2.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları

6.2.1.1. Yüzey Yapısı

Şekil 6.15'te lazer ışını ile kesilmiş bir yüzeyin tipik görüntüsü verilmiştir. Yüzey görüntüsü incelendiğinde; yüzeyin, lazer ışınının yüzeye temas ettiği, malzeme içerisine doğru ilerlediği ve belirli bir derinliğe kadar sürekli kesme rejiminin gerçekleştiği bölge (I. Bölge) ve bu derinlikten sonra kalan malzemenin kesit alanının uygulanan sıcaklık ve gaz basıncına dayanamadan kırıldığı bölge (II. Bölge) olmak üzere 2 bölgeden meydana geldiği görülmektedir. I. Bölge, kesme yönüne dik şekilde damarlı ve kanal şeklindeki çiziklerden oluşmaktadır. II. Bölge ise, ergimiş metalin gaz basıncıyla yüzeyden kopartılarak uzaklaştırıldığı bölgedir. Bu yöntemde daha önce yapılan çalışmalarda [122, 123] da elde edilen yüzeylerin benzer özellikler gösterdiği belirtilmiştir. Lazer ışını ile işlemede, iş parçası üzerine odaklanan ışının güç yoğunluğuna bağlı olarak oluşan yüksek ısı ile iş parçası malzemesi erir ve kısmen buharlaşır. Ergiyen metal, gaz basıncı yardımıyla kesme bölgesinden dışarıya doğru uzaklaştırılır. Kesme esnasında meydana gelen yüzey formu; lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncı gibi parametreler ile doğrudan ilişkilidir.



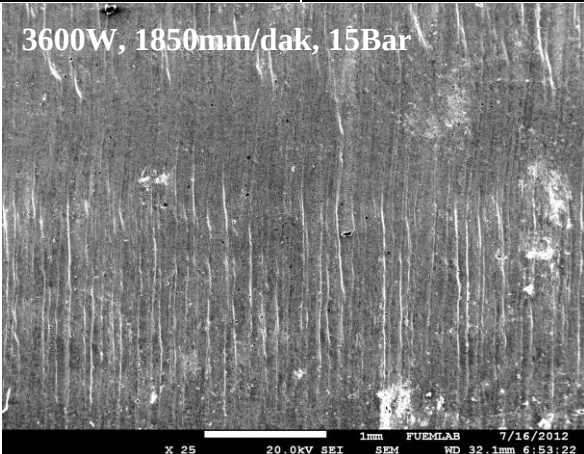
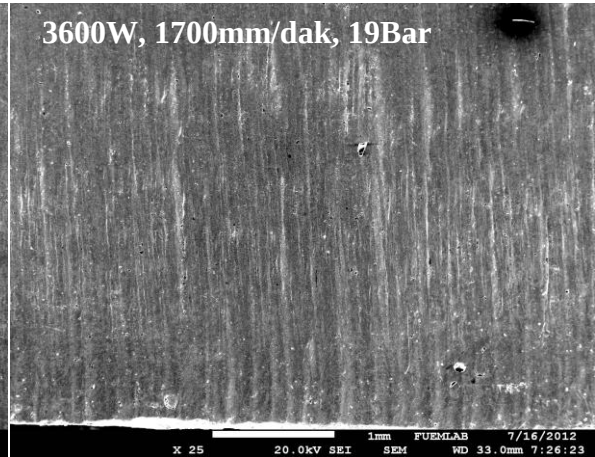
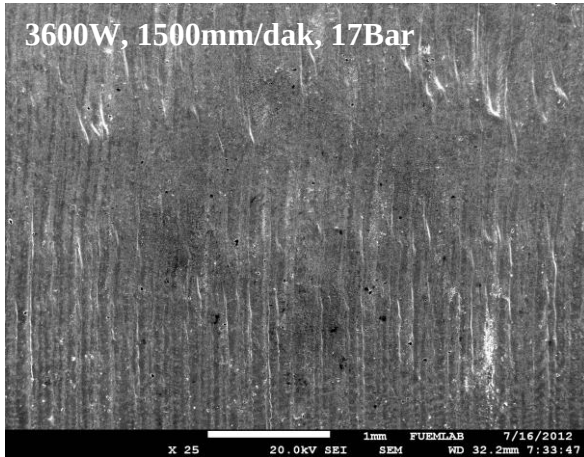
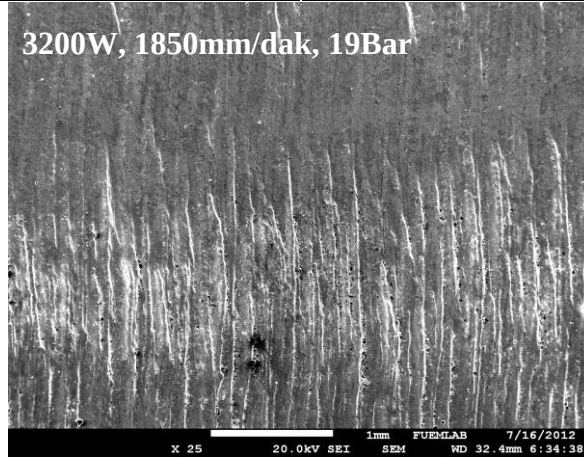
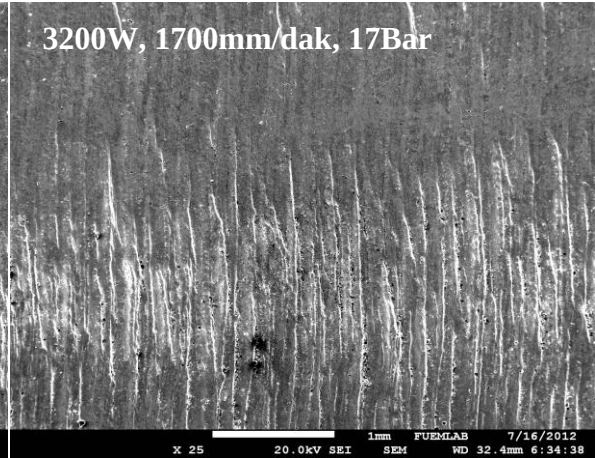
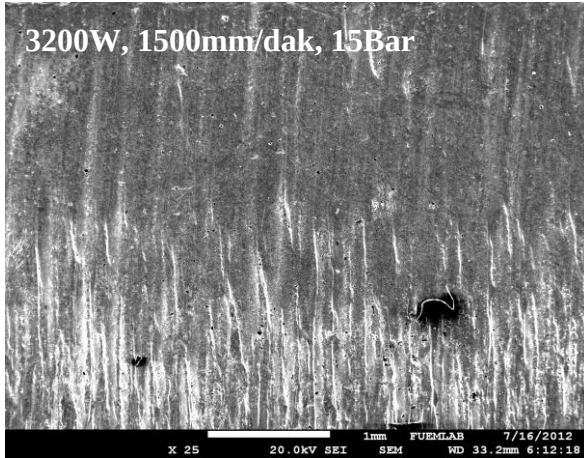
Şekil 6.15 Lazer ışını ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü

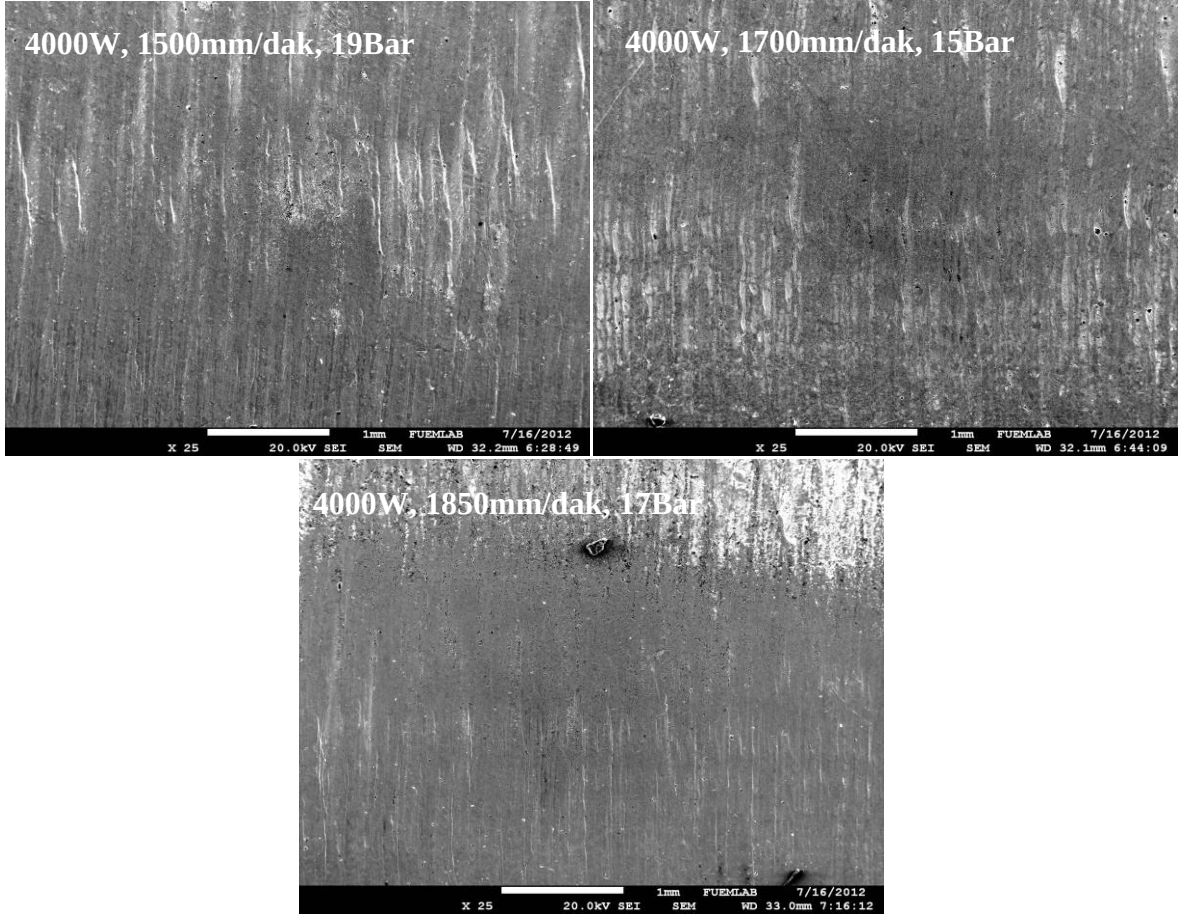
Yüzey görünümü açısından, farklı ısıtma işlem görmüş numunelere ait işlenmiş yüzeylerin benzer, ancak işleme şartlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değiştiği tespit edilmiştir.

6.2.1.1.1. Lazer Işını İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi

Şekil 6.16'da Inconel 718 alaşımının lazer ışını ile kesilmesi sonucu elde edilen yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi, lazer gücünün düşük olduğu durumlarda, kesme hızının artmasına ve parçanın alt kısımlarına doğru enerji yoğunluğunun daha fazla düşmesine bağlı olarak, I. bölgenin yüksekliği azalmakta, ancak meydana gelen çiziklerin derinliği düşmekte ve periyodu daralmakta, II. bölgenin yüksekliği ise artmaktadır. Bu durum, eriyik haldeki metalin akış davranışıyla ilişkilidir. Düşük kesme hızlarında, nispeten yüksek viskoziteye sahip eriyiğin geniş kütleler halinde dışarı atılması sonucunda daha geniş çiziklere sahip, pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır. Kesme hızının artmasıyla, eriyik metalin yüzey sıcaklığı yükselir ve bu yüzden eriyiğin viskozitesi düşer. Daha akışkan hale gelen eriyik gaz basıncının da yardımıyla yüzeye sıvanarak katılır [122,124].

Şekil 6.16'daki yüzey fotoğrafları birlikte değerlendirildiğinde, lazer gücünün artmasıyla I. bölge yüksekliğinin arttığı, II. bölge yüksekliğinin ise daraldığı görülmektedir. Bu durum, güç artışına bağlı olarak, kesme bölgesine etkili bir ısı girdisinin oluşmasıyla ortaya çıkmaktadır. Ahn vd. [122] yaptıkları çalışmada, lazer ışınıyla kesme esnasında kesme bölgesinde oluşan ısının etkisinin lazer gücü ve kesme hızı ile ters orantılı olduğunu, gücün artmasıyla etkili bir ısı girdisinin sağlandığı, kesme hızının artmasıyla daha yetersiz bir ısı girdisinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Lazer gücünün düşmesi ve kesme hızının artmasıyla ısı girişinin düştüğü ve bunun neticesinde kesme yüzeyinin alt kısmında oluşan II. Bölgenin yüksekliğinin yüksek güç yoğunluğu ve düşük kesme hızlarına nazaran daha arttığını belirtmişlerdir.

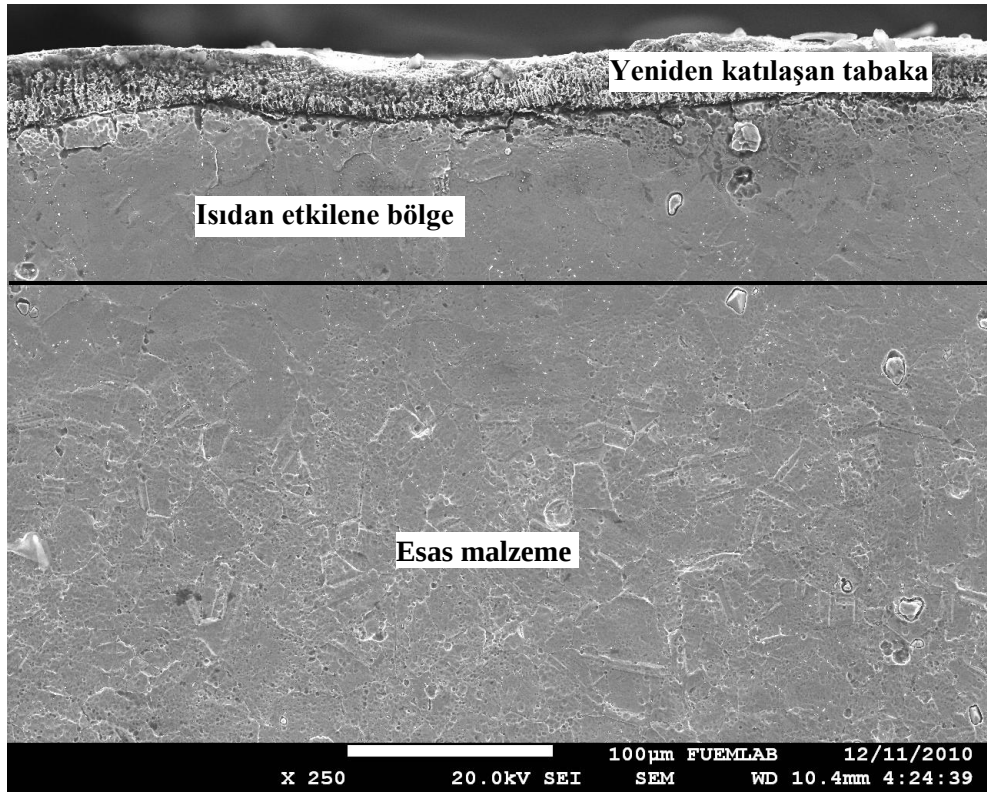




Şekil 6.16 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey formasyonuna etkisi

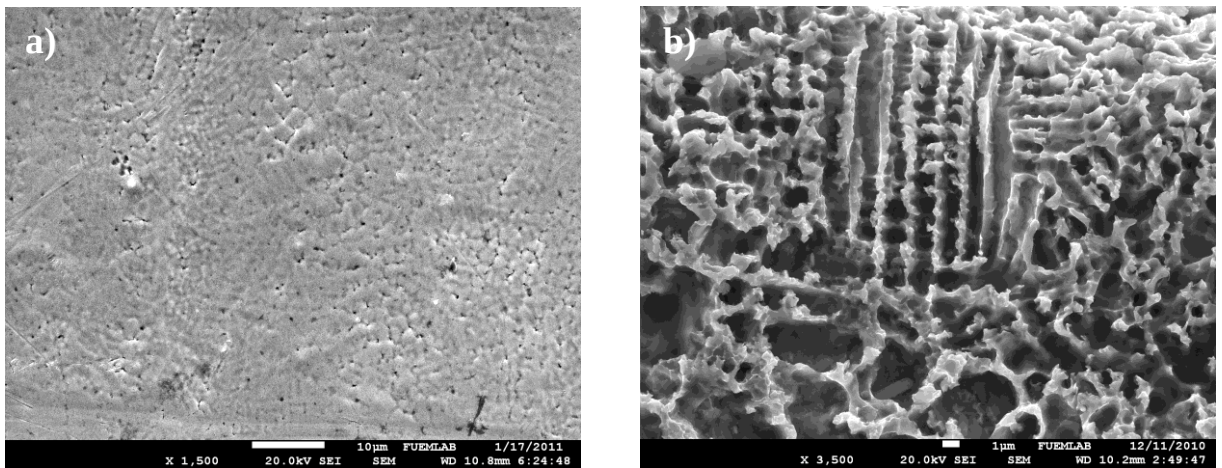
6.2.1.2. Isıdan Etkilenen Bölge

Lazer ışınıyla işleme esnasında meydana gelen temel metalurjik etki, yeniden katılaşan ve/veya ısıdan etkilene bölgenin formasyonu ve genişliğidir. Şekil 6.17’de işlenmiş bir yüzeyin komşu yüzeyinden alınan SEM görüntüsü görülmektedir. Fotoğraf incelendiğinde, üç farklı bölge görülmektedir. En üstte bulunan yeniden katılaşan tabakadır. Bu tabaka, lazer ışını ile kesme esnasında eriyik metalin yardımcı gaz basıncı ile kesme kanalından uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılaşması neticesinde oluşmaktadır. Isıdan etkilenen bölge ise, kesme esnasında ergimenin olmadığı fakat meydana gelen ısının tesiriyle esas metalin mikroyapı değişikliğine uğradığı bölgedir. En altta ise esas malzeme bulunmaktadır.



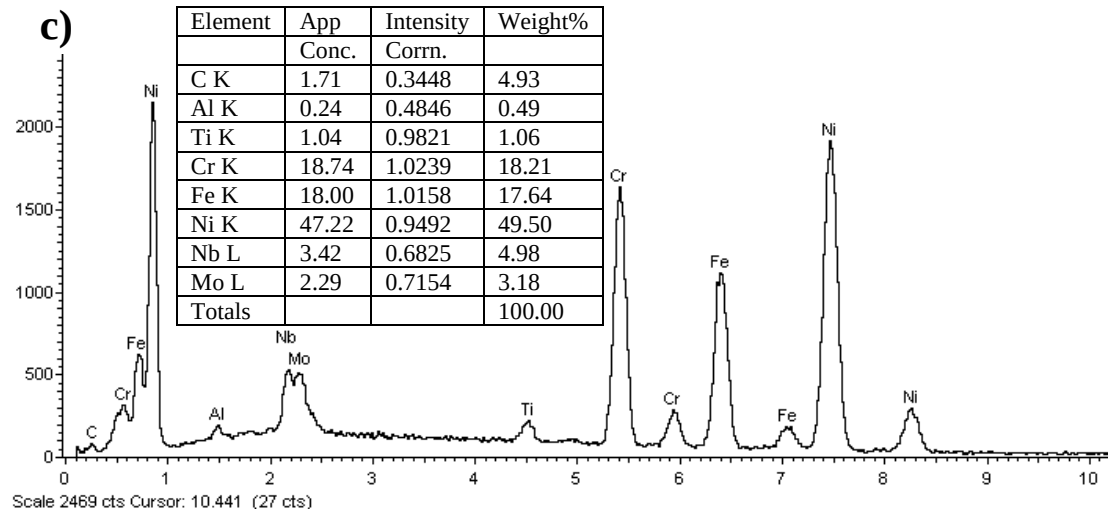
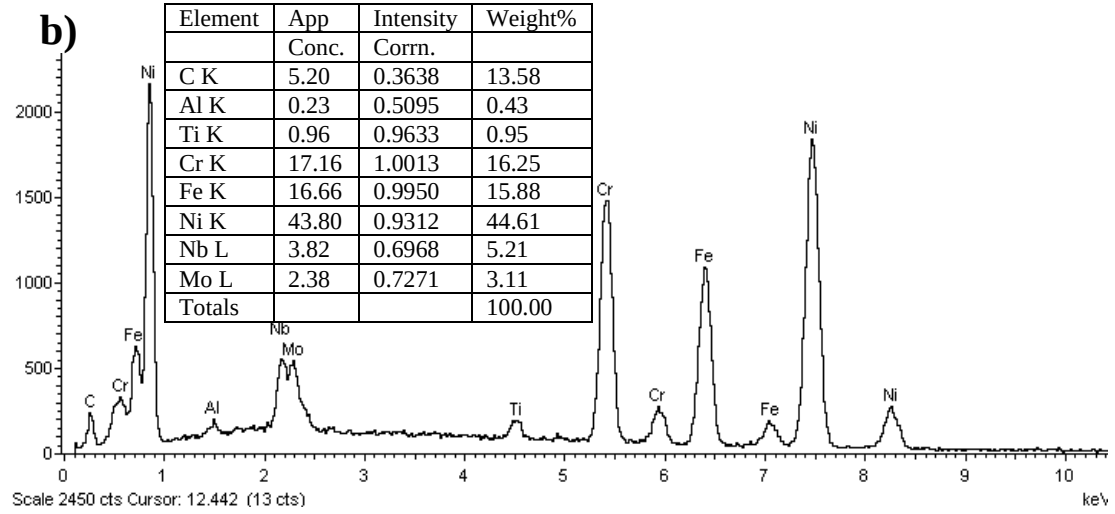
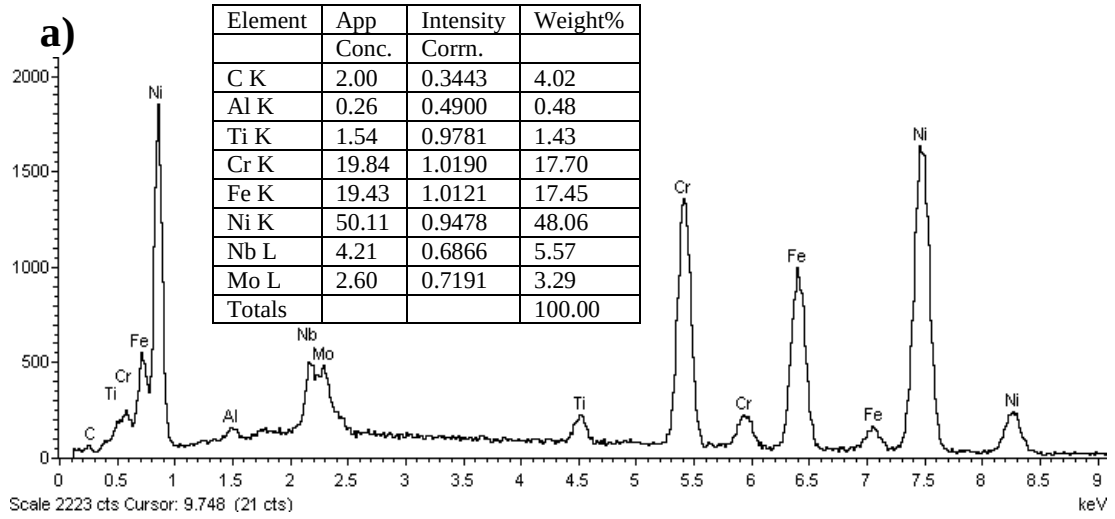
Şekil 6.17 Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler

Şekil 6.18’de görüldüğü gibi yeniden katılaşılan tabakanın metalografik ve mikro yapısal karakteristikleri ana malzemeden farklıdır. Şekil 6.18’da bu bölgenin üstten (kesilmiş yüzeyden) ve kesilmiş yüzeye dik komşu yüzeyden alınmış yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri görülmektedir.

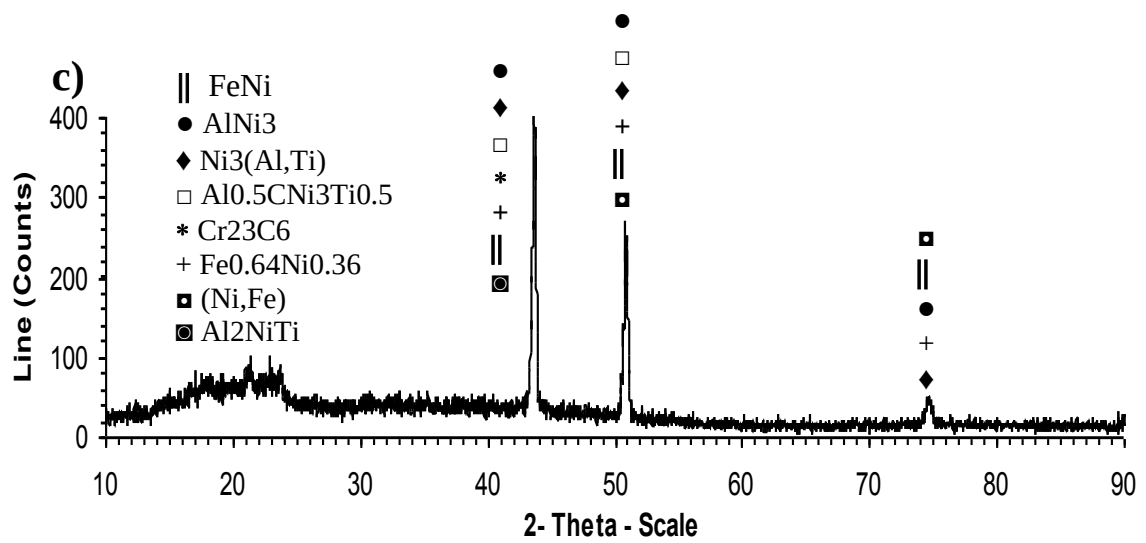
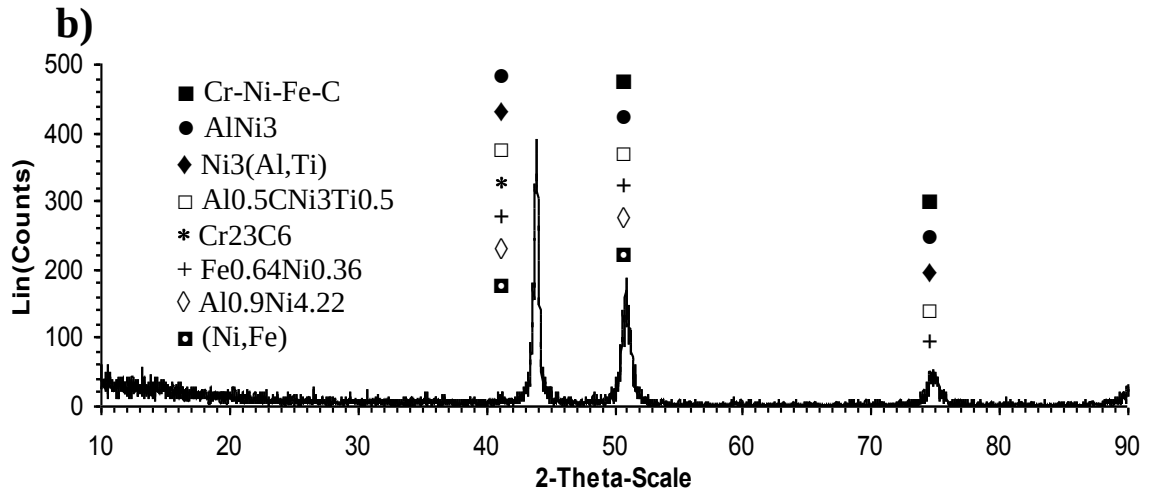
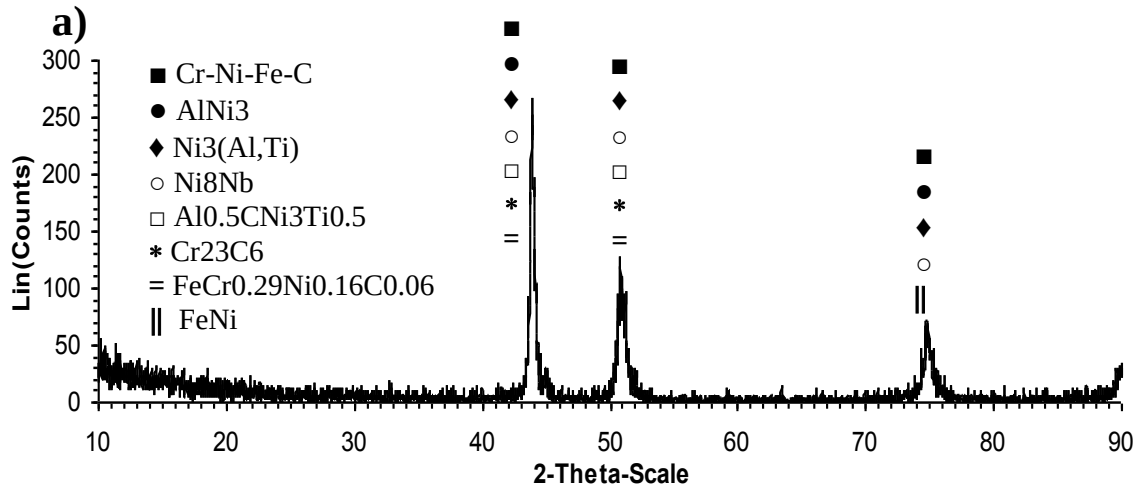


Şekil 6.18 Yeniden katılaşılan tabakanın, a) üstten (kesilen yüzey), b) yandan görüntüleri

Şekil incelendiğinde, lazer ışınıyla kesilen yüzeyde (Şekil 6.18 (a)) ergimiş metalin, basınçlı gazın etkisiyle küresel hücreler şeklinde topaklanarak katılaşmış bir görüntü sergilerken, yan yüzeyin görüntüsü ise dendritik yapıdadır (Şekil 6.18 (b)). Bunun nedeni, ana malzemenin eriyik metali soğutma etkisinden dolayı, ana metale doğru yönelenerek katılaşan dendritik bir yapı sergilemektedir 3 grup numune için yeniden katılaşan tabaka üzerinden alınan EDS sonuçları Şekil 6.19’de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde, I. grup numunelerde, ana matrisi oluşturan Ti, Cr, Fe, Ni, Mo ve Nb elementlerinin yeniden katılaşan tabaka içerisinde yoğunluklarının arttığı, II ve III. grup numunelerde ise azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 6.20’de verilen XRD sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, ısıtma işlem görmemiş I. grup numunelerde, lazer ışınıyla kesme işlemi sonrasında bu bölgede yaşlandırma sertleştirmesinin kısmi etkilerinin meydana geldiği. II ve III. grup numunelerde ise oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile yapıda bulunan ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrise geri çözüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 6.19 Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizleri
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)



Şekil 6.20 Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)

6.2.2. Yeniden Katılaşılan Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları

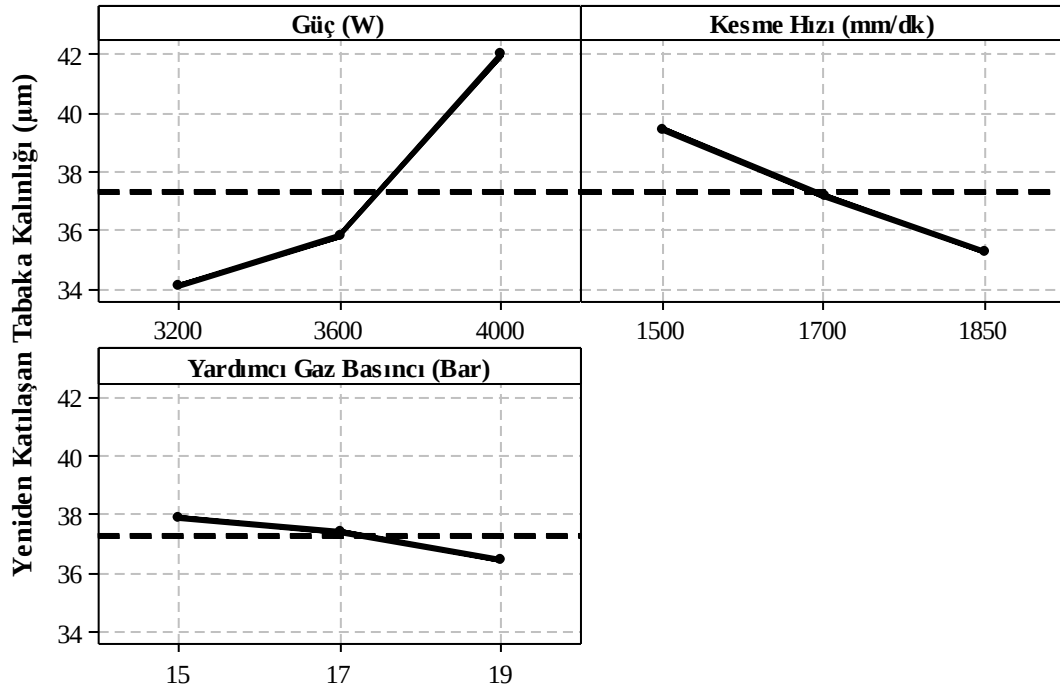
Tablo 6.2’de I, II, III. Grup numunelerden ölçülen ortalama YKTK toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 6.2. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri

Deney No	Deney Parametreleri (Güç-W, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama YKTK (µm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	3200 W, 1500 mm/dk, 15 Bar	37,8	37,2	39,3
2	3200 W, 1700 mm/dk, 17 Bar	33,5	32,8	34,2
3	3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar	30,9	30,2	31,9
4	3600 W, 1500 mm/dk, 17 Bar	37,8	37,3	43,1
5	3600 W, 1700 mm/dk, 19 Bar	35,8	35,5	41,6
6	3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar	33,8	34,6	40,4
7	4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar	42,7	42,4	50,1
8	4000 W, 1700 mm/dk, 15 Bar	42,2	41,7	49,3
9	4000 W, 1850 mm/dk, 17 Bar	41,1	40,3	47,8

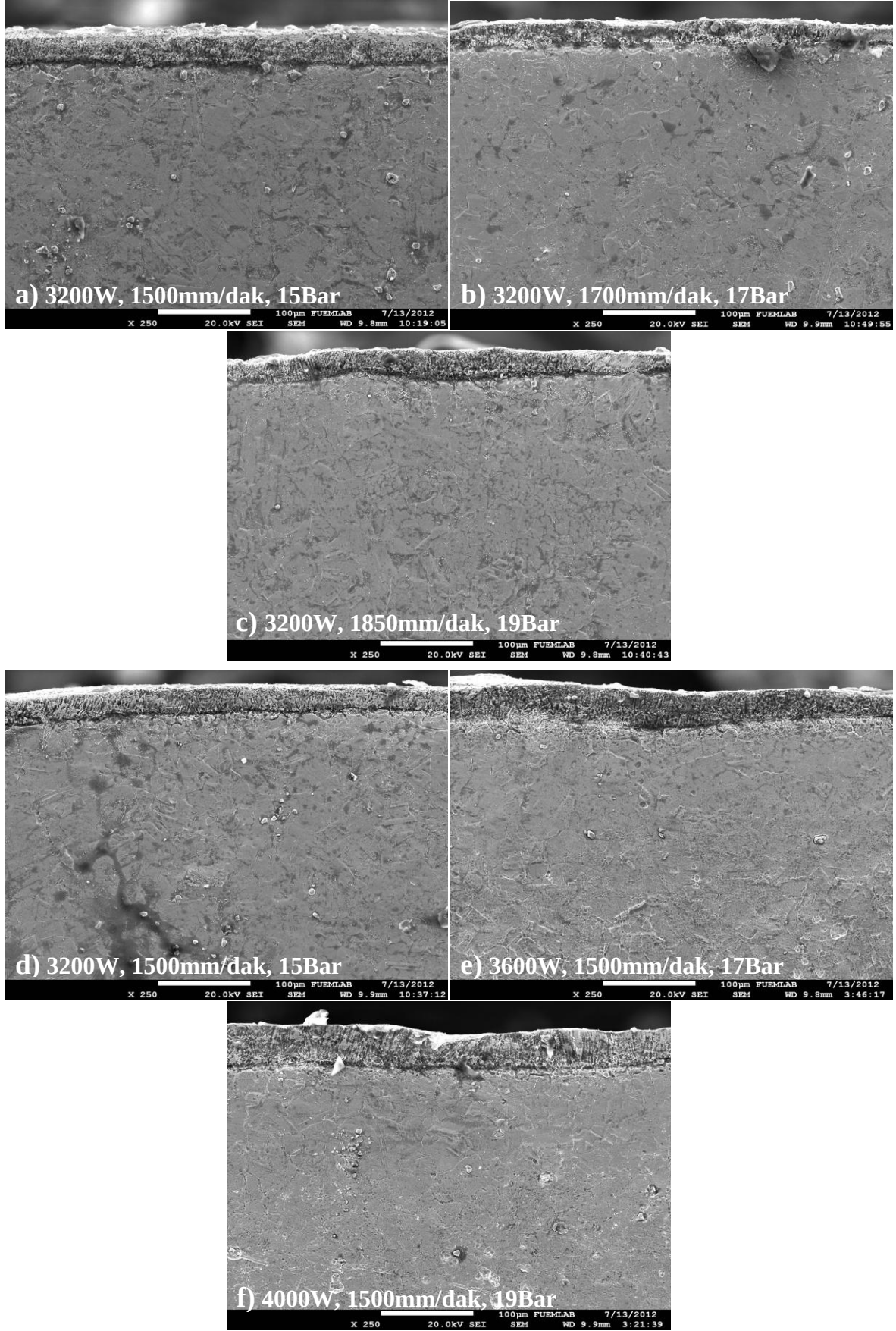
6.2.2.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK’ye Etkisi

Tablo 6.2’deki I. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama YKTK değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait Şekil 6.21’deki etki grafikler incelendiğinde, gaz basıncının yeniden katılaşılan tabaka kalınlığı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı, akım ve kesme hızının ise büyük bir etkisinin olduğu görülmektedir. Kesme hızının artması ile YKTK düşmektedir. Yüksek kesme hızında, lazer ışını ile malzeme etkileşim süresi düştüğünden dolayı malzemeye etki eden ısı miktarı da düşer; buna bağlı olarak da daha az malzeme ergitilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak YKTK düşmektedir. Bir başka değişle, ilerleme hızının artmasıyla, ısı iletim süresi düşer ve dolayısıyla ısının meydana getirdiği hasar daha dar bir alanda meydana gelir [125].



Şekil 6.21 Lazer kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi

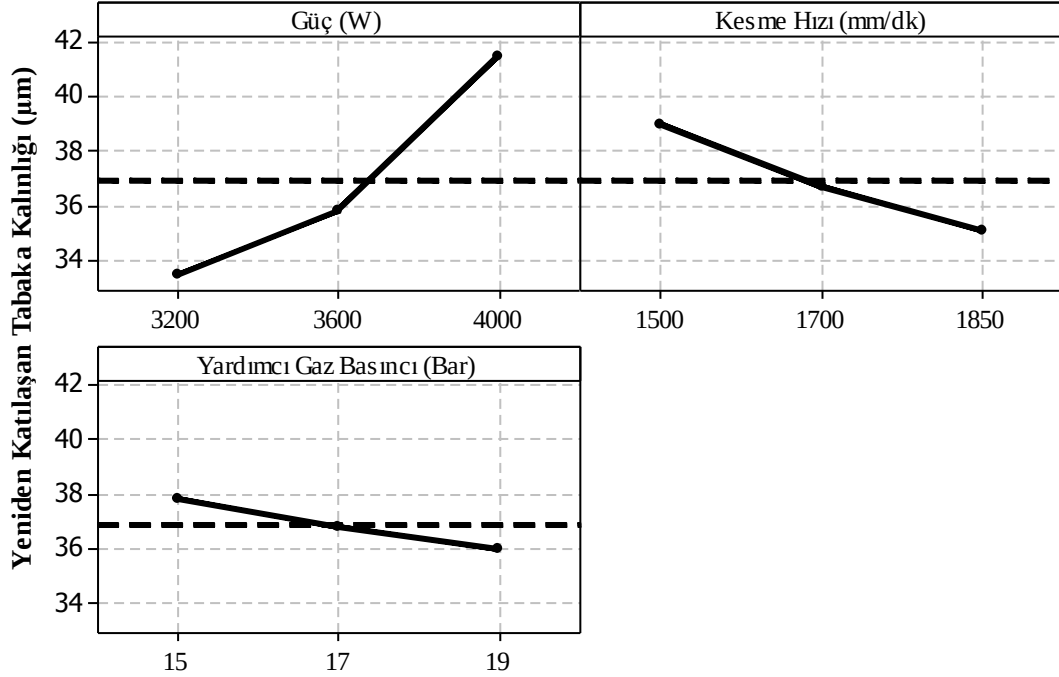
Lazer ışınıyla kesme yönteminde kullanılan parametrelerin etkileri birlikte değerlendirildiğinde, lazer gücü, ilerleme miktarı ve gaz basıncı parametreleri, kesme esnasında iş parçasına giren ısı miktarını belirleyen temel parametreler olduğu açıkça görülmektedir. Düşük güç ve yüksek ilerleme hızlarında, iş parçasına iletilen ısı miktarı düşük olacağından, YKTK da düşük olmaktadır. Ayrıca, gaz basıncının artmasıyla lazer-iş parçası etkileşim bölgesindeki ergimiş metalin yüzeyinde soğutma etkisi sağlandığından, YKTK da azalmaktadır [126]. Şekil 6.22'de deney parametrelerinin YKTK üzerindeki etkilerini gösteren SEM görüntüleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, gücün sabit olduğu durumlarda, kesme hızının artmasıyla YKTK düşmekte ve sabit kesme hızında, lazer gücünün artmasıyla YKTK artmaktadır.



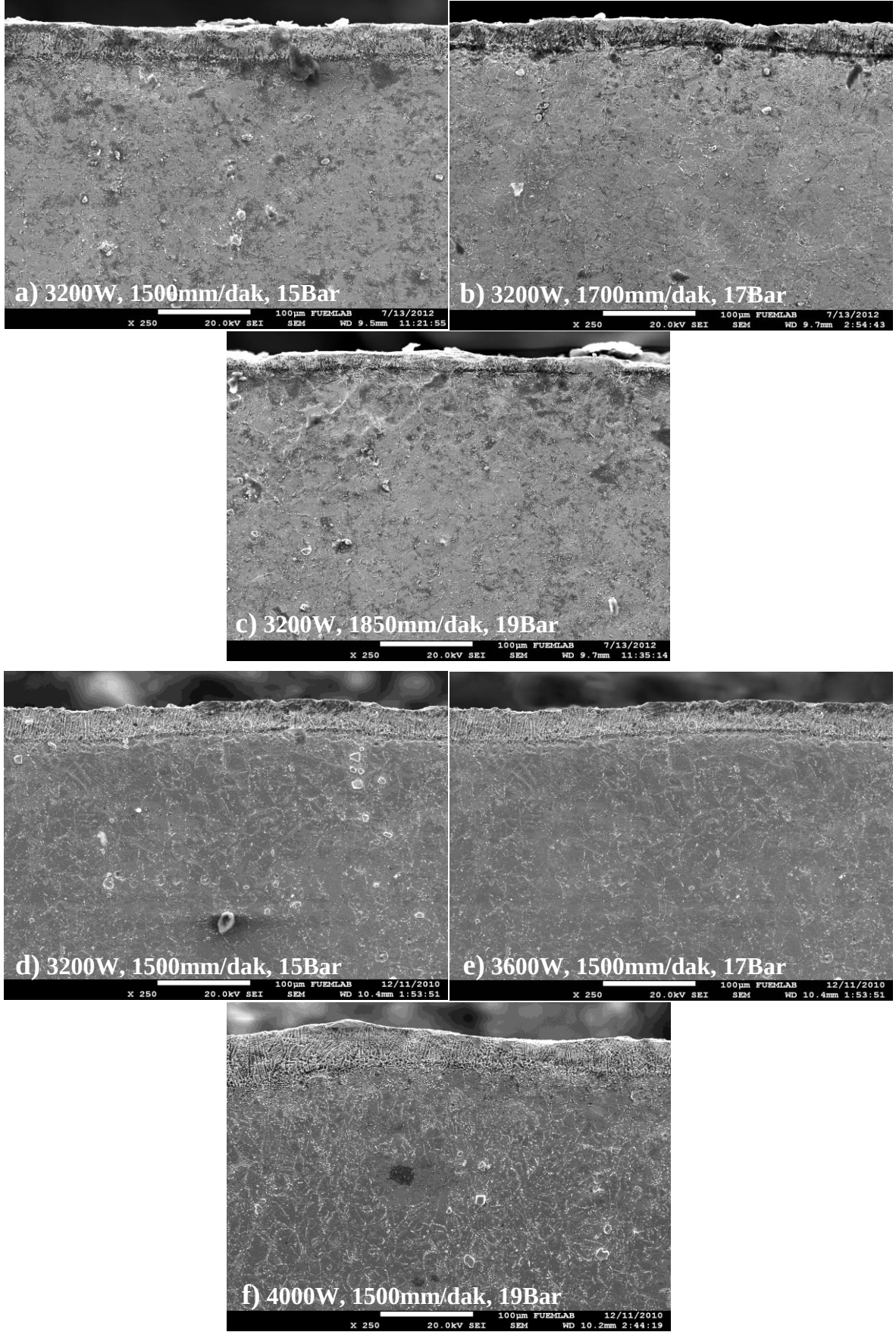
Şekil 6.22 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

6.2.2.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Şekil 6.23'de, II. grup numuneler için lazer ışını ile kesme parametrelerinin YKTK'ye olan etkileri görülmektedir. I. grup numunelere benzer şekilde, kullanılan parametreler, YKTK üzerinde aynı etkiye sahiptir. Şekil 6.24'te görüldüğü gibi sabit güç yoğunluğunda, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla YKTK düşerken, gücün artmasıyla YKTK da artmaktadır. Ancak, aynı kesme şartlarında, I. grup numunelerde YKTK 30,9 μm ila 42,7 μm arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık 30,2 μm ila 42,4 μm ' e düşmektedir. Bu düşüş, malzemenin düşük termal iletkenliğine bağlıdır. Malzemenin düşük termal iletkenliği nedeniyle, kesme esnasında oluşan ısı malzeme içine doğru yayılmadığından ısıl harisların daha dar bir bölgede oluşmasına neden olmaktadır [127].



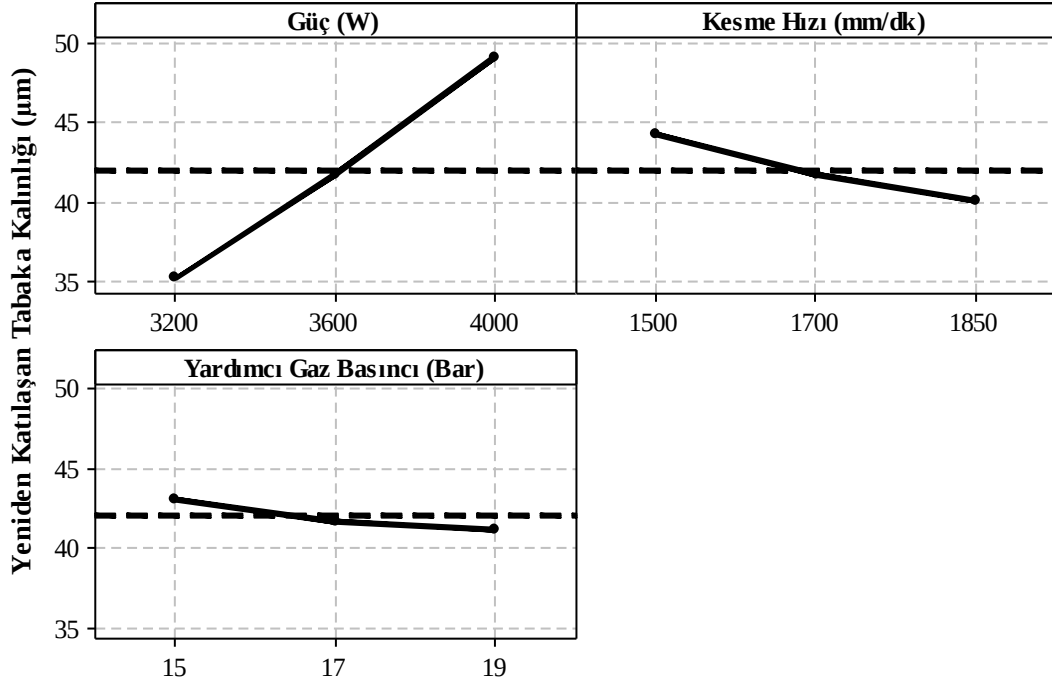
Şekil 6.23 Lazer kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi



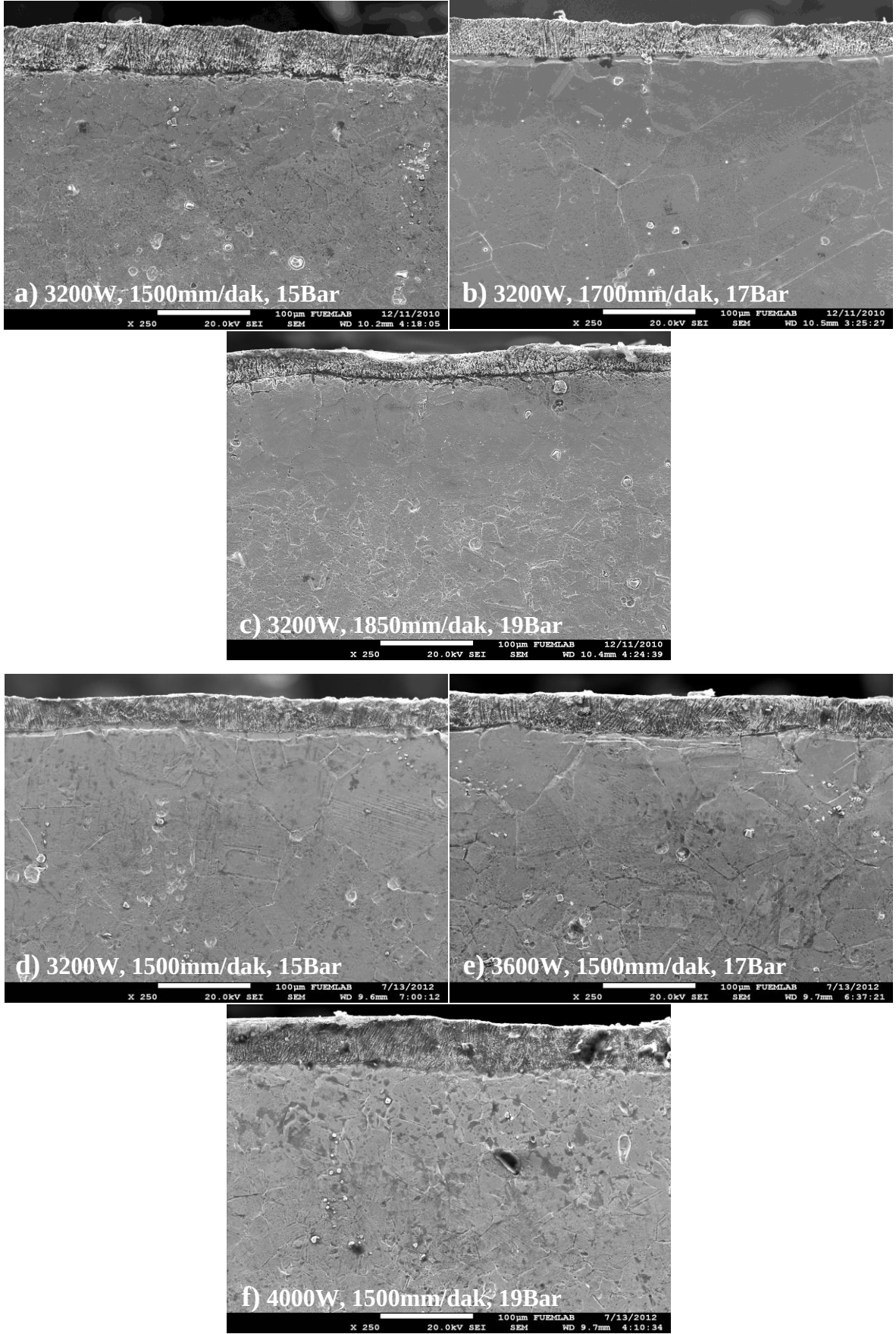
Şekil 6.24 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

6.2.2.3.III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Tablo 6.2'deki III. grup numunelere ait YKTK değerleri ve bu değerlere ait grafik (şekil 6.25) incelendiğinde, I. ve II. grup numunelerde gözlemlendiği gibi, kesme hızının ve gaz basıncının artmasına bağlı olarak YKTK azalmakta, gücün artmasıyla YKTK artmaktadır.



Şekil 6.25 Lazer kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi



Şekil 6.26 III. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

Şekil 6.26'deki III. grup numunelere ait SEM fotoğrafları, sabit lazer gücünde, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla YKTK' nin azaldığını, sabit kesme hızında gücün artmasıyla YKTK' nin arttığını göstermektedir. Ancak bu değişikliğin I. ve II. grup numunelere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. I. grup numunelerde ortalama yeniden katılaştıran tabakanın kalınlık değerleri 30,9 μm ile 42,7 μm arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık 30,2 μm ile 42,4 μm ' e düşmekte, III. grup numunelerde ise 31,9 μm ile 50,1 μm aralığında olmaktadır. Bu artış, aynı kesme şartlarında malzemenin ısı iletkenlik değeriindeki artışa bağılı olarak YKTK' nin arttığını ortaya koymaktadır. J. Grum vd. [127] yapmış oldukları çalışmada, düşük karbonlu çelik ile yüksek alaşımlı ostenitik paslanmaz çeliğin lazer ile kesilmesinde termal etkileri araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda, termal iletkenliği daha düşük olan yüksek alaşımlı ostenitik paslanmaz çeliğin kesme kenarında daha yoğun ısı oluştuğunu ve bunun sonucunda da daha fazla malzeme ergitilerek kesme boşluğundan uzaklaştırıldığını belirtmişlerdir.

6.2.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Termal işleme neticesinde, ısının etkisiyle kesme bölgesinde meydana gelen en önemli değişikliklerden birisi de malzemedeki mikrosertlik değişimidir. Mikrosertlik, termal kesme sonucunda kesme bölgesinde oluşan yeniden katılaştıran ve/veya ısıdan etkilenen bölgelerde ana malzemeye nazaran farklılık göstermektedir. Tablo 6.3'de lazer ışını ile kesilen I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama mikrosertlik değeri toplu şekilde verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi, ısı işlem görmemiş I. grup numunelerde, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeyle benzerlik gösterirken, YKTK' nin sertliği ana malzemeye göre artmıştır. Bilindiği gibi, Ni esaslı alaşımlar çözündürme ısı işleminin ardından yüksek sıcaklık ve soğuma süresinde çökelme sertleşmesi uygulanarak güçlendirilirler. I. grup numunelerdeki YKTK' nin sertlik artışı da malzemenin kesme bölgesinde aşırı ısınma ve soğuma neticesinde kısmen γ' ikincil fazların ve karbürlerin çökmesi neticesinde bu bölgede yaşlandırma sertleştirmesinin kısmi etkilerinin meydana geldiği düşünülmektedir. II. ve III. grup numunelerde ise YKTK' nin mikrosertliği ana malzemeye nazaran azda olsa düşmüştür. Bunun sebebi, numunelere uygulanan ısı işlemler sonunda yapıda oluşan γ' ikincil fazların ve karbürlerin, kesme esnasında oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile kısmen ana matris içerisinde yeniden çözünmesi olarak düşünülmektedir.

Tablo 6.3. Lazer ışıını ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri

Malzeme	Ölçüm Yapılan Alan	Deney No								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
I. Grup	YKB	240	248	245	262	252	304	287	289	266
	IEB	235	237	234	223	236	234	230	234	236
	Ana Malzeme	230	230	235	233	238	230	233	230	234
II. Grup	YKB	338	315	364	408	360	410	393	354	342
	IEB	360	374	332	424	376	406	358	461	418
	Ana Malzeme	408	410	403	412	400	410	419	406	410
III. Grup	YKB	447	410	410	443	435	404	435	417	420
	IEB	428	436	440	457	471	448	414	425	410
	Ana Malzeme	478	442	455	474	466	455	449	454	458

Thomas R. Newton vd. [62] yapmış oldukları çalışmada, yaşlandırma sertleşmesi uygulanmış Inconel 718 alaşımının tel erozyon ile kesilmesinde işlem parametrelerinin yeniden katılaştıran tabakanın karakteristiklerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, YKTK' nın mikrosertliğinin ana malzemeye nazaran düşük olduğunu rapor etmişlerdir. Garofano vd. [128], Inconel 100 süperalaşımın lazer ile delinmesinde yeniden katılaştıran bölgenin mikroyapısal değişimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yeniden katılaştıran bölgenin mikrosertliğinin ana malzemeye nazaran düşük olduğunu rapor etmişlerdir.

6.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

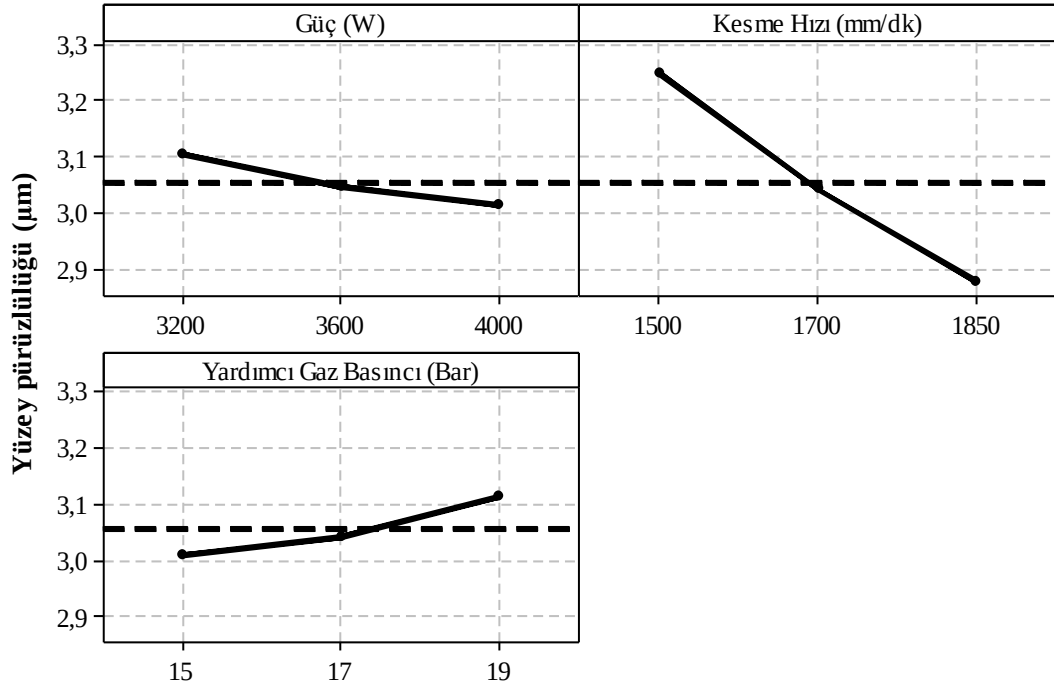
Lazer ışıını ile kesme işleminde, ergiyen metal, gaz basıncı yardımıyla kesme bölgesinden uzaklaştırılırken, kesilen yüzeyde, parça kalınlığı boyunca kanal ve çizik görünümlü profiller oluşmaktadır. Meydana gelen bu profillerin derinlik ve genişliği; kesme işleminde kullanılan lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla bu çiziklerin derinlik ve genişlikleri işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğünü değiştirmektedir. Tablo 6.4'de I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 6.4. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Deney No	Deney Parametreleri (Güç-W, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra- μ m)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	3200 W, 1500 mm/dk, 15 Bar	3,24	3,43	3,01
2	3200 W, 1700 mm/dk, 17 Bar	3,12	3,08	2,59
3	3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar	2,95	2,80	2,45
4	3600 W, 1500 mm/dk, 17 Bar	3,19	3,20	2,78
5	3600 W, 1700 mm/dk, 19 Bar	3,08	3,11	2,53
6	3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar	2,87	3,02	2,41
7	4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar	3,21	3,10	2,69
8	4000 W, 1700 mm/dk, 15 Bar	2,92	3,25	2,60
9	4000 W, 1850 mm/dk, 17 Bar	2,81	2,75	2,40

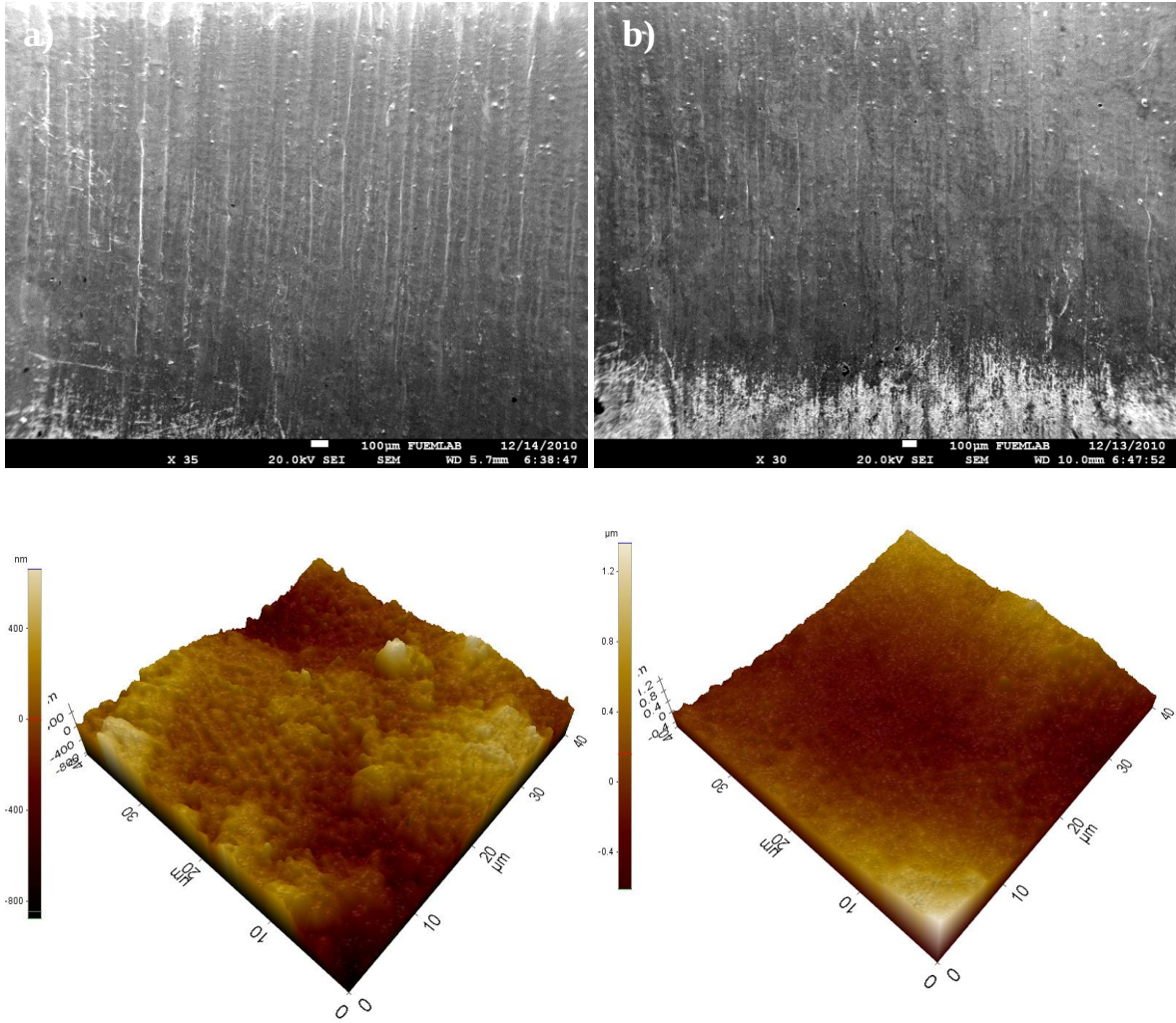
6.2.4.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.27’de I. grup numuneler için kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, kesme hızının pürüzlülük üzerinde büyük bir etkisi vardır. Grafikler ve tablo 6.4’teki değerler birlikte değerlendirildiğinde, sabit güç yoğunluğunda, ilerleme ve gaz basıncının artmasıyla pürüzlülük düşmektedir. Sabit güç yoğunluğunda oluşan ısının, düşük ilerleme hızlarında malzeme yüzeyinde daha yoğun olmakta ve böylece daha fazla hacimde malzeme ergitilerek kesme kanalından uzaklaştırılmaktadır. Kesilen yüzeyde oluşan çiziklerin daha geniş periyotlu ve daha derin olmasına; yüksek ilerleme hızlarında yapılan kesme işleminde ise, bu çiziklerin nispeten daha yüzeysel ve kısa periyotlar şeklinde oluşmasından dolayı pürüzlülüğün düştüğü söylenebilir. Bu yöntemde daha önce yapılan çalışmalarda [129,130] ilerleme hızının ve N₂ gaz basıncının artmasıyla daha pürüzsüz bir yüzeyin elde edildiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, düşük ilerleme hızında (1500mm/dk), gücün ve gaz basıncının artmasıyla (4000W, 19Bar) pürüzlülüğün arttığı görülmektedir. Yüksek güç ve düşük ilerleme nedeniyle kesme bölgesinde oluşan yüksek enerji daha fazla metalin ergitilmesine, yüksek gaz basıncı ile daha fazla eriyik metal ara bölgeden uzaklaştırıldığından meydana gelen çiziklerin daha derin ve geniş olmasına neden olmaktadır. Ancak, yüksek güç seviyelerinde ilerlemenin ve gaz basıncının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün tekrar iyileştiği gözlenmiştir. Bu durum, enerjinin artmasına bağlı olarak daha akışkan haldeki eriyik malzemenin, yüksek gaz basıncının yaratmış olduğu yüksek mekanik kuvvetler vasıtasıyla yüzeye yayılması neticesinde pürüzlülüğün düştüğü düşünülmektedir.



Şekil 6.27 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Lazer ışını ile kesme deneylerinde numunelerin yüzey pürüzlülüğü 2,81-3,24 μm aralığında değişmektedir. En kaba yüzey 1 nolu deney sonucunda elde edilirken, en iyi yüzey pürüzlülüğüne sahip kesme işlemi 9 nolu deney sonucunda elde edilmiştir. Bu numunelere ait yüzey görüntüleri Şekil 6.28’de verilmiştir.

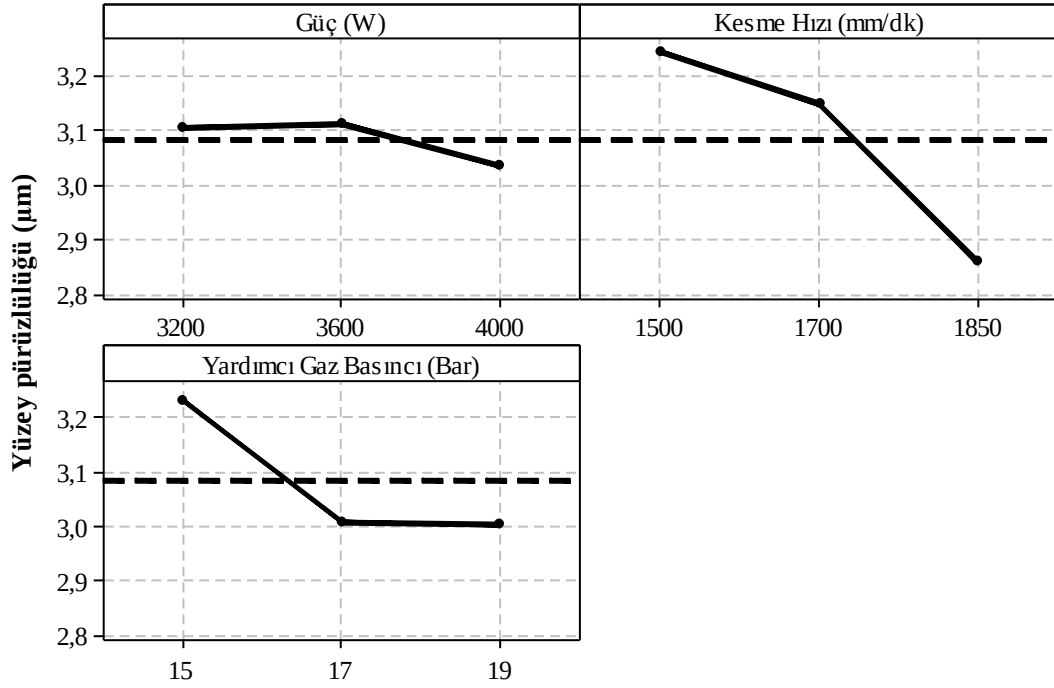


Şekil 6.28 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , d: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

6.2.4.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

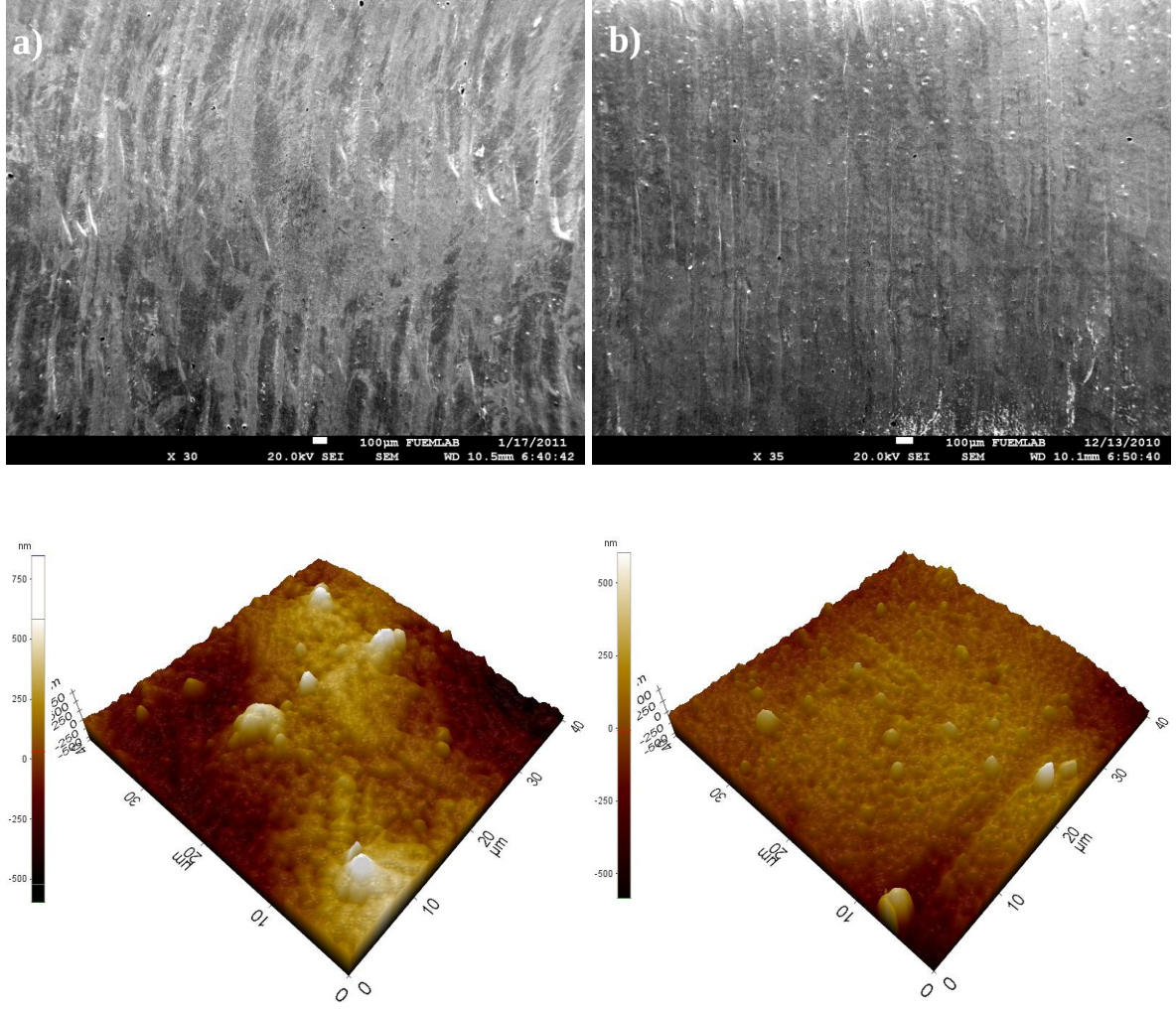
Şekil 6.29’da II. grup numunelere ait kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, II. grup numunelerde de lazer kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4’deki kesme parametrelerine bağlı olarak değişen pürüzlülük değerleri toplu olarak değerlendirildiğinde, işlem parametrelerinin (güç, kesme hızı, basınç) artmasıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Ancak, bu değişiklik I. grup numunelere ait pürüzlülük değerlerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bu artış, II. grup numunelere uygulanan ısıtma işlemi sonucunda malzemenin termal iletkenliğinin düşmesi ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 6.29 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Daha önceki bölümlerde malzeme kaldırma oranı ile malzemenin ısı iletkenliği arasında ters bir orantının olduğundan bahsetmiştik. Malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik, lazer ışınının temas ettiği bölgede oluşan ısının malzeme içine dağılmadan kesme kenarında yoğunlaşması neticesinde, birim zamanda daha fazla malzeme ergiyerek gaz basıncı yardımıyla kesme bölgesinden daha fazla eriyik malzeme uzaklaştırılmış olur. Bunun neticesinde daha pürüzlü bir yüzey ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.30'da II. grup numunelerin parametrelere bağlı olarak değişen yüzeylerin SEM ve AFM görüntüleri verilmiştir.

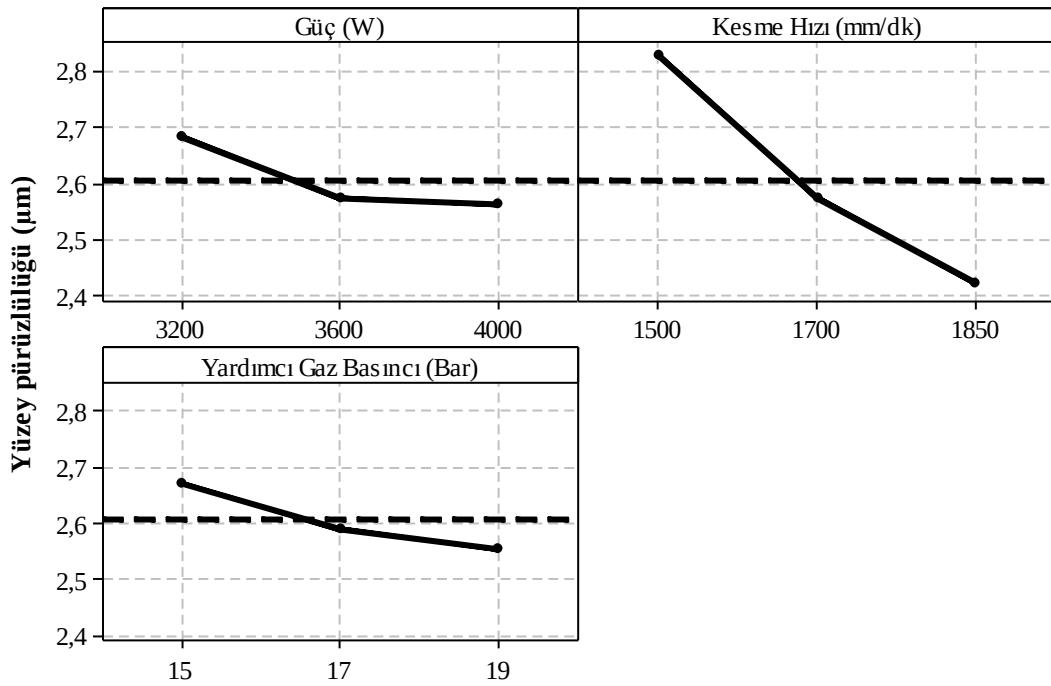


Şekil 6.30 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

6.2.4.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

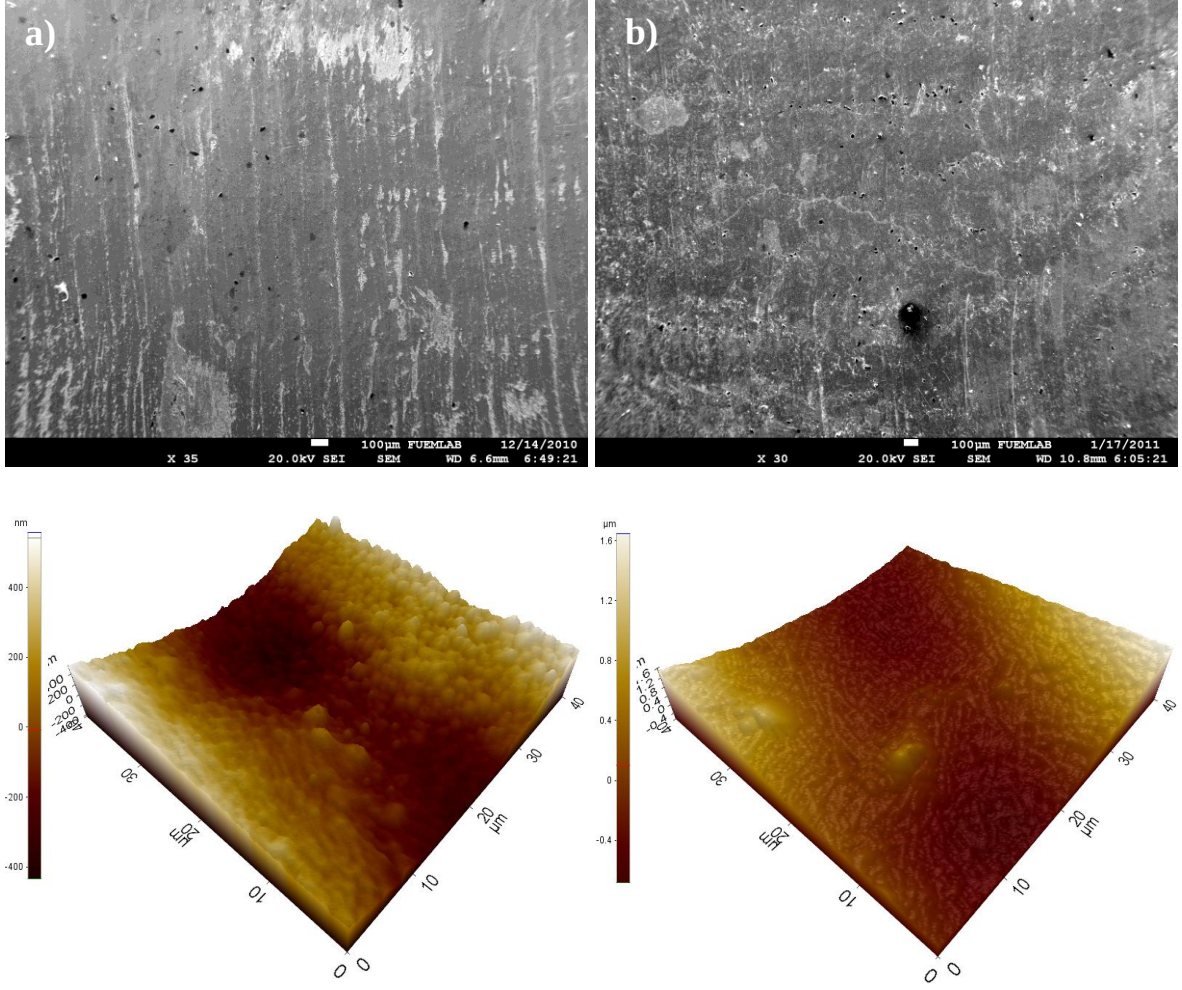
Tablo 6.4'deki III. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama pürüzlülük değerleri ve bu değerlere ait Şekil 6.31'deki grafik incelendiğinde I.ve II. grup numunelerde gözlendiği gibi, kesme hızının artması ile pürüzlülük değerinde bariz bir iyileşmenin olduğu ve aynı şekilde gaz basıncının ve gücün artması da yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü saptanmıştır. Ancak tablo 6.4'deki değerler incelendiğinde III. grup numunelere ait pürüzlülük değerlerinin I. ve II. grup numunelere nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu düşüşün, aynı kesme şartlarında malzemenin ısı iletkenlik değerindeki artışa bağlı olduğu düşünülmektedir. S.L. Chen vd. [131] yapmış oldukları çalışmada, TiNiCr ve TiNiZr şekil hafızalı metallerin EDM ile işlenebilirliğini araştırmışlardır. Araştırmalarında, malzemelerin ergime sıcaklığı ve ısı iletkenlik

iletkenlik katsayılarının ($T_{(-)} \times K_T$) işlenebilirlik üzerindeki etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Yüksek ergime sıcaklığının, daha az erimeye ve buharlaşmaya. Yüksek termal iletkenliğin ise, ısının matris içerisine daha fazla yayılmasına sebep olduğu, bundan dolayı birim zamanda daha düşük malzeme kaldırma oranı elde edildiğini ifade ederek iletkenlik ile malzeme kaldırma oranı ve pürüzlülük arasındaki ilişkiyi; $T_{(-)} \times K_T = Ti_{50}Ni_{50} < Ti_{51}Ni_{49} < Ti_{50}Ni_{49.5}Cr_{0.5} < Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr_{15}$, MKO ve $Ra = Ti_{50}Ni_{50} > Ti_{51}Ni_{49} > Ti_{50}Ni_{49.5}Cr_{0.5} > Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr_{15}$ şeklinde ifade etmişlerdir.



Şekil 6.31 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.32’de lazer ışını ile kesme işleminde kullanılan parametrelerin artışına bağlı olarak pürüzlülükteki iyileşmeyi gösteren III. grup numunelere ait yüzeylerin SEM ve AFM görüntüleri verilmiştir. III. grup numunelerde yüzey pürüzlülük değerleri, 2,40µm – 3,01µm aralığında değişirken, II. grup numunelerde 2,75µm – 3,43µm, I. grup numunelerde ise 2,40-3,01 µm aralığında değişmektedir. Ref. [131]’deki sonuçlarda bizim çalışmamızın doğruluğunu desteklemektedir.



Şekil 6.32 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneyle ilgili işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneyle ilgili işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

6.2.5. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Lazer ışını ile kesilen numunelerde kerf genişliği ölçümleri, kerf boyunca üst kerf üzerinden farklı noktalardan ölçülerek bu ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Ölçümler neticesinde, kesme mesafesi boyunca uçtan sona doğru gidildikçe kerf genişliğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu da, kesme işlemi esnasında ısının iş parçasında birikmesi ve lazer ışınında meydana gelen sapmalar neticesinde oluşmaktadır [32].

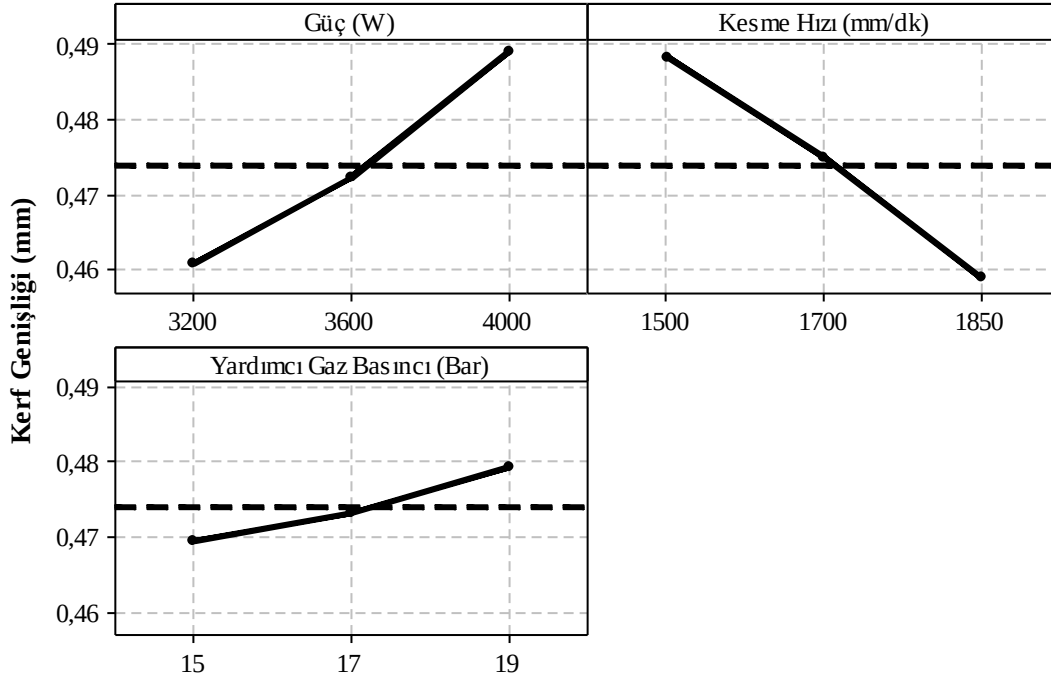
Tablo 6.5’de I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama kerf üst genişliği değerleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 6.5. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri

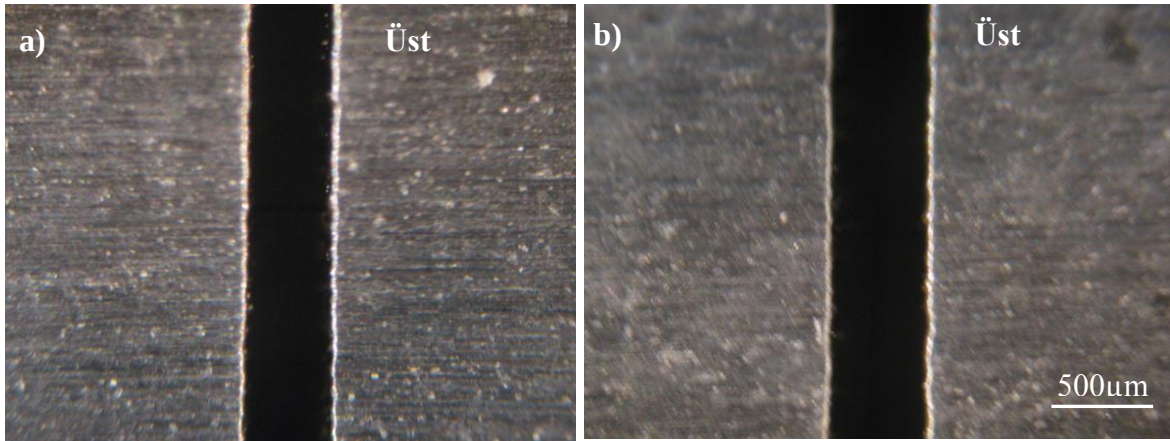
Deney No	Deney Parametreleri (Güç-W, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama Kerf Genişliği (mm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	3200 W, 1500 mm/dk, 15 Bar	0,4680	0,4927	0,4352
2	3200 W, 1700 mm/dk, 17 Bar	0,4604	0,4988	0,4270
3	3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar	0,4536	0,4780	0,4060
4	3600 W, 1500 mm/dk, 17 Bar	0,4882	0,5262	0,4514
5	3600 W, 1700 mm/dk, 19 Bar	0,4760	0,5104	0,4348
6	3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar	0,4560	0,4893	0,4266
7	4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar	0,5082	0,5576	0,4792
8	4000 W, 1700 mm/dk, 15 Bar	0,4880	0,5198	0,4490
9	4000 W, 1850 mm/dk, 17 Bar	0,4706	0,5010	0,4322

6.2.5.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Tablo 6.5’deki I. grup numunelere ait değerlerin grafikleri Şekil 6.33’de verilmiştir. Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi, I. grup numunelere ait ortalama kerf üst genişliği, gücün artması ve kesme hızının düşmesi ile önemli derecede artmaktadır. Yüksek güç seviyelerinde, oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme kaldırılmış olur [132]. Diğer taraftan, sabit güç yoğunluğunda oluşan ısı, düşük ilerleme değerlerinde malzeme yüzeyinde yoğunlaşmakta ve daha fazla hacimde malzeme ergiyerek kerf genişliği artmaktadır. Benzer sonuçlar, Lamikiz vd. [35] tarafından da belirtilmiştir. I. grup numuneler içerisinde en düşük ve en yüksek kerf genişlikleri sırasıyla 0,4536 (3 nolu deney) ve 0,5082 mm (7 nolu deney) olarak ölçülmüştür. Bu numunelere ait görüntü şekil 6.34’de verilmiştir.



Şekil 6.33 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

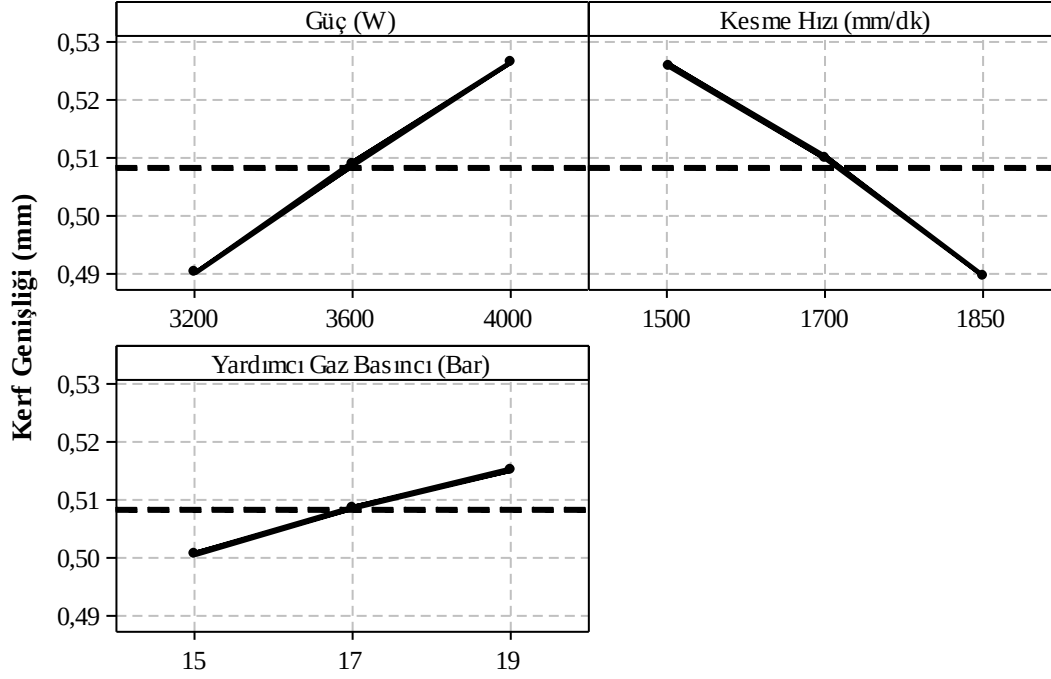


Şekil 6.34 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)

6.2.5.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

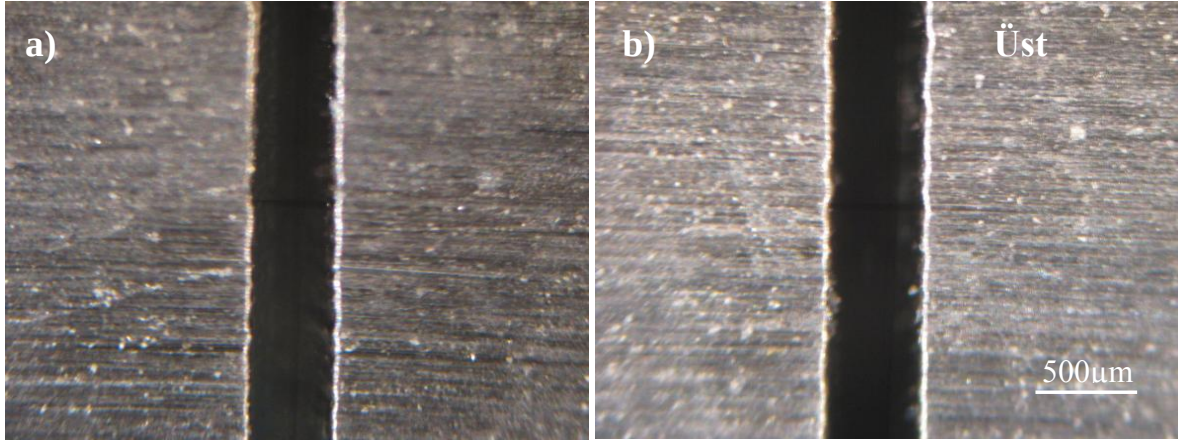
Tablo 6.5’de II. grup numunelere ait ortalama kerf genişliği değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise şekil 6.35’de verilmiştir. Şekil ve tablo değerleri incelendiğinde, I. grup numunelerde gözlemlenen benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, II. grup numunelere ait kerf genişliği değerlerinin nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. Bu artış, II. grup numunelere uygulanan ısıtıl işlem sonucunda malzemenin

termal iletkenliğinin düşmesi ile ilişkilendirilebilir. termal iletkenliğin düşmesi ile, bölgede oluşan ısı, birim zamanda daha fazla malzemenin ergimesine neden olmakta ve buna bağlı olarak da kerf genişliği artmaktadır.



Şekil 6.35 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

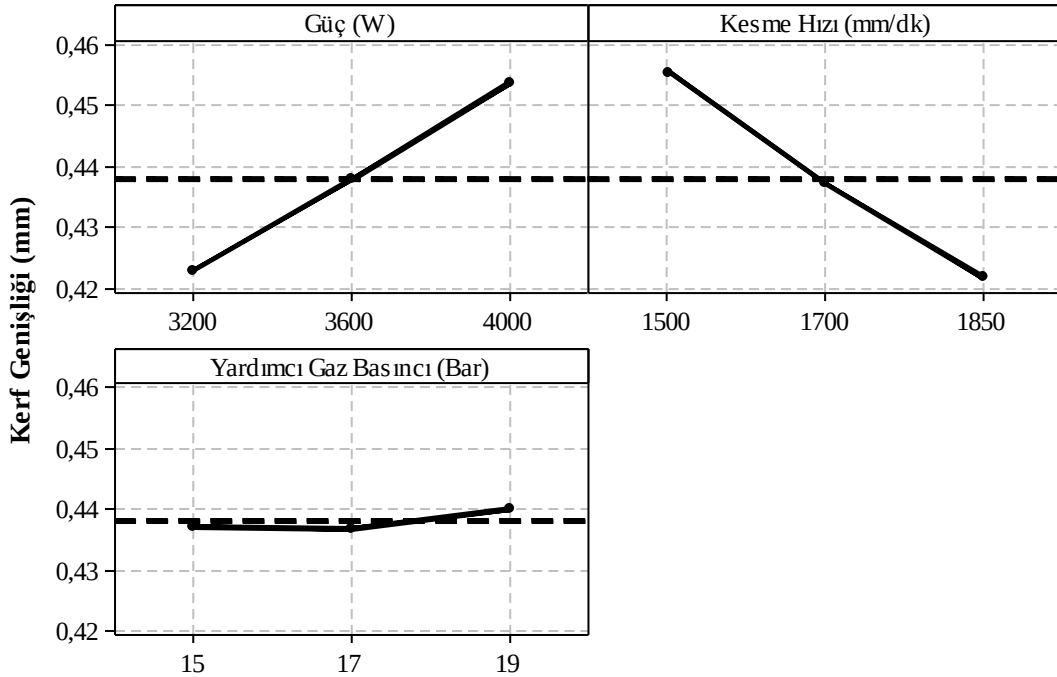
Şekil 6.36’da fotoğraf görüntüleri verilen II. grup numunelerde kerf genişliği, lazer gücünün en düşük (3200 W), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (1850 mm/dk, 19 Bar) 3 nolu deney şartlarında 0,4780 mm olarak ölçülürken, bu değer I. grup numunelerde 0,4536 mm’dir. Aynı şartlarda en yüksek kerf genişliği değeri I. grup numunelerde 0,5082 mm iken, II. grup numunelerde 0,5576mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.36 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)

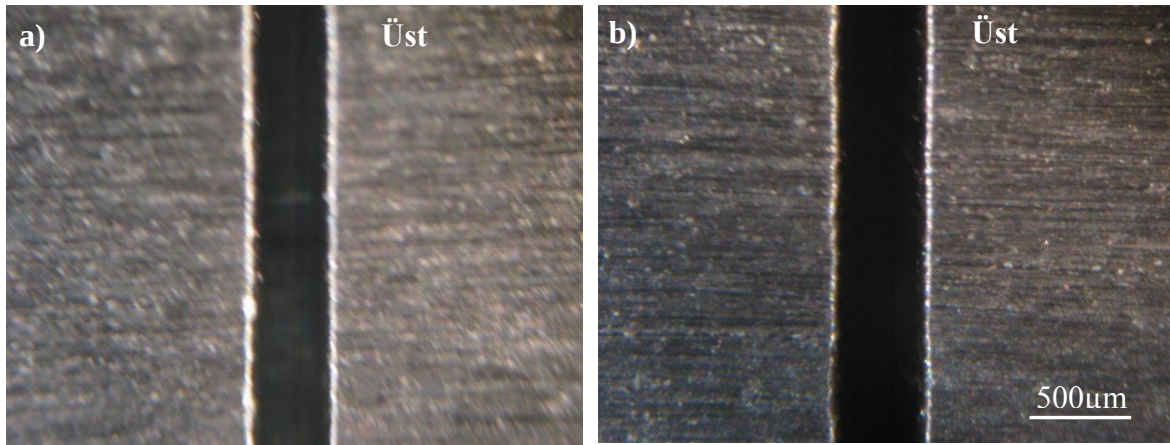
6.2.5.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Şekil 6.37’de III. grup numunelere ait ortalama kerf genişliğine olan etkileri görülmektedir. I. ve II. grup numunelere benzer şekilde, kesme hızının artmasıyla kerf genişliğinin düştüğü, öyle ki bu durumun yüksek güç yoğunluğunda da değişmediği gözlenmektedir. Yüksek güç yoğunluğunun kesme bölgesinde kaldırılan malzeme miktarını arttırması sonucunda kerf genişliği artmaktadır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalar tarafından da desteklenmektedir [132-134].



Şekil 6.37 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

Kerf genişliğindeki bu değişim, malzemeye uygulanan ısı işlemin bir sonucu olarak, düşen ısıl iletkenlik değeriyle ters orantılı bir şekilde diğer numunelere nazaran daha yüksek olmuştur. En düşük ve en yüksek kerf genişliklerinin görüldüğü şekil 6.38’de, en düşük kerf genişliği; lazer gücünün en düşük (3200 W), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (1850 mm/dk, 19 Bar) 3 nolu deney şartlarında 0,4060 mm olarak ölçülürken, bu değer II. grup numunelerde 0,4780 mm, I. grup numunelerde ise 0,4536 mm’dir. En yüksek kerf genişliği ise lazer gücünün en yüksek (4000 W), kesme hızının en düşük (1500 mm/dk) olduğu 7 nolu deney şartlarında 0,4792 mm iken II. grup numunelerde 0,5576 mm, I. grup numunelerde ise 0,5082 mm’dir. Bu sonuçlar da aynı kesme şartlarında malzemenin ısıl iletkenlik değerindeki değişime bağlı olarak kerf genişliğinin değiştiğini ortaya koymaktadır. S.L. Chen vd. [67] yapmış oldukları çalışmada, termal kesme işleminde malzemelerin sahip oldukları yüksek ergime sıcaklığı ve düşük termal iletkenliğinden dolayı daha az erime ve buharlaşmanın olduğunu, yüksek termal iletkenliğin ise, ısının malzeme içine doğru daha hızlı dağılmasından dolayı malzeme kaldırma oranının daha az olmasına neden olduğunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 6.38 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar, b: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar)

Yardımcı gaz basıncının kerf genişliği üzerindeki etkisine bakıldığında, kullanılan (N_2) gaz basıncı, ergimiş metal kütlelerinin kesme boşluğundan uzaklaştırılmasını arttırdığı kadar oluşacak oksidasyon reaksiyonunu da düşürmektedir. Bunun sonucunda, yardımcı gazın artmasıyla kerf genişliğinde hafif bir artış görülmektedir. Yüksek yardımcı gaz basıncı kesme kanalından uzaklaştırılan ergimiş metal kütlelerini artırır ve havadaki oksijen

konsantrasyonunu düşürerek kesme bölgesinde meydana gelecek oksidasyonu önlemektedir [133].

6.2.6. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları

Lazer ışını ile kesilen numunelerin üst ve alt kerf genişliği ölçüm sonuçlarında, tüm kesme şartlarında da üst kerf genişliğinin alt kerf genişliğinden daha büyük olduğu ve bu da lazer ışını ile kesmede kesme kanalının konik bir profilde olduğunu ortaya koymaktadır. Üst ve alt kerf genişliğinde meydana gelen bu değişimin, kesme kalınlığı boyunca ışın yoğunluğunun ve gaz basıncının düşmesi, ışın odağının bozulması neticesinde ortaya çıktığı düşünülmektedir. Lazer ışını ile kesmede, kerf genişliği (K_u , K_a) ve kerf eğim açısı ($K_{e.a.}$) kesme kalitesini belirleyen temel karakteristiklerdir. Kesme parametrelerinin kontrolü ile optimum kesme kalitesi elde edilebilmektedir.

Tablo 6.6’da I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama kerf eğim açısı değerleri toplu olarak verilmiştir.

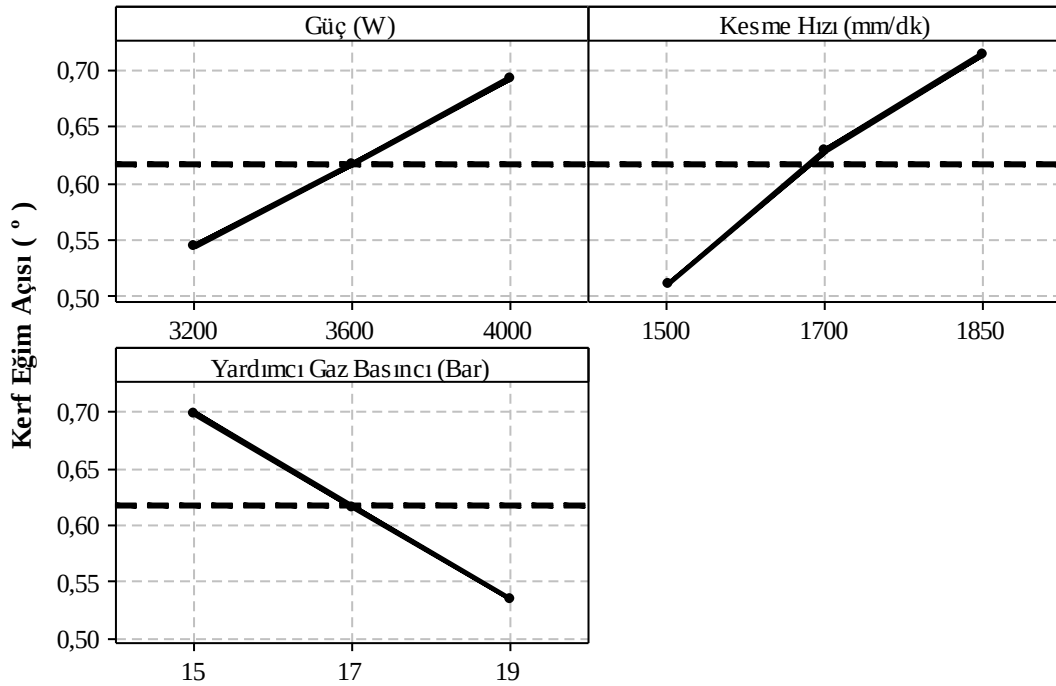
Tablo 6.6. Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı değerleri

Deney No	Deney Parametreleri (Güç-W, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama Kerf Eğim Açısı (°)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	3200 W, 1500 mm/dk, 15 Bar	0,521	0,524	0,488
2	3200 W, 1700 mm/dk, 17 Bar	0,552	0,546	0,509
3	3200 W, 1850 mm/dk, 19 Bar	0,558	0,562	0,559
4	3600 W, 1500 mm/dk, 17 Bar	0,509	0,520	0,512
5	3600 W, 1700 mm/dk, 19 Bar	0,547	0,540	0,536
6	3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar	0,793	0,760	0,752
7	4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar	0,502	0,520	0,482
8	4000 W, 1700 mm/dk, 15 Bar	0,786	0,742	0,710
9	4000 W, 1850 mm/dk, 17 Bar	0,790	0,756	0,746

6.2.6.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

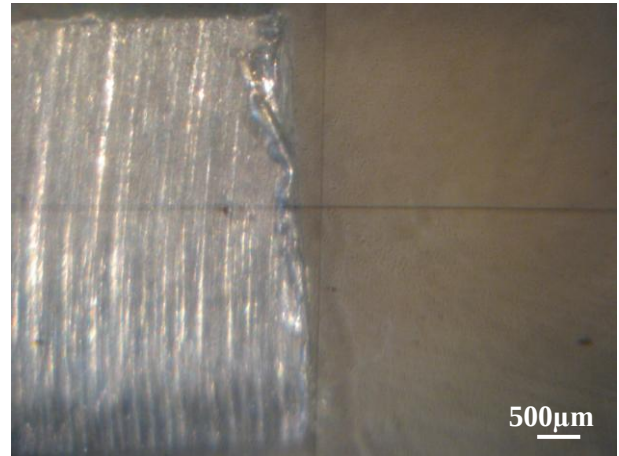
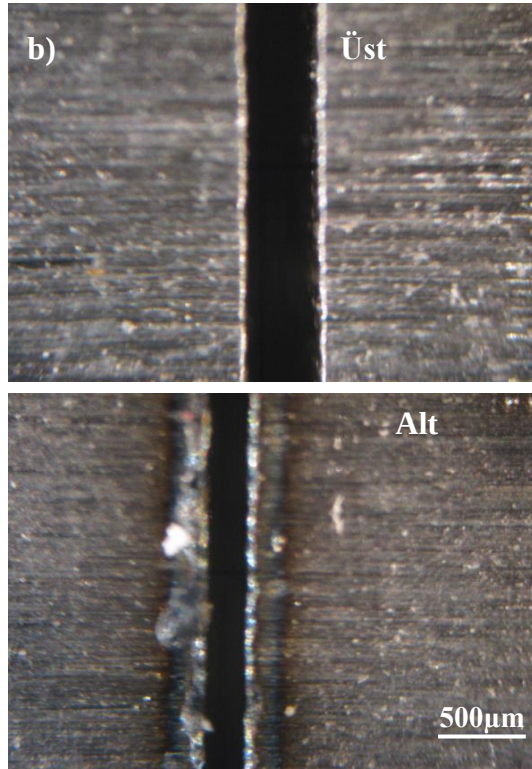
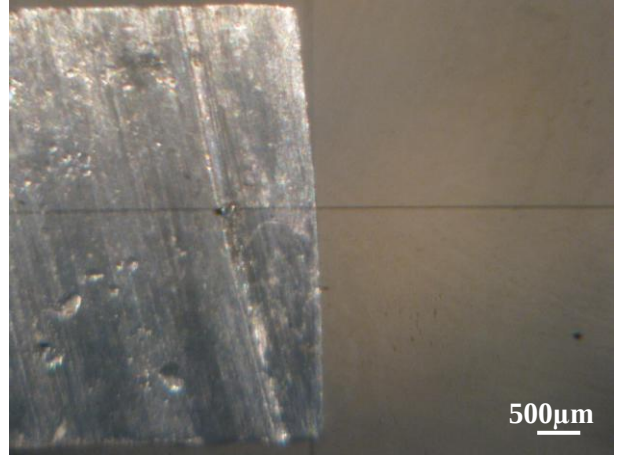
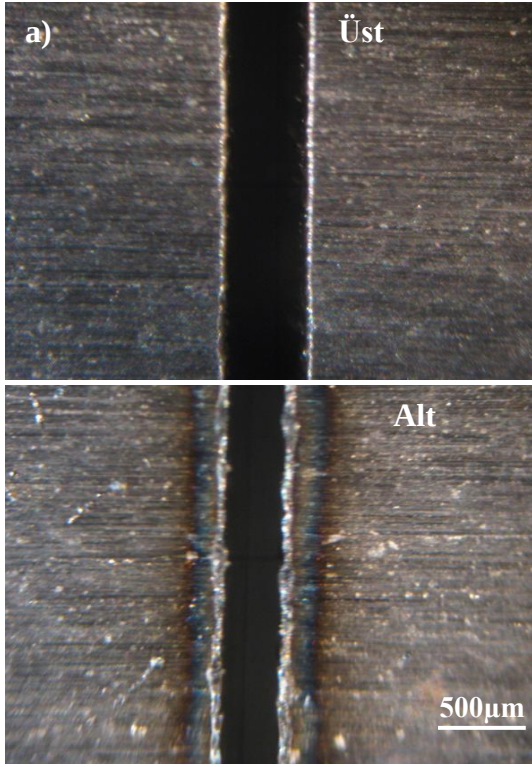
Tablo 6.6’daki değerlere ait grafikler şekil 6.39’da verilmiştir. Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi, ısıtma işlem görmemiş I. grup numunelere ait ortalama kerf eğim açısı, yüksek kesme hızlarında önemli derecede artmaktadır. Lazer ışını ile kesme esnasında, lazer gücü ve kesme hızı kombinasyonu iş parçasına nüfuz eden ısı miktarını belirleyen temel parametrelerdir. Bunun yanı sıra yardımcı gaz basıncının da eriyen metali kesme kanalından dışarı atma ve iş parçasını soğutma etkisi vardır. Şekil 6.39’da verilen grafikler incelendiğinde kesme hızının kerf eğim açısı üzerinde büyük etkisinin olduğu görülmektedir. Lazer ışınının yoğunluğunun, yüksek kesme hızlarında daha da azalması

neticesinde parçanın alt kısımlarına doğru ergitilen malzeme miktarı düşer ve üst kerf genişliğiyle alt kerf genişliği arasında fark oluşur. Ayrıca, kesme hızının düşük, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek olduğu durumda kerf eğim açısı önemli derecede düşmektedir. Bunun sebebi, lazer ışını ile malzeme arasında yeterli etkileşim süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaşmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir[124-126].



Şekil 6.39 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi

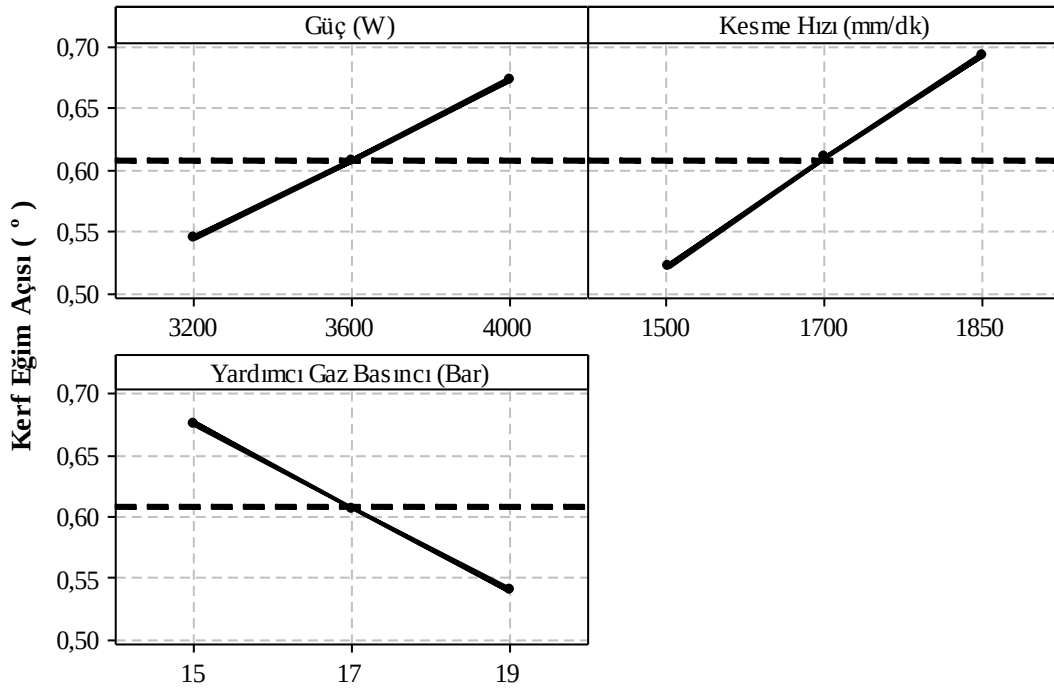
Şekil 6.40'ta I. grup numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en yüksek ve en düşük kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En düşük ortalama kerf eğim açısı, lazer gücünün ve gaz basıncının en yüksek (4000 W, 19 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (1500 mm/dk) 7 nolu deney şartlarında 0,502° olarak ölçülürken, 0,793° olarak ölçülen en yüksek kerf eğim açısı ise lazer gücünün orta (3600 W), kesme hızının en yüksek (1850 mm/dk) ve gaz basıncının en düşük olduğu (15 Bar) 6 nolu deney şartlarında elde edilmiştir.



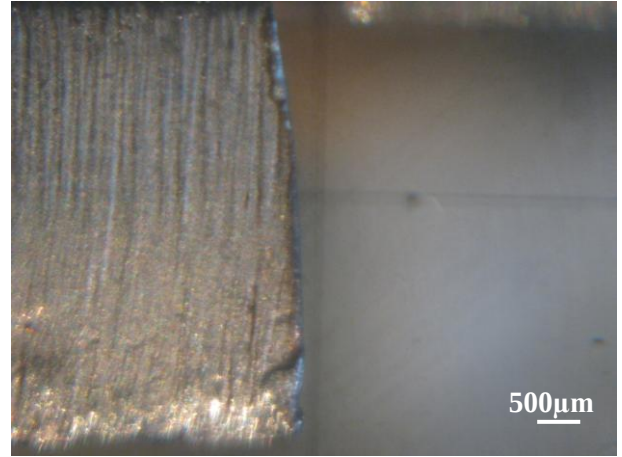
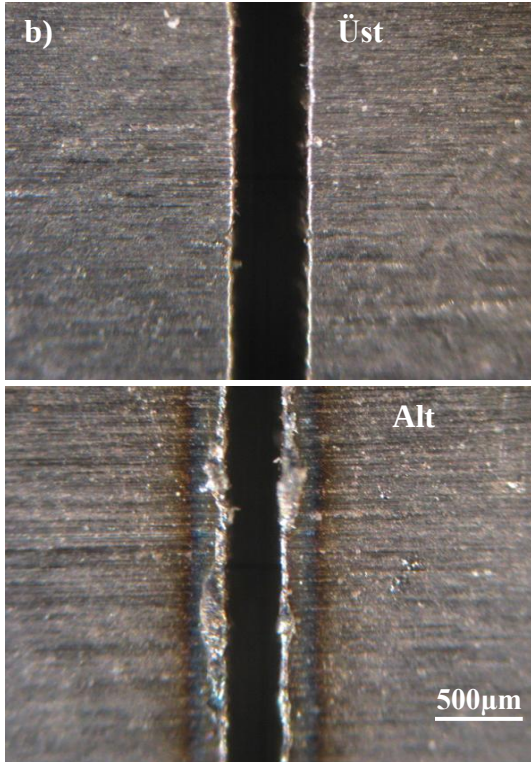
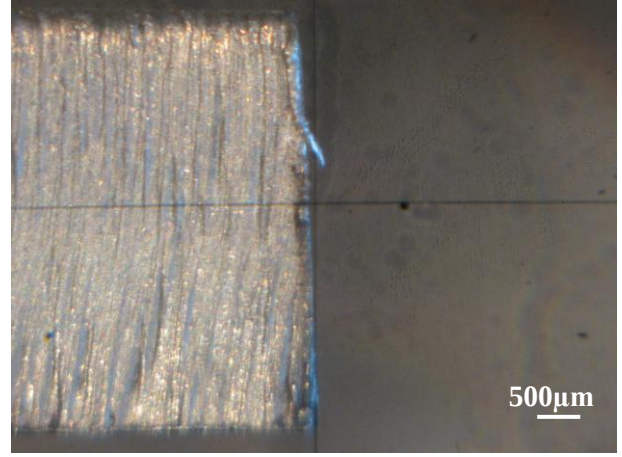
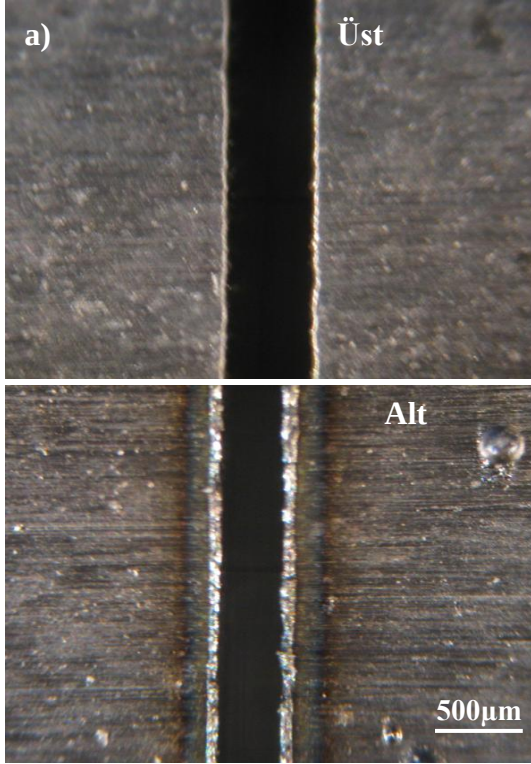
Şekil 6.40 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar)

6.2.6.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

Şekil 6.41’de II. grup numunelerin lazer ışını ile kesme işleminde kullanılan parametrelerinin ortalama kerf eğim açısına olan etkileri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, kesme hızının düşmesi ile eğim açısının düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda, eğim açısının, artan güç yoğunluğu ve gaz basıncıyla da düştüğü tespit edilmiştir. Kesme hızının düşük olduğu durumlarda lazer ışını ile malzeme arasındaki etkileşim tam anlamıyla sağlanmış olur. Böylelikle parça kalınlığı boyunca eritilen malzeme kütlesi yüksek gaz basıncı vasıtasıyla kesme kanalından uzaklaştırılmış olur. Bu durumu, tablo 6.5’teki gaz basıncı ve kesme hızı kombinasyonu sonucunda elde edilen değerler de desteklemektedir. II. grup numunelerde en düşük eğim açısı, şekil 6.42’de fotoğraf görüntülerinin verildiği $0,520^\circ$ olarak ölçülen 4 ve 7 nolu deney sonucunda elde edilmiştir. Bu deneylerdeki parametre kombinasyonu incelendiğinde, her iki deneyde de en düşük kesme ilerlemesinin olduğu görülmektedir. En yüksek eğim açısı ise, 6 nolu deney sonucunda $0,760^\circ$ olarak ölçülmüştür.



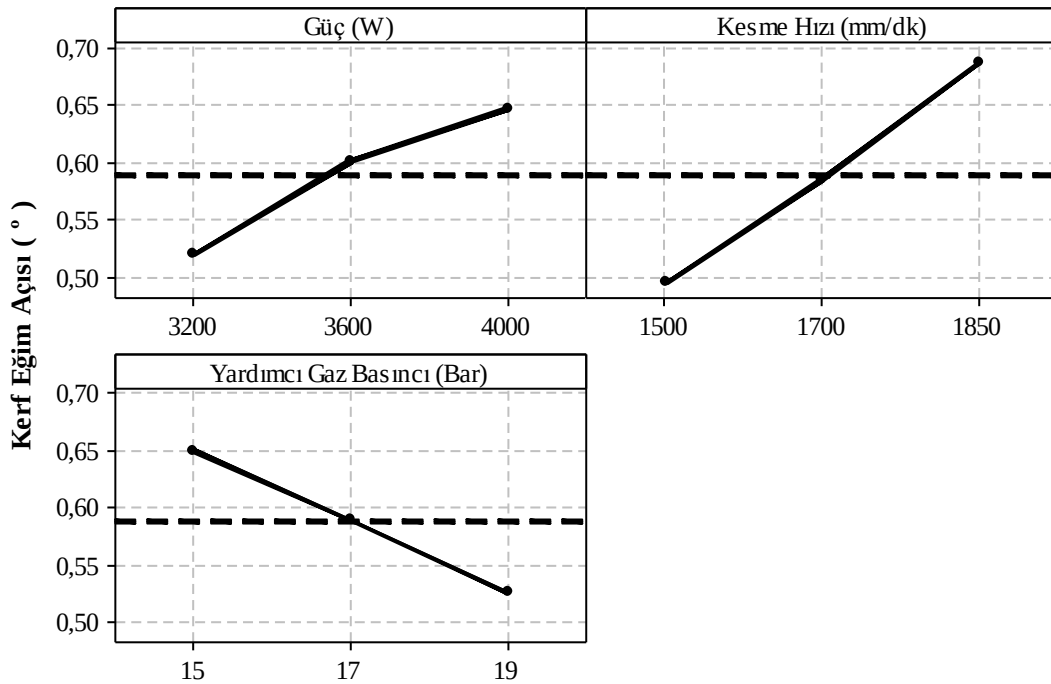
Şekil 6.41 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi



Şekil 6.42 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar)

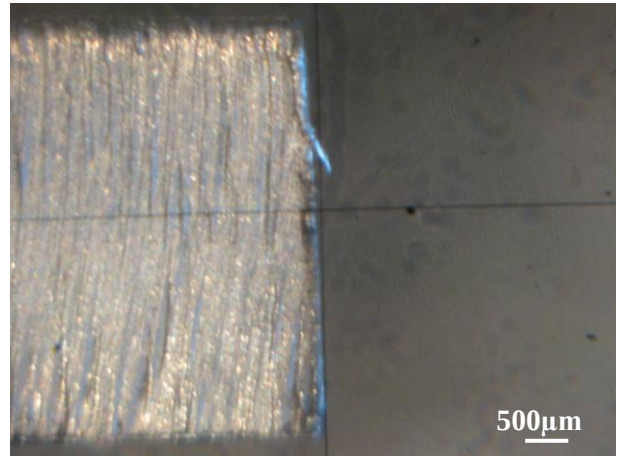
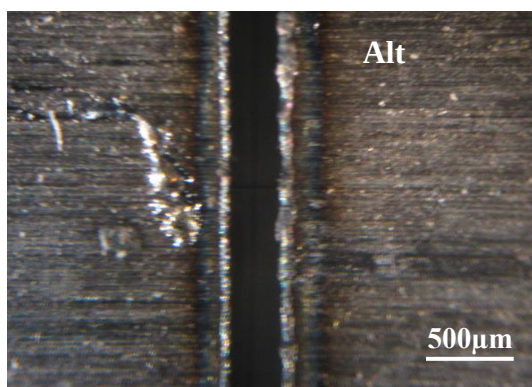
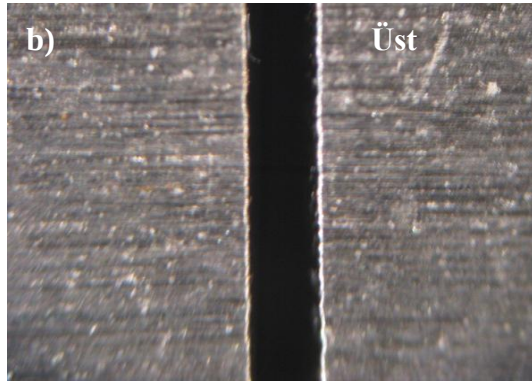
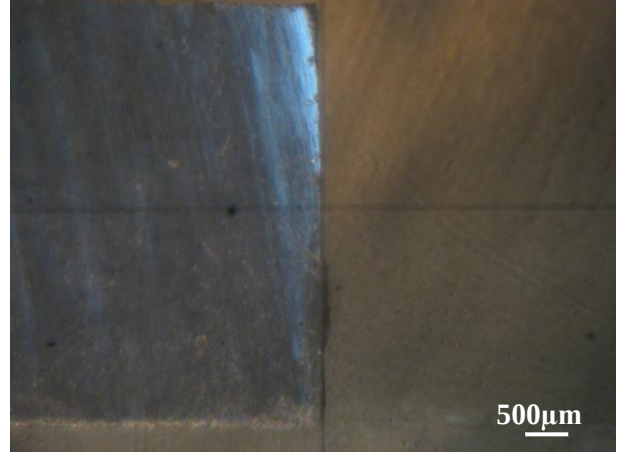
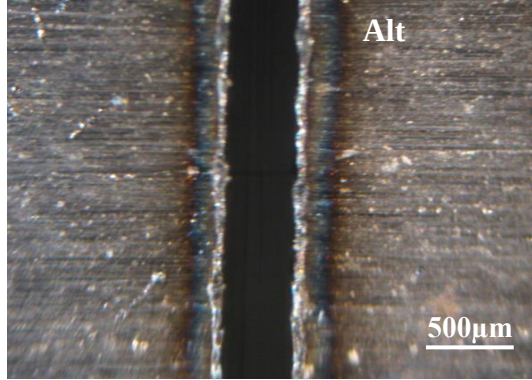
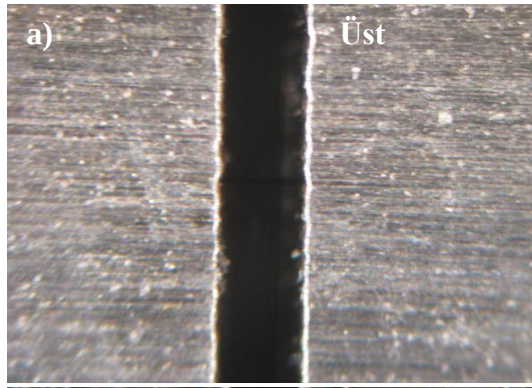
6.2.6.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

Tablo 6.6'daki III. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama kerf eğim açısı değerleri ve bu değerlere ait şekil 6.43'teki grafik incelendiğinde I.ve II. grup numunelerde gözlemlendiği gibi, kesme hızının artmasına ve gaz basıncının azalmasına bağlı olarak kerf eğim açısı artmakta, düşük kesme hızı ve yüksek gaz basıncı değerlerinde ise kerf eğim açısı azalmaktadır. Oldukça düşük kesme hızlarında kesme düzlemi hemen hemen diktir. Kesme hızının artmasıyla, ergimiş metal kesme bölgesinden hızlı bir şekilde atılamadığından kesme düzleminin eğimli olmasına yol açmaktadır.



Şekil 6.43 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi

Şekil 6.44'te III. grup numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en yüksek ve en düşük kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En düşük ortalama kerf eğim açısı, lazer gücünün ve gaz basıncının en yüksek (4000 W, 19 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (1500 mm/dk) 7 nolu deney şartlarında 0,482° olarak ölçülürken, 0,752° olarak ölçülen en yüksek kerf eğim açısı ise lazer gücünün orta (3600 W), kesme hızının en yüksek (1850 mm/dk) ve gaz basıncının en düşük olduğu (15 Bar) 6 nolu deney şartlarında elde edilmiştir.



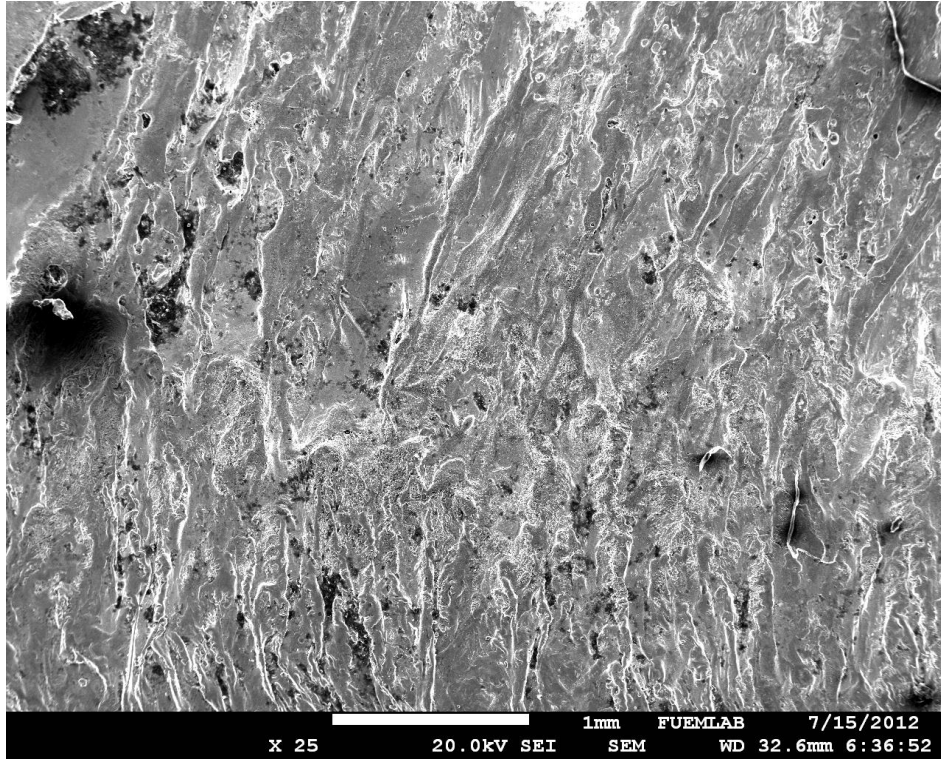
Şekil 6.44 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a: 4000 W, 1500 mm/dk, 19 Bar, b: 3600 W, 1850 mm/dk, 15 Bar)

6.3. Plazma Arkı İle Kesme Deney Sonuçları

6.3.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları

6.3.1.1. Yüzey Yapısı

Plazma ark prosesinde kesilmiş yüzeyler çoğu işleme yöntemlerine göre daha pürüzlü bir yapıya sahiptir. Şekil 6.45'te plazma arkı ile kesilmiş malzemenin yüzey görüntüsü verilmiştir. Yüzey görüntüsü incelendiğinde, bu pürüzlülüğün genellikle kesme yüzeyi boyunca uzanan dalga şeklinde oyuklardan oluştuğu, bunun yanı sıra plazma etkisi ile ergitilerek yerinden koparılan parçacıkların ara bölgeden uzaklaştırılmadan katılarak yüzeyde kaldığı gözlenmiştir. Yüzey görünümü açısından, işlenmiş yüzeylerin benzerlik gösterdiği ancak işleme şartlarına bağlı olarak çiziklerin eğimi, derinlikleri ve periyodunun farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.



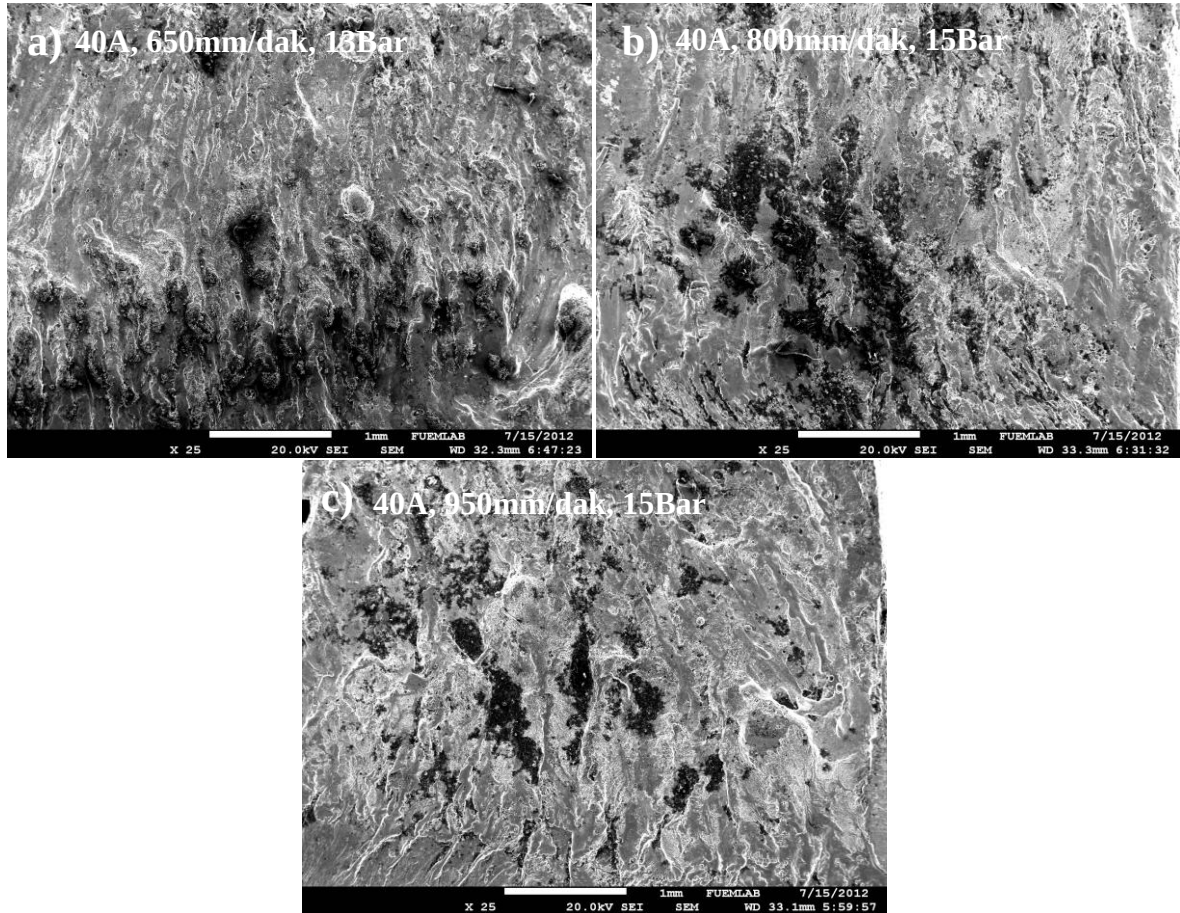
Şekil 6.45 Plazma arkı ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü

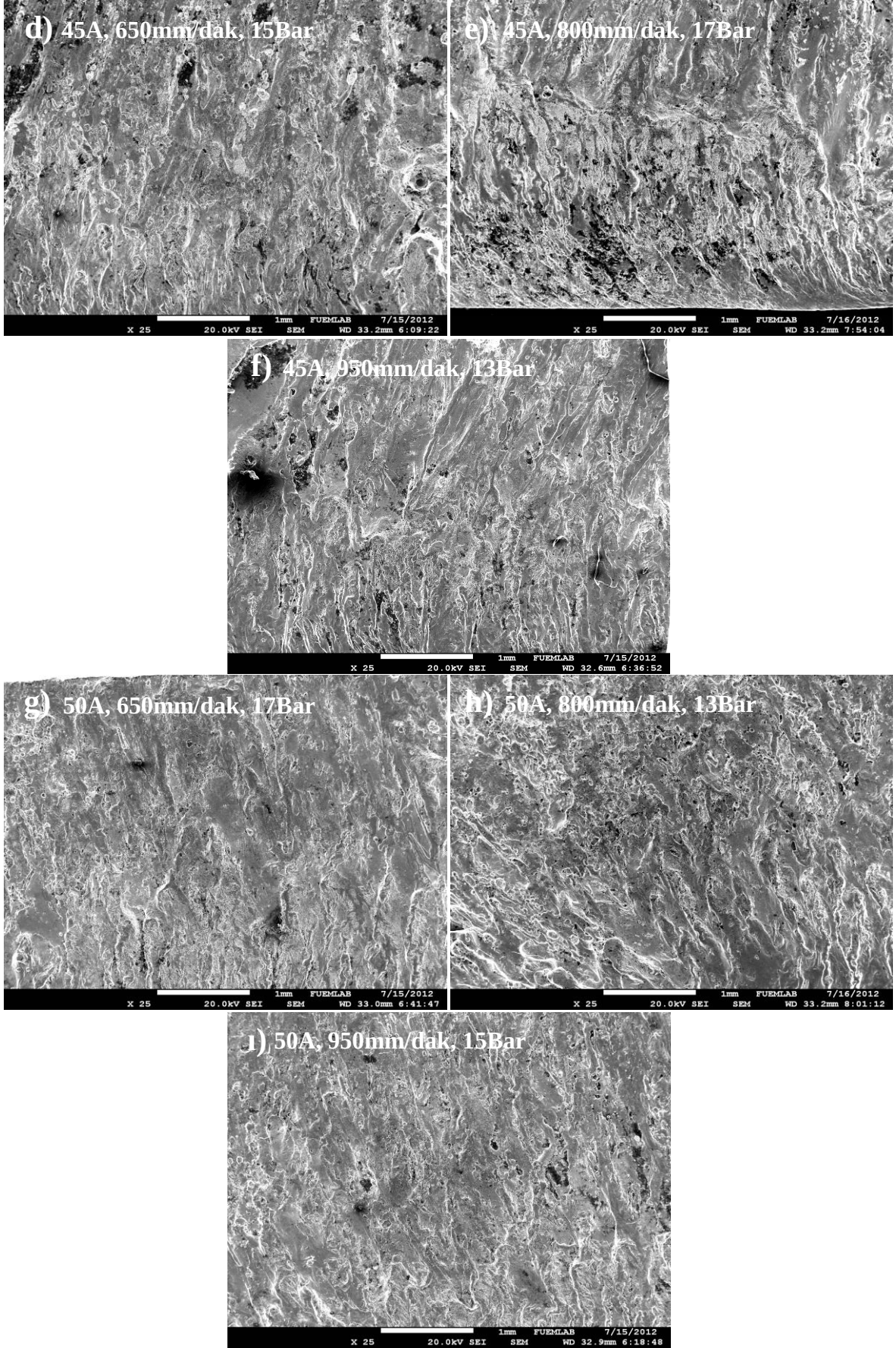
6.3.1.1.1. Plazma Arkı İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi

Plazma arkı ile kesmede kesme enerjisini, akım şiddeti, ark voltajı ve kesme hızı gibi parametreler oluşturmaktadır. Ark voltajı; torçun parçadan yüksekliği, akım şiddeti ve kesme hızı tarafından etkilenmektedir. Bu yüzden kesme işleminde akım şiddeti (I_a) ve kesme hızı (V) en etkin enerji parametrelerdir [135].

Şekil 6.46'da sırasıyla plazma arkı ile farklı işlem parametreleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi, sabit akım ve yüksek ilerleme hızlarında yüzeyin daha düzgün çıktığı görülmüştür. Bu olay, yüksek ilerleme hızlarında plazma arkı ile iş parçası arasındaki etkileşim süresinin düşmesine bağlı olarak yüzeyde meydana gelen çiziklerin daha ince ve yüzeysel olmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, plazma arkının oluşturduğu enerjinin düşük ilerleme hızlarında iş parçası yüzeyinde absorbe olmasıyla daha fazla metal, ergiyerek kesme boşluğundan uzaklaştırılacağından yüzeyde meydana gelen çizikler daha derin ve geniş olmakta; bu da yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.

Düşük ilerleme hızına rağmen akım şiddetinin ve gaz basıncının artmasıyla pürüzlülüğün düştüğü görülmektedir. Bu durum, kesme bölgesinde oluşan enerjinin artmasına bağlı olarak; daha akışkan haldeki eriyik malzemenin yüksek gaz basıncı ve ilerlemenin yaratmış olduğu yüksek mekanik kuvvetler eriyik metalin yüzeye süpürülerek yayılmasına ve yüzeyin düzgünleşmesine neden olmaktadır.



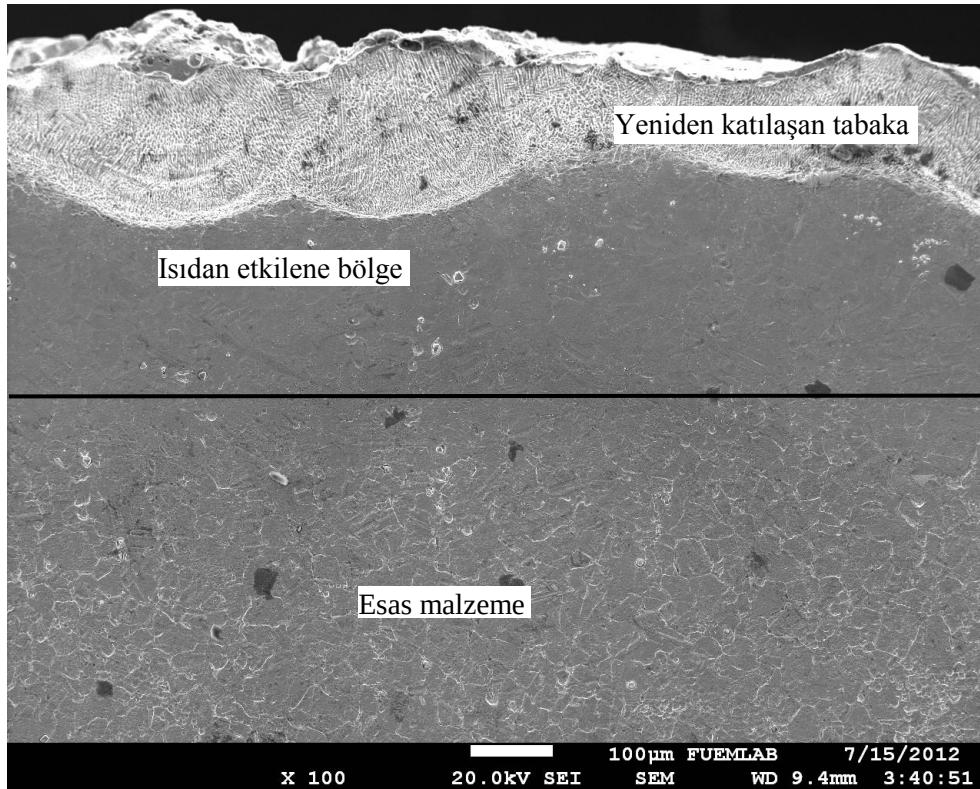


Şekil 6.46 Plazma arki ile kesmede işlem parametrelerinin yüzey yapısına etkisi

6.3.1.2. Isıdan Etkilenen Bölge

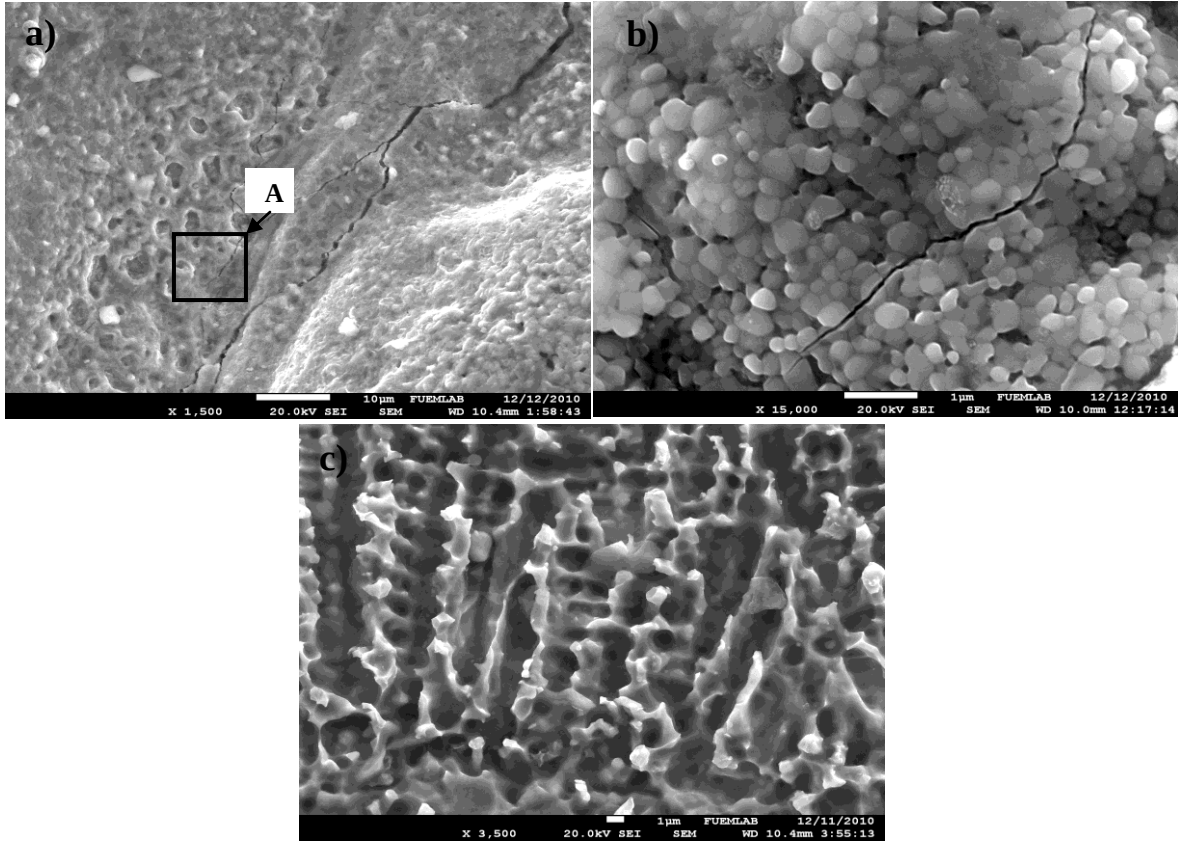
Termal işleme yöntemlerinde, yüzeyin ani ısınması ve soğuması neticesinde işlenmiş yüzeyde ve yüzey altında ana malzemeden farklı metalurjik yapıya sahip ısıdan etkilenen bölgeler meydana gelmektedir. Isıdan etkilenen bölge, kesilen parçanın yüzey çatlaklarına hassasiyetini, korozyon direncini ve malzemenin mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bazı uygulamalarda bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için termal yöntemlerle işlenmiş yüzeylere ikinci bir yüzey işlemi yapılmaktadır. Bu yüzden bu bölgenin daha dar olması, üretim maliyetlerini önemli derecede düşürmektedir [136].

Plazma arkı ile kesme yöntemi, kesme bölgesinde aşırı ısının oluşmasına (10000 - 14000 °C) ve bu da IEB'nin diğer termal yöntemlerle işleme yöntemlerine nazaran daha geniş olmasına sebep olmaktadır. Plazma arkı ile kesilmiş numunede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgelerin SEM görüntüsü şekil 6.47'de verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde lazer bölümünde de bahsettiğimiz gibi plazma arkı ile kesme sonrası lazer ışını ile kesilen numunelere nazaran daha geniş olan yeniden katılaşan tabaka, ısıdan etkilene bölge ve ana malzeme olmak üzere üç farklı bölge göze çarpmaktadır. Tanımlanan bu üç farklı tabaka içerisinde en büyük öneme sahip olan yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, işleme parametrelerine bağlı olarak minimize edilebilmektedir.



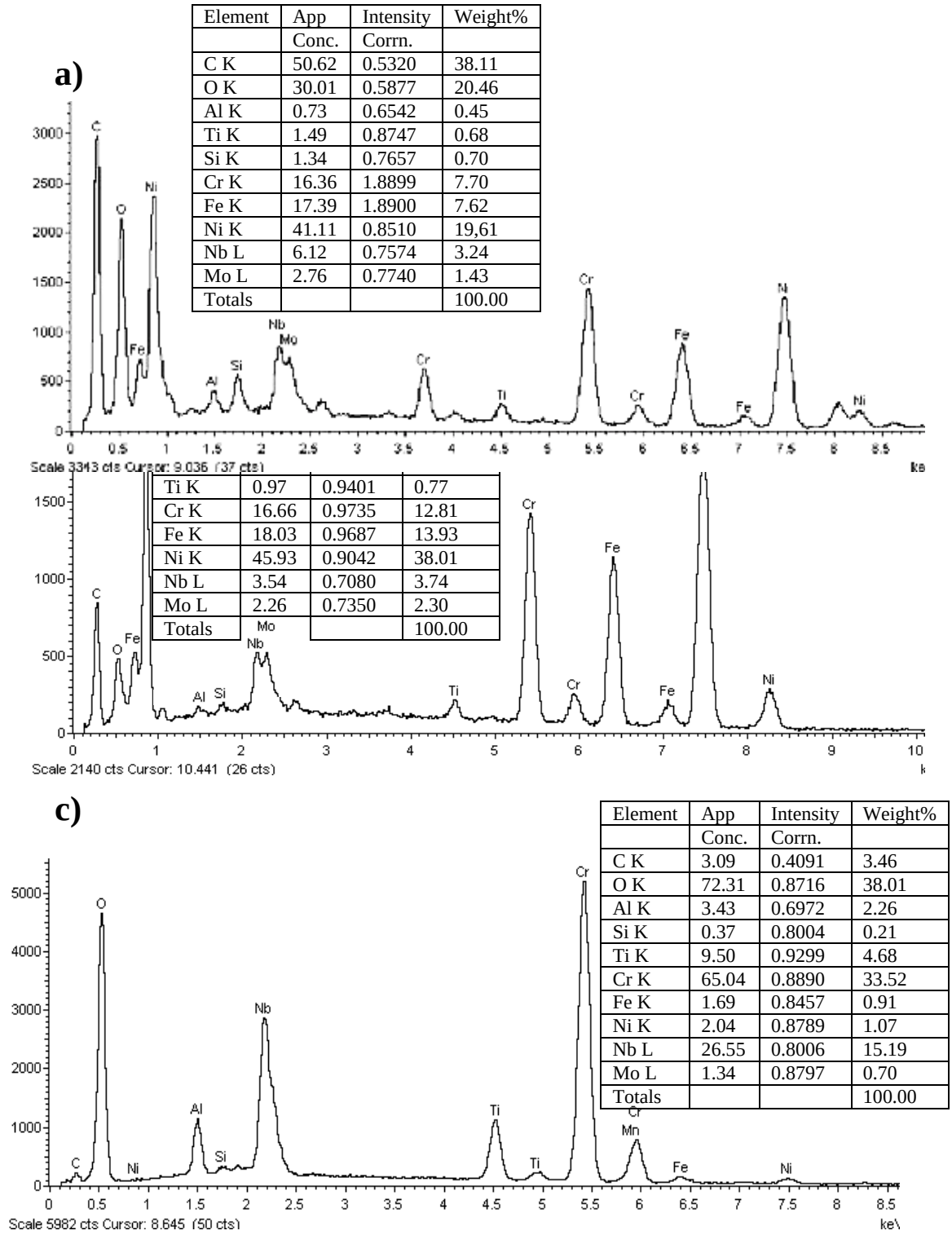
Şekil 6.47 Plazma arkı ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler

Şekilde görülen yeniden katılaştan tabaka daha detaylı incelendiğinde şekil 6.48’de görüldüğü gibi, metalografik ve mikro yapısal karakteristikleri ana malzemenin farklıdır. Plazma arkı ile kesilen yüzeyde erimiş metal ve oksijen gazı arasında meydana gelen oksidasyon reaksiyonundan dolayı oluşan oksit tabakası, şekil 6.48-a’da açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra bu bölgeden alınan yüksek büyütmedeki görüntüde (Şekil 6.48-b) ergimiş metalin basınçlı gazın etkisiyle küresel hücreler şeklinde topaklanarak katılaştı ve bu katılma esnasında meydana gelen iç gerilmelere bağlı olarak oluşan mikro çatlaklar göze çarpmaktadır. Yan yüzeyin görüntüsü ise dendrit şeklindedir (Şekil 6.48-c). Bunun nedeni, ana malzemenin eriyik metali soğutma etkisinden dolayı, ana metale doğru yönelen katılma dendritik bir yapı sergilemektedir.

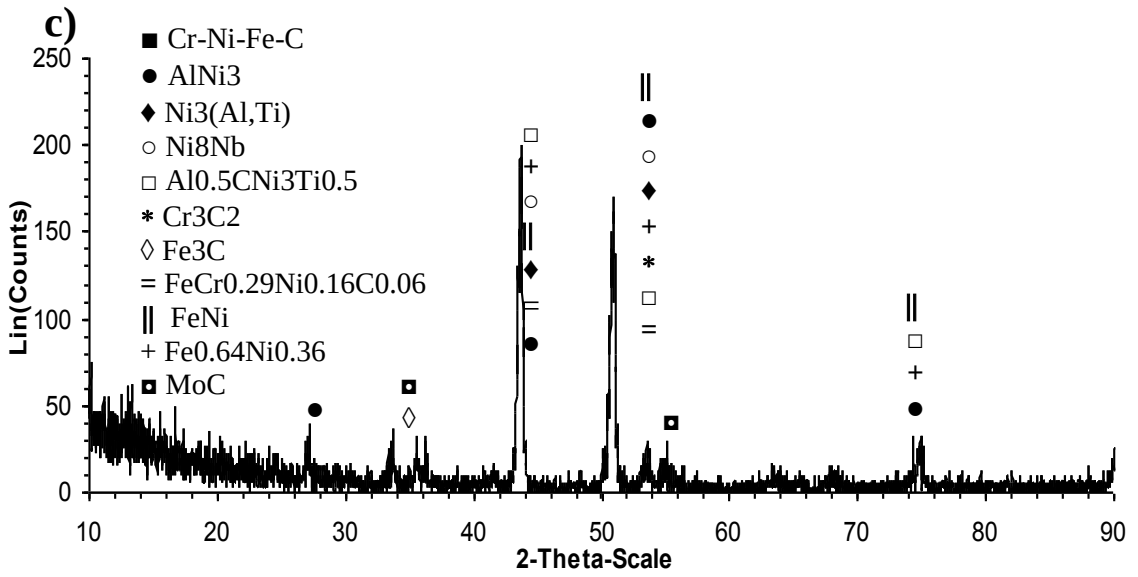
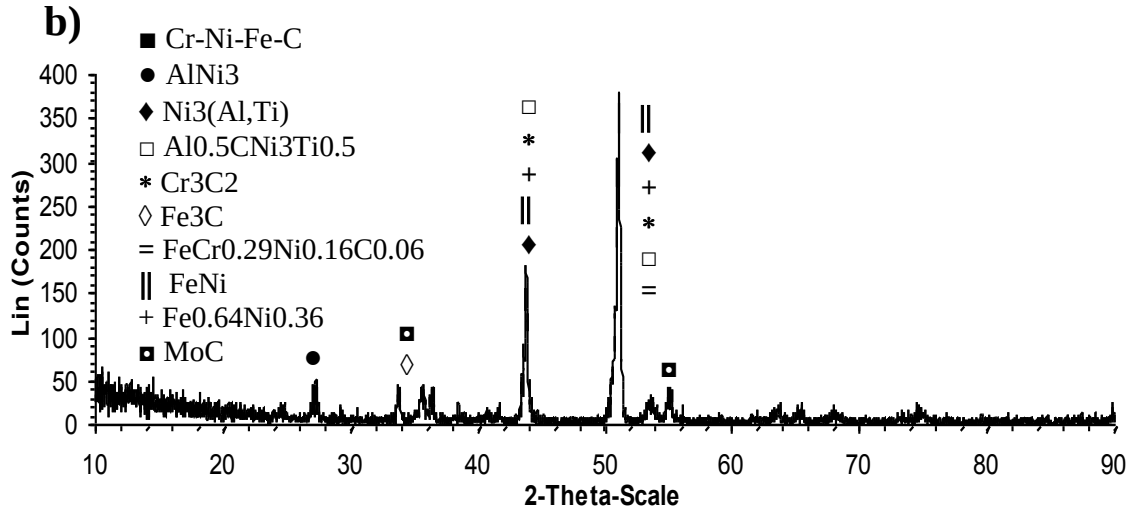
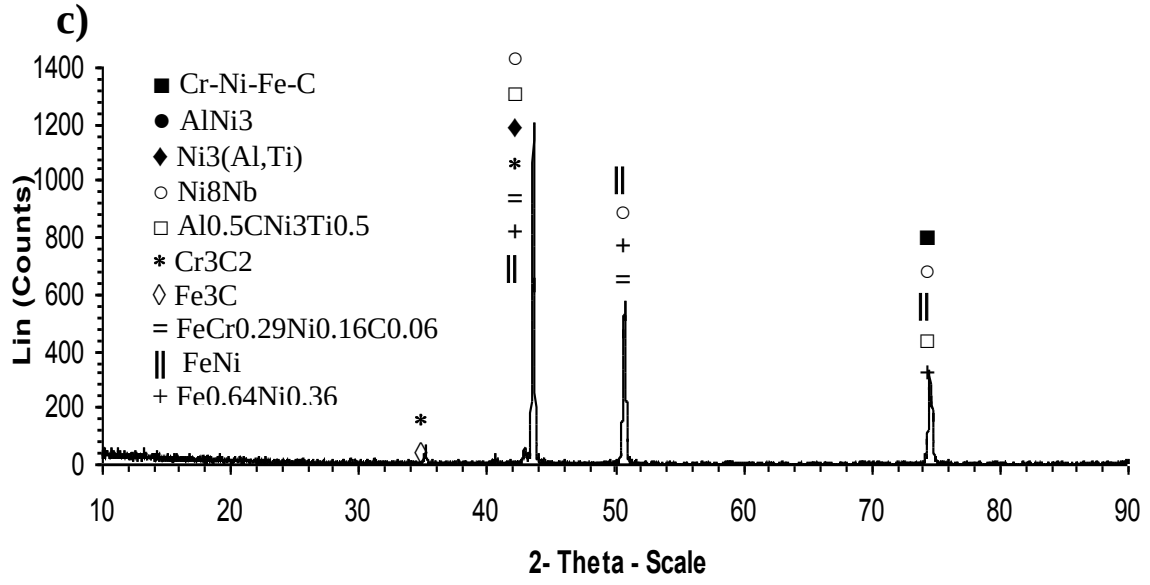


Şekil 6.48 a) kesme bölgesinin morfolojisi; b) A kesitinin mikro yapısı
c) yeniden katılaştan tabaka (kesilen yüzeye dik) görüntüleri

Her iki görüntünün elde edildiği bölgelerden alınan EDS ve XRD sonuçları şekil 6.49 ve 6.50’de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde, yeniden katılaştan tabakada, çeşitli karbür fazlarının ve $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$, Ni_3Nb fazının çökeldiğinden söz edebiliriz. Ayrıca, kesme bölgesinden alınan EDS analiz sonucunda, kesme bölgesinde yoğun bir şekilde oksijen varlığı da, bu bölgede oksit tabakasının oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6.49 Plazma arkı ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)



Şekil 6.50 Plazma arkı ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)

6.3.2. YKTK Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.7’de PAK deneyleri sonunda I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama yeniden katılan tabaka kalınlıkları toplu şekilde verilmiştir.

Tablodaki değerler incelendiğinde, ortalama YKTK, sabit akım şiddeti şartlarında, kesme hızının artışı ile önemli derecede düşmektedir. Düşük kesme hızı, kesme bölgesinde daha aşırı enerji girişine neden olduğundan, kesme kanalının daha geniş ve ısıdan etkilenen bölgenin daha derin olmasına neden olmaktadır. Ayrıca akımın artmasıyla yüzey sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığına daha düzenli bir şekilde ulaşmakta ve daha fazla malzeme ergitilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak YKTK artmaktadır.

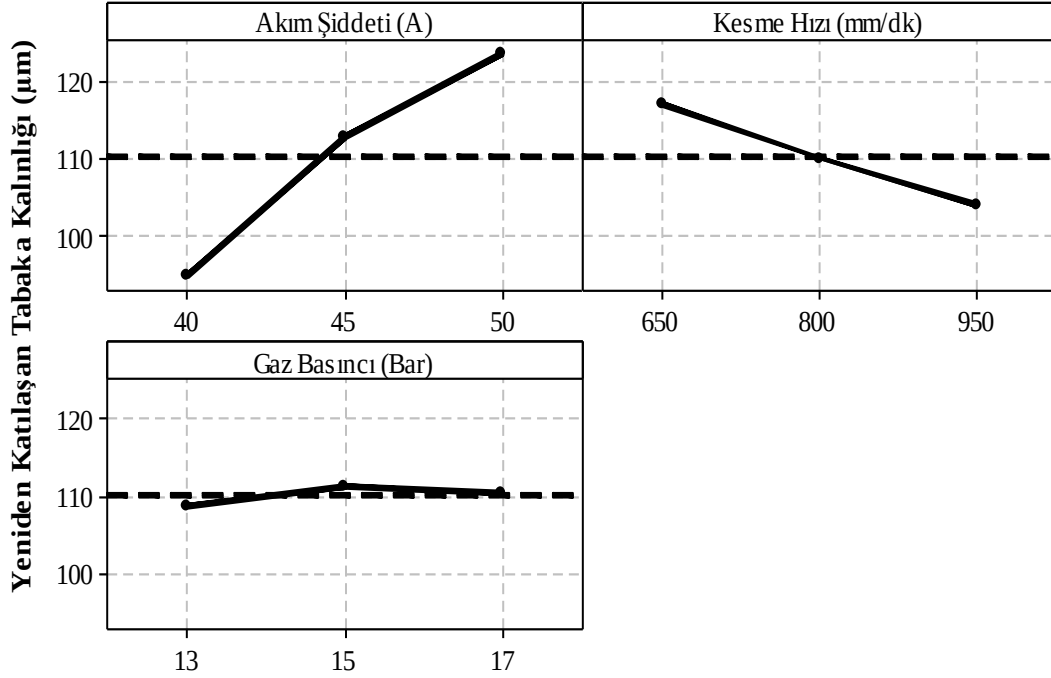
Tablo 6.7. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK.

Deney No	Deney Parametreleri (Akım şiddeti-A, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama YKTK (µm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	40 A, 650 mm/dk, 13 Bar	100	71,8	158,9
2	40 A, 800 mm/dk, 15 Bar	94,1	53,2	112,8
3	40 A, 950 mm/dk, 17 Bar	90,3	48,4	106,3
4	45 A, 650 mm/dk, 15 Bar	121,8	83,4	178,5
5	45 A, 800 mm/dk, 17 Bar	112,5	73,3	166,5
6	45 A, 950 mm/dk, 13 Bar	103,5	72	157,1
7	50 A, 650 mm/dk, 17 Bar	128,7	93,7	194,8
8	50 A, 800 mm/dk, 13 Bar	123,3	75,1	181,4
9	50 A, 950 mm/dk, 15 Bar	118,2	72,1	169,8

6.3.2.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK’ye Etkisi

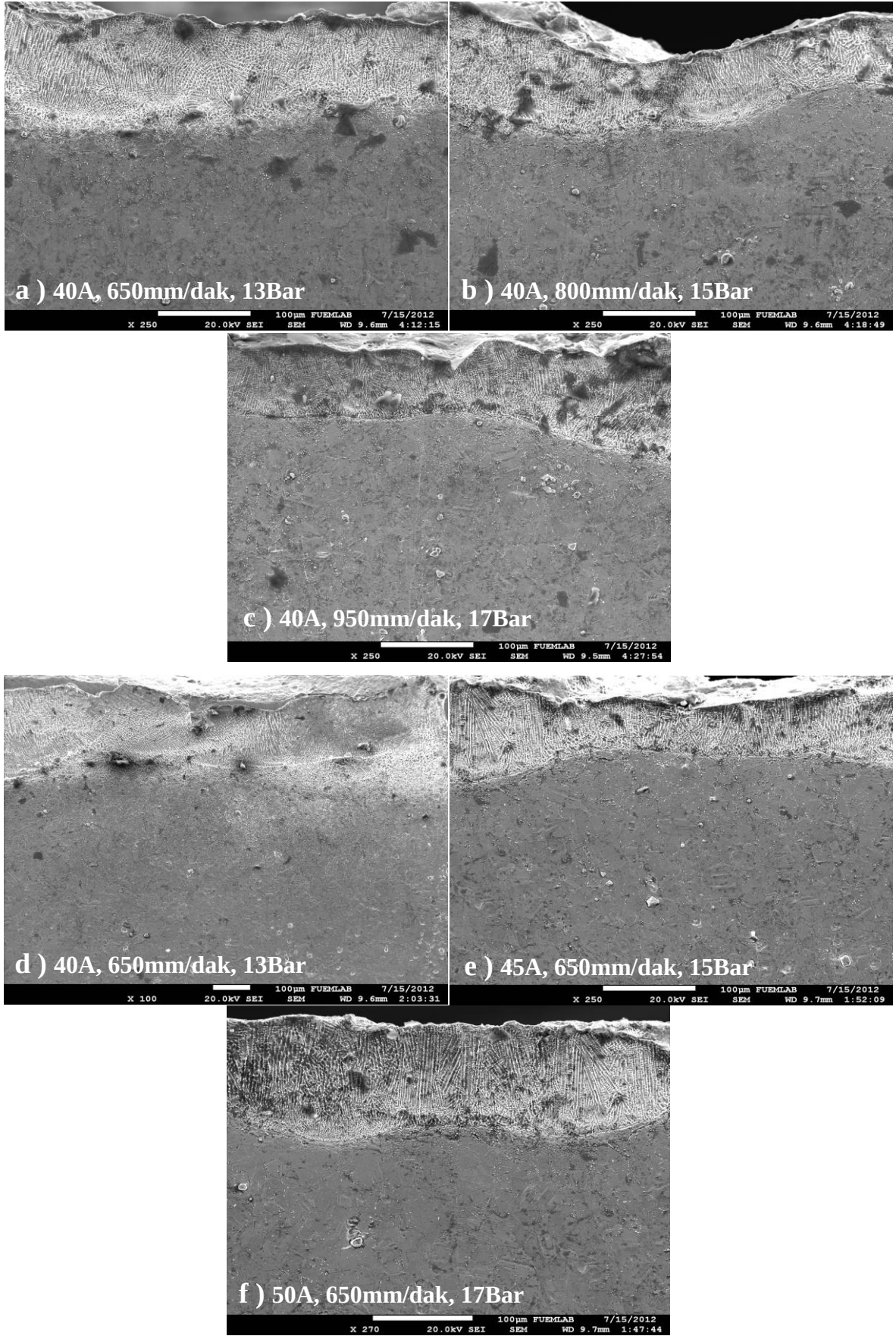
Tablo 6.7’deki I. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama YKTK değerleri ve bu değerlere ait şekil 6.51’deki grafikler incelendiğinde, gaz basıncının YKTK üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı; ancak akım değerinin sabit olduğu şartlarda, kesme hızının artması ile YKTK düştüğü izlenmektedir. Kesme hızının artmasıyla, akım şiddetiyle sabitlenmiş olan plazma arkının oluşturduğu ısı düşmekte, buna bağlı olarak da daha az malzeme ergitilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak YKTK düşmektedir. Ayrıca akım şiddetinin artmasıyla YKTK değerlerinin arttığı tablo ve grafiklerden açıkça görülmektedir. Plazma arkı ile kesme prosesinde, akım şiddetiyle monoton bir şekilde plazma arkının yarıçapı artmakta, akım şiddetinin artışına bağlı olarak arkın gücü de artmaktadır. Akım yoğunluğu ise ark yarıçapı ve arkın akım şiddetiyle belirlenmektedir. Dolayısıyla akım şiddetinin artmasıyla parça üzerinde oluşan enerjinin

yoğunluğu artmakta, ilerlemenin artmasıyla da enerji yoğunluğu düşmektedir. Enerji yoğunluğundaki bu değişime paralel olarak ergitilen malzeme miktarı değişmektedir [136].



Şekil 6.51 PAK parametrelerinin YKTK'ye etkisi

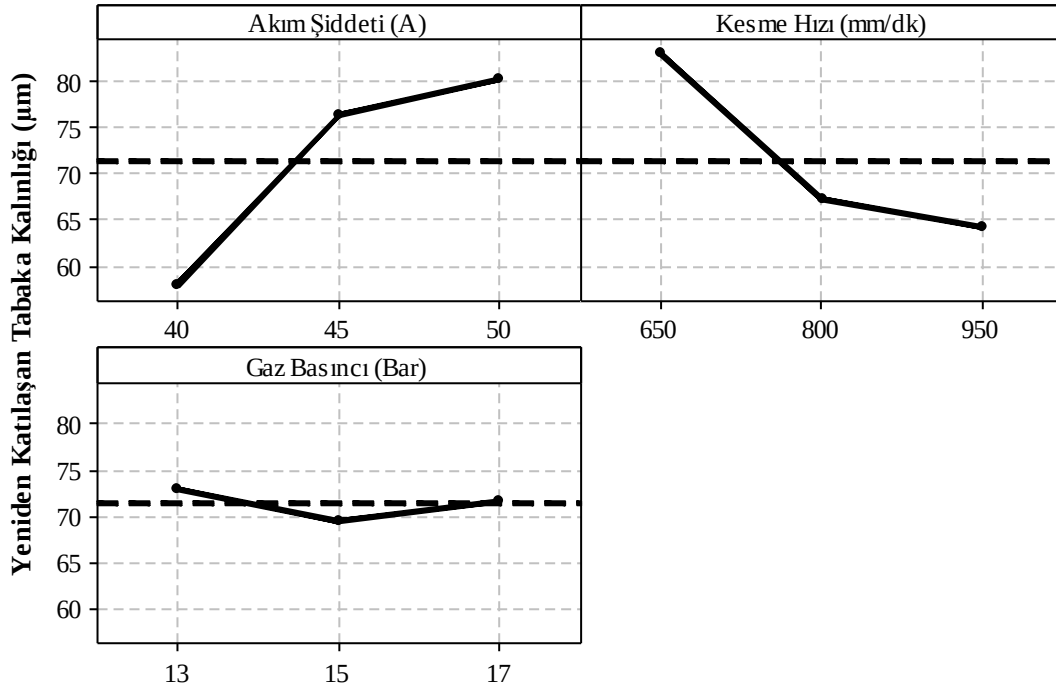
Şekil 6.52'de deney parametrelerine bağlı olarak değişen, YKTK gösteren SEM görüntüleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, kesme hızının artmasıyla YKTK düşmekte ve akım şiddetinin artmasıyla yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı artmaktadır. Deneyler sonucunda: I. grup numuneler içerisinde en düşük YKTK, akımın en düşük, ilerlemenin ve gaz basıncının en yüksek olduğu (40 A, 950 mm/dk, 17 Bar) 3 nolu deney sonucunda 48,4 µm olarak ölçülürken (Şekil 6.52-c); en yüksek YKTK, akımın ve gaz basıncının en yüksek ilerlemenin en düşük olduğu (50 A, 650 mm/dk, 17 Bar) 7 nolu deney sonucunda 93,7 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.52-f).



Şekil 6.52 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

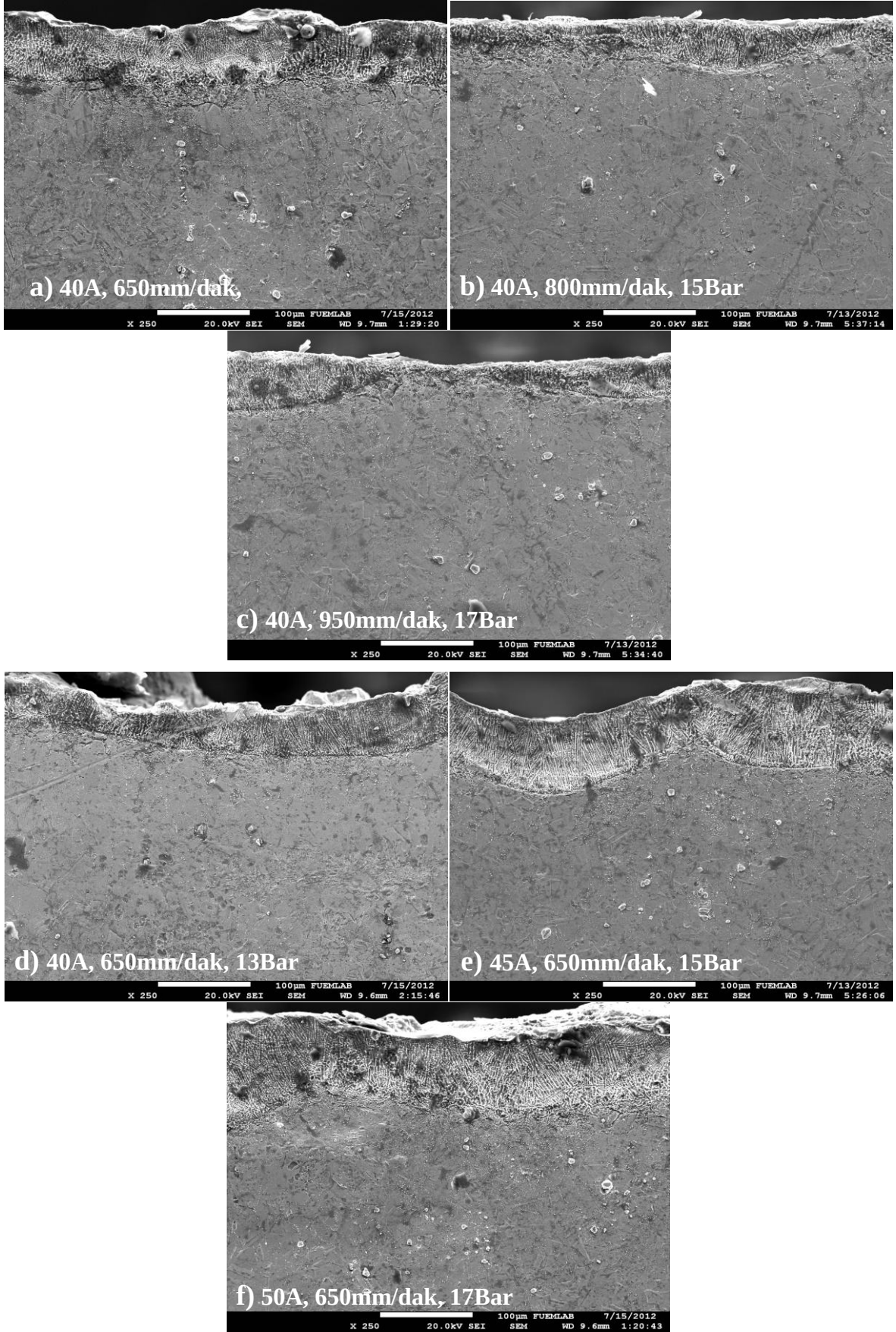
6.3.2.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Şekil 6.53'te II. grup numunelerde, YKTK üzerinde kullanılan parametrelerin etki grafikleri görülmektedir. I. grup numunelere benzer şekilde kullanılan parametreler, YKTK üzerinde aynı etkiye sahiptir. Ancak aynı kesme şartlarında, I. grup numunelerde YKTK 90,3 μm ila 128,7 μm arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık 48,4 μm ila 93,7 μm 'e düşmektedir. Bu düşüşün sebebi, II. grup numunelerin I. grup numunelere nazaran daha düşük termal iletkenliğe sahip olmalarıdır. Malzemenin düşük termal iletkenliği nedeniyle, kesme esnasında oluşan ısı malzeme içine doğru yayılmadığından ısıl hasarların daha dar bir bölgede oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.53 PAK parametrelerinin YKTK'ye etkisi

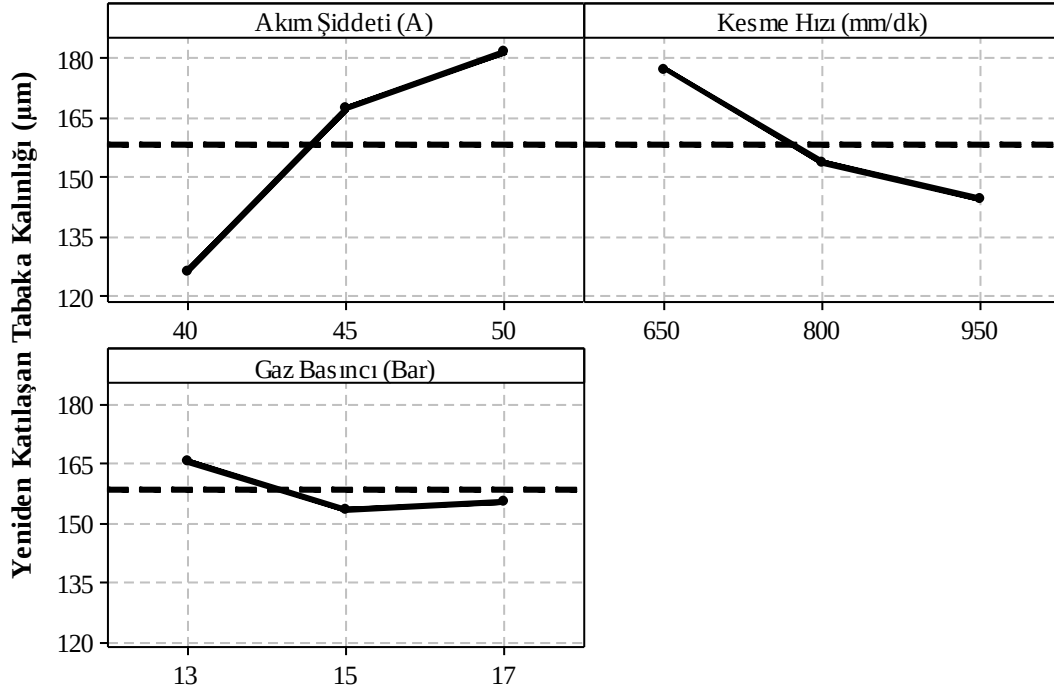
Akım şiddetinin sabit kalmasına, kesme hızının artmasına bağlı olarak numuneler üzerinde oluşan YKTK azaldığını; kesme hızının sabit kalmasına, akım şiddetinin artmasına bağlı olarak numuneler üzerinde oluşan YKTK arttığını gösteren SEM görüntüleri şekil 6.54'te ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 6.54 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

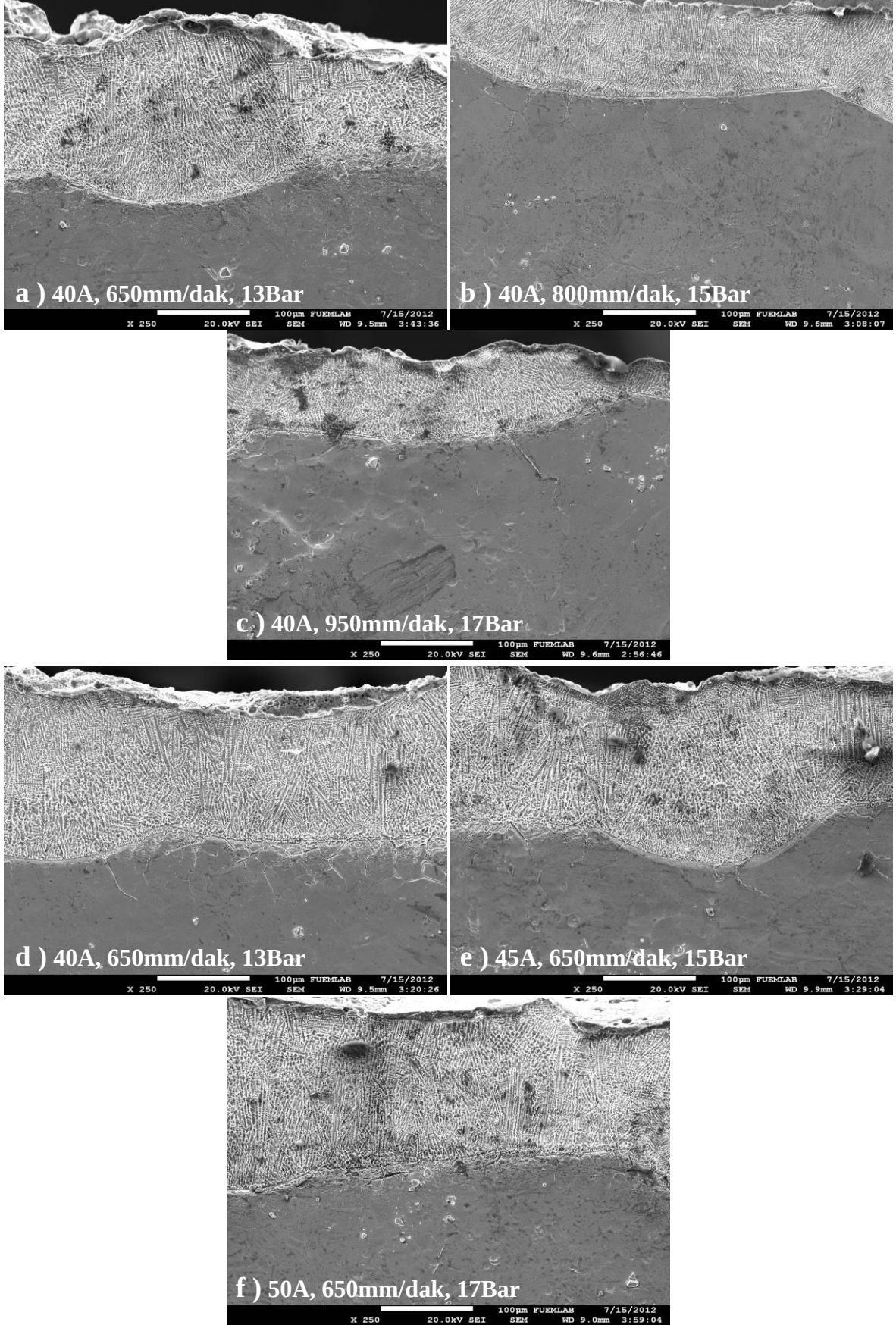
6.3.2.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Tablo 6.7'deki III. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama YKTK değerleri ve bu değerlere ait şekil 6.55'teki grafik incelendiğinde I.ve II. grup numunelerde gözlemlendiği gibi, gaz basıncının bir etkisi olmazken, kesme hızının artmasına bağlı olarak YKTK azalmakta, sabit kesme hızında akım şiddetinin artmasıyla YKTK artmaktadır.



Şekil 6.55 PAK parametrelerinin YKTK'ye etkisi

Şekil 6.56'daki III. grup numunelere ait SEM fotoğrafları, sabit akım şiddetinde, kesme hızının artmasıyla YKTK azaldığını, kesme hızının sabit ancak akım şiddetinin arttığı deneyler sonucunda ise YKTK arttığını göstermektedir. Ancak bu değişikliğin I. ve II. grup numunelere nazaran daha yüksek olduğu tablo 6.7'deki değerlerden görülmektedir. I. grup numunelerde ortalama YKTK değerleri 90,3 µm ile 128,7 µm arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık 48,4 µm ile 93,7 µm'e düşmekte, III. grup numunelerde ise 106,3 µm ile 194,8 µm'e yükselmiştir. YKTK değerlerindeki bu artış, malzemenin ısı iletkenlik değerinin diğer numunelere nazaran daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışmamızın lazer bölümünde de vurguladığımız gibi, termal kesme proseslerinde, termal iletkenliği yüksek olan malzemelerin kesme kenarından yapı içine doğru hızlı bir şekilde ve daha yoğun ısı geçişi olduğundan dolayı YKTK daha geniş olmaktadır.



Şekil 6.56 III. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

6.3.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.8’de plazma arkı ile kesilen I, II, III. grup numunelerden, kesme kenarından ana malzemeye doğru ölçülen ortalama mikrosertlik değerleri toplu şekilde verilmiştir. Termal işleme yöntemlerinde, ısıнын etkisiyle kesme bölgesinde meydana gelen en önemli değişikliklerden birisi de malzemenin kesilmiş yüzeyindeki mikrosertlik değişimidir. Mikrosertlik, termal kesme sonucunda kesme bölgesinde oluşan yeniden katılaşan ve/veya ısıdan etkilene bölgelerde ana malzemeye nazaran farklılık göstermektedir.

Tablo 6.8. Plazma arkı ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri

Malzeme	Ölçüm yapılan alan	Deney No								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
I. Grup Numunel	YKB	302	296	263	282	271	262	297	254	288
	IEB	248	259	244	233	250	253	255	248	233
	Ana malzeme	239	230	240	241	236	249	231	234	236
II. Grup Numunel	YKB	310	406	313	404	401	362	444	415	350
	IEB	442	410	418	422	404	400	414	407	391
	Ana malzeme	431	415	405	411	392	409	453	416	403
III. Grup Numunel	YKB	432	437	409	414	449	435	410	480	429
	IEB	467	434	467	359	404	467	434	418	432
	Ana malzeme	444	443	486	459	475	462	449	432	458

Tablo 6.8’de görüldüğü gibi, ısıl işlem görmemiş I. grup numunelerde, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeye benzerlik gösterirken, yeniden katılaşan tabakanın sertliği ana malzemeye göre artmıştır. Bilindiği gibi, Ni esaslı alaşımlar çözündürme ısıl işleminin ardından yüksek sıcaklık ve soğuma süresinde çökelme sertleşmesi uygulanarak güçlendirilirler. Isıl işlem görmemiş I. grup numunelerdeki yeniden katılaşan tabakanın sertlik artışı da malzemenin kesme bölgesinde aşırı ısınma ve soğuma neticesinde kısmen γ' ikincil fazların ve karbürlerin çökmesi neticesinde bu bölgede yaşlandırma sertleştirmesinin kısmi etkilerinin meydana geldiği düşünülmektedir. II. ve III. grup numunelerde ise yeniden katılaşan tabakanın mikrosertliği (ayrı yazılabilir) az da olsa ana malzemeye nazaran düşmüştür. Bunun sebebi, numunelere uygulanan ısıl

işlemler sonunda yapıda oluşan γ' ikincil fazların ve karbürlerin, kesme esnasında oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile bu ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrisine geri çözünmesi neticesinde yeniden katılaştıran tabakada sertlik düşüşü olduğu düşünülmektedir.

6.3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.9’da I, II, III. grup numunelerin kesilmiş yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları görülmektedir. Plazma arkı ile kesme işleminde, iş parçasına doğru akan plazma arkı, akım yoğunluğuna bağlı olarak oluşan ısının etkisiyle iş parçasını eritir, iş parçasını deler ve yüksek hızlı gaz akışı erimiş malzemeyi kesim bölgesinden uzaklaştırır, ergimiş metalin kesme boşluğundan uzaklaştırılmasıyla parça yüzeyinde kanal ve çizik görünümlü profiller, kesme boşluğundan dışarı atılmadan yüzeyde katılaştıran kraterler oluşmaktadır. Meydana gelen bu profillerin derinlik ve genişliği, kraterlerin büyüklüğü, kesme işleminde kullanılan akım şiddeti, kesme hızı ve gaz basıncı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla bu çiziklerin derinlik ve genişlikleri işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğünü değiştirmektedir [137].

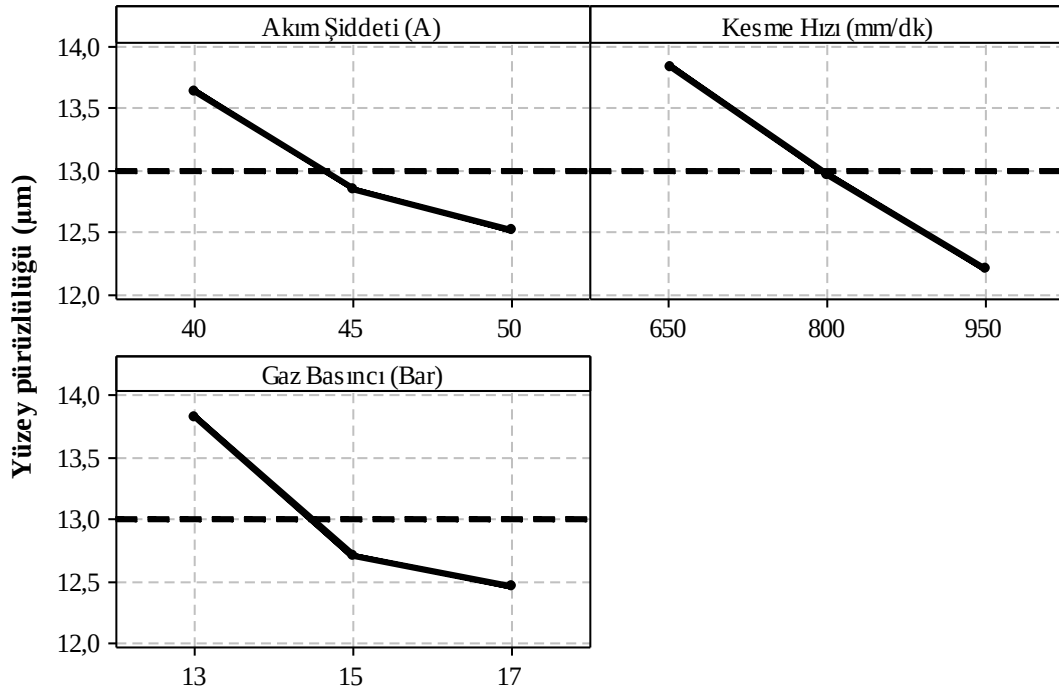
Tablo 6.9. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Deney no	Deney parametreleri (Akım şiddeti-A, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra- μ m)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	40 A, 650 mm/dk, 13 Bar	15,45	15,49	15,23
2	40 A, 800 mm/dk, 15 Bar	13,44	14,00	13,49
3	40 A, 950 mm/dk, 17 Bar	12,01	12,35	13,02
4	45 A, 650 mm/dk, 15 Bar	13,1	13,53	13,72
5	45 A, 800 mm/dk, 17 Bar	12,44	13,10	12,87
6	45 A, 950 mm/dk, 13 Bar	13,01	13,16	13,01
7	50 A, 650 mm/dk, 17 Bar	12,94	13,04	12,30
8	50 A, 800 mm/dk, 13 Bar	13,01	13,59	12,31
9	50 A, 950 mm/dk, 15 Bar	11,57	11,69	11,25

6.3.4.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

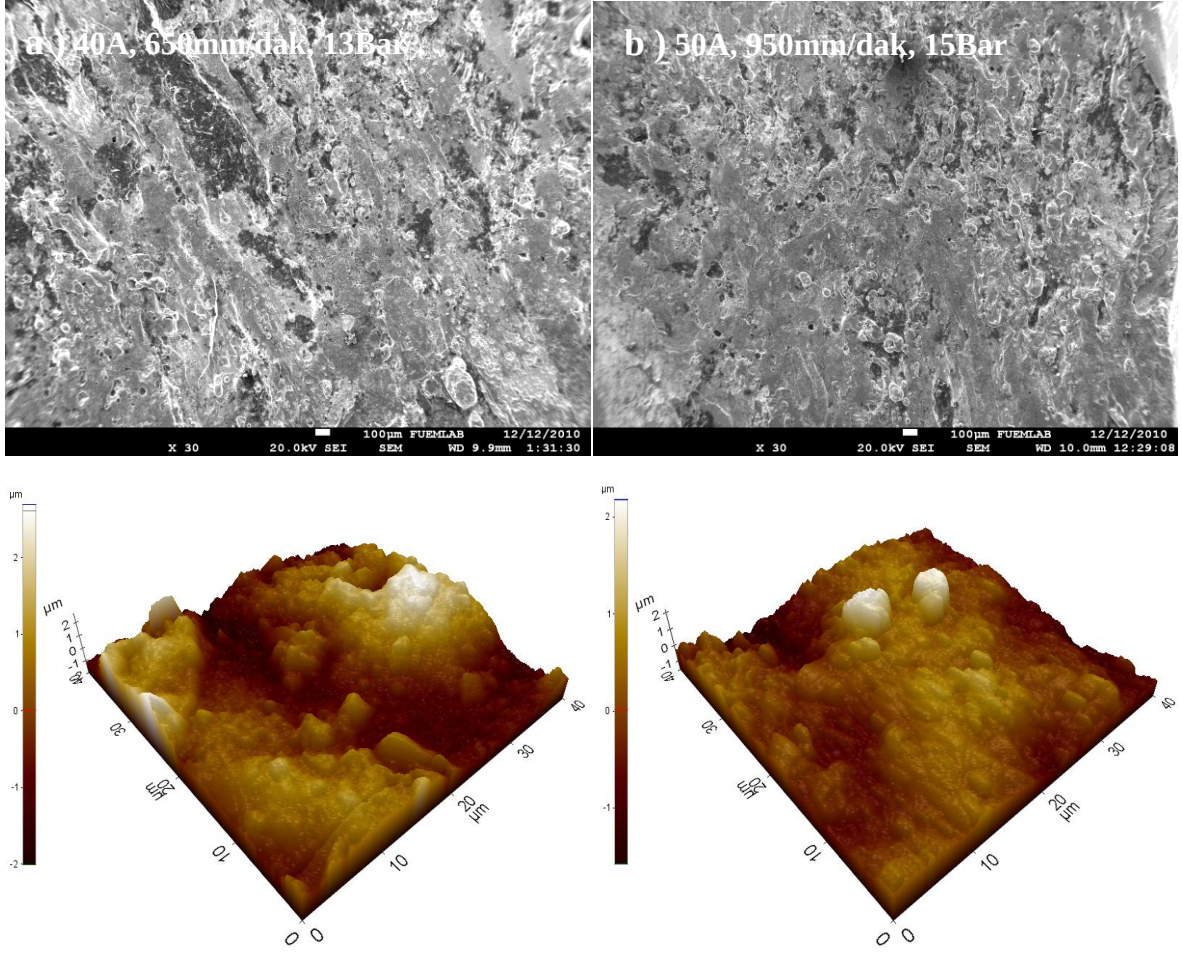
Şekil 6.57’de I. grup numunelere ait kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etki grafikler görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi kesme hızının ve akım şiddetinin pürüzlülük üzerinde büyük bir etkisi vardır. Grafikler değerlendirildiğinde, sabit akım şiddetinde, ilerlemenin 650’den 950 mm/dk’ye yükselmesi ve gaz basıncının artmasıyla pürüzlülük değerinin düzenli bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu durum, sabit güç

yoğunluğunda oluşan ısının, düşük ilerleme hızlarında malzeme yüzeyinde daha yoğun olması sonucunda daha fazla hacimde malzemenin ergitilerek kesme kanalından uzaklaştırılması sonucunda kesilen yüzeyde oluşan çiziklerin daha geniş periyotlu ve daha derin olmasına; yüksek ilerleme hızlarında yapılan kesme işleminde ise bu çiziklerin nispeten daha yüzeysel ve kısa periyotlar şeklinde oluşmasına neden olmaktadır. Ancak ilerlemenin ve akım şiddetinin yüksek; gaz basıncının düşük olduğu durumlarda pürüzlülüğün nispeten arttığı görülmüştür. Bunun da düşük gaz basıncıyla ergimiş metalin tam anlamıyla kesme bölgesinden uzaklaştırılmadan yüzeyde katılaşıp birikmesi sonucunda pürüzlülüğü attırdığı söylenebilir. Ayrıca düşük ilerleme hızına rağmen gücün ve gaz basıncının artmasıyla pürüzlülüğün düştüğü görülmektedir. Bu durum, plazma arkının ve güç yoğunluğunun bir fonksiyonu olan akım şiddetinin artmasına bağlı olarak daha akışkan hale gelen eriyik malzemenin, yüksek gaz basıncının ve ilerlemenin yaratmış olduğu yüksek mekanik kuvvetler vasıtasıyla yüzeye süpürülerek yayılması neticesinde pürüzlülüğün düştüğü düşünülmektedir.



Şekil 6.57 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

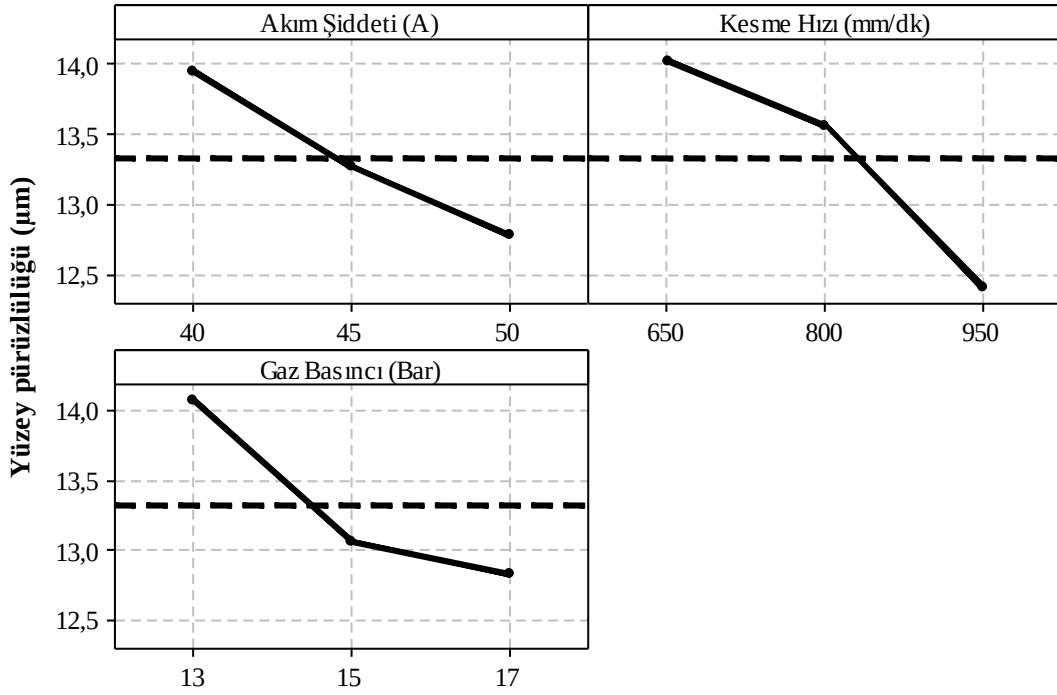
Tablo 6.9'a bakıldığında I. grup numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü 11,57-15,45 µm aralığında değişmektedir, en kaba yüzey 1 nolu deney sonucunda elde edilirken, en iyi yüzey pürüzlülüğüne sahip kesme işlemi 9 nolu deney sonucunda elde edilmiştir. Bu numunelere ait yüzey görüntüleri şekil 6.58'de verilmiştir.



Şekil 6.58 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

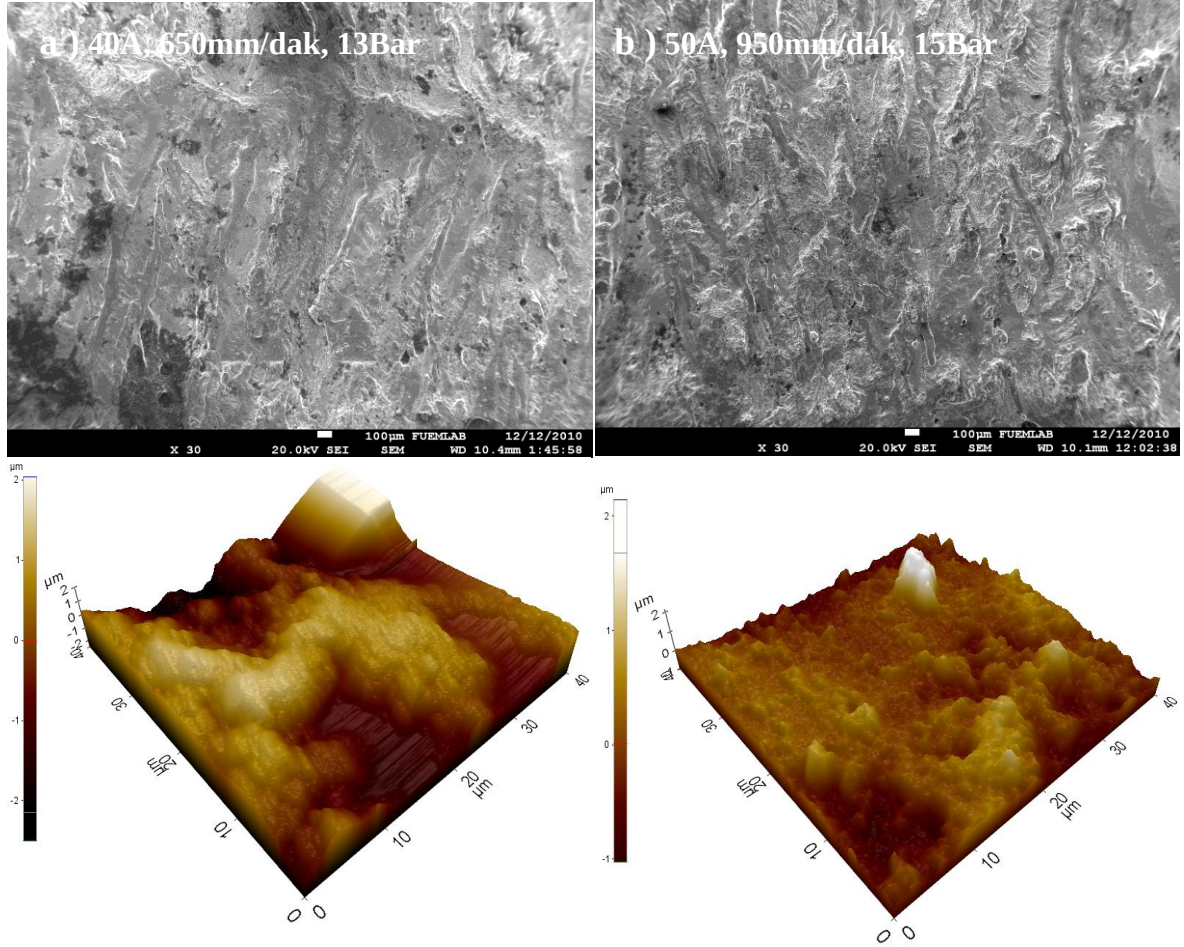
6.3.4.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.59’da, II. grup numunelere ait kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini gösteren grafikler görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, I. grup numunelerde olduğu gibi, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6.59 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Tablo 6.9'daki kesme parametrelerine bağlı olarak değişen pürüzlülük değerleri toplu olarak değerlendirildiğinde, işlem parametrelerinin (akım şiddeti, kesme hızı ve gaz basıncı) artmasıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşirken, akım şiddetinin, kesme hızının ve gaz basıncının en düşük olduğu deney şartlarında yüzeyin daha kötü çıktığı gözlenmiştir. I. grup numunelerde pürüzlülük değeri 11,57-15,45 μm aralığında değişirken, II. grup numunelerde bu değer 11,69-15,49 μm aralığında değişmektedir. Bu numunelere ait SEM ve AFM görüntüleri şekil 6.60'ta verilmiştir.

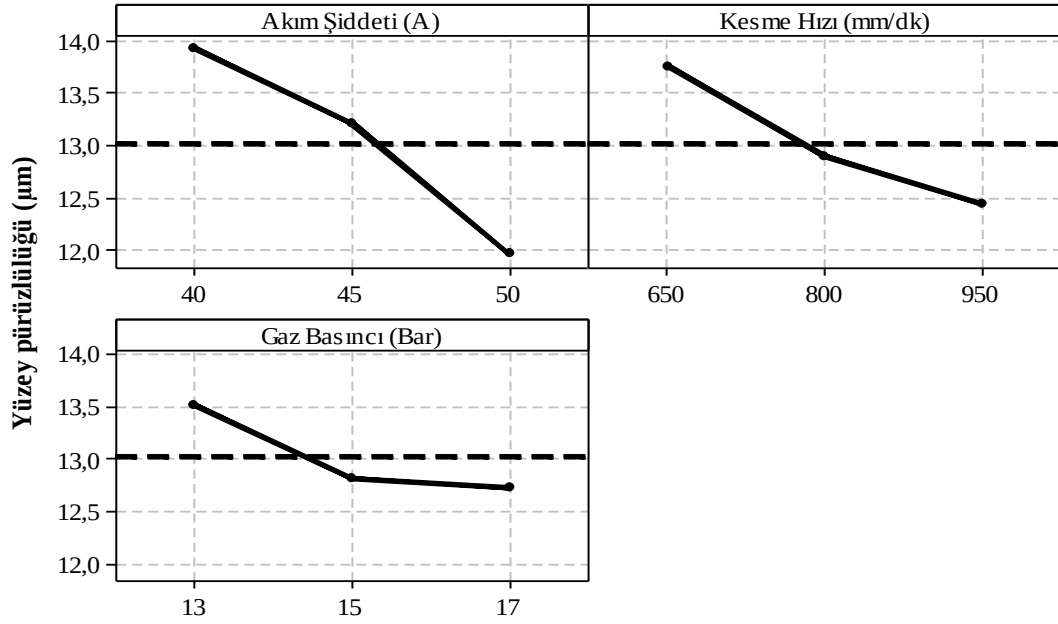


Şekil 6.60 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

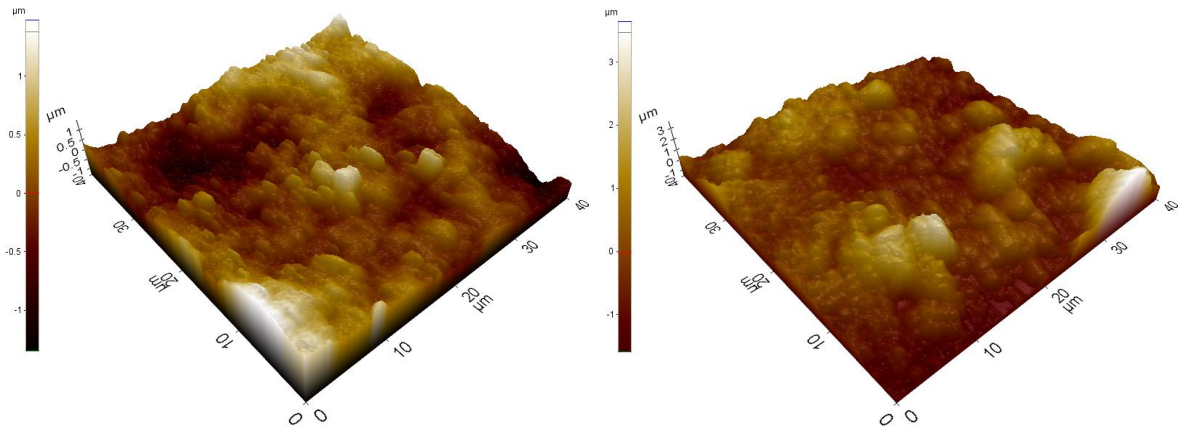
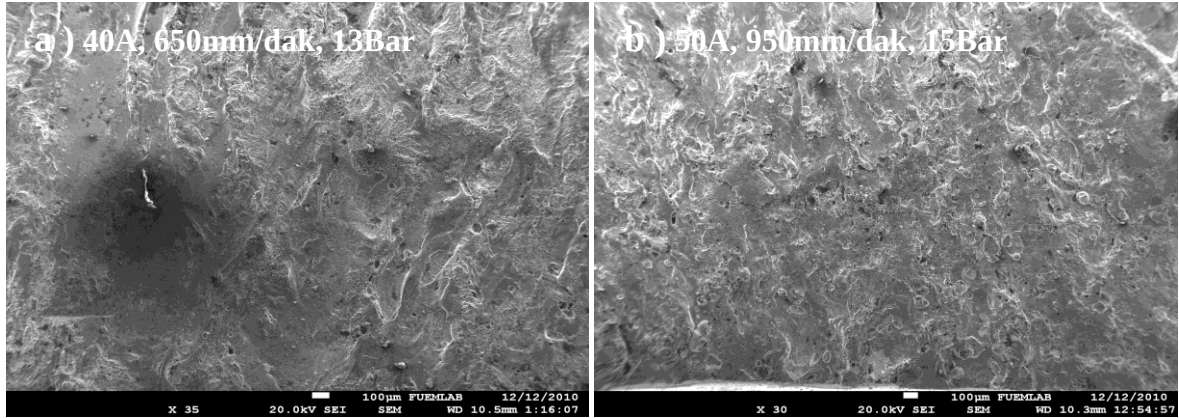
6.3.4.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.61-62’de kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, en iyi sonucu akım şiddetinin ve ilerlemenin en yüksek olduğu 9 nolu deney şartlarında elde ederken, akımın, ilerlemenin ve gaz basıncının en düşük olduğu 1 nolu deney şartlarında en kötü yüzey elde edilmiştir. Tablo 6.8’deki değerler toplu olarak irdelendiğinde, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülük değerleri, $11,25\mu\text{m} - 15,23\mu\text{m}$ aralığında değişirken, II. grup numunelerde $11,69\mu\text{m} - 15,49\mu\text{m}$, I. grup numunelerde ise $11,57\mu\text{m} - 15,45\mu\text{m}$ aralığında değişmektedir. III. grup numunelere ait pürüzlülük değerlerinin I. ve II. grup numunelere nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu düşüş, lazer bölümünde vurguladığımız gibi yüksek termal iletkenliğin, ısının matris içerisine daha fazla yayılmasına sebep olduğu için birim zamanda daha düşük malzeme kaldırma oranı elde edildiğini ifade ederek termal

iletkenlik ile malzeme kaldırma oranı ve pürüzlülük arasında ters bir orantının olduğunu belirtmiştik.



Şekil 6.61 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi



Şekil 6.62 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme

(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü, c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

6.3.5. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Lazer ve plazma gibi termal kesme yöntemleriyle ilgili literatür çalışmalarının bir çoğunda, işlem sonrası yüzey kalitesini belirleyen en önemli karakteristiklerden birinin de kerf genişliği olduğunu belirtmişlerdir. İmalatta, verimliliği, malzeme kaybını ve kaliteyi arttırmak amacıyla termal kesme yöntemlerinde kerf genişliğinin oldukça dar aralıklarda olması istenmektedir. Kerf genişliğini minimum seviyede tutabilmek için işlem parametrelerinden, kesme hızı ve ısıyı oluşturan güç kaynağının büyük bir önem taşıdığı daha önceki çalışmalarında vurgulanmıştır [136].

Tablo 6.10’da I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama kerf genişliği değerleri toplu olarak verilmiştir. Tablodaki değerler toplu olarak değerlendirildiğinde, numunelerin ısı iletkenlik değerleriyle ilişkili olarak kerf genişliklerinde de değişiklik gözlenmektedir. Termal iletkenliği düşük numunelerde, kerf genişliği fazla olurken, termal iletkenliğin yüksek olduğu numunelerde, kerf genişliği düşmüştür. Bu durum, termal kesme yöntemlerinde malzemenin termal iletkenliği ile malzeme kaldırma oranı arasında ters bir ilişkinin olduğunu ortaya koymaktadır.

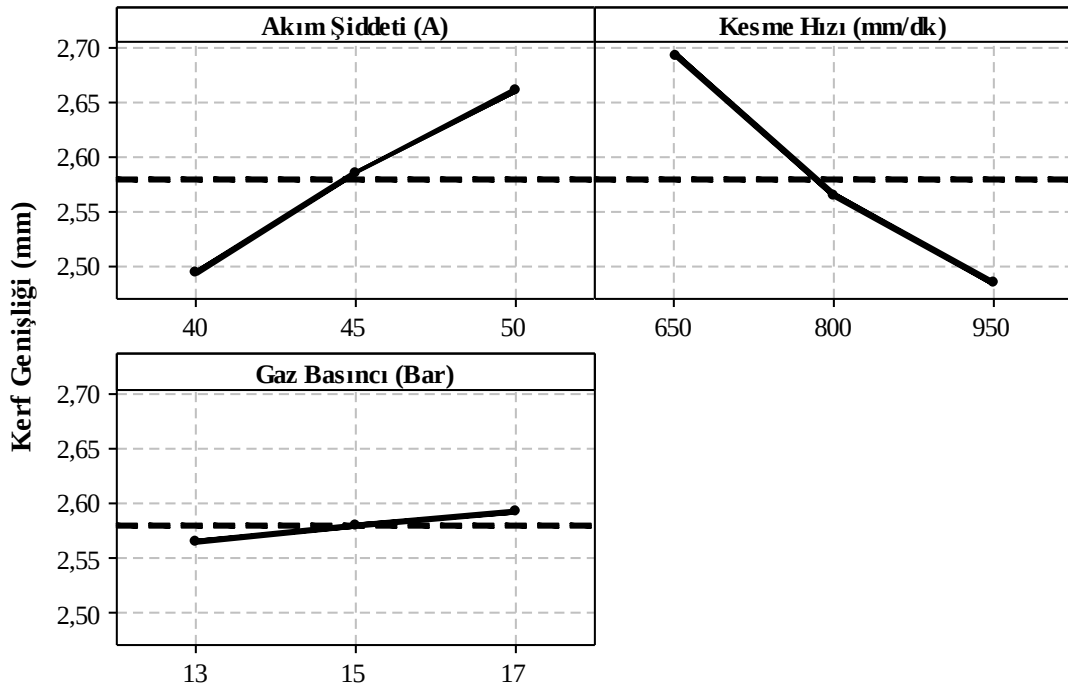
Tablo 6.10. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri

Deney No	Deney Parametreleri (Akım şiddeti-A, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama Kerf Genişliği (mm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	40 A, 650 mm/dk, 13 Bar	2,5376	2,8995	2,281
2	40 A, 800 mm/dk, 15 Bar	2,4965	2,6995	2,2052
3	40 A, 950 mm/dk, 17 Bar	2,4475	2,6075	2,1931
4	45 A, 650 mm/dk, 15 Bar	2,7340	2,9655	2,4869
5	45 A, 800 mm/dk, 17 Bar	2,5265	2,8570	2,3034
6	45 A, 950 mm/dk, 13 Bar	2,4940	2,7885	2,2491
7	50 A, 650 mm/dk, 17 Bar	2,8035	3,1134	2,673
8	50 A, 800 mm/dk, 13 Bar	2,6675	3,0428	2,4138
9	50 A, 950 mm/dk, 15 Bar	2,5090	2,9870	2,225

6.3.5.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

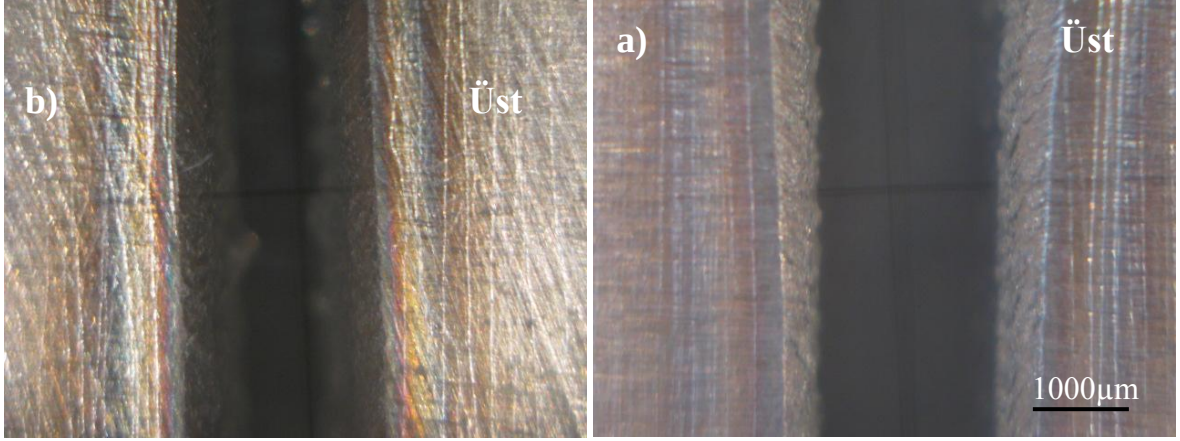
PAK ile kesme deneyleri sonucunda, kullanılan parametrelerin kerf genişliği üzerindeki etkilerini gösteren grafikler şekil 6.63’te verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, kerf genişliği, sabit akım şiddetinde, kesme hızının artmasıyla önemli derecede düşerken, akım şiddetinin artmasıyla kerf genişliği artmıştır. Kerf genişliği, akımın 40 A, ilerlemenin 650 mm/dk olduğu durumda 2,5376 mm iken, aynı akım şiddetinde, ilerlemenin 950 mm/dk olduğu durumda ise kerf genişliğinin 2,4975mm ye düştüğü

görülmüştür. Akım şiddetinin sabit olduğu durumlarda, ilerlemenin artmasıyla, kesme yüzeyindeki arkın gücü zayıflayacak ve bu da sistemin kesme enerjisini düşürecektir. Bu yüzden kerf genişliği düşecektir. PAK ile kesme işleminde, enerji yoğunluğunun akım şiddetiyle belirlendiği bilinmektedir. Dolayısı ile kesme işleminde, düşük ilerleme şartlarında akım şiddetinin artmasıyla, akım yoğunluğunun konsantrasyonu artacağı için kesme bölgesinde daha fazla hacimde malzeme ergitilerek uzaklaştırılacak, ısıdan etkilene bölge ve kerf genişliği artacaktır [135,136].



Şekil 6.63 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

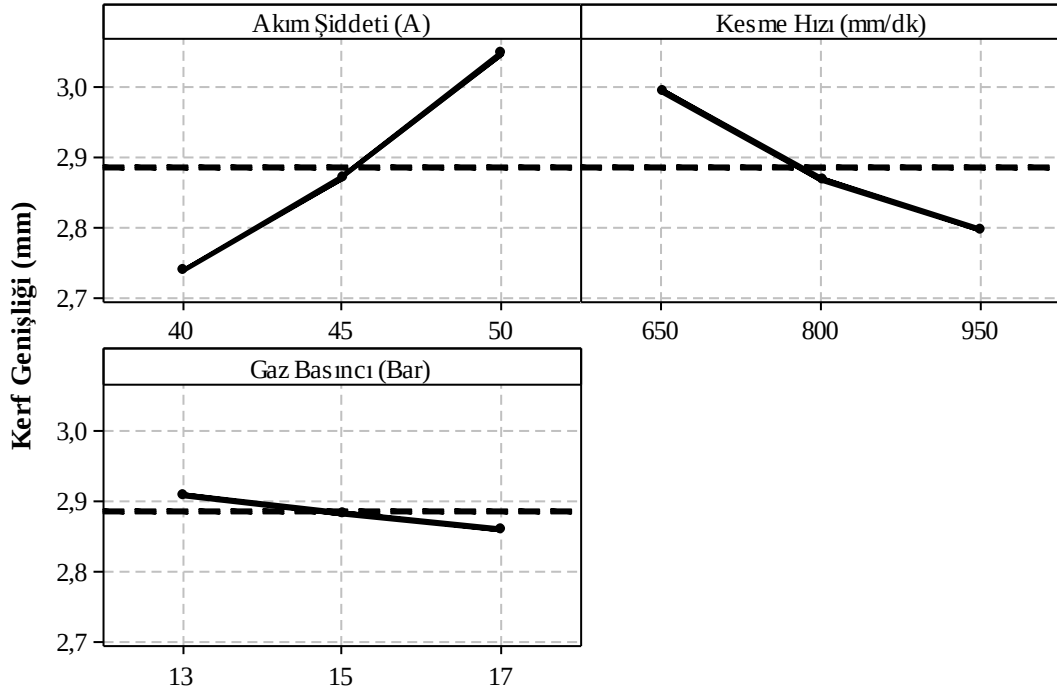
I. grup numunelerin PAK ile kesme sonucunda 2,4475mm olarak ölçülen en düşük kerf genişliği, akım şiddetinin en düşük (40 A), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (950 mm/dk, 17 Bar) 3 nolu deney şartlarında elde edilirken, 2,8035mm olarak ölçülen en yüksek kerf genişliği, akım şiddetinin ve gaz basıncının en yüksek (50 A, 17 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (650 mm/dk,) 7 nolu deney şartlarında elde edilmiştir. Bu numunelere ait görüntü şekil 6.64'te verilmiştir.



Şekil 6.64 I. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf genişliği
(a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar)

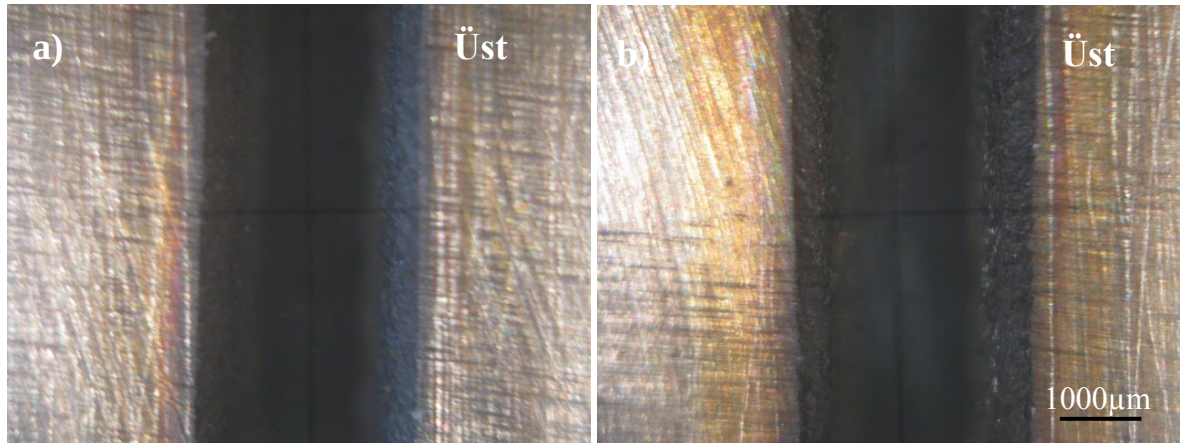
6.3.5.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Tablo 6.10 ve şekil 6.65'teki II. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama kerf genişliğini veren grafik incelendiğinde, I. grup numunelerde gözlemlendiği gibi, sabit akım şiddetinde, kesme hızının artmasıyla kerf genişliği düşerken, akım şiddetinin artmasıyla kerf genişliği artmıştır. Ancak bu değişikliğin, I. grup numunelere ait kerf genişliği değerlerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 6.65 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

Şekil 6.66’da fotoğraf görüntüleri verilen II. grup numunelerde kerf genişliği, akım şiddetinin en düşük (40 A), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (950 mm/dk, 17 Bar) 3 nolu deney şartlarında 2,6075 mm olarak ölçülürken, bu değer I. grup numunelerde 2,4475 mm’dir. Akım şiddetinin ve gaz basıncının en yüksek (50 A, 17 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (650 mm/dk,) 7 nolu deney sonucunda, en yüksek kerf genişliği değeri I. grup numunelerde 2,8035 mm iken, II. grup numunelerde 3,1134 mm olarak ölçülmüştür.

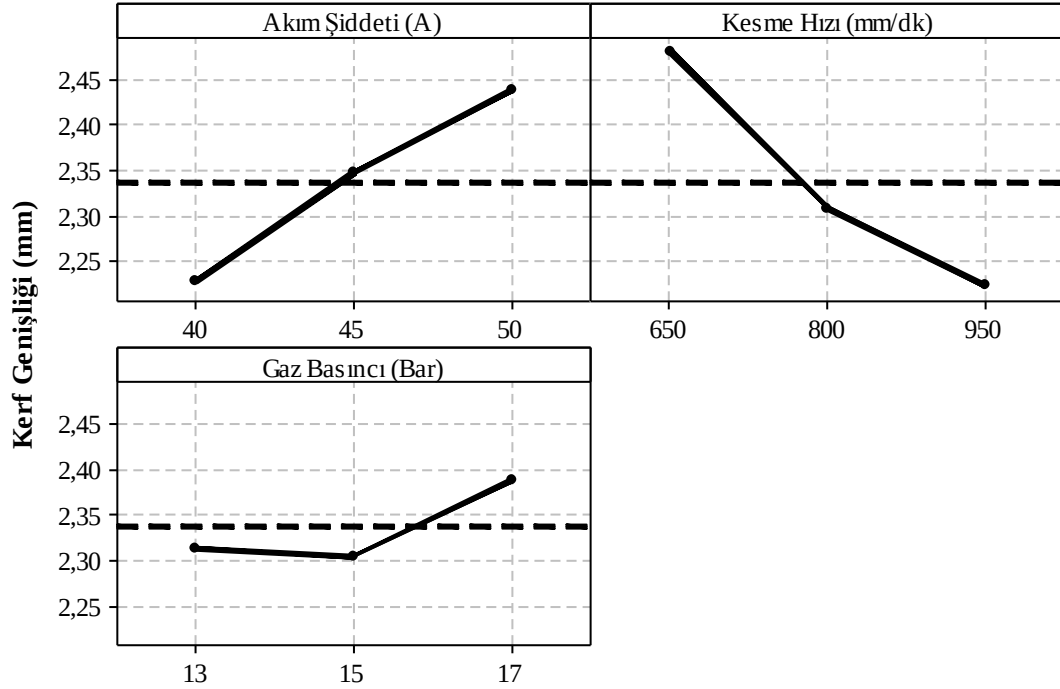


Şekil 6.66 II. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf genişliği
(a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar)

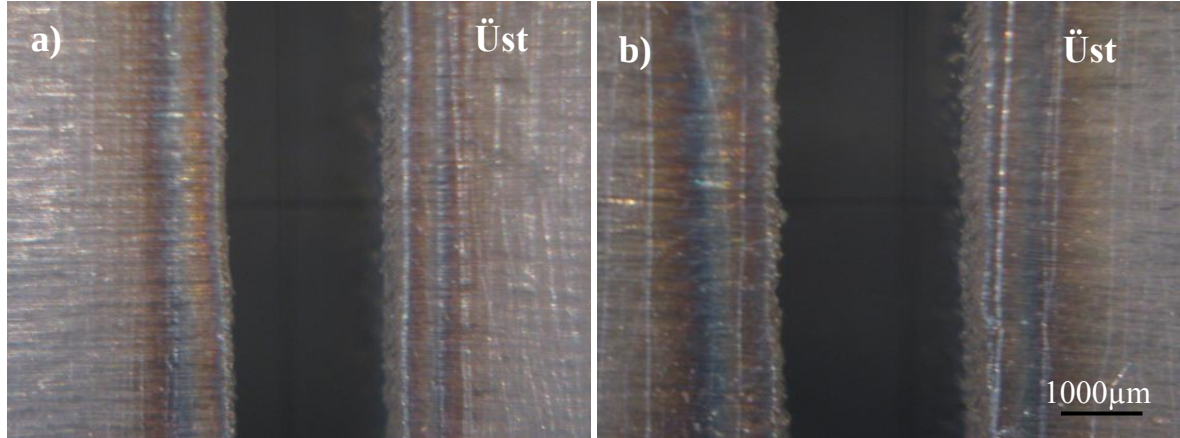
6.3.5.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Şekil 6.67’de III. grup numunelerin PAK işleminde kullanılan kesme parametrelerinin ortalama kerf genişliğine olan etkileri görülmektedir. I. ve II. grup numunelere benzer şekilde, akım şiddetinin sabit olduğu şartlarda, kesme hızının artmasıyla kerf genişliğinin düştüğü, akım şiddetinin artmasıyla kerf genişliğinin arttığı görülmüştür. Tablo 6.10’daki kerf genişliği değerleri irdelendiğinde, malzemelere uygulanan ısıtma işlemlerinin bir sonucu olarak, III. grup numunelerde artan ısıtma iletkenlik değeriyle ters orantılı bir şekilde diğer numunelere nazaran daha düşük olmuştur. Şekil 6.68’de III. grup numunelere ait en düşük ve en yüksek kerf genişliklerinin fotoğraf görüntüleri verilmiştir. Akım şiddetinin en düşük (40 A), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (950 mm/dk, 17 Bar) 3 nolu deney şartlarında (Şekil 6.56-a) 2,193 mm olarak ölçülürken, bu değer II. grup numunelerde 2,6075 mm, I. grup numunelerde ise 2,4475 mm’dir. En yüksek kerf genişliği ise, akım şiddetinin ve gaz basıncının en yüksek (50 A, 17 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (650 mm/dk,) 7 nolu deney sonucunda 2,673 mm iken II. grup numunelerde 3,1134 mm, I. grup numunelerde ise 2,8035 mm’dir.

Bu sonuçlar da aynı kesme şartlarında malzemenin ısı iletkenlik değeriindeki değışime bağı olarak kerf genişliğinin değıştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.67 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf genişliğine etkisi



Şekil 6.68 III. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değışen kerf genişliği
(a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar)

6.3.6. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları

Termal kesme yöntemlerinde, kesme tamlığı ve kalitesinin belirlenmesinde kerf eğim açısının en düşük seviyede olması tercih edilmektedir. Bu yüzden, plazma arkı ile

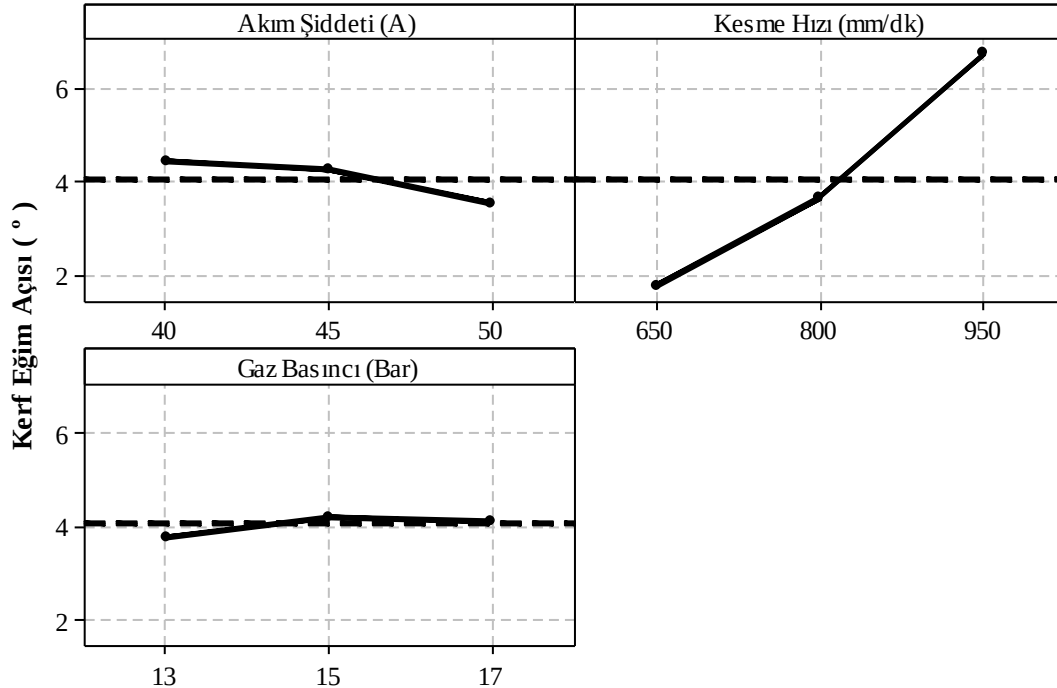
kesme işleminde, akım şiddeti, kesme hızı ve gaz basıncı gibi kesme parametrelerinin kerf eğim açısı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Tablo 6.11’de farklı parametreler kullanılarak plazma arkı ile kesilmiş olan numunelerin ortalama kerf eğim açıları verilmiştir.

Tablo 6.11. Plazma arkı ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı

Deney No	Deney Parametreleri (Akım şiddeti-A, Kesme hızı-mm/dk., Gaz basıncı- Bar)	Ortalama Kerf Eğim Açısı (°)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	40 A, 650 mm/dk, 13 Bar	1,422	1,591	1,424
2	40 A, 800 mm/dk, 15 Bar	4,138	4,870	4,035
3	40 A, 950 mm/dk, 17 Bar	7,687	7,751	7,682
4	45 A, 650 mm/dk, 15 Bar	2,609	2,953	2,616
5	45 A, 800 mm/dk, 17 Bar	3,502	3,765	2,515
6	45 A, 950 mm/dk, 13 Bar	6,629	6,229	6,634
7	50 A, 650 mm/dk, 17 Bar	1,236	1,426	1,238
8	50 A, 800 mm/dk, 13 Bar	3,370	3,165	3,374
9	50 A, 950 mm/dk, 15 Bar	5,932	6,288	5,931

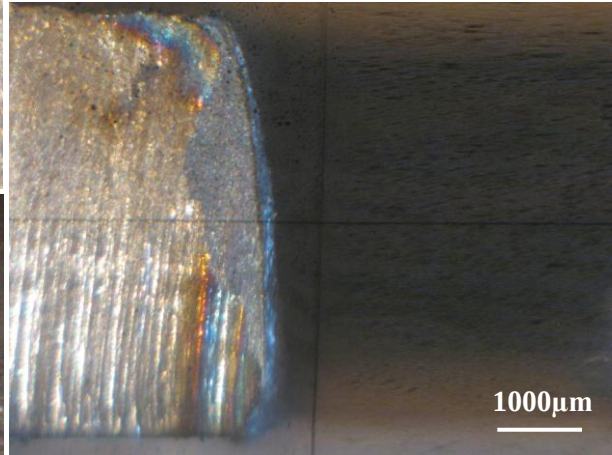
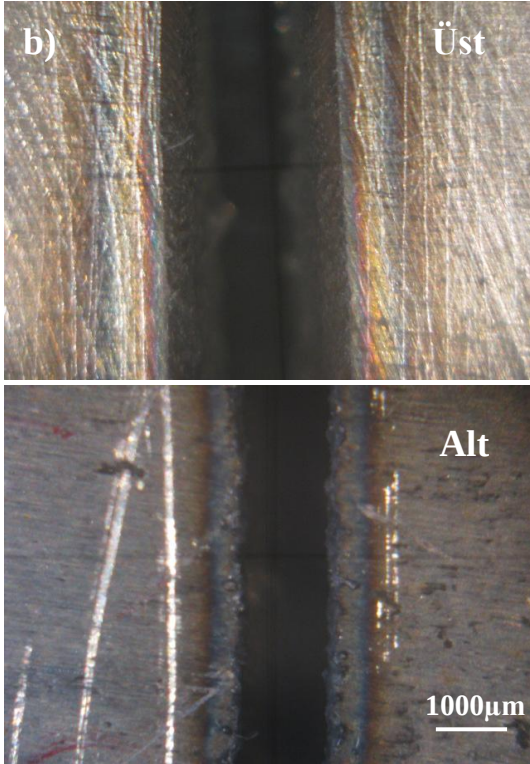
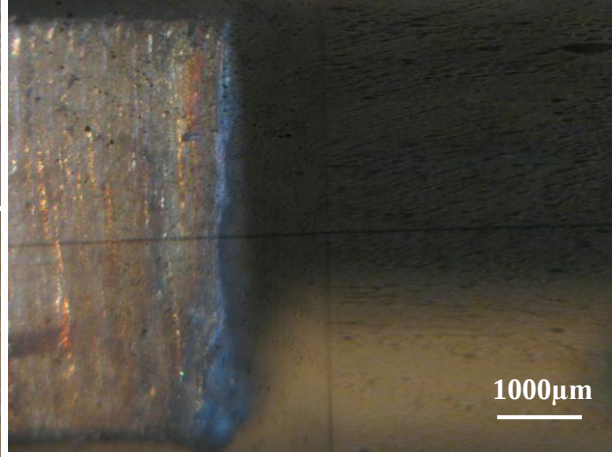
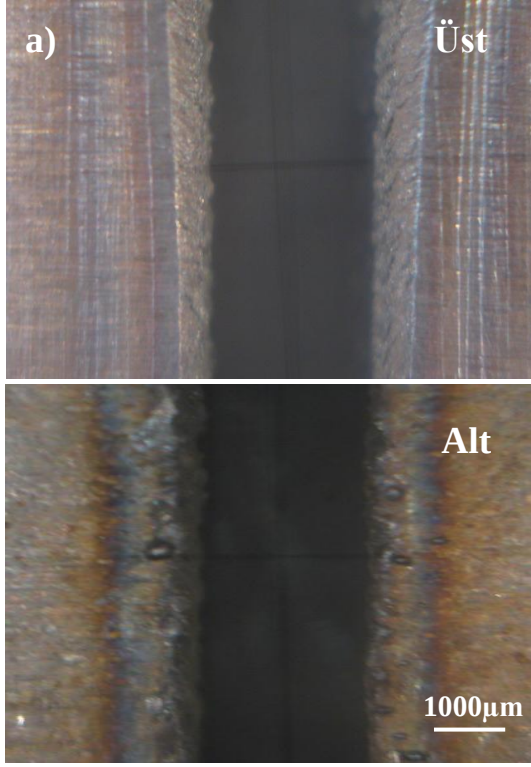
6.3.6.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

Tablo 6.11’deki değerlere ait grafikler şekil 6.69’da verilmiştir. Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi, ısıl işlem görmemiş I. grup numunelere ait ortalama kerf eğim açısı, akım şiddetinin sabit, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla önemli derecede artmaktadır. Kerf genişliği ve kerf eğim açısı üzerinde kesme hızının önemli bir etkisinin olduğu açıkça gözlenmektedir.



Şekil 6.69 I. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi

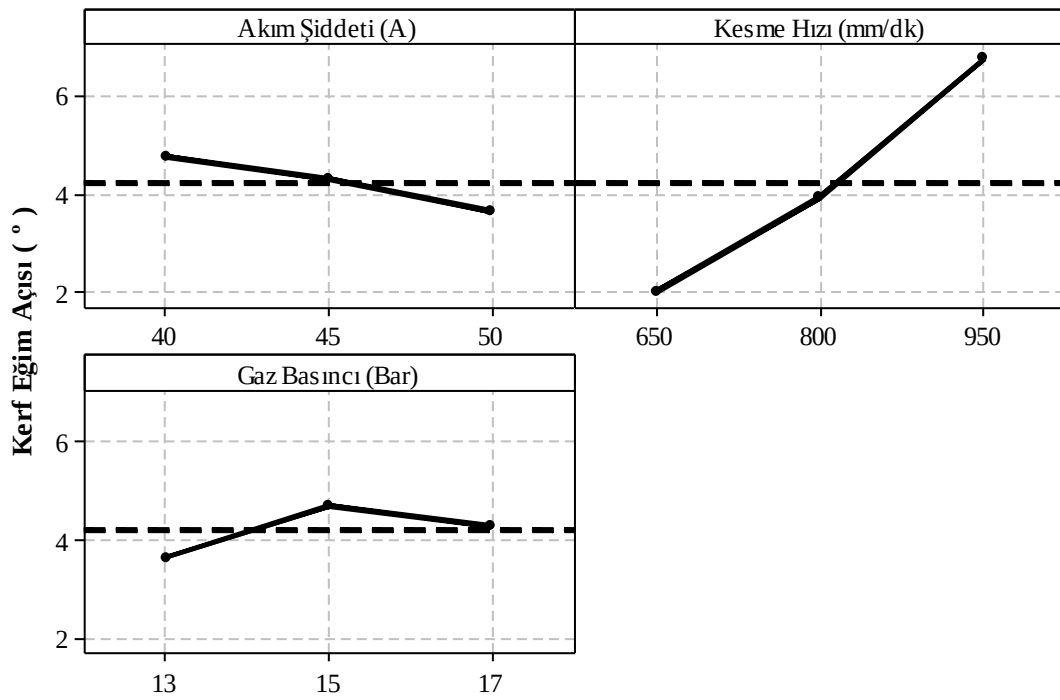
Şekil 6.70’te I. grup numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en yüksek ve en düşük kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En düşük ortalama kerf eğim açısı, 7 nolu deney şartlarında (50 A, 650 mm/dk, 17 Bar) $1,236^{\circ}$ olarak ölçülürken, $7,687^{\circ}$ olarak ölçülen en yüksek kerf eğim açısı ise 3 nolu deney şartlarında (40 A, 950 mm/dk, 17 Bar) elde edilmiştir.



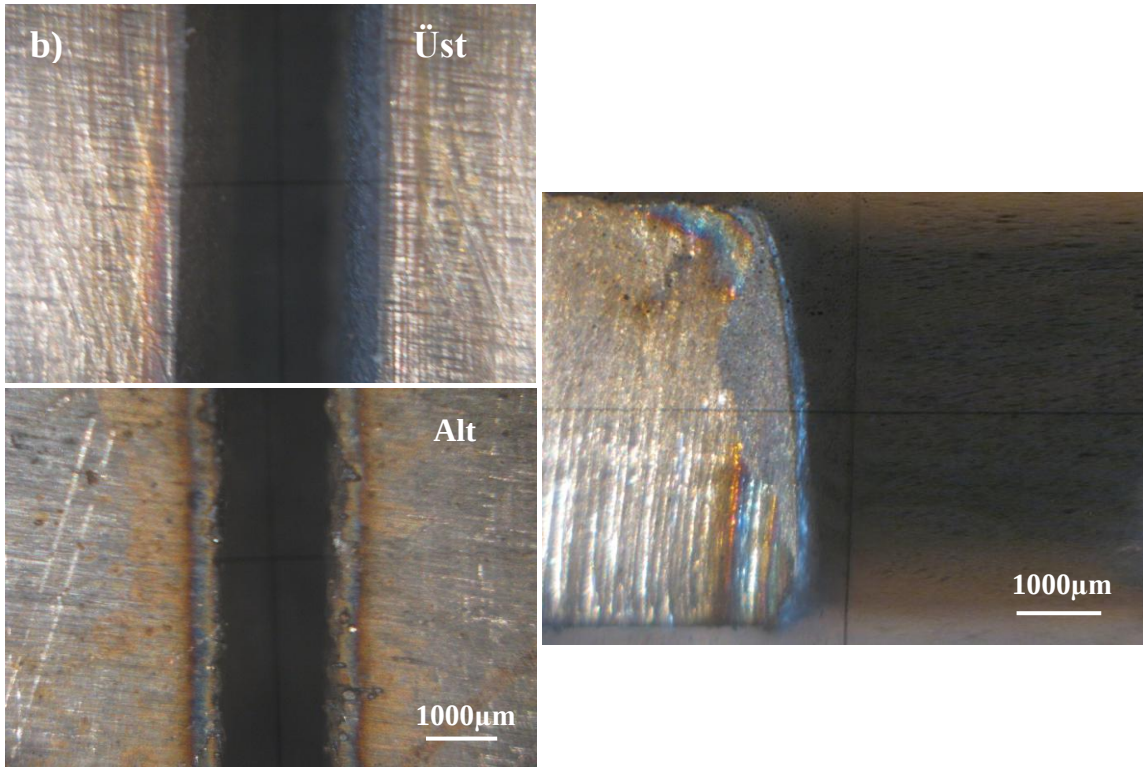
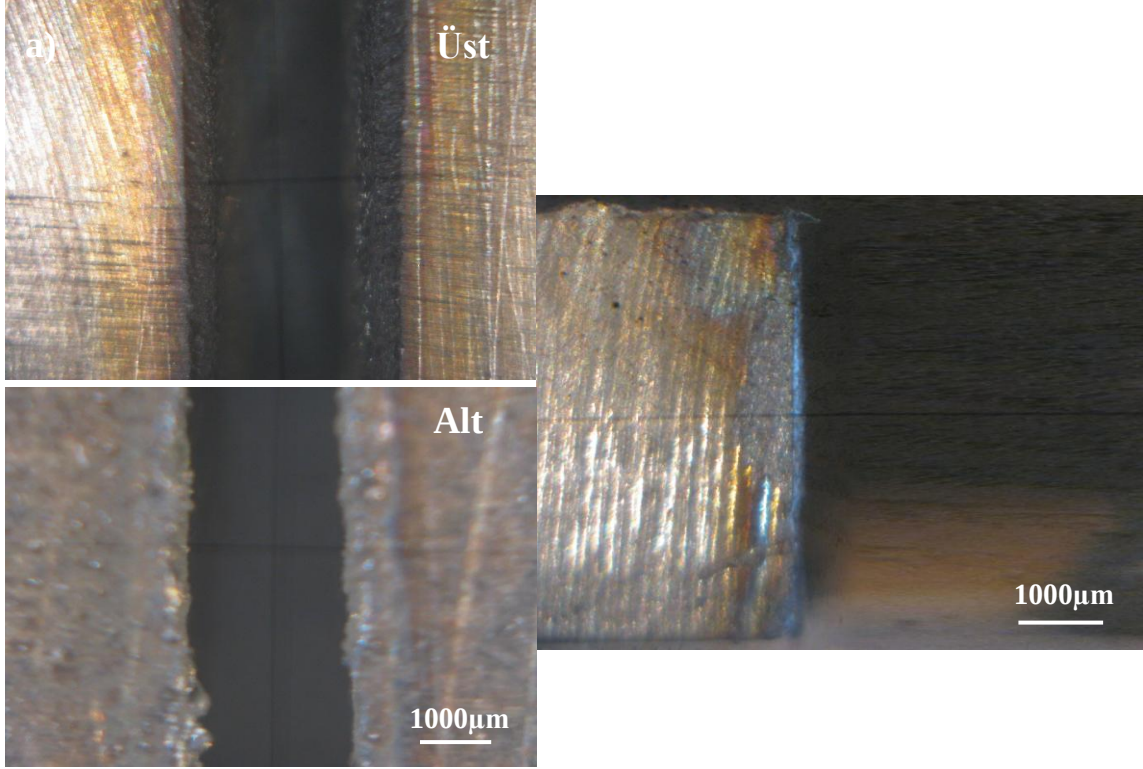
Şekil 6.70 I. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları
(a: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar, b: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar)

6.3.6.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

II. grup numunelerin PAK deneylerinde kullanılan parametrelerin, kerf eğim açısı üzerindeki etkilerinin gösteren grafikler şekil 6.71’de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere, kesme hızının kerf eğim açısı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Kesme hızının artmasına bağlı olarak, plazma gazının kesme kanalının alt kısımlarına doğru etkisini yitirmesi neticesinde, alt kerf genişliği üst kerf genişliğinden daha dar olmakta ve böylelikle eğim açısı da artmaktadır. II. grup numunelerde en düşük eğim açısı, şekil 6.72’de fotoğraf görüntülerinin verildiği 1,426° olarak ölçülen 7 nolu deney sonucunda elde edilirken, en yüksek eğim açısı ise 3 nolu deney sonucunda 7,751° olarak ölçülmüştür.



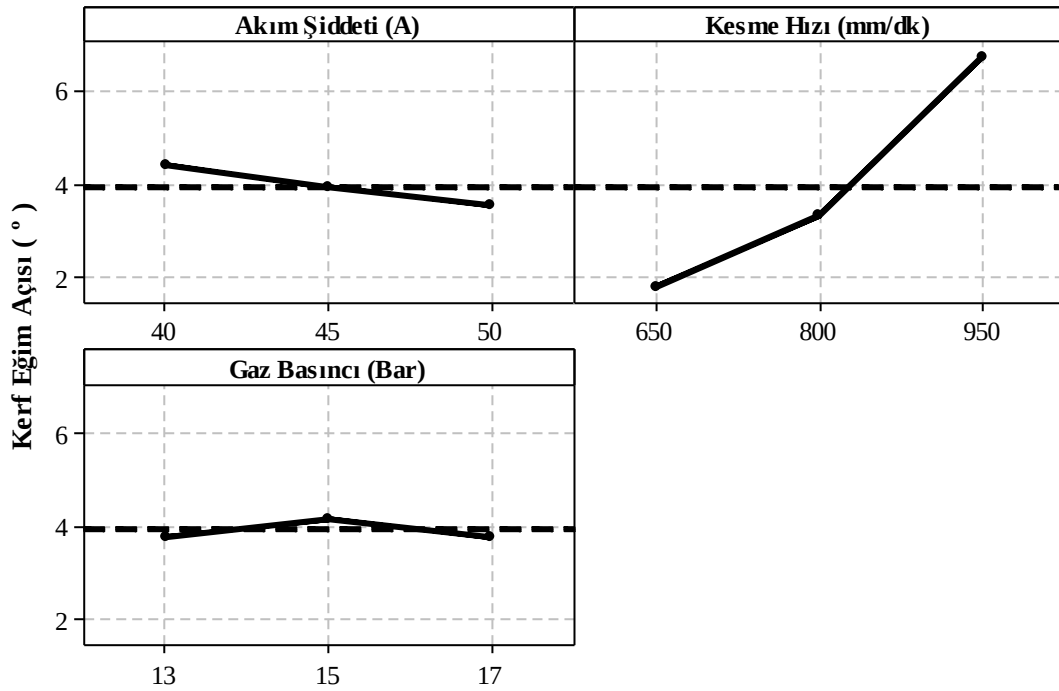
Şekil 6.71 II. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi



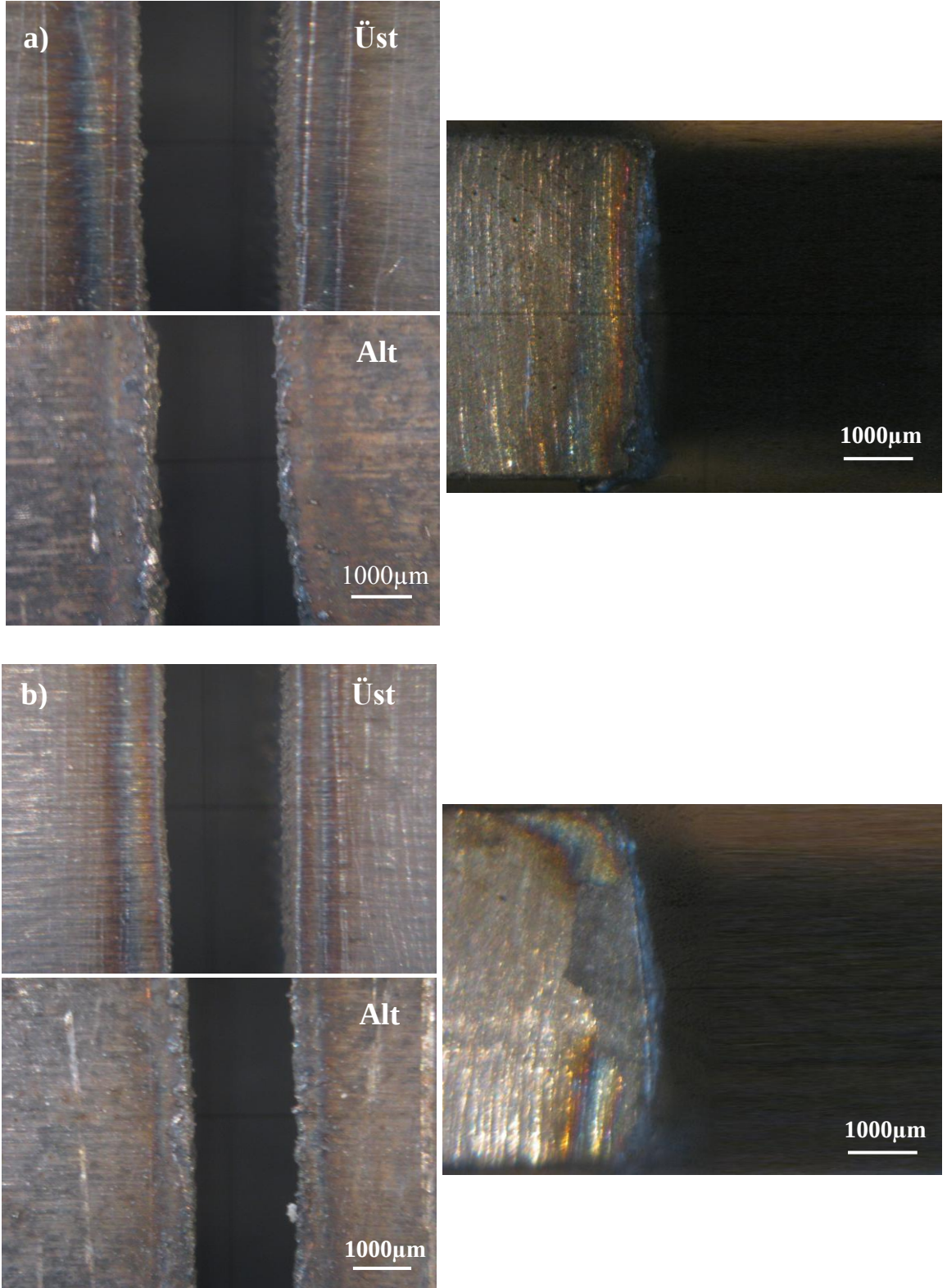
Şekil 6.72 II. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları
(a: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar, b: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar)

6.3.6.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Eğim Açısına Etkisi

Şekil 6.73'teki grafik incelendiğinde I.ve II. grup numunelerde gözlemlendiği gibi, kesme hızının artmasına bağlı olarak kerf eğim açısı artmakta, düşük kesme hızı ve yüksek akım şiddeti değerlerinde ise kerf genişliği azalmaktadır. Jiayou vd. [135] yaptıkları çalışmada, plazma ark ile kesme parametrelerinin kerf karakteristikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, kesme hızının artması ve ark akım şiddetinin düşmesi ile kesme enerjisinin düştüğünü ve kesme yüzeyindeki arkın etkisinin zayıfladığını belirtmişlerdir. Bu yüzden, alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha hızlı bir şekilde düşmesiyle kerf eğim açısının arttığını belirtmişlerdir. Şekil 6.74'te fotoğraf görüntülerinin verildiği III. grup numunelerde, en düşük eğim açısı 7 nolu deney sonucunda 1,238° olarak elde edilirken, en yüksek eğim açısı ise 3 nolu deney sonucunda 7,682° olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.73 III. grup numunelerde PAK parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi



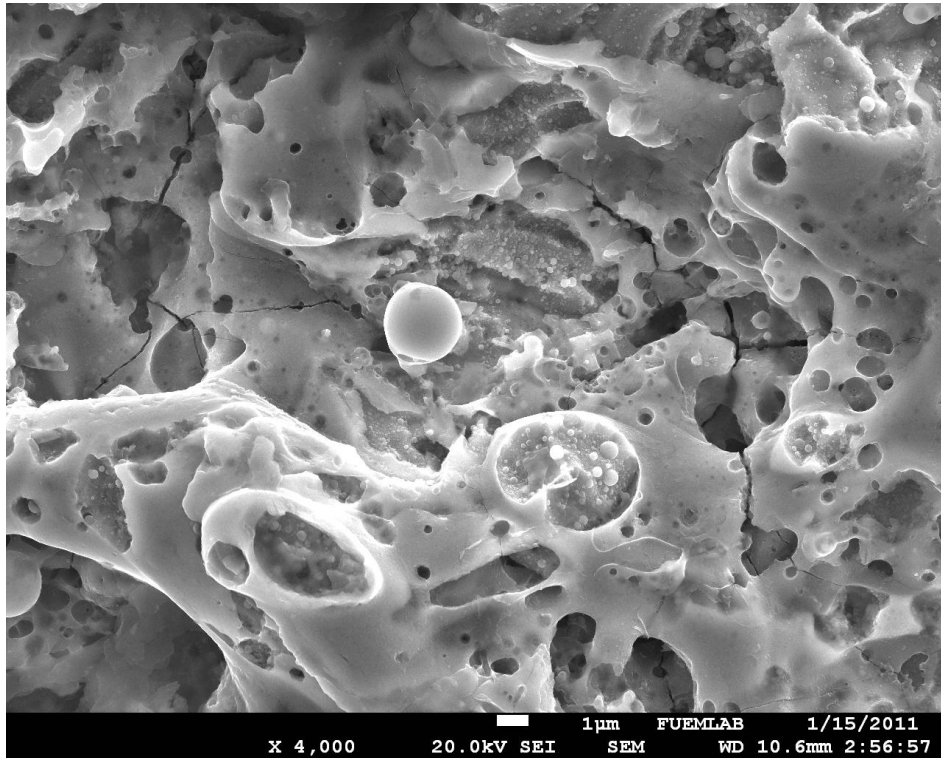
Şekil 6.74 III. grup numunelerde işlem parametrelerine göre değişen kerf eğim açıları
(a: 50 A, 650 mm/dk, 17 Bar, b: 40 A, 950 mm/dk, 17 Bar)

6.4. Tel Elektro Erozyon İle Kesme Deney Sonuçları

6.4.1. Metalurjik İnceleme Sonuçları

6.4.1.1. Yüzey Yapısı

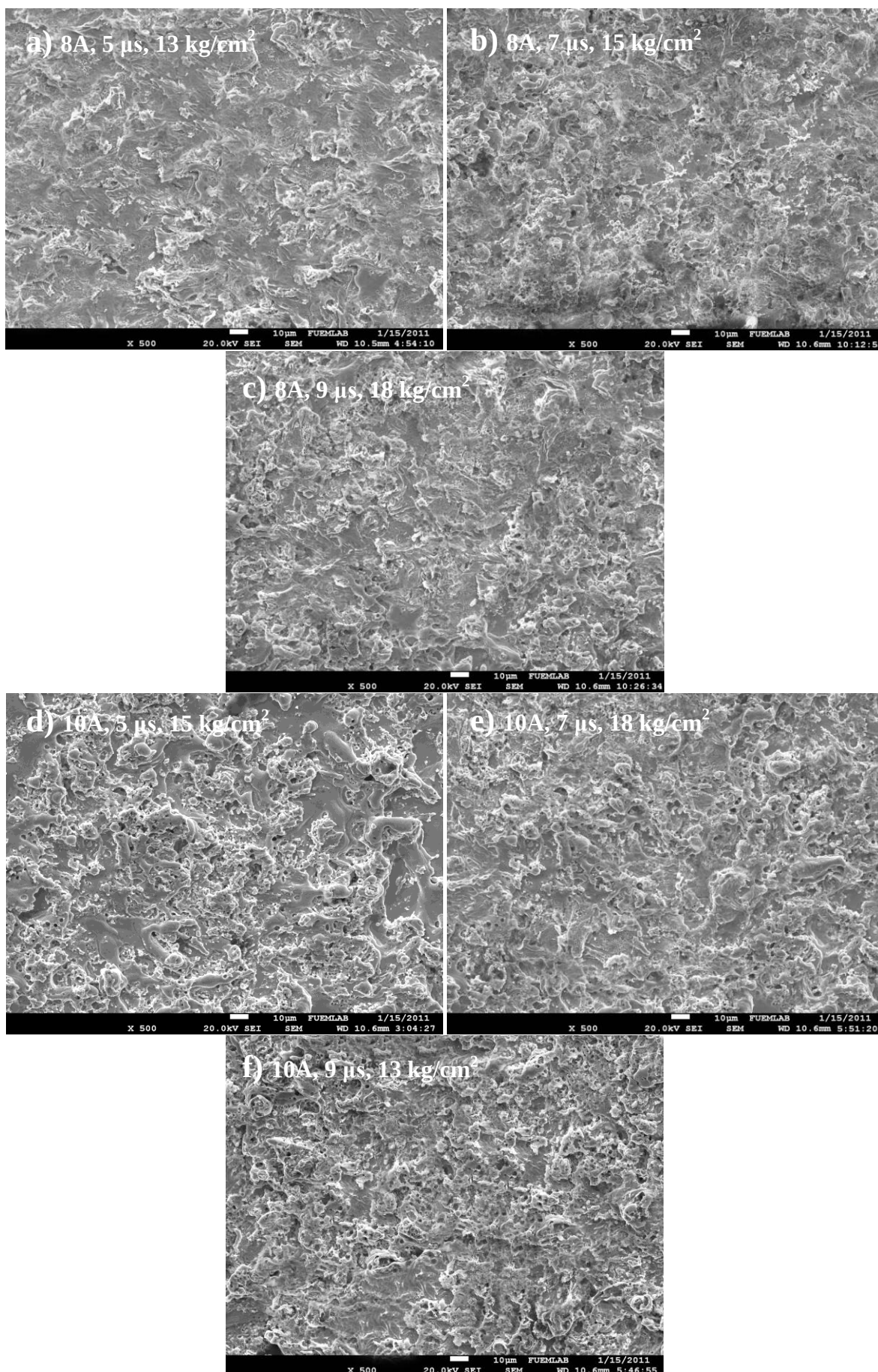
Şekil 6.75'te Inconel 718 nikel alaşımının tel elektro erozyon ile kesilmesi sonucunda elde edilen kesme yüzeyine ait bir görüntü verilmiştir. Yüzey, lazer ve plazma işleme yöntemlerinde olduğu gibi, kesme yönüne dik, kanal ve çiziklerden oluşan damarlı bir yapıda değil de, malzemedan kaldırılan ve sıvı basıncı ile ara bölgeden uzaklaştırılamayan küresel taneciklerden, eriyerek yüzeye damla şeklinde yapışan döküntülerden, çatlak, kalıntı ve farklı ebatlarda gelişmiş güzel dağılmış kraterlerden oluşmaktadır. Bu kraterler, işleme esnasında tel ile iş parçası arasında oluşan her bir kıvılcımın etkisi ile yüzeyden kaldırılan küresel talaşların meydana getirdiği oyuklar olarak nitelendirilmektedir. Yüzey görünümü açısından, işlenmiş yüzeylerin benzer, ancak akım ve vuruş süresinin değişimine bağlı olarak yüzeyde oluşan krater ve yükseltilerin farklı yoğunluklarda olduğu tespit edilmiştir.

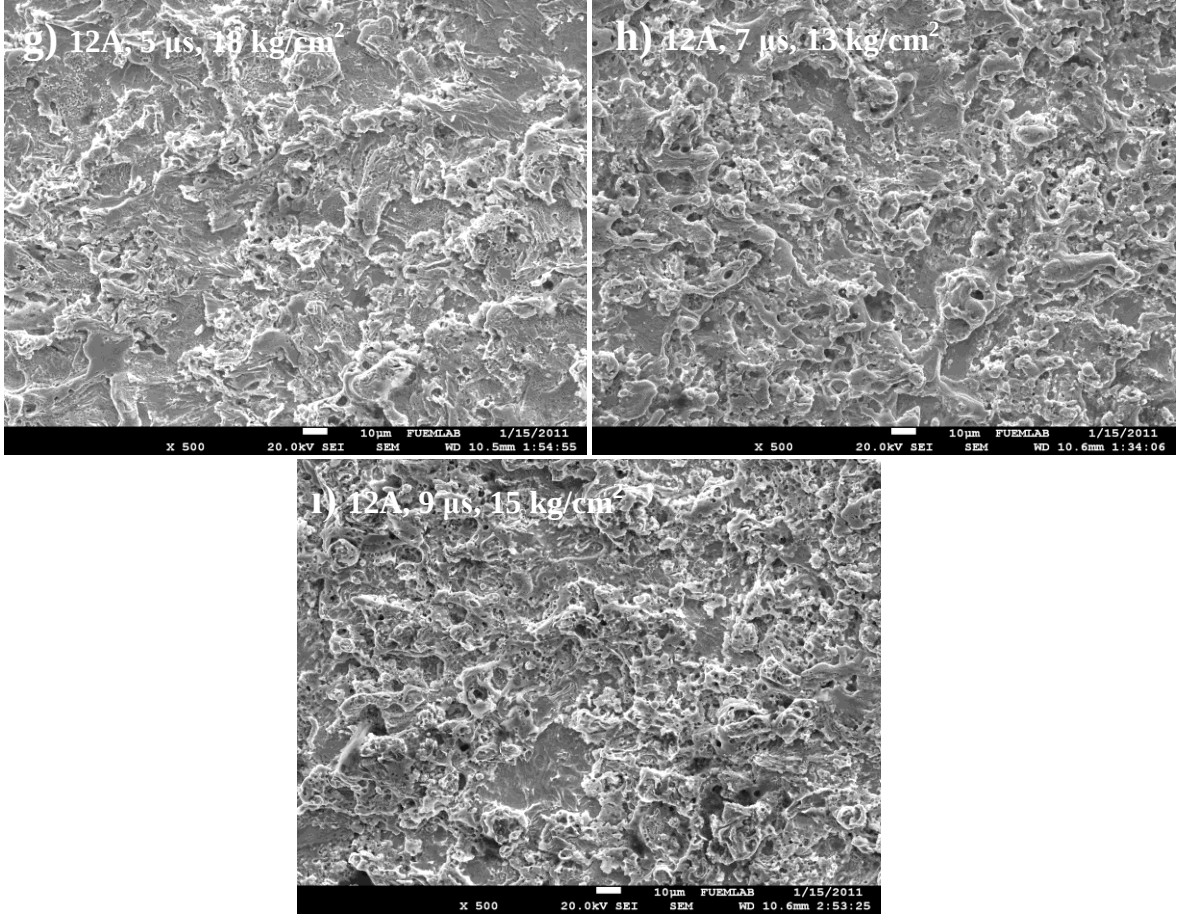


Şekil 6.75 Tel erozyonu ile kesilmiş tipik bir yüzey görüntüsü

6.4.1.1.1. Tel Elektro Erozyon İle Kesme Parametrelerinin Yüzey Yapısına Etkisi

Farklı akım, vurum süresi ve sıvı sirkülasyon basıncı kullanılarak kesilen ısı işlemsiz numunelere ait yüzey görüntüleri şekil 6.76'da görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, akım şiddetinin sabit olduğu durumda, vurum süresinin artmasıyla yüzey kabalaşmaktadır. Vurum süresi, tel elektrotta uygulanan elektrik zamanının uzunluğudur. Bir başka deyişle tel ile iş parçası arasında oluşan kıvılcım boşalımının zaman periyodudur. Dolayısıyla vurum süresindeki artış, iş parçasının yüzeyine daha fazla ısı enerjisinin transfer edilmesine yol açmakta ve iş parçası yüzeyinde daha büyük kraterlerin oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde akımın artmasıyla da yüzeyin kötüleştiği görülmektedir. Akım şiddetinin artması, iş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olmasına yol açmakta ve bunun sonucu olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmaktadır. Yüzeyden kaldırılan talaş miktarının artması, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de kötüleştirmektedir [138,139]. Sıvı sirkülasyon basıncının yüzey yapısı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda da, akımın ve vurum süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı [140], uygun sıvı sirkülasyon basıncının kullanılmasıyla tel kırılmalarının önlenmesi; fakat sıvı sirkülasyon basıncının yüzey pürüzlülüğü, yeniden katılacak tabaka kalınlığı ve mikro yapı üzerinde çok düşük etkisinin olduğu belirtilmiştir [60, 140].

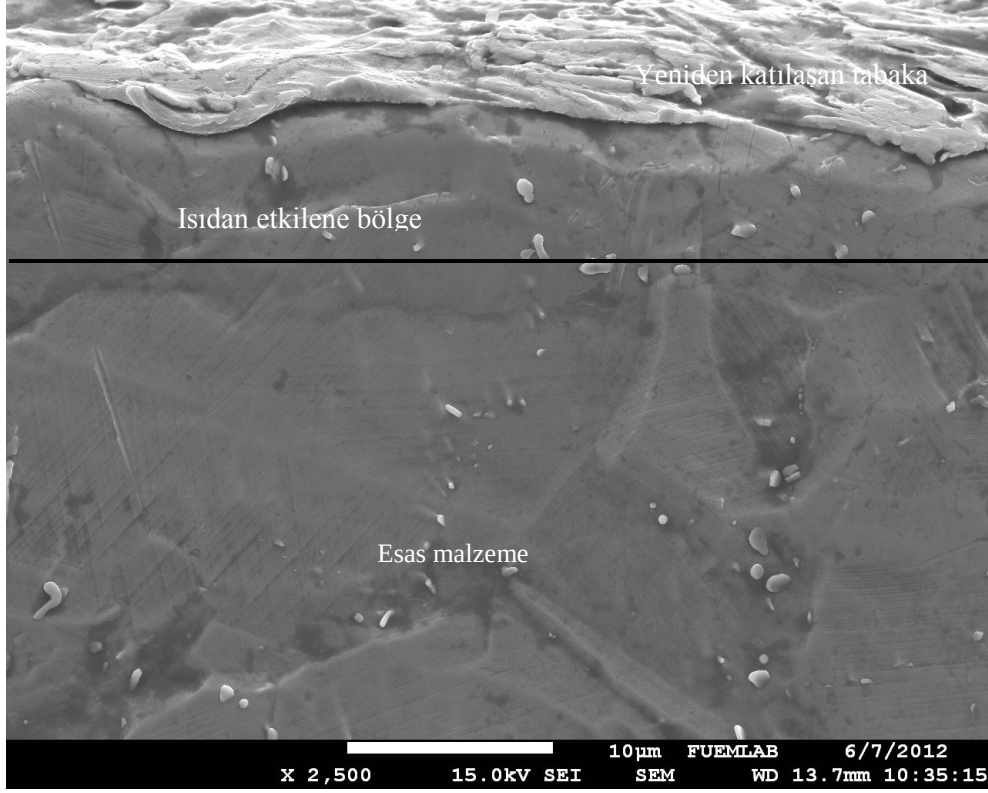




Şekil 6.76 Tel erozyon ile kesmede işlem parametrelerinin yüzey yapısına etkisi

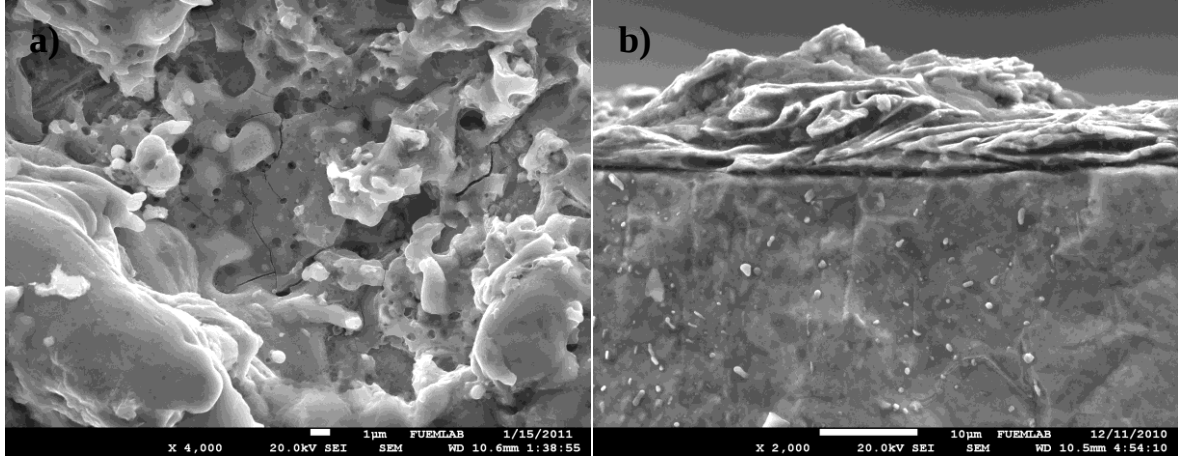
6.4.1.2. Isıdan Etkilenen Bölge

Tel erozyon ile kesilmiş numunede meydana gelen ısıdan etkilene bölgelerin SEM görüntüsü şekil 6.77’de verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde, lazer ve plazma ile kesme sonucunda ortaya çıkan ısıdan etkilenen bölgelerin tel erozyonla kesme sonucunda da oluştuğu, fakat bu bölgelerin diğer yöntemlere kıyasla daha dar aralıkta seyrettiği gözlenmektedir. Bu da, elektro erozyon ile işlemede, çalışma ortamının dielektrik sıvı içerisinde gerçekleşmesine bağlı olarak soğuma hızının daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



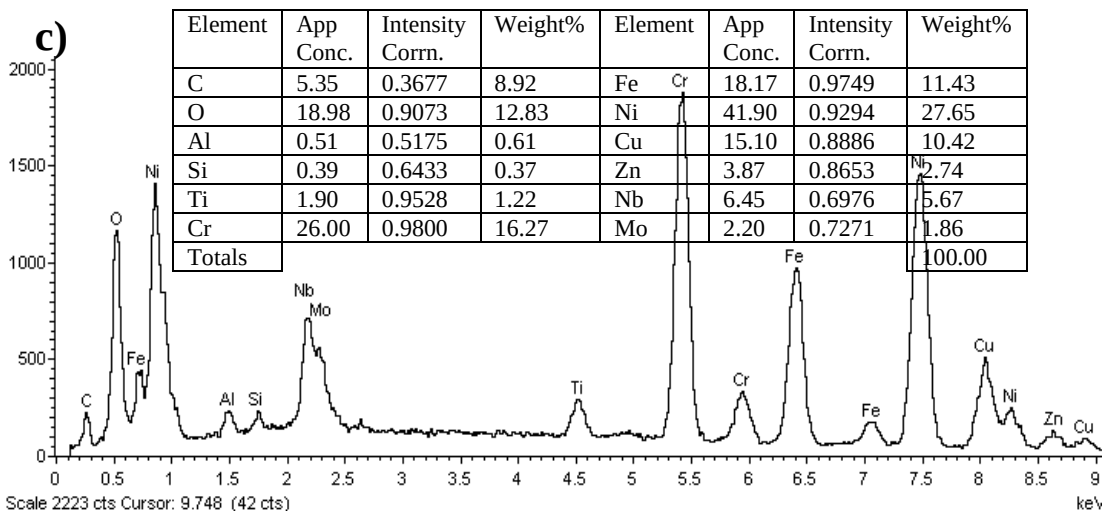
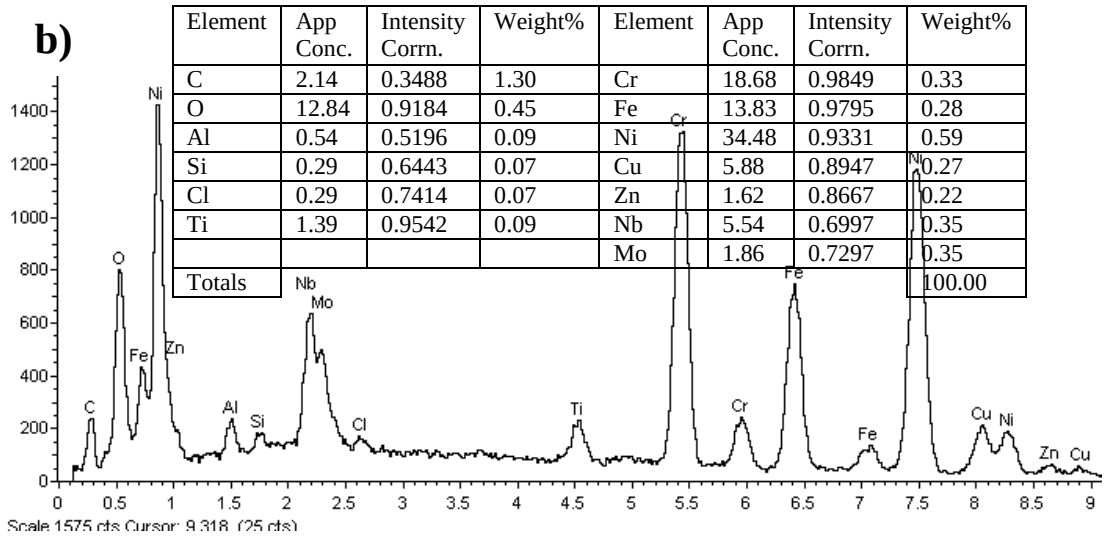
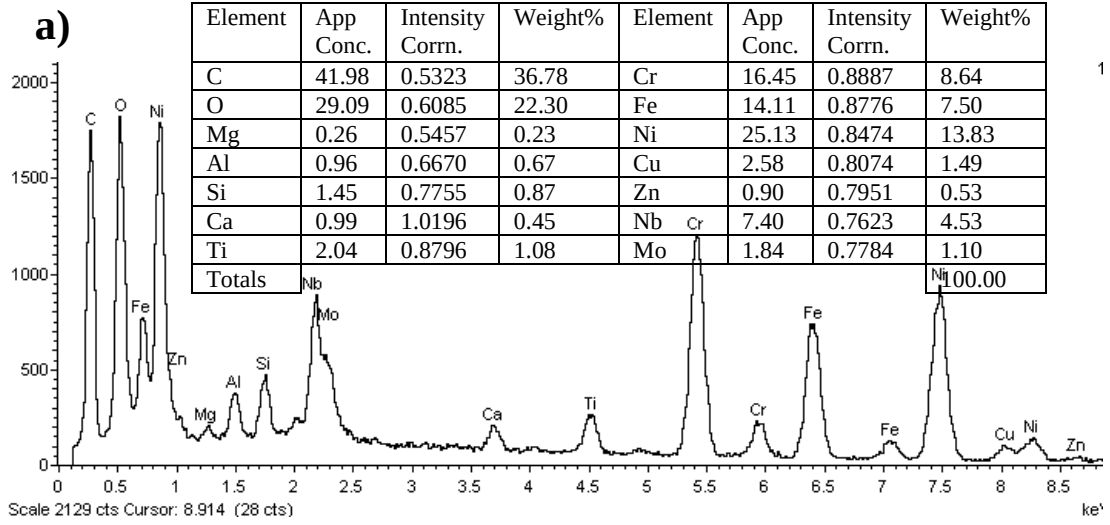
Şekil 6.77 Tel erozyon ile kesme sonrası malzemede meydana gelen ısıdan etkilenen bölgeler

Şekilde görülen yeniden katılan tabaka daha detaylı incelendiğinde şekil 6.78’de görüldüğü gibi metalografik ve mikro yapısal karakteristikleri ana malzemeden farklıdır. Tel erozyon ile kesme işleminde, akım ve vurum süresine bağlı olarak meydana gelen ısı enerjisi ile iş parçası üzerinden ergime olur, aşırı ısınmış eriyik haldeki malzeme buharlaşan gaz kabarcığı formunu alır ve deşarjın durması ile bu form patlar. Bu da yapının krater şeklinde bir form almasına neden olur. Ayrıca, işleme esnasında oluşan şiddetli ısınma ve soğuma oranına bağlı olarak gelişen düzensiz sıcaklık dağılımının yüzeyde oluşturduğu termal stresler nedeniyle mikro çatlak ve boşlukların oluştuğu gözlenmektedir.

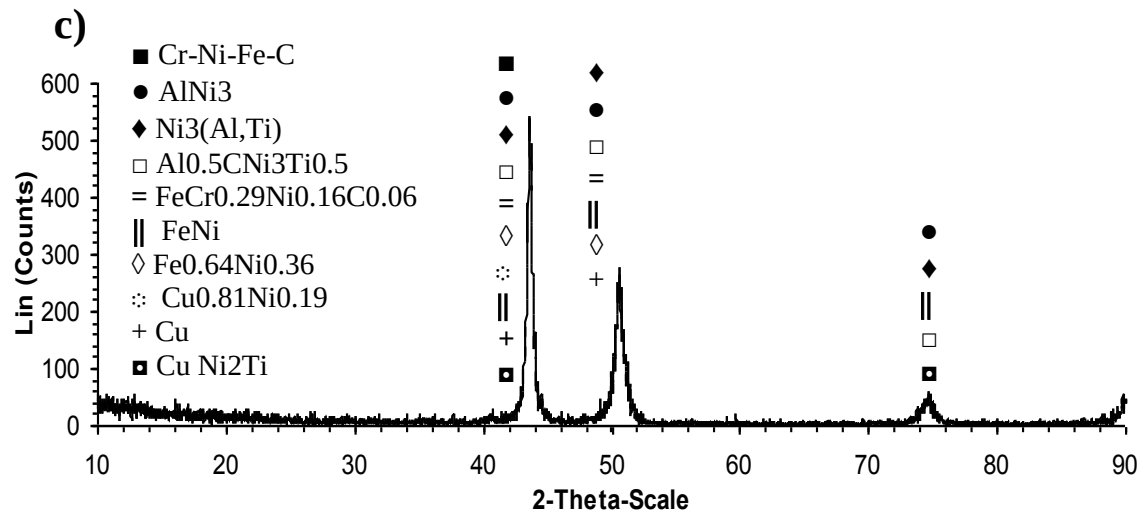
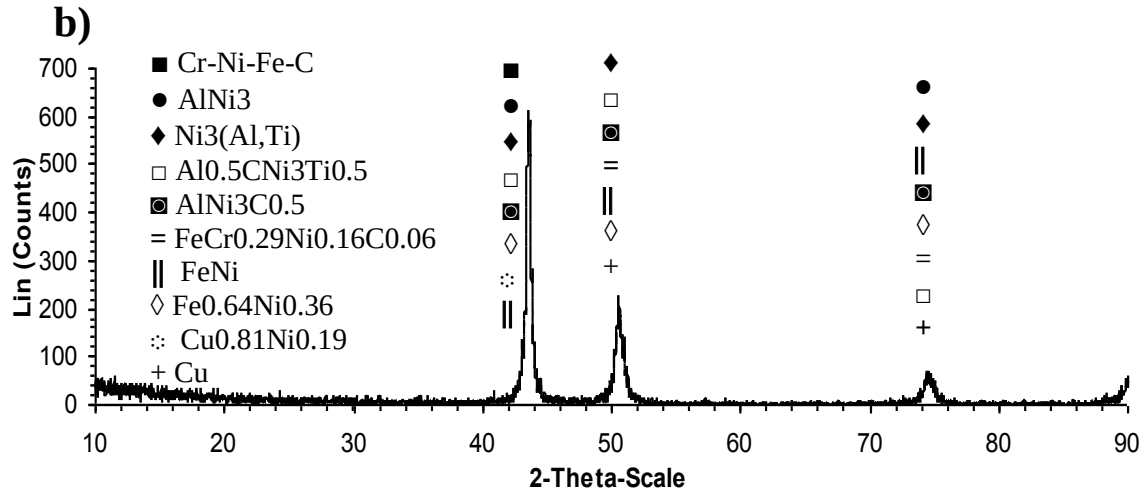
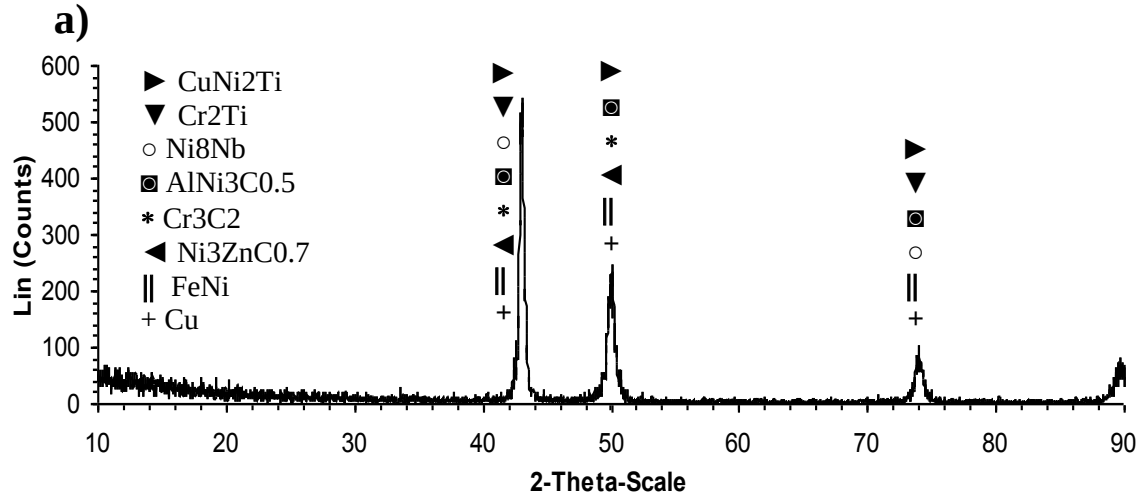


Şekil 6.78 YKTK' nın, a) üstten (kesilen yüzey), b) yandan görüntüleri

YKTK üzerinden alınan EDS ve XRD sonuçları şekil 6.79'da ve 6.80'de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde, YKTK' nın oksijen ve karbonca zenginleştiği görülmüştür. Bu durumun, Thomas R. Newton vd. [62] dielektrik sıvısı içerisinde gerçekleşen elektroliz işlemi neticesinde ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda, yeniden katılan tabakada bakır ve çinko bileşiklerinin varlığı göze çarpmaktadır. Inconel 718 yapısında %0,08 oranında Cu ihtiva ederken, yeniden katılan tabakadan alınan EDS sonuçlarında Cu elementinin yoğunluğunun arttığı, yapıda Zn olmamasına rağmen, YKTK da bu elementin varlığı, daha önceki çalışmalarda rapor edildiği gibi [62,66,141], tel elektrottan iş parçasına bu elementlerin difüze olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.79 Tel erozyon ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)



Şekil 6.80 Tel erozyon ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi
(a: I. grup numune, b: II. grup numune, c: III. grup numune)

6.4.2. YKTK Ölçüm Sonuçları

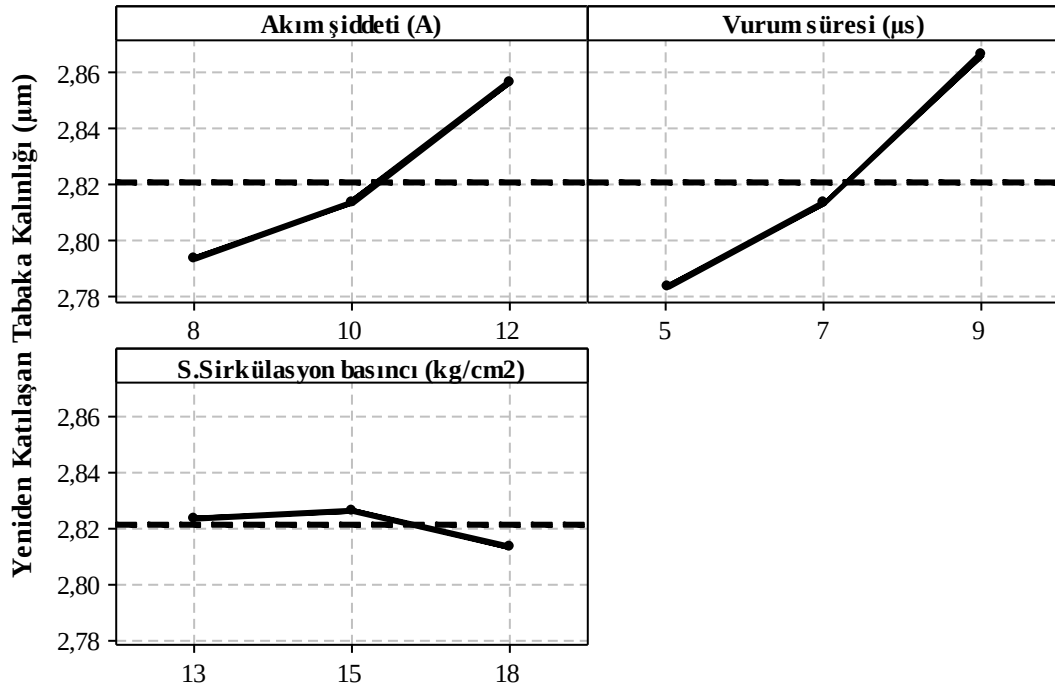
Tablo 6.12’de I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama YKTK nın kalınlıkları toplu şekilde verilmiştir.

Tablo 6.12. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri

Deney No	Deney Parametreleri (Akım-A, Vurum süresi- μ s, Sıvı sirkülasyon basıncı- kg/cm ²)	Ortalama YKTK (μ m)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	8 A, 5 μ s, 13 kg/cm ²	2,76	2,61	2,83
2	8 A, 7 μ s, 15 kg/cm ²	2,79	2,65	2,91
3	8 A, 9 μ s, 18 kg/cm ²	2,83	2,69	2,96
4	10 A, 5 μ s, 15 kg/cm ²	2,78	2,73	2,89
5	10 A, 7 μ s, 18 kg/cm ²	2,80	2,76	2,94
6	10 A, 9 μ s, 13 kg/cm ²	2,86	2,80	3,02
7	12 A, 5 μ s, 18 kg/cm ²	2,81	2,78	2,96
8	12 A, 7 μ s, 13 kg/cm ²	2,85	2,84	3,12
9	12 A, 9 μ s, 15 kg/cm ²	2,91	2,87	3,21

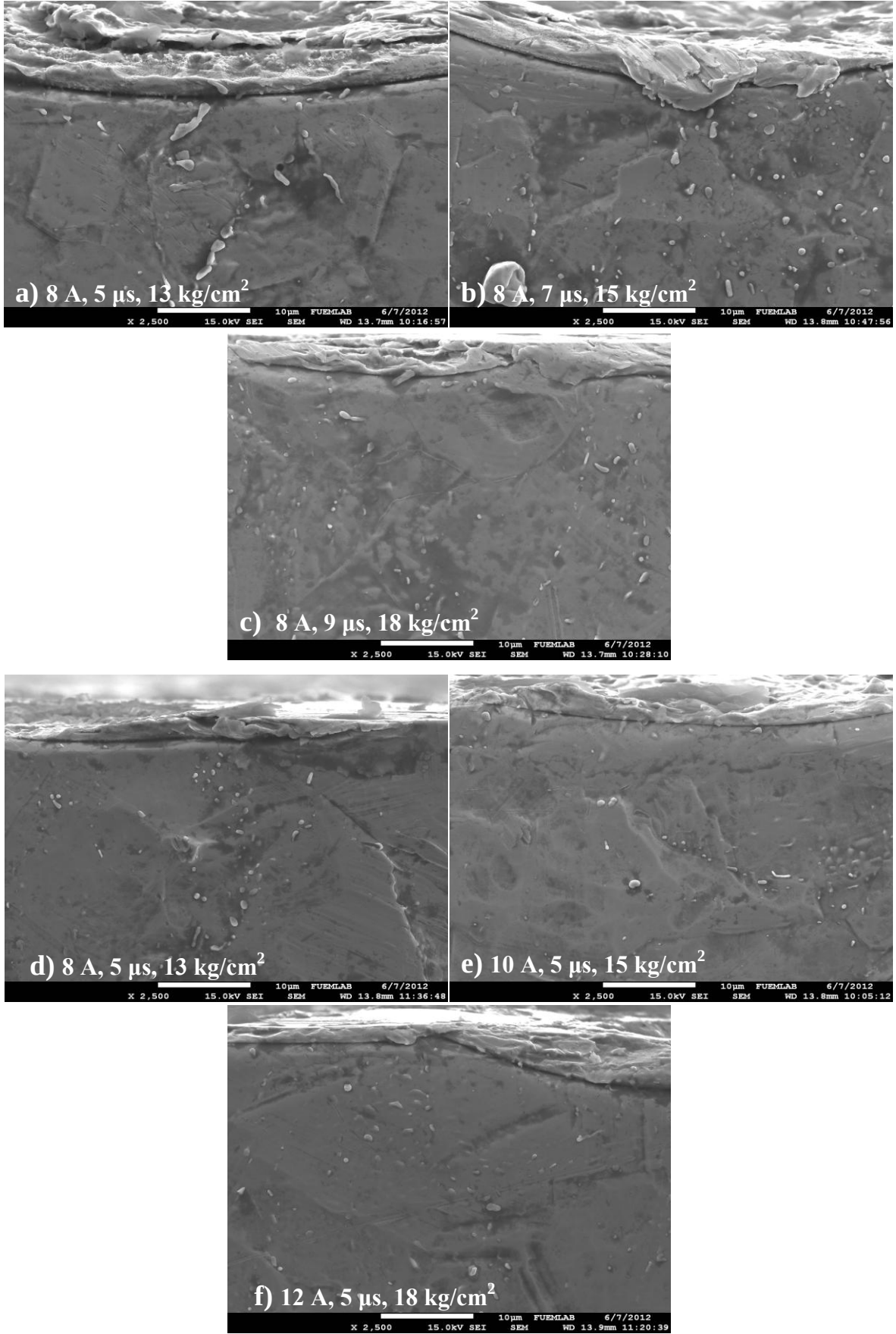
6.4.2.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK’ye Etkisi

Şekil 6.81’de kesme parametrelerinin YKTK üzerindeki etkileri görülmektedir. Şekil incelendiğinde, sıvı sirkülasyon basıncının yeniden katılacak tabaka kalınlığı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı, akım ve vurum süresinin ise büyük bir etkisinin olduğu görülmektedir. Tablo ve grafikler bir arada değerlendirildiğinde, sabit akım şartlarında, vurum süresinin artması ile ortalama YKTK’de artmaktadır. Vurum süresinin artmasıyla, iş parçası yüzeyine transfer edilen ısı enerjisinin miktarı artacağından, yüzeyden iletilecek malzeme miktarı da artmaktadır. Vurum süresinin artmasıyla, malzemenin izotermal eğrileri malzeme alt tabakalarına doğru daha fazla yayılmakta ve yüzey altında yayılan ısı miktarı malzeme içine doğru daha fazla bir bölgeyi kapsamaktadır. Bu da, daha geniş bir bölgenin ısı tesiri altında kalmasına ve YKTK’nin artmasına yol açmaktadır [142]. Ayrıca, ortalama YKTK, sabit vurum süresi şartlarında, akım değerindeki artış ile önemli derecede artırmaktadır. Akımın artmasıyla deşarj enerjisi daha yoğun olmaktadır. Yüksek deşarj enerjisi, daha fazla malzeme iletmesine neden olmaktadır [61]. İletilen malzeme kalınlığına paralel olarak YKTK de artmaktadır.



Şekil 6.81 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi

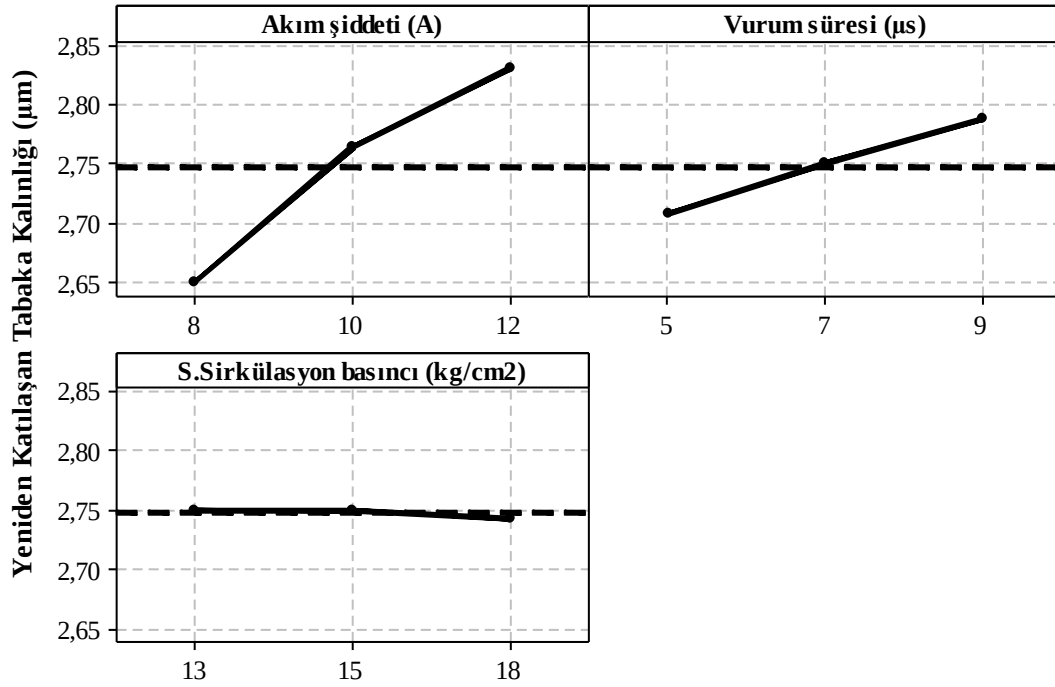
Şekil 6.82'de deney parametrelerine bağlı olarak değişen YKTK gösteren SEM görüntüleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, akımın sabit olduğu durumlarda, vurum süresinin artmasıyla yeniden katılan tabakanın kalınlığı artmakta ve sabit vurum süresinde, akım değerinin artmasıyla yeniden katılan tabakanın kalınlığının arttığı görülmektedir. Deneyler sonucunda, I. grup numuneler içerisinde en düşük yeniden katılan tabaka kalınlığı; akımın, vurum süresinin ve sıvı sirkülasyon basıncının en düşük olduğu (8 A, 5 μ s, 13 kg/cm²) 1 nolu deney sonucunda 2,76 μ m olarak ölçülürken (Şekil 6.82-a), en yüksek yeniden katılan tabaka kalınlığı; akımın en yüksek, ilerlemenin en düşük ve gaz basıncının en yüksek olduğu (12 A, 9 μ s, 15 kg/cm²) 9 nolu deney sonucunda 2,91 μ m olarak ölçülmüştür. K. Kanlayasiri vd. [61], yapmış oldukları çalışmada, akım ve vurum süresinin yüksek olduğu durumlarda, iş parçası yüzeyinde oluşan deşarj enerjisinin daha yoğun olmasına bağlı olarak işlenmiş yüzeyin daha pürüzlü ve ısı hasarlarının daha derin olduğundan bahsetmişlerdir. Bundan dolayı, akım ve vurum süresinin düşük seviyelerde tutulması gerektiğini; ancak bu iki parametrenin düşük olduğu durumlarda, işleme süresinin ve maliyetin arttığının belirtmişlerdir.



Şekil 6.82 I. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

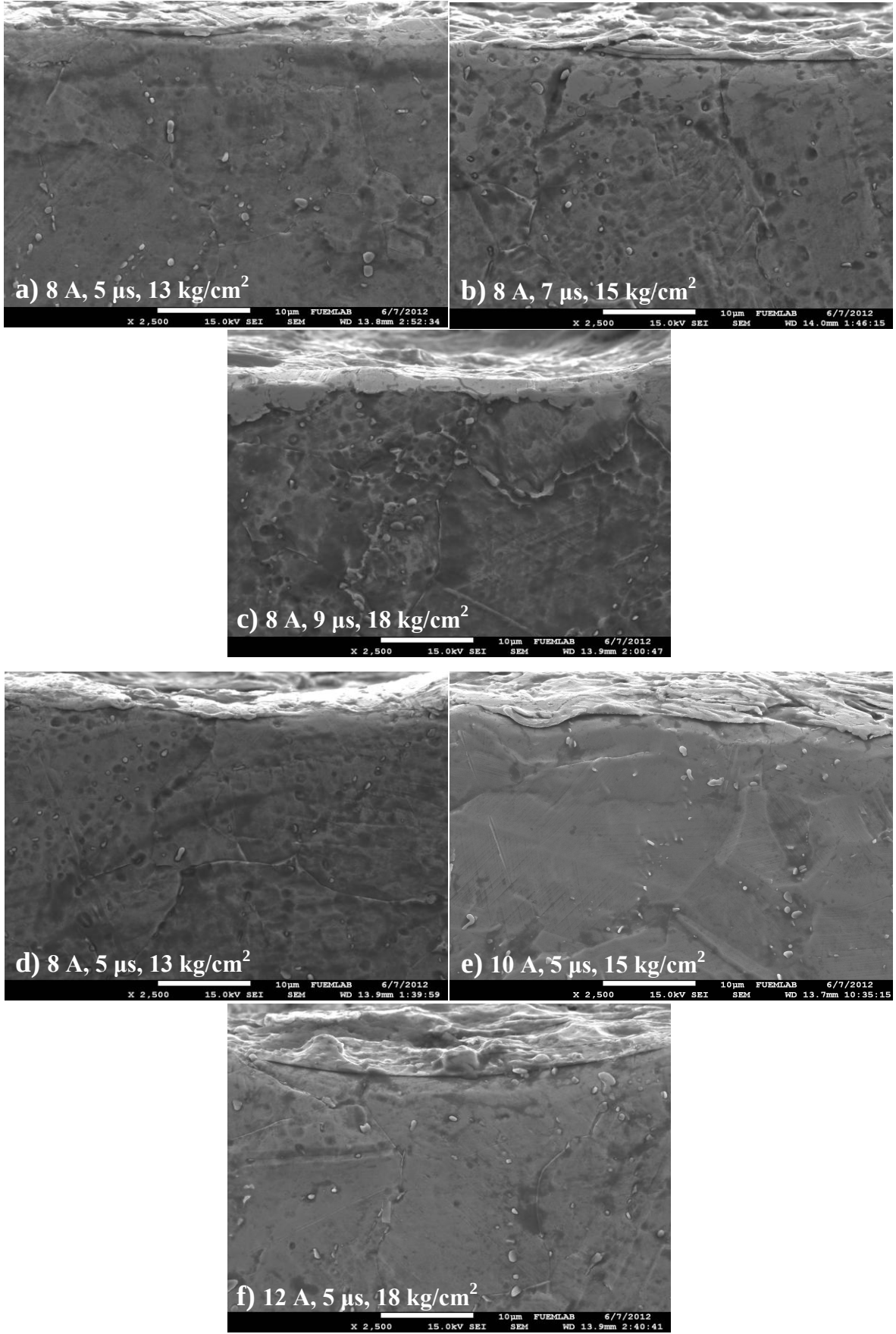
6.4.2.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Şekil 6.83'te II. grup numunelerde, kullanılan parametrelerin etki grafikleri görülmektedir. I. grup numunelere benzer şekilde, kullanılan parametreler, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı üzerinde aynı etkiye sahiptir. Ancak, aynı kesme şartlarında, I. grup numunelerde yeniden katılaşan tabaka kalınlığı 2,76 μm ile 2,91 μm arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık 2,61 μm ile 2,87 μm ' e düşmektedir. Bu düşüşün sebebi, II. grup numunelerin I. grup numunelere nazaran daha düşük termal iletkenliğe sahip olmalarıdır. Genelde, tel erozyon ile işlenebilirlik, malzemelerin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri ve kristal yapılarından ziyade, ergime sıcaklığı ve termal iletkenliği ile ilişkilidir. Malzemelerin yüksek ergime sıcaklığı, daha düşük ergime ve buharlaşmaya neden olurken, yüksek termal iletkenlik, matris içerisine daha fazla ısının transfer edilmesine yol açarak ısıl hasarların genişlemesine neden olur [143].



Şekil 6.83 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi

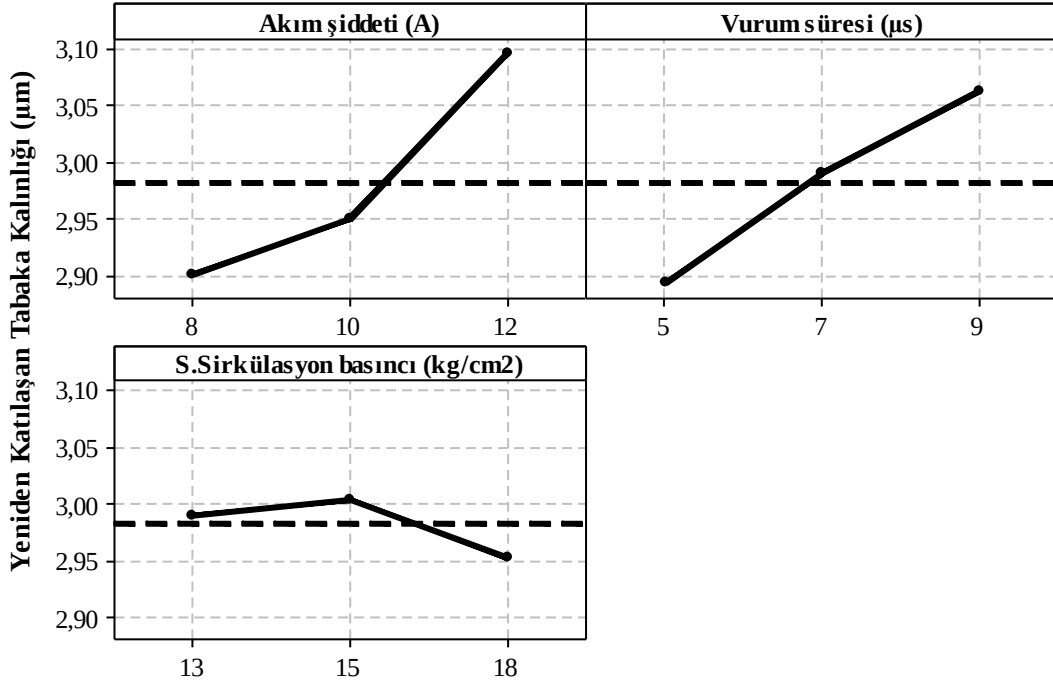
Şekil 6.84'te, akım şiddetinin sabit, vurum süresinin artmasına bağlı olarak numuneler üzerinde oluşan yeniden katılaşan tabaka kalınlıklarının arttığı ve vurum süresinin sabit olduğu durumda akım şiddetinin artmasıyla yeniden katılaşan tabaka kalınlıklarının arttığını gösteren SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.84 II. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

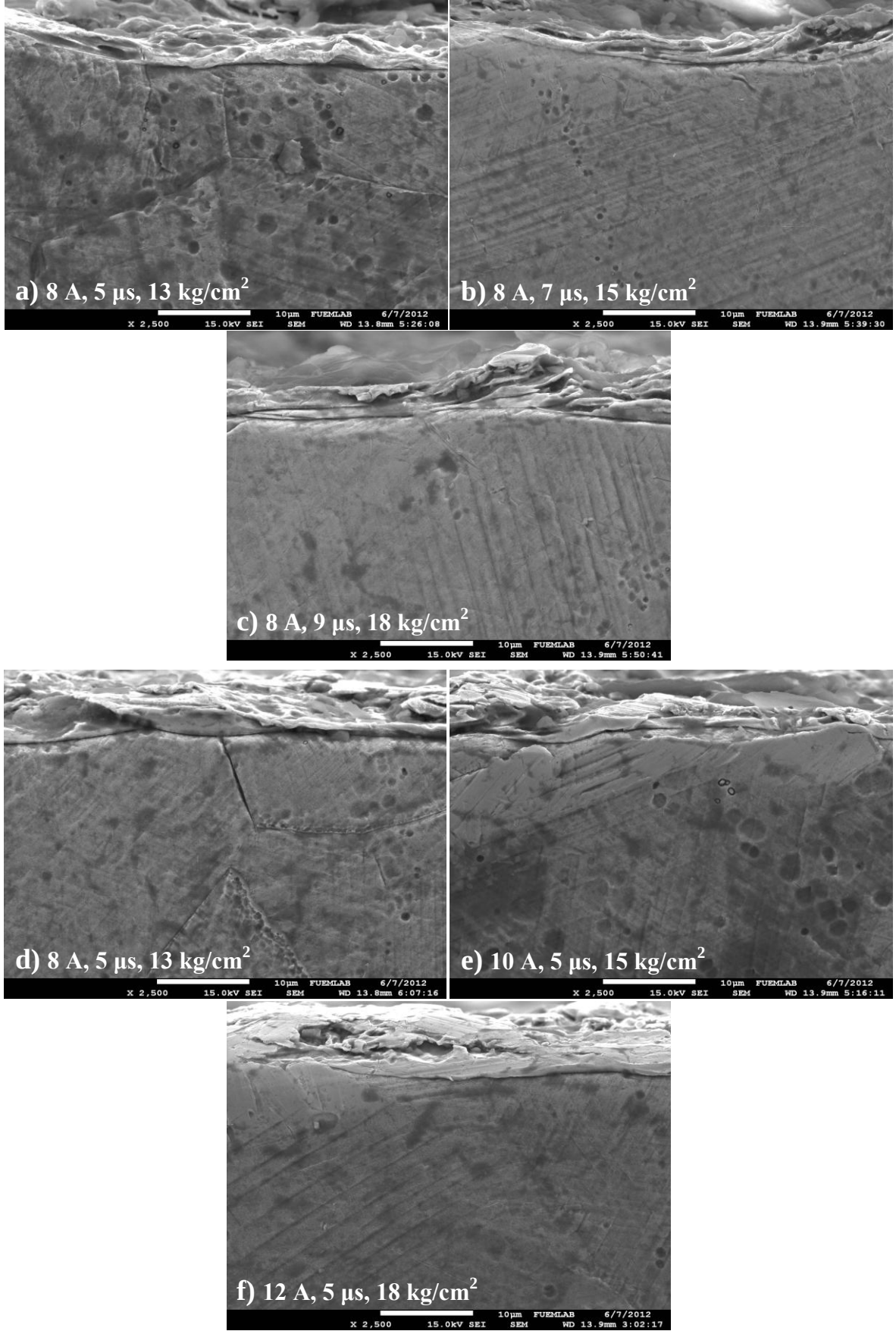
6.4.2.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin YKTK'ye Etkisi

Tablo 6.12'de ve şekil 6.85'teki grafikler birlikte incelendiğinde I.ve II. grup numunelerde gözlendiği gibi, YKTK üzerinde, akım ve vurum süresinin büyük oranda etkili olduğu. Ayrıca, akım şiddeti ve vurum süresinin artmasına bağlı olarak YKTK'nin arttığı grafiklerden açıkça görülmektedir.



Şekil 6.85 Tel erozyon ile kesme parametrelerinin YKTK'ye etkisi

Şekil 6.86'daki III. grup numunelere ait SEM fotoğrafları, sabit akım şiddetinde, vurum süresinin artmasıyla yeniden katılan tabakanın kalınlığının arttığını, aynı şekilde, sabit vurum süresinde akım şiddetinin artmasıyla yeniden katılan tabakanın kalınlığının arttığını göstermektedir. Ancak bu değişikliğin I. ve II. grup numunelere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. I. grup numunelerde ortalama yeniden katılan tabakanın kalınlık değerleri $2,76 \mu\text{m}$ ile $2,91 \mu\text{m}$ arasında değişirken, II. grup numunelerde bu aralık $2,61 \mu\text{m}$ ile $2,87 \mu\text{m}$ 'e düşmekte, III. grup numunelerde ise $2,83 \mu\text{m}$ ile $3,21 \mu\text{m}$ aralığında değişmiştir. Yeniden katılan tabakanın kalınlık değerlerindeki bu artış, aynı kesme şartlarında malzemenin ısı iletkenlik değerindeki artışa bağlı olarak yeniden katılan tabakanın kalınlığının arttığını ortaya koymaktadır. Yüzey altında yayılan ısı miktarı, ısı iletkenlik değerindeki artışa bağlı olarak malzeme içine doğru daha fazla bir bölgeyi kapsamaktadır. Bu da daha geniş bir bölgenin ısı tesiri altında kalmasına ve yeniden katılan tabaka kalınlığının artmasına yol açmaktadır.



Şekil 6.86 III. grup numunelerde deney parametrelerinin YKTK'ye etkisi

6.4.3. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.13'te tel erozyonu ile kesilen I, II, III. grup numunelere ait ortalama mikrosertlik değerleri toplu şekilde verilmiştir.

Isıl işlem görmemiş I. grup numunelerde, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeye benzerlik gösterirken, YKT'nin sertliği ana malzemeye göre artmıştır. S. H. Kang vd. [141], yapmış oldukları çalışmada, ısıl işlem görmemiş nikel esaslı süper alaşımın tel erozyon ile işlenmesi sonrasında meydana gelen yeniden katılaşan tabakanın sertliğinin ana malzemeye göre iki kat fazla olduğunu rapor etmişlerdir. Katı çözeltiye alma işlemi ile güçlendirilen nikel esaslı alaşımlarda, işleme esnasında vurum ara süresi esnasında çok hızlı bir şekilde katılaşarak oluşan bölgede amorf fazın baskın olduğunu. Bu amorf (şekilsiz) fazın varlığı, yeniden katılaşan tabakanın mikro sertliğinin artışına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, Ni esaslı alaşımlar çözündürme ısıl işleminin ardından yüksek sıcaklık ve soğuma süresinde çökelme sertleşmesi uygulanarak güçlendirilirler. Aşırı ısınarak yeniden katılaşan tabakada γ' ikincil fazların ve karbürlerin varlığı, bu bölgede çökelme sertleştirmesinin kısmi etkilerinin meydana geldiğini belirtmişlerdir. II. ve III. grup numunelerde ise yeniden katılaşan tabakanın mikrosertliği azda olsa ana malzemeye nazaran düşmüştür. Bunun sebebi, numunelere uygulanan ısıl işlemler sonunda yapıda oluşan γ' ikincil fazların ve karbürlerin, kesme esnasında oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile bu ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrise geri çözünmesi neticesinde YKT'de sertlik düşüşü olduğu düşünülmektedir. Thomas R. Newton vd. [62] çalışmalarında, yaşlandırma sertleştirmesi uygulanmış Inconel 718 alaşımının, tel erozyon ile işlemeden dolayı, YKT'nin sertliğinin düştüğünü belirtmişlerdir. Çalışmalarında, YKT'de krom yoğunluğunun azalması ve bu bölgede Cu, Zn'nin varlığı, bölgenin özelliğinin değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca, YKT'nin sertliğindeki düşüşe, yalıtkan sıvı içerisinde meydana gelen elektroliz olayının sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 6.13. Tel erozyon ile kesme sonrasında numunelerden ölçülen mikrosertlik değerleri

Malzeme	Ölçüm Yapılan Alan	Deney No								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
I. Grup	YKB	385	401	297	310	412	406	385	387	402
	IEB	230	235	238	223	236	244	230	234	228
	Ana malzeme	223	245	230	234	230	230	230	230	220
II. Grup	YKB	387	392	400	375	402	402	396	400	402
	IEB	415	474	422	424	426	412	418	410	418
	Ana malzeme	418	410	408	416	420	416	413	406	410
III. Grup	YKB	433	427	416	432	398	423	414	406	421
	IEB	455	456	465	466	468	459	482	486	479
	Ana malzeme	465	452	461	474	458	455	466	472	454

6.4.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

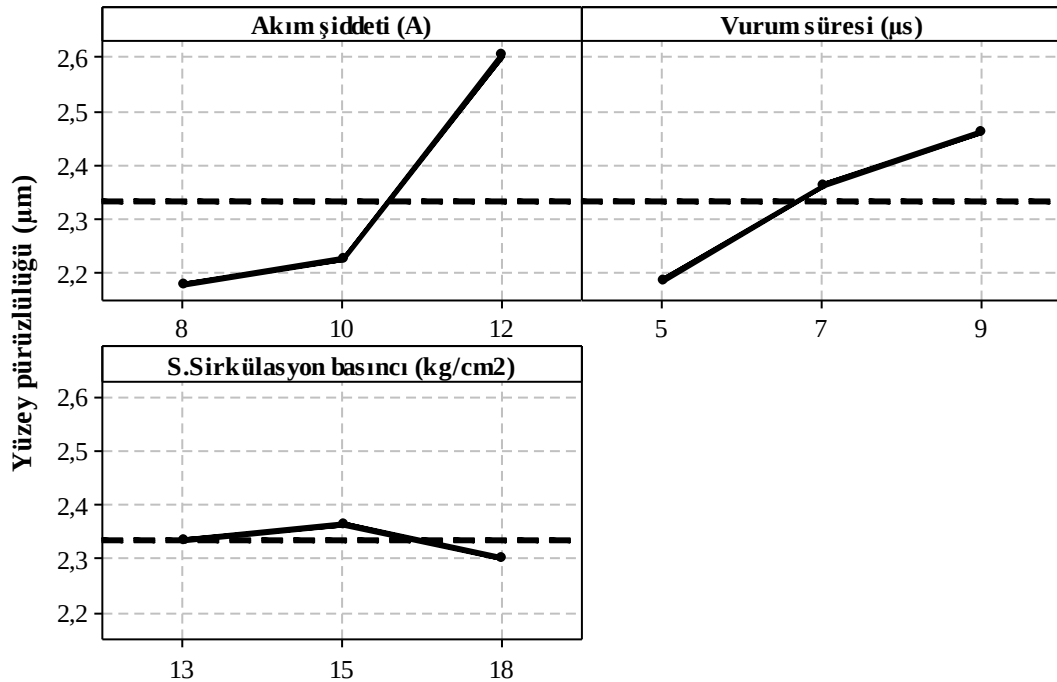
Talaşlı imalatla işleme kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülüğü önemli bir kriterdir. Tel erozyonla işleme esnasında, her bir boşalımla meydana gelendeşarj enerjisi, kıvılcımın iş parçasına çarptığı noktada çok yüksek ısı üretir. Oluşan bu ısı yüzeyde küçük parçaların eriyerek veya buharlaşarak kopmasına neden olur. Her birdeşarj ile yüzeyden kaldırılan küresel talaşlar işlenmiş yüzeyi krater forma sokar. Yüzey morfolojisi, kıvılcımların yüzeye çarpması neticesinde oluşan kraterlerin ebatlarına bağlıdır. Dolayısıyla bu yöntemdeki yüzey pürüzlülüğü uygulanan kıvılcımın şiddetini belirleyen, akım ve vuruş süresinin bir fonksiyonudur [144]. Tablo 6.14’te I, II ve III. grup numunelerin tel erozyon ile kesilmiş yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 6.14. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

Deney No	Deney Parametreleri (Akım şiddeti-A, Vurum süresi- μ s, Sıvı sirkülasyon basıncı- kg/cm^2)	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a - μm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	8 A, 5 μ s, 13 kg/cm^2	2,04	2,08	2,03
2	8 A, 7 μ s, 15 kg/cm^2	2,20	2,31	2,08
3	8 A, 9 μ s, 18 kg/cm^2	2,29	2,51	2,14
4	10 A, 5 μ s, 15 kg/cm^2	2,12	2,61	2,10
5	10 A, 7 μ s, 18 kg/cm^2	2,23	2,69	2,18
6	10 A, 9 μ s, 13 kg/cm^2	2,32	2,89	2,27
7	12 A, 5 μ s, 18 kg/cm^2	2,39	2,95	2,36
8	12 A, 7 μ s, 13 kg/cm^2	2,65	3,00	2,59
9	12 A, 9 μ s, 15 kg/cm^2	2,77	3,01	2,61

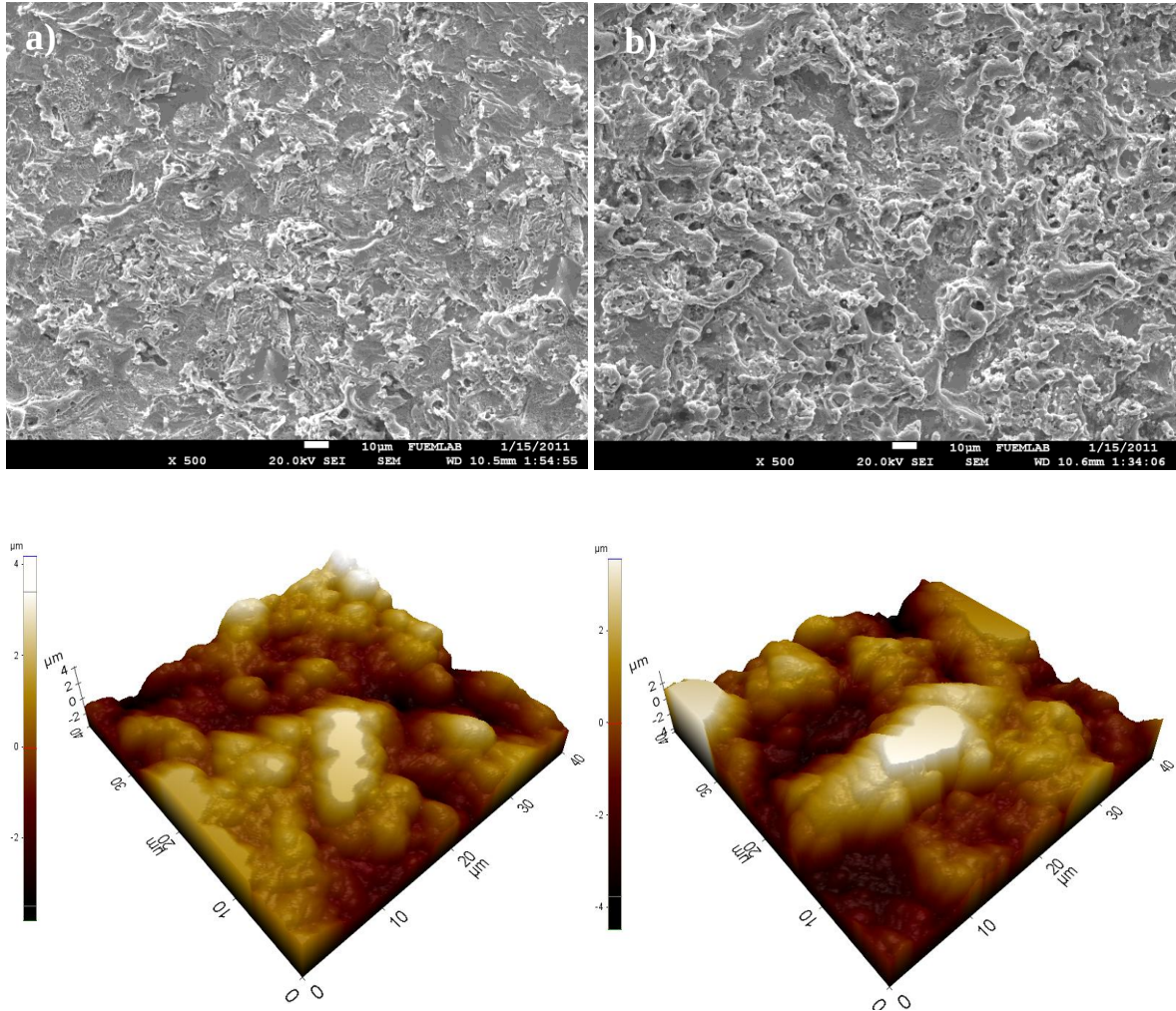
6.4.4.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.87’deki grafikler akım şiddeti, vurum süresi ve sıvı sirkülasyon basıncı gibi değişkenlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini göstermektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi akım şiddeti ve vurum süresinin pürüzlülük üzerinde büyük bir etkisi vardır. I. grup numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri 2,04-2,77 μm aralığında değişmektedir. Bu sonuçlardan, yüksek akım şiddeti ve en uzun vurum süresinde en kötü yüzeyin ortaya çıktığı açıkça görülmektedir. Grafikler ve tablo 6.14’teki değerler karşılaştırıldığında, en iyi yüzeyin, düşük akım şiddeti ve en kısa vurum süresinin kullanıldığı deney sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 6.87 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

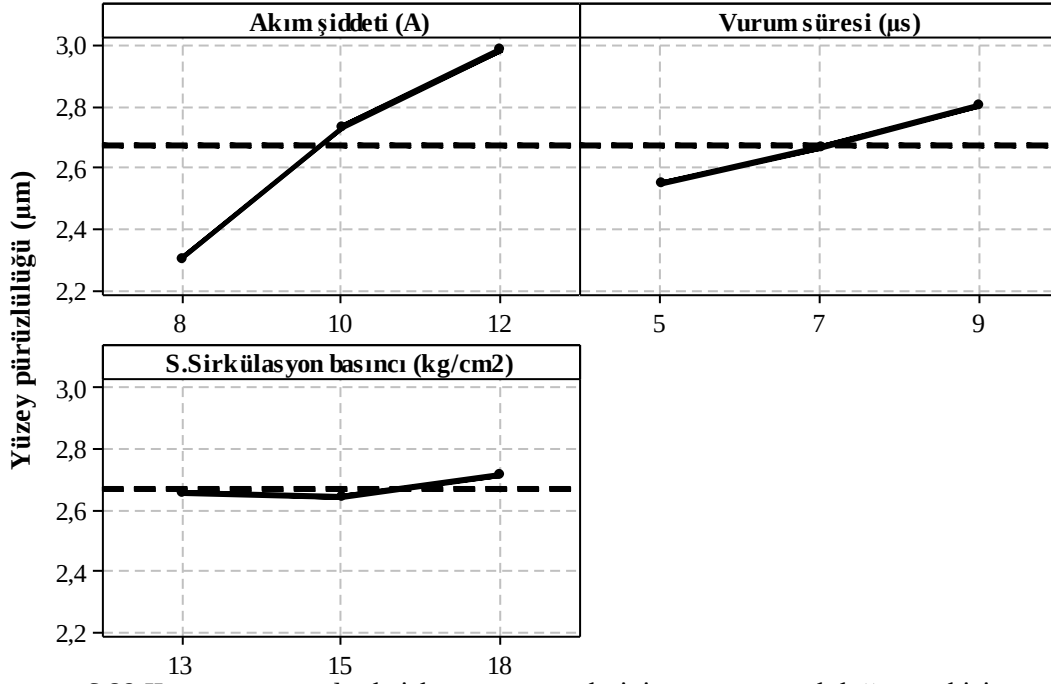
Akımın düşük olmasıyla, her bir boşalımla parça yüzeyine çarpan kıvılcımların şiddeti daha düşük olur. Bu durum, daha iyi erozyon etkisi yaratarak yüzeyin daha pürüzsüz olmasına neden olur. Ayrıca, vurum süresinin kısılmasıyla, parça yüzeyine transfer edilen ısı enerjisinin miktarı düşer, buna bağlı olarak daha az metal ergitilir. Böylelikle, kraterlerin daha yüzeysel olması, yüzeyin pürüzlülüğünü düşürür [144,145]. I.grup numunelerin tel erozyon ile yapılan kesme deneylerinde, en iyi yüzey akım ve vurum süresinin en düşük olduğu 1 nolu deney şartlarında elde edilirken, en kaba yüzey pürüzlülüğüne sahip kesme işlemi, akım ve vurum süresinin en yüksek olduğu 9 nolu deney sonucunda elde edilmiştir. Bu numunelere ait yüzey görüntüleri şekil 6.88’de verilmiştir.



Şekil 6.88 I. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

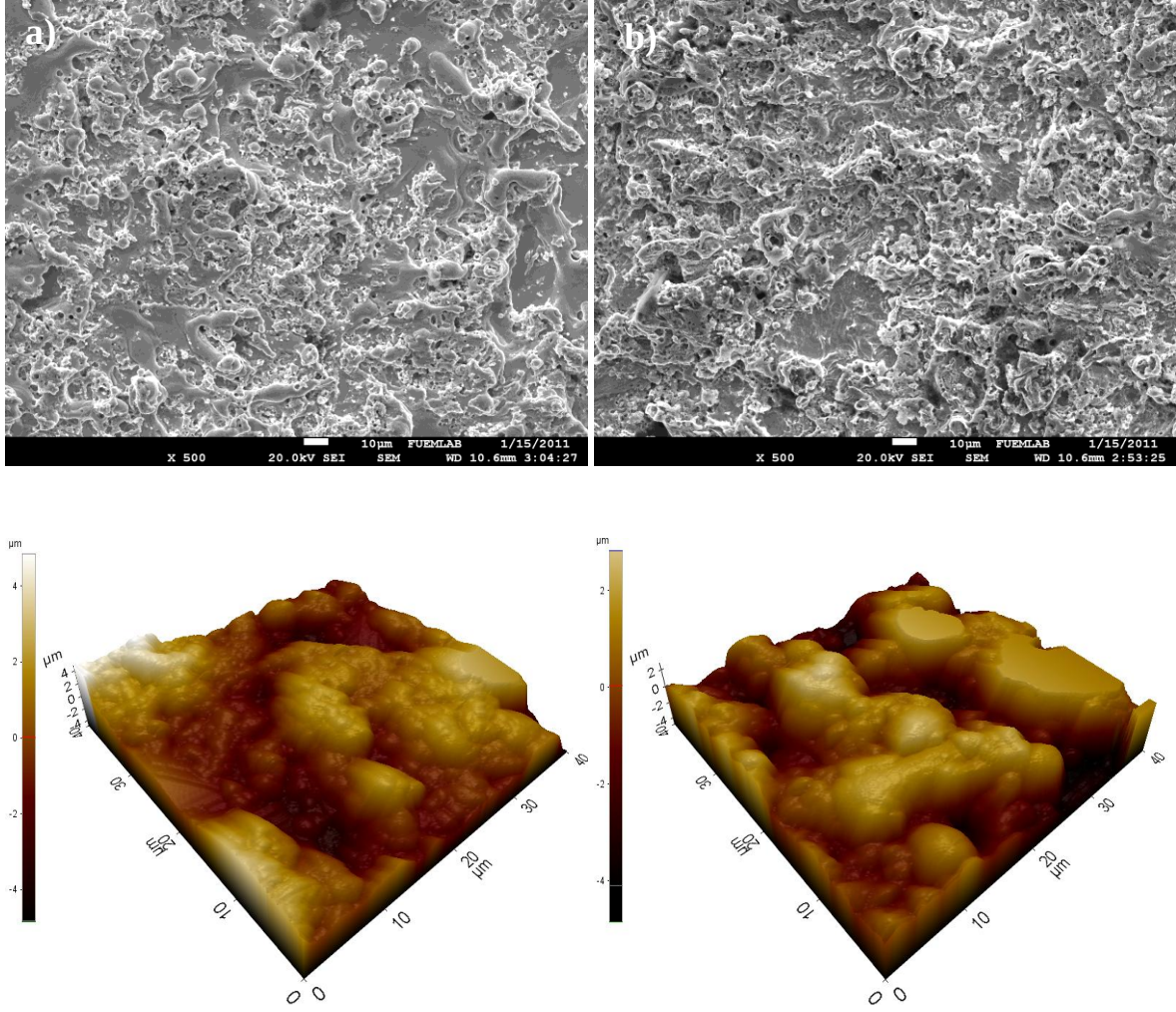
6.4.4.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.89’da II. grup numunelere ait kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, II. grup numunelerde de tel erozyon ile kesme deneylerinde kullanılan parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir.



6.89 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Tablo 6.14’teki kesme parametrelerine bağlı olarak değişen pürüzlülük değerleri toplu olarak değerlendirildiğinde, akım şiddetinin ve vurum süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Aynı zamanda, akım ve vurum süresinin en düşük olduğu durumda yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Ancak, bu değişiklik I. grup numunelere ait pürüzlülük değerlerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bu artış, II. grup numunelere uygulanan ısı işlem sonucunda malzemenin termal iletkenliğinin düşmesi ile ilişkilendirilebilir. Malzemelerin sahip oldukları yüksek termal iletkenliğin, daha düşük malzeme kaldırma oranına ve yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu daha önceki yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur [67,131,143,146]. Şekil 6.90’da II. grup numunelerde en düşük yüzey pürüzlülüğü 1 nolu deney sonucunda 2,08 µm olarak ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü, 9 nolu deney sonunda 3,01 µm olarak ölçülmüştür. Parametrelere bağlı olarak değişen yüzeylerin SEM ve AFM görüntüleri verilmiştir.

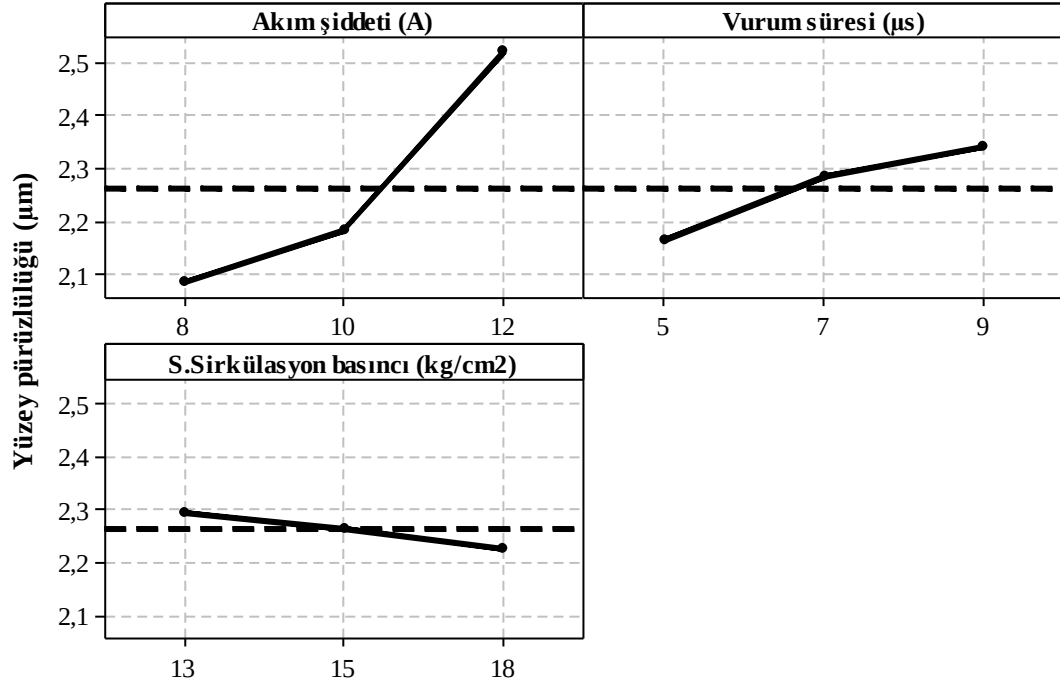


Şekil 6.90 II. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

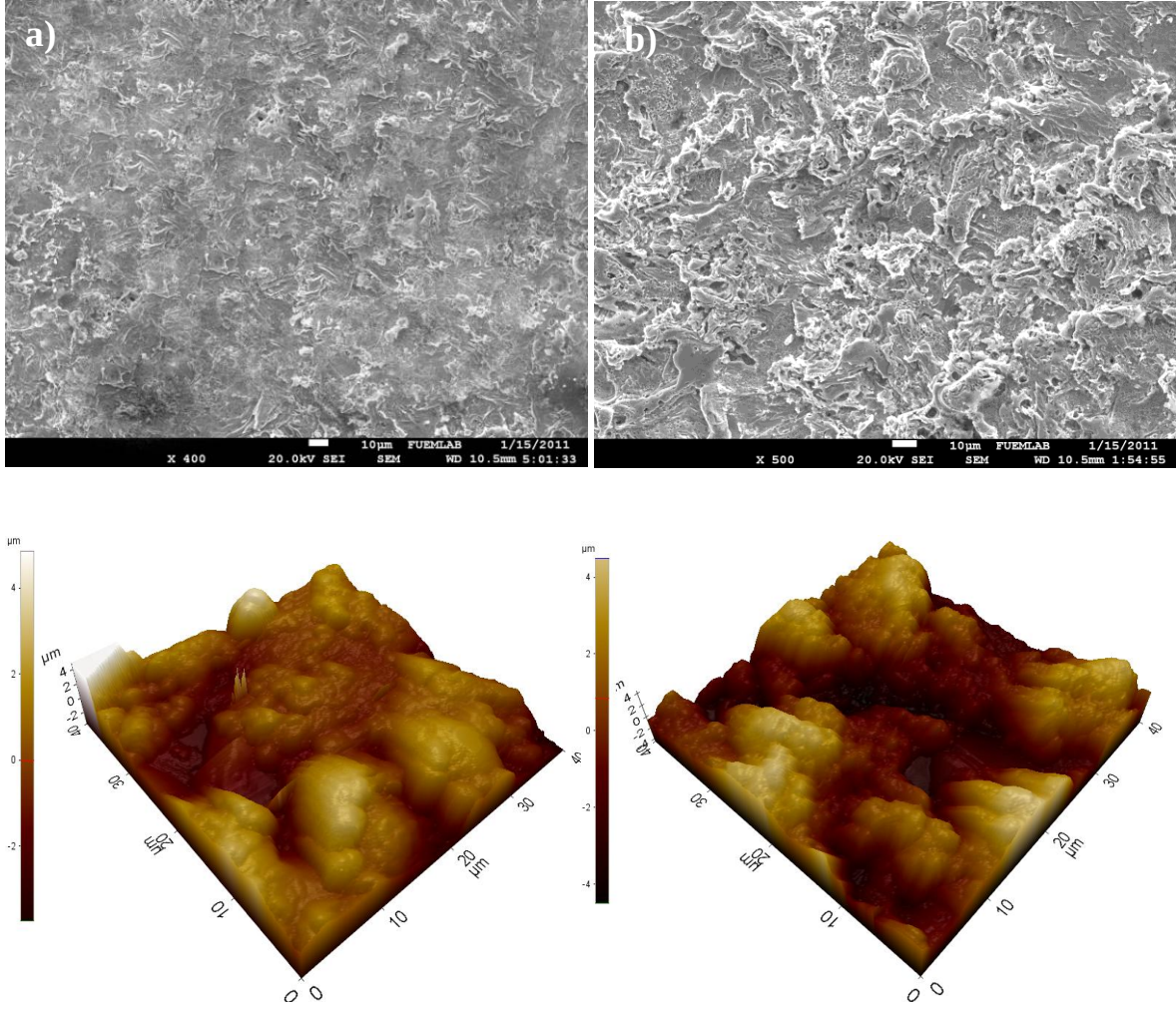
6.4.4.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 6.91-92’de deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, en iyi yüzey pürüzlülüğüne sahip numune, akım şiddetinin ve vurum süresinin en düşük olduğu 1 nolu deney şartlarında elde edilirken, akım şiddetinin ve vurum süresinin en yüksek olduğu 9 nolu deney şartlarında en kötü yüzey elde edilmiştir. Tablo 6.14’teki değerler toplu olarak irdelendiğinde, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülük değerleri, $2,03\mu\text{m} - 2,61\mu\text{m}$ aralığında değişirken, II. grup numunelerde $2,08\mu\text{m} - 3,01\mu\text{m}$, I. grup numunelerde ise $2,04\mu\text{m} - 2,77\mu\text{m}$ aralığında değişmektedir. III. grup numunelere ait pürüzlülük değerlerinin I. ve II. grup numunelere nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu düşüş, malzemelerin termal iletkenliği ile ilişkilidir. Metallerin sahip olukları yüksek termal

iletkenlik, deşarj enerjisinin yaratmış olduğu yüksek ısının matris içerisine daha fazla yayılmasına sebep olduğu için birim zamanda daha düşük malzeme kaldırma oranı elde edilir [147].



6.91 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

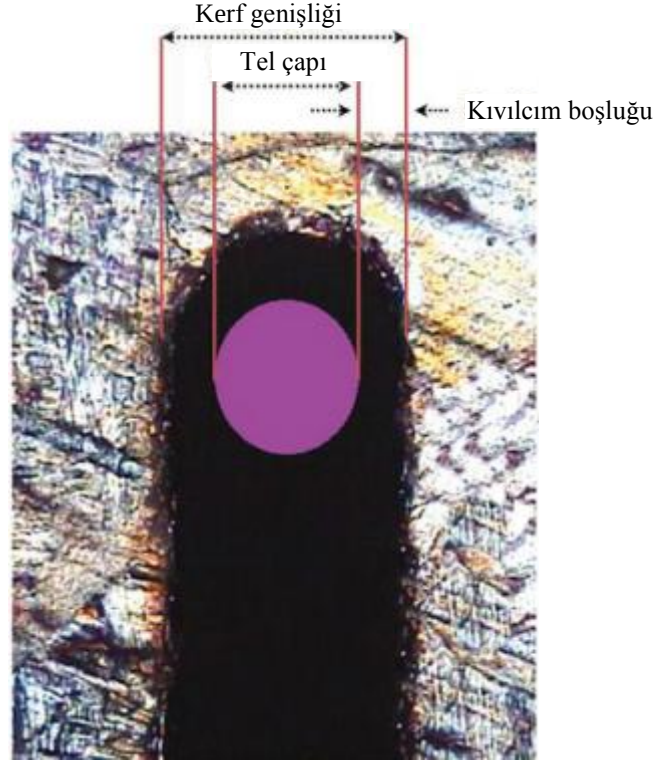


Şekil 6.92 III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme
(a: 1 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü,
c: 9 nolu numuneye ait işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü , b: Üç boyutlu AFM görüntüsü)

6.4.5. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Şekil 6.93'te tel erozyon ile işleme esnasında oluşan kerfin şematik gösterimi verilmiştir. Tel erozyon ile işleme esnasında, tel ile iş parçası arasında meydana gelen kıvılcım boşalımının neden olduğu yüksek ısı sonucunda, iş parçası üzerinden ergitilerek koparılan parçaların dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı ile ara bölgeden uzaklaştırılması ile kerf meydana gelir. Kerf genişliği, işleme esnasında kullanılan parametreler bağlı olarak değişmektedir. A. Alias vd. [148] ilerleme oranının artmasıyla kerf genişliğinin azaldığını, yapılan deneyler sonucunda, düşük ilerleme oranının kerf genişliğinin arttırdığını kanıtlamışlardır. K. P. Somashekar vd. [149] yüksek ilerleme hızının kerf genişliğindeki bozulmaları arttırdığından dolayı yüksek ilerleme oranlarında işlemeyi tavsiye etmemişlerdir. Nihat Tosun vd.. [63] açık devre geriliminin (open circuit

voltage) ve vurum süresinin, kerf genişliğini ve malzeme kaldırma oranının yüksek derecede etkileyen parametreler olduğunu deneysel ve matematiksel olarak kanıtlamışlardır. Kerf genişliğinin kontrolünde, gerilimin vurum süresine nazaran üç kat etkili olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 6.93 Tel erozyonda kerf oluşumunun şematik gösterimi [148].

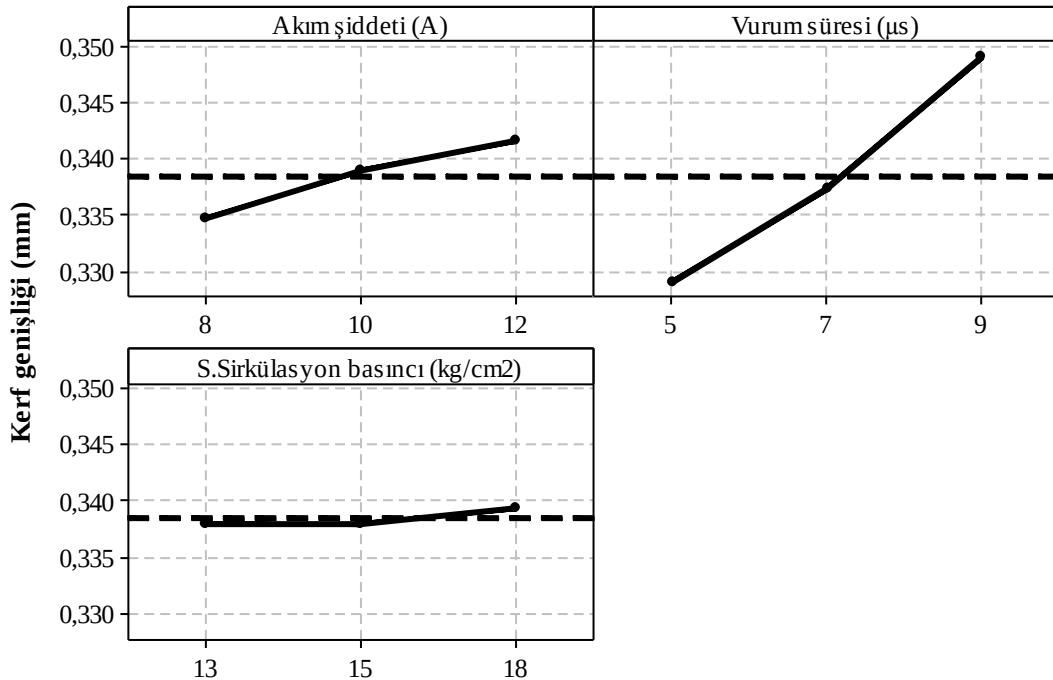
Tablo 6.15'te I, II, III. grup numunelerden ölçülen ortalama kerf üst genişliği değerleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 6.15. Tel erozyon ile kesme sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri

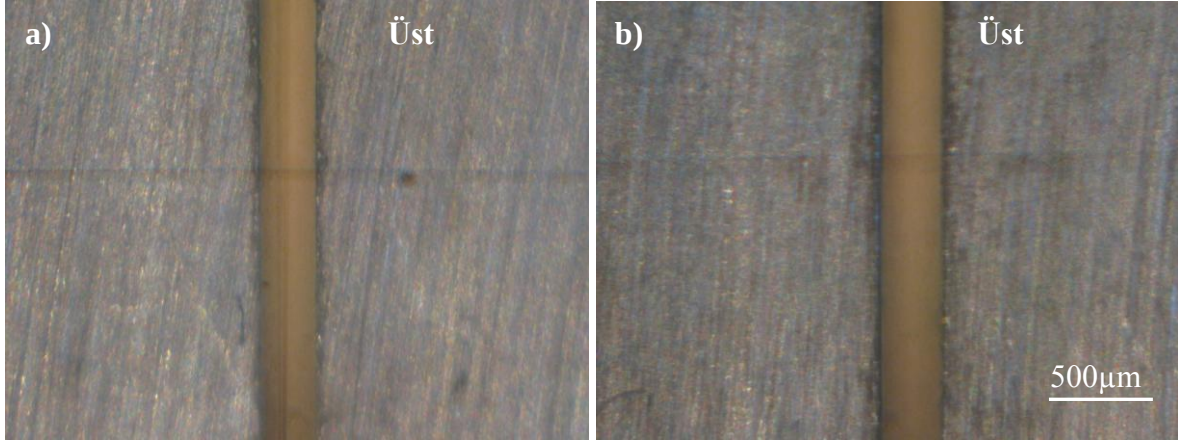
Deney No	Deney Parametreleri (Akım şiddeti-A, Vurum süresi- μ s, Sıvı sirkülasyon basıncı- kg/cm^2)	Ortalama Kerf Genişliği (mm)		
		I. Grup Numuneler	II. Grup Numuneler	III. Grup Numuneler
1	8 A, 5 μ s, 13 kg/cm^2	0,325	0,335	0,318
2	8 A, 7 μ s, 15 kg/cm^2	0,332	0,348	0,321
3	8 A, 9 μ s, 18 kg/cm^2	0,347	0,351	0,339
4	10 A, 5 μ s, 15 kg/cm^2	0,330	0,349	0,323
5	10 A, 7 μ s, 18 kg/cm^2	0,339	0,359	0,325
6	10 A, 9 μ s, 13 kg/cm^2	0,348	0,365	0,336
7	12 A, 5 μ s, 18 kg/cm^2	0,332	0,353	0,324
8	12 A, 7 μ s, 13 kg/cm^2	0,341	0,367	0,338
9	12 A, 9 μ s, 15 kg/cm^2	0,352	0,375	0,351

6.4.5.1. I. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Deneylerde kullanılan parametrelerin kerf genişliği üzerindeki etkilerini gösteren grafikler şekil 6.94’te verilmiştir. Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi, I. grup numunelere ait ortalama kerf üst genişliği, akım şiddetinin ve vurum süresinin değişimine bağlı olarak bariz bir şekilde değişmektedir. Vurum süresinin artmasıyla, daha uzun süreli kıvılcımların yüzeye çarpmasına ve buna bağlı olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, kesme bölgesinden kaldırılan talaş miktarına bağlı olarak kerf genişliği artmaktadır. Aynı şekilde, akım şiddetinin artışına bağlı olarak kerf genişliğinde artış gözlenmiştir. Akımın artmasıyla, her bir boşalımda parça yüzeyine çarpan kıvılcımların şiddeti daha yüksek olur. Yüksek şiddetteki kıvılcımlar yüzeyde daha derin erozyon etkisi yaratarak kerfın genişlemesine neden olur. Şekil 6.95’te I. grup numunelerde en düşük ve en yüksek kerf genişliklerinin elde edildiği 1 ve 9 nolu numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. 1 nolu deney sonucunda en düşük kerf genişliği 0,325 mm olurken, 9 nolu deney sonucunda en yüksek kerf genişliği 0,352 mm olmuştur.



Şekil 6.94 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi

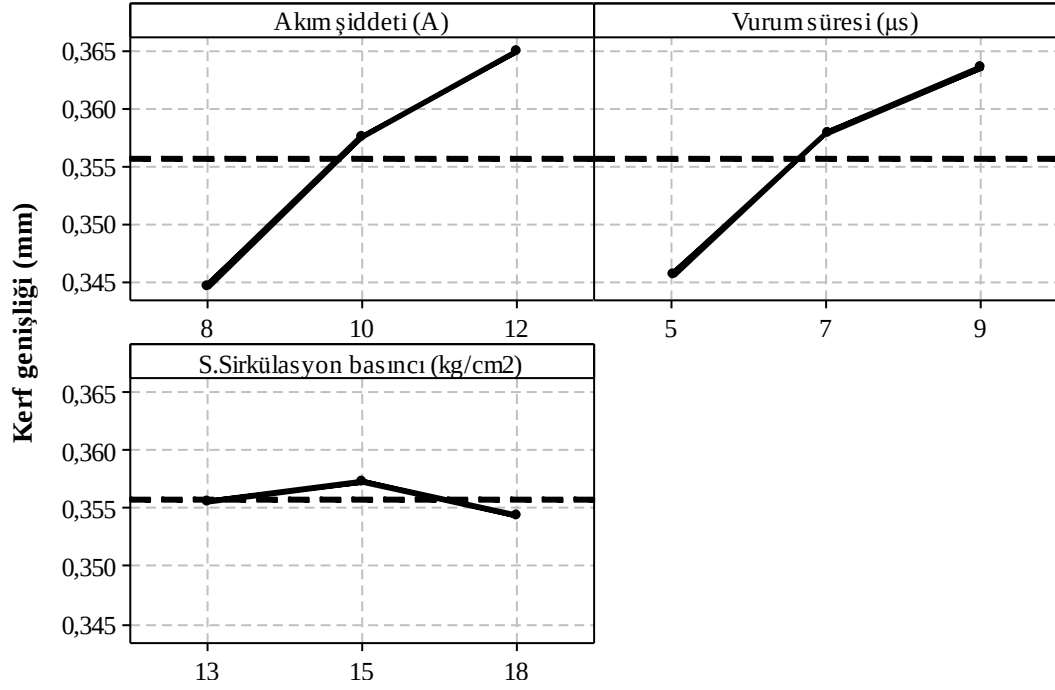


Şekil 6.95 I. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 8 A, 5 μ s, 13 kg/cm², b: 12 A, 9 μ s, 15 kg/cm²)

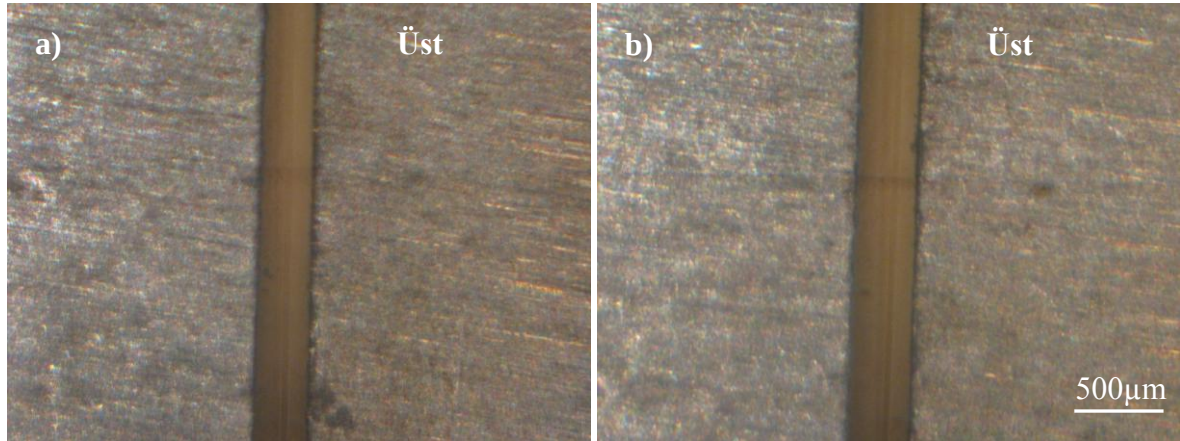
6.4.5.2. II. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Şekil 6.96’da II. grup numunelere ait kesme parametrelerinin kerf genişliğine olan etkileri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, akım şiddeti ve vurum süresinin artmasıyla malzeme kaldırma oranı artacağından dolayı kerf genişliğinin arttığı görülmektedir. Tablo 6.15’teki II. grup numunelere ait kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama kerf genişliği değerleri incelendiğinde, II. grup numunelerin kerf genişlikleri I. grup numunelere nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda, metallerin sahip olduğu yüksek termal iletkenlikten dolayı, kesme esnasında oluşan ısının matris içerisine hızla yayılmasına sebep olduğu. Bir başka deyişle, düşük termal iletkenlik, ısının yayılmadan kesme kenarında yoğunlaşması neticesinde daha fazla hacimde metalin ergitilmesine yol açtığı rapor edilmiştir [67,131,143,146,147,150]. Ancak, B. H. Yan vd. [150] yapmış oldukları çalışmada, Al₂O₃p/6061Al kompozitlerinin tel erozyon ile işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, akımın ve vurum süresinin artmasıyla talaş kaldırma oranının arttığını ve buna bağlı olarak kerf genişliğinin de arttığını, ayrıca deneyler sonucunda Al₂O₃ takviyeli 6061Al alaşıma nazaran en yüksek talaş kaldırma oranının 6061Al alaşımında meydana geldiğini belirtmişlerdir. Al₂O₃ takviyeli kompozit’ in düşük termal iletkenliğe sahip olmasına karşın Al₂O₃ partiküllerinin çok yüksek ergime sıcaklığına sahip olmaları, birim zamanda eğritilen metal miktarını düşürdüğünden kerf genişliğinin düştüğünü belirtmişlerdir. Şekil 6.97’de fotoğraf görüntüleri verilen II. grup numunelerde kerf genişliği, akım şiddetinin (8 A), vurum süresinin ve sıvı sirkülasyon basıncının en düşük olduğu (5 μ s, 13 kg/cm²) 1 nolu deney şartlarında 0,335 mm olarak ölçülürken, bu değer I. grup numunelerde 0,325 mm’dir. Akım şiddeti, vurum süresi ve gaz basıncının en yüksek olduğu (12 A, 9 μ s, 15

kg/cm²) 9 nolu deney sonucunda, en yüksek kerf genişliği değeri I. grup numunelerde 0,352 mm iken, II. grup numunelerde 0,375 mm olarak ölçülmüştür.



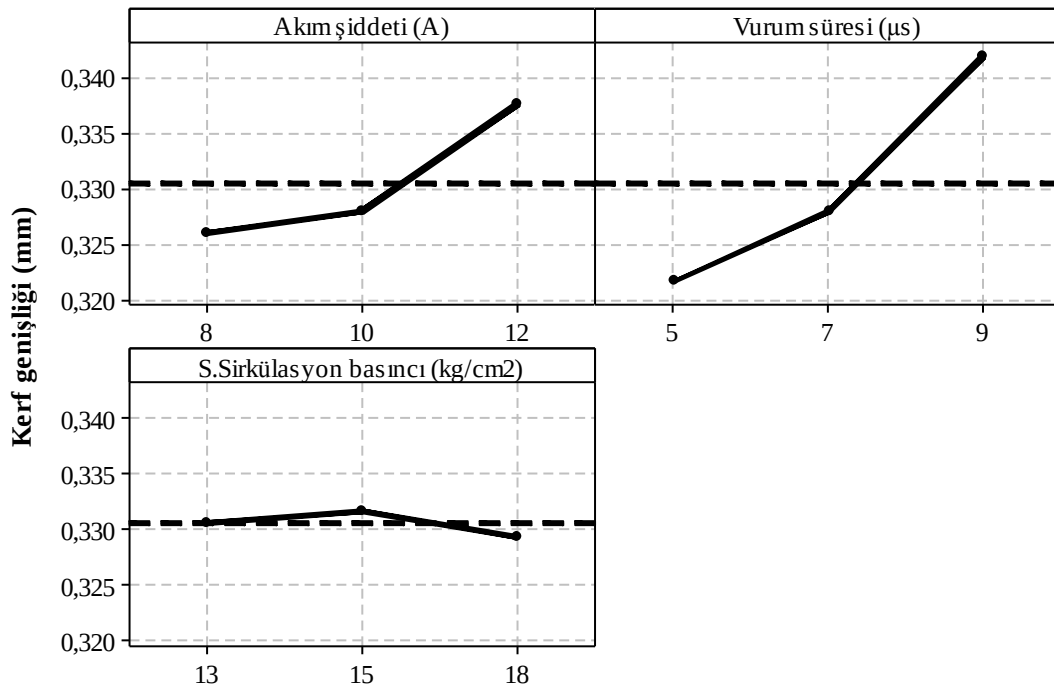
Şekil 6.96 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi



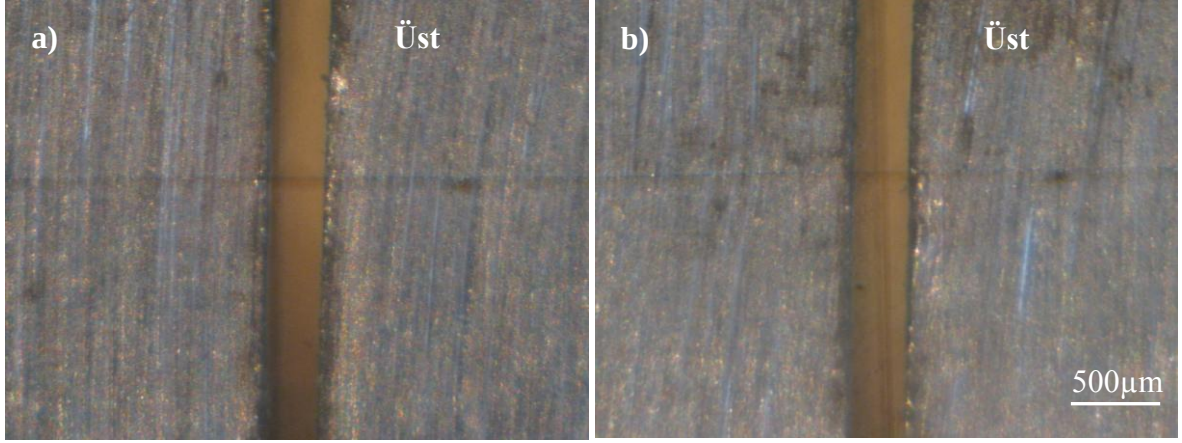
Şekil 6.97 II. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 8 A, 5 μs, 13 kg/cm², b: 12 A, 9 μs, 15 kg/cm²)

6.4.5.3. III. Grup Numunelerde Deney Parametrelerinin Kerf Genişliğine Etkisi

Şekil 6.98’de III. grup numunelerin kesilmesinde kullanılan deney parametrelerinin ortalama kerf genişliğine olan etkileri görülmektedir. I. ve II. grup numunelere benzer şekilde, akım şiddetinin sabit olduğu şartlarda, vurum süresinin artmasıyla kerf genişliğinin arttığı. Aynı şekilde, sabit vurum süresinde, akım şiddetinin artmasıyla kerf genişliğinin arttığı görülmüştür. Tablo 6.15’teki kerf genişliği değerleri irdelendiğinde, malzemelere uygulanan ısıtma işlemlerinin bir sonucu olarak, III. grup numunelerde artan ısıtma iletkenlik değeriyle ters orantılı bir şekilde kerf genişliği diğer numunelere nazaran daha düşük olmuştur. Şekil 6.99’da III. grup numunelere ait en düşük ve en yüksek kerf genişliklerinin fotoğraf görüntüleri verilmiştir. Akım şiddetinin (8 A), vurum süresinin ve sıvı sirkülasyon basıncının en düşük olduğu (5 μ s, 13 kg/cm²) 1 nolu deney şartlarında (Şekil 6.99-a) en düşük kerf genişliği 0,318 mm olarak ölçülürken, bu değer II. grup numunelerde 0,335 mm, I. grup numunelerde ise 0,325 mm’dir. En yüksek kerf genişliği ise, Akım şiddeti, vurum süresi ve gaz basıncının en yüksek olduğu (12 A, 9 μ s, 15 kg/cm²) 9 nolu deney sonucunda (Şekil 6.99-b) 0,351 mm iken II. grup numunelerde 0,375 mm, I. grup numunelerde ise 0,352 mm’dir. Bu sonuçlar da aynı kesme şartlarında malzemenin ısıtma iletkenlik değerindeki değişime bağlı olarak kerf genişliğinin değiştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.98 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi



Şekil 6.99 III. grup numunelerde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 8 A, 5 μ s, 13 kg/cm², b: 12 A, 9 μ s, 15 kg/cm²)

7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİKSEL ANALİZİ

Bu çalışmada, deney sonuçlarının istatistiksel analizinde varyans analizi metodu kullanılmıştır. Varyans analizi (ANOVA- anallysis of variance) metodu, deney sonuçlarını yorumlamanın bir yolu olarak, 1930 yılında Ranold Fisher tarafından geliştirilmiştir [151]. Varyans analizi yöntemi (ANOVA), işleme parametrelerinin işlem performansları üzerinde istatistiksel olarak ne kadar bir etkiye sahip olduklarına bakmak için kullanılır.

Varyans analizinde deneysel değerler ile arzu edilen değerler arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu (loss function) kullanılır. Bu kayıp fonksiyon, performans karakteristiğini ölçmek için kullanılır. Kayıp fonksiyonu, işaret/gürültü (S/N – signal/noise) oranına dönüştürülür. S/N oranı, süreç değişkenliğinin bir ölçüsüdür. Taguchi’ye göre S/N oranı kullanılarak sürecin optimize edilmesi sağlanır. Genellikle, S/N oranının analizinde üç çeşit performans karakteristiği kullanılmaktadır. Bunlar, daha düşük – daha iyidir, daha yüksek –daha iyidir ve ortalama – daha iyidir şeklinde tanımlanmaktadır. İşlemden elde edilmek istenilen duruma göre bu performanslardan bir tanesi seçilmektedir. Örneğin, yüzey pürüzlülüğünün incelendiği bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün en düşük olması istenir veya takım ömrünün en yüksek olmasının istendiği çalışmada en yüksek en iyidir seçimi tercih edilir. S/N oranlarının belirlenmesinde her bir durum için aşağıdaki farklı formüllerden yararlanılır;

$$\text{Ortalama en iyidir} \quad : S/N_{NB} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (7.1)$$

$$\text{Daha yüksek daha iyidir (maksimize)} \quad : S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2 i} \right) \quad (7.2)$$

$$\text{Daha düşük daha iyidir (minimize)} \quad : S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2 i \right) \quad (7.3)$$

burada, $\bar{y}$, ölçülen değerlerin ortalaması, s_y^2 , y ’ nin varyansı, n , deney sayısı ve y de ölçülen değerdir. Yukarıdaki kategorilerin hepsi için, elde edilen S/N oranı ne kadar yüksek olursa, performans da o kadar yüksek demektir. Dolayısıyla, işleme parametrelerinin optimum seviyeleri aynı zamanda en yüksek S/N oranının olduğu durumdur [142].

Bu çalışmada, Inkonel 718 alaşımının lazer, plazma ve tel erozyon yöntemi ile işlenmesi neticesinde, yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) gibi performans çıktılarının varyans analizlerinde “daha düşük daha iyidir” (lower is better) kayıp fonksiyonları kullanılmıştır.

7.1. Lazer Işını ile Kesme Deneylerinin İstatiksel Analizi

Deney sonuçlarının S/N oranlarının tespitinde Tablo 7.1’de görülen faktörler ve seviyeleri kullanılmıştır. Lazer ışını ile kesme deneyleri için güç, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı olmak üzere üç kontrol faktörü bulunmaktadır. Her bir faktörün üç farklı seviyesi vardır. Deneyler sonucunda yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler, Minitab Release 15 ve JMP 5.0 paket programları kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 7.1. Lazer ışını ile kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Lazer Gücü (W)	3200	3600	4000
B	Kesme Hızı (mm/dak)	1500	1700	1850
C	Y. Gaz basıncı (Bar)	15	17	19

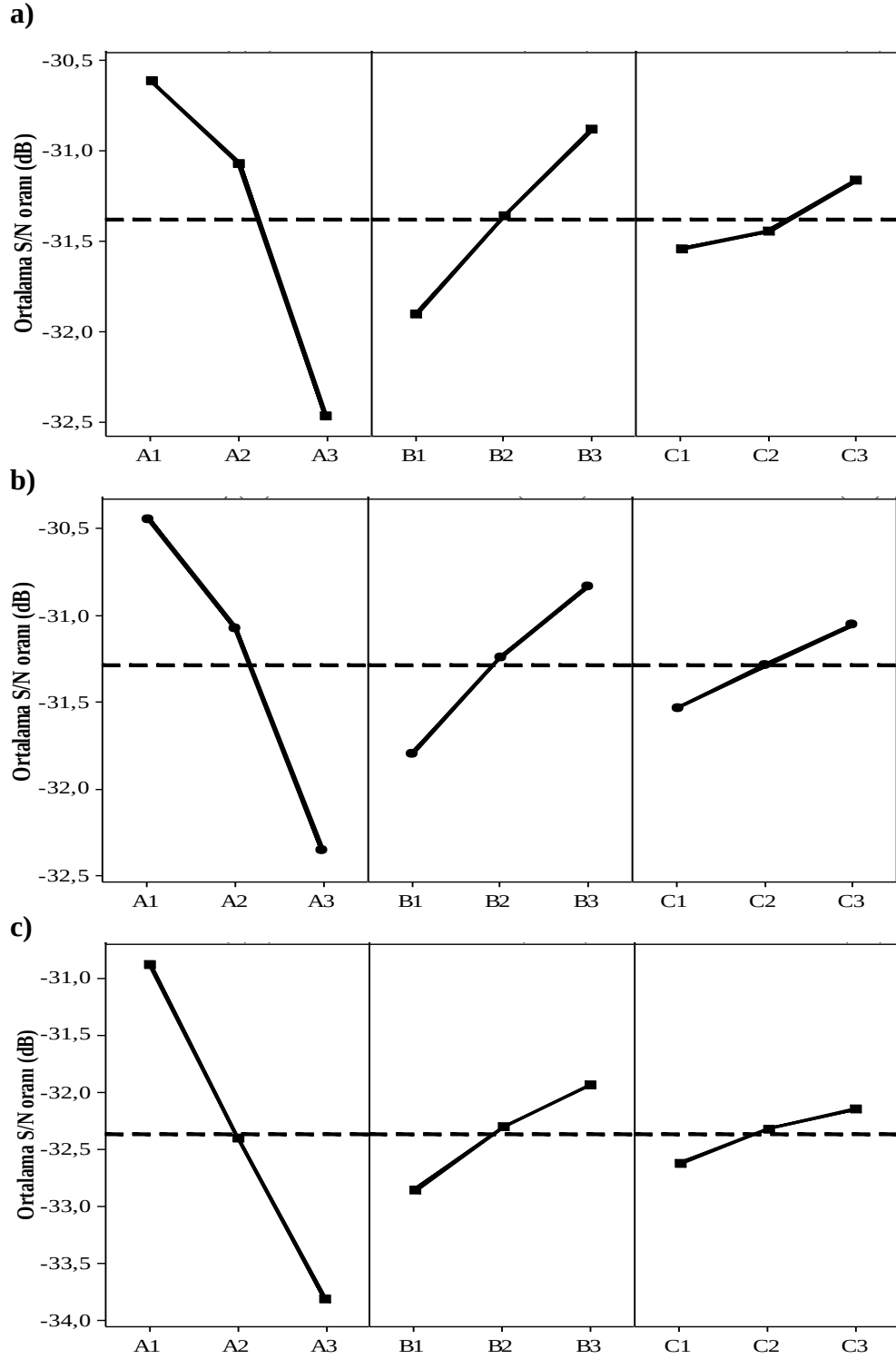
7.1.1. YKTK’ nın İstatiksel Analizi

Tablo 7.1’de verilen Lazer ışını ile kesme deneylerinde kullanılan parametrelerinin her bir seviyesine göre farklı ısı işleme görmüş numuneler için YKTK’ ya ait S/N değerleri sırasıyla Tablo 7.2’de verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin YKTK üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.1’de görülmektedir. Şekildeki A1, A2 ve A3 lazer gücünü, B1, B2, ve B3 kesme hızının, C1, C2 ve C3 ise gaz basıncının her bir seviyesini göstermektedir (Tablo 7.1).

Tablo 7.2. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-30,62*	-31,07	-32,46
	Kesme Hızı (B)	-31,90	-31,36	-30,88*
	Gaz basıncı (C)	-31,54	-31,44	-31,16*
	Toplam ortalama S/N oranı = -31,38 dB			
II. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-30,44*	-31,07	-32,35
	Kesme Hızı (B)	-31,80	-31,24	-30,83*
	Gaz basıncı (C)	-31,53	-31,29	-31,05*
	Toplam ortalama S/N oranı = -31,28 dB			
III. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-30,88*	-32,40	-33,81
	Kesme Hızı (B)	-32,86	-32,31	-31,93*
	Gaz basıncı (C)	-32,62	-32,32	-32,15*
	Toplam ortalama S/N oranı = -31,36 dB * Optimum seviyeler			

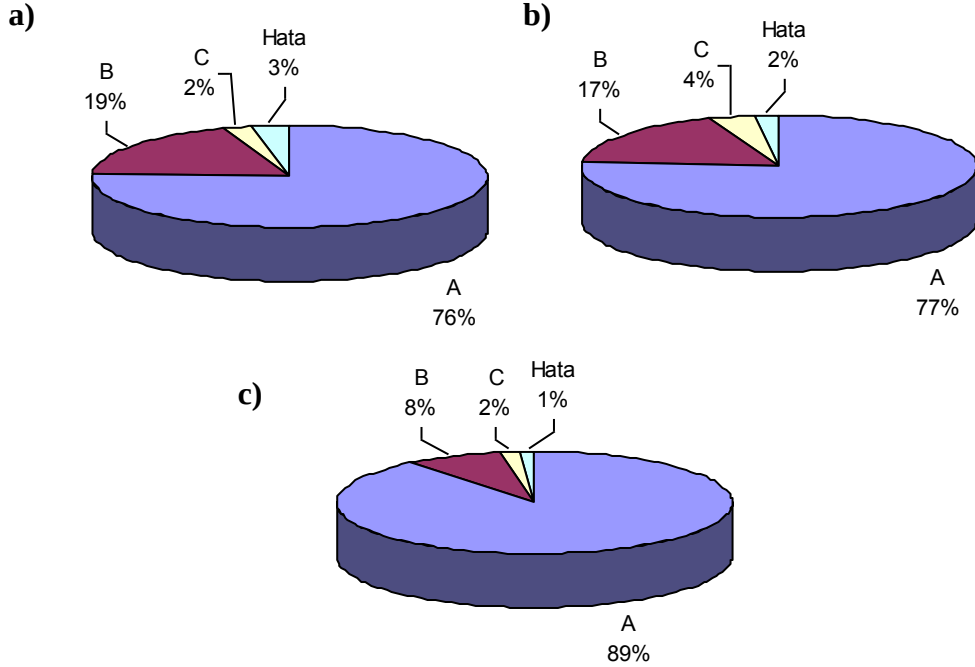
Tablo 7.2’de verilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise bu çalışma için minimum YKT kalınlığını elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Minimum yani optimum YKTK tablolardan da görüldüğü I, II ve III. grup numuneler için gücün 3200 W, kesme hızının 1850 mm/dk ve yardımcı gaz basıncının 19 bar olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır. Şekil 7.1’ de ki grafikler I, II ve III. grup numuneler de YKTK için S/N yanıt grafikleridir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) YKTK değerlerini vermektedir. Şekillerdeki lazerin güç parametresini dikkate aldığımızda (A1, A2, A3) gücün artmasıyla S/N oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum YKTK’ nın artması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.1. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin YKTK' ya etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Varyans analizlerinin sonucunda deney parametrelerinin YKTK' ya % olarak etkileri Şekil7.2 'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, , her üç grup numuneler için de güç parametresinin YKTK üzerinde kesme hızına nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu,

yardımcı gaz basıncının ise çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, YKTK için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.



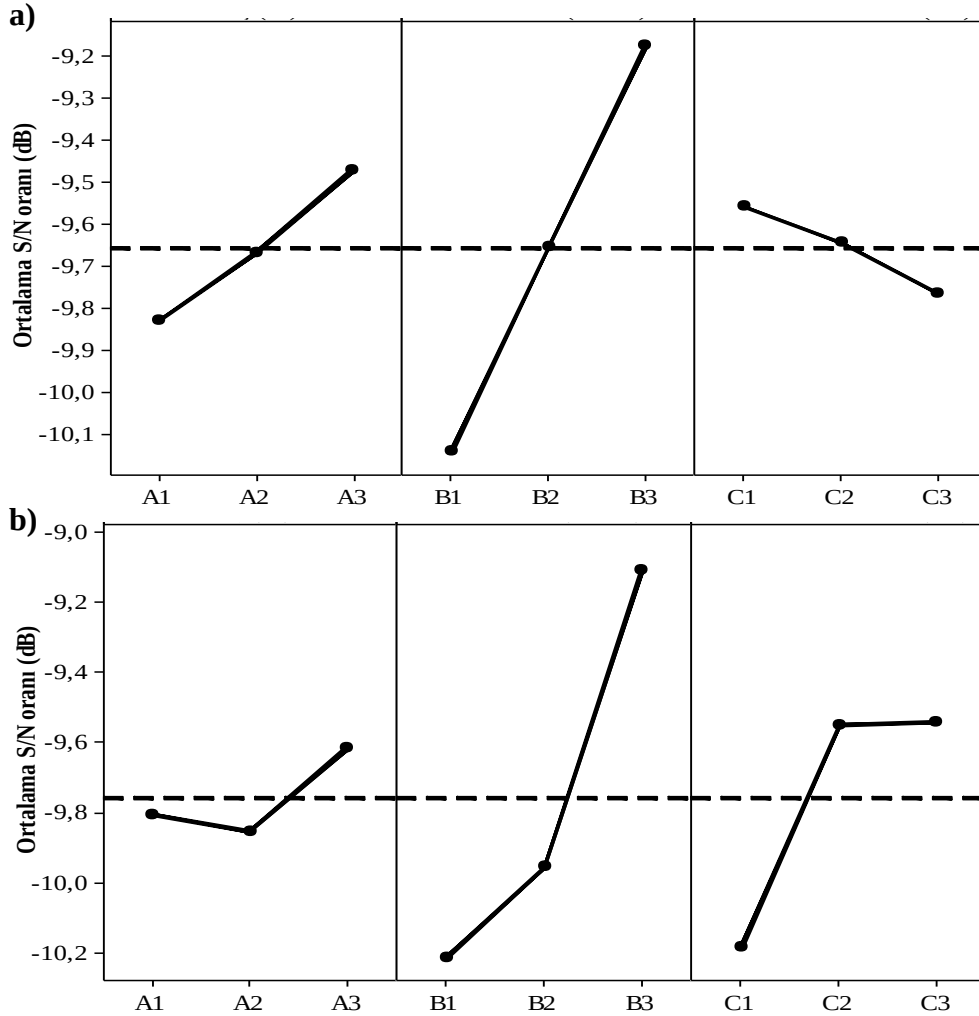
Şekil 7.2. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' ya etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

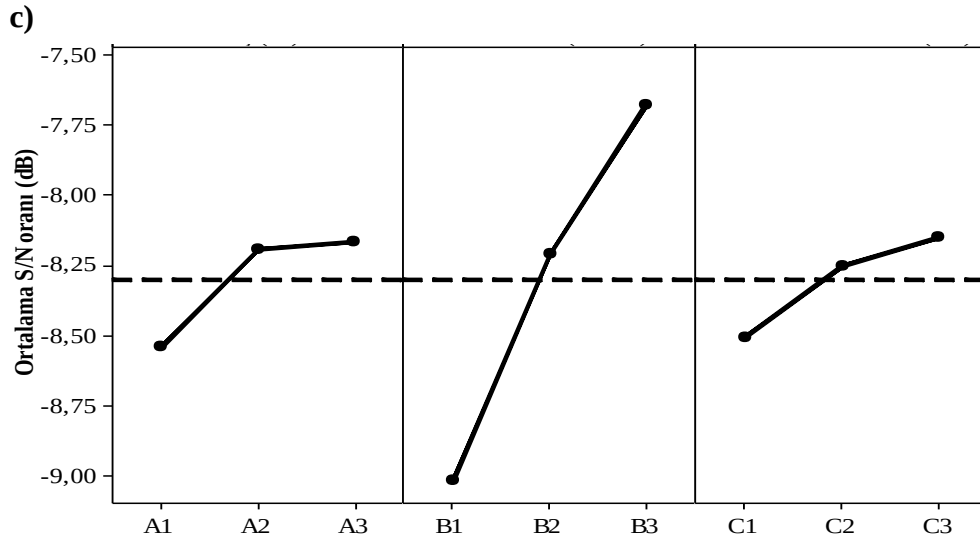
7.1.2. Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi

Tablo 7.1'de verilen işleme parametrelerinin her bir seviyesine göre yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri sırasıyla Tablo 7.3'de verilmiştir. Her grup numuneler için işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise sırasıyla Şekil 7.3'da görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, I. grup numunelerin kesilmesinde, yüzey pürüzlülüğünün minimuma indirilmesi için işleme parametrelerinin A3-B3-C1, II ve III. grup numunelerde ise her üç parametrenin de üçüncü seviyede olması gerekmektedir.

Tablo 7.3. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

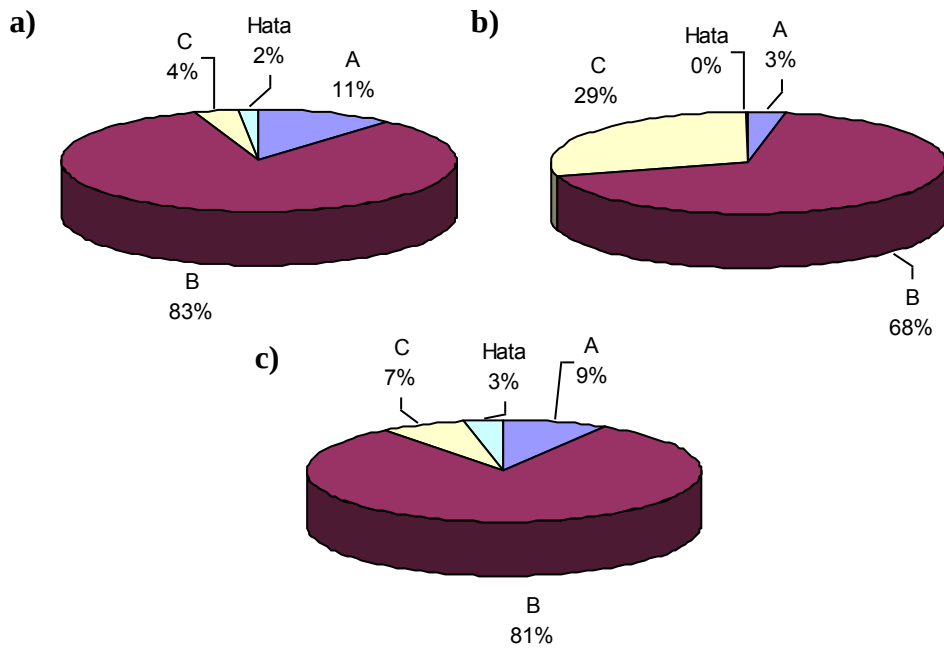
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-9,830	-9,668	-9,471*
	Kesme Hızı (B)	-10,139	-9,654	-9,174*
	Gaz basıncı (C)	-9,559*	-9,644	-9,766
	Toplam ortalama S/N oranı = -9,656 dB			
II. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-9,807	-9,853	-9,617*
	Kesme Hızı (B)	-10,212	-9,955	-9,110*
	Gaz basıncı (C)	-10,181	-9,554	-9,542*
	Toplam ortalama S/N oranı = -9,759 dB			
III. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	-8,540	-8,195	-8,166*
	Kesme Hızı (B)	-9,016	-8,209	-7,676*
	Gaz basıncı (C)	-8,504	-8,250	-8,147*
	Toplam ortalama S/N oranı = -8,300 dB			
* Optimum seviyeler				





Şekil 7.3. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

I, II ve III. grup numunelerin yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 7.4' da görülmektedir. Grafiklerdeki % dağılım değerleri incelendiğinde, bütün numuneler için de kesme hızı parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde güç parametresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü için deneysel hatalar oldukça düşüktür.



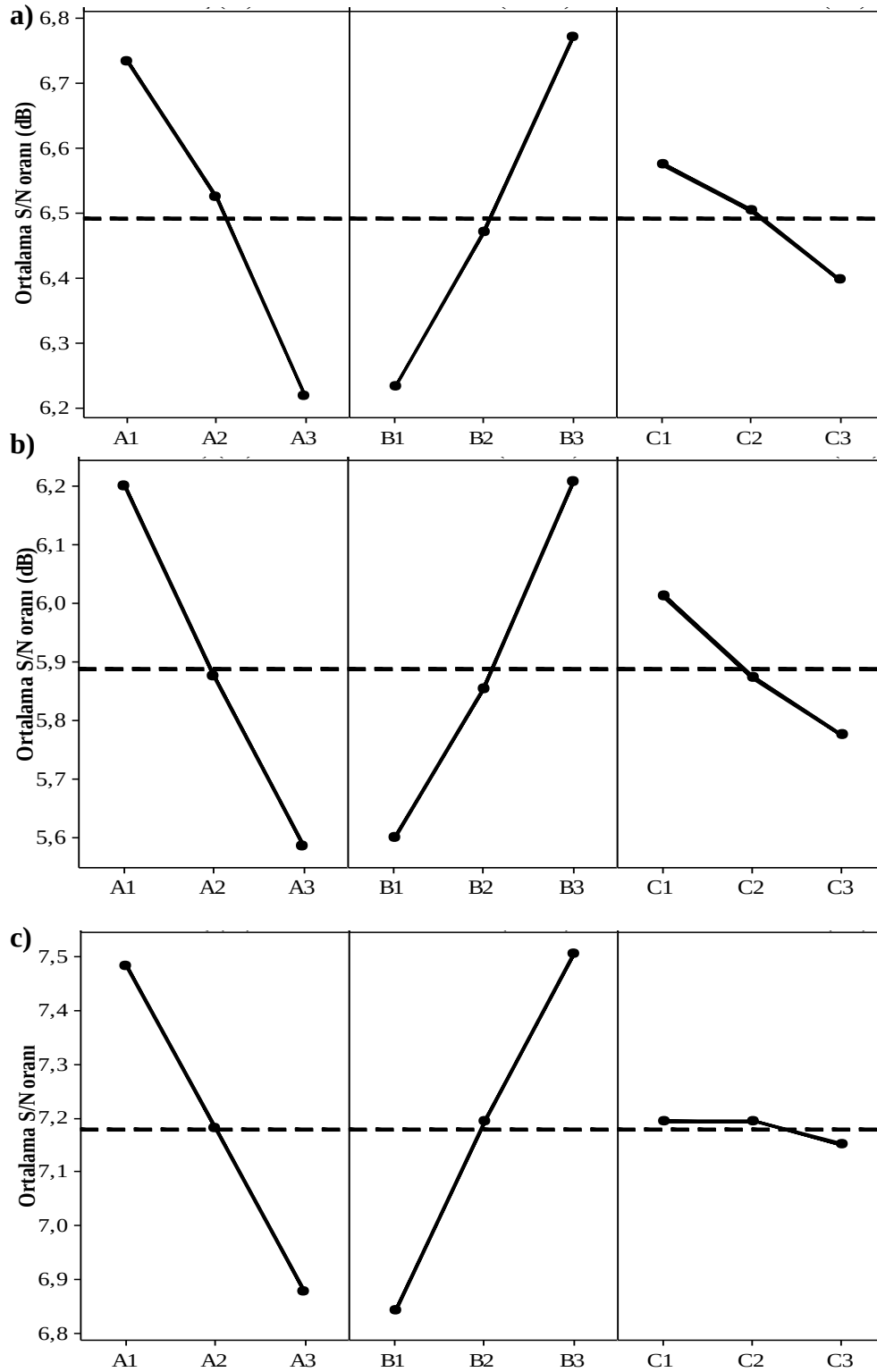
Şekil 7.4. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

7.1.3. Kerf Genişliği İstatiksel Analizi

Tablo 7.1’ de verilen kesme parametrelerinin her bir seviyesine göre kerf genişliğine ait S/N değerleri Tablo 7.4’ de verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin kerf genişliği üzerindeki etkisi ise Şekil 7.5’ de görülmektedir. Tablo 7.4’ de görüldüğü gibi, en küçük kerf genişliği, A1-B3-C1 seviyeleri ile elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 7.4. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

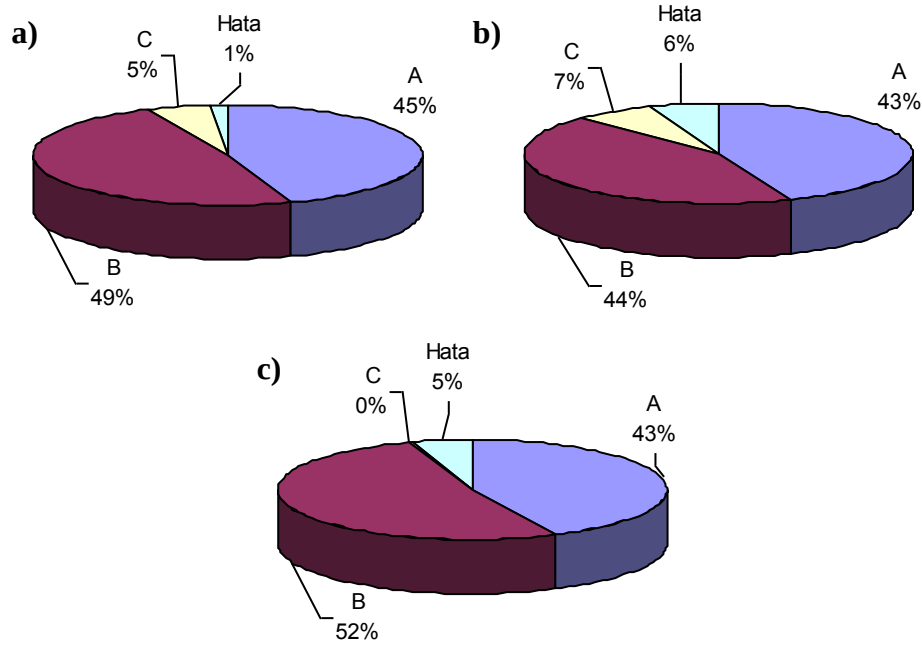
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	6,733*	6,524	6,219
	Kesme Hızı (B)	6,234	6,472	6,770*
	Gaz basıncı (C)	6,575*	6,504	6,398
	Toplam ortalama S/N oranı = 6,492 dB			
II. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	6,200*	5,876	5,587
	Kesme Hızı (B)	5,600	5,856	6,208*
	Gaz basıncı (C)	6,013*	5,874	5,776
	Toplam ortalama S/N oranı = 5,887 dB			
III. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	7,482*	7,181	6,877
	Kesme Hızı (B)	6,842	7,194	7,505*
	Gaz basıncı (C)	7,196*	7,194	7,151
	Toplam ortalama S/N oranı = 7,180 dB * Optimum seviyeler			



Şekil 7.5. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Kerf genişliği için yapılan varyans analizleri sonucuna göre parametrelerin % olarak etkilerini gösteren grafikler Şekil 7.6' da verilmiştir. Görüldüğü üzere kerf genişliği

üzerinde en büyük etkiye kesme hızı ve güç parametreleri sahip iken, yardımcı gaz basıncının etkisi oldukça düşüktür.



Şekil 7.6. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

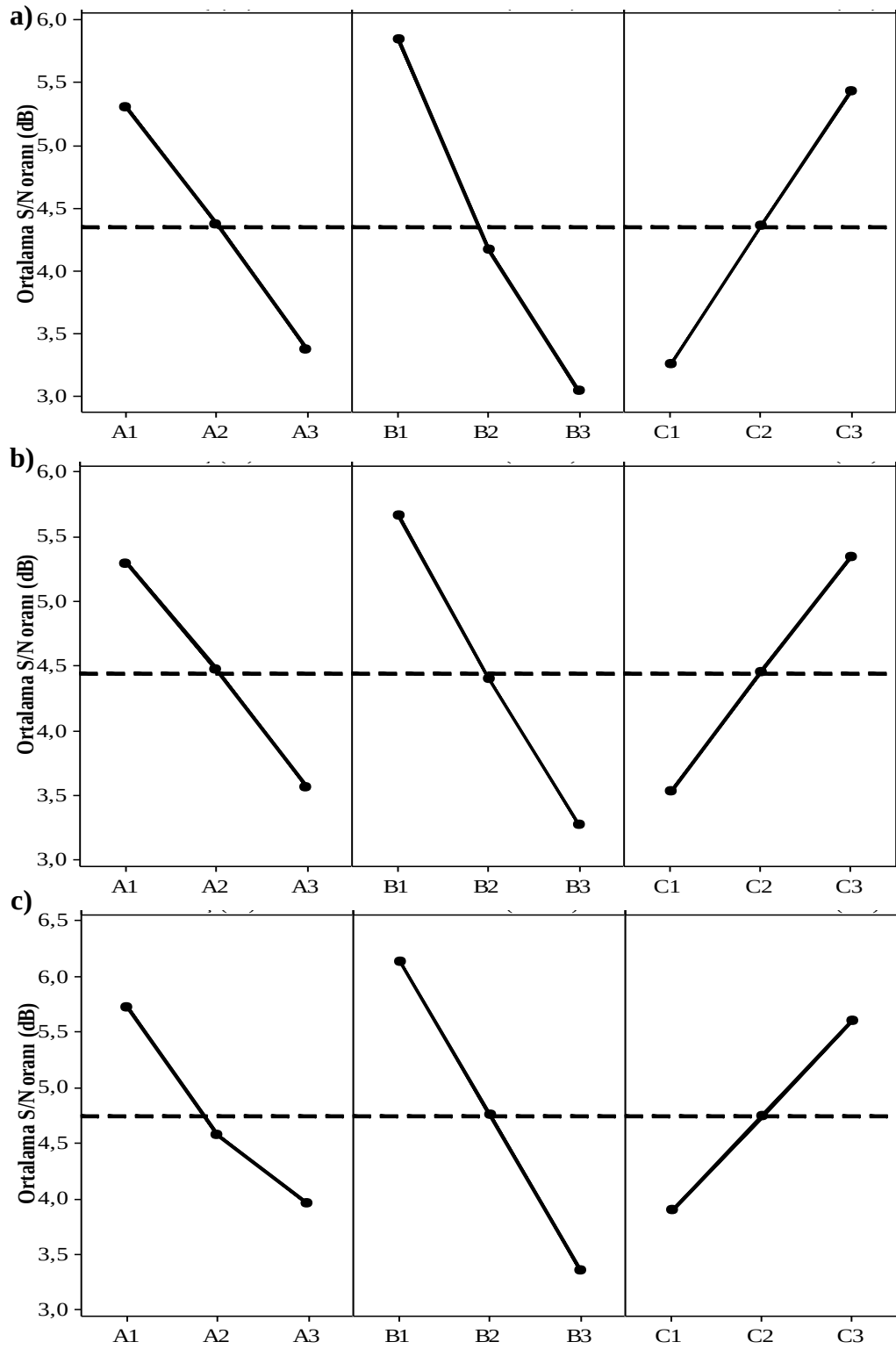
7.1.4. Kerf Eğim Açısı İstatiksel Analizi

Tablo 7.1’de verilen işleme parametrelerinin her bir seviyesine göre kerf eğim açısına ait S/N değerleri, I, II ve III. grup numuneler için Tablo 7.5’de verilmiştir. İşleme parametrelerinin kerf eğim açısı üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.7’de görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, I, II ve III. grup numuneler için en küçük kerf eğim açısının elde edilebilmesi için deney parametrelerinin A1-B1-C3 seviyelerinin kullanılması gerektiği tahmin edilmiştir.

Tablo 7.5. I, II, III. grup numunelerde kerf eğim açısı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

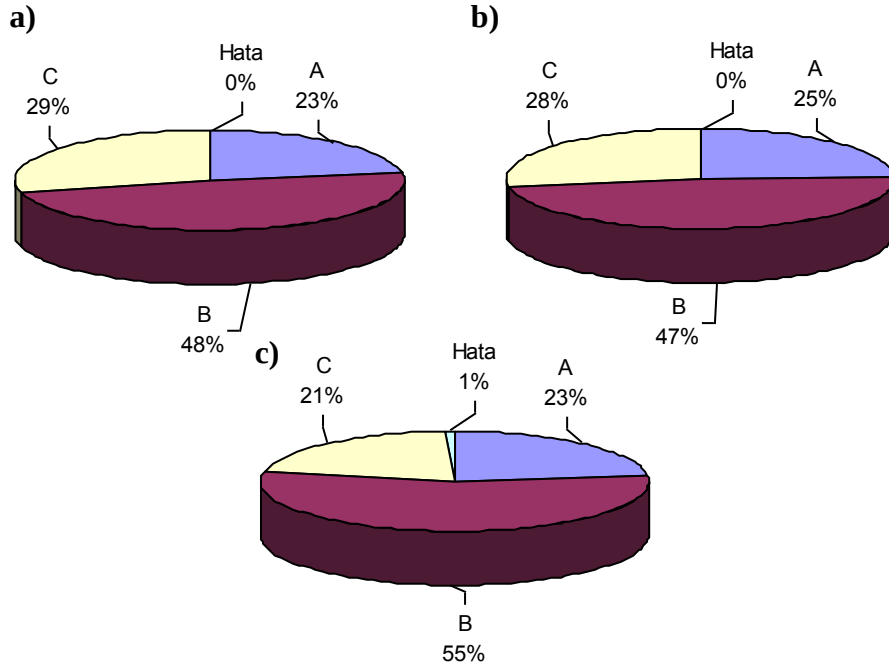
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	5,297*	4,373	3,375
	Kesme Hızı (B)	5,838*	4,164	3,043
	Gaz basıncı (C)	3,256	4,358	5,431*
	Toplam ortalama S/N oranı = 4,348 dB			
II. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	5,292*	4,472	3,567
	Kesme Hızı (B)	5,658*	4,400	3,273
	Gaz basıncı (C)	3,530	4,455	5,346*
	Toplam ortalama S/N oranı = 4,443 dB			
III. Grup numuneler	Lazer Gücü (A)	5,716*	4,569	3,953
	Kesme Hızı (B)	6,128*	4,752	3,358
	Gaz basıncı (C)	3,894	4,742	5,603*
	Toplam ortalama S/N oranı = 4,746 dB * Optimum seviyeler			

S/N yanıt grafiklerinde, daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) kerf eğim açısı değerlerini vermektedir. Şekillerdeki lazerin güç ve kesme hızı parametresini dikkate aldığımızda, her iki parametrenin de artmasıyla S/N oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum kerf eğim açısının artması anlamına gelmektedir



Şekil 7.7. Lazer ışını ile kesme parametrelerinin seviyelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Kerf eğim açısı için yapılan varyans analizleri sonucuna göre parametrelerin % olarak etkilerini gösteren grafikler Şekil 7.8’ de verilmiştir. Görüldüğü üzere kerf eğim açısı üzerinde en büyük etkiye kesme hızı sahip iken, güç ve yardımcı gaz basıncının etkisi daha düşüktür.



Şekil 7.8. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf eğim açısına etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

7.2. Plazma Arkı ile Kesme (PAK) Deneylerinin İstatiksel Analizi

PAK deney sonuçlarının S/N oranlarının tespitinde Tablo 7.6’da görülen faktörler ve seviyeleri kullanılmıştır. PAK deneyleri için akım şideti, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı olmak üzere üç kontrol faktörü bulunmaktadır. Her bir faktörün üç farklı seviyesi vardır.

Tablo 7.6. PAK parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Akım Şiddeti (A)	40	45	50
B	Kesme Hızı (mm/dak)	650	800	950
C	Y. Gaz basıncı (Bar)	13	15	17

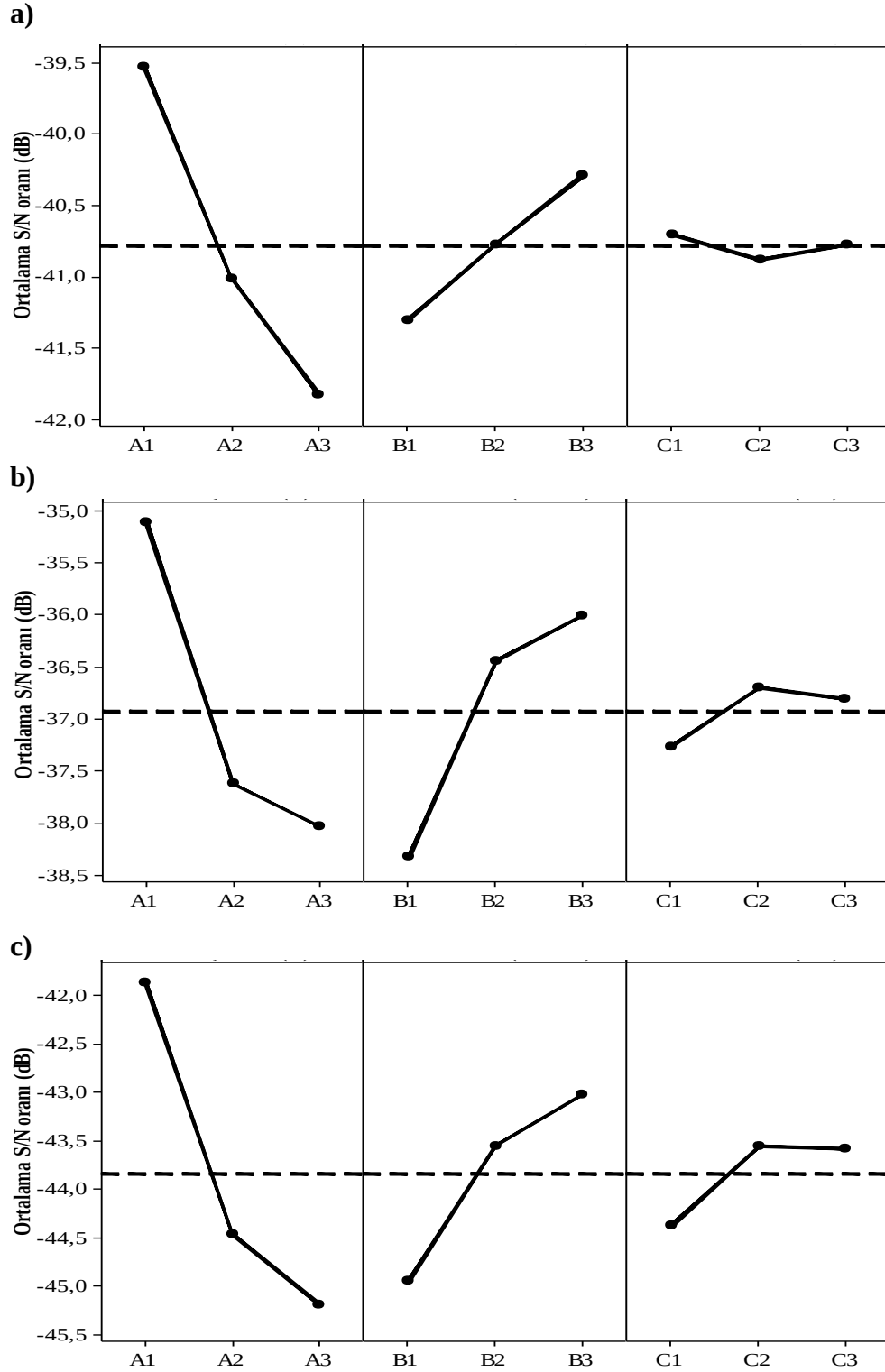
7.2.1. YKTK' nın İstatiksel Analizi

Tablo 7.6' de verilen kesme parametrelerinin her bir seviyesine göre YKTK' na ait S/N değerleri Tablo 7.7' de verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin YKTK üzerindeki etkisi ise Şekil 7.9' da görülmektedir. Tablo 7.7' de görüldüğü gibi, en küçük YKTK, A1-B3-C2 seviyeleri ile elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 7.7. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-39,53*	-41,01	-41,82
	Kesme Hızı (B)	-41,309	-40,77	-40,29*
	Y. Gaz basıncı (C)	-40,88	-40,71*	-40,78
	Toplam ortalama S/N oranı = -40,78 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-35,11*	-37,62	-38,04
	Kesme Hızı (B)	-38,33	-36,44	-36,00*
	Y. Gaz basıncı (C)	-37,26	-36,70*	-36,81
	Toplam ortalama S/N oranı = -36,92 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-41,87*	-44,46	-45,19
	Kesme Hızı (B)	-44,95	-43,55	-43,02*
	Y. Gaz basıncı (C)	-44,37	-43,56*	-43,58
	Toplam ortalama S/N oranı = -43,84 dB * Optimum seviyeler			

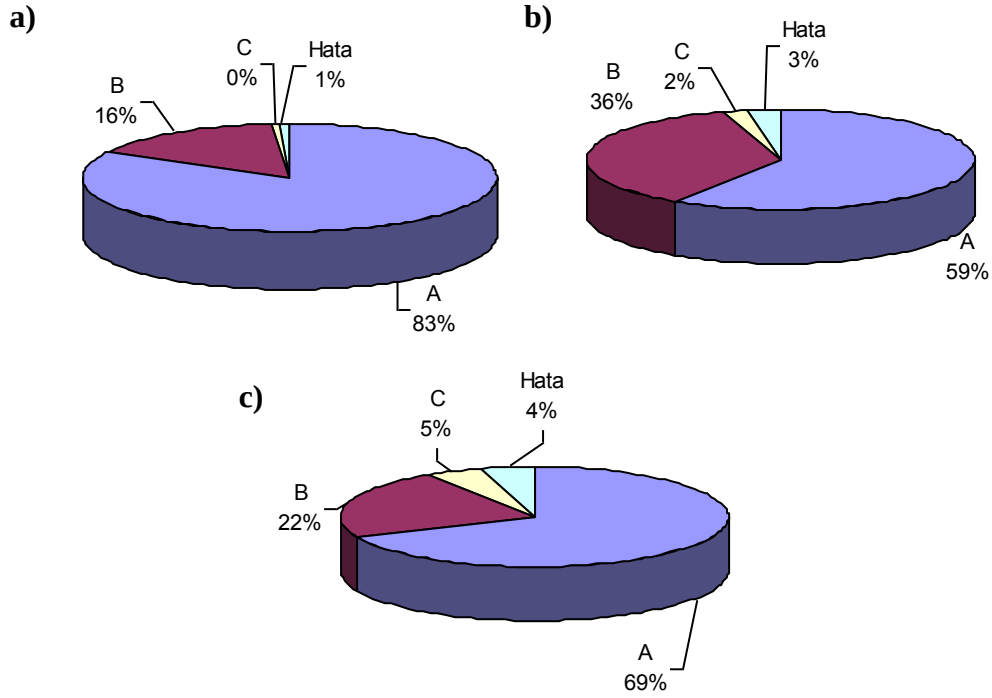
Şekil 7.9' da ki grafikler I, II ve III. grup numuneler de YKTK için S/N yanıt grafikleridir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) YKTK değerlerini vermektedir. Şekillerdeki akım parametresini dikkate aldığımızda (A1, A2, A3) akımın artmasıyla S/N oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum YKTK' nın artması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.9. PAK parametrelerinin seviyelerinin YKTK' na etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Varyans analizlerinin sonucunda deney parametrelerinin YKTK' na % olarak etkileri Şekil 7.10 'da görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, , her üç grup numuneler için

de akım şiddetinin YKTK üzerinde kesme hızına nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu, yardımcı gaz basıncının ise çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, YKTK için deneysel hatalar oldukça düşüktür.



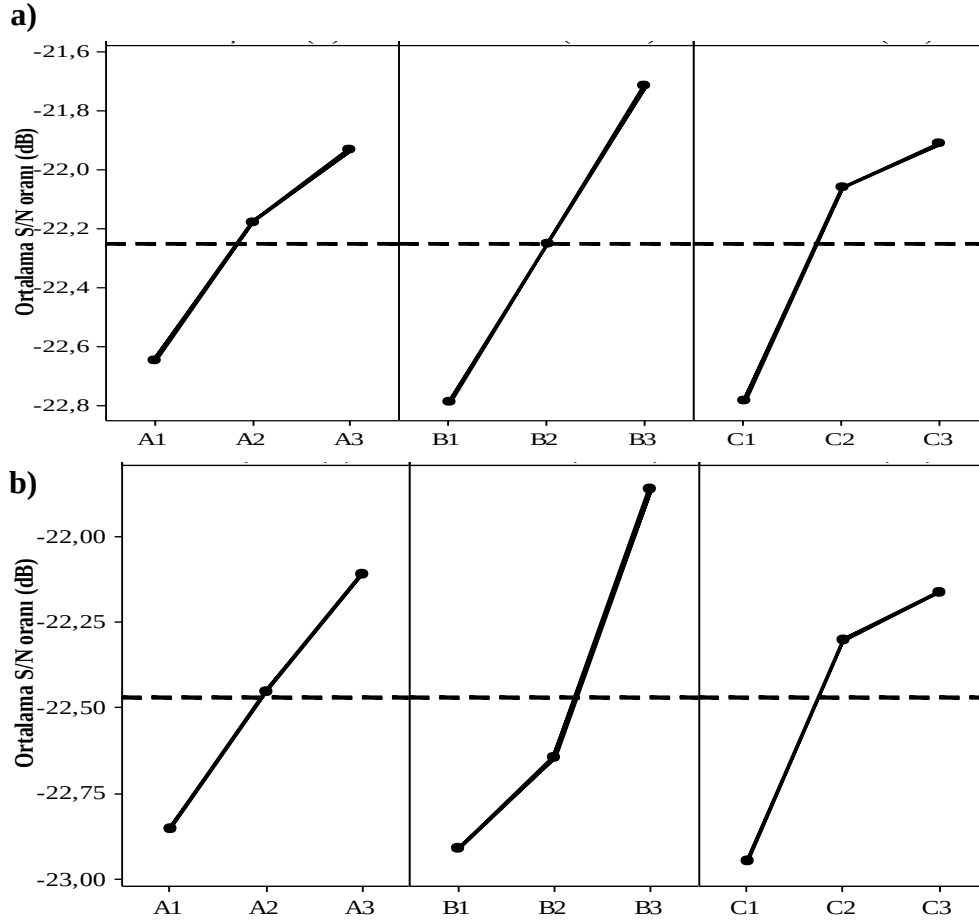
Şekil 7.10. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' na etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

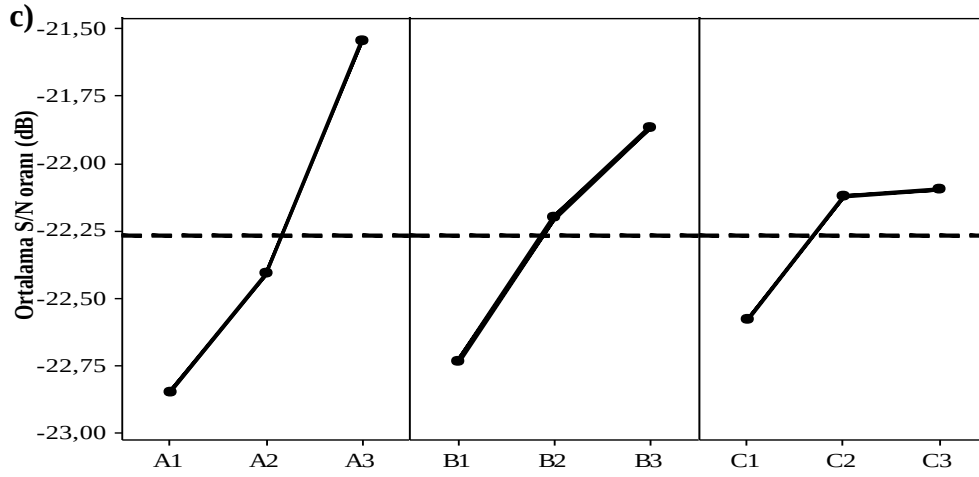
7.2.2. Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi

Tablo 7.8'de yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri verilmiştir. Her üç grup numuneler için işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise sırasıyla Şekil 7.11'de görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, PAK işleminde, yüzey pürüzlülüğünün minimuma indirilmesi için işleme parametrelerinin A3-B3-C3 seviyede olması gerekmektedir.

Tablo 7.8. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

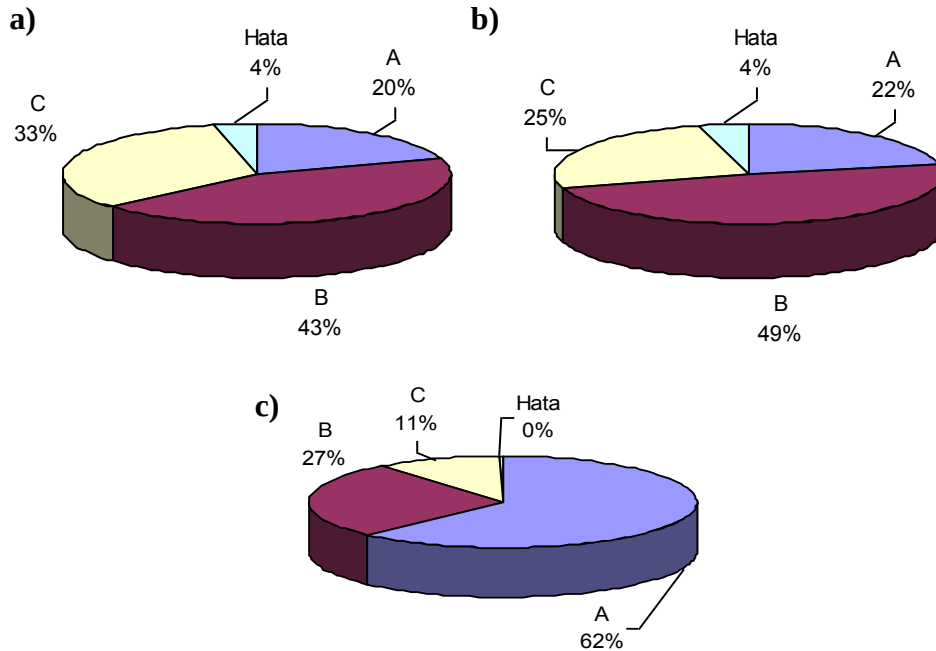
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-22,65	-22,18	-21,93*
	Kesme Hızı (B)	-22,79	-22,25	-21,71*
	Y. Gaz basıncı (C)	-22,78	-22,06	-21,91*
	Toplam ortalama S/N oranı = -22,25 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-22,85	-22,45	-22,11*
	Kesme Hızı (B)	-22,91	-22,64	-21,86*
	Y. Gaz basıncı (C)	-22,95	-22,30	-22,16*
	Toplam ortalama S/N oranı = -22,47 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-22,85	-22,41	-21,54*
	Kesme Hızı (B)	-22,73	-22,20	-21,87*
	Y. Gaz basıncı (C)	-22,58	-22,12	-22,09*
	Toplam ortalama S/N oranı = -22,26 dB * Optimum seviyeler			





Şekil 7.11. PAK parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

I, II ve III. grup numunelerin yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 7.12’ da görülmektedir. Grafiklerdeki % dağılım değerleri incelendiğinde, kesme hızı parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.



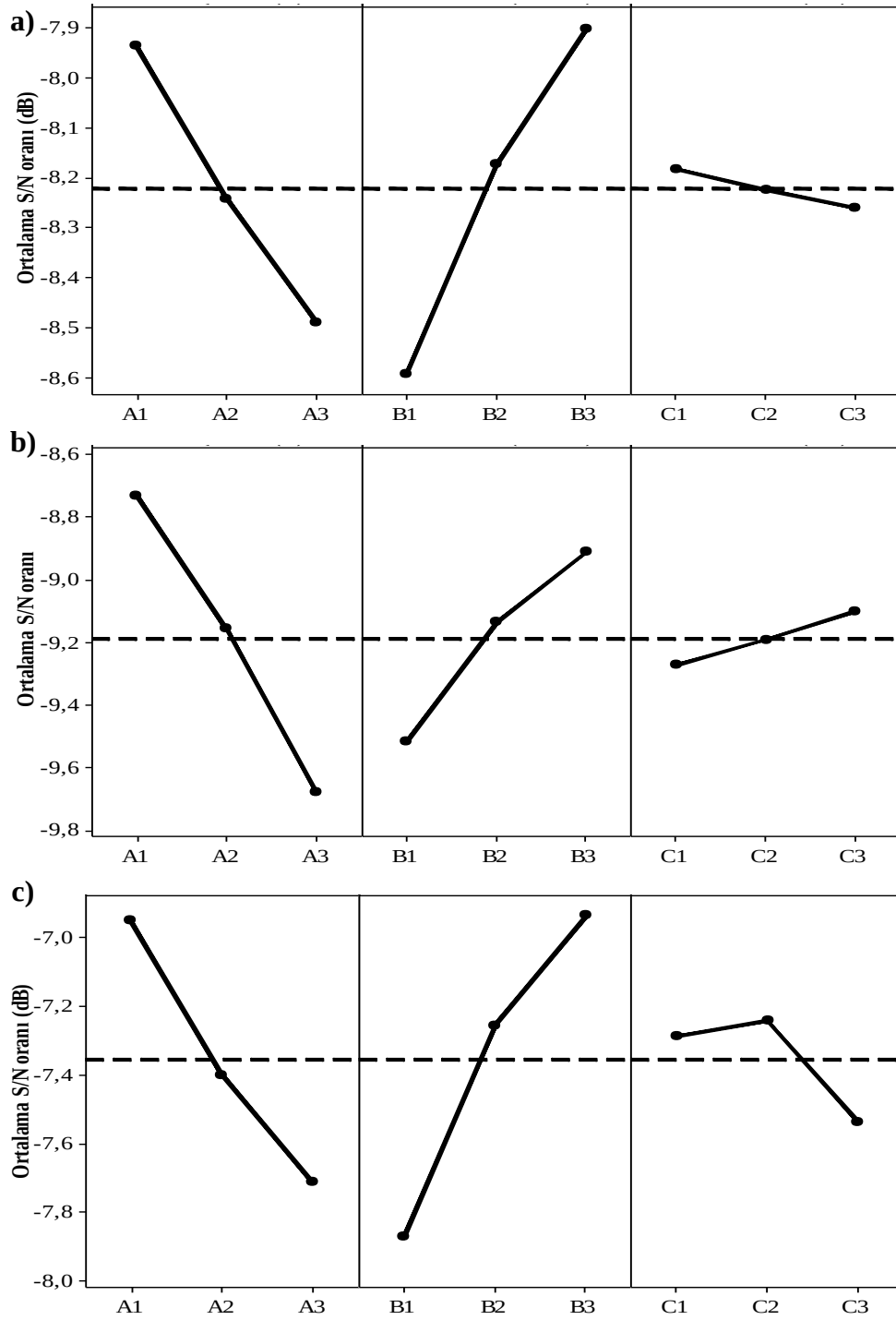
Şekil 7.12. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

7.1.3. Kerf Genişliği İstatiksel Analizi

PAK deneylerinde kullanılan parametrelerin her bir seviyesine göre kerf genişliğine ait S/N değerleri Tablo 7.9’ da verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin kerf genişliği üzerindeki etkisi ise Şekil 7.13’ de görülmektedir. Tablo 7.9’ da görüldüğü gibi, en küçük kerf genişliği için akım ve kesme hızı parametresinin, A1-B3 seviyeleri ile elde edilebileceği tahmin edilirken y. gaz basıncı parametresi farklılık göstermektedir.

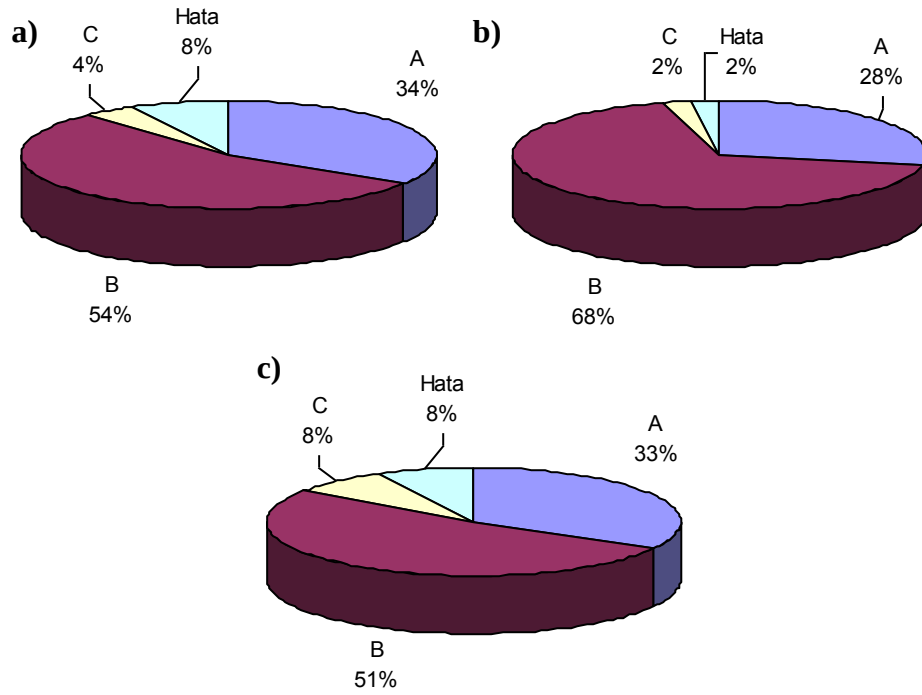
Tablo 7.9. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-7,937*	-8,241	-8,489
	Kesme Hızı (B)	-8,593	-8,173	-7,901*
	Y. Gaz basıncı (C)	-8,183*	-8,224	-8,260
	Toplam ortalama S/N oranı = -8,222 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-8,732*	-9,156	-9,678
	Kesme Hızı (B)	-9,518	-9,136	-8,912*
	Y. Gaz basıncı (C)	-9,273	-9,191	-9,102*
	Toplam ortalama S/N oranı = -9,188 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-6,951*	-7,400	-7,714
	Kesme Hızı (B)	-7,872	-7,257	-6,936*
	Y. Gaz basıncı (C)	-7,286	-7,243*	-7,536
	Toplam ortalama S/N oranı = -7,355 dB * Optimum seviyeler			



Şekil 7.13. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Kerf genişliği için yapılan varyans analizleri sonucuna göre parametrelerin % olarak etkilerini gösteren grafikler Şekil 7.14’ da verilmiştir. Görüldüğü üzere kerf genişliği üzerinde en büyük etkiye kesme hızı ve güç parametreleri sahip iken, yardımcı gaz basıncının etkisi oldukça düşüktür.



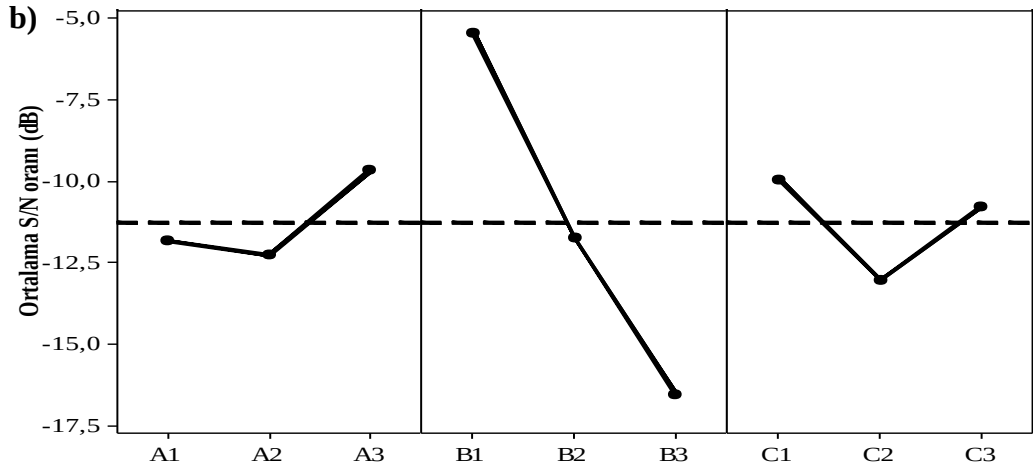
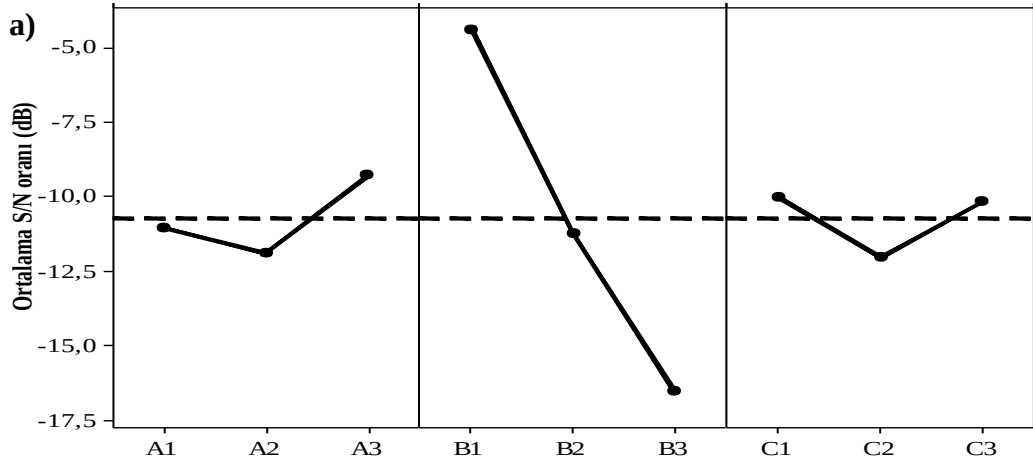
Şekil 7.14. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

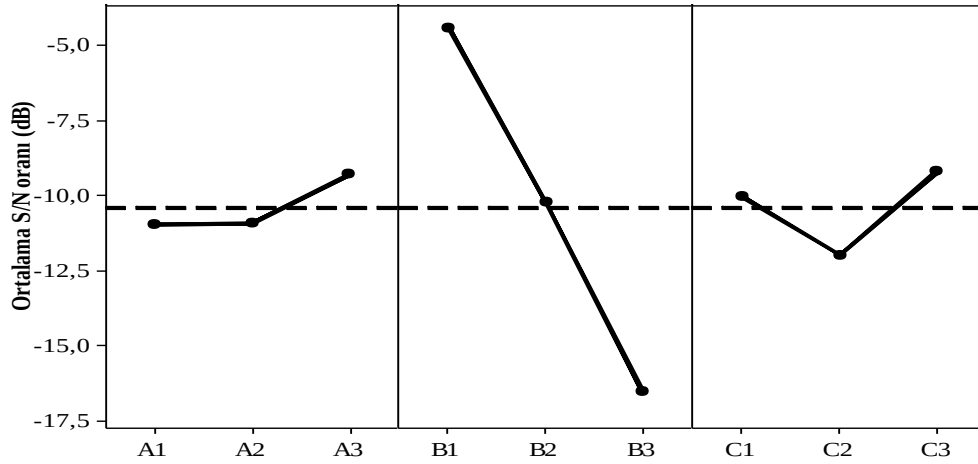
7.2.4. Kerf Eğim Açısı İstatiksel Analizi

Tablo 7.6’da verilen PAK parametrelerinin her bir seviyesine göre kerf eğim açısına ait S/N değerleri, I, II ve III. grup numuneler için Tablo 7.10’da verilmiştir. İşleme parametrelerinin kerf eğim açısı üzerindeki etkileri ise sırasıyla Şekil 7.15’da görülmektedir. Tablolar incelendiğinde, I, II ve III. grup numuneler için en küçük kerf eğim açısının elde edilebilmesi için deney parametrelerinin A3-B1-C1 seviyelerinin kullanılması gerektiği tahmin edilmiştir.

Tablo 7.10. I, II, III. grup numunelerde kerf eğim açısı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

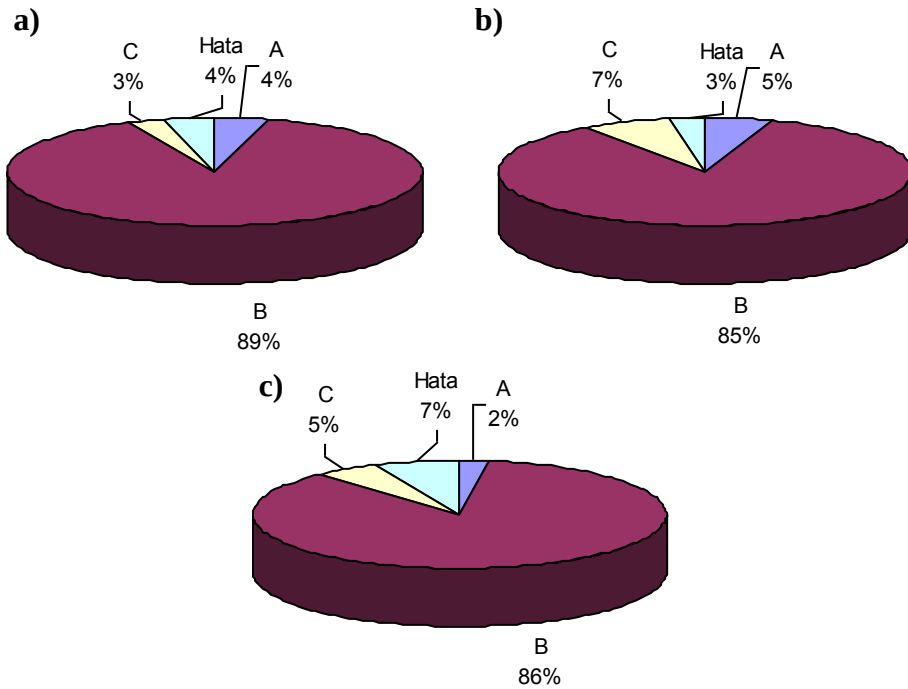
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-11,036	-11,882	-9,286*
	Kesme Hızı (B)	-4,409*	-11,258	-16,536
	Y. Gaz basıncı (C)	-10,013*	-12,043	-10,147
	Toplam ortalama S/N oranı = -10,734 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-11,857	-12,270	-9,687*
	Kesme Hızı (B)	-5,507*	-11,758	-16,549
	Y. Gaz basıncı (C)	-9,976*	-13,042	-10,795
	Toplam ortalama S/N oranı = -11,271 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-10,966	-10,933	-9,293*
	Kesme Hızı (B)	-4,426*	-10,230	-16,536
	Y. Gaz basıncı (C)	-9,192*	-11,977	-10,023
	Toplam ortalama S/N oranı = -10,397 dB			
* Optimum seviyeler				





Şekil 7.15. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Kerf eğim açısı için yapılan varyans analizleri sonucuna göre parametrelerin % olarak etkilerini gösteren grafikler Şekil 7.16' de verilmiştir. Görüldüğü üzere kerf eğim açısı üzerinde en büyük etkiye kesme hızı sahip iken, akım şiddeti ve yardımcı gaz basıncının etkisi daha düşüktür.



Şekil 7.16. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf eğim açısına etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

7.3. Tel Erozyon İle Kesme Deneylerinin İstatiksel Analizi

Tel erozyon ile kesme deney sonuçlarının S/N oranlarının tespitinde Tablo 7.11’de görülen faktörler ve seviyeleri kullanılmıştır. Tel erozyon ile kesme deneyleri için akım şiddeti, vurum süresi ve sıvı sirkülasyon basıncı olmak üzere üç kontrol faktörü bulunmaktadır. Her bir faktörün üç farklı seviyesi vardır.

Tablo 7.11. Tel erozyon ile kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Akım Şiddeti (A)	8	10	12
B	Vurum Süresi (μ s)	5	7	9
C	Sıvı Sirkülasyon Basıncı (kg/cm^2)	13	15	18

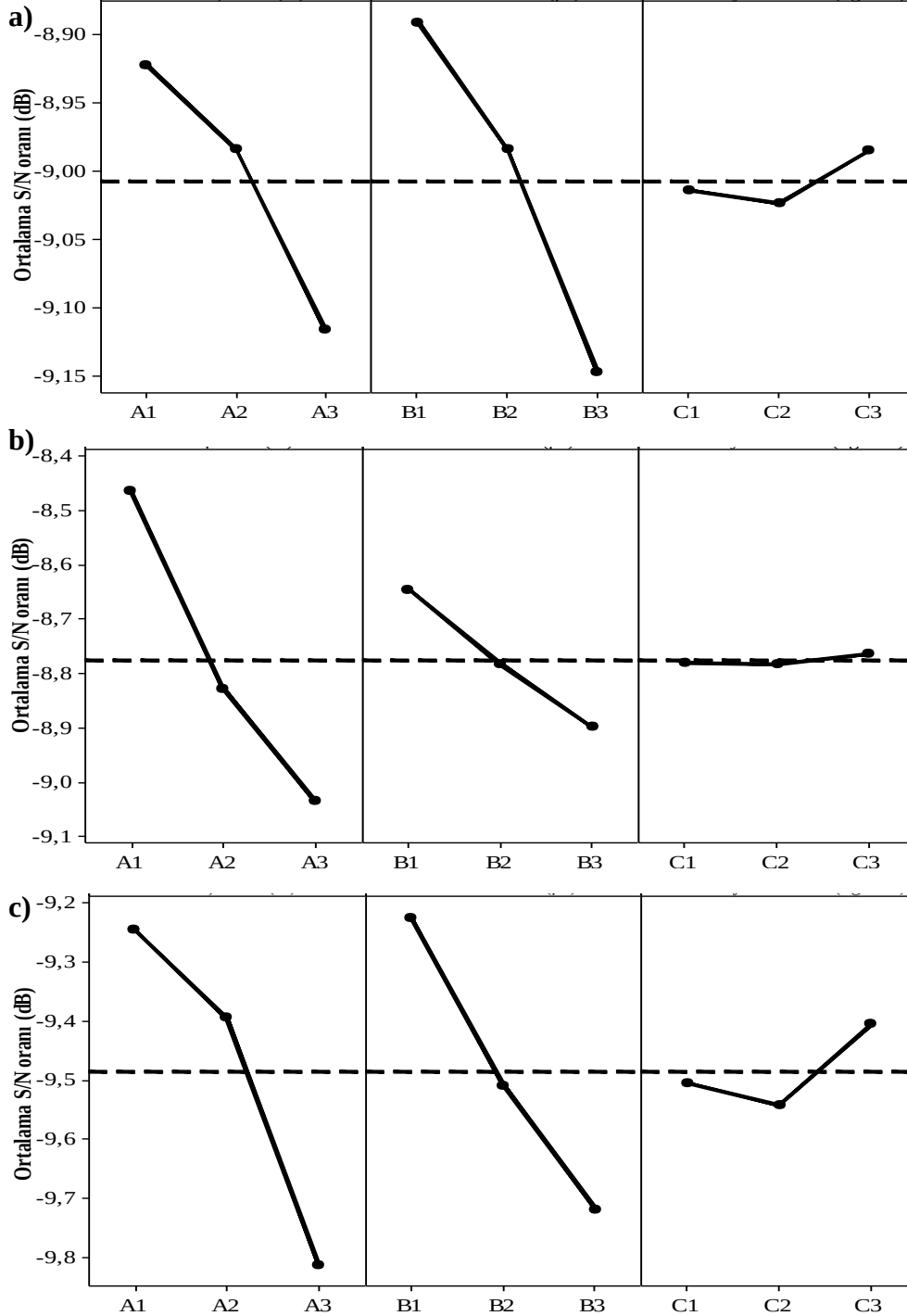
7.3.1. YKTK’ nın İstatiksel Analizi

Tablo 7.11’ de verilen tel erozyon ile kesme parametrelerinin her bir seviyesine göre YKTK’ ya ait S/N değerleri Tablo 7.12’ de verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin YKTK üzerindeki etkisi ise Şekil 7.17’ de görülmektedir. Tablo 7.12’ de görüldüğü gibi, en küçük YKTK, A1-B1-C3 seviyeleri ile elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 7.12. I, II, III. grup numunelerde YKTK için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

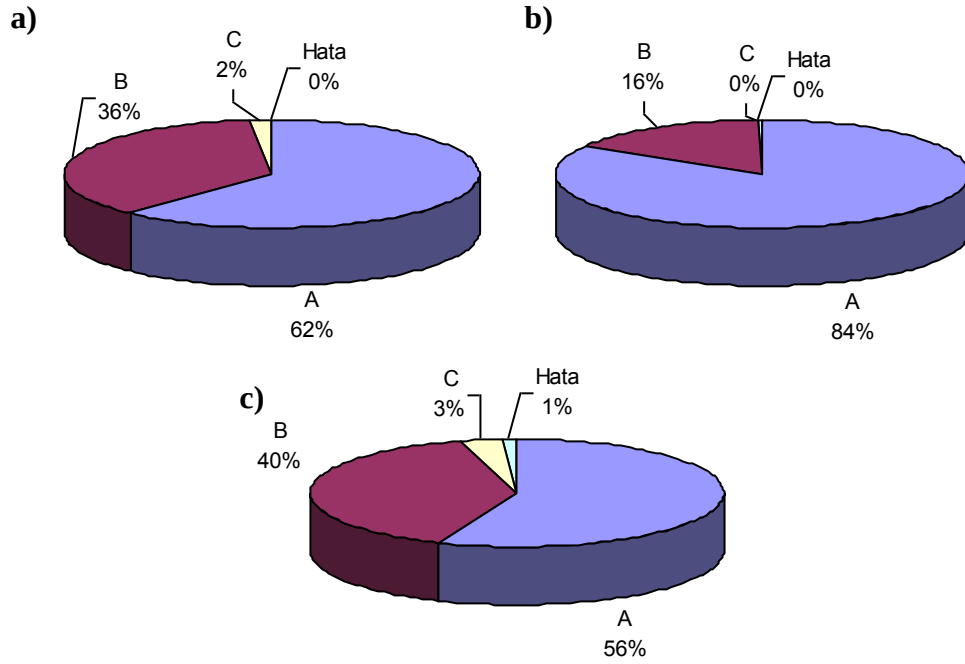
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-8,922*	-8,984	-9,116
	Vurum Süresi (B)	-8,891*	-8,984	-9,147
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-9,014	-9,024	-8,984*
	Toplam ortalama S/N oranı = -9,00 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-8,464*	-8,828	-9,035
	Vurum Süresi (B)	-8,646*	-8,783	-8,899
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-8,781	-8,782	-8,765*
	Toplam ortalama S/N oranı = -8,775 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-9,246*	-9,395	-9,813
	Vurum Süresi (B)	-9,227*	-9,509	-9,719
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-9,506	-9,542	-9,406*
	Toplam ortalama S/N oranı = -9,484 dB			
* Optimum seviyeler				

Şekil 7.17’ de ki grafikler I, II ve III. grup numuneler de YKTK için S/N yanıt grafikleridir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) YKTK değerlerini vermektedir. Şekillerdeki akım ve vurum süresi parametrelerini dikkate aldığımızda (A1, A2, A3-B1, B2, B3) akımın ve vurum süresinin artmasıyla S/N oranlarının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum YKTK’ nın artması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.17. Tel erozyon ile kesme parametrelerinin seviyelerinin YKTK’ ya etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Varyans analizlerinin sonucunda deney parametrelerinin YKTK' ya % olarak etkileri Şekil 7.18' de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi, her üç grup numuneler için de akım şiddetinin YKTK üzerinde vurum süresine nazaran oldukça fazla etkisinin olduğu, s. sirkülasyon basıncının ise çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, YKTK için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.



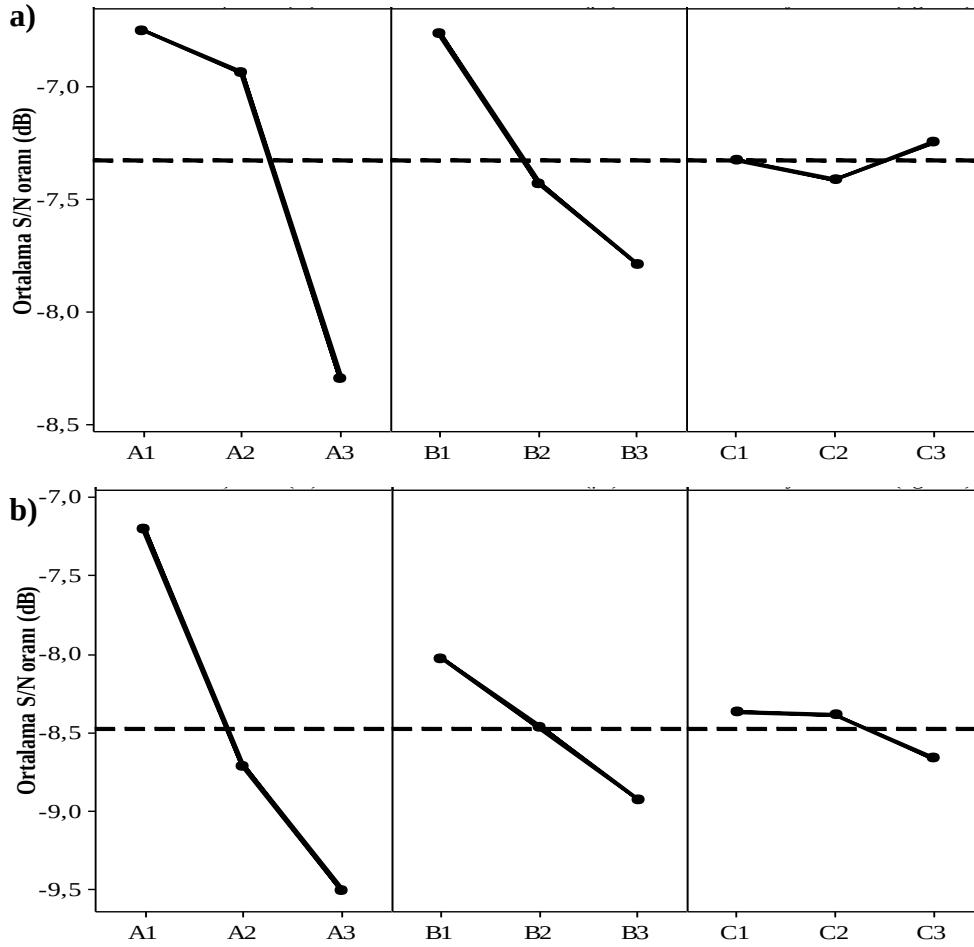
Şekil 7.18. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin YKTK' ya etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

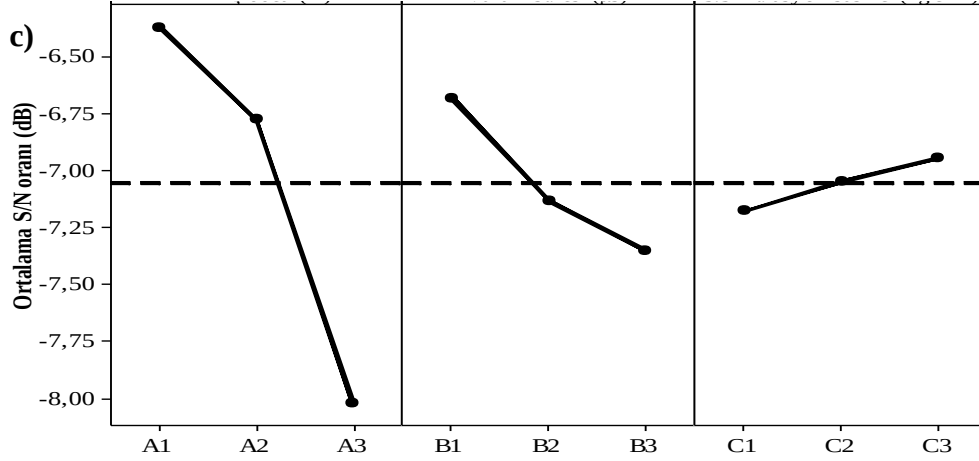
7.3.2. Yüzey Pürüzlülüğünün İstatiksel Analizi

Tablo 7.13'de yüzey pürüzlülüğüne ait S/N değerleri verilmiştir. Her üç grup numuneler için işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise sırasıyla Şekil 7.19'da görülmektedir. Tablo ve grafikler incelendiğinde, tel erozyon ile kesme işleminde, yüzey pürüzlülüğünün minimuma indirilmesi için işleme parametrelerinin A1-B1-C3 seviyede olması gerekmektedir.

Tablo 7.13. I, II, III. grup numunelerde yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

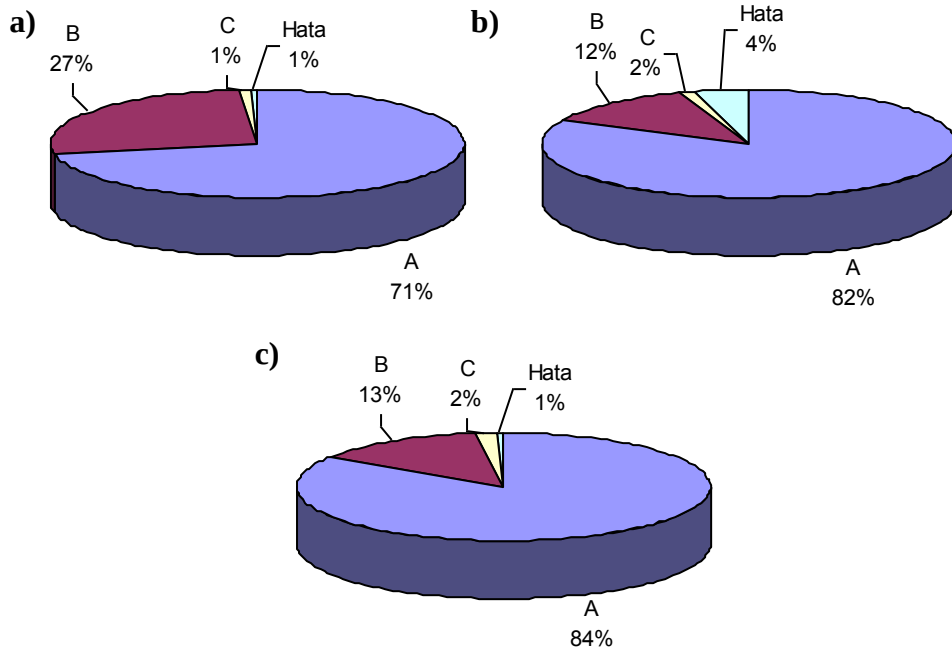
		İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
			Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-6,746*	-6,934	-8,294	
	Vurum Süresi (B)	-6,762*	-7,426	-7,785	
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-7,322	-7,408	-7,244*	
	Toplam ortalama S/N oranı = -7,324 dB				
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-7,209*	-8,715	-9,503	
	Vurum Süresi (B)	-8,030*	-8,470	-8,928	
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-8,374*	-8,392	-8,662	
	Toplam ortalama S/N oranı = -8,475 dB				
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	-6,373*	-6,778	-8,019	
	Vurum Süresi (B)	-6,684*	-7,132	-7,354	
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	-7,179	-7,046	-6,945*	
	Toplam ortalama S/N oranı = -7,056 dB				
* Optimum seviyeler					





Şekil 7.19. Tel erozyon ile kesme parametrelerinin seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

I, II ve III. grup numunelerin yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 7.20’ de görülmektedir. Grafiklerdeki % dağılım değerleri incelendiğinde, kesme hızı parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça fazla etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü için deneysel hatalar oldukça düşük seviyededir.



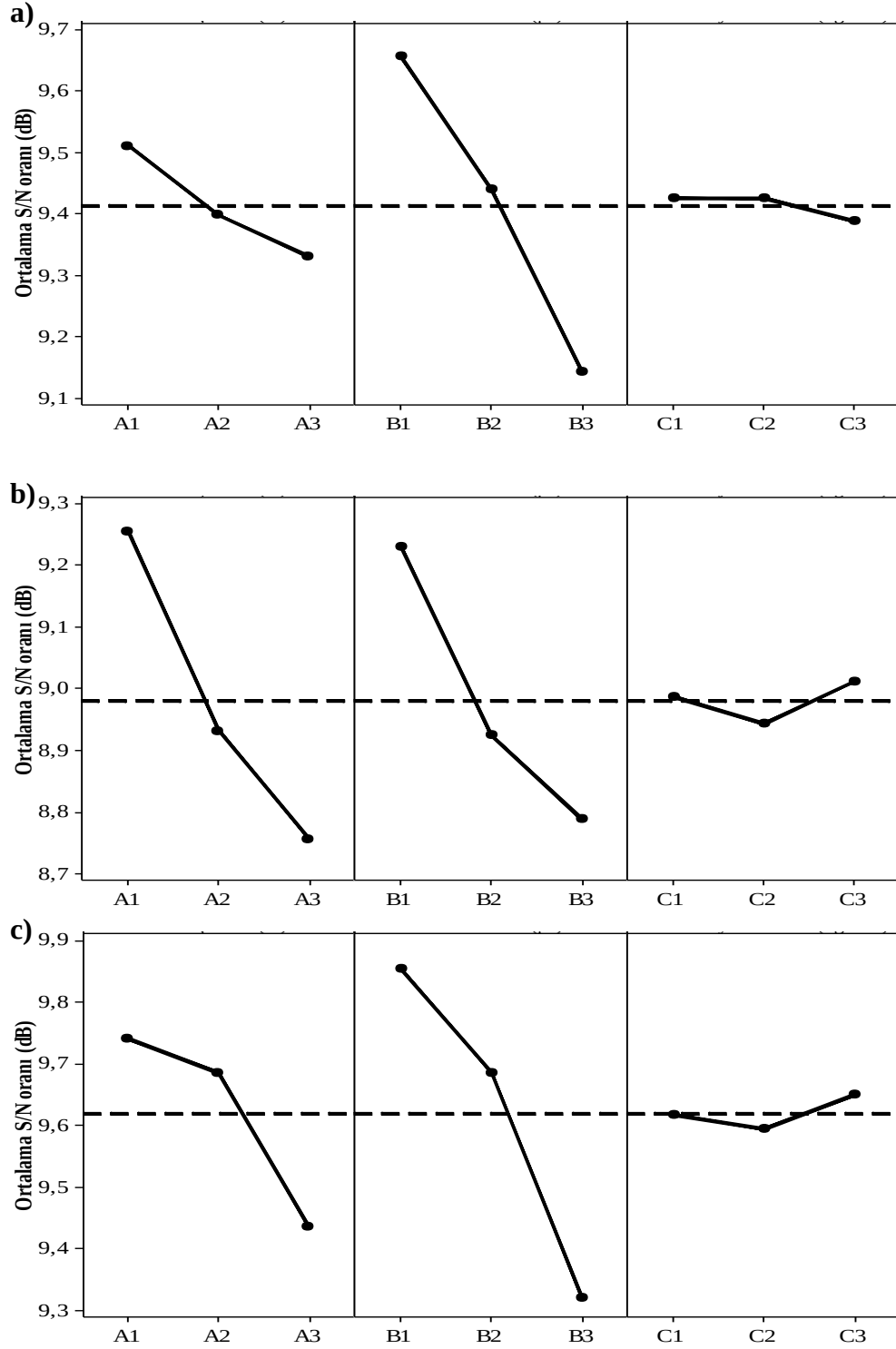
Şekil 7.20. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

7.1.3. Kerf Genişliği İstatiksel Analizi

Tel erozyon ile kesme deneylerinde kullanılan parametrelerin her bir seviyesine göre kerf genişliğine ait S/N değerleri Tablo 7.14’ da verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin kerf genişliği üzerindeki etkisi ise Şekil 7.21’ de görülmektedir. Tablo 7.14’ de görüldüğü gibi, en küçük kerf genişliği için her üç grup numunede parametrelerin, A1-B1-C1 seviyeleri ile elde edilebileceği tahmin edilmiştir.

Tablo 7.14. I, II, III. grup numunelerde kerf genişliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (S/N değerleri)

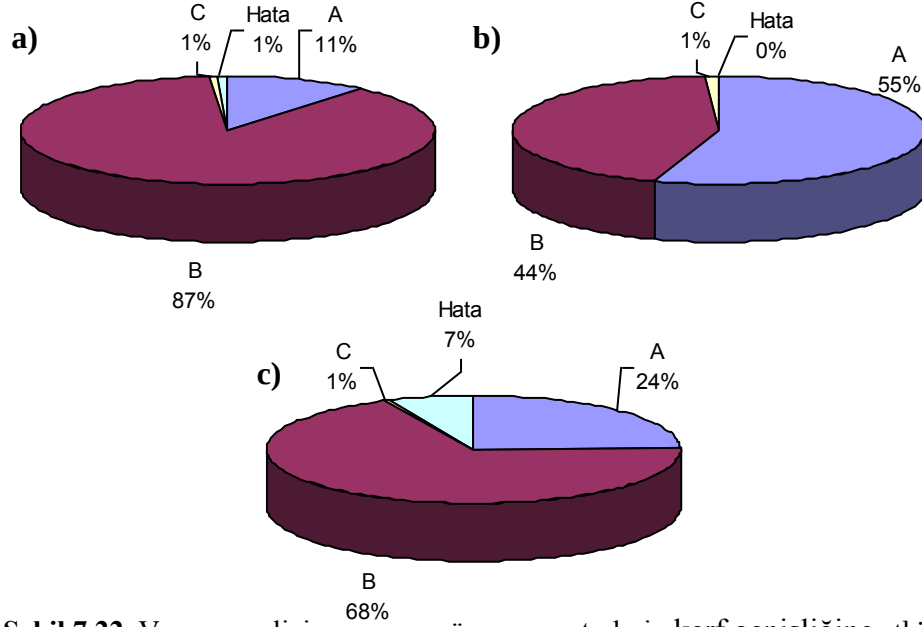
	İşlem parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)		
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
I. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	9,511*	9,398	9,330
	Vurum Süresi (B)	9,656*	9,439	9,144
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	9,425	9,389	9,425*
	Toplam ortalama S/N oranı = 9,413 dB			
II. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	9,254*	8,932	8,757
	Vurum Süresi (B)	9,229*	8,924	8,789
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	8,987	8,944	9,012*
	Toplam ortalama S/N oranı = 8,991 dB			
III. Grup numuneler	Akım Şiddeti (A)	9,739*	9,684	9,435
	Vurum Süresi (B)	9,852*	9,685	9,321
	S.Sirkülasyon Basıncı (C)	9,615	9,593	9,649*
	Toplam ortalama S/N oranı = 9,619 dB			
* Optimum seviyeler				



Şekil 7.21. PAK parametrelerinin seviyelerinin kerf genişliğine etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

Şekil 7.22' de kerf genişliği için yapılan varyans analizleri sonucuna göre parametrelerin % olarak etkilerini gösteren grafikler verilmiştir. Görüldüğü üzere kerf

genişliği üzerinde en büyük etkiye vurum süresi ve akım parametreleri sahip iken, s. sirkülasyon basıncının etkisi oldukça düşüktür.



Şekil 7.22. Varyan analizi sonucuna göre parametrelerin kerf genişliğine etkisi
(a= I. grup numuneler, b= II. grup numuneler, c= III. grup numuneler)

8. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bu çalışmada, çoklu lineer regresyon yöntemi ile termal kesme deneylerine ait sonuçlar kullanılarak, yeniden katılacak tabaka kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve kerf eğim açısı ile ilgili sonuçların matematiksel modellemesi yapılmıştır. Ayrıca matematiksel modellerin uygunluğu incelenmiştir

8.1. Lazer Işını İle Kesme Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi

Matematiksel model oluşturulurken, lazer ışını ile kesme sonrasında kesme kalitesini belirleyen , yeniden katılacak tabaka kalınlığı ($YKTK$), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısının ($Ke.a$) kontrol parametreleri olan; lazer gücü (P), kesme hızı (V) ve yardımcı gaz basıncına (GPy) bağlı olarak regresyon modelleri:

$$\text{Yeniden katılacak tabaka kalınlığı} \quad YKTK = a_0 + a_1 . P - a_2 . V - a_3 . GPy \quad (8.1)$$

$$\text{Yüzey pürüzlülüğü} \quad Ra = a_0 - a_1 . P - a_2 . V - a_3 . GPy \quad (8.2)$$

$$\text{Kerf genişliği} \quad Kü = a_0 + a_1 . P - a_2 . V + a_3 . GPy \quad (8.3)$$

$$\text{Kerf eğim açısı} \quad Ke.a = -a_0 + a_1 . P + a_2 . V - a_3 . GPy \quad (8.4)$$

Şeklinde ifade edilmiştir. MİNİTAB R15 programı yardımı ile elde edilen regresyon ve korelasyon katsayıları Tablo 8.1’ de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 8.1. Lazer ışını ile kesme yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları

	Regresyon katsayıları				Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Y. katılacak tabaka k	27,2	0,0101	0,0113	0,450	95,9%
Yüzey pürüzlülüğü	6,18	0,000088	0,00107	0,0575	83,8%
Kerf genişliği	0,454	0,000045	0,000102	0,00368	98,9%
Kerf eğim açısı	0,218	0,000161	0,000487	0,0337	99,8%

Bu katsayılar, denklemlerde yerine konulduğunda yeniden katılacak tabaka kalınlığı ($YKTK$), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısına ($Ke.a$) ait matematiksel modeller:

$$YKTK = 27,2 + 0,0101 \cdot P - 0,0113 \cdot V - 0,450 \cdot GPy \quad (8.5)$$

$$Ra = 6,18 - 0,000088 \cdot P - 0,00107 \cdot V - 0,0575 \cdot GPy \quad (8.6)$$

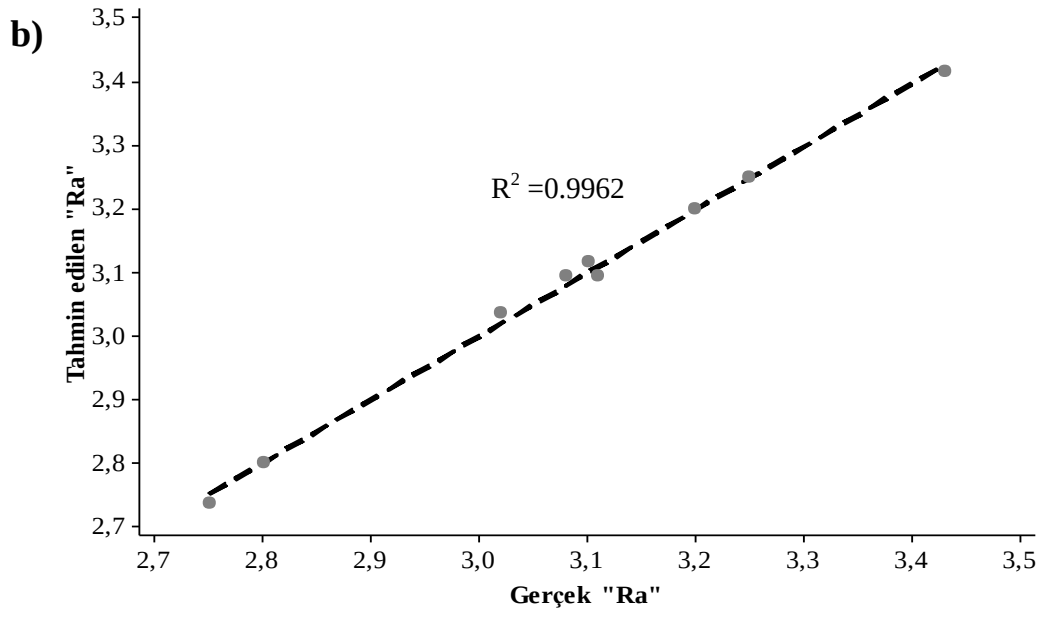
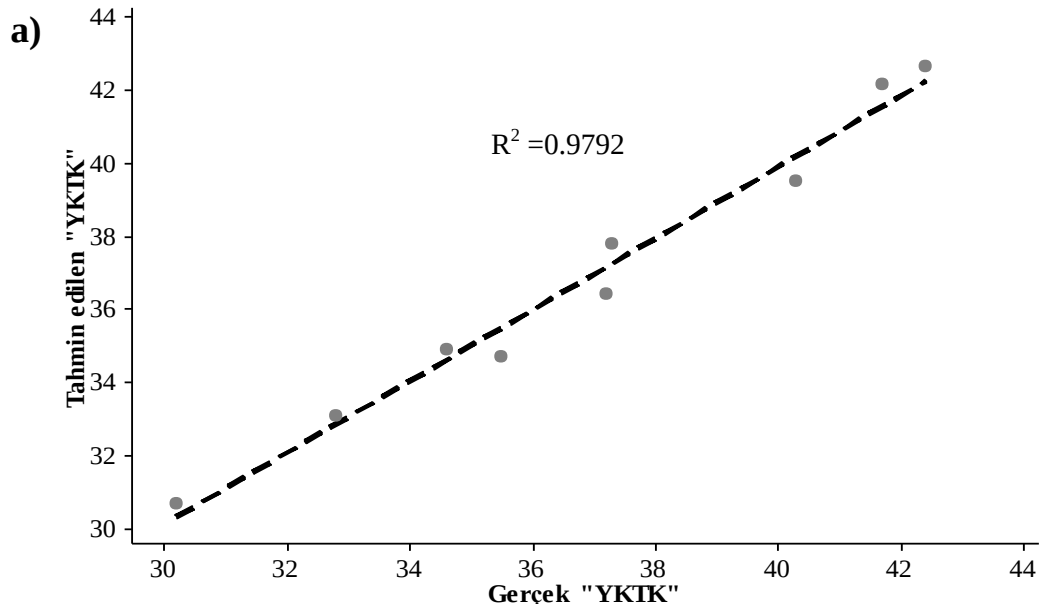
$$Kü = 0,454 + 0,000045 \cdot P - 0,000102 \cdot V + 0,00368 \cdot GPy \quad (8.7)$$

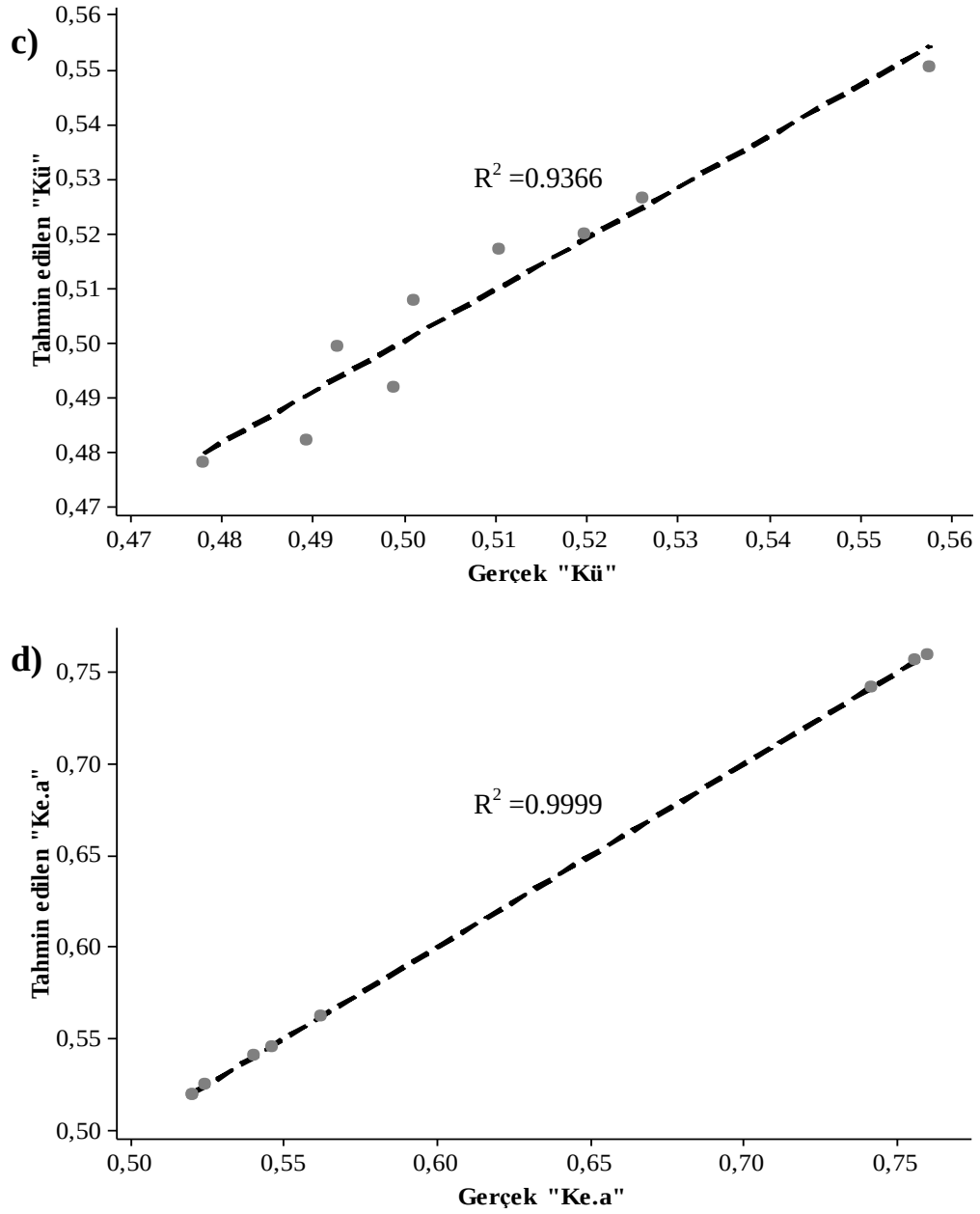
$$Ke.a = -0,218 + 0,000161 \cdot P + 0,000487 \cdot V - 0,0337 \cdot GPy \quad (8.8)$$

şeklinde elde edilir. Tablo 8.1’de modellere ait korelasyon katsayıları elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yeniden katılacak tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*), kerf genişliği (*Kü*) ve kerf eğim açısı (*Ke.a*) değerleri Tablo 8.2’de verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.1’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir.

Tablo 8.2. Lazer ışını ile kesme sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler

Deney numarası	Y. katılacak tabaka kalınlığı		Yüzey pürüzlülüğü		Kerf genişliği		Kerf eğim açısı	
	Gerçek <i>YKTK</i>	Tahmin edilen <i>YKTK</i>	Gerçek <i>Ra</i>	Tahmin edilen <i>Ra</i>	Gerçek <i>Kü</i>	Tahmin edilen <i>Kü</i>	Gerçek <i>Ke.a</i>	Tahmin edilen <i>Ke.a</i>
1	37,2	36,4222	3,43	3,41556	0,4927	0,499533	0,524	0,525111
2	32,8	33,0889	3,08	3,09556	0,4988	0,491767	0,546	0,545111
3	30,2	30,6889	2,80	2,79889	0,4780	0,478200	0,562	0,561778
4	37,3	37,7889	3,20	3,19889	0,5262	0,526400	0,520	0,519778
5	35,5	34,7222	3,11	3,09556	0,5104	0,517233	0,540	0,541111
6	34,6	34,8889	3,02	3,03556	0,4893	0,482267	0,760	0,759111
7	42,4	42,6889	3,10	3,11556	0,5576	0,550567	0,520	0,519111
8	41,7	42,1889	3,25	3,24889	0,5198	0,520000	0,742	0,741778
9	40,3	39,5222	2,75	2,73556	0,5010	0,507833	0,756	0,757111





Şekil 8.1. Lazer ışını ile kesmede elde edilen deneysel ve teorik
a: yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (Ra),
c: kerf genişliği ($Kü$), d: kerf eğim açılarının ($Ke.a$) karşılaştırılması

8.2. PAK Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi

PAK yönteminde yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısının ($Ke.a$) kontrol parametreleri olan; akım şiddeti (IP), kesme hızı (V) ve yardımcı gaz basıncına (GPy) bağlı olarak regresyon modelleri:

$$\begin{aligned}
\text{Yeniden katılan tabaka kalınlığı} \quad YKTK &= a_0 + a_1 \cdot IP - a_2 \cdot V - a_3 \cdot GP_y & (8.9) \\
\text{Yüzey pürüzlülüğü} \quad Ra &= a_0 - a_1 \cdot IP - a_2 \cdot V - a_3 \cdot GP_y & (8.10) \\
\text{Kerf genişliği} \quad Kü &= a_0 + a_1 \cdot IP - a_2 \cdot V + a_3 \cdot GP_y & (8.11) \\
\text{Kerf eğim açısı} \quad Ke.a &= -a_0 - a_1 \cdot IP + a_2 \cdot V + a_3 \cdot GP_y & (8.12)
\end{aligned}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Elde edilen regresyon ve korelasyon katsayıları Tablo 8.3’ de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 8.3. PAK yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları

	Regresyon katsayıları				Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Y. katılan tabaka k	24,7	2,25	0,0627	0,29	86,6%
Yüzey pürüzlülüğü	27,6	0,117	0,00540	0,312	93,7%
Kerf genişliği	2,20	0,0312	0,000662	0,0127	98,9%
Kerf eğim açısı	5,93	0,111	0,0159	0,163 Gaz	96,2%

Bu katsayılar, denklemlerde yerine konulduğunda yeniden katılan tabaka kalınlığı ($YKTK$), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısına ($Ke.a$) ait matematiksel modeller:

$$YKTK = 24,7 + 2,25 \cdot IP - 0,0627 \cdot V - 0,29 \cdot GP_y \quad (8.13)$$

$$Ra = 27,6 - 0,117 \cdot IP - 0,00540 \cdot V - 0,312 \cdot GP_y \quad (8.14)$$

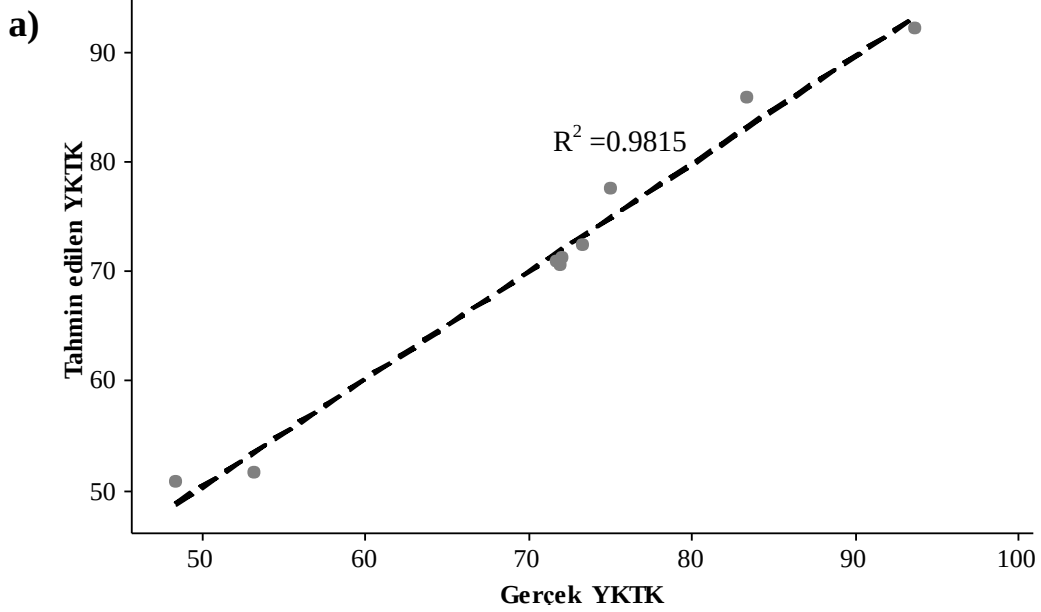
$$Kü = 2,20 + 0,0312 \cdot IP - 0,000662 \cdot V + 0,0127 \cdot GP_y \quad (8.15)$$

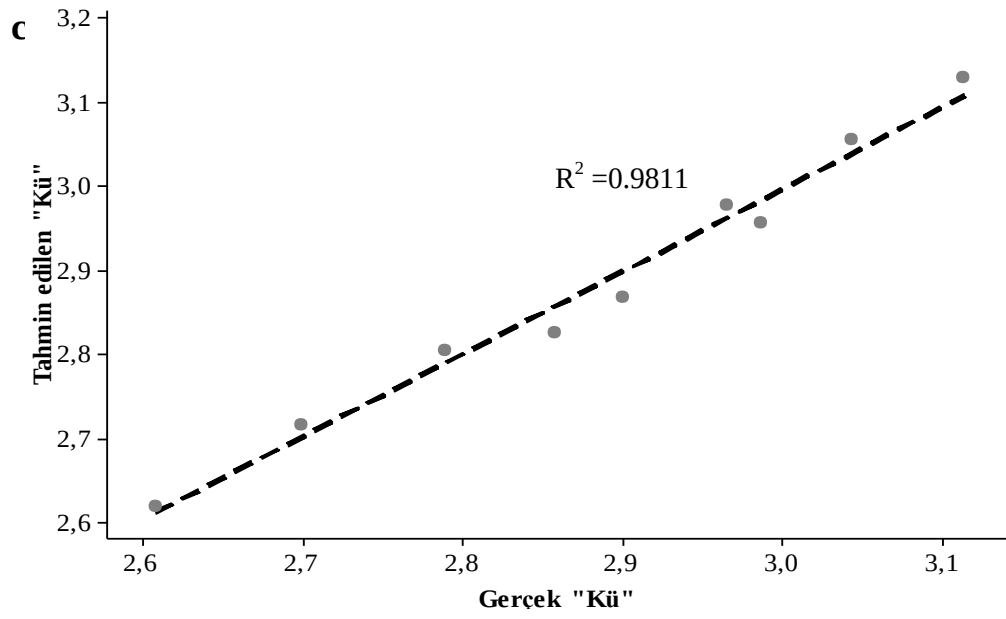
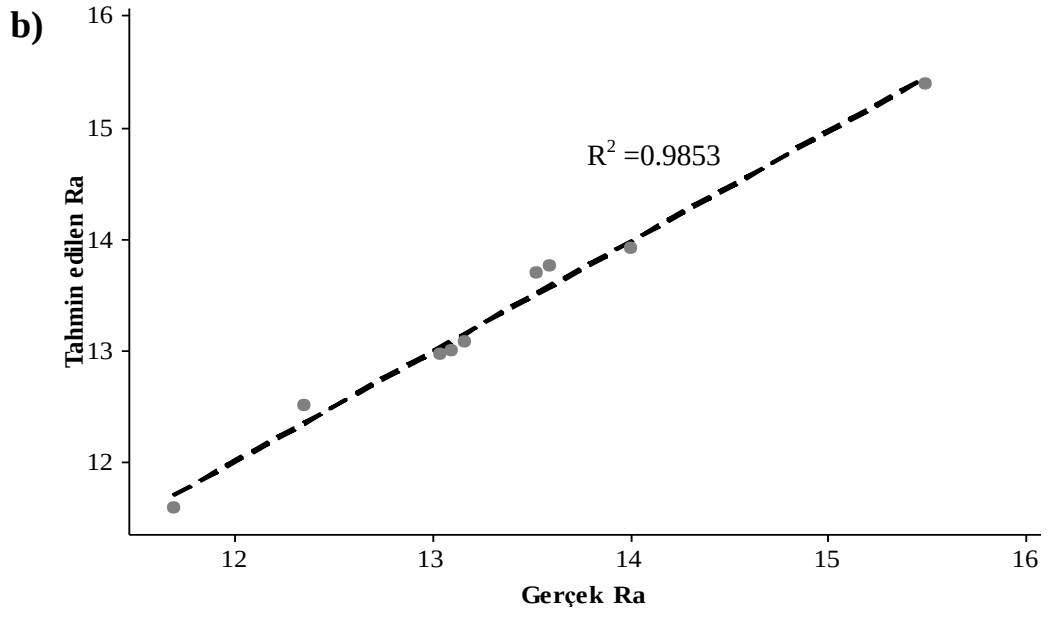
$$Ke.a = -5,93 - 0,111 \cdot IP + 0,0159 \cdot V + 0,163 \cdot GP_y \quad (8.16)$$

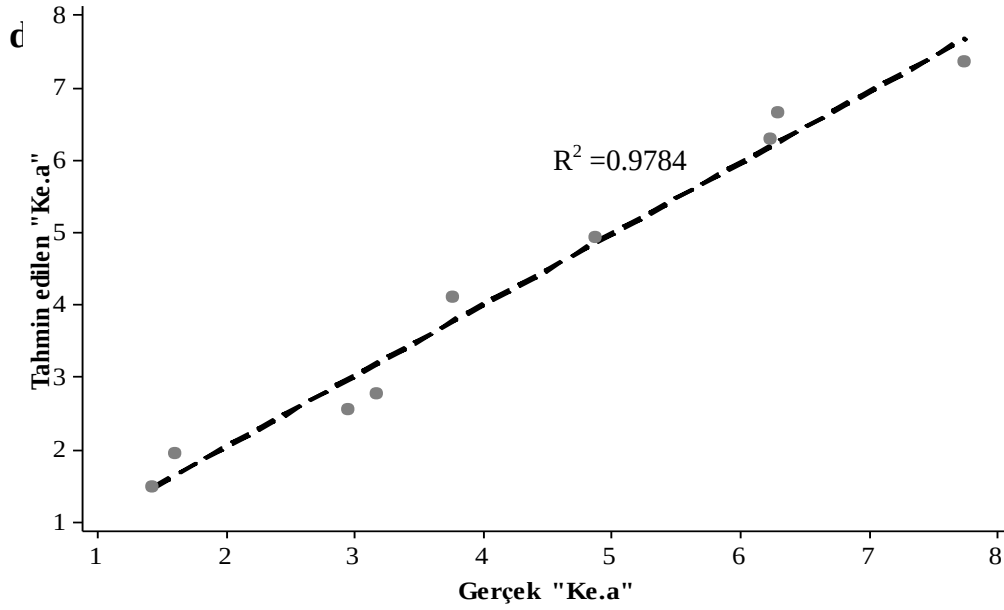
şeklinde elde edilir. Tablo 8.3’de modellere ait korelasyon katsayıları elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yeniden katılan tabaka kalınlığı ($YKTK$), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısı ($Ke.a$) değerleri Tablo 8.4’de verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.2’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir.

Tablo 8.4. PAK sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler

Deney numarası	Y. katılan tabaka kalınlığı		Yüzey pürüzlülüğü		Kerf genişliği		Kerf eğim açısı	
	Gerçek YKTK	Tahmin edilen YKTK	Gerçek Ra	Tahmin edilen Ra	Gerçek Kü	Tahmin edilen Kü	Gerçek Ke.a	Tahmin edilen Ke.a
1	71,8	70,8444	15,49	15,3911	2,8995	2,86952	1,59192	1,93706
2	53,2	51,6778	14,00	13,9278	2,6995	2,71689	4,87023	4,92192
3	48,4	50,8778	12,35	12,5211	2,6075	2,62009	7,75196	7,35513
4	83,4	85,8778	13,53	13,7011	2,9655	2,97809	2,95395	2,55712
5	73,3	72,3444	13,10	13,0011	2,8570	2,82702	3,76507	4,11021
6	72,0	70,4778	13,16	13,0878	2,7885	2,80589	6,22925	6,28093
7	93,7	92,1778	13,04	12,9678	3,1134	3,13079	1,42641	1,47809
8	75,1	77,5778	13,59	13,7611	3,0428	3,05539	3,16551	2,76869
9	72,1	71,1444	11,69	11,5911	2,9870	2,95702	6,28852	6,63367







Şekil 8.2. PAK’ de elde edilen deneysel ve teorik
a: yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (R_a),
c: kerf genişliği ($Kü$), d: kerf eğim açılarının ($Ke.a$) karşılaştırılması

8.3. Tel Erozyon İle Kesme Yönteminin Lineer Regresyon Yöntemi ile Modellenmesi

Tel erozyon ile kesme yönteminde yeniden katılaşan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve kerf genişliği ($Kü$) kontrol parametreleri olan; akım şiddeti (IP), Puls süresi (T_{on}) ve sıvı sirkülasyon basıncı (Ps) bağlı olarak regresyon modelleri:

$$\text{Yeniden katılaşan tabaka kalınlığı} \quad YKTK = a_0 + a_1 \cdot IP + a_2 \cdot T_{on} - a_3 \cdot Ps \quad (8.9)$$

$$\text{Yüzey pürüzlülüğü} \quad Ra = a_0 + a_1 \cdot IP + a_2 \cdot T_{on} + a_3 \cdot Ps \quad (8.10)$$

$$\text{Kerf genişliği} \quad Kü = a_0 + a_1 \cdot IP + a_2 \cdot T_{on} - a_3 \cdot Ps \quad (8.11)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Elde edilen regresyon ve korelasyon katsayıları Tablo 8.5’ de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 8.5. Tel erozyon ile kesme yönteminde elde edilen matematiksel modellere ait regresyon ve korelasyon katsayıları

	Regresyon katsayıları				Korelasyon katsayısı (r)
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Y. katılaşan tabaka kal	2,18	0,0450	0,0200	0,00140	98,1%
Yüzey pürüzlülüğü	0,307	0,172	0,0642	0,0130	97,8%
Kerf genişliği	0,278	0,00508	0,00450	0,000325	95,9%

Bu katsayılar, denklemlerde yerine konulduğunda yeniden katılacak tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) ve kerf genişliği (*Kü*) ait matematiksel modeller:

$$YKTK = 2,18 + 0,0450 \cdot IP + 0,0200 \cdot T_{on} - 0,00140 \cdot Ps \quad (8.13)$$

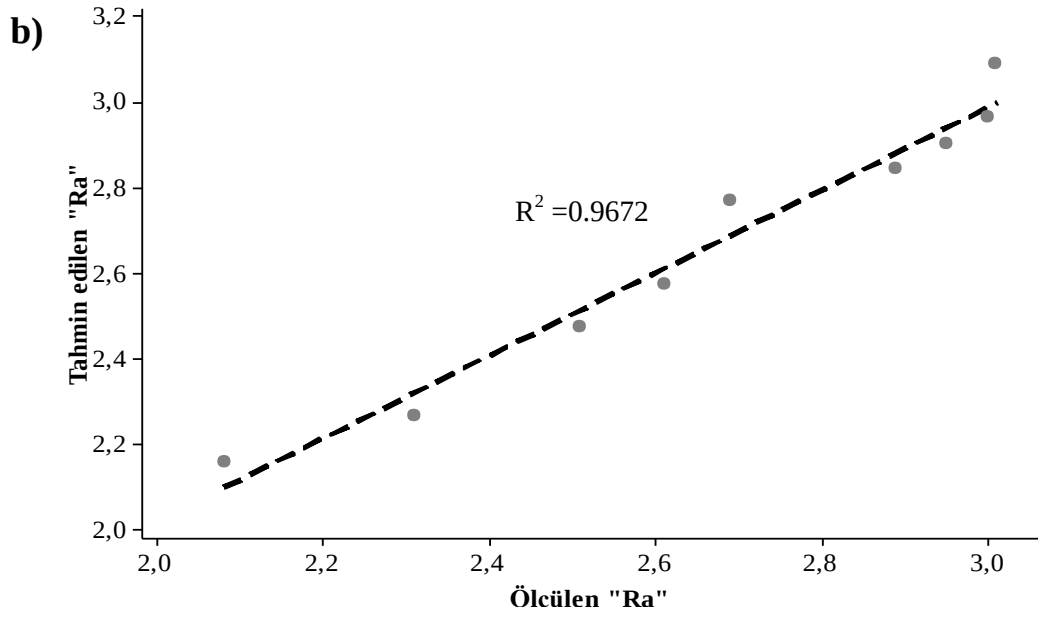
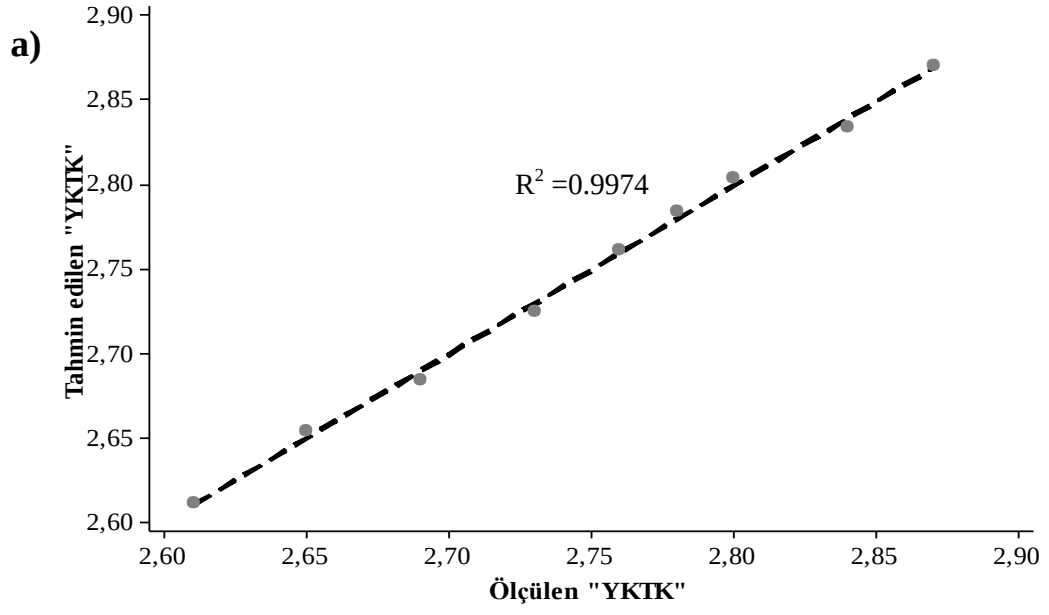
$$Ra = 0,307 + 0,172 \cdot IP + 0,0642 \cdot T_{on} + 0,0130 \cdot Ps \quad (8.14)$$

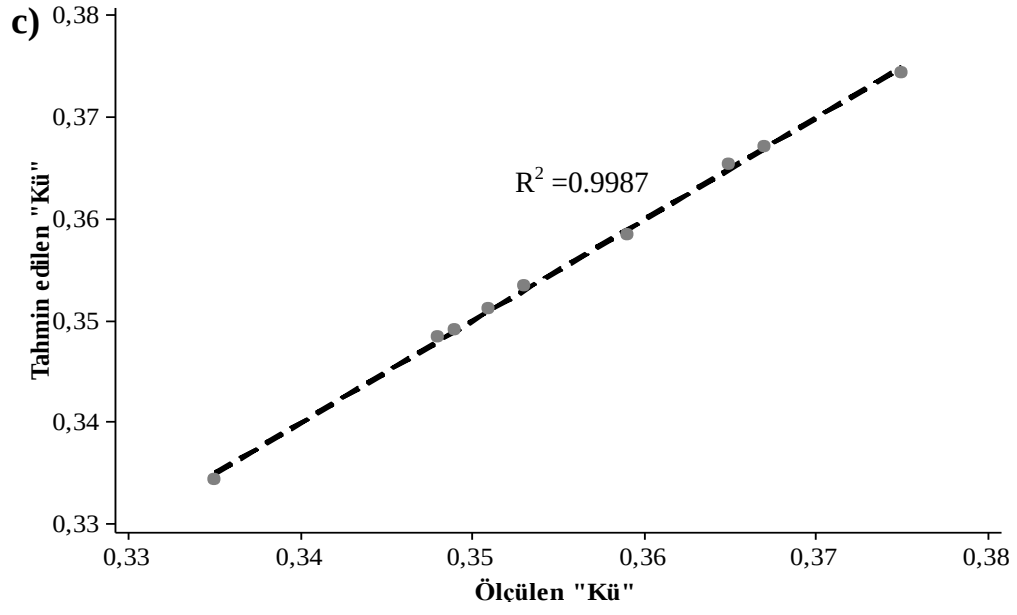
$$Kü = 0,278 + 0,00508 \cdot IP + 0,00450 \cdot T_{on} - 0,000325 \cdot Ps \quad (8.15)$$

şeklinde elde edilir. Tablo 8.5’da modellere ait korelasyon katsayıları elde edilen modellerin oldukça uygun olduklarını göstermektedir. Deneysel değerler ve elde edilen matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen yeniden katılacak tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) ve kerf genişliği (*Kü*) değerleri Tablo 8.6’da verilmiştir. Bu değerlere ait grafikler ise sırasıyla Şekil 8.3’de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal değerler regresyon çizgisine oldukça yakın dağılımlar göstermektedir.

Tablo 8.6. Tel erozyon ile kesme sonrası elde edilen gerçek ve matematiksel modeller kullanılarak tahmin edilen değerler

Deney numarası	Y. katılacak tabaka kalınlığı		Yüzey pürüzlülüğü		Kerf genişliği	
	Gerçek <i>YKTK</i>	Tahmin edilen <i>YKTK</i>	Gerçek <i>Ra</i>	Tahmin edilen <i>Ra</i>	Gerçek <i>Kü</i>	Tahmin edilen <i>Kü</i>
1	2,61	2,61111	2,08	2,15889	0,335	0,334444
2	2,65	2,65444	2,31	2,26556	0,348	0,348444
3	2,69	2,68444	2,51	2,47556	0,351	0,351111
4	2,73	2,72444	2,61	2,57556	0,349	0,349111
5	2,76	2,76111	2,69	2,76889	0,359	0,358444
6	2,80	2,80444	2,89	2,84556	0,365	0,365444
7	2,78	2,78444	2,95	2,90556	0,353	0,353444
8	2,84	2,83444	3,00	2,96556	0,367	0,367111
9	2,87	2,87111	3,01	3,08889	0,375	0,374444





Şekil 8.3. Tel erozyon ile kesme de elde edilen deneysel ve teorik
a: yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK), b: yüzey pürüzlülüğü (Ra),
c: kerf genişliği ($Kü$) karşılaştırılması

9. ÇOKLU PERFORMANS ANALİZİ

Gri İlişkisel Analiz, Gri Teori ana başlığı altında literatürde yerini almış bir derecelendirme, sınıflandırma ve karar verme tekniğidir [152]. Gri teori ilk defa 1982 yılında Tayland'da ki Hua Chung Bilim ve Teknoloji Üniversite'si öğretim üyelerinden olan Profesör Julong Deng tarafından ortaya atılmıştır. Gri teori gri ilişkisel analiz, gri modelleme, gri tahmin ve gri karar verme gibi alt başlıklar altında farklı alanlarda uygulanmaktadır [153]. Gri İlişkisel Analizi'nde; siyah, bilgiye sahip olmadığını, beyaz, bilgiye tamamen sahip olduğunu gösterir. Gri sistem ise, siyah ile beyaz arasındaki bilginin seviyesini gösterir. Diğer bir deyişle gri sistemde bazı bilgiler bilinirken bazı bilgiler bilinmez. Beyaz sistemde, sistem içerisindeki ilişkiler arası faktörler kesindir. Gri sistemde ise sistem içerisindeki ilişkiler arası faktörler kesin değildir.[154]. Gri ilişkisel analiz (GİA) gri modellemenin alt başlıklarından biridir. GİA gri bir sistemdeki her bir faktör ile kıyas yapılan faktör (referans serisi) serisi arasındaki ilişki derecesini belirlemeye yarayan bir metottur. Her bir faktör bir dizi (satır veya sütun) olarak tanımlanır. Faktörler arası etki derecesi ise gri ilişkisel derece olarak isimlendirilir [153].

Gri ilişkisel derecenin belirlenmesi için gerekli olan matematiksel temelli hesaplama adımları aşağıdaki biçimde tanımlanabilir :

1. Adım: n uzunluğundaki referans seri aşağıdaki gibi olsun (Eşitlik 1).

$$x_0 = \langle x_0, x_0, x_0, \dots, x_0 \rangle \quad (1)$$

2. Adım: Verilerin normalize edilmesi

Faktörlerin farklı kaynaklardan geldiği, farklı birimlerde ölçüldüğü düşünüldüğünde GİA' nın ilk adımı verilerin aynı birime dönüştürülmesidir. Ayrıca serinin çok geniş aralıklarda değerler aldığı durumlarda standartlaştırmayla verilerin küçük bir aralığa çekilmesinde de fayda vardır. Gri sistem teorisinde bu normalleştirme projesine “gri ilişkisel oluşum (grey relational generating)” adı verilmektedir. Verilerin normalizasyonunda en sık kullanılan yöntemlerden birisi lineer veri önileme metodudur. Faktör serilerinin normalizasyonunda dikkat edilmesi gereken “ daha yüksek daha iyi”, “daha düşük daha iyi” ve “en ideal en iyi” kriterlerinden hangisinin serinin özelliğini yansıtır. Örneğin serideki noktaların küçük değerler olması istenen bir özellik ise lineer normalizasyonda küçük değer alan noktalar normalizasyonda “1” e yakın değerler alırken, büyük değer alan noktalar “0” ‘a yakın değerler alacaktır.

“Daha yüksek daha iyi” , “Daha düşük daha iyi”, “İdeal değer daha iyi” durumunda normalizasyonlar sırasıyla Eşitlik 2-4’deki gibidir.

$$\text{“Daha yüksek daha iyi”} \quad x_i \leftarrow \frac{x_i^0 \leftarrow \min x_i^0 \leftarrow}{\max x_i^0 \leftarrow \min x_i^0 \leftarrow} \quad (2)$$

$$\text{“Daha düşük daha iyi”} \quad x_i \leftarrow \frac{\max x_i^0 \leftarrow x_i^0 \leftarrow}{\max x_i^0 \leftarrow \min x_i^0 \leftarrow} \quad (3)$$

$$\text{“İdeal değer daha iyi”} \quad x_i \leftarrow 1 - \frac{|x_i^0 \leftarrow x^0|}{\max x_i^0 \leftarrow x^0} \quad (4)$$

Burada $x_i^0 \leftarrow$, i serisi k. sıradaki orijinal değer, $x_i \leftarrow$, normalizasyon sonrası i. seri k. sıradaki değer, $\min x_i^0 \leftarrow$, i serisindeki minimum değer, $\max x_i^0 \leftarrow$, i serisindeki maksimum değer, x^0 ise istenilen ideal değeri göstermektedir.

3. Adım: x_0 serisi ile karşılaştırılacak m tane seri Eşitlik 5’te tanımlanmış olsun.

$$x_i = \leftarrow x_i \leftarrow x_i \leftarrow \dots x_i \leftarrow i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

4. Adım: k, n uzunluğundaki serideki k. sırayı gösterebilir. $\varepsilon \leftarrow x_i \leftarrow$, k. noktadaki gri ilişkisel katsayı olup eşitlik 6, 7, 8 ve 9’a göre hesaplanır.

$$\varepsilon \leftarrow x_i \leftarrow = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i} \leftarrow \xi \Delta_{\max}} \quad (6)$$

$$\Delta_{0i} \leftarrow |x_0 \leftarrow x_j \leftarrow| \quad (7)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_k |x_0 \leftarrow x_j \leftarrow| \quad (8)$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_0 \leftarrow x_j \leftarrow| \quad (9)$$

Burada $\xi \in [0, 1]$ arasında bir katsayıdır. $j = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, n$. ξ işlevi, Δ_{0i} ile $\Delta_{\max}$ arasındaki farkı ayarlamaktadır. Çalışmalar ξ değerinin gri ilişkisel derece sonrası oluşacak sıralamayı etkilemediğini göstermektedir.

5. Adım: Son olarak gri ilişkisel derece ise eşitlik 10 ile hesaplanır:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0, x_i) \quad (10)$$

$\gamma(x_0, x_i)$ gri bir sistemdeki x_i serisi ile x_0 referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsüdür.. Gri ilişkisel derecesinin büyüklüğü x_i ile x_0 arasında kuvvetli bir ilişki olduğunun göstergesidir. Eğer karşılaştırılan iki seri birbirinin aynı ise gri ilişkisel derece değeri 1 olarak bulunur. Gri ilişkisel derece karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir. Karar verme probleminde referans seri, kriterlerin alması istenen en büyük, en küçük ve en ideal değerler olarak seçilirse, karşılaştırması yapılacak faktör serinin referans seriye göre hesaplanacak gri ilişkisel derecesi kriterleri yakalama seviyesinin bir göstergesi olacaktır. Diğer bir deyişle gri ilişkisel derecesi en yüksek olan faktör serisi (alternatif) karar verme probleminde en iyi karar verme alternatifini gösterecektir [152-154].

9.1. Lazer Işını ile Kesme Deneylerinin Çoklu Performans Analizi

Lazer ışıını ile kesme deneylerinde Tablo 9.1’ de verilen faktör ve seviyeler kullanılmıştır. Deneyler sonunda, yapılan ölçümlerden elde edilen, yeniden katılan tabaka kalınlığı ($YKTK$), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği ($Kü$) ve kerf eğim açısı ($Ke.a$) değerleri Tablo 9.2’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 9.1. Lazer ışıını ile kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Lazer Gücü (W)	3200	3600	4000
B	Kesme Hızı (mm/dak)	1500	1700	1850
C	Y. Gaz basıncı (Bar)	15	17	19

Tablo 9.2. Lazer ışını ile kesme işleminde L₉ ortogonal deney dizini ve deney sonuçları

Deney No	A	B	C	Yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	Kerf genişliği (Kü)	kerf eğim açısının (Ke.a)
1	3200	1500	15	37,2	3,43	0,4927	0,524
2	3200	1700	17	32,8	3,08	0,4988	0,546
3	3200	1850	19	30,2	2,80	0,4780	0,562
4	3600	1500	17	37,3	3,20	0,5262	0,520
5	3600	1700	19	35,5	3,11	0,5104	0,540
6	3600	1850	15	34,6	3,02	0,4893	0,760
7	4000	1500	19	42,4	3,10	0,5576	0,520
8	4000	1700	15	41,7	3,25	0,5198	0,742
9	4000	1850	17	40,3	2,75	0,5010	0,756

Lazer ışını ile kesme sonrasında kesme kalitesinin belirlenmesinde göz önünde tutulan, yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) değerlerinin minimum olması kesme kalitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Böylece GİA yöntemine göre referans serisi oluşturulurken minimum değerler göz önüne alınır ve normalizasyon işlemi esnasında “daha düşük daha iyi” şeklinde değerlendirilir. 1. deneydeki YKTK değeri için normalizasyon işlemi yapacak olursak aşağıdaki değer elde edilir.

$$x_{YKTK} = \frac{\max x_{YKTK} - x_{YKTK}}{\max x_{YKTK} - \min x_{YKTK}} = \frac{42,4 - 37,2}{42,4 - 30,2} = 0,4262 \text{ olur.}$$

Bütün ölçüm sonuçlarının normalize edilmiş hali Tablo 9.3’de verilmiştir.

Tablo 9.3. Lazer ışını ile kesme işlemi için normalizasyon değerleri

Deney No	YKTK	Ra	Kü	Ke.a
1	0,4262	0,0000	0,8153	0,9833
2	0,7869	0,5147	0,7387	0,8917
3	1,0000	0,9265	1,0000	0,8250
4	0,4180	0,3382	0,3945	1,0000
5	0,5656	0,4706	0,5930	0,9167
6	0,6393	0,6029	0,8580	0,0000
7	0,0000	0,4853	0,0000	1,0000
8	0,0574	0,2647	0,4749	0,0750
9	0,1721	1,0000	0,7111	0,0167

Normalize edilen sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi elde edilmiş olur.

$$\Delta_{YKTK} = |x_0 - x_j| = |1 - 0,4262| = 0,5738 \text{ bulunur.}$$

Bütün deneyler için hesaplanan uzaklık matrisi sonuçları Tablo 9.4’ de verilmiştir. Katsayı matrisi hesabı için $\xi = 0,5$ orta değeri alınır. 1. deneyin YKTK sonuçları için katsayı matrisini hesaplayacak olursak;

$$\varepsilon_{YKTK} = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i} + \xi \Delta_{\max}} = \frac{0 + 0,5 \times 1}{0,5738 + 0,5 \times 1} = 0,4656 \text{ olur.}$$

Katsayı matrisleri hesaplandıktan sonra, formül 10’a göre “Gri İlişkisel Dereceleri” bulunur.

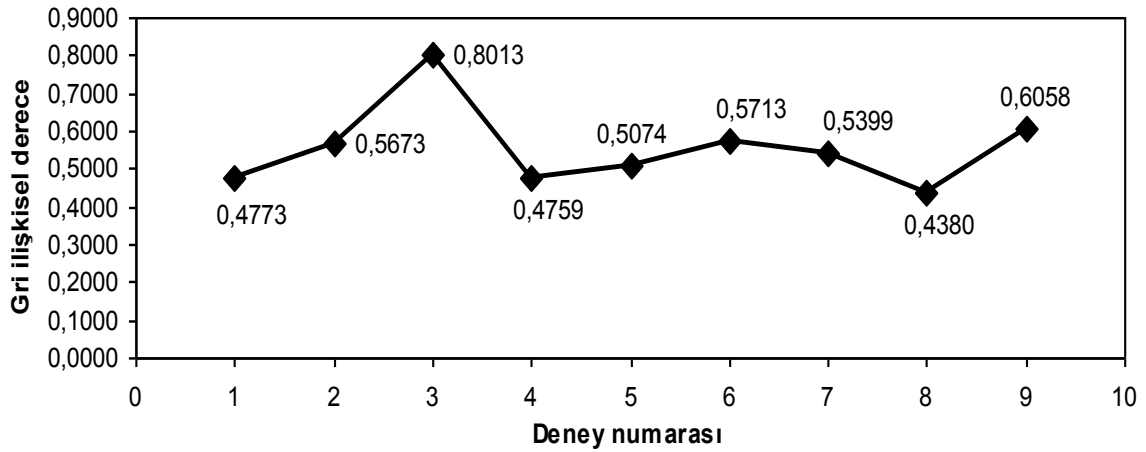
Tablo 9.4. Lazer ışını ile kesme işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi

Deney No	YKTK	Ra	Kü	Ke.a
1	0,5738	1,0000	0,1847	0,0167
2	0,2131	0,4853	0,2613	0,1083
3	0,0000	0,0735	0,0000	0,1750
4	0,5820	0,6618	0,6055	0,0000
5	0,4344	0,5294	0,4070	0,0833
6	0,3607	0,3971	0,1420	1,0000
7	1,0000	0,5147	1,0000	0,0000
8	0,9426	0,7353	0,5251	0,9250
9	0,8279	0,0000	0,2889	0,9833

Yapılan işlemlerin sonuçlarına göre, Tablo 9.5’de ve Şekil 9.1’de de açıkça görüldüğü gibi Gri İlişkisel Derecelerinde en yüksek (optimum) değer 3 nolu deneyden elde edilmiştir. Çıkan sonuçlara göre en yüksek olan değer en ideal değer olarak tanımlanır. Böylece minimum yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) değerleri elde etmek için kullanılacak en ideal kesme parametrelerine ait seviyeler 3 numaralı deneyde kullanılan kesme şartlarında görülmektedir.

Tablo 9.5. Lazer kesme işleminde L₉ deney dizini için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceler ve tavsiye edilen sıralama

Deney No	Gri İlişkisel Katsayı				Gri ilişkisel derece	Gri ilişkisel analize Göre en iyi sıralama
	YKTK	Ra	Kü	Ke.a		
1	0,4656	0,3333	0,7303	0,3801	0,4773	7
2	0,7011	0,5075	0,6568	0,4037	0,5673	4
3	1,0000	0,8718	1,0000	0,3333	0,8013	1
4	0,4621	0,4304	0,4523	0,5590	0,4759	8
5	0,5351	0,4857	0,5512	0,4575	0,5074	6
6	0,5810	0,5574	0,7789	0,3682	0,5713	3
7	0,3333	0,4928	0,3333	1,0000	0,5399	5
8	0,3466	0,4048	0,4877	0,5129	0,4380	9
9	0,3765	1,0000	0,6338	0,4129	0,6058	2



Şekil 9.1. Deney sonuçlarına göre gri ilişkisel derecenin değişimi

9.2. PAK Deneylerinin Çoklu Performans Analizi

PAK deneylerinde Tablo 9.6' da verilen faktör ve seviyeler kullanılmıştır. Deneyler sonunda, yapılan ölçümlerden elde edilen, yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) değerleri Tablo 9.7'de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 9.6. Lazer ışını ile kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Akım Şiddeti (A)	40	45	50
B	Kesme Hızı (mm/dak)	650	800	950
C	Y. Gaz basıncı (Bar)	13	15	17

Tablo 9.7. PAK işleminde L₉ ortogonal deney dizini ve deney sonuçları

Deney No	A	B	C	Yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)	Kerf genişliği (Kü)	Kerf eğim açısının (Ke.a)
1	40	650	13	71,8	15,49	2,8995	1,59192
2	40	800	15	53,2	14,00	2,6995	4,87023
3	40	950	17	48,4	12,35	2,6075	7,75196
4	45	650	15	83,4	13,53	2,9655	2,95395
5	45	800	17	73,3	13,10	2,8570	3,76507
6	45	950	13	72,0	13,16	2,7885	6,22925
7	50	650	17	93,7	13,04	3,1134	1,42641
8	50	800	13	75,1	13,59	3,0428	3,16551
9	50	950	15	72,1	11,69	2,9870	6,28852

PAK kalitesini belirleyen, yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) değerlerinin az olması kesme kalitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı GİA yöntemine göre referans serisi oluşturulurken minimum değerler göz önüne alınarak ve normalizasyon işlemi esnasında “daha düşük daha iyi” şeklinde değerlendirilerek, 3 nolu eşitlik yardımıyla Tablo 9.8’ deki normalizasyon değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 9.8. PAK işlemi için normalizasyon değerleri

Deney No	YKTK	Ra	Kü	Ke.a
1	0,4834	0,0000	0,4228	0,9738
2	0,8940	0,3921	0,8181	0,4556
3	1,0000	0,8263	1,0000	0,0000
4	0,2274	0,5158	0,2924	0,7585
5	0,4503	0,6289	0,5068	0,6303
6	0,4790	0,6132	0,6422	0,2407
7	0,0000	0,6447	0,0000	1,0000
8	0,4106	0,5000	0,1396	0,7251
9	0,4768	1,0000	0,2499	0,2314

Normalize edilen sonuçlar referans serisinden çıkarılarak (7 nolu eşitlik) katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi değerleri hesaplanmıştır (Tablo 9.9).

Tablo 9.9. PAK işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi

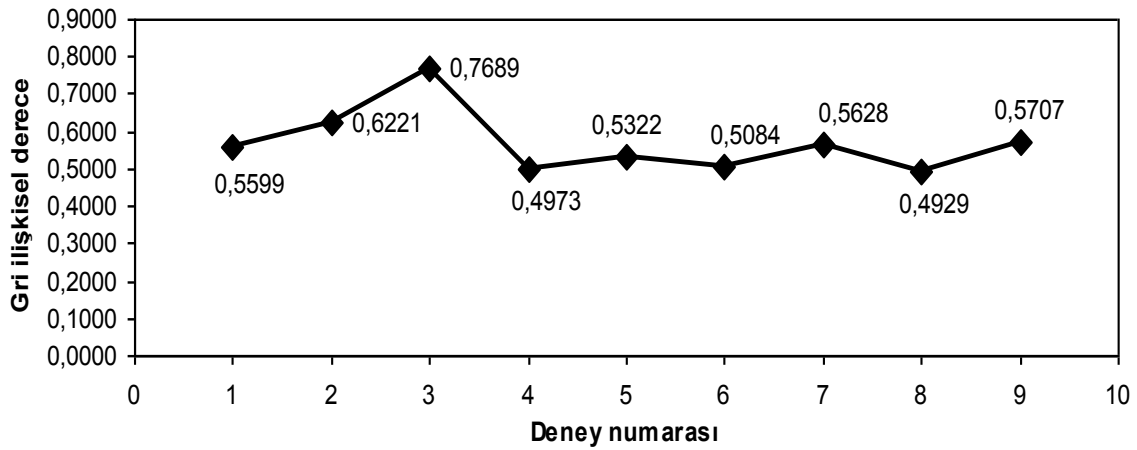
Deney No	YKTK	Ra	Kü	Ke.a
1	0,5166	1,0000	0,5772	0,0262
2	0,1060	0,6079	0,1819	0,5444
3	0,0000	0,1737	0,0000	1,0000
4	0,7726	0,4842	0,7076	0,2415
5	0,5497	0,3711	0,4932	0,3697
6	0,5210	0,3868	0,3578	0,7593
7	1,0000	0,3553	1,0000	0,0000
8	0,5894	0,5000	0,8604	0,2749
9	0,5232	0,0000	0,7501	0,7686

Bütün deneyler için elde edilen uzaklık matrisleri kullanılarak Tablo 9.10’ da verilen katsayı matrisleri hesaplanarak gri ilişkisel dereceleri belirlenmiştir.

Tablo 9.10. PAK işleminde L₉ deney dizini için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceler ve tavsiye edilen sıralama

Deney No	Gri İlişkisel Katsayı				Gri ilişkisel derece	Gri ilişkisel analize Göre en iyi sıralama
	YKTK	Ra	Kü	Ke.a		
1	0,4919	0,3333	0,4642	0,9503	0,5599	5
2	0,8251	0,4513	0,7333	0,4787	0,6221	2
3	1,0000	0,7422	1,0000	0,3333	0,7689	1
4	0,3929	0,5080	0,4140	0,6743	0,4973	8
5	0,4763	0,5740	0,5034	0,5749	0,5322	6
6	0,4897	0,5638	0,5829	0,3971	0,5084	7
7	0,3333	0,5846	0,3333	1,0000	0,5628	4
8	0,4590	0,5000	0,3675	0,6452	0,4929	9
9	0,4887	1,0000	0,4000	0,3941	0,5707	3

Şekil 9.2’ de PAK işleminde her bir deney için gri ilişkisel dereceleri gösteren grafik verilmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü gibi Gri İlişkisel Derecelerinde en yüksek (optimum) değer 3 nolu deneyden elde edilmiştir. Böylece minimum yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kerf genişliği (Kü) ve kerf eğim açısı (Ke.a) değerleri elde etmek için kullanılacak en ideal kesme parametrelerine ait seviyeler 3 numaralı deneyde kullanılan kesme şartlarında görülmektedir.



Şekil 9.2. Deney sonuçlarına göre gri ilişkisel derecenin değişimi

9.3. Tel Erozyon İle Kesme Deneylerinin Çoklu Performans Analizi

Tel erozyon ile kesme deneylerinde Tablo 9.11’ de verilen faktör ve seviyeler kullanılmıştır. Deneyler sonunda, yapılan ölçümlerden elde edilen, yeniden katılan tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*), kerf genişliği (*Kü*) ve kerf eğim açısı (*Ke.a*) değerleri Tablo 9.12’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 9.11. Tel erozyon ile kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	İşlem parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Akım Şiddeti (<i>A</i>)	8	10	12
B	Vurum Süresi (μ s)	5	7	9
C	Sıvı Sirkülasyon Basıncı (kg/cm^2)	13	15	18

Tablo 9.12. Tel erozyon ile kesme işleminde L_9 ortogonal deney dizini ve deney sonuçları

Deney No	A	B	C	Yeniden katılan tabaka kalınlığı (<i>YKTK</i>)	Yüzey pürüzlülüğü (<i>Ra</i>)	Kerf genişliği (<i>Kü</i>)
1	8	5	13	2,61	2,08	0,335
2	8	7	15	2,65	2,31	0,348
3	8	9	18	2,69	2,51	0,351
4	10	5	15	2,73	2,61	0,349
5	10	7	18	2,76	2,69	0,359
6	10	9	13	2,80	2,89	0,365
7	12	5	18	2,78	2,95	0,353
8	12	7	13	2,84	3,00	0,367
9	12	9	15	2,87	3,01	0,375

Tel erozyon ile kesme sonrası kesme kalitesini belirleyen, yeniden katılaşılan tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*) ve kerf genişliği (*Kü*) değerlerinin az olması kesme kalitesinin daha iyi olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı GİA yöntemine göre referans serisi oluşturulurken minimum değerler göz önüne alınarak ve normalizasyon işlemi esnasında “daha düşük daha iyi” şeklinde değerlendirilerek Tablo 9.13 deki normalizasyon değerleri hesaplanmıştır. Normalize edilen sonuçlar referans serisinden çıkarılarak katsayı matrisi için gerekli olan uzaklık matrisi değerleri hesaplanmıştır (Tablo 9.14).

Tablo 9.13. Tel erozyon ile kesme işlemi için normalizasyon değerleri

Deney No	<i>YKTK</i>	<i>Ra</i>	<i>Kü</i>
1	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,8462	0,7527	0,6750
3	0,6923	0,5376	0,6000
4	0,5385	0,4301	0,6500
5	0,4231	0,3441	0,4000
6	0,2692	0,1290	0,2500
7	0,3462	0,0645	0,5500
8	0,1154	0,0108	0,2000
9	0,0000	0,0000	0,0000

Tablo 9.14. Tel erozyon ile kesme işlemi için gri ilişkisel uzaklık matrisi

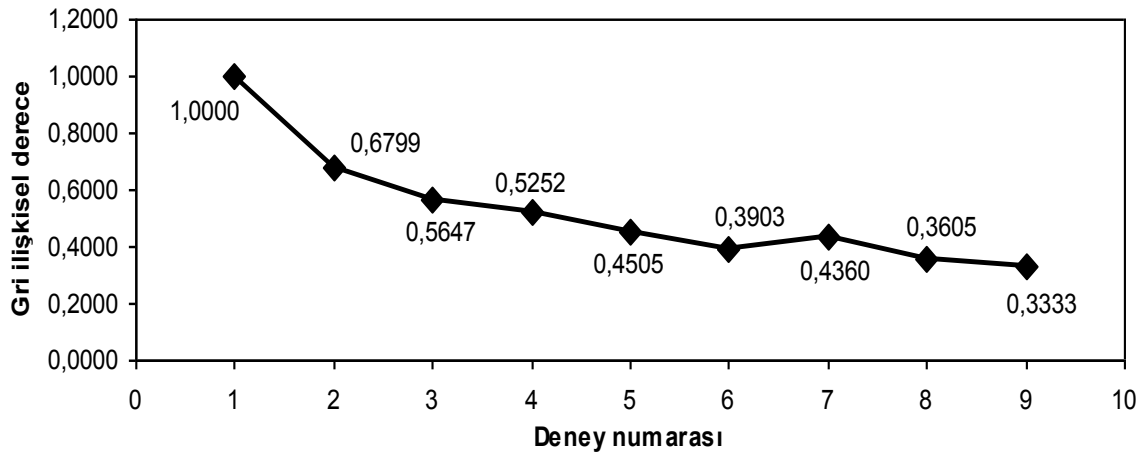
Deney No	<i>YKTK</i>	<i>Ra</i>	<i>Kü</i>
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,1538	0,2473	0,3250
3	0,3077	0,4624	0,4000
4	0,4615	0,5699	0,3500
5	0,5769	0,6559	0,6000
6	0,7308	0,8710	0,7500
7	0,6538	0,9355	0,4500
8	0,8846	0,9892	0,8000
9	1,0000	1,0000	1,0000

Bütün deneyler için elde edilen uzaklık matrisleri kullanılarak Tablo 9.15’ de verilen katsayı matrisleri hesaplanarak gri ilişkisel dereceleri belirlenmiştir.

Tablo 9.15. Tel erozyon ile kesme işleminde L₉ deney dizini için gri ilişkisel katsayılar, gri ilişkisel dereceleri ve tavsiye edilen sıralama

Deney No	Gri İlişkisel Katsayı			Gri ilişkisel derece	Gri ilişkisel analize Göre en iyi sıralama
	YKTK	Ra	Kü		
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1
2	0,7647	0,6691	0,6061	0,6799	2
3	0,6190	0,5196	0,5556	0,5647	3
4	0,5200	0,4673	0,5882	0,5252	4
5	0,4643	0,4326	0,4545	0,4505	5
6	0,4063	0,3647	0,4000	0,3903	7
7	0,4333	0,3483	0,5263	0,4360	6
8	0,3611	0,3357	0,3846	0,3605	8
9	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	9

Şekil 9.3’ de Tel erozyon ile kesme işleminde her bir deney için gri ilişkisel dereceleri gösteren grafik verilmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü gibi Gri İlişkisel Derecelerinde en yüksek (optimum) değer 1 nolu deneyden elde edilmiştir. Böylece minimum yeniden katılacak tabaka kalınlığı (YKTK), yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kerf genişliği (Kü) değerleri elde etmek için kullanılacak en ideal kesme parametrelerine ait seviyeler 1 numaralı deneyde kullanılan kesme şartlarında görülmektedir.



Şekil 9.3. Deney sonuçlarına göre gri ilişkisel derecenin değişimi

10. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

10.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşıma, farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinde iki ayrı çökelme sertleştirilmesi ısıtıl işlemi uygulanmış, elde edilen üç farklı gruptaki malzemeler lazer ışını, plazma arkı ve tel erozyon yöntemleri ile kesilmiştir. Yapılan araştırma ve incelemelerde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- ❖ Inconel 718 alaşımının termal kesme yöntemleri ile kesilmesinde, yüzey ve yüzey altı hasarların meydana geldiği metalografik incelemeler neticesinde tespit edilmiştir. Her üç işleme yöntemine ait yüzey fotoğraflarından da görüldüğü gibi bu hasarlar; yüzeyden kaldırılan eriyik metalin kesme bölgesinden tamamen uzaklaştırılmadan tekrar katılaşması neticesinde yüzeye yapışması ile oluşan kalıntılardan, boşluklardan, ani ısınma soğumanın etkisiyle oluşan çatlaklardan ve kraterlerden oluşmaktadır.
- ❖ Lazer ışını ile kesilmiş yüzeylerin kesitleri incelendiğinde, yeniden katılaşan tabak, ısıdan etkilenen bölge ve esas malzeme olmak üzere üç farklı tabakanın oluştuğu görülmüştür. Yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı özellikle lazer gücüne bağlı olarak önemli derecede artmakta, aynı zamanda, kesme hızının artmasıyla azalmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda en düşük yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, lazer gücünün en düşük (3200 W), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu (1850 mm/dk, 19 Bar) 3 nolu deney şartlarında elde edilmiştir.
- ❖ Lazer ışını ile kesme işleminde, yüzey pürüzlülüğünün güç ve kesme hızına bağlı olarak değiştiği, özellikle kesme hızının daha belirleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri deney şartlarına bağlı olarak değişirken, en düşük yüzey pürüzlülüğü; gücün ve kesme hızının en yüksek olduğu 9 nolu deney şartlarında elde edilmiştir. Lazer gücünün ve gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumlarda, pürüzlülüğün arttığı izlenirken, kesme hızının artmasıyla pürüzlülüğün iyileştiği tespit edilmiştir.
- ❖ Ortalama kerf genişliği, gücün artması ve kesme hızının düşmesi ile önemli derecede artmaktadır. Bu sonuç, gücün artmasıyla meydana gelen yüksek sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzemenin eritilerek, gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme kaldırılması ile ilişkilendirilmektedir. Diğer taraftan, sabit güç yoğunluğunda oluşan ısının, düşük kesme ilerlemesi ile malzeme yüzeyinde daha yoğun olması sonucunda daha fazla hacimde malzemenin

ergimesiyle kerf genişliği artmaktadır. Lazer ışını ile kesme deneyleri sonucunda, 0,4536 mm olarak ölçülen en düşük kerf genişliği, lazer gücünün en düşük (3200 W), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu(1850 mm/dk, 19 Bar) 3 nolu deney şartlarında elde edilmiştir.

- ❖ Kesme hızının kerf eğim açısı üzerinde büyük etkisinin olduğu saptanmıştır. Lazer ışınının yoğunluğunun, yüksek kesme hızlarında daha da azalması neticesinde parçanın alt kısımlarına doğru ergitilen malzeme miktarı düşer ve üst kerf genişliğiyle alt kerf genişliği arasında fark oluşur. Ayrıca, kesme hızının düşük, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek olduğu durumda kerf eğim açısı önemli derecede düşmektedir.
- ❖ Lazer ışını ile kesme yönteminde, varyans analizi sonuçlarına göre, kesme hızının; yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve kerf eğim açısı üzerinde istatistiksel olarak güç parametresinden daha etkili olduğu, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı üzerinde ise güç parametresinin daha etkili olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Plazma arkı ile kesme işleminde, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, sabit akım şiddeti şartlarında, kesme hızının artışı ile önemli derecede düşmüştür. Düşük kesme hızı, kesme bölgesinde daha aşırı enerji girişine neden olduğundan dolayı, kesme kanalının daha geniş ve ısıdan etkilene bölgenin daha derin olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, akımın artmasıyla, yüzey sıcaklığı malzemenin erime sıcaklığına daha düzenli bir şekilde ulaşmakta ve daha fazla malzeme ergitilmektedir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı artmaktadır.
- ❖ Plazma arkı ile kesme deneyleri sonucunda, kesme hızının ve akım şiddetinin pürüzlülük üzerinde büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Sabit akım şiddetinde, ilerlemenin 650'den 950 mm/dk' ya yükselmesi ve gaz basıncının artmasıyla pürüzlülük değerinin düzenli bir şekilde düştüğü görülmüştür.
- ❖ Kerf genişliğini minimum seviyede tutabilmek için işlem parametrelerinden, kesme hızı ve ısıyı oluşturan güç kaynağının büyük bir önem taşıdığı deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Kerf genişliği, sabit akım şiddetinde, kesme hızının artmasıyla önemli derecede düşerken, akım şiddetinin artmasıyla kerf genişliği artmıştır. Plazma arkı ile kesme deneylerinde, akım şiddetinin en düşük (40 A), kesme hızının ve gaz basıncının en yüksek olduğu(950 mm/dk, 17 Bar) 3 nolu deney şartlarında elde edilirken; en yüksek kerf genişliği ise, akım şiddetinin ve gaz

basıncının en yüksek (50 A, 17 Bar), kesme hızının en düşük olduğu (650 mm/dk,) 7 nolu deney şartlarında elde edilmiştir.

- ❖ Kerf genişliği ve kerf eğim açısı üzerinde kesme hızının önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Kerf eğim açısı; akım şiddetinin sabit, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla önemli derecede artmaktadır. Aynı zamanda, ilerlemenin düşük, akımın yüksek olduğu durumda da kerf eğim açısının düştüğü tespit edilmiştir.
- ❖ Plazma arkı ile kesme yönteminde, varyans analizi sonuçlarına göre, kesme hızının; yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve kerf eğim açısı üzerinde istatistiksel olarak akım parametresinden daha etkili olduğu, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı üzerinde ise akım parametresinin daha etkili olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Tel erozyon ile kesme işleminde, sıvı sirkülasyon basıncının yeniden katılaşan tabaka kalınlığı üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı, akım ve vurum süresinin ise büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Deneyler sonucunda, en düşük yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, akım ve vurum süresinin düşük olduğu 1 nolu deney sonucunda elde edilmiştir.
- ❖ Tel erozyon ile işlemede, yüzey morfolojisi, kıvılcımların yüzeye çarpması neticesinde oluşan kraterlerin ebatlarına bağlıdır. Dolayısıyla bu yöntemdeki yüzey pürüzlülüğü uygulanan kıvılcımın şiddetini belirleyen, akım ve vurum süresinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün akım ve vurum süresinin artmasına bağlı olarak arttığı görülmüştür.
- ❖ Tel erozyonla kesme deneyleri sonucunda, akım şiddetinin ve vurum süresinin değişimine bağlı olarak kerf genişliğinin bariz bir şekilde değiştiği görülmüştür. Vurum süresinin artmasıyla, daha uzun süreli kıvılcımların yüzeye çarpmasına ve buna bağlı olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak kesme bölgesinden kaldırılan talaş miktarına bağlı olarak kerf genişliği artmaktadır. Aynı şekilde, akım şiddetinin artışına bağlı olarak kerf genişliğinde artış gözlenmiştir.
- ❖ Tel erozyon yönteminde, varyans analizi sonuçları dikkate alındığında, akım parametresinin; yüzey pürüzlülüğü, ortalama beyaz tabaka kalınlığı üzerinde istatistiksel olarak vurum süresi parametresinden daha etkili olduğu görülmüşken, kerf genişliği üzerinde vurum süresinin daha etkili olduğu saptanmıştır.

- ❖ Lazer, Plazma ve Elektro erozyon yöntemi için elde edilen lineer regresyon modelleri, korelasyon katsayıları da dikkate alındığında uygun hata oranlarında tahminler vermektedir. Bu sonuçlar da, elde edilen modellerin uygun olduklarını göstermektedir.
- ❖ Yapılan deneyler sonucunda, termal kesme işleminde malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları ile kesme kalitesi arasında bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Isıl iletkenlik ile yeniden katılan tabaka kalınlığı arasında doğru orantı varken, yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği ile ters bir orantının olduğu görülmüştür.
- ❖ Inconel 718 alaşımının lazer ile kesilmesinde, yeniden katılan tabaka kalınlığı 30,2-50,1 μm , bu değer plazmada 48,4-194 μm , tel erozyonda ise 2,61-3,21 μm aralığında dır. Yüzey pürüzlülüğü, lazer ile kesilmesinde 2,40-3,43 μm iken, plazmada 11,25-15,49 μm , tel erozyonda ise 2,03-3,01 μm olmuştur. Kerf genişliği lazerde 0,4266-0,5576 mm iken, plazmada 2,1931-3,1134 mm, tel erozyonda ise 0,313-0,375 mm olmuştur. Kerf eğim açısı ise lazerde 0,482-0,793° iken, plazmada 1,236-7,751°, tel erozyonda ise 0° olmuştur.görüldüğü gibi kesme kalitesini belirleyen kriterler açısından en kaliteli kesimin tel erozyon ile kesme işleminde sağlandığı, daha sonra lazer ışını ile kesme işleminin geldiği, en kötü kesmenin ise plazma arkı ile oluştuğu saptanmıştır.
- ❖ Termal kesme yöntemleri için yapılan çoklu performans analizi sonuçlarına göre, lazer ışını ve plazma arkı ile kesme işleminde, minimum yeniden katılan tabaka kalınlığı (*YKTK*), yüzey pürüzlülüğü (*Ra*), kerf genişliği (*Kü*) ve kerf eğim açısı (*Ke.a*) değerleri elde etmek için kullanılacak en ideal kesme parametrelerine ait seviyeler 3 numaralı deneyde kullanılan kesme şartlarında elde edilebileceği, tel erozyon ile kesme işleminde ise 1 nolu deneyde kullanılan kesme şartlarında elde edilebileceği tespit edilmiştir.

10.2. Öneriler

- ❖ Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, termal kesme sonrası Inconel 718 alaşımında oluşabilecek sıcaklık ve gerilme analizi yapılabilir.
- ❖ Termal kesme yöntemleri ile işlenmiş parçaların yorulma ve diğer mekanik özellikleri incelenebilir.
- ❖ Farklı işlem parametreleri daha geniş aralıklarda seçilerek denenebilir.

KAYNAKLAR

1. Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava. Multi-objective optimization of Nd:YAG laser cutting of nickel-based superalloy sheet using orthogonal array with principal component analysis. *Optics and Lasers in Engineering* 46 (2008) 124–132
2. Amit Sharma, Vinod Yadava , Raghavendra Rao. Optimization of kerf quality characteristics during Nd: YAG laser cutting of nickel based superalloy sheet for straight and curved cut profiles. *Optics and Lasers in Engineering* 48 (2010) 915–925
3. A. Sharman, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) 29–35.
4. E.O. Ezugwu., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) 1353–1367.
5. D. Dudzinski a, A. Devillez , A. Moufki , D. Larrouque`re , V. Zerrouki b, J. Vigneau, A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 439–456
6. P. Warburton, Problems of Machining Nickel-Based Alloys, Iron and Steel Institute, Special Report 94, 1967, pp. 151–160.
7. E.O. Ezugwu , Z.M. Wang , A.R. Machado, The machinability of nickel-based alloys: a review, *Journal of Materials Processing Technology* 86 (1999) 1–16
8. Saied Azadian, Liu-Ying Wei, Richard Warren. Delta phase precipitation in Inconel 718. *Materials Characterization* 53 (2004) 7– 16
9. M. Anderson, R. Patwa, Y. C. Shin. Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 1879–1891
10. T. Kitagawa, A. Kubo, K. Maekawa, Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel and Ti–6Al– 6V–2Sn, *Wear* 202 (1997) 142–148.
11. L. Li, N. He, M. Wang, Z.W. Wang, High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002) 127–130.
12. A. Sharman, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) 29–35.
13. N. Richards, D. Aspinwall, Use of ceramic tools for machining nickel-based alloys, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 29 (4) (1989) 575–588.
14. E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, Performance of PVD and CVD coated tools when

machining nickel-based, Inconel 718 alloy, *Progress of Cutting and Grinding*, vol. 111, 1996, pp. 102–107.

15. K. Shintani, H. Kato, T. Maeda, Y. Fujimura, A. Yamamoto, Cutting performance of CBN tools in machining of nickel-based superalloy, *J. Precis. Eng.* 58 (10) (1992) 63–68.
16. Y.S. Liao, R.H. Shiue, Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy, *Wear* 193 (1996) 16–24.
17. M. Nalbant, A. Altın , H. Gökkaya, The effect of coating material and geometry of cutting tool and cutting speed on machinability properties of Inconel 718 super alloys, *Materials and Design* 28 (2007) 1719–1724
18. Y.S. Liaoa,, H.M. Linb, J.H. Wangc, Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools, *journal of materials processing technology* 201 (2008) 460–465
19. M. Rahman, W.K.H. Seah, T.T. Teo, The machinability of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 63 (1997) 199–204.
20. A. Sharman, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, Tool life when high speed ball nose end milling Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) 29–35.
21. A. Jawaaid, S. Koksai, S. Sharif, Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 116 (2001) 2–9.
22. C. Ducros, V. Benevent, F. Sanchette, Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools, *Surface and Coatings Technology* 163-164 (2003) 681–688.
23. J.W. Nowak, Y.C. Shin, F.P. Incropera, Assessment of plasma enhanced machining for improved machinability of Inconel 718, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 119 (1997) 119–129.
24. C.E. Leshock, Kim Jin-Nam, Y.C. Shin, Plasma enhanced machining of Inconel 718: modelling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2001) 877–897.
25. T. Kitagawa, K. Maedawa, A. Kubo, Plasma hot machining for high hardness metals, *Bull. Japan Soc. of Prec. Engr.* 22 (2) (1988) 145–151
26. S.Y. Hong, I. Markus, W.C. Jeong, New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti–6Al–4V, *International Journal*

of Machine Tool Manufacture 41 (2001) 2245–2260.

27. Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, Cryogenic machining of hard-to-cut materials, *Wear* 239 (2000) 168–175.

28. Ahsan Ali Khan, Mirghani I. Ahmed, Improving tool life using cryogenic cooling, *Journal of Materials Processing Technology* 196 (2008) 149–154.

Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base,

29. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base alloy 2004. Inconel 718, alloy with coated carbide tools. *J. Mater. Process. Technol.* 153–154, 1045–1050.

30. S.W. Kim, D.W. Lee, M.C. Kang, J.S. Kim, Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials, *Journal of Processing Technology* 111 (2001) 256–260.

31. A. Kumar Dubey, V. Yadava, Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 609–628

32. N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad, S.H. Cheraghi, CO₂ laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 351–358.

33. S.-L. Chen, The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting, *Journal of Material Processing Technology* 88 (1999) 57–66.

34. K.A. Ghany, M. Newishy, Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser, *Journal of Material Processing Technology* 168 (2005) 438–447.

35. J.Wang, An experimental analysis and optimisation of the CO₂ laser cutting process for metallic coated sheet steels, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 16 (2000) 334–340.

36. W.W. Duley, J.N. Gonsalves, CO₂ laser cutting of thin metal sheets with gas jet assist, *Optics and Laser Technology* 1 (1974) 78–81.

37. C. Karatas, O. Keles, I. Uslan, Y. Usta, Laser cutting of steel sheets: influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation, *Journal of Material Processing Technology* 172 (2006) 22–29

38. Lamikiz A, Lacella LNL, Sanchez JA, Pozo DD, Etayo JM, Lopez JM. CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS). *Appl Surf Sci* 2005;242:362–8.

39. S. Bandyopadhyay, J.K.S. Sundar, G. Sundarajan, S.V. Joshi, Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd:YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti–6Al–4V sheets, *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 83–95.

40. Z.I. Vitez, Laser processing of adhesives and polymeric materials for microelectronics packaging applications, *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing* (2000) 289–295.
41. J. Wang, W.C.K. Wong, CO₂ laser cutting of metallic coated sheet steels, *Journal of Materials Processing Technology* 95 (1999) 164–168.
42. D. Araujo, F.J. Carpio, D. Mendez, A.J. Garcia, M.P. Villar, R. Garcia, D. Jimenez, L. Rubio, Microstructural study of CO₂ laser machined heat affected zone of 2024 aluminium alloy, *Applied Surface Science* 208–209 (2003) 210–217.
43. J. Mathew, G.L. Goswami, N. Ramakrishnan, N.K. Naik, Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology* 89–90 (1999) 198–203.
44. A.S. Kuar, B. Doloi, B. Bhattacharyya, Modeling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining of zirconia (ZrO₂), *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (12–13) (2006) 1301–1310.
45. S.C. Tam, L.E.N. Lim, K.Y. Quek, Application of Taguchi method in the optimization of the laser-cutting process, *Journal of Materials Processing Technology* 29 (1992) 63–74.
46. S.-H. Lim, C.-M. Lee, W.J. Chung, A study on optimal cutting condition of a high speed feeding type laser cutting machine by using Taguchi method, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 7 (1) (2006) 18–23.
47. J. Chen, J. Yang, S. Zhang, T. Zuo, D. Guo, Parameter optimization of non-vertical laser cutting, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, published online 2006.
48. B.S. Yilbas, Parametric study to improve laser hole drilling process, *Journal of Materials Processing Technology* 70 (1997) 264–273.
49. C. Esposito, G. Daurelio, Tuning of a parametric model for the laser cutting of steels, *Optics and Lasers in Engineering* 2 (1981) 161–171.
50. G. Tani, L. Tomesani, G. Campana, Prediction of melt geometry in laser cutting, *Applied Surface Science* 208–209 (2003) 142–147.
51. P.S. Sheng, V.S. Joshi, Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 53 (1995) 879–892.
52. C.-H. Tsai, C.-S. Liou, Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture,

ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 125 (2003) 519–528.

53. D.G. Ahn, K.W. Byun, M.C. Kang, Thermal Characteristics in the Cutting of Inconel 718 Superalloy Using CW Nd:YAG Laser J. Mater. Sci. Technol., 2010, 26(4), 362-366.
54. A. Gullu, U. Atici, Investigation of the effects of plasma arc parameters on the structure variation of AISI 304 and St 52 steels Materials and Design 27 (2006) 1157–1162.
55. E. Gariboldi, B. Previtali, High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium Journal of Materials Processing Technology 160 (2005) 77–89.
56. U. Atıcı, A. Güllü, A comparison of the effects of plasma and underwater plasma arc methods on surface roughness and hardness variations of aisi 304 and aisi 1050 steels G.U. Journal of Science 18(4): 647-655 (2005).
57. A. Narimanyan, Unilateral conditions modelling the cut front during plasma cutting: FEM solution, Applied Mathematical Modelling 33 (2009) 176-197.
58. W.J. Xu, J.C. Fang, Y.S. Lu, Study on ceramic cutting by plasma arc, Journal of Materials Processing Technology 129 (2002) 152–156.
59. R. Bini, B.M. Colosimo, A.E. Kutlu, M. Monno, Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system journal of materials processing technology 196 (2008) 345–35.
60. A. Hasçalık, U. Çaydaş, Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel, Journal of Materials Processing Technology 148 (2004) 362–367
61. K. Kanlayasiri, S. Boonmung, An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel, Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 26–29
62. Thomas R. Newton, Shreyes N. Melkote, Thomas R. Watkins, Rosa M. Trejo, Laura Reister, Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718, Materials Science and Engineering A 513–514 (2009) 208–215.
63. Tosun, N., Cogun, C. ve Ğnan, A., The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM, Machining Science and Technology, (2003) 7(2): 209-219
64. Scott D., Boyina S. and Rajurkar K.P., Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining, International Journal of Production Research, (1991) 29 (11): 2189-2207

65. Özek, C., Özel, C., Tel erozyon tezgahında Ç8620 disli çeliginin kesilme davranışlarının araştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi (2003) 5 (2): 47-42
66. Huang J.T., Liao Y.S. and Hsue W.J., Determination of finish-cutting operation number and machining parameters setting in wire electrical discharge machining, Journal of Materials Processing Technology, (1999) 87: 69-81
67. S.L. Chen, S.F. Hsieh, H.C. Lin , M.H. Lin , J.S. Huang, Electrical discharge machining of a NiAlFe ternary shape memory alloy, Journal of Alloys and Compounds 464 (2008) 446–451
68. Aspinwall, D.K., Soon, S.L., Berrisford, A.E. and Walder, G., Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology, CIRP Annals- Manufacturing Technology, (2008) 57: 187-190
69. N. Kinoshita, M. Fukui, G. Gamo, Control of wire-EDM preventing electrode from breaking, Ann. CIRP (1982,)31 (1) 111–114
70. Tarng, Y.S., Ma, S.C., Chung, L.K., Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining, international journal mach. Toulls manuf.(1995) 35:1693-1701
71. W.S. Lau, W.B. Lee, A comparison between EDM wire-cut and laser cutting of carbon fibre composite materials, Mater. Manuf. Processes 6 (2) (1991) 331–342.
72. R. Arunachalam, M.A. Mannan, Machinability of nickel-based high temperature alloys, Machining Science and Technology 4 (1) (2000) 127–168
73. E.O. Ezugwu, S.H. Tang, Surface abuse when machining cast iron (G-17) and nickel-base superalloy (Inconel 718) with cer-amic tools, Journal of Materials Processing Technology 55 (1995) 63–69
74. L. Guerville, J. Vigneau, Influence of machining conditions on residual stresses, in: D. Dudzinski, A. Molinari, H. Schulz (Eds.), Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic Plenum Publishers, 2002, pp. 201–210
75. B.K. Subhas, Bhat Ramaraja, K. Ramachandra, H.K. Balakrishna, Simultaneous optimization of machining parameters for dimensionnal instability control in aero gas turbine components made of Inconel 718 alloy, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions ASME A22 (2000) 586–590.
76. B.K. Subhas, Bhat Ramaraja, K. Ramachandra, H.K. Balakrishna, Dimensionnal

instability studies in machining of Inconel 718 nickel based superalloy as applied to aerogas turbine components, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Transactions ASME 122 (January 2000) 55–61.

77. M. Alaudin, M.A. El Baradie, M.S.J. Hashmi, Tool life testing in the end milling of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 55 (1995) 321–330

78. S. Derrien, J. Vigneau, High speed milling of difficult to machine alloys, in: A. Molinari, H. Schulz, H. Schulz (Eds.), *Proceedings of the First French and German Conference on High Speed Machining*, University of Metz, France, 1997

79. P.C. Jindal, A.T. Santhanam, U. Schleinkofer, A.F. Shuster, Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 17 (1999) 163–170

80. E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 134 (2003) 233–253

81. S. Lo. Casto, E. Lo. Volvo, E. Lucchini, S. Maschio, M. Piacentini, V.F. Ruisi, Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys, *Wear* 225–229 (1999) 227–233.

82. N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa, High speed machining of Inconel 718 with ceramic tools, *Annals of CIRP* 42 (1) (1993) 103–106.

83. T.I. El-Wardany, M.A. Elbestawi, High speed machining of nickel based superalloys with silicon carbide whisker reinforced ceramics, paper MR 95-160 IN, *First International Machining and Grinding Conference*, September 1995, Dearborn, USA

84. Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, J. Fan, S. Lei, Y.C. Shin, G. Petrescu, Hybrid machining of Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003) 1391–1396.

85. S.Y. Hong, Y. Ding, Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti–6Al–4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2001) 1417–1437

86. C. Slama, M. Abdellaoui, Structural characterization of the aged Inconel 718, *Journal of Alloys and Compounds* 306 (2000) 277–284

87. D. Ulutan, T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51 (2011) 250–280

88. G.E. Maurer, Primary and Secondary Melt Processing--Superalloys, *Superalloys*,

Supercomposites and Superceramics, Academic Press, (1989) 49-97

89. A. Altın, Nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımının işlenebilirliğinin incelenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kasım 2005

90. Sims, C.T., Hagel, W.C., The Superalloys Wiley, New York p 25 (1972)

91. D. Tali, Nikel esaslı Inconel 718 Süper alaşımının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi, Y.Lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.16-18

92. Metals Handbook, vol. 1, 10th edn., ASM International, USA, 1990, pp. 950–980

93. Bartlay, E., “Super Alloys a Technical Guide”, (1988)

94. Arunachalam, R., Mannan, M. A, “Machinability of nickel-based high temperature alloys”, Machining Science and Technology, Vol 4, Issue 1(2000) 127- 168

95. <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html>

96. Smith, W.F., Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri : demir dışı alaşımlar, cilt II, Nobel Yayın Dağıtım, (2001)602 s.

97. Akdoğan, A., 2008, Malzeme II ders notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 9 s.,www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Super_Alasimlar.pdf, Mart 2009

98. Beesley, M. J., Lasers and Their Applications, Taylor & Francis Ltd, 2 (1976)7-9

99. Kaçar, E., “Nd-YAG Lazeri ile Plazma Oluşturularak X-Işınlının Üretilmesi ve Bu Işınlının Ölçülerek Dönüşüm Verimliliklerinin Hesaplanması”. Kocaeli Üniversitesi Araştırma Fonu.34 (2007).

100. SMITH, W. V.,. Laser Applications. Artech House Inc, (1970)1- 3, United States of America

101. İloğlu, M. E., Farklı özelliklerdeki çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde elde edilen kesme aralığının karakterizasyonu, Y. Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010) 26-52.

102. Özden, H., “ Lazer makineleri ve Lazer yöntemleri”, Yüksek lisans ders notları, Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (2007) 7-15

103. Karaören, K., Lazer ile Kesim Parametrelerinin Tespiti. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, (1999) 9- 23 s, İstanbul.

104. www.gedikaynak.com.tr, Termik kesme teknolojisi, 99-134

105. Mungan, M. C., Lazer ile kesme ve endüstriyel uygulamaları, Y. Lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü , (2006) 3-12.

106. Samant, A. N., Dahotre, N. B., “Ab initio physical analysis of single dimensional

laser machining of silicon nitride”. Department of Materials Science Engineering, The University of Tennessee, USA. 10 (2008)974-981.

107. G. Thawari, J.K. Sarin Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi, Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys, Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 229–239

108. www.esabcutting.com/cutting/en/process/laser-cutter.

109. E., Kaluç, Plazma ile kaynak ve kesme, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, (1993)

110. www.heyperterm.com

111. www.azom.com

112. A. E. Kutlu, M. Monno, R. Bini, Plazma ile kesme metoduna genel bir bakış, Mühendis ve Makina - Cilt: 46 Sayı: 541

113. K.H. Ho, S.T. Newman , S. Rahimifard, R.D. Allen, State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 1247–1259

114. Özdemir, A., Türker, M., Karatağ, Ç. ve Güllü, A. K., “MA 956 Süperalaçım Malzemesi İçin Tel Erozyonda İşleme Parametrelerinin Ön Tayini”, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, 4 (2002)7-14

115. M. Doğan, Inconel 718 malzemesinin tel erozyon tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme performansına etkisinin deneysel analizi ve optimum parametrelerin belirlenmesi, Y.Lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, 2010

116. Sanjeev Kumar, Rupinder Singh, T. P. Singh, B. L. Sethi, Surface modification by Electrical Discharge Machining: A Review, Journal of Materials Processing Technology, 2008

117. Ho, K. H., Newman, S. T., State of the art electrical discharge machining. Int. J. Of Machine Tools and Manufacture 43 (2003) 1287-1300

118. U. Caydaş, WEDM Yönteminde İşleme Parametrelerinin Mikro Yapı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi., Y.Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002

119. Güllü, A., Poyrazoğlu, O., Gültaş, A., Şentürk, A., “Tel elektro erozyon ile işleme tekniği”, Endüstriyel Teknoloji Dergisi, 2 (1996) 20-25

120. www.specialmetals.com

121. G.D. Janaki Rama, A. Venugopal Reddy, K. Prasad Rao, G.M. Reddy, J.K.

Sarin Sundar, Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 73–82

122. D.G. Ahn, K.W. Byun, Influence of cutting parameters on surface characteristics of cut section in cutting of Inconel 718 sheet using CW Nd:YAG laser, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19 (2009) 32-39

123. S. L. Chen, The effect of gas composition on the CO₂ laser cutting of mild steel, *Journal of Materials Processing Technology* 73 (1998) 147-159

124. J. Powell, S.O. Al-Mashikhi, A.F.H. Kaplan, K.T. Voisey, Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the ‘striation free’ effect, *Optics and Lasers in Engineering* 49 (2011) 1069–1075

125. W.K. Hamoudi, The effects of speed and processing gas on laser cutting of steel using a 2 kW CO₂ laser, *International Journal for Joining of Materials* 9 (1) (1996) 31–36

126. Lv. Shanjin, W. Yang, An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics and Lasers in Engineering* 44 (2006) 1067–1077

127. J. Grum, D. Zuljan, Analysis of Heat Effects in Laser Cutting of Steels, *JMEPEG*, 5 (1996) 526-537

128. J.K.M. Garofano, H. L. Marcus, and M. Aindow, Nanoscale carbide precipitation in the recast layer of a percussion laser-drilled superalloy, *Scripta Materialia* 61 (2009) 943–946

129. A. Sharma, V. Yadava, Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile, *Optics & Laser Technology* 44 (2012) 159–168

130. H.A. Eltawahni, M. Hagino, K.Y. Benyounis, T. Inoue, A.G. Olabi, Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L, *Optics & Laser Technology* 44 (2012) 1068–1082

131. S.L. Chen, S.F. Hsieh, H.C. Lin, M.H. Lin, J.S. Huang, Electrical discharge machining of TiNiCr and TiNiZr ternary shape memory alloys, *Materials Science and Engineering A* 445–446 (2007) 486–492

132. B.S. Yilbas, Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 (2004) 2106–2115

133. F. Al-Sulaiman, B. S. Yilbas, M. Ahsan, C. Karatas, CO₂ laser cutting of Kevlar laminate: influence of assisting gas pressure, *Int J Adv Manuf Technol* 45 (2009) 62–70

134. B.S. Yilbas, Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on

kerf size variations, *Journal of Materials Processing Technology* 201 (2008) 285–290

135. J. Wang, Z. Zhu, C. He, F. Yang. Effect of dual swirling plasma arc cutting parameters on kerf characteristics. *Int J Mater Form* 4 (2011) 39–43.

136. B. R. Hendricks, Simulation of Plasma Arc Cutting, Master Theses, Peninsula Technikon Faculty of Engineering Center for Research in Applied Technology, January 1999

137. D. J. Thomas, The influence of the laser and plasma traverse cutting speed process parameter on the cut-edge characteristics and durability of Yellow Goods vehicle applications, *Journal of Manufacturing Processes* 13 (2011) 120–132

138. M.S. Hewidy, T.A. El-Taweel, M.F. El-Safty, Modelling the machining parameters of wire electrical discharge machining of Inconel 601 using RSM, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 328–336

139. R. Ramakrishnan, L. Karunamoorthy, Modeling and multi-response optimization of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology* 207 (2008) 343–349

140. Y.S. Liao, J.T. Huang, H.C. Su, A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining, *J. Mater. Process. Technol.* 71 (1997) 487–493.

141. S. H. Kang, D. E. Kim, Investigation of EDM characteristics of nickel-based heat resistant alloy, *KSME International Journal*, Vol. 17 (2003) 1475- 1484.

142. U. Çaydaş, Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ve elektro kimyasal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması, Dr. Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008), 95-98.

143. S.F. Hsieh, S.L. Chen, H.C. Lin, M.H. Lin, S.Y. Chiou, The machining characteristics and shape recovery ability of Ti–Ni–X (X = Zr, Cr) ternary shape memory alloys using the wire electro-discharge machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 509–514.

144. Y.H. Guu, K. Hou, Effect of machining parameters on surface textures in EDM of Fe-Mn-Al alloy, *Materials Science and Engineering A* 466 (2007) 61–67.

145. H. Ramasawmy, L. Blunt, K.P. Rajurkar, Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process, *Precision Engineering* 29 (2005) 479–490

146. S. F. Miller, A. J. Shih, J. Qu, Investigation of the spark cycle on material removal rate in wire electrical discharge machining of advanced materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 391–400

- 147.** D. Poros, S. Zaborski, Semi-empirical model of efficiency of wire electrical discharge machining of hard-to-machine materials, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 1247–1253
- 148.** A. Alias, B. Abdullah, N.M. Abbas, Influence of machine feed rate in WEDM of titanium Ti-6Al-4V with constant current (6a) using brass wire, *Procedia Engineering* 41 (2012) 1806 – 1811
- 149.** K. P. Somashekhar, N. Ramachandran, J. Mathew, Material removal characteristics of microslot (kerf) geometry in μ -WEDM on aluminium *Int J Adv Manuf Technol* 51(2010) 611–626.
- 150.** B.H. Yan, H. C. Tsai, F. Y. Huang, L. C. Lee, Examination of wire electrical discharge machining, of Al₂O₃p/6061Al composites, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 251–259
- 151.** P.J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, Second Edition, McGraw-Hill, USA, 1966.
- 152.** LIN, Yi, Mian-Yun Chen ve Sifeng Liu, “Theory of Grey Systems: Capturing uncertainties of Grey Information”, *Grey Systems Theory and Applications, The International Journal of Systems and Cybernetics*, 33 (2004) 196-218.
- 153.** Üstünişik, N.Z., Türkiye'deki iller ve bölgeler bazında Sosyo-Ekonomik gelişmişlik sıralaması araştırması: Gri ilişkisel Analiz Yöntemi ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (Haziran 2007).
- 154.** U. Çaydaş, A. Haşçalık, Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics, *Optics and Laser Technology* 40 (2008) 987–994.

ÖZGEÇMİŞ

06 Ocak 1972 yılında Elazığ’ da doğdu. İlk ve orta öğreniminin ardından, 1990 yılında Elazığ Merkez Anadolu Teknik Lisesi Makine bölümünde lise eğitimini tamamladı. 1992 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Makine bölümünden, 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Makine Öğretmenliği Programından mezun oldu. 1999 yılında Milli Eğitim Bakanlığında Makine Öğretmeni olarak göreve başladı. 2003 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı Talaşlı İmalat Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı ve 2004 yılında aynı ana bilim dalında doktora eğitimine başladı. Halen öğretmenlik görevine devam eden Mustafa AY evli ve 3 çocuk babasıdır.