
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELEKTRO-EROZYON YÖNTEMİYLE İŞLENMİŞ Ti6Al4V ALAŞIMININ YÜZEY KALİTESİNİN MANYETİK AŞINDIRICILARLA İŞLEME YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Mahmut ÇELİK

DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MART 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mahmut ÇELİK

17/03/2021

ELEKTRO-EROZYON YÖNTEMİYLE İŞLENMİŞ Ti6Al4V ALAŞIMININ YÜZEY KALİTESİNİN MANYETİK AŞINDIRICILARLA İŞLEME YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Mahmut ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2021

ÖZET

Teknolojide yaşanan gelişmelerle birlikte mühendislik parçalarından duyulan beklentileri artırmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan bileşenlerin üstün mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra sınırları önceden belirlenmiş geometrik ve boyutsal toleranslar ile yüzey kalitesi kıstaslarını da karşılaması gerekmektedir. Bu beklentilerin karşılanması için geleneksel imalat yöntemleri genelde yetersiz kalmaktadır. Özellikle talaşlı imalatla şekillendirilmesi zor malzemelerin işlenmesinde geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada özellikle havacılık uzay ve medikal gibi yüksek teknolojinin kullanıldığı alanlarda sıklıkla kullanılan Ti6Al4V alaşımı, elektro erozyonla işleme (EEİ) yöntemi aracılığıyla işlenmiş ve işlenen yüzeylerin yüzey kaliteleri manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemiyle iyileştirilmiştir. Çalışmada, ultrasonik destek, işleme süresi, SiC aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar varyans analizi ve gri ilişkisel analiz yöntemleriyle istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmış, ikinci bölümde ise EEİ yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde MAİ yöntemi tanıtılmış ve dördüncü bölümde EEİ ve MAİ yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar ve mevcut çalışmanın literatürdeki yeri vurgulanmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışmalarla ilgili yöntemler verilmiştir. Altıncı bölümde deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular ile işleme parametreleri arasındaki ilişkiler tartışılmıştır. Yedinci bölümde varyans analizi ve gri ilişkisel analiz yöntemleriyle deney sonuçlarının istatistiksel analizi yapılmıştır. Son bölümde ise çalışma ile ilgili genel sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Üretim teknolojileri, Manyetik aşındırıcılarla işleme, Yüzey kalitesi, Beyaz tabaka, Elektro erozyonla işleme, Ti6Al4V
Sayfa Adedi	:	157
Danışman	:	Doç. Dr. Hakan GÜRÜN
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ

IMPROVING THE SURFACE QUALITY OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINED Ti6Al4V ALLOY BY MAGNETIC ABRASIVE FINISHING TECHNIQUE

(Ph. D. Thesis)

Mahmut ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2021

ABSTRACT

With the advances in technology, the expectations from engineering parts increase. Components used in engineering applications are expected to have superior mechanical properties, as well as geometric properties such as tolerance, accuracy and surface quality. Traditional manufacturing methods are insufficient to meet these expectations. It has become mandatory to use nontraditional manufacturing methods especially in the difficult to cut materials. In this study, Ti6Al4V alloy, which is frequently used in areas where high technology is used such as aviation, space and medical, was machined by electrical discharge machining (EDM) method and the surface qualities of the machined surfaces were improved by magnetic abrasive finishing (MAF) method. In the study, the effects of ultrasonic support, machining time, SiC abrasive size, spindle speed and magnetic field amount parameters on material removal rate, surface roughness improvement rate and white layer thickness were investigated experimentally. The experimental results obtained were evaluated statistically by variance analysis and gray relational analysis methods. In the first chapter of the study, the subject was introduced, and in the second chapter, information was given about the EDM method. In the third chapter, the MAF method is introduced and in the fourth chapter, studies on EDM and MAF methods and the place of the present study in the literature are emphasized. In the fifth chapter, methods related to experimental studies are given. In the sixth chapter, the relationships between the findings obtained in experimental studies and machining parameters are discussed. In the seventh chapter, the statistical analysis of the results of the experiment has been made with analysis of variance and gray relational analysis. In the last section, general results of the study and recommendations for future studies are presented.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Manufacturing technologies, Magnetic abrasive finishing, Surface quality, White layer, Electrical discharge machining, Ti6Al4V
Page Number	:	157
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Hakan GÜRÜN
Co-Supervisor	:	Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde derin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocalarım sayın Doç. Dr. Hakan GÜRÜN ve Prof. Dr. Ulaş ÇAYDAŞ'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim elemanlarından Araş. Gör. Cihangir KALE, Araş. Gör. Halil İbrahim YAMAÇ, Araş. Gör. Dr. Erman ÇELİK'e ve Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi öğretim elemanlarından Araş. Gör. Dr. Oğuzhan ŞAHİN'e teşekkürlerimi iletirim. Çalışmanın yüzey pürüzlülük değerlerinin edinilmesi konusunda yardımlarını esirgemeyen Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye teşekkürlerimi iletirim. Bu çalışmayı 07/2020-04 proje numarası ile destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma süresince manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme, bu süreçte bana sabreden değerli eşim Sibel ÇELİK'e ve varlığıyla bana güç veren kızım Elif Ülkü'ye sonsuz şükranlarımı sunarım.

En büyük motivasyon kaynağım sevgili babamın aziz hatırasına…

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME YÖNTEMİ 5

2.1. Elektro Erozyonla İşleme Yöntemi Hakkında Temel Bilgiler 5

2.2. Talaş Kaldırma Mekanizması 5

2.3. Yüzey Tamlığı 7

2.4. Tel Erozyonla İşleme 9

2.4.1. Çalışma prensibi 10

2.4.2. Yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk 11

3. MANYETİK AŞINDIRICILARLA İŞLEME YÖNTEMİ 13

3.1. Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemi Hakkında Temel Bilgiler 13

3.2. İşleme Mekanizması 15

3.2.1. Tek bir manyetik aşındırıcı taneciğin kuvvet analizi 16

3.3. Yöntemi Etkileyen Parametreler 18

3.3.1. Manyetik aşındırıcı özellikleri 18

Sayfa

3.3.2. Aşındırıcı tanecik özellikleri 18
3.3.3. Manyetik alan kaynağı 19
3.3.4. İşleme boşluğu 19
3.3.5. Yağlayıcı 20
3.3.6. Dairesel hız 20
3.3.7. Karışım oranı 20
3.4. MAİ Yönteminin Avantajları 20
4. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR 23
4.1. Elektro Erozyon Yöntemiyle İlgili Yapılan Çalışmalar 23
4.2. Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İlgili Yapılan Çalışmalar 24
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 31
5.1. Çalışmanın Amacı 31
5.2. Deneysel Tasarım 32
5.3. Numunelerin TEİ Yöntemiyle Kesilmesi 33
5.4. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi 35
5.5. Deney Düzeneğinin Tasarımı 36
5.5.1. İş parçası tutucu imalatı 37
5.5.2. Manyetik kutup imalatı 38
5.5.3. Ultrasonik sistem entegrasyonu 45
5.5.4. Aşındırıcı karışımın hazırlanması 47
5.6. Deneylerin Yapılması 47
5.6.1. Numunelerin hazırlanması 48
5.6.2. Numunelerin ağırlıklarının ölçülmesi 48
5.6.3. MAİ deneylerinin yapılması 48

Sayfa

5.6.4. UDMAİ deneylerinin yapılması 49
5.7. Metalografik İncelemeler 49
5.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri 50
5.9. Talaş Kaldırma Oranının Belirlenmesi 51
5.10. Mikrosertlik Ölçümleri 51
6. DENEYSEL SONUÇLAR 53
6.1. Talaş Kaldırma Oranı Ölçüm Sonuçları 53
6.1.1. İşleme süresinin TKO üzerindeki etkisi 54
6.1.2. Aşındırıcı boyutunun TKO üzerindeki etkisi 55
6.1.3. Devir sayısının TKO üzerindeki etkisi 56
6.1.4. Manyetik alanın TKO üzerindeki etkisi 57
6.2. Yüzey Pürüzlülüğündeki İyileşme Oranı Ölçüm Sonuçları 58
6.2.1. İşleme süresinin YPİO üzerindeki etkisi 63
6.2.2. Aşındırıcı boyutunun YPİO üzerindeki etkisi 64
6.2.3. Devir sayısının YPİO üzerindeki etkisi 65
6.2.4. Manyetik alanın YPİO üzerindeki etkisi 66
6.3. Beyaz Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları 67
6.3.1. İşleme süresinin beyaz tabaka üzerindeki etkisi 74
6.3.2. Aşındırıcı boyutunun beyaz tabaka üzerindeki etkisi 75
6.3.3. Devir sayısının beyaz tabaka üzerindeki etkisi 76
6.3.4. Manyetik alanın beyaz tabaka üzerindeki etkisi 77
6.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları 78
7. DENEYSEL SONUÇLARIN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ 79
7.1. Varyans Analizi Yöntemi (ANOVA) 79

Sayfa

7.1.1. MAİ/UDMAİ deneylerinin varyans analizi 83

7.2. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi 95

7.2.1. Gri ilişkisel analiz adımları 96

7.2.2. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin gri ilişkisel analizi 99

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 107

8.1. Genel Sonuçlar 107

8.2. Öneriler 110

KAYNAKLAR 111

EKLER 119

EK-1 Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri 120

EK-2 Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri 138

ÖZGEÇMİŞ 156

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. MAİ yönteminde kullanılan bazı aşındırıcıların özellikleri 19

Çizelge 5.1. TEİ işleme parametreleri) 34

Çizelge 5.2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri 34

Çizelge 5.3. Ti6Al4V alaşımın kimyasal bileşimi 35

Çizelge 5.4. MAİ Deney parametreleri 35

Çizelge 5.5. MAİ deneysel tasarım tablosu 36

Çizelge 5.6. Ultrasonik sistem özellikleri 46

Çizelge 6.1. MAİ deneylerine ait talaş kaldırma oranları 53

Çizelge 6.2. UDMAİ deneylerine ait talaş kaldırma oranları 54

Çizelge 6.3. MAİ deneylerine ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPİO değerleri 59

Çizelge 6.4. UDMAİ deneylerine ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPİO değerleri 60

Çizelge 6.5. MAİ deneylerine ait ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri 69

Çizelge 6.6. UDMAİ deneylerine ait ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri 69

Çizelge 7.1. MAİ/UDMAİ deney parametreleri ve seviyeleri 83

Çizelge 7.2. MAİ deneyleri için faktörlerin TKO için S/N değerleri 84

Çizelge 7.3. UDMAİ deneyleri için faktörlerin TKO için S/N değerleri 84

Çizelge 7.4. MAİ yönteminde talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları 86

Çizelge 7.5. UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları 86

Çizelge 7.6. MAİ deneyleri için faktörlerin YPİO için S/N değerleri 88

Çizelge 7.7. UDMAİ deneyleri için faktörlerin YPİO için S/N değerleri 88

Çizelge 7.8. MAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları 90

Çizelge 7.9. UDMAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları 90

Çizelge 7.10. MAİ deneyleri için faktörlerin beyaz tabaka kalınlığı için S/N değerleri 92

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 7.11. UDMAİ deneyleri için faktörlerin beyaz tabaka kalınlığı için S/N değerleri 92

Çizelge 7.12. MAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları 94

Çizelge 7.13. UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları..... 94

Çizelge 7.14. MAİ yöntemi karar problemine ait veri seti 100

Çizelge 7.15. UDMAİ yöntemi karar problemine ait veri seti 100

Çizelge 7.16. MAİ deneylerine ait normalizasyon tablosu..... 101

Çizelge 7.17. UDMAİ deneylerine ait normalizasyon tablosu..... 102

Çizelge 7.18. MAİ deneylerine ait mutlak değer tablosu 102

Çizelge 7.19. UDMAİ deneylerine ait mutlak değer tablosu..... 103

Çizelge 7.20. MAİ deneylerinde gri ilişkisel dereceler ve sıralamaları..... 103

Çizelge 7.21. UDMAİ deneylerinde gri ilişkisel dereceler ve sıralamaları..... 104

Çizelge 7.22. MAİ deneylerinde ortalama gri ilişkisel dereceler 105

Çizelge 7.21. UDMAİ deneylerinde ortalama gri ilişkisel dereceler..... 105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. EEİ yönteminde talaş kaldırma mekanizması 6

Şekil 2.2. Boşaltım noktasının detaylı modeli 7

Şekil 2.3. EEİ ile işlenmiş bir yüzeyin ve komşu yüzeyin şematik gösterimi 8

Şekil 2.4. TEİ yönteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi 10

Şekil 3.1. MAİ yönteminin farklı yüzeylerde uygulanışı: a: silindirik dış yüzeyler, b: silindirik iç yüzeyler, c: düzlemsel yüzeyler, d: serbest formlu yüzeyler 14

Şekil 3.2. MAİ yönteminin sınıflandırılması 14

Şekil 3.3. MAİ yönteminde manyetik alan dağılımı ve taneciklere etki eden kuvvetler 15

Şekil 3.4. MAİ yönteminde talaş kaldırma sırasında aşındırıcı taneciklere etki eden kuvvetler 16

Şekil 3.5. MAİ yönteminde manyetik tanecik üzerine etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi 17

Şekil 3.6. MAİ yöntemini etkileyen parametreler 18

Şekil 5.1. Numunelerin TEİ yöntemiyle kesilmesi 34

Şekil 5.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi 37

Şekil 5.3. İş parçası tutucusu 37

Şekil 5.4. NSNS-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri 39

Şekil 5.5. NNNN-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri 39

Şekil 5.6. NSNS-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan 40

Şekil 5.7. NNNN-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan 41

Şekil 5.8. NSNS-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde manyetik alan yoğunluğu 41

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.9. NNNN-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde manyetik alan yoğunluğu 42

Şekil 5.10. 1 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi 43

Şekil 5.11. 2 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi 44

Şekil 5.12. 3 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi 44

Şekil 5.13. Metalografik inceleme bölgeleri 50

Şekil 6.1. MAİ/UDMAİ deneylerine ait TKO grafiği 54

Şekil 6.2. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun TKO üzerine etkisi 55

Şekil 6.3. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının TKO üzerine etkisi 57

Şekil 6.4. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının TKO üzerine etkisi 58

Şekil 6.5. MAİ/UDMAİ deneylerine ait YPİO grafiği 59

Şekil 6.6. MAİ ve UDMAİ yönteminde işleme süresinin YPİO üzerine etkisi 64

Şekil 6.7. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun YPİO üzerine etkisi 65

Şekil 6.8. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının YPİO üzerine etkisi 66

Şekil 6.9. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının YPİO üzerine etkisi 67

Şekil 6.10. MAİ/UDMAİ deneylerine ait beyaz tabaka kalınlık grafiği 70

Şekil 6.11. MAİ ve UDMAİ yönteminde işleme süresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi..... 74

Şekil 6.12. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi 75

Şekil 6.13. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi 76

Şekil 6.14. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi 78

Şekil 7.1. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisi 85

Şekil 7.2. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisi. 85

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.3. MAİ yönteminde işlem parametrelerinin TKO üzerindeki katkıları 87

Şekil 7.4. UDMAİ yönteminde işlem parametrelerinin TKO üzerindeki katkıları 87

Şekil 7.5. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına etkisi..... 89

Şekil 7.6. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına etkisi..... 89

Şekil 7.7. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin YPİO üzerindeki katkıları 91

Şekil 7.8. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin YPİO üzerindeki katkıları ... 91

Şekil 7.9. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi 93

Şekil 7.10. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi 93

Şekil 7.11. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki katkıları..... 95

Şekil 7.12. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki katkıları..... 95

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. EEİ ile işlenmiş bir yüzeyin komşu yüzeyinin SEM görüntüsü 9

Resim 5.1. Numunelerin kesme işleminin yapıldığı tel erozyon tezgahı..... 33

Resim 5.2. Mıknatıs kutup sistemi..... 38

Resim 5.3. Manyetik kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun ölçülmesi 43

Resim 5.4. İş parçası genliğinin ölçülmesi 45

Resim 5.5. Deney düzeneğinin fotoğrafı..... 46

Resim 5.6. SiC taneciklerinin SEM görüntüsü 47

Resim 5.7. Numunelerin temizlenmesi ve tartılmasında kullanılan cihazlar..... 48

Resim 5.8. Numune üzerinde fırça şeklini alan manyetik aşındırıcı karışımı 49

Resim 6.1. TEİ işlemi sonrası numunelerin 3B yüzey topografyası..... 61

Resim 6.2. En düşük YPİO değerine sahip numunelerin 3B yüzey topografyası 62

Resim 6.3. En yüksek YPİO değerine sahip numunelerin 3B yüzey topografyası 63

Resim 6.4. TEİ işlemi sonrası yüzeyde oluşan beyaz tabaka görüntüleri..... 68

Resim 6.5. En düşük BTKAO değerine sahip numunelere ait SEM görüntüleri 71

Resim 6.6. En yüksek BTKAO değerine sahip numunelere ait SEM görüntüleri..... 72

Resim 6.7. MAİ işleminin yüzey yapıları üzerindeki etkisi 73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
mg	Miligram
dev/dk	Devir/dakika
sn	Saniye
dB	Desibel
kHz	Kilohertz
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
HV	Vickers sertlik değeri
HRC	Rockwell-C sertlik değeri

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ANOVA	Varyans analizi
BTKAO	Beyaz tabaka kalınlığındaki azalma oranı
EEİ	Elektro erozyonla işleme
GİA	Gri ilişkisel analiz
KDMAİ	Kimyasal destekli manyetik aşındırıcılarla işleme
MAFT	Manyetik aşındırıcılı fırça takımı
MAİ	Manyetik aşındırıcılarla işleme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TEİ	Tel erozyonla işleme
TKO	Talaş kaldırma oranı
UDMAİ	Ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme
YPİO	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan bir ürüne, ham maddeden nihai ürün oluşumuna kadar geçen süreçte genellikle, döküm, plastik şekil verme, talaşlı imalat ve gerekli olması halinde ısıl işlem basamakları uygulanmaktadır. Bu süreçler sonrasında oluşan ürünlerin yüzeylerinde farklı seviyelerde yüzey pürüzlülüğü, çizikler ve kılcal çatlaklar; yüzey altında ise ısıdan etkilenen bölgeler gibi istenmeyen kusurlar meydana gelmektedir. Bu oluşumlar ürünlerin sadece kullanılabilirliğini değil aynı zamanda aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir. İşleme yöntemi, malzeme türü, mikroyapı ve fizikokimyasal reaksiyonlar gibi birçok faktöre bağlı olan bu yüzey kusurlarının önemli ölçüde üstesinden gelebilmek için bu faktörlerin her birinin etkileri dikkate alınmalıdır [1].

Bir mühendislik parçasının yüzey kalitesi, parça kalitesinin değerlendirilmesi için temel ölçütlerden biridir ve parçanın kullanılabilirliği ve güvenirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey kalitesi sadece kendi kullanılabilirliğini değil tüm makine performansı ve ömrünü de yakından ilgilendirmektedir.

Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, mühendislik malzemelerinden beklenen performans ve kalite gibi özelliklere yönelik talepler artmaktadır. İmalat teknolojilerindeki yaşanan gelişmeler neticesinde, yüzey kalitesinin yanı sıra mekanik özellikler de mühendislik parçalarının ayırt edici özellikleri arasında yerini almıştır.

Özellikle havacılık-uzay, biyomedikal ve otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı malzemelere olan talep giderek artmaktadır [2]. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci; düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır [2, 3]. Yer kabuğunun %6'sını oluşturan titanyum, sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde; vücut içi implant, protez ve ameliyat ekipmanları imalatı; uçak motorlarının giriş kanatçıkları ve düşük ve yüksek basınç kompresör kanatçıklarının imalatı gibi yüksek teknolojinin kullanıldığı birçok alanda kullanılmaktadır [4–7]. Mekanik olarak beklentileri karşılayan titanyum ve alaşımlarının çalışma koşulları da dikkate alındığında, ürünlerin yüzey kalitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir. Özellikle medikal endüstrisinde kullanılan

titanyum alaşımından imal edilen implantların yüzey kalitesinin artırılması, gerek biyo-uyumluluk açısından gerekse korozyon direnci açısından önem arz etmektedir [8]. Ayrıca havacılık alanında gaz türbinli motorların kompresör kanatçıklarında kullanılan titanyum alaşımının yüzey kalitesi, aerodinamik açıdan sistemin verimini önemli ölçüde etkilemektedir [9].

Ancak titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında bir takım sorunlarla karşılaşılmaktadır [10]. Geleneksel talaşlı imalat sırasında, malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet sebebiyle kesici takım ile iş parçası arasında yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve talaş oluşumunu sağlayan plastik deformasyonun gerçekleşmesi zorlaşmaktadır. Öte yandan artan sıcaklıkla birlikte iş parçası ile kesici takım arasında kimyasal tepkimeler gerçekleşmekte ve sonuç olarak iş parçası kesici takımın yüzeyine yapışmakta ve hızla aşınarak işlenen yüzeyin kalitesini düşürmektedir [11]. Bu sebeple, titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde genellikle geleneksel olmayan imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan geleneksel olmayan yöntemlerden bir tanesi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir.

EEİ, dielektrik sıvısı içerisine daldırılmış olan elektriksel iletkenliğe sahip bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalımlarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece malzeme yüzeyinin yerel olarak ergitilerek/buharlaştırılarak talaş kaldırma esasına göre çalışan bir ileri imalat yöntemidir. Kaldırılan talaşlar ara bölgeden dielektrik sıvı basıncı yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Yöntemde, vurum ve vurum ara süresince, yüzey ani ısınma ve soğumaya maruz kalmakta ve elektriksel işleme parametrelerinin seviyelerine de bağlı olarak yüzey ve yüzey altında mikroyapısal değişimler meydana gelmektedir. Dolayısıyla EEİ ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılgan bir artık tabaka oluşmakta ve bu tabakada bulunan kılcal çatlaklar, artık gerilmeler ve yeniden katılaşmış eriyikler malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere çalışma ömrünü ve diğer mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [12].

EEİ işlemi sonrası oluşan bu yapıların ortadan kaldırılması amacıyla birçok farklı yöntemin denendiği çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elektrot ya da iş parçasına ultrasonik titreşimler verilmek suretiyle, ara bölgede kaldırılan talaşların artan sıvı sirkülasyonu ile daha etkin bir şekilde uzaklaştırıldığı ve böylece yüzeyde eriyerek yeniden katılaşan tabaka kalınlığının azaldığı görülmüştür [13–15]. Diğer bir yöntem olarak dielektrik sıvısı içerisine

aşındırıcı tozlar katılmak suretiyle yöntemin veriminin arttırılması sağlanmıştır [16–19]. Ayrıca işlem esnasında malzeme yüzeyinin sert ve ince filmlerle kaplanması amacıyla, sıvı içerisine krom, grafit gibi tozlar katılarak malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmek de denenen diğer yöntemlerdir [20–22].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, denenen bu yöntemlerin işlemin performansı ve veriminde artış sağladığı, iş parçası yüzeyinde yeniden katılaşmış artık tabaka kalınlığını ve yüzeyde bulunan çatlak yoğunluğunu azalttığı görülmüştür. Ancak bu istenmeyen oluşumların tamamen ortadan kaldırılamadığı tespit edilmiştir. Bu oluşumların ortadan tamamen kaldırılabilmesi için malzeme yüzeyinin ayrıca bir bitirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir [23]. Elektrokimyasal taşlama, mekanik taşlama ve bilyeli parlatma gibi yöntemler bu amaçla kullanılan yöntemlere örnek olarak gösterilebilir [24–26]. Manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi de kolay uygulanabilirliği, esnek yapısı, mikro talaş kaldırma ve daha düşük kesme kuvvetleri gereksinimi gibi özelliklerinden dolayı, EEİ sonrasında oluşan artık tabakanın kaldırılmasında tercih edilebilir bir yöntem olarak bu yöntemlerin arasına girmiştir.

Bu çalışmada tel erozyon ile işleme yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kalitelerinin MAİ yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MAİ yönteminde, aşındırıcı boyutu, devir sayısı, manyetik alan miktarı ve işleme süresi parametreleri farklı seviyelerde değiştirilerek işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca sisteme ultrasonik titreşimler vermek suretiyle işlem performansı artırılmıştır. MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları (YPİO) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Yüzeyi iyileştirilmiş numuneler taramalı elektron mikroskopu (SEM) aracılığıyla incelenmiş, yüzey morfolojisi ve artık tabaka kalınlıkları irdelenmiştir. Numunelerden alınan kesit boyunca iş parçası yüzeyinden merkeze doğru mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçümler sonucu ulaşılan verilerin doğruluğunun ve hata oranlarının belirlenebilmesi için istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bunun sonucunda işleme parametrelerinin işlem performansı üzerindeki bireysel ve birlikte izafi etkileri deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

Öte yandan çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak bütün kriterler için en uygun işleme parametreleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak

MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilecek bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

2. ELEKTRO EROZYONLA İŞLEME YÖNTEMİ

2.1. Elektro Erozyonla İşleme Yöntemi Hakkında Temel Bilgiler

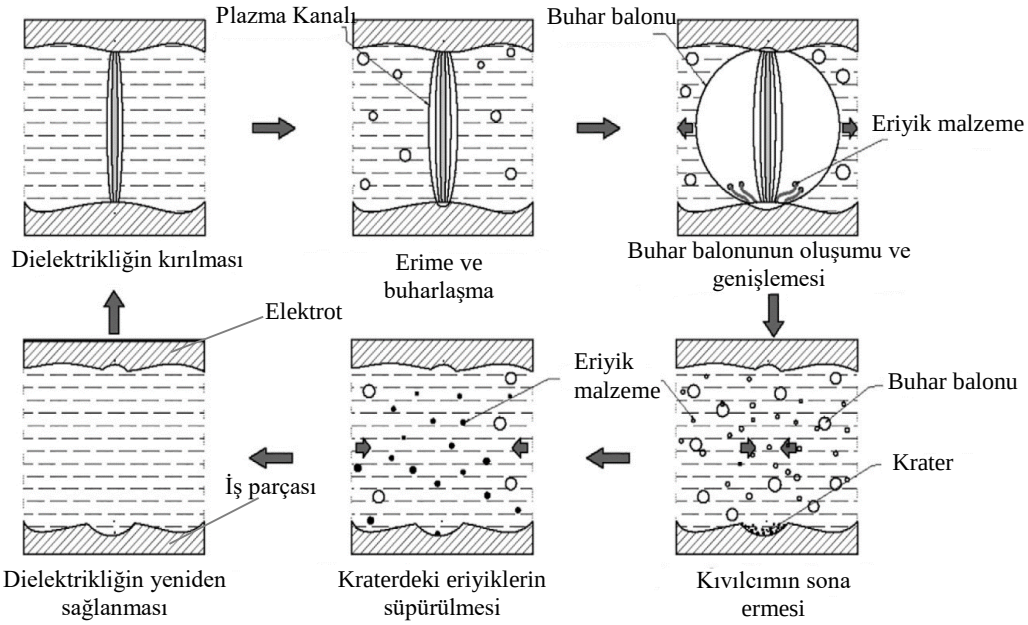
Günümüzde, termal enerji kullanılarak talaş kaldıran işleme yöntemleri içerisinde en çok kullanılan yöntem olan elektro erozyonla işleme (EEİ) yöntemi, elektriksel iletkenliğe sahip olan iş parçası yüzeyinden iş parçasının mekanik özelliklerinden bağımsız olarak talaş kaldıran bir geleneksel olmayan işleme yöntemidir [27]. Yöntemde iş parçası ile takım arasında herhangi bir fiziksel bir temas olmadığı için işlenebilirlikleri zor olan malzemeler ve karmaşık şekilli ürünler bu yöntem ile kolaylıkla işlenebilmektedir.

1770 yılında İngiliz kimyager Joseph Priestly tarafınadan elektrik boşalımının aşındırıcı etkileri keşfedilmesine rağmen, elektrik akımının imalat süreçlerinde kullanılması fikri 1943 yılında Moskova Üniversitesi araştırmacıları B.R Lazarenko ve N.I. Lazarenko tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır [28]. Bu tarihten itibaren işlenmesi zor malzemelerin yüzeyinden eritme ve buharlaştırma yoluyla hassas işleme elde etmek için elektrik akımın kontrollü olarak boşaltılmasını esas alan elektro erozyonla işleme yönteminin gelişim süreci başlamıştır. O tarihten itibaren de çeşitli araştırmacılar tarafından hızla geliştirilmiş ve kalıp imalatı, prototipleme ve mikro işleme gibi uygulamaların vazgeçilmezi haline gelmiştir.

2.2. Talaş Kaldırma Mekanizması

EEİ, elektriksel iletken malzemeleri aşındırmak için elektrik akımı kullanılan termal bir işlemdir. Takım ile iş parçası arasındaki boşluk dielektrik sıvı ile doldurulur. Takımın iş parçasına yaklaştırılmasıyla sıvının dilektrikliği kırılır ve takımdan iş parçasına doğru bir elektron hareketi başlar ve hareket eden elektronlar aradaki dielektrik moleküllerine çarparak daha fazla elektronu yerinden çıkarmak suretiyle bir elektron boşalımı hareketine neden olur. Takımın iş parçasına yaklaştırılmasıyla takım ve iş parçası yüzeyinde bulunan düzensizliklerin varlığı nedeniyle en dar aralıkta bir plazma kanalı oluşur. Bu kanalda meydana gelen olaylar çok karmaşık olmakla birlikte bir EEİ döngüsünün tek bir boşalması sırasında meydana gelen olaylar Şekil 2.1'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Pozitif yüklü dielektrik iyonları, oluşan bu kanal boyunca takıma doğru hareket ederken negatif yüklü

parçacıklar (elektronlar) iş parçasına doğru hareket ederler.



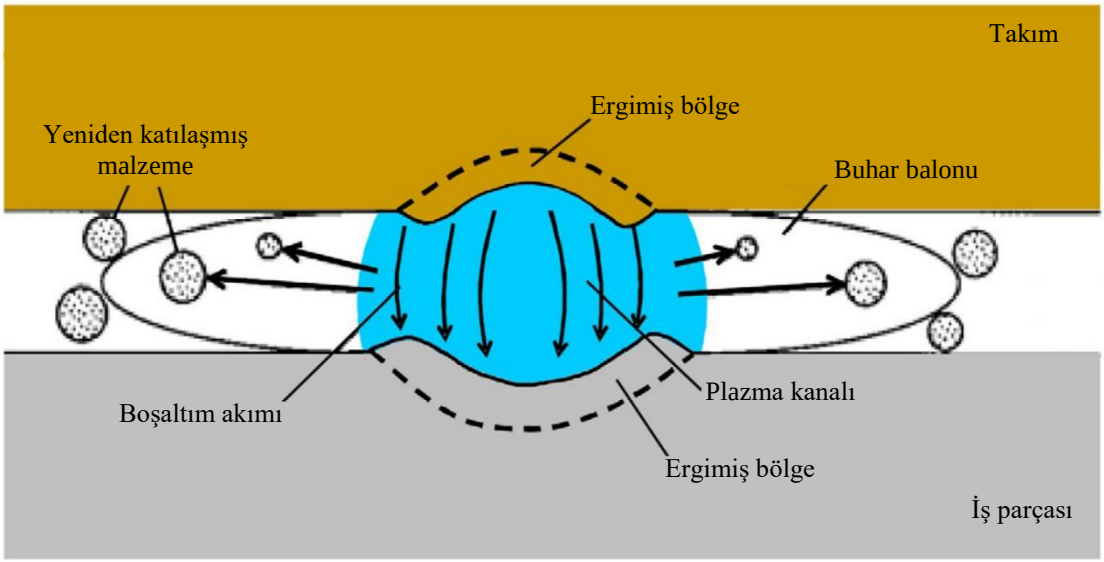
Şekil 2.1. EEİ yönteminde talaş kaldırma mekanizması [27]

Plazma kanalında, dielektrik sıvı ve yüklü parçacıklar buharlaşır ve iyonlaşır ve takım ile iş parçası arasında kıvılcım oluşumuna neden olur. Plazma kanalının çapı gittikçe artar. Kanalın yüksek iletkenliğinden dolayı gerilimin azalmasıyla birlikte akım miktarında artış meydana gelir. Akımdaki artış kanal içerisinde sıcaklık ve basınç artışına sebebiyet verir. Yaklaşık olarak 8000°C - 12000 °C değerlerine yükselen kıvılcım nedeniyle iş parçası ve takım yüzeyindeki malzemeler kıvılcımın temas ettiği noktalarda erir ve/veya buharlaşır [29]. Kanal çevresindeki dielektrik sıvının da buharlaşmasıyla kanal çevresinde bir buhar balonu oluşur. Buharlaşmanın devam etmesiyle buhar balonu dışa doğru genleşmeye başlar. Bu genleşme miktarı dielektrik sıvının ataleti ve viskozitesi sebebiyle sınırlanır. Bu aşamada akım değeri yükselmeye devam ederken voltaj değeri işe düşer.

Boşalım noktasının detaylandırılmış modeli şematik olarak Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Buhar balonundaki bu son derece yüksek basınç ve hız, talaş kaldırma sürecinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Boşalımın son aşamasında sıcaklık ve basınç maksimum düzeye ulaşır ve takım ve elektrot yüzeyinden bir miktar talaş kaldırır. Kaldırılan talaşlar buhar balonunun tesiri ile plazma

kanalının altında ergimiş şekilde tutulmaktadır. Boşalımın tamamlanmasıyla birlikte buhar balonu söner ve dielektrik sıvı şiddetli bir şekilde kıvılcım bölgesine hücum eder ve bu durum ergimiş halde olan malzemenin iş parçası ve takım yüzeyinden patlayarak fırlamasına sebep olur. Bu durumun sonunda da her iki yüzeyde de küçük kraterler oluşur. Dielektrik sıvı aynı zamanda kaldırılan malzemenin, takım ve iş parçasının soğutulması işlevini de yerine getirir. Küresel parçacıklar halinde soğuyan ergimiş malzeme, dielektrik sıvının basıncı ile takım - iş parçası ara bölgesinden uzaklaştırılarak takım ile iş parçası arasındaki dielektriklik tekrar kurulur. Böylece sistem bir sonraki kıvılcım için hazır hale gelir. Ancak, her bir boşaltım periyodu için yüzlerce küçük yeniden katılaşmış malzeme ve buhar balonlarının açığa çıkması sürecin daha karmaşık hale gelmesine sebep olur.



Şekil 2.2. Boşaltım noktasının detaylı modeli [30]

2.3. Yüzey Tamlığı

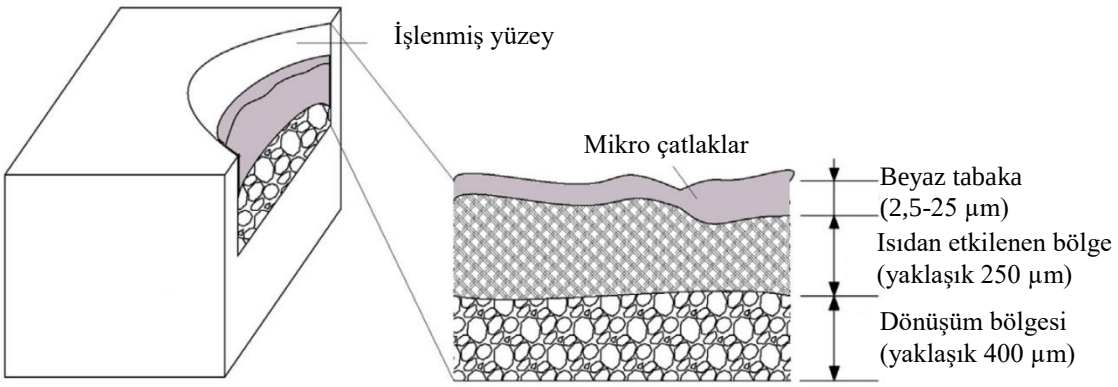
EEİ yöntemi iş parçası yüzeyinin istenilen şekle gelmesi için elektrik kıvılcımları aracılığıyla iş parçası yüzeyinde küçük kraterler açan termal bir yöntemdir. Bu yüzden işlenen yüzeyler farklı boyutlardaki küçük kraterlerle kaplı haldedir. Kraterlerin derinlikleri ve çapları, vurum süresi, frekans ve akım değeri gibi EEİ işleme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. İşlenmiş yüzeylerin yüzey kaliteleri bu kraterlerin boyutlarına bağlı olarak değişmektedir.

Yöntemde talaş kaldırma işlemi, kıvılcımın sebep olduğu 8000 °C - 12000 °C sıcaklık

sonucu erime ve buharlaşma şeklinde oluşmaktadır. Ulaşılan bu yüksek sıcaklıklar ise iş parçası yüzeyinde metalürjik açıdan bazı değişikliklere sebebiyet vermektedir. Şekil 2.3' te EEİ işlemi sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan yeniden katılaşmış bölge, ısıdan etkilenen bölge ve dönüşüm bölgesi şematik olarak gösterilmiştir. Resim 2.1'de ise aynı bölgelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığı ile kaydedilmiş görüntüsü görülmektedir.

Her bir boşalım periyodunun sonunda ergimiş malzemeler dileketrik sıvı tarafından kraterlerden uzaklaştırılmaktadır. Ancak bazı ergimiş malzemeler hızlı bir şekilde katılaşarak işlenmiş yüzey üzerine yapışabilmektedir. Çok sayıdaki bu hızlı katılaşan malzemeler iş parçası yüzeyinde oldukça sert ve kırılgan olan ve üzerinde mikro çatlaklar bulunduran bir yeniden katılaşmış tabaka, artık tabak ya da beyaz tabaka olarak isimlendirilen bir katman oluşturmaktadırlar. Bu tabakanın kalınlığı ise işleme parametrelerin kombinasyonlarına bağlı olarak 2,5 µm ile 25 µm aralığında değişmektedir. EEİ işleminden sonra bu katmanın kaldırılması için ikinci bir yüzey bitirme işlemi yapılması, iş parçasının kullanım ömrü açısından önem arz etmektedir.

Beyaz tabakanın hemen altında ısınma ve soğuma çevrimlerinden kaynaklı ısıl gerilme ve metalürjik hasarların bulunduğu ısıdan etkilenen bölge bulunmaktadır. Bu bölgenin kalınlığı 250 µm'den daha az olup yaklaşık olarak 65 HRC sertlik değerine sahiptir.

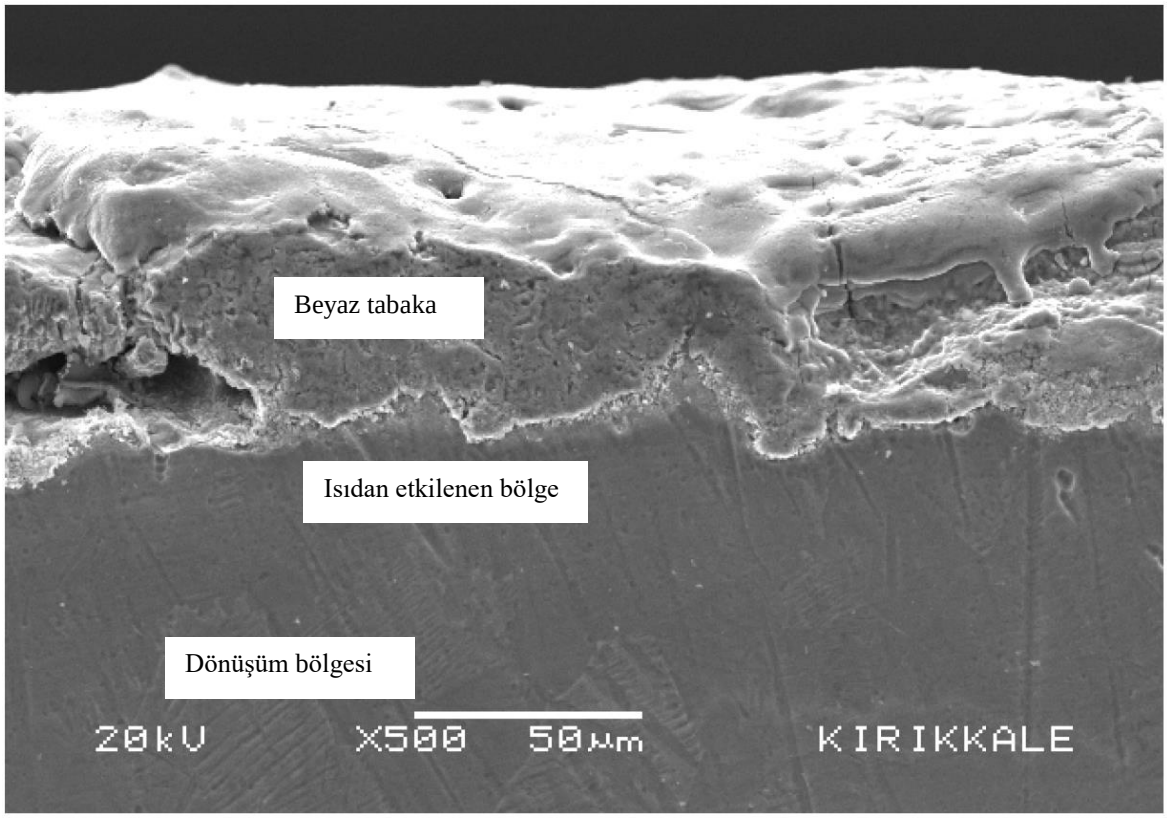


Şekil 2.3. EEİ ile işlenmiş bir yüzeyin ve komşu yüzeyin şematik gösterimi [27]

Isıdan etkilenen bölgenin altında ise tane yapılarının orijinal şeklinden farklılık gösterdiği dönüşüm bölgesi başlamaktadır. Bu bölgenin derinliği ise 400 µm boyutlarına kadar

ulaşabilmektedir. İşleme parametrelerinin uygun şekilde seçilmesiyle bu kalınlık değeri azaltılabilir [27].

Bu tabakalar ve tabakalarda bulunan mikro çatlaklar malzemenin yorulma dayanımını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca dielektrik sıvı içerisinde bulunan karbonun yüksek sıcaklıklarda karbür oluşturmak suretiyle malzemenin kimyasal bileşimini de değiştirmesi söz konusu olabilmektedir. İşleme sonrası malzemenin yorulma dayanımını tekrar kazanmasını sağlamak için beyaz tabaka ve ısıdan etkilenen bölgenin kaldırılması gerekmektedir.



Resim 2.1. EEİ ile işlenmiş bir yüzeyin komşu yüzeyinin SEM görüntüsü [23]

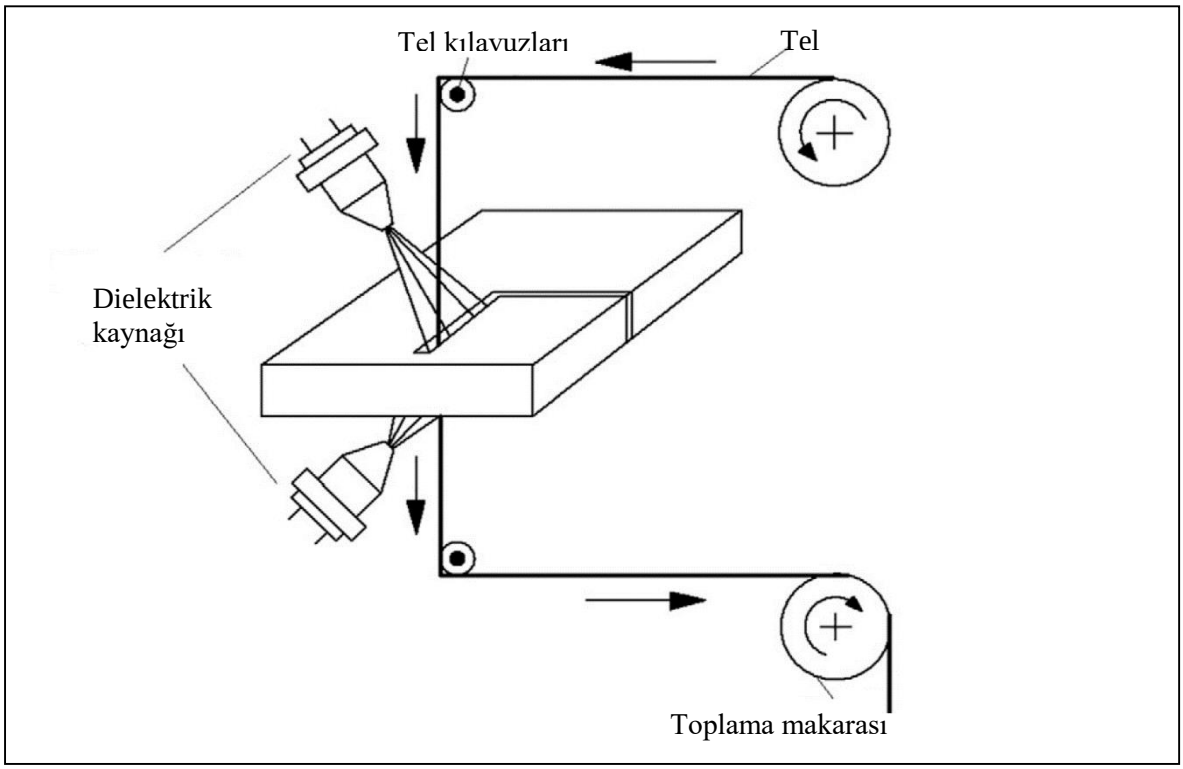
2.4. Tel Erozyon İle İşleme

Tel erozyon ile işleme (TEİ), 1960'lı yılların sonlarında, çeşitli konfigürasyonlara sahip ürünlerin imalatı için EEİ yönteminde ihtiyaç duyulan farklı geometrilere sahip takım zorunluluğunu ortadan kaldırmak için ortaya çıkmıştır. 1970'li yılların sonunda ise TEİ yönteminin bilgisayarlı numerik kontrol teknolojisi ile birleşmesiyle yöntem endüstride popüler olarak kullanılmaya başlamıştır. Yöntemle takım çeliği, alüminyum, bakır ve grafit

gibi nispeten yaygın olarak kullanılan malzemelerden; hastaloy, waspaloy, inconel, titanyum, çok kristalli elmas bileşenleri ve iletken seramikler gibi en gelişmiş uzay çağı alaşımlarına kadar, sertliği ne olursa olsun elektriksel olarak iletken olan malzemeler işlenebilmektedir [31, 32].

2.4.1. Çalışma prensibi

TEİ yöntemi, temelde geleneksel EEİ yöntemiyle aynı prensipte çalışmaktadır. TEİ yönteminde malzemeler hassas bir şekilde konumlandırılmış hareket eden bir tel ile iş parçası arasındaki elektriksel boşalım ile işlenmektedir. Yöntemde hem tel hem de iş parçası dielektrik sıvı içerisine yerleştirilmeli ve hareketli telden iş parçasına elektriksel boşalımın sağlanması için yüksek frekanslı bir gerilim uygulanmalıdır. Boşalım esnasında oluşan kıvılcımla birlikte açığa çıkan yüksek sıcaklık iş parçası yüzeyini yerel olarak eritip buharlaştırmaktadır [33]. Yöntemde takım olarak kullanılan telde de aşınma meydana gelmektedir. Ergimiş malzeme ve takım parçacıkları ara bölgeden, püskürtülen yüksek basınçlı dielektrik sıvı vasıtasıyla uzaklaştırılır. TEİ yönteminin şematik olarak gösterimi Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4. TEİ yönteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi [27]

2.4.2. Yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk

EEİ yöntemi ile kıyaslandığında TEİ yöntemi, sahip olduğu çok sayıdaki işleme parametreleri sebebiyle daha karmaşık bir süreç içermektedir. Yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk büyük ölçüde bu işleme parametrelerine bağlıdır. Yüzey topoğrafyası, tel besleme hızı ile ters orantılı şekilde değişirken kesme hızındaki artış ise yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Vurum ara süresi ise yüzey kalitesini etkilememektedir [32, 33]. İşleme parametrelerinin uygun kombinasyonlarıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) 0,2 ~ 0,4 µm aralığında iyileştirilebilir [32, 34].

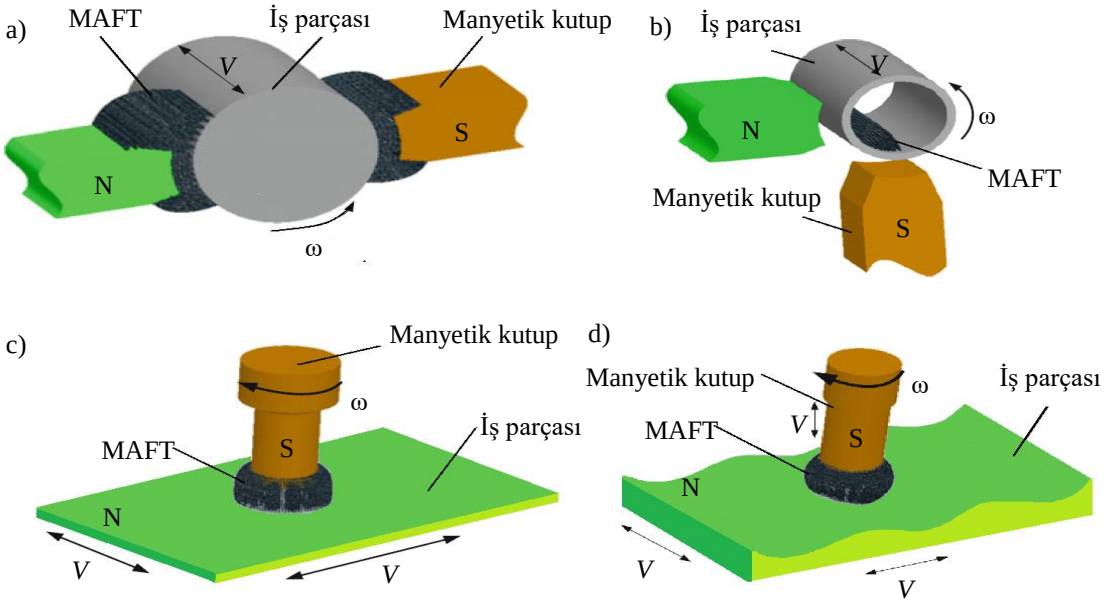
3. MANYETİK AŞINDIRICILARLA İŞLEME YÖNTEMİ

3.1. Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemi Hakkında Temel Bilgiler

İlk olarak 1930'lu yıllarda keşfedilen manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi 1960'lı yılların ortalarına kadar önemli bir gelişim gösterememiştir. 1970'li yıllarla birlikte başta Bulgar araştırmacılar olmakla birlikte Kore, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Çin gibi bölgelerdeki araştırmacılar çalışmalarını bu yöntem üzerine yoğunlaştırmışlardır [35]. Son yıllarda MAİ yöntemine duyulan önemin artmasıyla birlikte, yöntem özellikle medikal, optik, havacılık, elektrik ve motor parçaları gibi hassas bileşenlerin imalat süreçlerinde kullanılmaktadır [36–38].

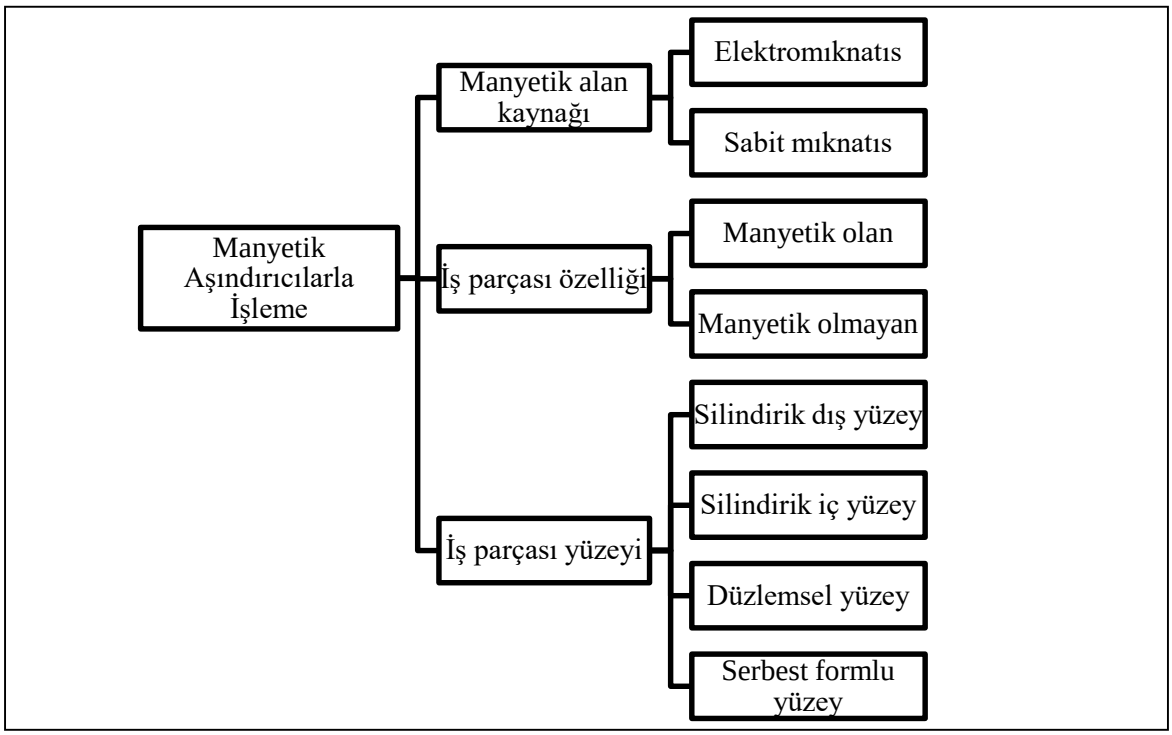
MAİ yöntemi, işleme kuvvetlerinin bir manyetik alan tarafından kontrol edildiği geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde iş parçası, bir manyetik alan kaynağının kuzey ve güney kutupları arasına yerleştirilmektedir. İş parçası ile kutuplar arasında bulunan boşluğa ise manyetik olarak demir esaslı parçacıklar; aşındırıcı olarak Al_2O_3, SiC, B4C, elmas vb. parçacıklardan oluşan bir karışım [manyetik aşındırıcılı fırça takımı (MAFT)] yerleştirilmektedir. İş parçası ve/veya MAFT'ın izafi hareketi neticesinde, manyetik alan etkisinde bulunan MAFT çok noktadan kesme yaparak, içerisinde bulunan aşındırıcı taneciklerin boyutlarına bağlı olarak mikro düzeyde talaş kaldırır. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde; yüzey pürüzlülüğünde azalma, çapakların yok olması gibi geometrik özelliklerde; yüzey altında; gerilim katmanlarının yok olması gibi mekanik ve fiziksel özelliklerde değişiklik meydana gelerek yüzey kalitesi artmakta, yüzey tamlığı sağlanmakta, ürünün hizmet kalitesi ve süresi gelişmektedir.

Yöntemde kullanılan takım esnek olduğu için, silindirik yüzeyler, düzlemsel yüzeyler, formlu yüzeyler ve karmaşık şekilli yüzeyler kolaylıkla işlenebilmektedir. Yöntemin farklı yüzeyler için çalışma prensibi şematik olarak Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. MAİ yönteminin farklı yüzeylerde uygulanışı: a: silindirik dış yüzeyler, b: silindirik iç yüzeyler, c: düzlemsel yüzeyler, d: serbest formlu yüzeyler [35]

MAİ yöntemi, manyetik alan kaynağı, iş parçasının manyetik özelliği ve iş parçası yüzeyi özelliklerine bağlı olarak Şekil 3.2'deki gibi sınıflandırılabilir.

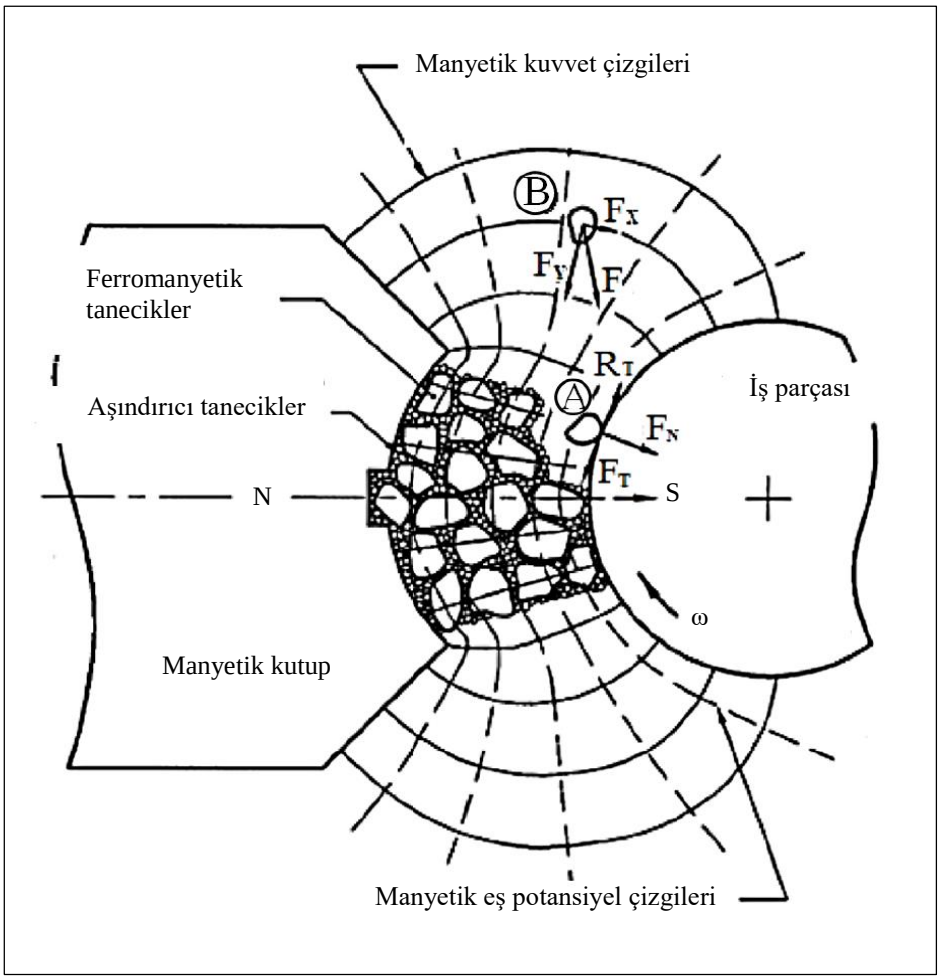


Şekil 3.2. MAİ yönteminin sınıflandırılması

3.2. İşleme Mekanizması

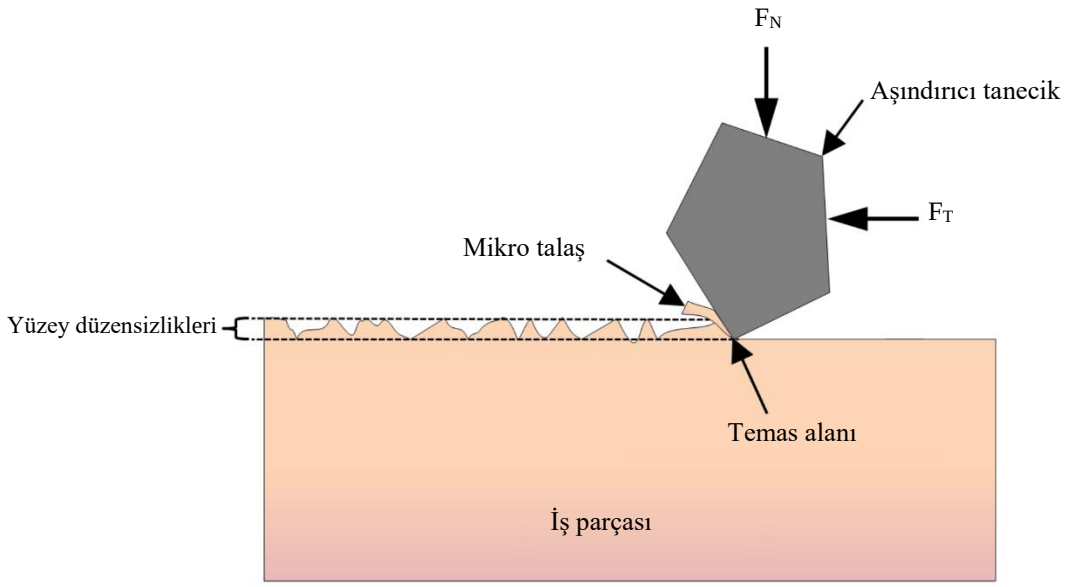
Manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminde manyetik alan etkisi altında bulunan manyetik aşındırıcı tanecikler iş parçası yüzeyine basınç uygulamakta ve iş parçası ve/veya MAFT'ın bağıl hareketi neticesinde yüzeyden talaş kaldırılmaktadır. Yöntemde iki tür kuvvetten söz etmek mümkün olup bunlar; manyetik aşındırıcı tanecikleri bir arada tutan ve taneciklerin iş parçası yüzeyine basınç uygulamasını sağlayan normal kuvvet ve MAFT'ın hareketi neticesinde iş parçasından mikro talaş kaldıran teğetsel kuvvettir [39].

Şekil 3.3'te manyetik aşındırıcı taneciklere etki eden manyetik kuvvetlerin manyetik alan içerisinde nasıl dağıldığı şematik olarak gösterilmektedir [40]. MAİ yönteminin talaş kaldırma mekanizmasını anlamak için, manyetik kutup ve iş parçası arasındaki manyetik alanın dağılımına yoğunlaşmak gerekmektedir.



Şekil 3.3. MAİ yönteminde manyetik alan dağılımı ve taneciklere etki eden kuvvetler [1]

Manyetik aşındırıcı tanecikler, manyetik kuvvet çizgileri boyunca sıralanarak manyetik kutuplar ve iş parçası arasında esnek bir fırça takımı oluştururlar. Şekil 3.3'te "A" bölgesinde iş parçası yüzeyinin yakınındaki taneciğe normal doğrultuda bir F_N kuvveti etkimektedir. İş parçasının dönmesi neticesinde ise dönme yönüne teğet olacak şekilde bir direnç kuvveti R_T etkimektedir. Direnç kuvvetine ters yönde etki eden ise manyetik alana bağlı olan F_T kuvvetidir. Buradaki teğetsel kuvvet F_T, manyetik aşındırıcı taneciklerin işleme bölgesinde kalmasını sağlayarak mikro talaş kaldırmak için direnç kuvvetinden büyük olmalıdır. Şekil 3.4'te kesme işlemi sırasında taneciklere etki eden kuvvetler şematik olarak gösterilmektedir. MAİ yönteminde, geleneksel aşındırıcılı işleme yöntemlerinde olduğu gibi iş parçası yüzeyindeki pürüz tepeleri mikro talaşlar şeklinde giderilmektedir.



Şekil 3.4. MAİ yönteminde talaş kaldırma sırasında aşındırıcı taneciklere etki eden kuvvetler [35]

3.2.1. Tek bir manyetik aşındırıcı taneciğin kuvvet analizi

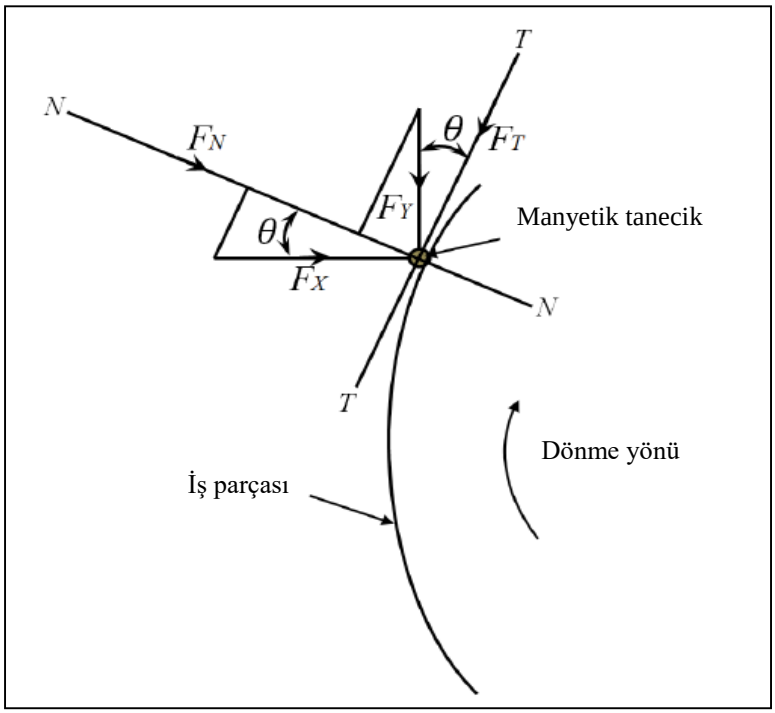
Şekil 3.5 MAİ yönteminde bir tek manyetik aşındırıcı taneciğe etki eden kuvvetler şematik olarak gösterilmektedir. İşleme bölgesi dışında "B" alanında bulunan bir taneciğe F_x ve F_y kuvvetleri etkimektedir (Bkz. Şekil 3.3). F_x kuvveti manyetik kuvvet çizgileri boyunca etki ederek aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine basınç uygulamasını sağlarken F_y ise eş potansiyel çizgileri boyunca etkimektedir. Bu iki kuvvet;

$$F_X = \chi^{FP} \mu_0 V H \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) \quad (3.1)$$

$$F_y = \chi^{FP} \mu_0 V H \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right) \quad (3.2)$$

şeklinde tanımlanmıştır [41].

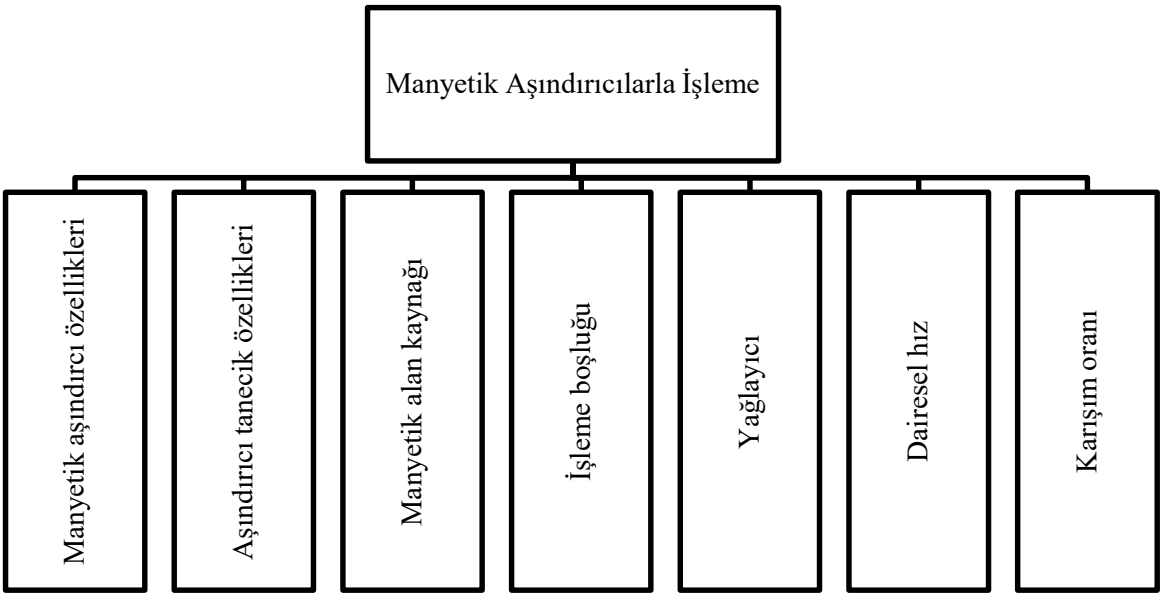
Burada *x*, manyetik kuvvet çizgilerinin doğrultusunu; *y*, eş potansiyel çizgilerinin doğrultusunu; χ^{FP} manyetik aşındırıcı taneciğin manyetik hassasiyetini; μ_0, havanın manyetik geçirgenlik katsayısını *H* işleme bölgesindeki manyetik alan yoğunluğunu; *V* manyetik parçacıkların hacmini ifade etmektedir.



Şekil 3.5. MAİ yönteminde manyetik tanecik üzerine etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi [42]

3.3. Yöntemi Etkileyen Parametreler

MAİ yöntemini etkileyen parametreler toplu olarak Şekil 3.6 da görülmektedir.



Şekil 3.6. MAİ yöntemini etkileyen parametreler

3.3.1. Manyetik aşındırıcı özellikleri

Aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine etkimesini sağlayan manyetik aşındırıcı tanecikler dağınık ya da aşındırıcı taneciklerle bir arada bulunabilirler [43]. Bir arada bulunan tanecikler manyetik taneciklerin ve aşındırıcı taneciklerin sinterlenmesi ile hazırlanırken dağınık aşındırıcılar az miktarda bir yağlayıcı ile birlikte mekanik olarak karıştırılmaktadır [44]. Bazı deneysel çalışmalar dağınık aşındırıcıların bir arada bulunan aşındırıcılara kıyasla daha fazla TKO değerlerine ve daha iyi yüzey kalitesi değerlerine sahip olduğunu göstermiştir [45].

3.3.2. Aşındırıcı tanecik özellikleri

Aşındırıcı tanecikler MAİ yönteminde doğrudan iş parçası yüzeyinin kesilmesi işlemi ile ilişkili oldukları için oldukça önemli bir parametre olarak görev almaktadır. Yöntemde kullanılan MAFT, aşındırıcı olarak elmas (PCD), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), kübik bor nitrür (CBN), karbon nano tüp (CNT) vb. malzemeler kullanılırken; manyetik tanecik olarak ise demir esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Çizelge 3.1'de bazı

aşındırıcılara ait mekanik özellikler görülmektedir.

Çizelge 3.1. MAİ yönteminde kullanılan bazı aşındırıcıların özellikleri [45–47]

Aşındırıcı Cinsi	Termal İletkenlik (W/mK)	Elastik Modül (GPa)	Basma Dayanımı (GPa)
CBN	100-200	370-400	3,3-4,0
SiC	70-110	210-400	2,9-4,0
Al_2O_3	30	380	1,5
PCD	350	1050	4,0
CNT	1800-6600	600-1200	20-50

Çizelge incelendiğinde CNT aşındırıcıların üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ve bunu sırasıyla PCD, CBN, SiC ve Al_2O_3 aşındırıcıların takip ettiği görülmektedir. Öte yandan aşındırıcı taneciklerin boyutları da yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Aşındırıcı taneciklerin boyutlarının küçülmesi yüzey kalitesinde artışa neden olacaktır.

3.3.3. Manyetik alan kaynağı

MAİ yönteminde manyetik alan kaynağı olarak sabit mıknatıslar ve doğru veya alternatif akımla çalışan elektro mıknatıslar kullanılmaktadır. Kullanılacak manyetik alan kaynağı genellikle iş parçası boyutlarıyla ilişkili olup özellikle kılcal boru ve mıknatısların dönmesinin gerekli olduğu düzlemsel yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlenmesinde sabit mıknatıslar kullanılmaktadır. Elektromıknatıslar ise ısınma ve kablo dolaşması gibi dezavantajlara sahip olmakla birlikte özellikle manyetik alan şiddetinin anlık olarak kontrol edilebilmesi gibi avantajları barındırmaktadır.

3.3.4. İşleme boşluğu

İş parçası ile manyetik kutup arasındaki boşluk olarak tanımlanan işleme boşluğundaki azalış talaş kaldırma oranında artışa sebep olmaktadır. İşleme boşluğunun azalmasıyla MAFT daha rijit hale gelerek iş parçası yüzeyinde daha derin kesmeler yaparak birim zamanda daha fazla talaş kaldırma işlemi yapacaktır.

3.3.5. Yağlayıcı

Yağlayıcı, diğer aşındırıcılı işleme yöntemlerinde olduğu gibi MAİ yönteminde de büyük öneme sahiptir. Sürtünme kuvvetlerinin azaltılmasının yanı sıra işleme sırasında açığa çıkan ısıyı uzaklaştırarak soğutma görevi de yapan yağlayıcı, aşındırıcı ve manyetik taneciklerin karıştırılması esnasında karışıma eklenmektedir [48].

3.3.6. Dairesel hız

MAİ yönteminde dairesel hızın artmasıyla birim zamanda alınan yol artacağı için talaş kaldırma oranında bir artış meydana gelecektir. Ancak dairesel hızdaki artış aynı zamanda taneciklere etkiyen merkezcil kuvveti de artıracağı için bir noktadan sonra manyetik kuvvet tanecikleri bir arada tutma konusunda yeterli olmayacak ve taneciklerin savrulmasına sebep olacaktır. Bu sebeple MAİ yönteminde dairesel hız parametresi büyük önem arz etmektedir.

3.3.7. Karışım oranı

MAFT içerisinde bulunan aşındırıcı miktarı işlem performansı açısından önem arz etmektedir. Aşındırıcı taneciklerin olması gerekenden daha az olması durumunda, aşındırıcı tanecikler manyetik tozlar arasında sıkışıp yüzeye etki etmeyebilirler. Aşındırıcı taneciklerin olması gerekenden daha fazla olduğu durumlarda ise manyetik kuvvet yeteri kadar fazla olmayacak ve aşındırıcı taneciklerin yüzeye batmasını sağlayamayacaktır.

3.4. MAİ Yönteminin Avantajları

MAİ yönteminde kesme kuvvetlerinin oldukça düşük olması ve dağınık aşındırıcıların kullanılması iş parçası yüzeyinde oluşabilecek hasarları en aza indirgemektedir. MAİ yönteminin diğer aşındırıcılı işleme yöntemlerine kıyasla avantajları ise aşağıda listelenmiştir.

- Boru iç ve dış yüzeyi veya konik ve silindirik yüzeye sahip parçaların birden fazla yüzeyinin eş zamanlı olarak işlenebilmesi MAİ yöntemiyle mümkündür.
- MAİ yönteminde talaş kaldırma düşük enerji ve aşındırıcı tüketimi ile gerçekleşmektedir.
- MAİ yöntemi ekolojik olarak güvenli bir yöntemdir.

- MAİ yöntemi, uygulanması kolay bir yöntem olup iş parçası geometrisine göre uygun bir takım tezgâhı aracılığıyla devreye alınabilmektedir.
- Alüminyum ve bakır gibi demir esaslı olmayan malzemeler dahi MAİ yöntemiyle kolaylıkla işlenebilmektedir.

4. KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1. Elektro Erozyon Yöntemiyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Elektro erozyon yöntemiyle yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların işlem performansını artırmaya ve işleme sonrası oluşabilecek hasarları azaltmaya yönelik ultrasonik titreşim kullanmak, kuru ortamda işleme yapmak ve toz ilavesi yapmak gibi farklı yöntemleri içeren çalışmalar yapıldığı tespit edilmiştir. Bu bölümde, elektro erozyon üzerine yapılan çalışmalar yüzey kalitesi ve beyaz tabaka kalınlığı açısından değerlendirilecektir.

Araştırmacılar elektro erozyon yönteminin işleme performansını artırmak amacıyla, elektrota yüksek frekansta titreşim uygulamak suretiyle elektrot ile iş parçası arasındaki basınç değerini değiştirmektedir. Bu şekilde ara bölgede bulunan iş parçası ve takım parçacıklarının daha etkin süpürülmesi sağlanmakta ve beyaz tabaka kalınlığı azalmaktadır [13, 15, 49]. Chen vd. [50] yaptıkları çalışmada Al-Zn-Mg alaşımını ultrasonik destekli EEİ yöntemiyle işlemişlerdir. Çalışmada ultrasonik destekli EEİ yönteminde elde edilen yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin klasik EEİ yönteminde elde edilen yüzeylere kıyasla daha düşük olduğu ve özellikle yüksek akım değerlerinde ultrasonik desteğinin yüzey kalitesini daha olumlu etkilediği görülmüştür. Geleneksel EEİ, kriyojenik EEİ ve ultrasonik destekli kriyojenik EEİ yöntemlerinin kıyaslandığı bir çalışmada ise en düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin ultrasonik destekli kriyojenik yönteminde elde edildiği tespit edilmiştir [51]. Goiogana vd. [52] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise ultrasonik desteğinin yüzey pürüzlülük değerlerine olumlu sonuçlarının yanı sıra işlenmiş yüzeylerin daha homojen bir yapıda olduğu raporlanmıştır.

Geleneksel EEİ yöntemine kıyasla daha çevreci ve az maliyetli olan kuru elektro erozyon yöntemiyle yapılan çalışmalar incelendiğinde geleneksel yönteme kıyasla daha kaliteli yüzeyler elde edildiği görülmüştür. İş parçası yüzeyinde herhangi bir korozyon oluşmaması ve tel titreşimlerinin daha az olması yöntemi avantajlı hale getirmektedir. Yöntemin bir bitirme işlemi olarak kullanılabileceği belirtilmesine rağmen [53], yapılan çalışmalarda bu yöntemde talaş kaldırma oranının geleneksel erozyon yöntemine kıyasla daha az olduğu ve işlenmiş yüzeylerde çizikler şeklinde hasarların oluştuğu ancak kalıntı gerilme, beyaz tabaka ve ısıdan etkilenen bölgelerin daha az miktarda olduğu tespit edilmiştir [54–56].

Elektro erozyon yönteminde, dielektrik sıvı içerisine aşındırıcı özellikli tozların ilave edilmesi suretiyle yöntemin veriminin artırılmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Bu yöntemle, kullanılan tozların cinsine bağlı olarak oldukça yüksek kaliteli yüzeylerin elde edildiği tespit edilmiştir.

Wong vd. [57], yaptıkları çalışmada farklı tane boyutlarına sahip farklı toz parçacıklarını kullanarak SKH-51 ve SKH-54 iş parçalarını elektro erozyon yöntemi ile işlemişlerdir. Çalışma sonucunda alüminyum tozlarının kullanıldığı deneylerde ayna yüzeye yakın yüzeyler elde edildiği tespit edilmiştir. Pecas ve Henriques [58], farklı boyutlardaki elektrotlar kullandıkları çalışmalarında dieletrik sıvı içerisine silisyum tozları ilave etmek suretiyle iş parçası ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini 0,09 µm değerine kadar düşürmeyi başarmışlardır.

Klocke vd. [59], çalışmalarında Inconel 718 alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde toz parçacıkların ilavesinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Alüminyum ve silisyum tozlarının kullanıldığı çalışmada en düşük beyaz tabaka kalınlığının alüminyum tozlarının kullanıldığı deneylerde elde edildiği görülmüştür. Inconel 825 süper alaşımının kullanıldığı diğer bir çalışmada ise [17], Al_2O_3 tozlarının kullanılması ile EEİ işleminde yüzey kalitesinin arttığı raporlanmıştır. Geleneksel elektro erozyon işleminde iş parçası yüzeyinde oluşan 5-8 µm kalınlığındaki beyaz tabakanın alüminyum toz ilaveli elektro erozyon yönteminde 1-2 µm aralığına düştüğü ise yapılan diğer bir çalışmada raporlanmıştır [60]. Kolli ve Kumar [19], çalışmalarında Ti6Al4V alaşımını EEİ yöntemiyle işlemişlerdir. Çalışmada dielektrik sıvı içerisine B4C tozları ve bu tozların dielektrik sıvı içerisinde dağılmasını sağlayacak sürfektan madde ilave edilmiş ve işleme parametrelerinin yüzey kalitesi ve beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Varyans analizi yöntemiyle incelenen sonuçlarda toz ve sürfektan konsantrasyonunun yüzey kalitesi ve beyaz tabaka kalınlığı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İlgili Yapılan Çalışmalar

MAİ yöntemi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde yöntemin ilk olarak 1929 [61] ve 1940 [62] yıllarında uygulamaya geçtiği görülmektedir. Ancak yöntemin pratik hale gelmesi 1980'li yıllara tekabül etmektedir. Bu tarihten günümüze kadar olan süreçte konuyla ilgili

çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış olup bu çalışmaların başlıcaları bu bölümde özetlenmiştir.

Yapılan araştırmalar, MAİ yönteminin, silindirik, düzlemsel ve serbest formlu yüzeylerde başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir.

Silindirik yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlendiği çalışmalar incelendiğinde, MAİ yönteminin medikal alanda kullanılan kılcal borulardan günlük hayatta kullanılan ortalama boyutlardaki borulara kadar geniş bir alanda uygulama şansı bulduğu görülmektedir.

Kang vd. [63] çalışmalarında Ø 1,27 × Ø 1,06 × 100 mm ölçülerindeki SUS 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş kılcal boruların iç yüzeylerini MAİ yöntemi aracılığıyla işlemişlerdir. Nteziyaremye vd. [64] ise göğüs kanseri biyopsi uygulamalarında kullanılan SUS 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeden üretilen iğnelerin (1,27 mm dış çap, 1,14 mm iç çap) iç ve dış yüzeylerini eş zamanlı olarak işlemişlerdir.

Li vd. [65] Ø30 × Ø26 × 50 mm boyutlarındaki Al 6061 alüminyum alaşımından imal edilmiş boruların iç yüzeyleri geliştirmiş oldukları macun kıvamındaki aşındırıcı karışımı ile işlemişlerdir. Çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde en fazla %96,67 oranında iyileşme tespit edilirken, talaş kaldırma oranı değeri de en fazla 1,916 mg/sn olarak tespit edilmiştir. Macun kıvamında aşındırıcı kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada ise araştırmacılar C1220 bakır malzemeden üretilmiş iş parçası kullanarak araştırmalarını yapmışlardır. Elmas aşındırıcıların ve elektromıknatısların kullanıldığı çalışma sonucunda aşındırıcı boyutu ve akım miktarının düşük olduğu deneylerde daha pürüzsüz yüzeyler elde edildiği tespit edilmiştir.

Kajal vd. [66] tarafından yapılan bir çalışmada ise bir tabanca namlusunun iç yüzeyi MAİ yöntemiyle işlenerek 600-900 nm aralığında değişen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 150 nm değerine kadar düşürülmüştür.

Yamaguchi vd. [67], çalışmalarında bir tür seramik olan alümina malzemeden üretilen iş parçalarını MAİ yöntemiyle işlemişler ve uygun işleme parametreleri neticesinde 0,02 μm ortalama yüzey pürüzlülük değerinde yüzey kalitesine erişmişlerdir.

Düzlemsel yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlenmesi üzerine de yapılan çok sayıda çalışma bulunmakta olup bu çalışmalar genellikle işleme parametrelerinin yüzey kalitesi ve talaş kaldırma oranındaki etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Mulik vd. [68] çalışmalarında AISI 52100 sertleştirilmiş çelik plakadan imal edilmiş iş parçalarının yüzeylerini MAİ yöntemiyle işlemişlerdir. Çalışma sonucunda en düşük 51 nm ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edildiği ve bu değerin 120 sn'lik işleme sonrasında edinildiği bildirilmiştir.

Wu vd. [69], MAİ yönteminde işleme verimi ve yüzey hassasiyetini artırmak amacıyla alternatif akım kaynaklı elektromıknatıslar kullanmışlardır. C5210P pirinç malzemeden üretilen iş parçalarının kullanıldığı çalışmada işleme süresinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 0,55 μm değerlerinden 0,18 μm değerlerine düşmüştür.

Jiao vd. [70], manyetik kutup sisteminin takip edeceği takım yolunun yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemek için yaptıkları çalışmada farklı takım yollarına sahip işlemlerin sonucunda elde edilen yüzey kalitelerini karşılaştırmışlardır. SUS 304 östenitik paslanmaz çelik plakaların kullanıldığı deneylerde farklı takım yollarının takip edilmesiyle yüzey kalitesinde geleneksel MAİ yöntemine kıyasla %68'lik bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

Kanish vd. [71], tarafından yapılan bir çalışmada ise MAİ yöntemi ile işlenmiş SS316L östenitik paslanamaz çelik iş parçasının aşınma performansı geleneksel taşlama yöntemi ile işlenmiş iş parçasıyla kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda MAİ yönteminin aşınma performansı bakımından geleneksel taşlama yöntemine kıyasla 3 kat daha üstün olduğu görülmüştür.

Kim vd. [72], yaptıkları çalışmada, delme işlemi sonrasında iş parçası yüzeyinde kalan çapakların kaldırılması amacıyla kullandıkları MAİ yönteminin, magnezyum plakalarda çapakları yüzeyin orijinal yapısına zarar vermeden kaldıran kullanışlı bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde serbest formlu yüzeyler üzerine yapılan çalışmalar da mevcut olup bu çalışmalarda genellikle küresel şekilli manyetik kutup sistemleri kullanılmaktadır.

Lin vd. [73] tarafından yapılan çalışmada serbest formlu yüzey yapısına sahip SUS304 malzemesinden üretilmiş iş parçası bilgisayar kontrollü bir işleme merkezi ile MAİ yöntemiyle, kaba ve ince işleme olmak üzere 2 kademeli olarak işlenmiştir. Deneyler öncesinde iş parçasının sahip olduğu 2,670 µm'lik Rmax değeri birinci kademe işleme sonrası 0,158 µm ve ikinci kademe işleme sonrası 0,102 µm değerine düşmüştür.

Vahdati vd. [74] tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise AA 7075 alaşımından imal edilmiş serbest formlu yüzeye sahip iş parçası MAİ yöntemiyle işlenmiş ve işlem sonrasında ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 1,3 µm değerinden 0,08 µm değerine düşürülmüştür.

Öte yandan MAİ yönteminin işleme performansını artırmaya yönelik yapılan hibrit uygulamalar da mevcuttur. İş parçasına ve/veya manyetik takıma titreşim uygulamak, işleme bölgesine kimyasal çözücüler ilave etmek ya da bu uygulamaların birlikte kombinasyonlarını uygulamak MAİ yönteminin işleme performansını artırmaktadır.

Yin vd. [75] magnezyum alaşımının delinmesi sonucu meydana gelen çapakların kaldırılması için MAİ yöntemini kullanmışlardır. Yöntemin verimini artırmak amacıyla iş parçasına dikey eksende titreşim uygulayan araştırmacılar bu uygulamanın geleneksel MAİ yöntemine kıyasla daha verimli olduğunu bildirmişlerdir.

Mulik vd. [76] sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğini ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme (UDMAİ) yöntemiyle işlemiş ve geleneksel MAİ yöntemiyle karşılaştırmışlardır. İş parçasına yatay eksende 20 kHz frekans değerinde titreşim uygulanan yöntemde aşındırıcı olarak ise SiC tanecikleri kullanılmıştır. Karşılaştırma sonucu UDMAİ yönteminin MAİ yöntemine nazaran daha kaliteli yüzeyler meydana getirdiği görülmüştür.

Misra vd. [77, 78] yapmış oldukları çalışmalarda UDMAİ yönteminde yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı değerleri için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model neticesinde yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı değerlerinin elektromanyetik kuvvet, işleme boşluğu, elektromıknatısların dairesel hızı, ultrasonik titreşimin frekans ve genlik değeri ve iş parçasının sertlik ve başlangıç yüzey pürüzlülük değeri ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Liu vd. [79] Al 6061 alaşımından imal edilmiş levhaları Na_3PO_4 ve Na_2CO_3 çözeltileri içerisinde MAİ yöntemiyle işlemişlerdir. Çalışa sonucunda kimyasal destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminin (KDMAİ) geleneksel MAİ yöntemine kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha yüksek talaş kaldırma oranı değerlerine sahip olduğu bildirilmiştir.

Sihag vd. [80] MAİ yönteminin verimini artırmak amacıyla işleme sürecini H_2O_2 çözeltisi içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Böylece iş parçası olarak seçilen tungsten malzemesi üzerinde pasif bir oksit tabakası oluşmakta ve oluşan bu daha yumuşak tabaka ile birlikte iş parçası malzemesinin kaldırılması da kolaylaşmaktadır.

Pandey vd. [81] yapmış oldukları çalışmada 3 farklı çözelti kullanarak silikon plakaları KDMAİ yöntemiyle işlemişlerdir. Çalışmada işleme parametrelerinin yöntem üzerindeki etkileri ANOVA yöntemiyle irdelenmiş ve optimum işleme parametreleri Matlab paket programı aracılığıyla belirlenmiştir.

Singh vd. [82, 83] çalışmalarında Inconel 625 nikel alaşımından imal edilmiş boruların KDMAİ yöntemiyle işlenmesi neticesinde işleme parametrelerinin iç dairesellik değerlerini ve talaş kaldırma oranı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda uygun parametrelerle iç dairesellik değerinin %32 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Singh vd. [84] yapmış oldukları çalışmada UDMAİ yöntemini elektrolitik işleme yöntemi ile birleştirmiş ve işlem sonuçlarını UDMAİ yöntemiyle kıyaslamışlardır. Elektrolitik çözelti olarak $NaNO_3$, iş parçası olarak SS 316L östenitik paslanmaz çelik kullanılan çalışmada elektrolitik destekli UDMAİ yönteminin UDMAİ yöntemine kıyasla daha verimli olduğu bildirilmiştir.

Sihag vd. [85] çalışmalarında UDMAİ yöntemi ile kimyasal işleme yöntemini birleştirmek suretiyle tungsten iş parçasını H_2O_2 çözeltisi içerisinde işlemişlerdir. Çalışma sonucunda kimyasal-ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminin (KUDMAİ) UDMAİ yöntemine kıyasla daha kaliteli yüzeyler ürettiği ve işleme süresini kısalttığı tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının EEİ işlemi ile işlenmesi neticesinde yüzey kalitesinin artırılmasına yönelik olarak manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmayla birlikte literatürdeki bu açığın kapatılarak gelecek çalışmalara bir yol gösterici olunması amaçlanmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışmanın Amacı

Titanyum ve alaşımları, sahip oldukları yüksek dayanım, düşük yoğunluk, üstün termal ve korozyon direnci ve biyo-uyumluluk gibi özellikleri sayesinde, özellikle havacılık, otomotiv ve medikal endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Ancak titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında bir takım sorunlarla karşılaşılmaktadır. Geleneksel talaşlı imalat sırasında, artan sıcaklıkla birlikte iş parçası ile kesici takım arasında kimyasal tepkimeler gerçekleşmekte ve sonuç olarak iş parçası kesici takımın yüzeyine yapışmakta ve yüzeyin kalitesini düşürmektedir. Bu sebeple, titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde genellikle geleneksel olmayan imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan yöntemlerden bir tanesi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir.

EEİ yöntemi, elektriksel iletkenliğe sahip olan iş parçası yüzeyinden, iş parçasının mekanik özelliklerinden bağımsız olarak talaş kaldıran bir geleneksel olmayan işleme yöntemidir. Yöntemde iş parçası yüzeyi elektrik akımı aracılığıyla yerel olarak ergitilmekte/buharlaştırılmakta ve çok sayıda tekrarlayan bu süreç sonucunda iş parçası yüzeyi işlenmektedir.

EEİ ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılgan bir artık tabaka oluşmakta ve bu tabakada bulunan kılcal çatlaklar, artık gerilmeler ve yeniden katılaşmış eriyikler malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple EEİ işlemi sonrası oluşan bu olumsuz yapıları ortadan kaldırmak için ikinci bir yüzey iyileştirme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi kolay uygulanabilirliği, esnek yapısı, mikro talaş kaldırma ve daha düşük kesme kuvvetleri gibi özelliklerinden dolayı, EEİ sonrasında oluşan artık tabakanın kaldırılmasında tercih edilebilir bir yöntemdir. MAİ yönteminde, demir esaslı manyetik tozlar ve aşındırıcılardan oluşan bir karışım kesici takım olarak kullanılmaktadır. İş parçası ve/veya takımın izafi hareketi neticesinde takım, çok noktadan kesme yapan bir kesici gibi davranır. Manyetik alanın şiddeti, esnek takım ile işlenecek yüzey arasındaki sürtünme kuvvetini yendiğinde yüzeyden talaş kaldırılmaktadır.

Bu çalışmada bir EEİ yöntemi olan tel erozyon ile işlenmiş Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kalitelerinin MAİ yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MAİ yönteminde, aşındırıcı boyutu, devir sayısı, işleme süresi ve manyetik alan miktarı parametreleri farklı seviyelerde değiştirilerek işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca sisteme ultrasonik titreşimler vermek suretiyle işlem performansı artırılmıştır. MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPİO) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Yüzeyi iyileştirilmiş numuneler taramalı elektron mikroskopu (SEM) aracılığıyla incelenmiş, yüzey morfolojisi ve artık tabaka kalınlıkları irdelenmiştir. Numunelerden alınan kesit boyunca iş parçası yüzeyinden merkeze doğru mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçümler sonucu ulaşılan verilen doğruluğunun ve hata oranlarının belirlenebilmesi için istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Bunun sonucunda işleme parametrelerinin işlem performansı üzerindeki bireysel ve izafi etkileri deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir. Öte yandan çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak bütün kriterler için en uygun işleme parametreleri tespit edilmiştir. Sonuç olarak MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilecek bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

5.2. Deneysel Tasarım

Temelde, bir şey öğrenmek veya ortaya atılan bir hipotezin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla yapılan gözlemler olarak tanımlanan deneyler, iki işlemin ortalama sonuçlarının karşılaştırılması gibi basit bir uygulama olabileceği gibi özellikle parametre sayısının artmasıyla çok karmaşık bir deneysel tasarım uygulamasını da gerektirebilir [86]. Deneylere başlanmadan önce en fazla bilgiye sahip olunabilecek en az sayıdaki deneyden oluşan bir deneysel tasarım geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanmış olacaktır. Bu amaçla birçok deneysel tasarım yöntemi geliştirilmiştir.

Taguchi deneysel tasarım yöntemi ise bu amaçla geliştirilen bir yöntem olup, hedef değere ulaşmak için ortogonal dizinleri kullanarak kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini de en aza indirgeyerek deney sayısını azaltmaktadır.

Bu çalışmada manyetik aşındırıcılarla işleme deneyleri için L_{18} ve ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemi deneyleri için L_{18} ortogonal dizin olmak üzere

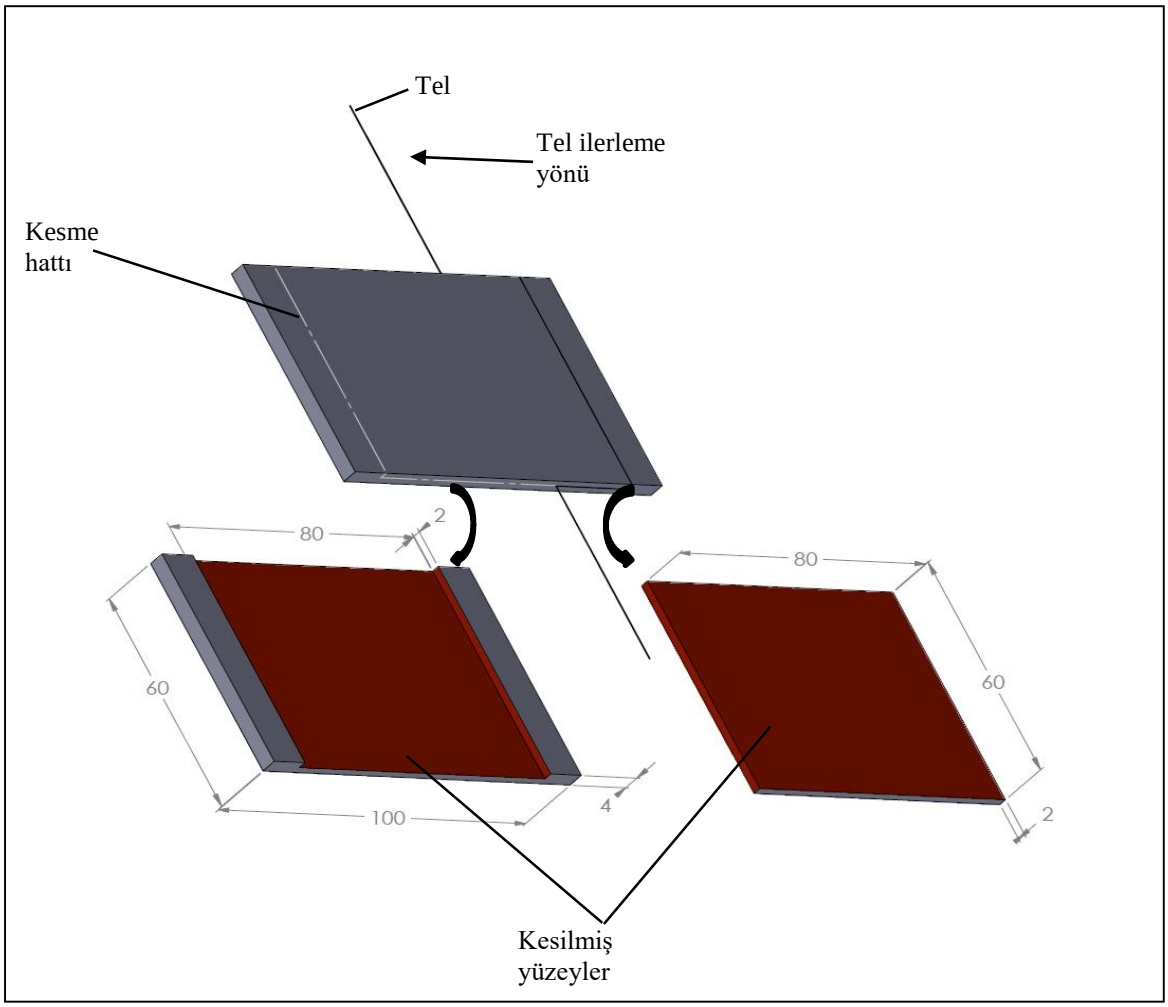
toplam 36 deneyin yapıldığı bir deneysel tasarım belirlenmiştir.

5.3. Numunelerin TEİ Yöntemiyle Kesilmesi

Ticari olarak temin edilmiş olan 4 × 60 × 100 mm^3 boyutlarındaki Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş numuneler Resim 5.1'de fotoğrafı görülen Charmilles Technologies marka Robofil 290 model tel erozyon tezgahı ile her bir numuneden 2 işlenmiş numune elde etmek amacıyla Şekil 5.1'de gösterilen boyutlarda kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında kullanılan parametreler Çizelge 5.1'de görülmektedir. Ti6Al4V alaşımın mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri sırasıyla Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir.



Resim 5.1. Numunelerin kesme işleminin yapıldığı tel erozyon tezgahı



Şekil 5.1. Numunelerin TEİ yöntemiyle kesilmesi

Çizelge 5.1. TEİ işleme parametreleri

Kesme Parametresi	
Tel çapı (mm)	0,25
Vurum süresi (ns)	500
Gerilim (V)	100
Tel ilerleme hızı (m/dk)	5
Dielektrik basıncı (kg/cm^2)	5,5

Çizelge 5.2. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri [87]

Özellik	
Sertlik (HRC)	36
Erime noktası (°C)	1878-1933
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	862-1200
Akma dayanımı (MPa)	848-1080
Yoğunluğu (Mg/m^3)	4,42-4,51
Elastikiyet modülü (GPa)	110-119

Çizelge 5.3. Ti6Al4V alaşımın kimyasal bileşimi [87]

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
%	89,464	6,08	4,02	0,22	0,18	0,02	0,01	0,0053

5.4. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

MAİ yönteminde işlem verimini etkileyen çok sayıda faktör olmasına rağmen bu faktörler arasında işleme performansını en fazla etkileyen parametreler deneysel tasarım içerisinde yer almıştır. Daha önce yapılan çalışmalar ve yapılan ön deneyler neticesinde, manyetik alan kaynağı, aşındırıcı boyutu, işleme süresi ve devir sayısı parametreleri farklı seviyelerde uygulanacak şekilde deney parametreleri Çizelge 5.4'te belirtildiği gibi planlanmıştır. Deneylere ait işleme şartları ise Çizelge 5.5'te verilmiştir. Çizelge 5.5'te verilen koşullar hem MAİ hem de UDMAİ deneylerinde uygulanmak suretiyle toplam 36 deney yapılmıştır.

Çizelge 5.4. MAİ Deney parametreleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme süresi (sn)	60	120	180	240	300	360
Aşındırıcı boyutu (µm)	75	105	150	-	-	-
Devir sayısı (dev/dk)	400	600	800	-	-	-
Manyetik alan (mT)	130	145	170	-	-	-
İşleme boşluğu (mm)	2	-	-	-	-	-
Demir tozu boyutu (µm)	200	-	-	-	-	-
Demir tozu miktarı (g)	3	-	-	-	-	-
SiC aşındırıcı miktarı (g)	1	-	-	-	-	-
Yağlayıcı miktarı (g)	0,2	-	-	-	-	-

Aşındırıcı olarak SiC taneciklerinin kullanıldığı deneylerde ilerleme miktarı sıfır olarak belirlenmiş ve her bir deney neticesinde dairesel bir işlenmiş yüzey elde edilmiştir. Deneyler 60 sn, 120 sn, 180 sn, 240 sn, 300 sn ve 360 sn olmak üzere 6 farklı süre zarfında gerçekleştirilmiş, SiC aşındırıcıların boyutları ise ortalama 75 µm, 105 µm ve 150 µm ortalama tane boyutu değerlerinde; devir sayısı 400 dev/dk, 600 dev/dk, 800 dev/dk olacak şekilde belirlenmiştir. 3 farklı mıknatıs sisteminin tasarlandığı deneylerde bir mıknatıs kutbu boyunca ölçülen manyetik alanların ortalaması 130 mT, 145 mT ve 170 mT olarak hesaplanmıştır. Deneylerde aşındırıcı miktarı/karışım miktarı oranı kütlece 0,25 olacak

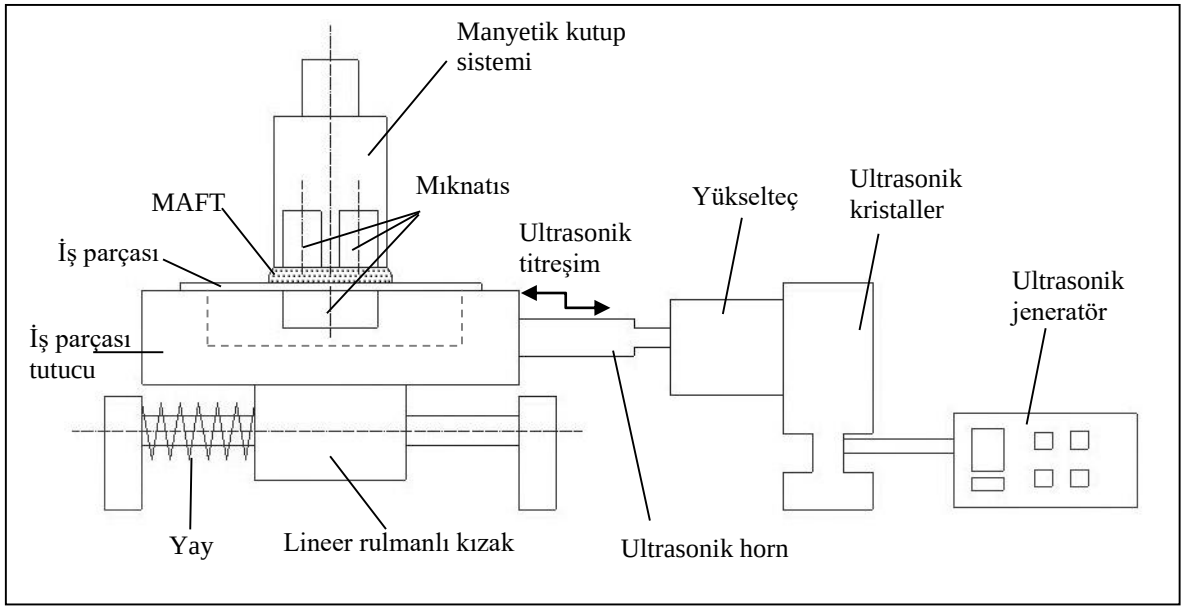
şekilde 3 gr demir tozuna karşılık 1 gr SiC tozu içeren bir karışım hazırlanmıştır. Toplam karışım kütlesinin %5'i oranında SAE 30 yağlayıcı karışıma ilave edilmiştir.

Çizelge 5.5. MAİ deneysel tasarım tablosu

Deney No	İşleme Süresi (sn)	Aşındırıcı Boyutu (μm)	Devir sayısı (dev/dk)	Manyetik Alan (mT)
1	60	75	400	130
2	60	106	600	145
3	60	150	800	170
4	120	75	400	145
5	120	106	600	170
6	120	150	800	130
7	180	75	600	130
8	180	106	800	145
9	180	150	400	170
10	240	75	800	170
11	240	106	400	130
12	240	150	600	145
13	300	75	600	170
14	300	106	800	130
15	300	150	400	145
16	360	75	800	145
17	360	106	400	170
18	360	150	600	130

5.5. Deney Düzeneğinin Tasarımı

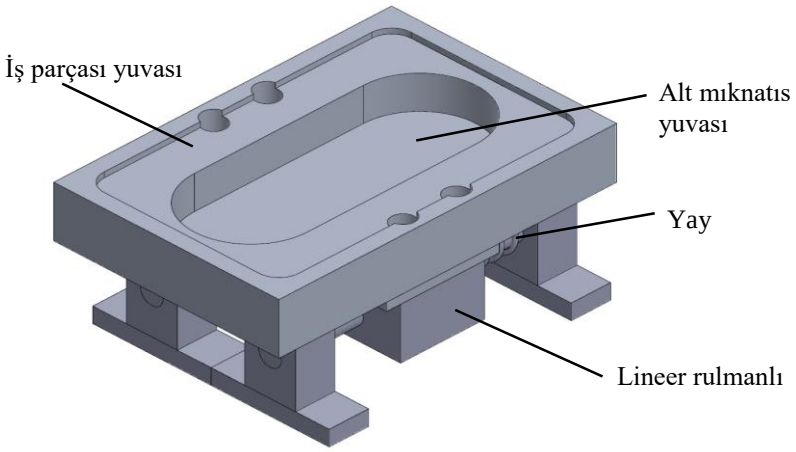
Deneysel çalışmaların yapılması için gerekli olan ekipmanlardan ticari olarak temin edilebilecek ekipmanlar ticari olarak temin edilmiş olup ticari olarak temin edilemeyen özel tasarıma sahip ekipmanlar ise SOLIDWORKS 2015 Paket programı aracılığıyla tasarlanmış ve talaşlı imalat yöntemleriyle imal edilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

5.5.1. İş parçası tutucu imalatı

MAİ deneyleri sırasında iş parçasına yatay yönde ultrasonik titreşimler uygulanacağı için, iş parçasının eksenel olarak hareketine imkân tanıyan yaylı bir iş parçası tutucusu tasarlanmış ve alüminyum alaşımı malzemeden imal edilmiştir (Şekil 5.3). İş parçası tutucusu bağlı bulunduğu lineer rulmanlı kızak vasıtasıyla eksenel hareket yapmakta ve ayrıca iş parçasının hemen altına yerleştirilecek ve manyetik kutuplardan çıkan manyetik alan çizgilerinin iş parçası üzerinden kendisine aktarılmasını sağlayacak bir mıknatıs yuvasını da bünyesinde barındırmaktadır.



Şekil 5.3. İş parçası tutucusu

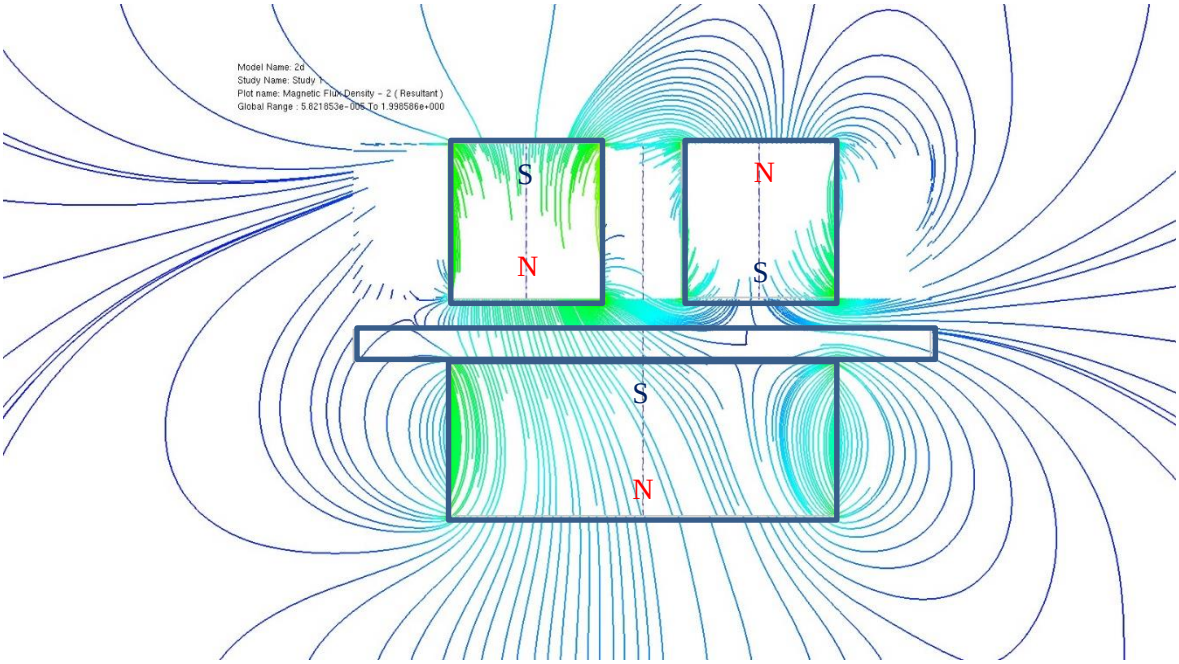
5.5.2. Manyetik kutup imalatı

Deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı manyetik kutup sistemi hazırlanmıştır. Manyetik kutup sistemleri, Ø10 × 10 mm, Ø10 ×15 mm ve Ø10 × 20 mm ölçülerine sahip Nd-Fe-B mıknatıslar kullanılarak, her bir kutup sisteminde 4'er adet mıknatıs olacak şekilde, mıknatısların özel olarak tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla imal edilmiş olan tutuculara yerleştirildikten sonra bir kalıba konularak polyester reçine aracılığıyla Ø30 × 50 mm boyutlarında imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen manyetik kutuplar dik işleme merkezi pensine monte edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir (Resim 5.2).

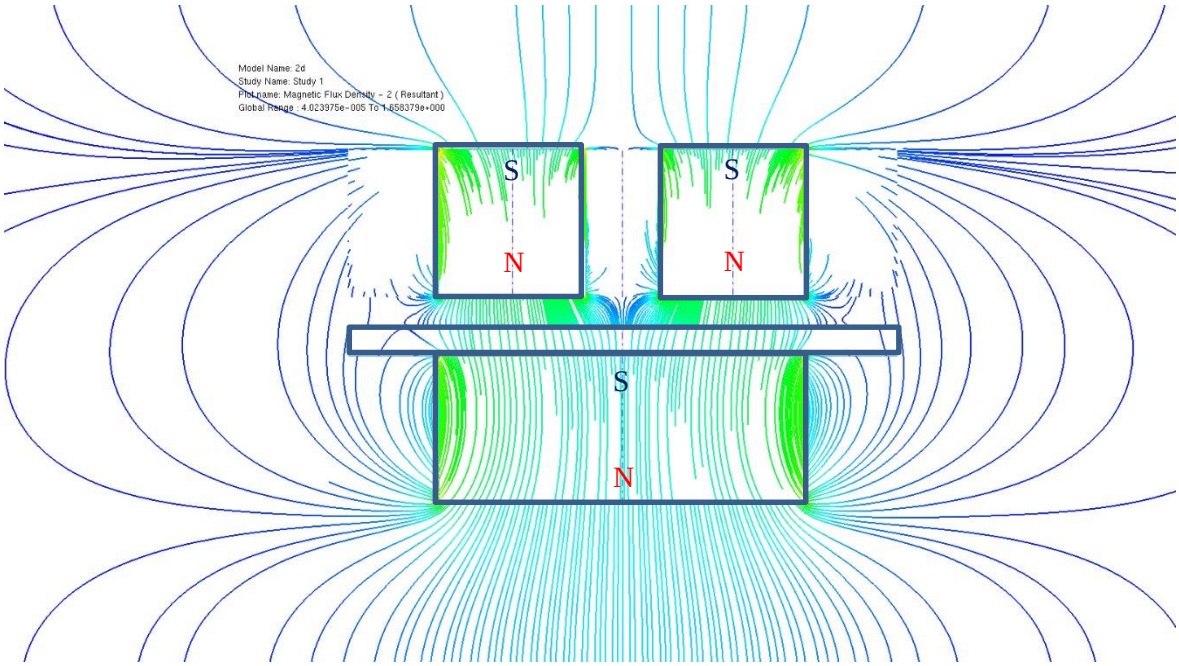


Resim 5.2. Mıknatıs kutup sistemi

Mıknatısların oryantasyonu ise EMWorks 2020 paket programı aracılığıyla yapılan sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 5.4'te NSNS-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sisteminin manyetik alan çizgilerinin dağılımı 2 boyutlu olarak görülmektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan çizgilerinin Şekil 5.5'te görülen NNNN-S oryantasyonuna kıyasla daha düzensiz dağıldığı görülmektedir.



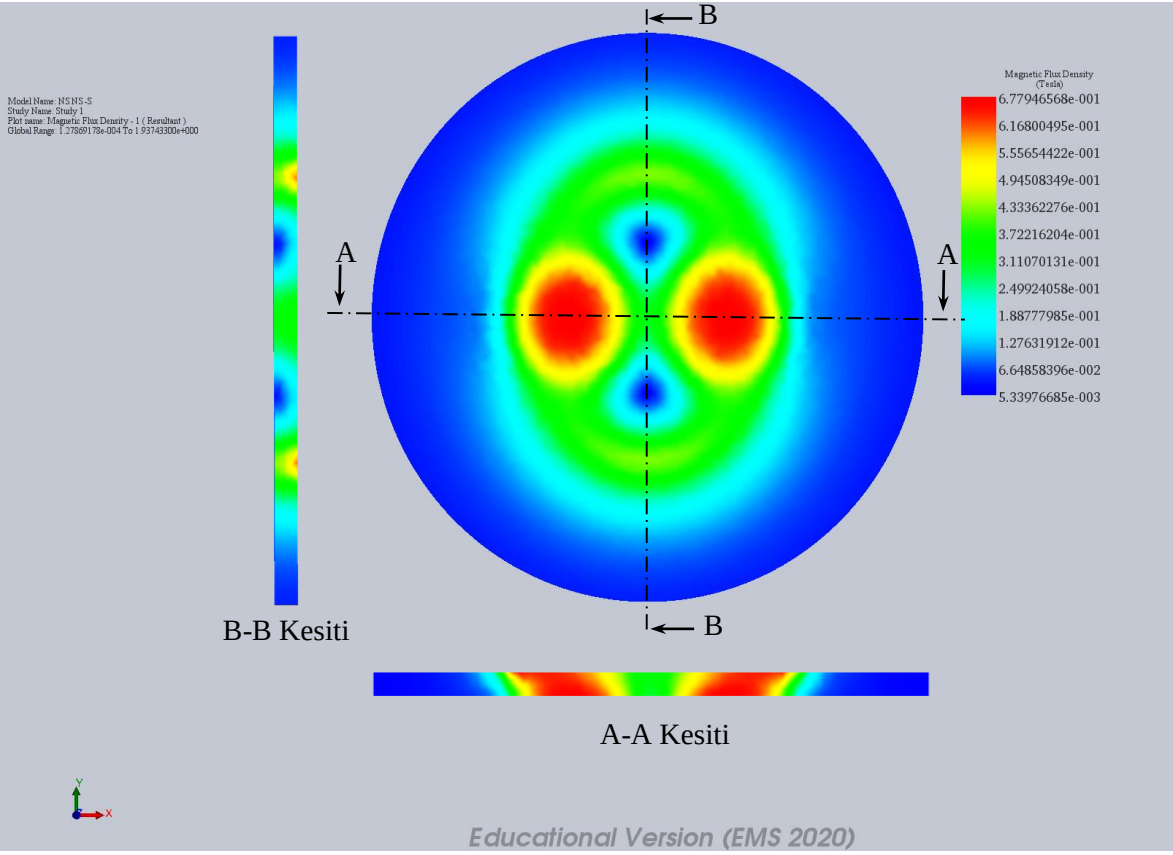
Şekil 5.4. NSNS-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri



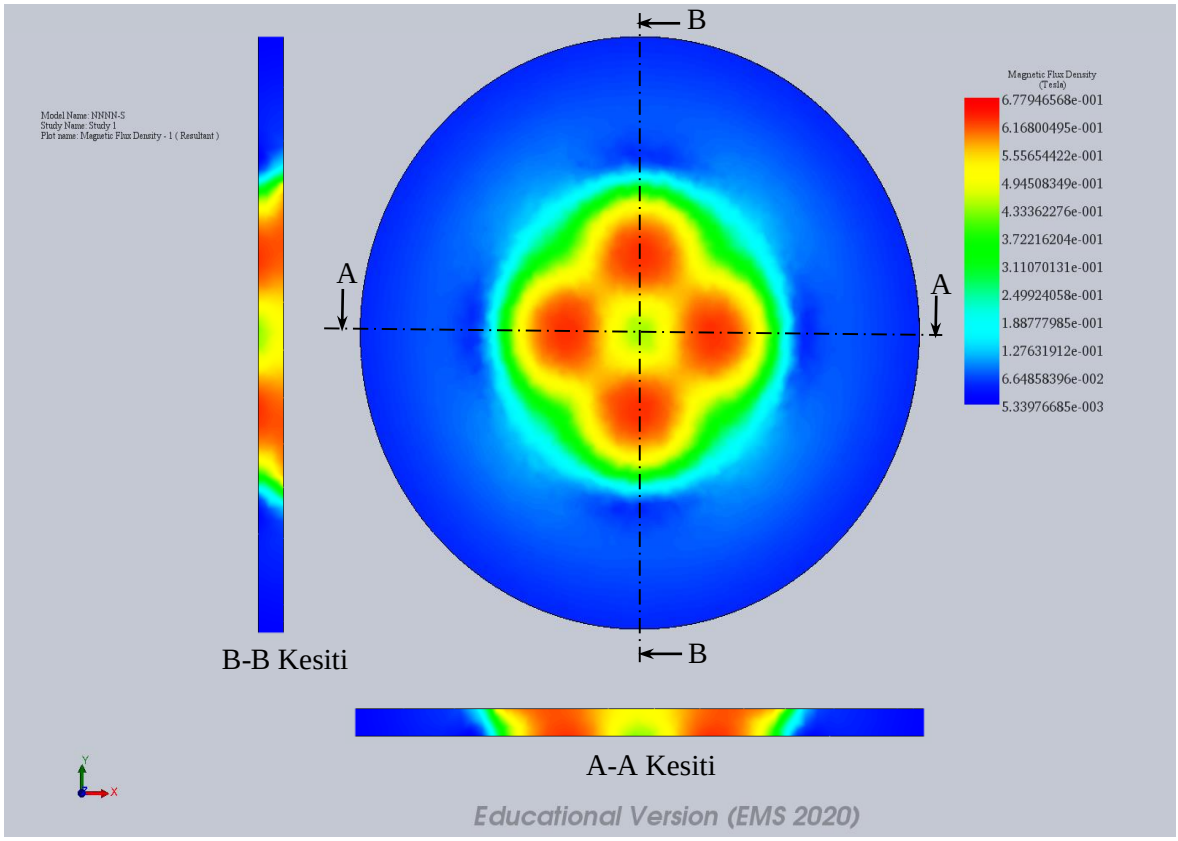
Şekil 5.5. NNNN-S manyetik kutup sistemine ait manyetik alan çizgileri

Şekil 5.6'da ise NSNS-S oryantasyona sahip manyetik kutup sisteminde iş parçası üzerine etki eden manyetik alan yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir. Her ne kadar NSNS-S oryantasyonu NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sistemine kıyasla daha yüksek manyetik alan yoğunluğuna sahip olsa da, NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik

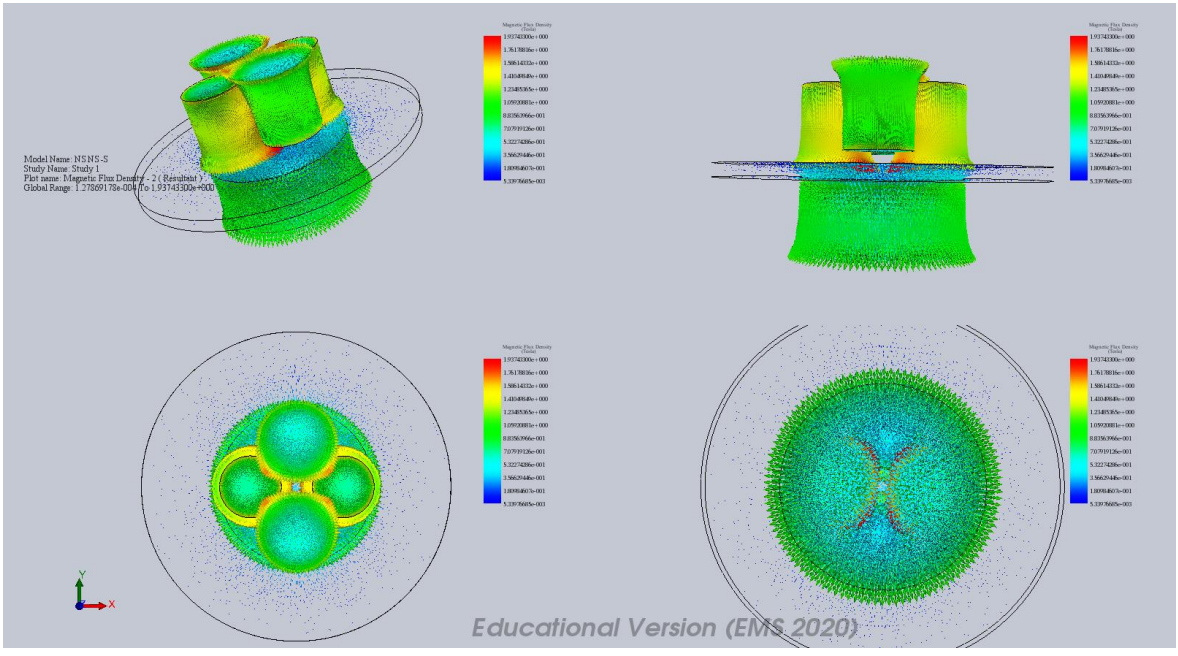
kutup sisteminde yoğunluk daha homojen olarak dağılmıştır (Şekil 5.7). Bu sebeple deneylerde kullanılacak olan manyetik kutup sistemlerinde NNNN-S oryantasyonu tercih edilmiştir. NSNS-S ve NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sistemlerinin sahip oldukları manyetik alan yoğunlukları ise 3 boyutlu vektörler aracılığıyla sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da görülmektedir.



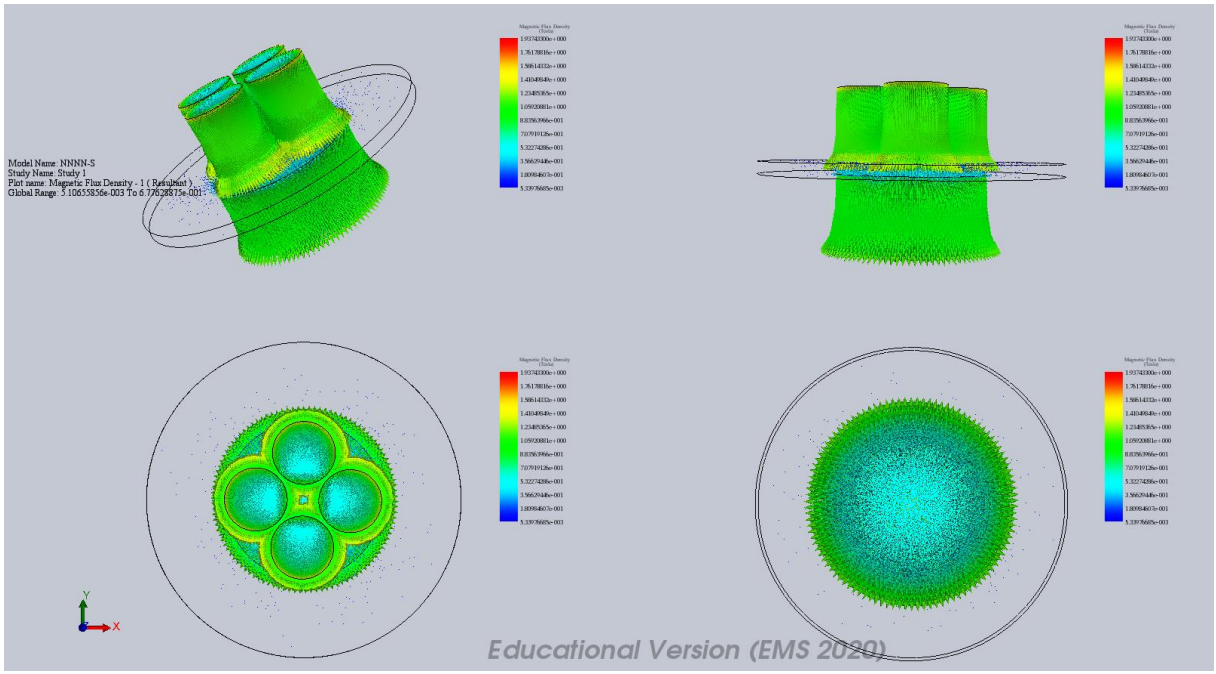
Şekil 5.6. NSNS-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan



Şekil 5.7. NNNN-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde iş parçasına etkiyen manyetik alan

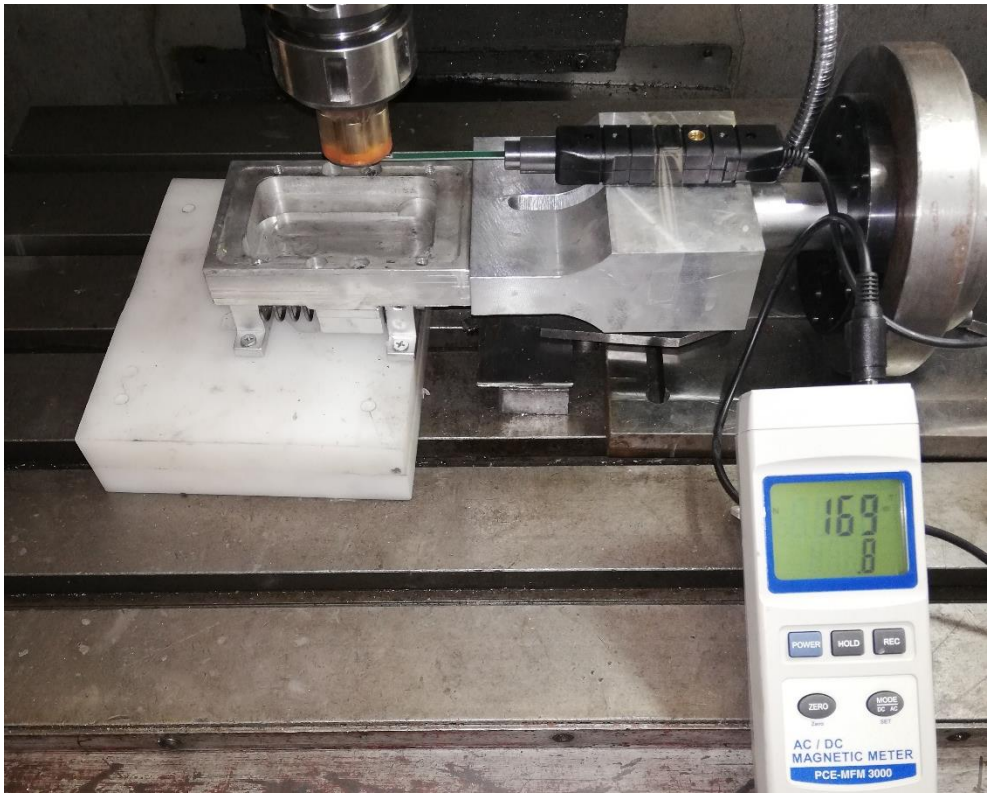


Şekil 5.8. NSNS-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde manyetik alan yoğunluğu

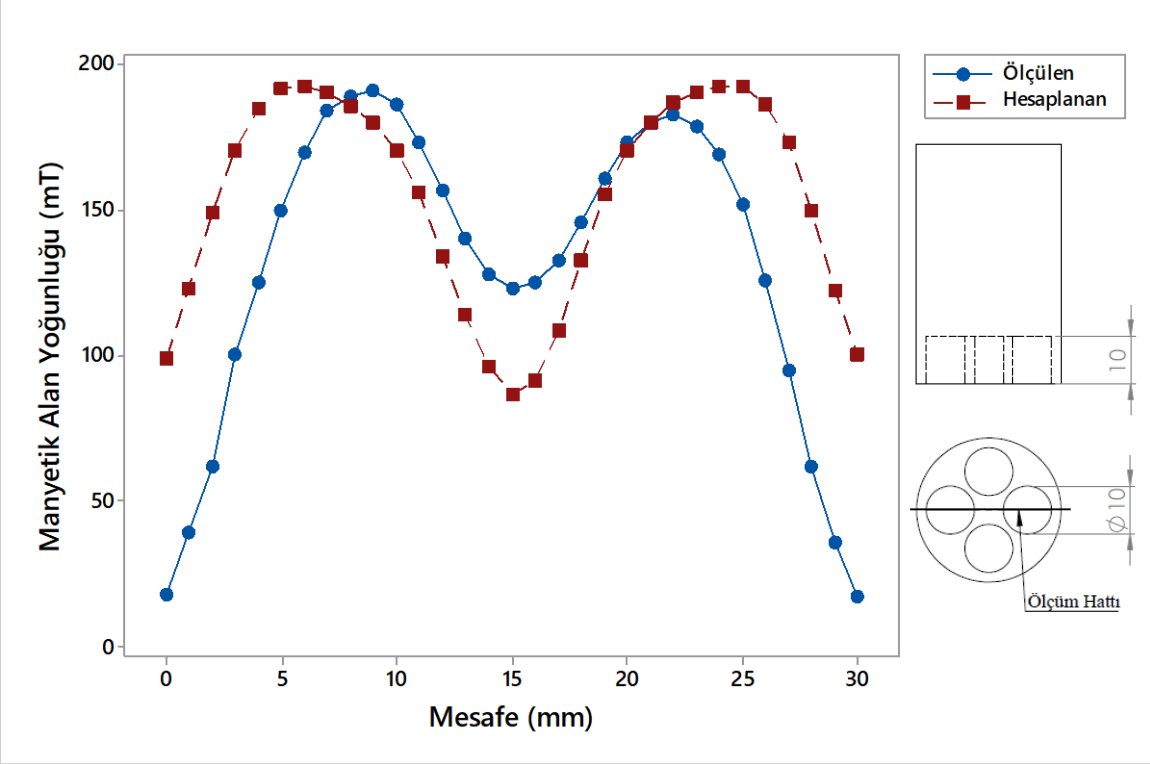


Şekil 5.9. NNNN-S oryantasyonuna sahip kutup sisteminde manyetik alan yoğunluğu

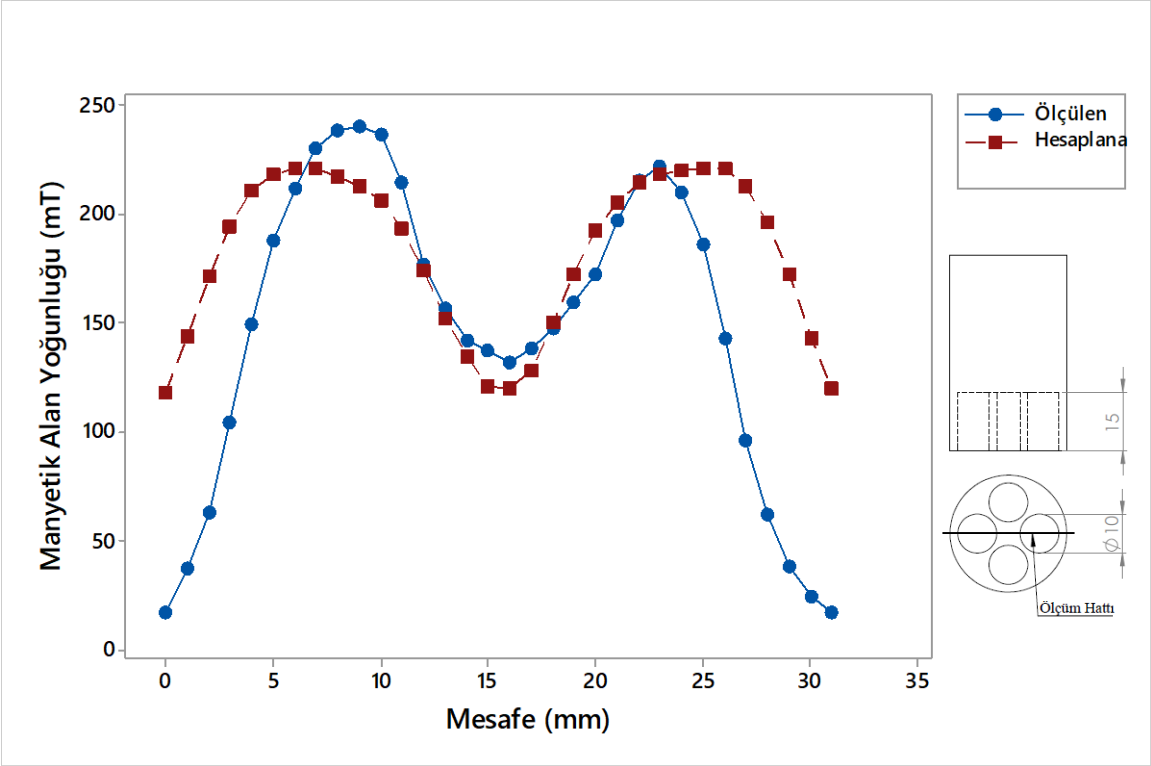
Manyetik alan yoğunluğunun MAİ/UDMAİ üzerindeki etkilerini görebilmek için 3 farklı manyetik kutup sistemi imal edilmiş ve bu sistemlerin oluşturduğu manyetik alan yoğunluğu PCE marka MFM 3000 model manyetik alan ölçer cihazı ile Resim 5.3'te görüldüğü gibi kutup sistemleri boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu manyetik kutup sistemlerinin hat boyunca sahip oldukları ortalama manyetik alan yoğunlukları sırasıyla 130 mT, 145 mT ve 170 mT olarak tespit edilmiştir. Manyetik alan yoğunlukları EMWorks 2020 paket programında da kutup sistemleri çapı boyunca sonlu elemanlar analizi yöntemiyle analiz edilmiş ve analiz sonucu elde edilen sonuçlar, ölçülen sonuçlarla birlikte her bir takım için Şekil 5.10-12'de grafiksel olarak verilmiştir.



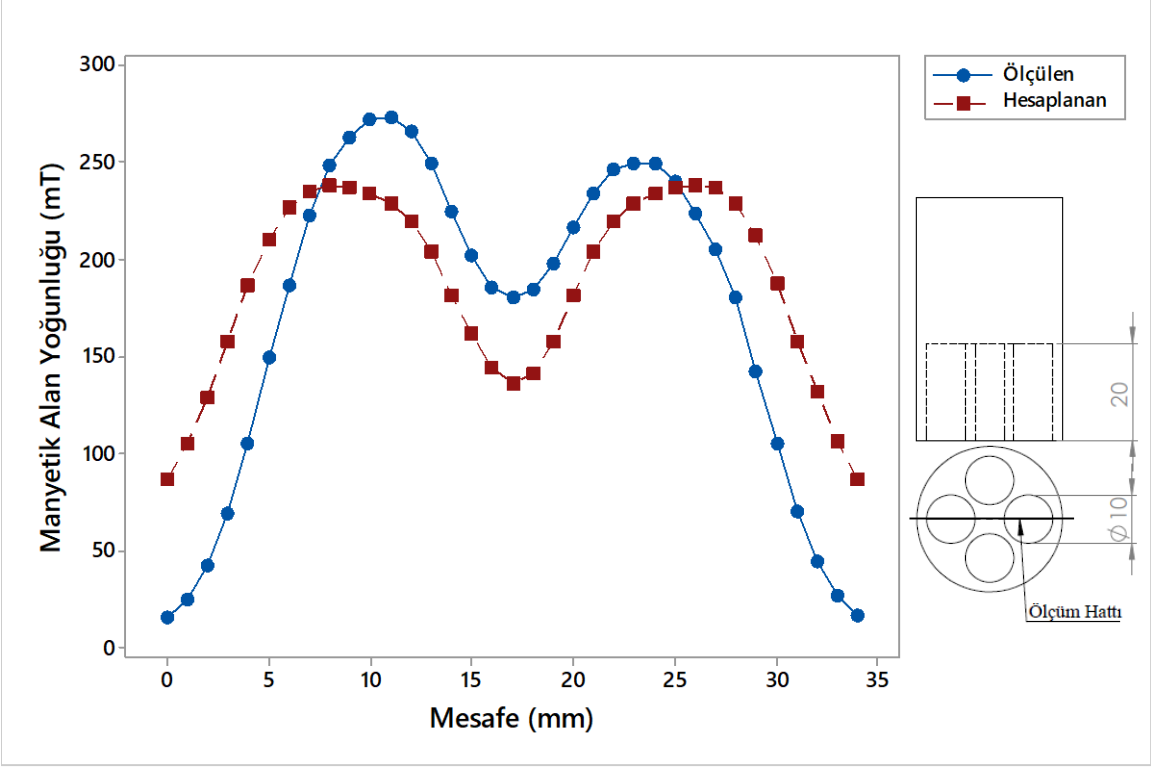
Resim 5.3. Manyetik kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun ölçülmesi



Şekil 5.10. 1 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi



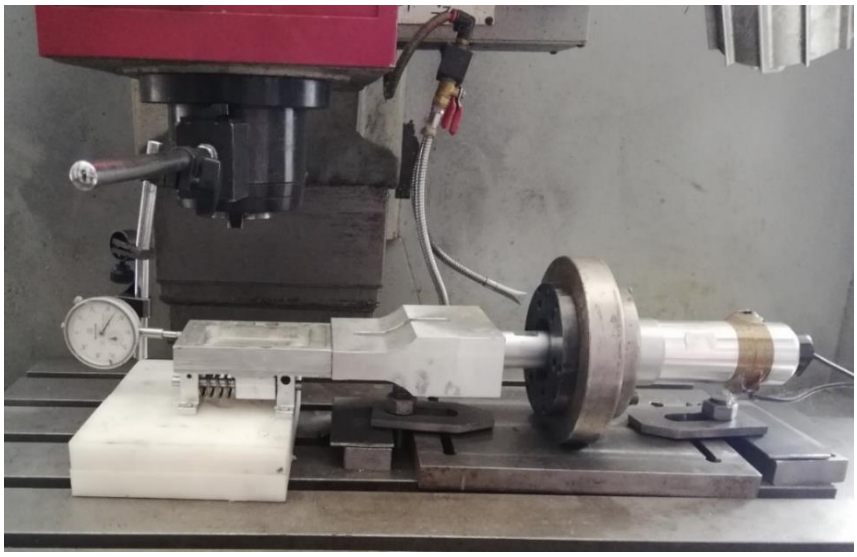
Şekil 5.11. 2 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi



Şekil 5.12. 3 nolu takıma ait kutup boyunca manyetik alan yoğunluğunun değişimi

5.5.3. Ultrasonik sistem entegrasyonu

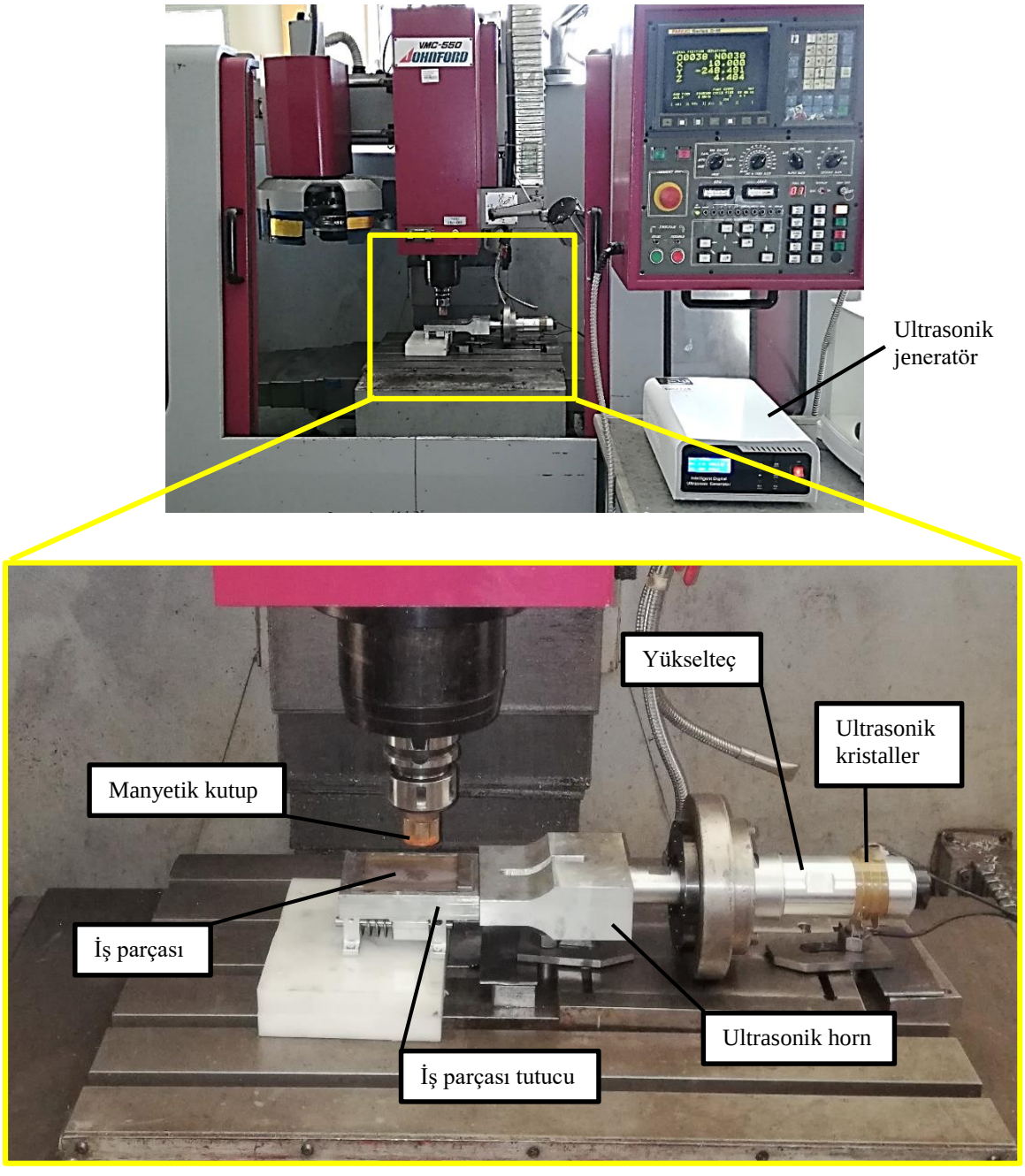
MAİ yönteminde işleme performansının artırılması amacıyla iş parçasına yüksek frekansta titreşim uygulamak amacıyla, ticari olarak temin edilen bir adet Skymen 2000 W ultrasonik jeneratör ve ultrasonik titreşim grubu kullanılmıştır. Ultrasonik titreşim grubu, jeneratör tarafından üretilen elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik sensör gruplarını içerisinde barındıran ultrasonik kristaller; ultrasonik kristaller tarafından oluşturulan titreşimin genliğini artırmaya yarayan yükselteç ve yükselteçten elden edilen titreşimleri iş parçasına uygulayacak olan iş parçası geometrisine özel olarak imal edilmiş bir ultrasonik horn sisteminden oluşmaktadır. Ultrasonik sisteme ait özellikler Çizelge 5.6'da görülmektedir. Ultrasonik titreşim jeneratörü 20150 Hz frekansta titreşim üretmekte olup üretilen bu titreşim neticesinde iş parçası yatay eksende 5 μm genlik değeriyle hareket etmektedir. İş parçası genliği iş parçası tutucusu ucuna yerleştirilen 1 μm hassasiyetli bir komperatör saati aracılığıyla ölçülmüştür (Resim 5.4). Deney düzeneğinin fotoğrafı ise Resim 5.5'te görülmektedir.



Resim 5.4. İş parçası genliğinin ölçülmesi

Çizelge 5.6. Ultrasonik sistem özellikleri

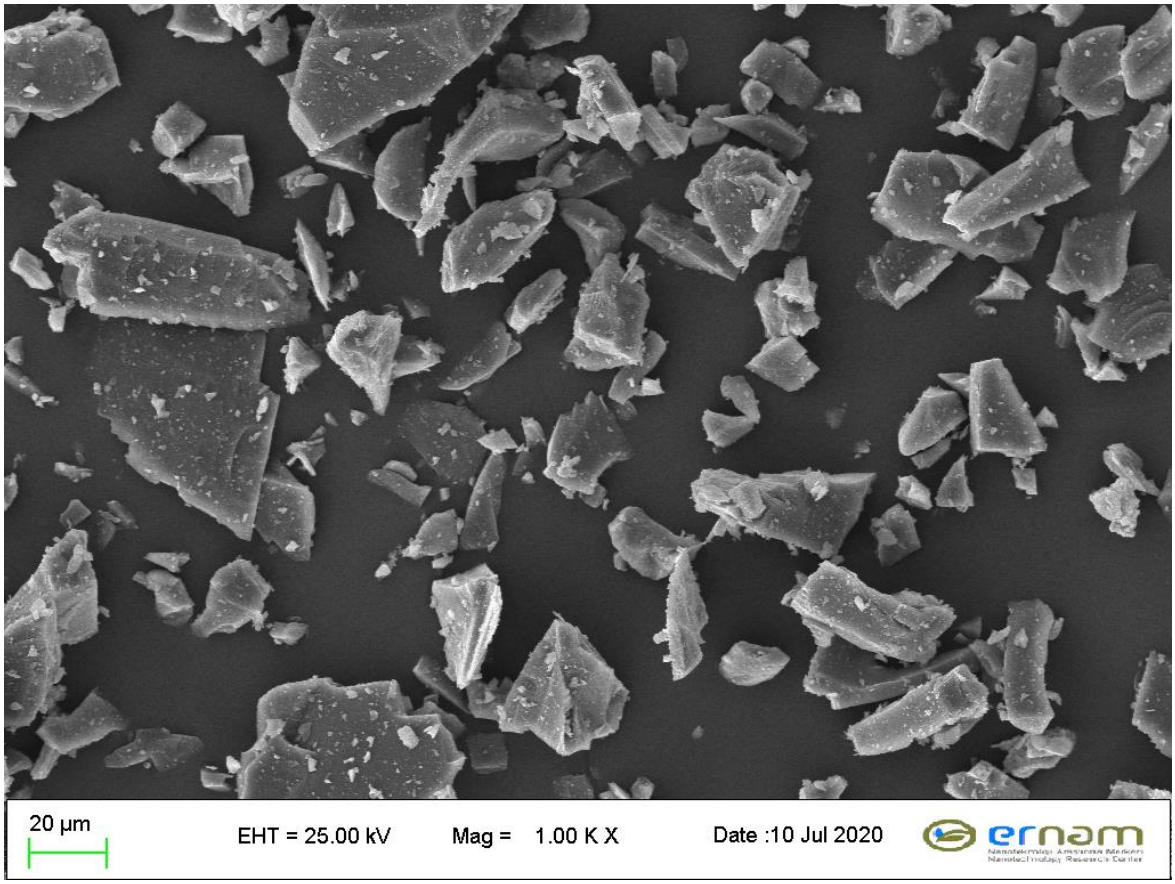
Özellik	Değer
Güç (W)	2000
Frekans (Hz)	20150
Vurum süresi (sn)	4
Vurum ara süresi (sn)	4
İş parçası genliği (µm)	5
Horn malzemesi	Alüminyum



Resim 5.5. Deney düzeneğinin fotoğrafı

5.5.4. Aşındırıcı karışımın hazırlanması

Deneylerde kullanılacak aşındırıcılar her bir deney için ayrı bir kutu içerisinde 3 gr. demir tozu, 1 gr. SiC ve 0,2 gr. SAE 30 yağlayıcı homojenlik sağlanana kadar mekanik olarak karıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan SiC taneciklerden ortalama tanecik boyutu 75 µm olan taneciklere ait SEM görüntüsü Resim 5.6'da görülmektedir.



Resim 5.6. SiC taneciklerin SEM görüntüsü

5.6. Deneylerin Yapılması

Manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) ve ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme (UDMAİ) deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Johnford marka WMC 550 model CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır.

5.6.1. Numunelerin hazırlanması

Her bir deney numunesi, deneyler öncesinde ve sonrası üzerinde bulunan yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla Struers marka Metason 120 T ultrasonik temizleyici aracılığıyla %80 oranındaki aseton (C_3H_6O) çözeltisi içerisinde temizlenmiştir (Resim 5.7).

5.6.2. Numunelerin ağırlıklarının ölçülmesi

Ultrasonik temizleyici aracılığıyla yabancı maddelerden arındırılan numuneler her bir deney öncesinde ve deney sonrasında 0,0001 gr hassasiyete sahip Precisa marka XB 220A model terazi ile tartılarak ağırlıkları ölçülmüştür (Resim 5.7).



Resim 5.7. Numunelerin temizlenmesi ve tartılmasında kullanılan cihazlar

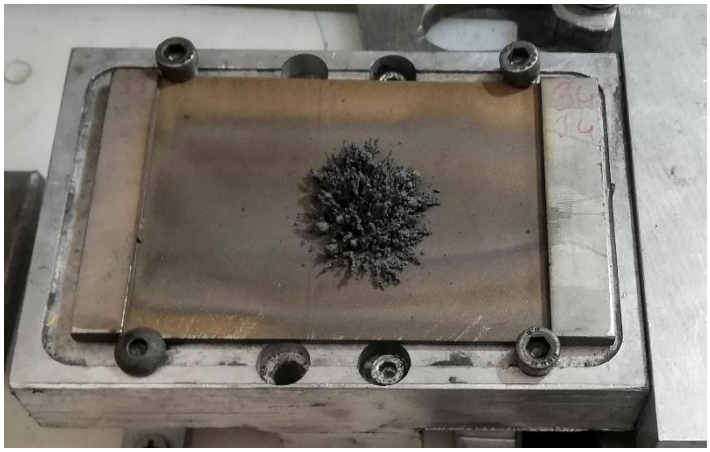
5.6.3. MAİ deneylerinin yapılması

Yabancı maddelerden arındırılan ve ağırlığı ölçülen deney numunesi iş parçası tutucu üzerine yerleştirildikten sonra hazırlanan manyetik aşındırıcı karışımı numune üzerine dökülmüştür. Numune altında bulunan mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı sebebiyle numune üzerine dökülen karışım manyetik alan çizgileri boyunca dizilmek suretiyle iş parçası üzerinde bir fırça halini almıştır (Resim 5.8). Sonrasında fener mili

üzerinde bağlı olan manyetik kutup CNC kontrolü ile işleme bölgesine işleme boşluğu 2 mm olacak şekilde yaklaştırılmış ve aşındırıcı karışımı üstte bulunan mıknatıslardan çıkıp altta bulunan mıknatısa yönelen manyetik alan çizgileri boyunca konumlanarak deneyler için hazır hale gelmiştir. Belirlenen parametrelere göre deneyler başarıyla gerçekleştirilmiştir.

5.6.4. UDMAİ deneylerinin yapılması

UDMAİ deneyleri ultrasonik titreşim grubunun çok fazla ısınmasını engellemek amacıyla iş parçasına sürekli titreşim vermek yerine 4 sn boyunca titreşimin verilip 4 sn boyunca titreşim grubunun soğuması için titreşim verilmemiştir. Bu 4 sn'lik gecikmeler ultrasonik jeneratör üzerinde bulunan kontrol paneli aracılığıyla ayarlanmıştır. UDMAİ deneyleri bir önceki başlıkta bahsedilen MAİ deneyleri ile aynı şartlarda yapılmış ve başarıyla tamamlanmıştır.

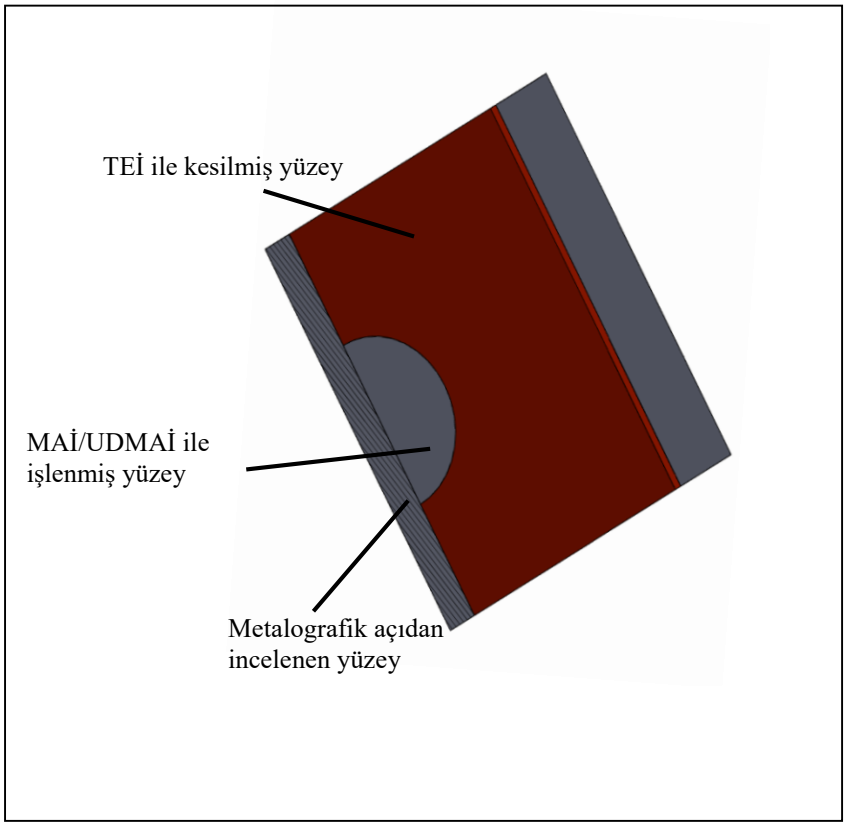


Resim 5.8. Numune üzerinde fırça şeklini alan manyetik aşındırıcı karışımı

5.7. Metalografik İncelemeler

Deneyler sonucunda numunelerin yüzey yapıları ve beyaz tabaka bölgelerinin incelenmesi için numuneler Şekil 5.13'te gösterildiği gibi Metkon Metacut 250 kesme cihazında kesilmiştir. Kesilen numuneler polyester kalıba alınarak sırasıyla 100-120-180-200-400-600-800-1000 ve 2000 mesh boyutlarında zımparalarla otomatik olarak zımparalandıktan sonra 1 μm ortalama çapa sahip elmas pasta aracılığıyla çuhada parlatılmışlardır. Parlatılan numuneler %10 HF, ve %5 HNO_3 çözeltisinde 20'şer saniye dağlanmışlardır. Dağlanan bu MAİ/UDMAİ ile işlenmiş yüzeye komşu olan yüzeyler taramalı elektron mikroskobu (SEM)

altında incelenmiştir. İncelemeler Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan ZEISS Gemini 500 taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. Metalografik inceleme bölgeleri

5.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Numunelerin TEİ ile kesim işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve MAİ/UDMAİ işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan zygoZeGage marka 3 boyutlu yüzey profilometresi aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçümler numune üzerindeki 3 farklı noktadan alınarak ortalamaları numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri olarak kabul edilmiştir.

Her ne kadar TEİ ile kesim sırasında her numune aynı şartlar altında kesilmiş olsa da numunelerin yüzey pürüzlülükleri farklı olmaktadır. Dolayısıyla MAİ/UDMAİ işleminin

yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek için numunelerin yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları her bir numune için Eş. 5.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{Ra_i - R_{as}}{R_{ai}} \times 100 = \%iyileşme \quad (5.1)$$

Burada;
Ra_i: MAİ/UDMAİ işlemi öncesi yüzey pürüzlülük değeri
Ra_s: MAİ/UDMAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

5.9. Talaş Kaldırma Oranlarının Belirlenmesi

Talaş kaldırma oranları (TKO) numunelerin MAİ/UDMAİ işlemi öncesi ve MAİ/UDMAİ işlemi sonrası ağırlık farklarının işleme süresine bölünmeleri ile Eş. 5.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TKO = \frac{\Delta W}{t} \quad (5.2)$$

Burada; t MAİ/UDMAİ işlem süresini; W numunelerin ağırlıklarını ifade etmektedir.

5.10. Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik ölçümleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bünyesinde bulunan Emcotest marka mikrosertlik ölçüm cihazı ile Vickers skalasına göre ölçülmüştür. MAİ/UDMAİ işlemine tabi tutulmuş yüzey üzerinden başlayarak 10 μm aralıklarla iş parçası orijinal sertliğine erişilinceye kadar 25 gr yükleme yapılmak suretiyle ölçümler devam etmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Talaş Kaldırma Oranı Ölçüm Sonuçları

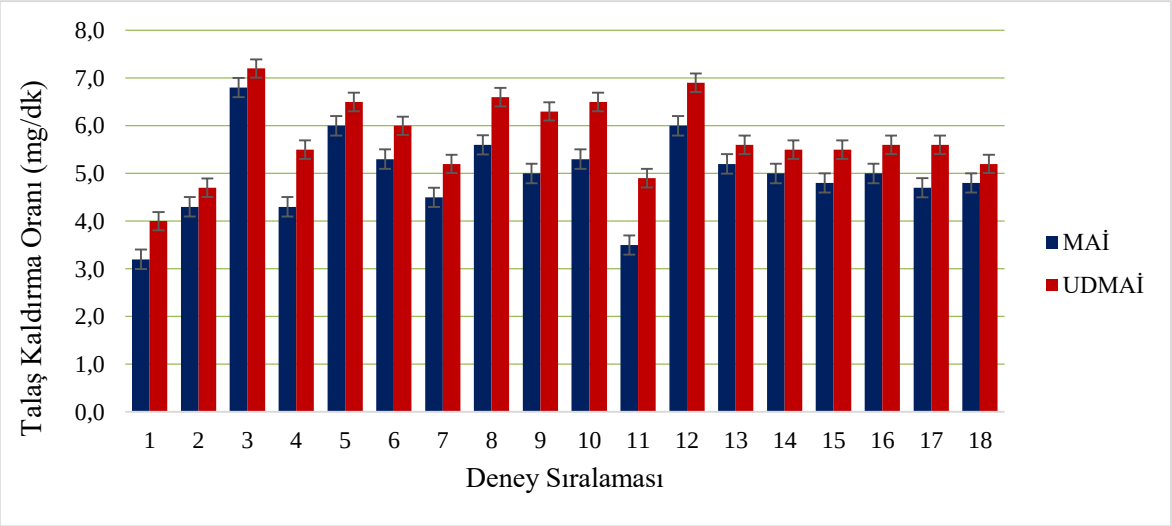
Yapılan deneyler sonucunda MAİ ve UDMAİ işlemine tabi tutulan numunelerde ortalama olarak sırasıyla 4,95 mg/dk ve 5,74mg/dk'lık talaş kaldırma oranlarına sahip olunduğu tespit edilmiştir. Deney parametrelerinin farklı seviyelerinde bu değer MAİ ve UDMAİ deneyleri için sırasıyla 6,80 mg/dk ve 7,20 mg/dk değerlerine kadar yükselmektedir. Çizelge 6.1 ve 6.2'de sırasıyla MAİ ve UDMAİ deneylerine ait kaldırılan talaş miktarları ve TKO değerleri görülmektedir. Şekil 6.1'de ise MAİ ve UDMAİ deneylerinde elde edilen TKO değerleri grafiksel olarak görülmektedir.

Çizelge 6.1. MAİ deneylerine ait talaş kaldırma oranları

Deney No	İşleme Süresi (dk)	Kaldırılan talaş miktarı (mg)	Talaş kaldırma oranı (mg/dk)
1	1	3,20	3,20
2	1	4,30	4,30
3	1	6,80	6,80
4	2	8,50	4,25
5	2	12,00	6,00
6	2	10,70	5,35
7	3	13,50	4,50
8	3	16,80	5,60
9	3	15,00	5,00
10	4	21,20	5,30
11	4	14,00	3,50
12	4	24,00	6,00
13	5	26,00	5,20
14	5	24,90	4,98
15	5	24,10	4,82
16	6	30,00	5,00
17	6	28,20	4,70
18	6	28,20	4,70

Çizelge 6.2. UDMAİ deneylerine ait talaş kaldırma oranları

Deney No	İşleme Süresi (dk)	Kaldırılan talaş miktarı (mg)	Talaş kaldırma oranı (mg/dk)
1	1	4,00	4,00
2	1	4,70	4,70
3	1	7,20	7,20
4	2	11,00	5,50
5	2	13,00	6,50
6	2	12,10	6,05
7	3	15,60	5,20
8	3	19,80	6,60
9	3	18,90	6,30
10	4	26,00	6,50
11	4	19,80	4,95
12	4	27,40	6,85
13	5	28,10	5,62
14	5	27,70	5,54
15	5	27,40	5,48
16	6	33,60	5,60
17	6	33,60	5,60
18	6	31,20	5,20



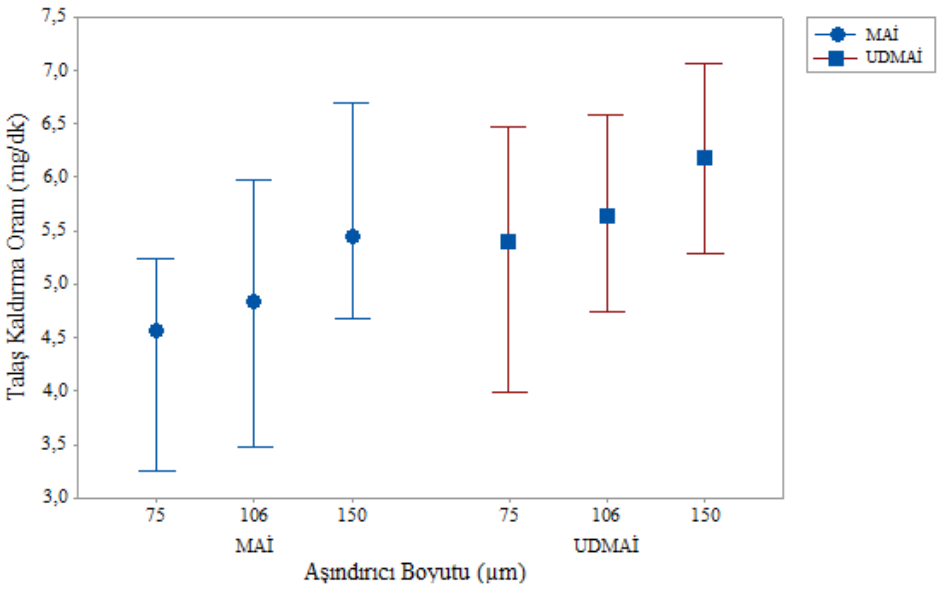
Şekil 6.1. MAİ/UDMAİ deneylerine ait TKO grafiği

6.1.1. İşleme süresinin TKO üzerindeki etkisi

Talaş kaldırma oranı Eş. 5.2 yardımıyla, işleme süresince kaldırılan talaş miktarının işleme süresine bölünmesi neticesinde belirlenmiştir. Dolayısıyla ölçüm sonuçları neticesinde hesaplanan değerler birim zamanda kaldırılan talaş miktarını belirttiği için işleme süresinin TKO üzerinde anlamlı bir etkisini saptanamamıştır.

6.1.2. Aşındırıcı boyutunun TKO üzerindeki etkisi

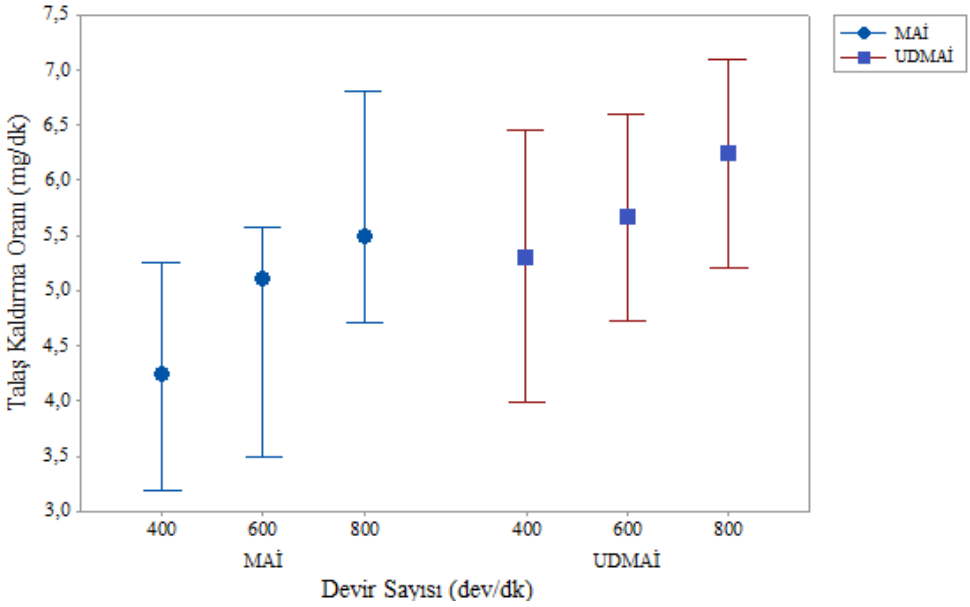
Şekil 6.2'de MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama TKO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük TKO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı boyutunun artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Artan aşındırıcı boyutu ile birlikte iş parçası ile aşındırıcı temas uzunluğu artmakta ve bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyinden birim zamanda daha büyük hacimli bir talaş kaldırılmaktadır [87]. Bu sebeple birim zamanda kaldırılan talaş miktarı olan TKO değeri de artmaktadır. Aşındırıcı boyutunun artmasıyla talaş kaldırma oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aşındırıcı boyutlarının 75 µm, 106 µm ve 150 µm değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,57 mg/dk, 4,84 mg/dk ve 5,44 mg/dk olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı aşındırıcı boyutu değerleri için sırasıyla 5,40 mg/dk, 5,65 mg/dk ve 6,18 mg/dk olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %15,79'luk bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.2. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun TKO üzerine etkisi

6.1.3. Devir sayısının TKO üzerindeki etkisi

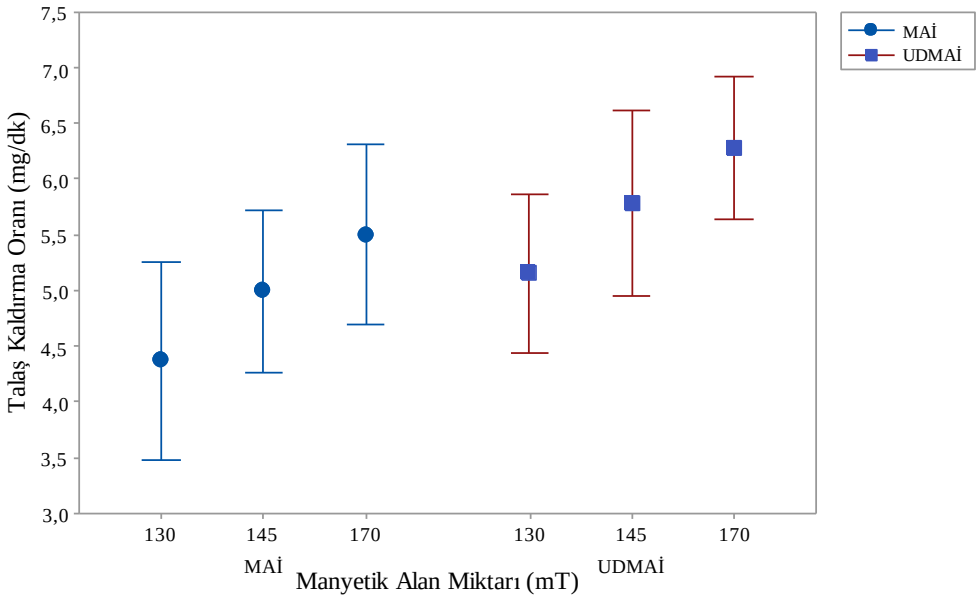
Şekil 6.3'te MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde devir sayısının talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama TKO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük TKO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde devir sayısının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Devir sayısı, aşındırıcı taneciklerin birim zamanda aldıkları yolu doğrudan etkilediği için devir sayısındaki artış talaş kaldırma oranı üzerinde de bir artışa sebep olmaktadır [88]. MAİ yönteminde devir sayısının 400 dev/dk'dan 600 dev/dk değerine çıkmasıyla talaş kaldırma oranındaki artış 600 dev/dk'dan 800 dev/dk değerine çıkmasıyla meydana gelen artışa kıyasla daha fazladır. Bu durum devir sayısının artmasıyla MAFT üzerine etki eden merkezcil kuvvetin artması neticesinde aşındırıcı taneciklerin işleme bölgesine daha düşük kuvvetlerle temas etmesi ile açıklanabilir. UDMAİ yönteminde devir sayısının artması neticesinde TKO değerleri lineer bir şekilde artmaktadır. Ultrasonik desteği ile devir sayısının artmasıyla birlikte artan merkezcil kuvvetin etkisi azaltılmış ve etkin bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde devir sayısı parametresinin 400 dev/dk, 600 dev/dk ve 800 dev/dk değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,24 mg/dk, 5,12 mg/dk ve 5,50 mg/dk olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı devir sayısı değerleri için sırasıyla 5,31 mg/dk, 5,68 mg/dk ve 6,25 mg/dk olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde devir sayısı açısından ortalama %16,23'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.3. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının TKO üzerine etkisi

6.1.4. Manyetik alanın TKO üzerindeki etkisi

Şekil 6.4'te MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama TKO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük TKO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranının arttığı görülmektedir. Manyetik kuvvet, aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine etkiyen baskı kuvvetini etkilediği için, artan manyetik kuvvetle birlikte aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine uyguladığı kuvvet artmakta ve bunun neticesinde daha etkin bir talaş kaldırma gerçekleşmektedir [78,88]. Manyetik alan miktarının artmasıyla talaş kaldırma oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde manyetik alan miktarının 130 mT, 145 mT ve 170 mT değerleri için ortalama TKO değerleri sırasıyla; 4,37 mg/dk, 5,00 mg/dk ve 5,50 mg/dk olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama TKO değerleri aynı manyetik alan değerleri için sırasıyla 5,16 mg/dk, 5,79 mg/dk ve 6,29 mg/dk olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin TKO değerleri üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %15,76'lık bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

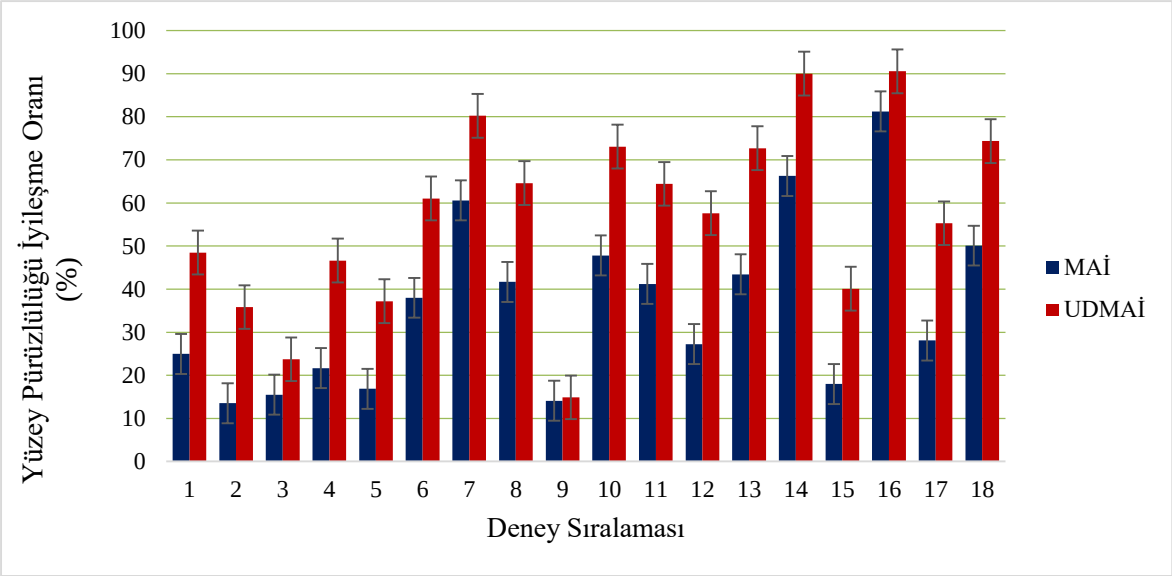


Şekil 6.4. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının TKO üzerine etkisi

6.2. Yüzey Pürüzlülüğündeki İyileşme Oranı Ölçüm Sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda MAİ ve UDMAİ işlemine tabi tutulan numunelerin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları (YPİO) ortalama olarak sırasıyla % 36,12 ve % 57,26 olarak tespit edilmiştir. Deney parametrelerinin farklı seviyelerinde bu değer MAİ ve UDMAİ deneyler için sırasıyla % 81,22 ve % 90,55 değerlerine kadar yükselmektedir. Çizelge 6.3 ve 6.4'de sırasıyla MAİ ve UDMAİ deneylerine ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve YPİO değerleri görülmektedir. Şekil 6.5'te ise MAİ ve UDMAİ deneylerinde elde edilen YPİO değerleri standart hata çubuklarıyla birlikte grafiksel olarak görülmektedir. Resim 6.1, TEİ işlemi sorası elde edilen numunelere ait yüzey topografyasını göstermektedir. Resim incelendiğinde TEİ işlemi sonrasında iş parçası yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin 1,601~1,638 µm aralığında değiştiği görülmektedir. Numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemlerine tabi tutulmadan önceki ortalama yüzey pürüzlülük değeri ortalama olarak 1,619 µm olarak alınmıştır. Resim 6.2 ve 6.3 ise sırasıyla en düşük ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranlarına sahip numunelere ait yüzey topografyasını göstermektedir. Resimler incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına sahip numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemi için sırasıyla 1,591 µm ve 1,378 µm Ra değerlerine sahip olduğu görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına sahip numunelerin MAİ ve UDMAİ işlemi için sırasıyla 0,304 µm ve 0,153 µm Ra değerlerine

sahip olduğu görülmektedir. Tüm numunelere ait yüzey topografyaları ise Ek-1'de verilmiştir.



Şekil 6.5. MAİ/UDMAİ deneylerine ait YPİO grafiği

Çizelge 6.3. MAİ deneylerine ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPİO değerleri

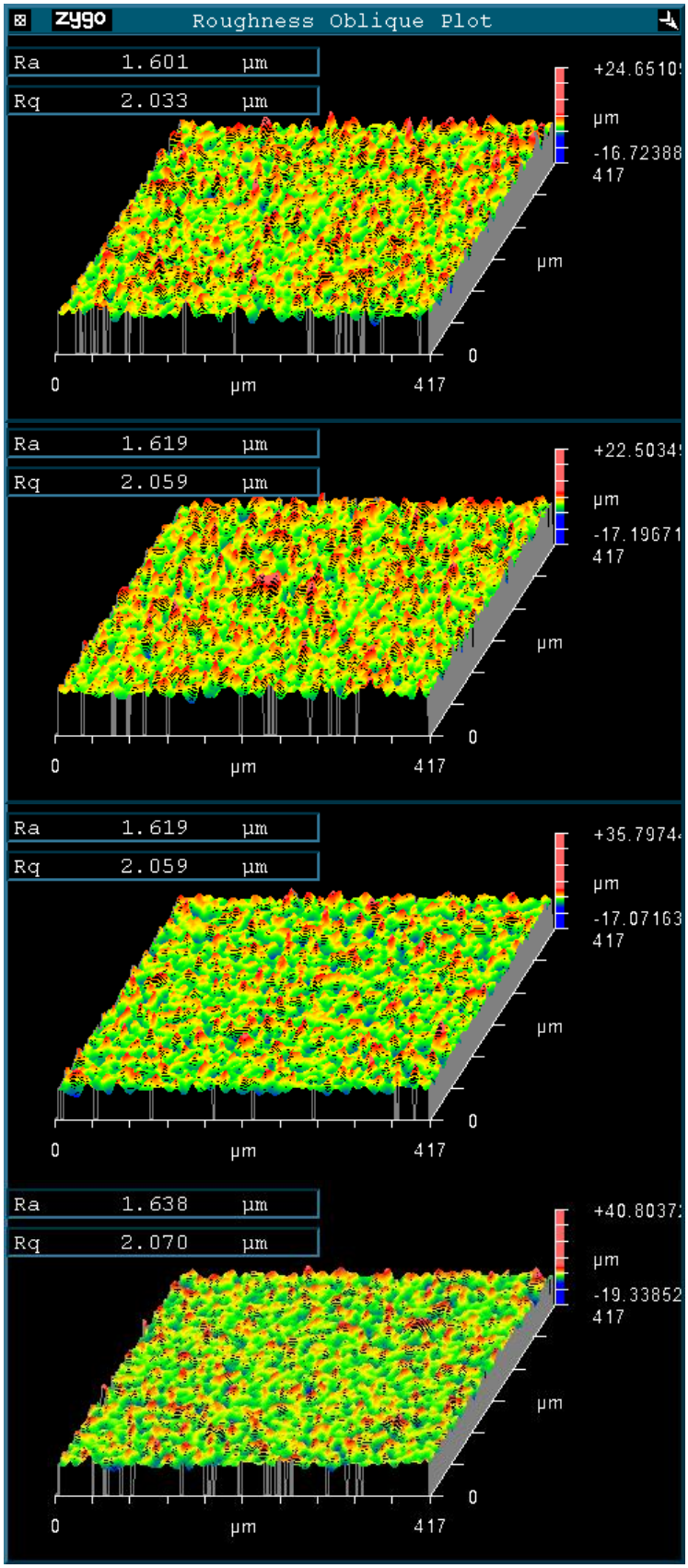
Deney No	İşleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değeri (µm)	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (%)
1	1,215	24,95
2	1,400	13,52
3	1,368	15,50
4	1,268	21,68
5	1,346	16,86
6	1,004	37,98
7	0,638	60,59
8	0,944	41,69
9	1,391	14,08
10	0,845	47,80
11	0,952	41,19
12	1,178	27,23
13	0,916	43,42
14	0,546	66,27
15	1,328	17,97
16	0,304	81,22
17	1,164	28,10
18	0,808	50,09

*Numunelerin MAİ işlemi öncesi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri: 1,619 µm

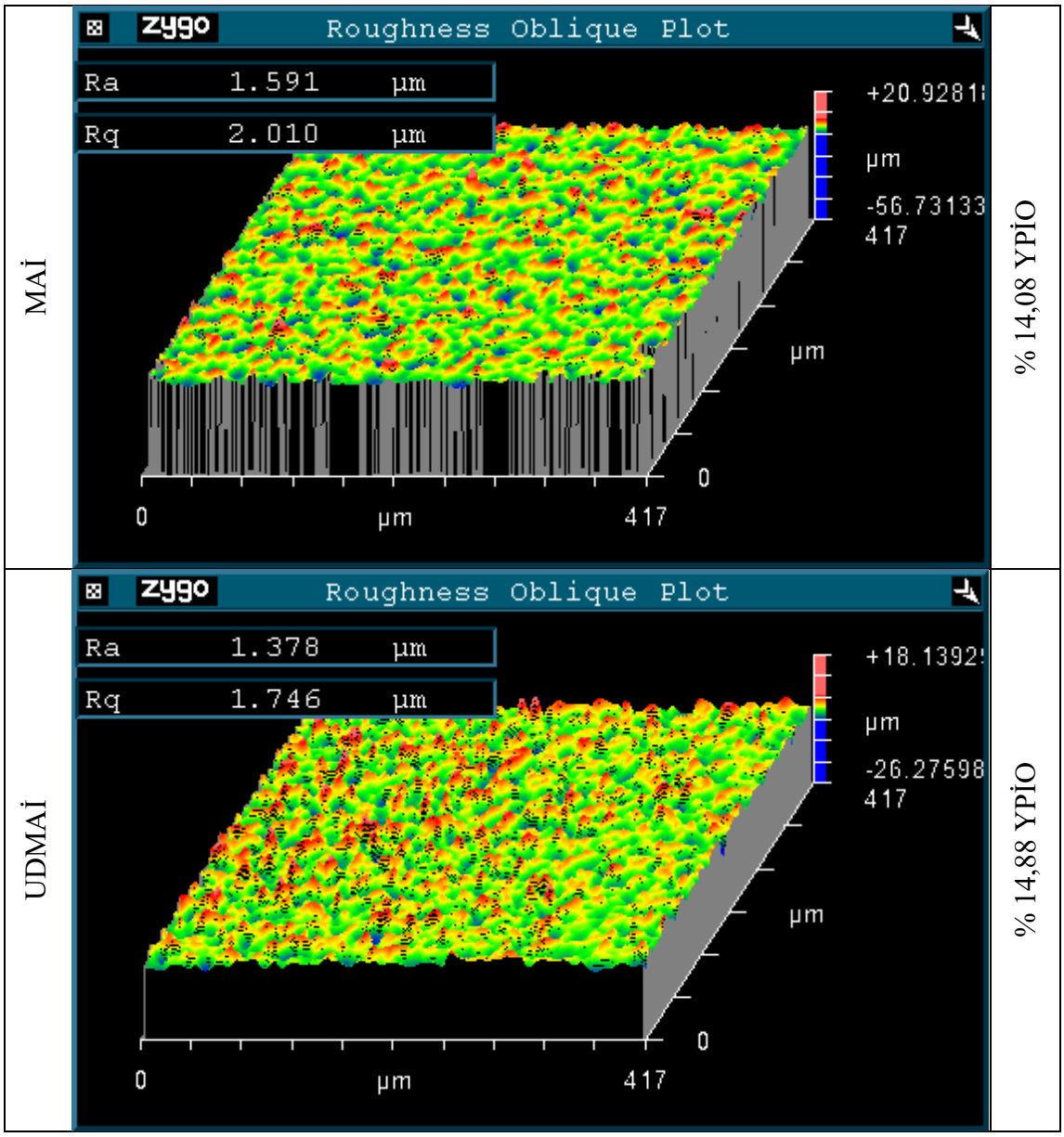
Çizelge 6.4. UDMAİ deneylerine ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPİO değerleri

Deney No	İşleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değeri (µm)	Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (%)
1	0,834	48,48
2	1,039	35,82
3	1,235	23,71
4	0,864	46,63
5	1,017	37,18
6	0,631	61,02
7	0,320	80,23
8	0,573	64,60
9	1,378	14,88
10	0,436	73,06
11	0,576	64,42
12	0,686	57,62
13	0,442	72,69
14	0,162	89,99
15	0,970	40,08
16	0,153	90,54
17	0,724	55,28
18	0,415	74,36

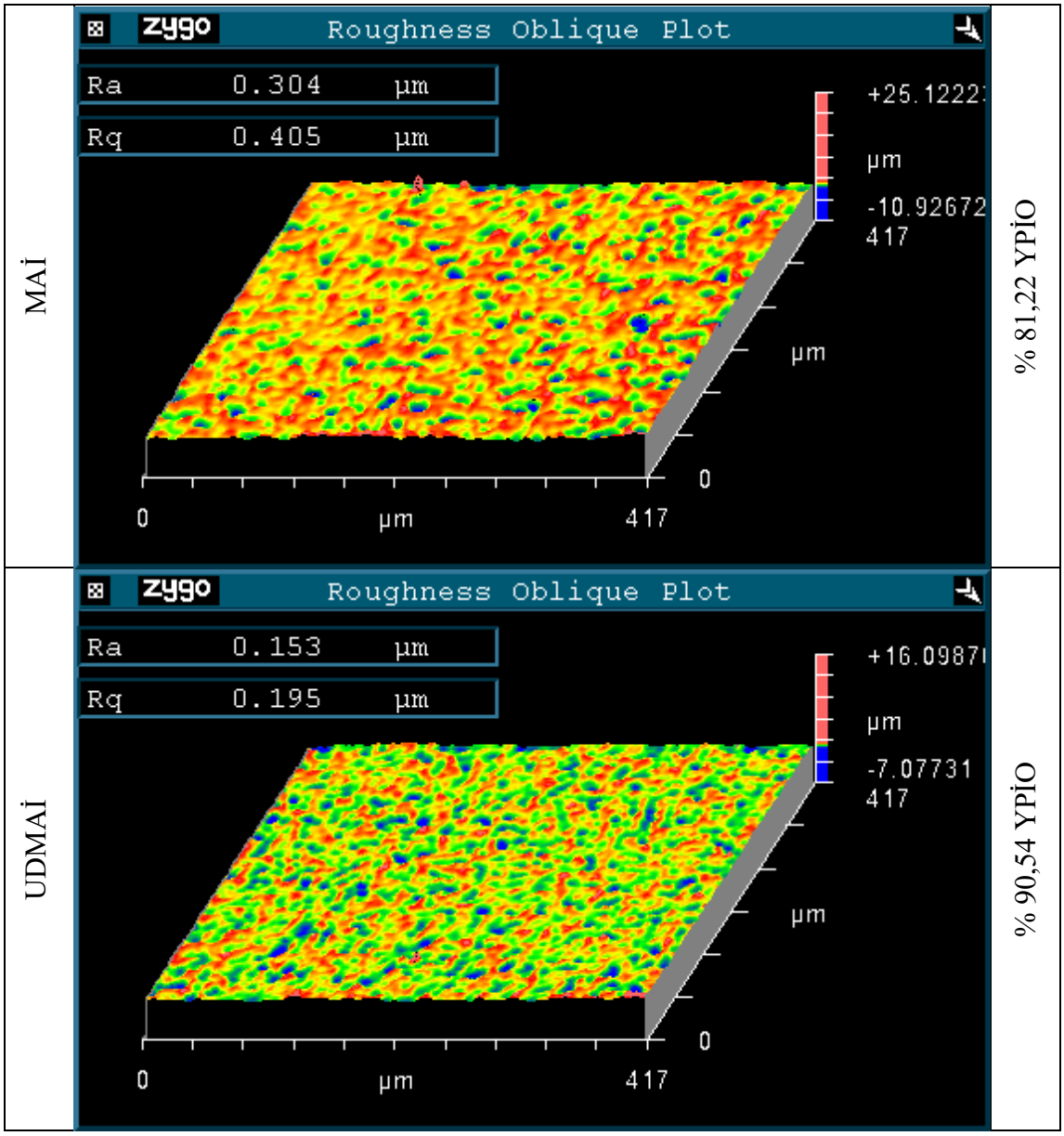
*Numunelerin UDMAİ işlemi öncesi ortalama yüzey pürüzlülük değerleri: 1,619 µm



Resim 6.1. TEİ işlemi sonrası numunelerin 3B yüzey topografyası



Resim 6.2. En düşük YPİO değerine sahip numunelerin 3B yüzey topografyası

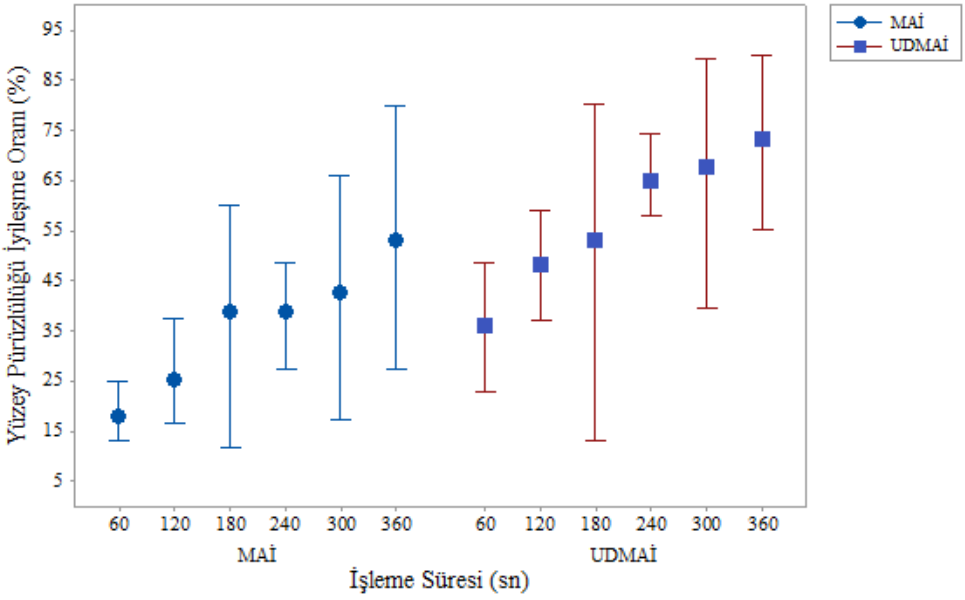


Resim 6.3. En yüksek YPİO değerine sahip numunelerin 3B yüzey topografyası

6.2.1. İşleme süresinin YPİO üzerindeki etkisi

Şekil 6.6'da MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde işleme süresinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama YPİO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük YPİO değerlerini göstermektedir. İşleme süresinin artmasıyla talaş kaldırma işlemi sırasında meydana gelen tepe ve vadi gibi yüzey oluşumları azalmakta ve yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır [77]. Şekil incelendiğinde işleme süresinin artması ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranındaki değişim

MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilimleri göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde işleme süresinin 60 sn, 120 sn, 180 sn, 240 sn, 300 sn ve 360 sn değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla ; %17,99, %25,50, %38,78, %38,74, %42,55 ve %53,13 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı işleme süresi parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %36,00, %48,28, %53,24, %65,04, %67,59 ve %73,39 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde işleme süresi açısından ortalama %58,52'lik bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

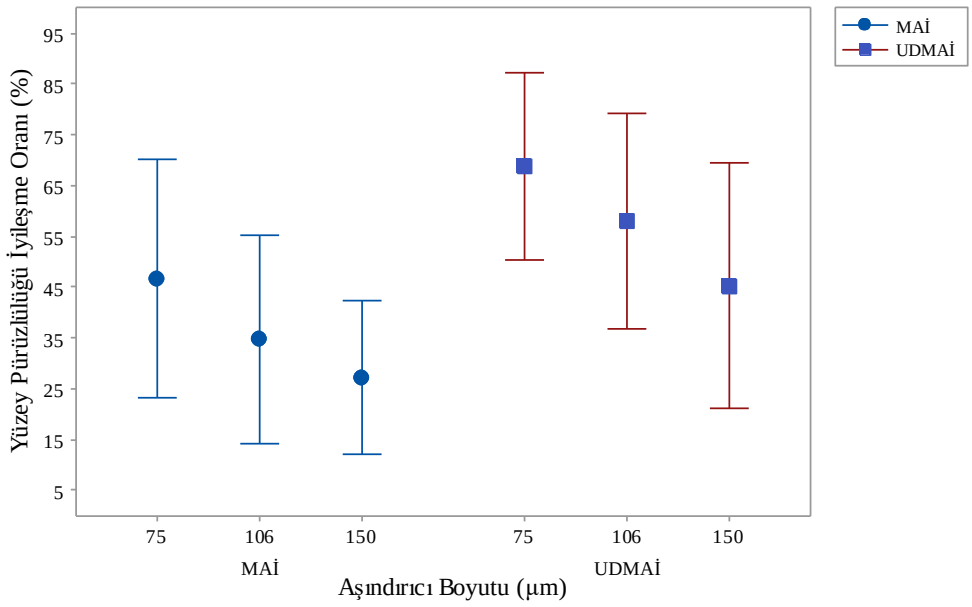


Şekil 6.6. MAİ ve UDMAİ yönteminde işleme süresinin YPİO üzerine etkisi

6.2.2. Aşındırıcı boyutunun YPİO üzerindeki etkisi

Şekil 6.7'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde aşındırıcı boyutunun yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama YPİO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük YPİO değerlerini göstermektedir. Aşındırıcı boyutunun artması sonucunda iş parçası ile aşındırıcı tanecikler arasındaki temas uzunluğu artmakta ve işleme neticesinde daha derin çiziklerin oluşmasına sebebiyet vermektedir Öte yandan aşındırıcı boyutunun azalmasıyla daha fazla sayıdaki küçük kesici kenar yüzeye temas etmekte ve bunun neticesinde daha kaliteli yüzeyler elde edilmektedir [89]. Dolayısıyla aşındırıcı boyutunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşme

oranlarında bir azalma meydana gelmektedir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı boyutundaki değişim ile yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilimleri göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aşındırıcı boyutunun 75 µm, 106 µm ve 150 µm değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla; %46,61, %34,60 ve %27,14 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı aşındırıcı boyutu parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %68,61, %57,88 ve %45,28 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

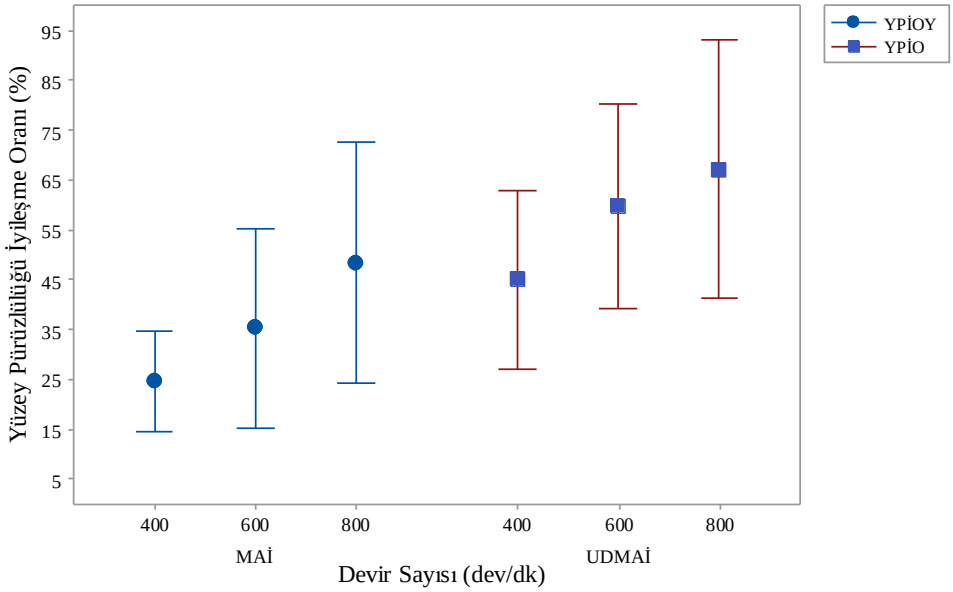


Şekil 6.7. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun YPİO üzerine etkisi

6.2.3. Devir sayısının YPİO üzerindeki etkisi

Şekil 6.8'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde devir sayısının yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama YPİO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük YPİO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde devir sayısının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değerinin arttığı görülmektedir. Devir sayısının artmasıyla birlikte aşındırıcı taneciklerin birim zamanda aldıkları yol artmaktadır. Bu nedenle daha kısa sürede daha fazla talaş kaldırılmakta ve yüzey üzerindeki pürüz tepeleri aşındırılarak yüzey

pürüzlülük değeri azalmaktadır [77]. Bu durum YPİO oranında bir artışa sebebiyet vermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde devir sayısının 400 dev/dk, 600 dev/dk ve 800 dev/dk değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla; %24,66, %35,28 ve %48,41 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı devir sayısı parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %44,96, %59,65 ve %67,16 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

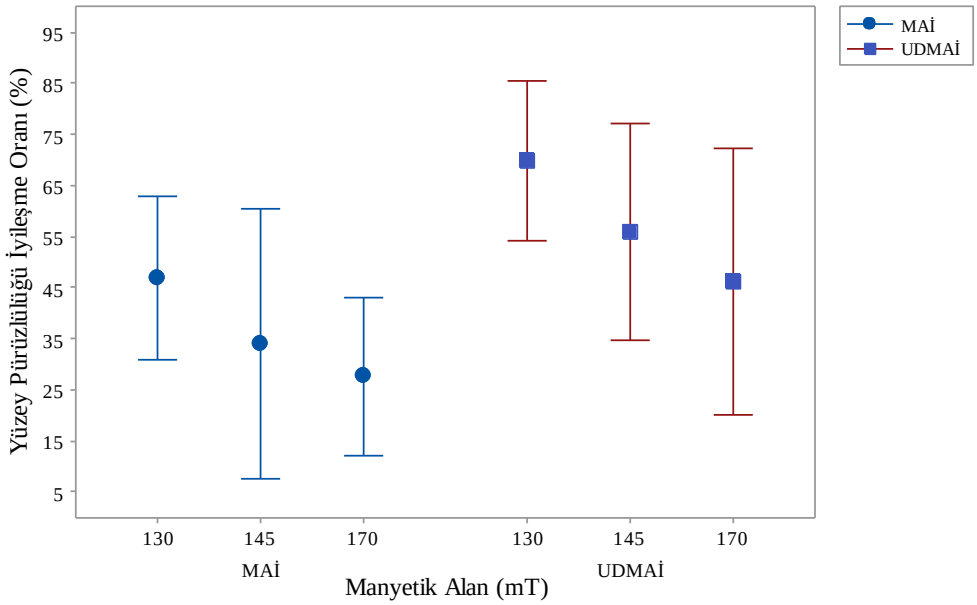


Şekil 6.8. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının YPİO üzerine etkisi

6.2.4. Manyetik alan miktarının YPİO üzerindeki etkisi

Şekil 6.9'da MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama YPİO değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük YPİO değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değerinin azaldığı görülmektedir. Manyetik alan miktarının artmasıyla birlikte aşındırıcı taneciklerin üzerine etkiyen manyetik kuvvet artmakta ve aşındırıcı tanecikler iş parçası yüzeyinde daha derine batarak talaş kaldırmaktadır. Bu durum da iş parçası yüzeyinde daha derin vadilerin oluşmasına ve yüzey pürüzlülük değerinin artmasına sebebiyet vermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde

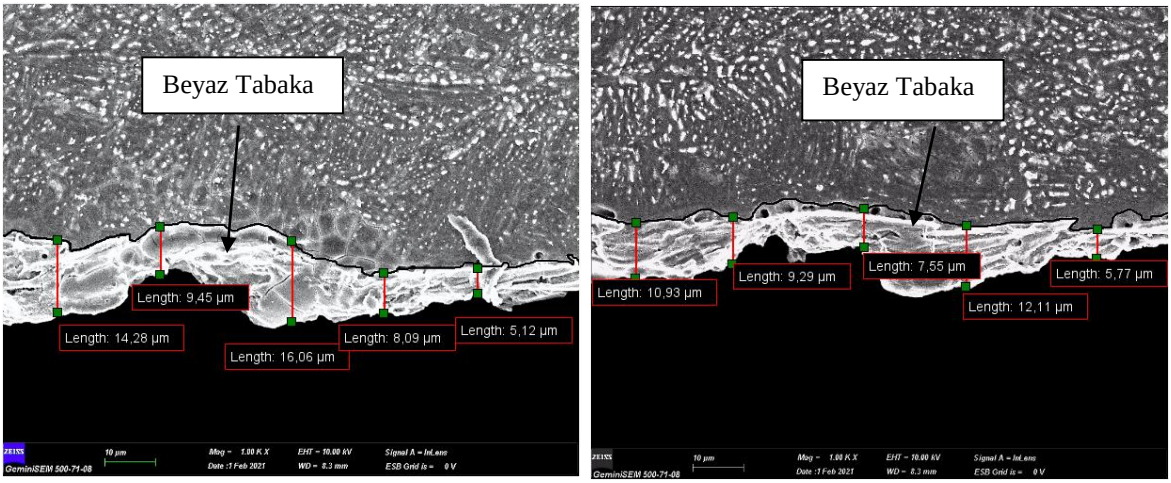
manyetik alan miktarının 130 mT, 145 mT ve 170 mT değerleri için ortalama YPİO değerleri sırasıyla; %46,84, %33,88 ve %27,63 olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı manyetik alan miktarı parametreleri için elde edilen ortalama YPİO değerleri ise sırasıyla; %69,75, %55,88 ve %46,13 olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.9. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının YPİO üzerine etkisi

6.3. Beyaz Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

TEİ yöntemiyle işlenmiş numuneler SEM aracılığıyla incelenmiş ve iş parçası yüzeyinden 5 farklı noktadan alınan ölçümler sonucunda ortalama 9,63 µm kalınlığında bir yeniden katılaşma bölgesi tespit edilmiştir (Resim 6.4).



Resim 6.4. TEİ işlemi sonrası yüzeyde oluşan beyaz tabaka görüntüleri

Yapılan deneyler sonucunda MAİ ve UDMAİ işlemine tabi tutulan numunelerde ölçülen ortalama beyaz tabaka kalınlıkları sırasıyla 3,69 µm ve 3,21 µm olarak tespit edilmiştir. Deney parametrelerinin farklı seviyelerinde bu değer MAİ ve UDMAİ deneyleri için sırasıyla 1,51 µm ve 0,98 µm değerlerine kadar düşmektedir. Çizelge 6.5 ve 6.6 sırasıyla MAİ ve UDMAİ deneylerine ait beyaz tabaka kalınlıkları ve beyaz tabaka kalınlığındaki azalma oranlarını (BTKAO) göstermektedir. Çizelgeler incelendiğinde beyaz tabaka kalınlıklarının MAİ ve UDMAİ deneyleri için BTKAO değerleri sırasıyla % 61,68 ve % 66,66 olduğu ve bu değerlerin deney parametrelerinin farklı seviyelerinde MAİ ve UDMAİ deneyleri için sırasıyla %84,24 ve % 89,74 değerlerine yükseldiği görülmektedir. Şekil 6.10 ise MAİ ve UDMAİ deneylerinde elde edilen beyaz tabaka kalınlıklarını standart hata çubuklarıyla birlikte grafiksel olarak göstermektedir. Resim 6.5 ve 6.6'da sırasıyla en düşük ve en yüksek BTKAO oranına sahip numunelerin SEM görüntüleri görünmektedir. Her bir numuneye ait SEM görüntüleri ise Ek-2'de verilmiştir

Çizelge 6.5. MAİ deneylerine ait ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri

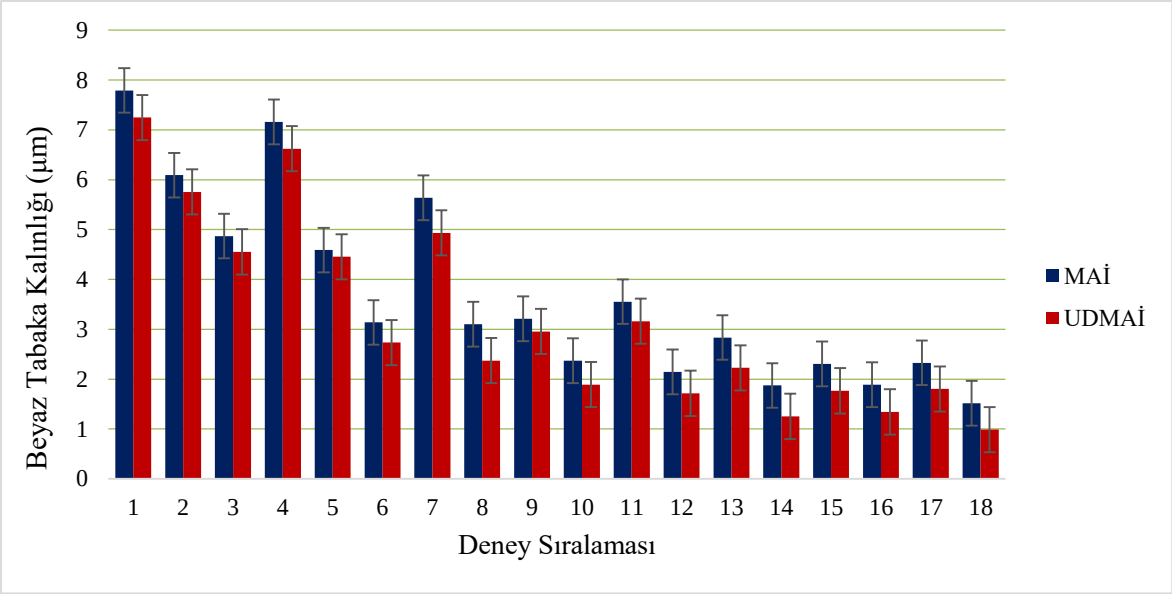
Deney No	İşleme sonrası ortalama beyaz tabaka kalınlık değeri (µm)	Beyaz tabaka kalınlığındaki azalma oranı (%)
1	7,792	19,09
2	6,092	36,74
3	4,87	49,43
4	7,16	25,65
5	4,59	52,34
6	3,138	67,41
7	5,64	41,43
8	3,104	67,77
9	3,212	66,65
10	2,372	75,37
11	3,554	63,09
12	2,145	77,73
13	2,836	70,55
14	1,874	80,54
15	2,308	76,03
16	1,89	80,37
17	2,328	75,83
18	1,518	84,24

*Numunelerin MAİ işlemi öncesi ortalama beyaz tabaka kalınlığı: 9,63 µm

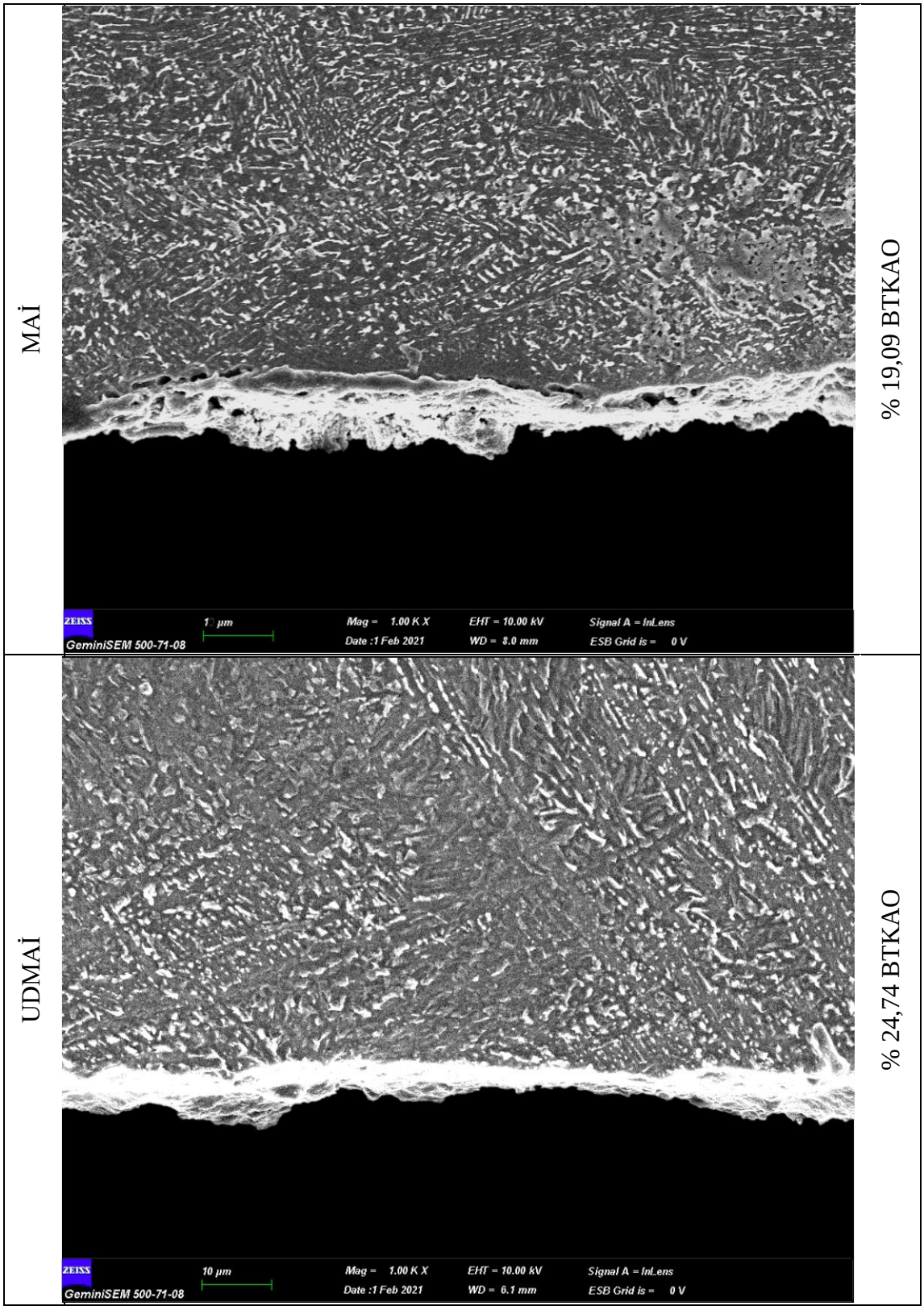
Çizelge 6.6. UDMAİ deneylerine ait ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri

Deney No	İşleme sonrası ortalama beyaz tabaka kalınlık değeri (µm)	Beyaz tabaka kalınlığındaki azalma oranı (%)
1	7,248	24,74
2	5,756	40,23
3	4,554	52,71
4	6,622	31,24
5	4,4540	53,75
6	2,7340	71,61
7	4,934	48,76
8	2,3720	75,37
9	2,9560	69,30
10	1,8920	80,35
11	3,1620	67,17
12	1,7160	82,18
13	2,2280	76,86
14	1,2540	86,98
15	1,7660	81,66
16	1,3440	86,04
17	1,8040	81,27
18	0,9880	89,74

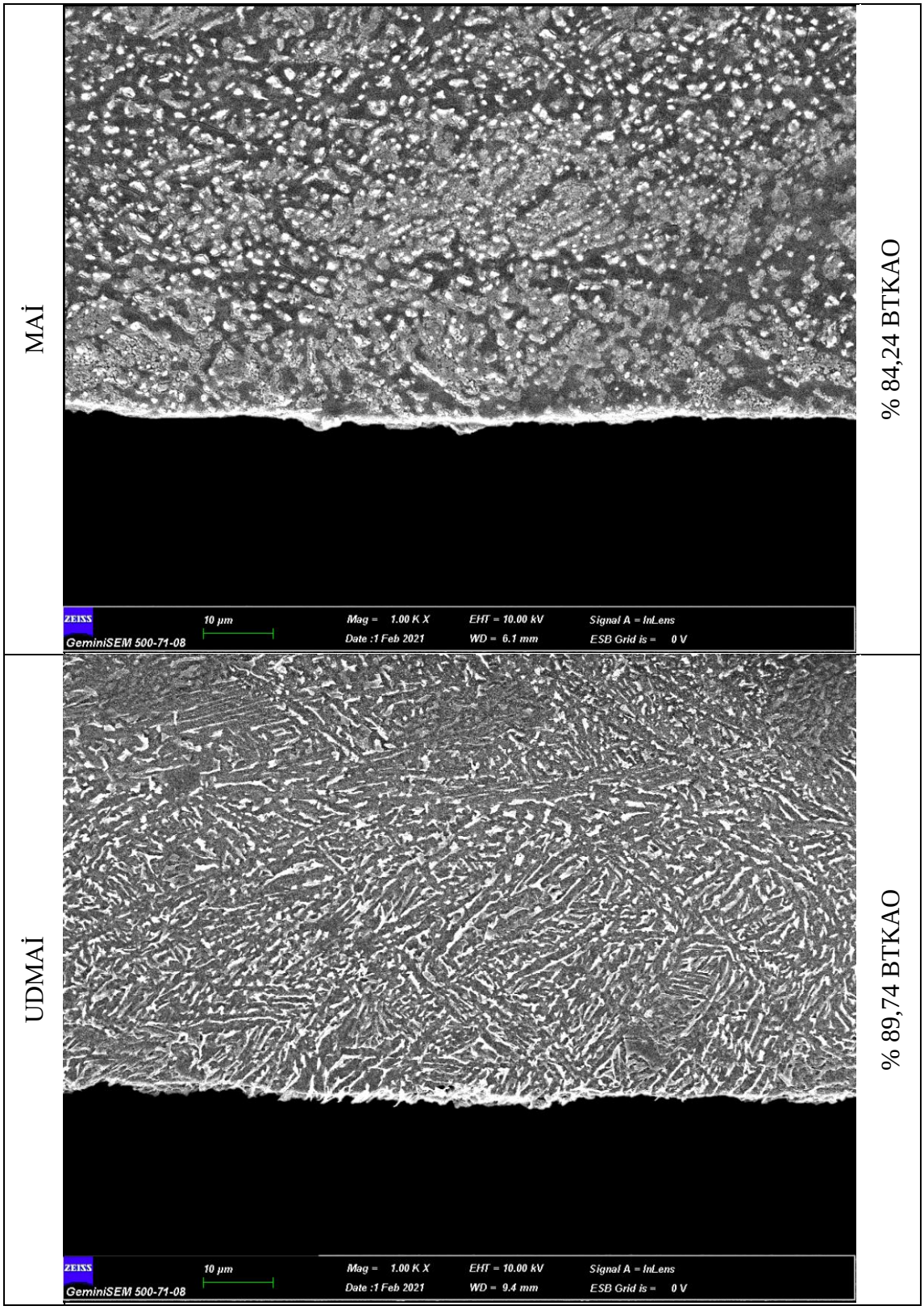
*Numunelerin UDMAİ işlemi öncesi ortalama beyaz tabaka kalınlığı: 9,63 µm



Şekil 6.10. MAİ/UDMAİ deneylerine ait beyaz tabaka kalınlık grafiği

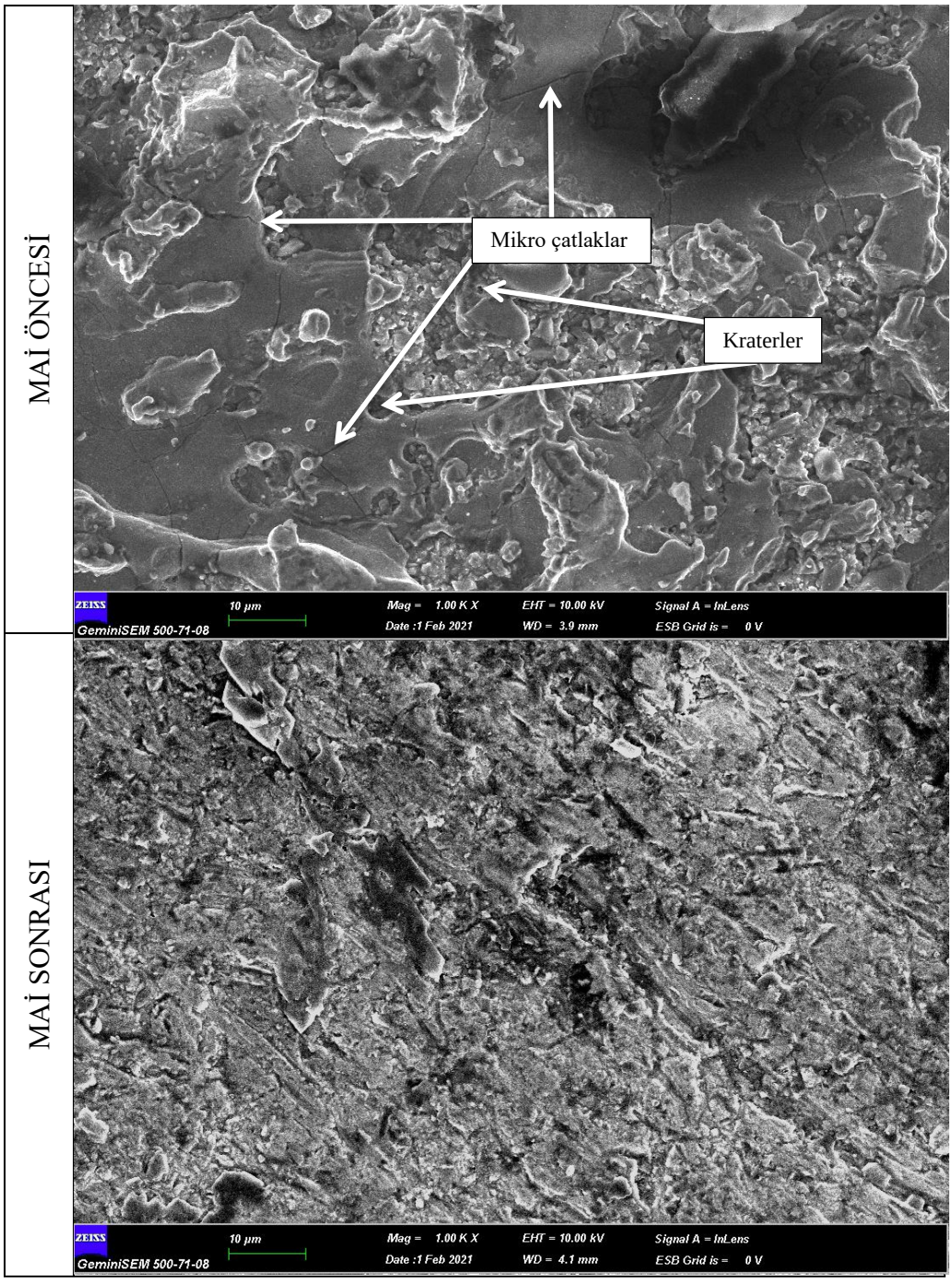


Resim 6.5. En düşük BTKAO değerine sahip numunelere ait SEM görüntüleri



Resim 6.6 En yüksek BTKAO değerine sahip numunelere ait SEM görüntüleri

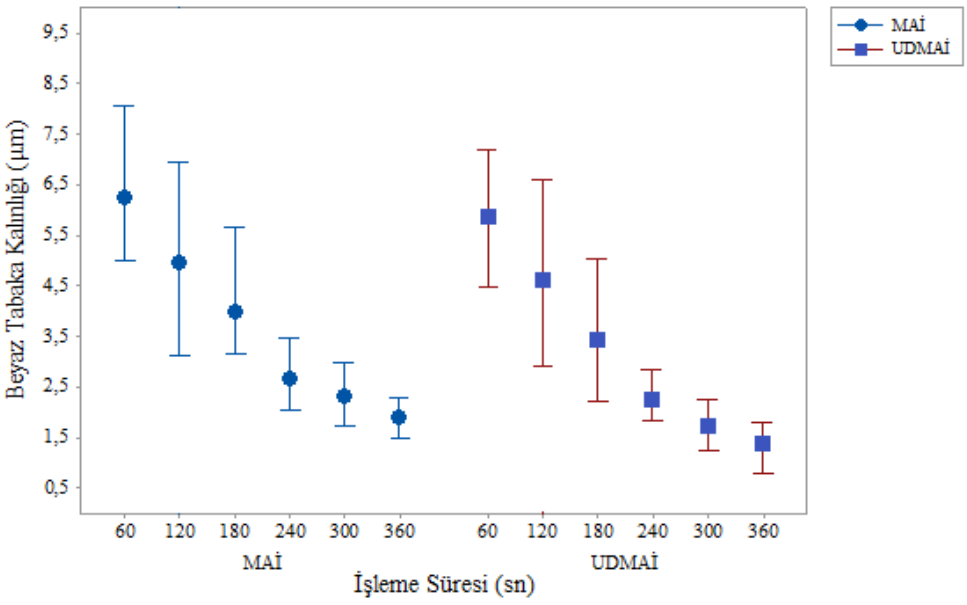
Resim 6.7’de MAİ işleminin yüzey yapıları üzerindeki etkisi anlayabilmek amacıyla işleme bölgesine dik olarak alınan bir SEM görüntüsü görülmektedir. Resim incelendiğinde MAİ işlemi öncesi yüzeyde oluşan krater ve mikro çatlak gibi oluşumların MAİ işlemi neticesinde büyük oranda azaldığı görülmektedir.



Resim 6.7. MAİ işleminin yüzey yapıları üzerindeki etkisi

6.3.1. İşleme süresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi

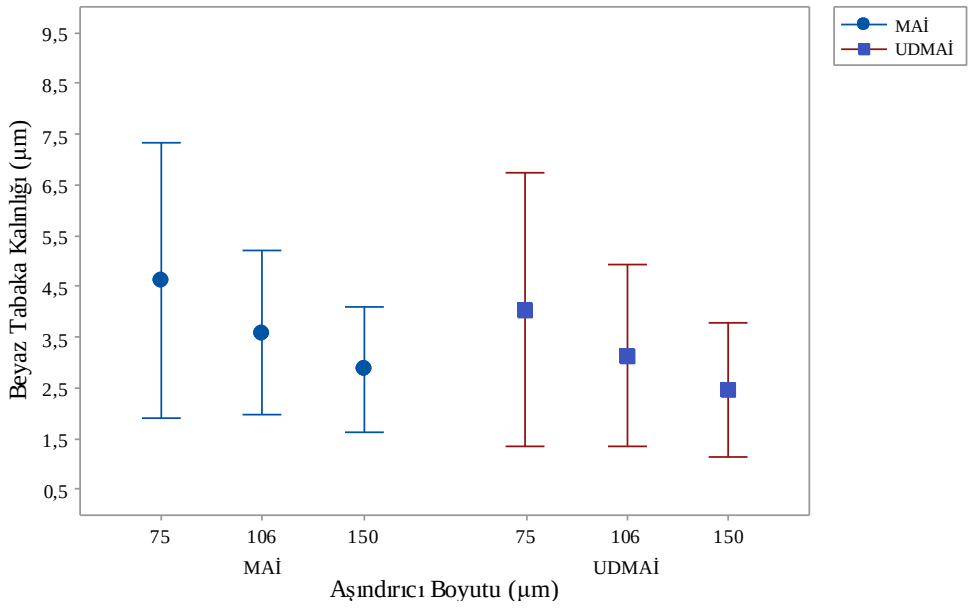
Şekil 6.11'de MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde işleme süresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. İşleme süresinin artmasıyla kaldırılan talaş miktarı da artmakta ve bunun neticesinde beyaz tabaka kalınlığında azalma meydana gelmektedir [78,90]. Bu azalma hem MAİ hem de UDMAİ yöntemi için benzer eğilim göstermekle birlikte, işleme süresinin ilk 4 parametresinde keskin bir azalma söz konusu iken 4. parametreden sonra bu azalış oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum beyaz tabakanın üst yüzeyinde tabanına nazaran daha gözenekli bir yapıya sahip olması ve bu yapının nispeten daha kolay kaldırılabilmesi ile açıklanabilir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde işleme süresinin 60 sn, 120 sn, 180 sn, 240 sn, 300 sn ve 360 sn değerleri için ortalama beyaz tabaka kalınlıkları sırasıyla; 6,25 µm, 4,96 µm, 3,98 µm, 2,69 µm, 2,33 µm ve 1,91 µm olmaktadır. UDMAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aynı işleme süresi parametreleri için elde edilen ortalama beyaz tabaka kalınlıkları ise sırasıyla; 5,85 µm, 4,63 µm, 3,42 µm, 2,25 µm, 1,74 µm, 1,37 µm olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi işleme süresi bakımından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde % 14,64'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.11. MAİ ve UDMAİ yönteminde işleme süresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi

6.3.2. Aşındırıcı boyutunun beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi

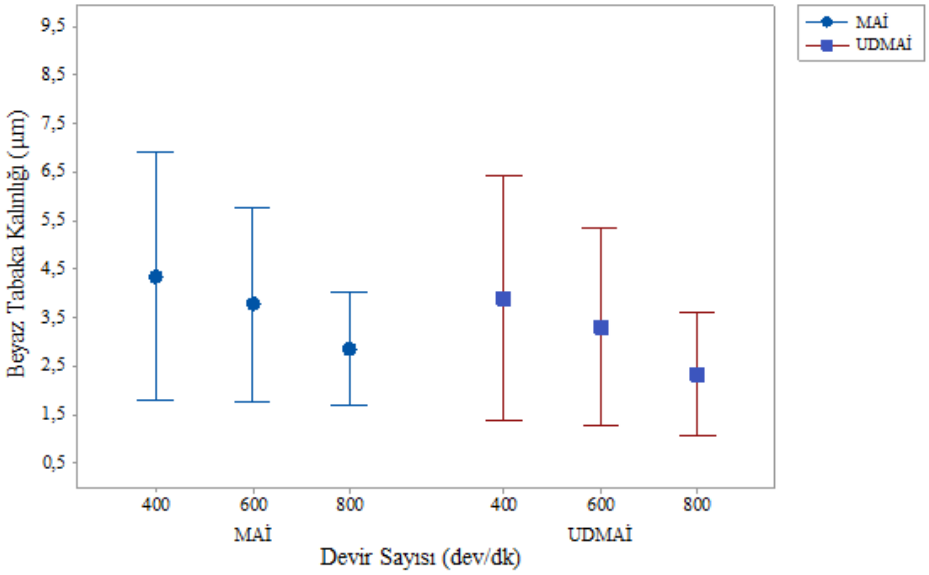
Şekil 6.12'de MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı boyutunun artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığının azaldığı görülmektedir. Bu durum tıpkı talaş kaldırma oranında olduğu gibi aşındırıcı boyutunun artmasıyla iş parçası ile aşındırıcı tanecik arasındaki temas uzunluğunun artması ile ilişkilendirilebilir. Artan temas uzunluğu ile daha büyük hacimde bir talaş kaldırma meydana gelerek beyaz tabaka kalınlığında azalış meydana gelmektedir [90]. Aşındırıcı boyutunun artmasıyla beyaz tabaka kalınlığındaki değişim MAİ ve UDMAİ yöntemleri için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde aşındırıcı boyutlarının 75 µm, 106 µm ve 150 µm değerleri için ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri sırasıyla; 4,61 µm, 3,59 µm ve 2,86 µm olmaktadır. UDMAİ yönteminde ise ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri aynı tanecik boyutu değerleri için sırasıyla 4,04 µm, 3,13 µm ve 2,48 µm olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %13,02'lik bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.12. MAİ ve UDMAİ yönteminde aşındırıcı boyutunun beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi

6.3.3. Devir sayısının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi

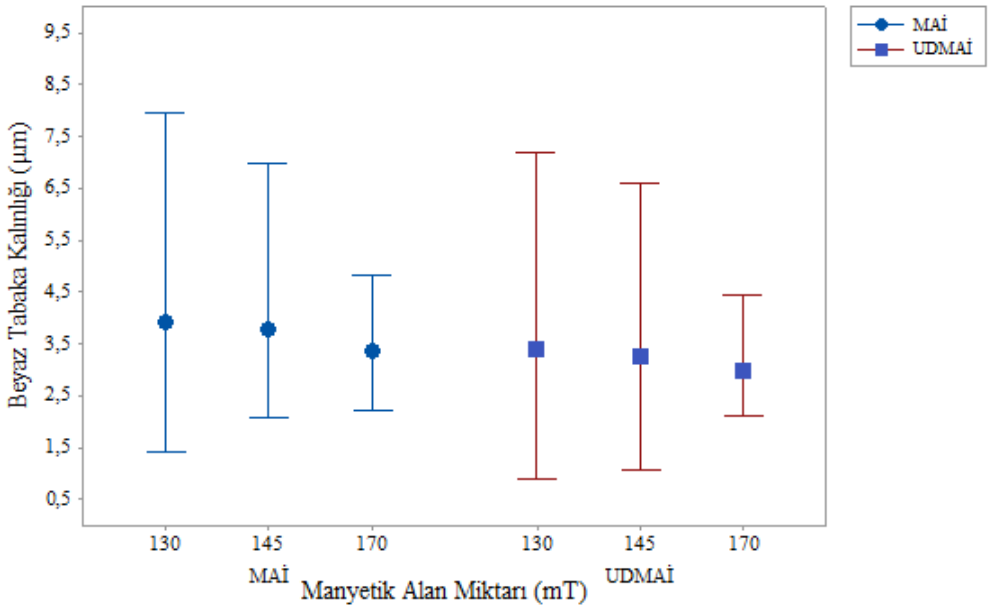
Şekil 6.13'te MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde devir sayısının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde devir sayısının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığının azaldığı görülmektedir. Devir sayısı aşındırıcı taneciklerin birim zamanda aldıkları yolu doğrudan etkilediği için devir sayısının artmasıyla birim zamanda kaldırılan talaş miktarı da artmakta ve bununla birlikte beyaz tabaka kalınlığı azalmaktadır [78,88,90]. Devir sayısının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi hem MAİ hem de UDMAİ yöntemi için benzer eğilim göstermektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde devir sayısının 400 dev/dk, 600 dev/dk ve 800 dev/dk değerleri için ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri sırasıyla; 4,39 µm, 3,80 µm ve 2,87 µm olmaktadır. UDMAİ yönteminin kullanıldığı deneylerde ise aynı devir sayısı parametreleri için ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri sırasıyla; 3,92 µm, 3,34 µm, ve 2,35 µm olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde devir sayısı açısından ortalama %13,11'lik bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.13. MAİ ve UDMAİ yönteminde devir sayısının beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi

6.3.4. Manyetik alan miktarının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi

Şekil 6.14 ‘te MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde manyetik alan miktarının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi grafiksel olarak görülmektedir. Şekilde mavi nokta ve kare şekilleri sırasıyla MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde o seviyelerdeki ortalama beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekilde bulunan çubuklar ise o seviyelerdeki en fazla ve en düşük beyaz tabaka kalınlık değerlerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde ortalama beyaz tabaka kalınlığının azaldığı görülmektedir. Artan manyetik alan miktarı neticesinde aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine uyguladığı baskı kuvveti artmakta ve aşındırıcı tanecikler iş parçası yüzeyinde daha derine nüfuz etmektedirler. Bunun neticesinde beyaz tabaka kalınlığında bir azalış meydana gelmektedir [90]. Manyetik alan miktarının ortalama beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi incelendiğinde hem MAİ hem de UDAMİ yöntemlerinde benzer bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. MAİ yöntemiyle yapılan deneylerde manyetik alan miktarının 130 mT, 145 mT ve 170 mT değerleri için ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri sırasıyla; 3,91 μm, 3,78 μm ve 3,36 μm olmaktadır. UDMAİ yönteminin kullanıldığı deneylerde ise aynı manyetik alan miktarı parametreleri için ortalama beyaz tabaka kalınlıkları sırasıyla; 3,38 μm, 3,26 μm ve 2,98 μm olmaktadır. MAİ ve UDMAİ yöntemi kıyaslandığında ultrasonik desteğinin ortalama beyaz tabaka kalınlık değerleri üzerinde aşındırıcı boyutu açısından ortalama %12,94’lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.



Şekil 6.14. MAİ ve UDMAİ yönteminde manyetik alan miktarının beyaz tabaka kalınlığı üzerine etkisi

6.4. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Her bir numuneye aynı işleme koşullarında TEİ işlemi uygulandığı için numunelerin yüzey sertlik değerleri birbirlerine çok yakın olmaktadır. TEİ işlemi sonrasında yapılan ölçümler sonucunda numune yüzeylerinin sertlik değerleri ortalama olarak 850 ~ 920 $HV_{0,025}$ aralığında çıkmaktadır. Bu yükseliş TEİ işlemi neticesinde iş parçası yüzeyinde bulunan beyaz tabakadan kaynaklanmaktadır. Beyaz tabaka içerisinde bulunan karbür ve oksit bileşikleri bu tabakanın sertliğinin artmasına sebep olmaktadır. Yüzeyden itibaren yapılan ölçümlerde ısıdan etkilenen bölgelerin numuneler arasında çok düşük farklılıklar göstermekle birlikte numuneler yüzeyden itibaren 15-20 µm genişlikten sonra numunelerin TEİ öncesi orijinal sertlik değeri olan yaklaşık 350 $HV_{0,025}$ değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Bu çalışmada manyetik aşındırıcılarla işleme ve ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme deney sonuçlarının istatistiksel analizi varyans analizi ve gri ilişkisel analiz yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

7.1. Varyans Analizi Yöntemi (ANOVA)

Varyans analizi yöntemi bir deneysel tasarımda bulunan bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki istatistiksel etkisini belirlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Yöntemde grupların ortalama değerden ne kadar uzaklaşıldığını tanımlayan varyanslar karşılaştırılmaktadır.

Varyans analizinde olması beklenen değerler ile deneysel değerler arasındaki sapma miktarı bir kayıp fonksiyonu aracılığıyla hesaplanır. Yöntemde kullanılan bu kayıp fonksiyonu işaret/gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek sürecin optimizasyonu sağlanır. Genellikle S/N oranının analizinde 3 farklı yaklaşım söz konusu olup, bunlar "daha düşük olan daha iyidir", "daha yüksek olan daha iyidir" ve "ortalama olan daha iyidir" yaklaşımlarıdır. Elde edilmek istenilen çıktıya göre bu yaklaşımlardan bir tanesi seçilmektedir [23]. Örneğin talaş kaldırma oranının incelendiği bir çalışmada talaş kaldırma oranının yüksek olması istenmektedir ya da takım aşınmasının en az olması istenmektedir. Bu iki örnek için S/N oranında sırasıyla daha yüksek olan daha iyidir ve daha düşük olan daha iyidir yaklaşımını kabul etmek gerekir. S/N oranlarının hesaplanmasında her bir yaklaşım için farklı formüller kullanılmaktadır (Eş. 7.1-7.3).

Ortalama olan daha iyidir $: S/N_{NB} = 10log\left(\frac{\overline{y}}{s_y^2}\right)$ (7.1)

Daha yüksek olan daha iyidir $: S/N_{HB} = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right)$ (7.2)

Daha düşük olan daha iyidir $: S/N_{HB} = -10log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right)$ (7.3)

burada,

$\overline{y}$, ölçülen değerlerin ortalamasını,

s_y^2, y'nin varyansını,

n, deney sayısını,

y, ölçülen değeri ifade etmektedir.

Yukarıda verilen yaklaşımların hepsi için, elde edilen S/N değeri ne kadar yüksek olursa, işlemin performansı da o kadar yüksek olacaktır. Bu sebeple işleme parametrelerinde hangi yaklaşım kabul edilirse edilsin, parametrelerin optmimum değeri en yüksek S/N değeri ile sağlanacaktır.

Varyans analizi neticesinde işleme etki eden parametrelerin performansı arasındaki farklar incelenmektedir. Bu analizin yapılması esnasında ihtiyaç duyulan serbestlik derecesi, ortalama kareler, karelerin toplamı vb. nicelikler Eş. 7.4 – 7.18 yardımıyla hesaplanır.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{A\times B} + SS_C \tag{7.4}$$

Burada;

SS_T: Toplam kareler toplamını

SS_A: A faktörüne ait kareler toplamını

SS_B: B faktörüne ait kareler toplamını

$SS_{A\times B}$: AxB'ye ait kareler toplamını

SS_C: Hata kareler toplamını ifade etmektedir.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^{N} y_i^2\right] - \frac{T^2}{N} \tag{7.5}$$

Burada;

N: Gözlemlerin toplam sayısını

y_i: i. gözlemi

T: Tüm gözlemlerin toplamını ifade etmektedir.

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{Ai}}\right)\right] - \frac{T^2}{N} \tag{7.6}$$

Burada;

k_A: A faktörünün seviye sayısını

A_i: A_i seviyesindeki gözlemlerin toplamını

n_{Ai}: A_i seviyesi altındaki gözlem sayısını ifade etmektedir.

$$SS_{A\times B} = \left[\sum_{i=1}^{c} \frac{(A\times B)_i^2}{n_{A\times B_i}}\right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \tag{7.7}$$

Burada;

c : Etkileşim faktörlerinin kombinasyon sayısını

$(A\times B)_i$: A ve B faktörlerinin i. koşulu altındaki verilerin toplamını ifade etmektedir.

$$\nu_T = \nu_A + \nu_B + \nu_{A\times B} + \nu_C = N - 1 \tag{7.8}$$

Burada;

ν_T: Toplam serbestlik derecesini

ν_A: A faktörünün serbestlik derecesini

ν_B: B faktörünün serbestlik derecesini

$\nu_{A\times B}$: Etkileşimin serbestlik derecesini

ν_C: Hatanın serbestlik derecesini

N: Deneme sayısının ifade etmektedir.

$$\nu_A = k_A - 1 \tag{7.9}$$

$$\nu_B = k_B - 1 \tag{7.10}$$

$$\nu_{A\times B} = (\nu_A)\cdot(\nu_B) \tag{7.11}$$

Burada;

k_A: A faktörünün seviye sayısını

k_B: B faktörünün seviye sayısını ifade etmektedir.

$$V_C = \frac{SS_C}{\nu_C} \tag{7.12}$$

$$V_A = \frac{SS_A}{\nu_A} \tag{7.13}$$

$$V_B = \frac{SS_B}{\nu_B} \tag{7.14}$$

$$V_{A\times B} = \frac{SS_{A\times B}}{\nu_{A\times B}} \tag{7.15}$$

Burada;

V_C: Hata varyansını

V_A: A faktörünün varyansını

V_B: B faktörünün varyansını

$V_{A\times B}$: AxB etkileşimi için varyansı ifade etmektedir.

$$F_A = \frac{V_A}{V_C} \tag{7.16}$$

$F_{\alpha.\nu_1.\nu_2}$

Burada;

F_A: A faktörüne ait F değerini

α: Riski

$1-\alpha$: Güven aralığını

ν_1: Payın serbestlik derecesini

ν_2: Paydanın serbestlik derecesini ifade etmektedir.

$$SS'_A = SS_A - (V_C)\cdot(V_A) \tag{7.17}$$

$$P = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100 \tag{7.18}$$

Burada;

SS'_A: A faktörüne göre kareler toplamının beklenen değerini

P: Katkı yüzdesini ifade etmektedir.

7.1.1. MAİ/UDMAİ deneylerinin varyans analizi

Bu çalışmada tel erozyonla işleme yöntemi kullanılarak işlenen titanyum alaşımının yüzey kalitesinin MAİ/UDMAİ yöntemiyle iyileştirilmesi neticesinde talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşme oranı gibi performans çıktılarının analizinde "daha yüksek olan daha iyidir" yaklaşımı beyaz tabaka kalınlığı analizinde ise "daha düşük olan daha iyidir" yaklaşımı esas alınmıştır. MAİ ve UDMAİ deney sonuçlarının S/N değerlerinin tespitinde kullanılan faktör ve seviyeleri Çizelge 7.1'de görülmektedir. MAİ ve UDMAİ deneyleri için, işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı bağımsız değişkenlerdir. Aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı faktörleri 3'er farklı seviyeye sahipken işleme süresi faktörü 6 farklı seviyeye sahiptir. Talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı ise bağımlı değişkenleri oluşturmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, Minitab Release 17 paket programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.1. MAİ/UDMAİ deney parametreleri ve seviyeleri

Sembol	Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
A	İşleme Süresi (dk)	1	2	3	4	5	6
B	Aşındırıcı boyutu (µm)	75	105	150	-	-	-
C	Devir sayısı (dev/dk)	400	600	800	-	-	-
D	Manyetik Alan (mT)	130	145	170	-	-	-

Talaş kaldırma oranının istatistiksel analizi

Çizelge 7.1'de verilen MAİ/UDMAİ deney parametrelerinin her bir seviyesine göre MAİ ve UDMAİ deneyleri için talaş kaldırma oranına ait S/N değerleri sırasıyla Çizelge 7.2 ve 7.3'te verilmiştir. İşleme parametrelerinin MAİ ve UDMAİ deneyleri için her bir seviyesinin talaş kaldırma oranı üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 7.1 ve 7.2'de görülmektedir. Şekillerdeki A1, A2, A3, A4, A5 ve A6 işleme süresinin; B1, B2 ve B3 aşındırıcı boyutunun; C1, C2 ve C3 devir sayısının; D1, D2 ve D3 manyetik alan miktarının kullanılan her bir seviyesini göstermektedir.

Çizelge 7.2. MAİ deneyleri için faktörlerin TKO için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	13,14	14,23[a]	14,00	13,64	13,98	13,62
Aşındırıcı boyutu (B)	13,09	13,58	14,64[a]	-	-	-
Devir sayısı (C)	12,44	14,10	14,77[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	12,67	13,90	14,74[a]	-	-	-

Toplam ortalama S/N değeri = 13,77 dB
[a] Optimum seviyeler

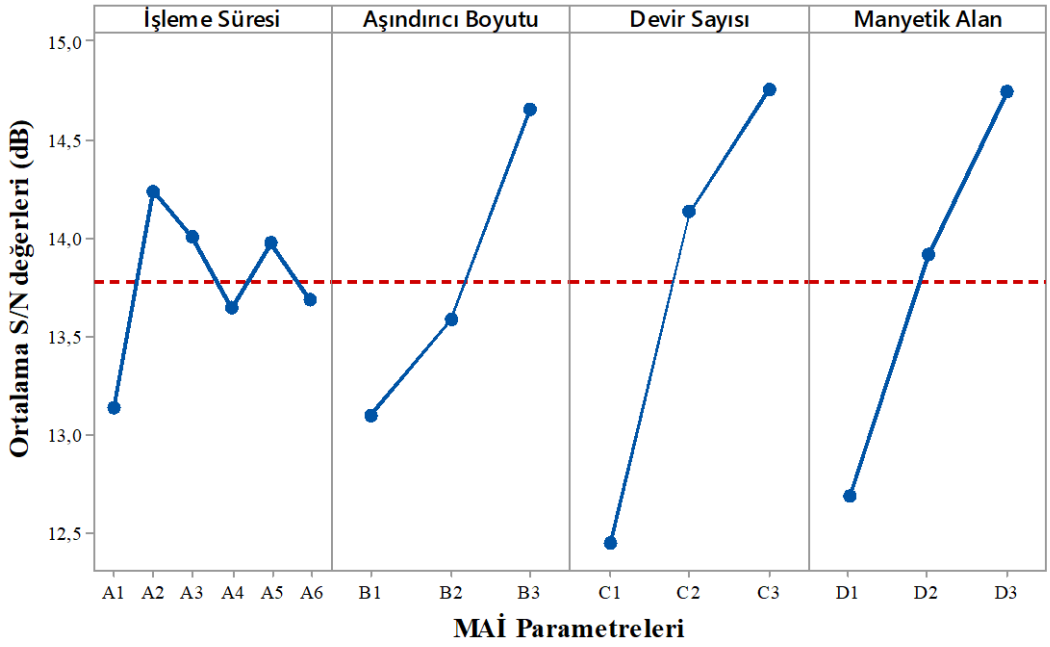
Çizelge 7.3. UDMAİ deneyleri için faktörlerin TKO için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	14,21	15,57	15,57	15,62[a]	14,88	14,75
Aşındırıcı boyutu (B)	14,56	14,97	15,76[a]	-	-	-
Devir sayısı (C)	14,41	15,01	15,88[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	14,18	15,18	15,93[a]	-	-	-

Toplam ortalama S/N değeri = 15,09 dB
[a] Optimum seviyeler

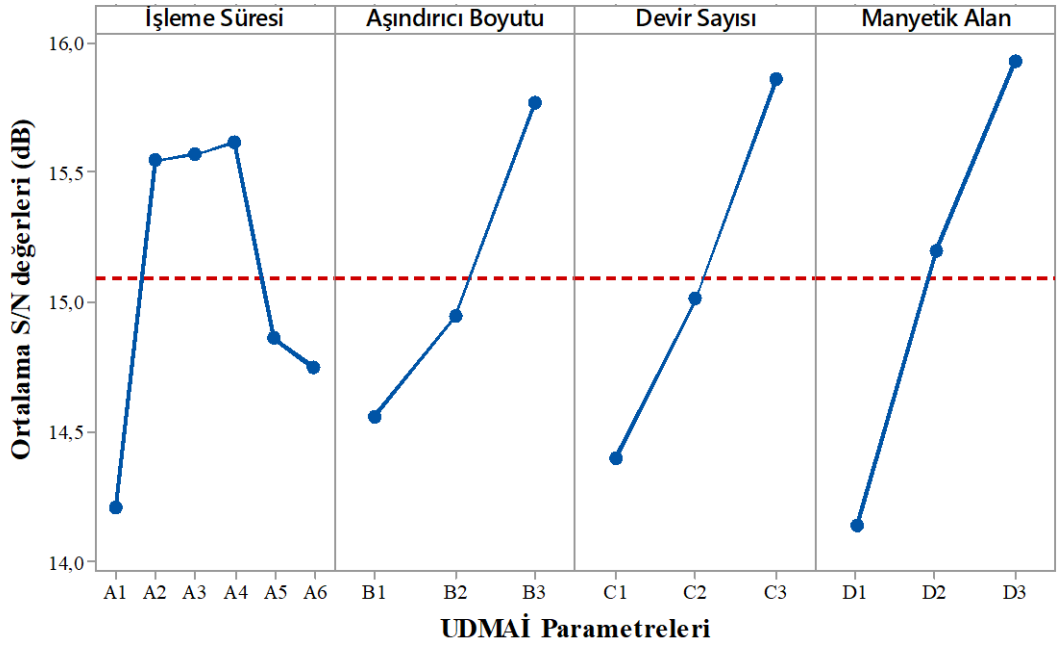
Çizelge 7.2 ve 7.3'te gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer o parametrenin elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde maksimum talaş kaldırma oranı elde etmek için işleme parametrelerinin uygun görüldüğü değerlerdir. Çizelgelerden görüldüğü gibi MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de maksimum talaş kaldırma oranı değeri aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan parametrelerinin 3. seviyelerinde elde edilmekte iken, işleme süresi parametresinde maksimum talaş kaldırma oranı MAİ ve UDMAİ yöntemi için sırasıyla 2. ve 4. seviyelerde elde edilmiştir.

Şekil 7.1 ve 7.2 MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin kullanıldığı deneylerde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı için S/N değerlerini göstermektedir. Daha büyük S/N değerleri istenilen (daha büyük olan daha iyidir) daha büyük talaş kaldırma oranı değerlerini vermektedir. Şekillerdeki işleme süresi, devir sayısı ve manyetik alan parametreleri dikkate alındığında seviyelerin artmasıyla S/N değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum talaş kaldırma oranının artması anlamına gelmektedir.



S/N: Daha yüksek olan daha iyidir

Şekil 7.1. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisi



S/N: Daha yüksek olan daha iyidir

Şekil 7.2. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisi

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde talaş kaldırma oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 7.4 ve 7.5' te görülmektedir.

Çizelge 7.4 incelendiğinde MAİ yönteminde devir sayısı parametresinin P değerinin 0,05 olan anlamlılık düzeyi değerinden daha küçük olduğu ve dolayısıyla MAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin MAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ancak işlem üzerinde belirli oranlarda katkılarının bulunduğu görülmektedir (Şekil 7.3).

Çizelge 7.5 incelendiğinde UDMAİ yönteminde manyetik alan parametresinin P değerinin 0,05 değerinden daha küçük olduğu ve dolayısıyla UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin MAİ yönteminde talaş kaldırma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı ancak işlem üzerinde belirli oranlarda katkılarının bulunduğu görülmektedir (Şekil 7.4).

Çizelge 7.4. MAİ yönteminde talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları

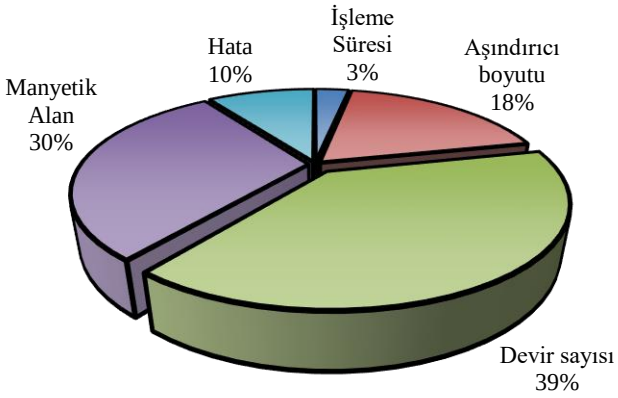
Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	0,3844	0,0768	0,07	0,995	3,00
Aşındırıcı boyutu (B)	2	2,377	1,1887	1,71	0,215	18,54
Devir sayısı (C)	2	4,996	2,4982	4,79	0,025	38,97
Manyetik Alan (D)	2	3,833	1,9167	3,20	0,070	29,90
Toplam Hata	6	4,1787	0,2974	-	-	9,59
Toplam	17	15,7691	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05

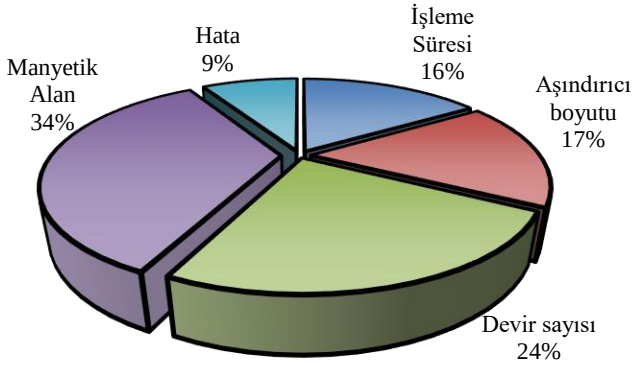
Çizelge 7.5. UDMAİ yönteminde talaş kaldırma oranı için ANOVA sonuçları

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	1,793	0,3587	0,46	0,800	16,01
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1,892	0,9459	1,52	0,250	16,89
Devir sayısı (C)	2	2,708	1,3542	2,39	0,125	24,17
Manyetik Alan (D)	2	3,848	1,9242	3,92	0,043	34,35
Hata	6	3,639	0,2591	-	-	8,58
Toplam	17	13,88	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05



Şekil 7.3. MAİ yönteminde işlem parametrelerinin TKO üzerindeki katkıları



Şekil 7.4. UDMAİ yönteminde işlem parametrelerinin TKO üzerindeki katkıları

Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranının istatistiksel analizi

Çizelge 7.1'de verilen MAİ/UDMAİ deney parametrelerinin her bir seviyesine göre MAİ ve UDMAİ deneyleri için talaş kaldırma oranına ait S/N değerleri sırasıyla Çizelge 7.6 ve 7.7'de verilmiştir. İşleme parametrelerinin MAİ ve UDMAİ deneyleri için her bir seviyesinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 7.5 ve 7.6'da görülmektedir. Şekillerdeki A1, A2, A3, A4, A5 ve A6 işleme süresinin; B1, B2 ve B3 aşındırıcı boyutunun; C1, C2 ve C3 devir sayısının; D1, D2 ve D3 manyetik alan miktarının kullanılan her bir seviyesini göstermektedir.

Çizelge 7.6. MAİ deneyleri için faktörlerin YPİO için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	24,79	27,62	30,34	31,53	31,42	33,72[a]
Aşındırıcı boyutu (B)	32,47[a]	29,54	27,69	-	-	-
Devir sayısı (C)	27,77	29,71	32,67[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	32,98[a]	28,96	27,77	-	-	-

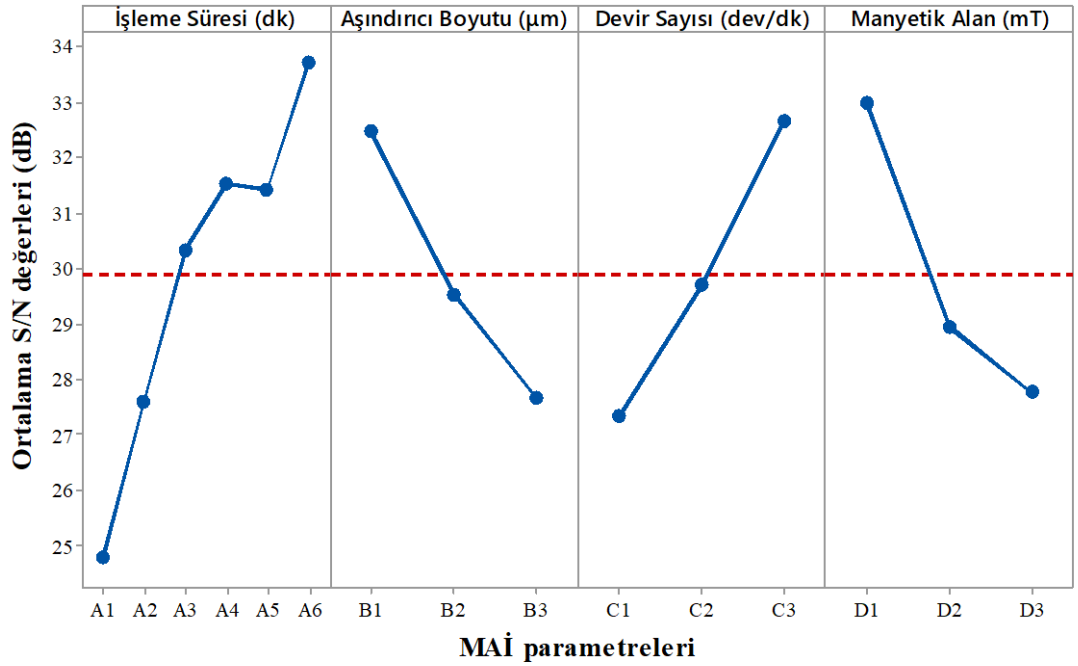
Toplam ortalama S/N değeri = 29,93 dB
[a]Optimum seviyeler

Çizelge 7.7. UDMAİ deneyleri için faktörlerin YPİO için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	30,77	33,65	32,26	36,45	36,16	37,48[a]
Aşındırıcı boyutu (B)	36,67[a]	35,05	32,17	-	-	-
Devir sayısı (C)	32,34	35,44	36,10[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	37,07[a]	34,77	32,05	-	-	-

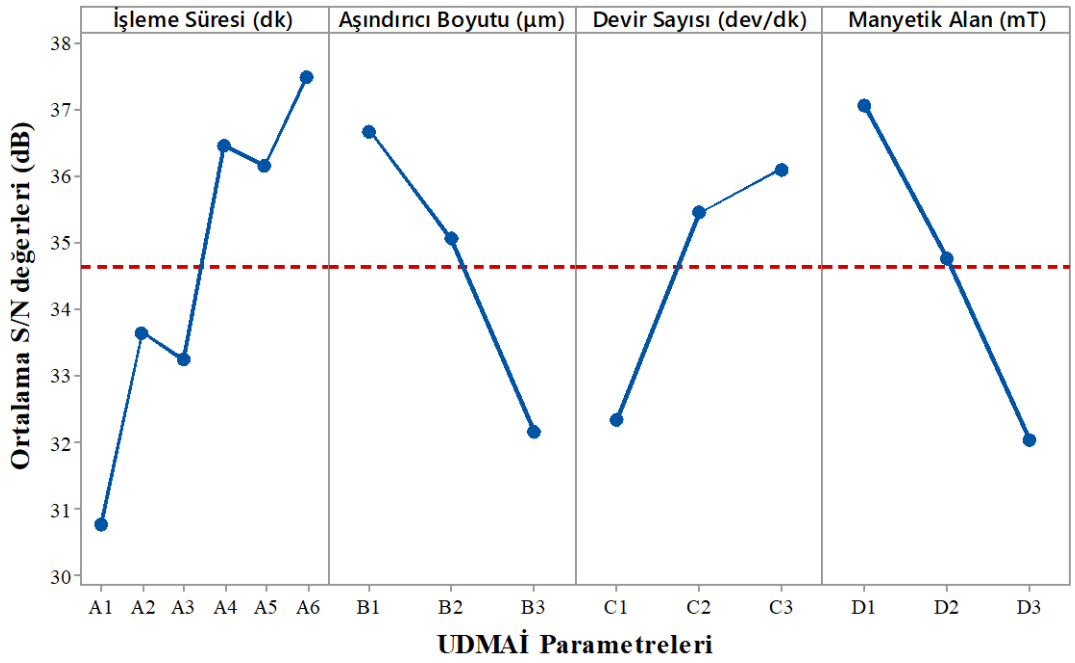
Toplam ortalama S/N değeri = 34,56 dB
[a]Optimum seviyeler

Çizelge 7.6 ve 7.7'de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer o parametrenin elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde maksimum yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı elde etmek için işleme parametrelerinin uygun görüldüğü değerlerdir. Çizelgelerden görüldüğü gibi MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de maksimum yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değeri aşındırıcı boyutu ve manyetik alan parametrelerinin 3. seviyelerinde elde edilmekte iken, işleme süresi ve devir sayısı parametrelerinde sırasıyla 1 ve 6. seviyelerde elde edilmiştir. Şekil 7.5 ve 7.6 MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin kullanıldığı deneylerde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı için S/N değerlerini göstermektedir. Daha büyük S/N değerleri istenilen (daha büyük olan daha iyidir) daha yüksek yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı değerlerini vermektedir. Şekillerdeki işleme süresi ve devir sayısı parametreleri dikkate alındığında seviyelerin artmasıyla S/N değerinin arttığı görülmektedir. Aşındırıcı boyutu ve manyetik alan miktarı parametrelerinin azalmasıyla ise S/N değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranının artması anlamına gelmektedir.



S/N: Daha yüksek olan daha iyidir

Şekil 7.5. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına etkisi



S/N: Daha yüksek olan daha iyidir

Şekil 7.6. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranına etkisi

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 7.8 ve 7.9'da görülmektedir.

Çizelge 7.8 incelendiğinde MAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki katkıları ise şekil 7.7'de görülmektedir.

Çizelge 7.9 incelendiğinde UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı üzerindeki katkıları ise Şekil 7.8'de görülmektedir. Her iki çizelge için de hata oranlarının oldukça düşük olduğu da görülmektedir.

Çizelge 7.8. MAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları

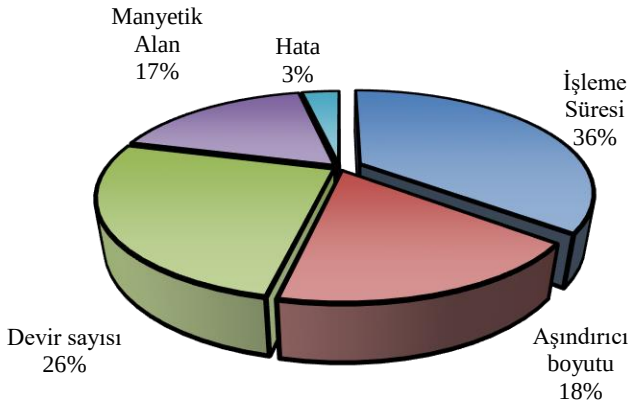
Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	2359	471,8	1,34	0,313	35,82
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1157	578,7	1,60	0,235	17,58
Devir sayısı (C)	2	1698	849,2	2,61	0,107	25,79
Manyetik Alan (D)	2	1153	576,6	1,59	0,236	17,51
Hata	6	2102	147,5	-	-	3,3
Toplam	17	8469	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05

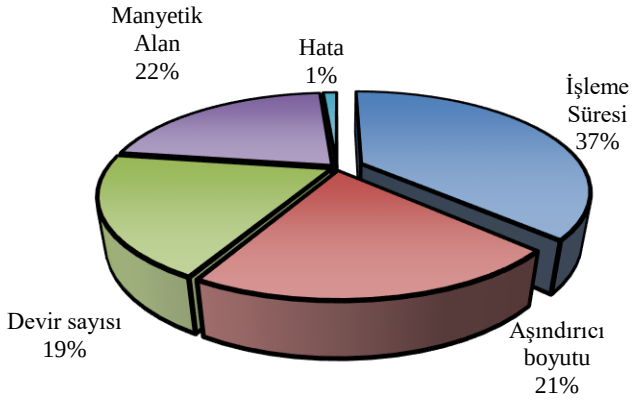
Çizelge 7.9. UDMAİ yönteminde YPİO için ANOVA sonuçları

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	2928	585,7	1,42	0,286	37,16
Aşındırıcı boyutu (B)	2	1636	818,0	1,97	0,175	20,76
Devir sayısı (C)	2	1529	764,7	1,81	0,198	19,41
Manyetik Alan (D)	2	1690	845,0	2,05	0,164	21,45
Hata	6	2102	147,5	-	-	1,22
Toplam	17	9885	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05



Şekil 7.7. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin YPİO üzerindeki katkıları



Şekil 7.8. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin YPİO üzerindeki katkıları

Beyaz tabaka kalınlığının istatistiksel analizi

Çizelge 7.1'de verilen MAİ/UDMAİ deney parametrelerinin her bir seviyesine göre MAİ ve UDMAİ deneyleri için beyaz tabaka kalınlıklarına ait S/N değerleri sırasıyla Çizelge 7.10 ve 7.11'de verilmiştir. İşleme parametrelerinin MAİ ve UDMAİ deneyleri için her bir seviyesinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri sırasıyla Şekil 7.9 ve 7.10'da görülmektedir. Şekillerdeki A1, A2, A3, A4, A5 ve A6 işleme süresinin; B1, B2 ve B3 aşındırıcı boyutunun; C1, C2 ve C3 devir sayısının; D1, D2 ve D3 manyetik alan miktarının kullanılan her bir seviyesini göstermektedir.

Çizelge 7.10. MAİ deneyleri için faktörlerin beyaz tabaka kalınlığı için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	-15,76	-13,43	-11,66	-8,38	-7,25	-5,49[a]
Aşındırıcı boyutu (B)	-12,00	-10,43	-8,55[a]	-	-	-
Devir sayısı (C)	-11,87	-10,54	-8,66[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	-10,48	-10,34	-10,17[a]	-	-	-

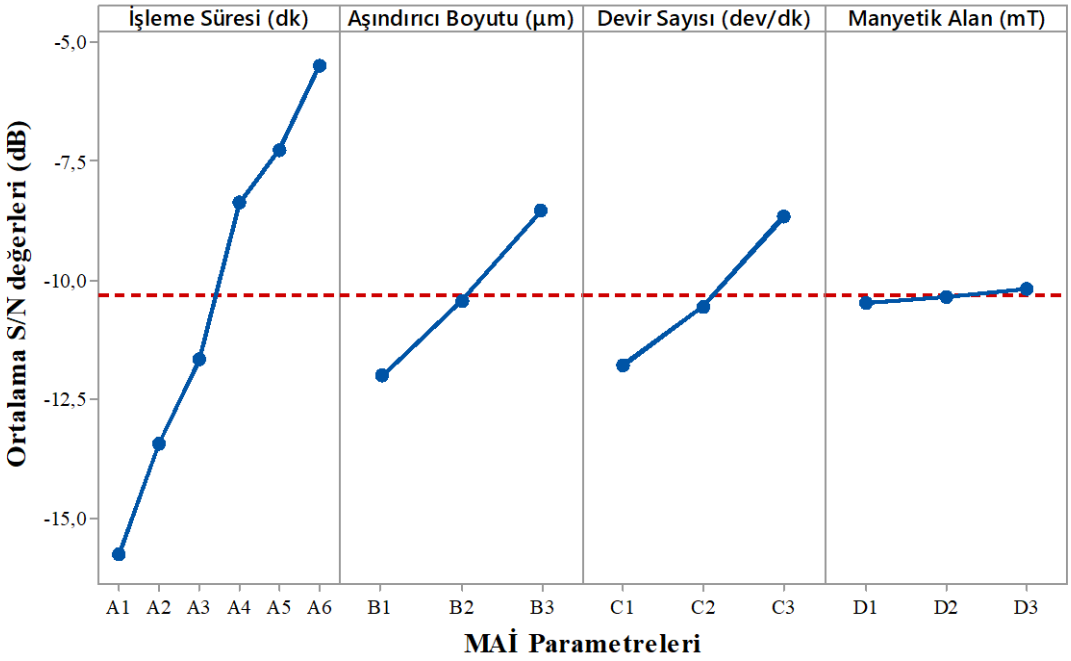
Toplam ortalama S/N değeri = -10,31 dB
[a]Optimum seviyeler

Çizelge 7.11. UDMAİ deneyleri için faktörlerin beyaz tabaka kalınlığı için S/N değerleri

Parametre	Ortalama S/N değeri (dB)					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme Süresi (A)	-15,19	-12,71	-10,26	-6,74	-4,61	-2,52[a]
Aşındırıcı boyutu (B)	-10,42	-8,79	-6,80[a]	-	-	-
Devir sayısı (C)	-10,51	-8,93	-6,58[a]	-	-	-
Manyetik Alan (D)	-8,61	-8,55[a]	-8,86	-	-	-

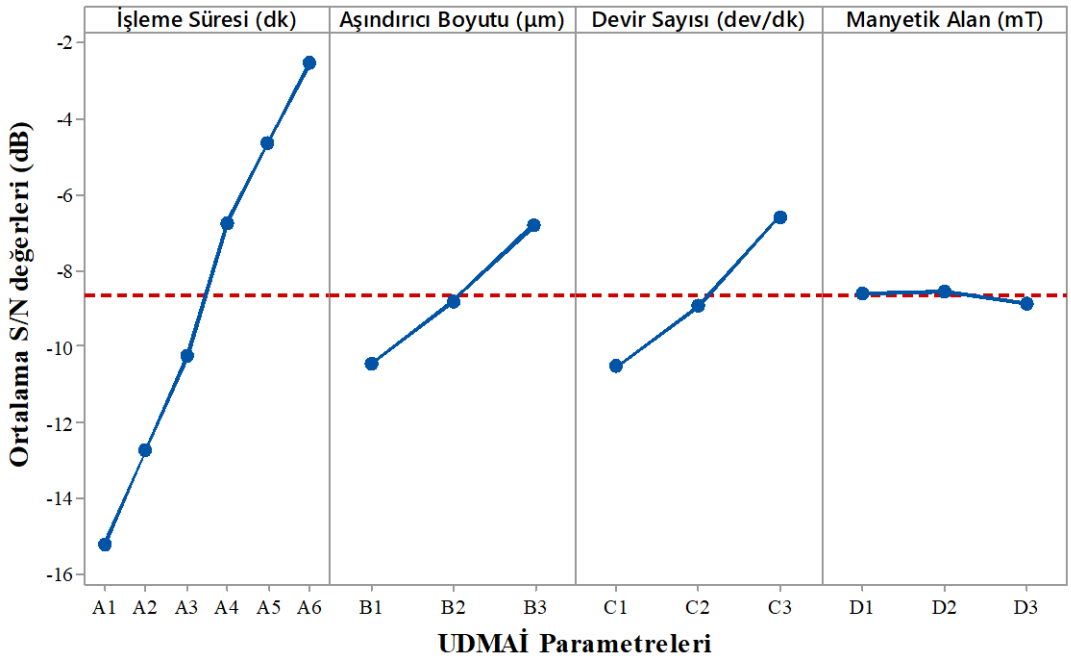
Toplam ortalama S/N değeri = -8,67 dB
[a]Optimum seviyeler

Çizelge 7.10 ve 7.11'de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer o parametrenin elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde minimum beyaz tabaka kalınlığı elde etmek için işleme parametrelerinin uygun görüldüğü değerlerdir. Çizelgelerden görüldüğü gibi MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin her ikisi için de minimum beyaz tabaka kalınlığı değeri aşındırıcı boyutu ve devir sayısı parametrelerinin 3. seviyelerinde elde edilmekte iken, işleme süresi parametresinin 6. seviyesinde elde edilmiştir. MAİ yöntemi için manyetik alan parametresinin 3. seviyesinde en düşük beyaz tabaka kalınlığı elde edilirken UDMAİ yönteminde manyetik alan parametresinin 2. seviyesinde en düşük beyaz tabaka kalınlığı ele edilmektedir. Şekil 7.9 ve 7.10, MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin kullanıldığı deneylerde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı için S/N değerlerini göstermektedir. Daha büyük S/N değerleri, istenilen (daha küçük olan daha iyidir) daha düşük beyaz tabaka kalınlığı değerlerini vermektedir.



S/N: Daha düşük olan daha iyidir

Şekil 7.9. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi



S/N: Daha düşük olan daha iyidir

Şekil 7.10. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı için yapılan varyans analizlerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 7.12 ve 7.13'te görülmektedir.

Çizelgeler incelendiğinde MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde işleme süresi parametresinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu diğer parametrelerin ise istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. İşleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki katkıları ise MAİ ve UDMAİ yöntemleri için sırasıyla Şekil 7.11 ve 7.12'de görülmektedir.

Çizelge 7.12. MAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları

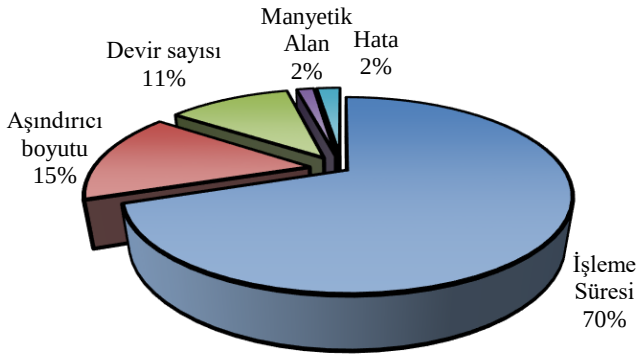
Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	42,76	8,55	5,50	0,007	69,62
Aşındırıcı boyutu (B)	2	9,27	4,63	1,33	0,293	15,10
Devir sayısı (C)	2	7,02	3,51	0,97	0,402	11,44
Manyetik Alan (D)	2	0,98	0,49	0,12	0,885	1,61
Hata	6	19,53	1,75	-	-	2,23
Toplam	17	79,56	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05

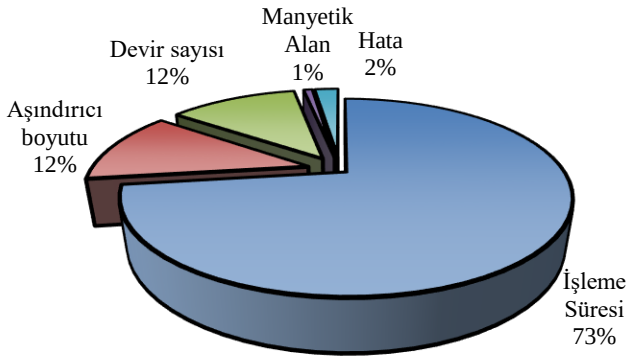
Çizelge 7.13. UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı için ANOVA sonuçları

Parametre	Serbestlik derecesi (ν)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans	F değeri	P değeri	% katkı
İşleme Süresi (A)	5	46,10	9,21	6,55	0,004	73,18
Aşındırıcı boyutu (B)	2	7,65	3,83	1,04	0,378	12,16
Devir sayısı (C)	2	7,54	3,77	1,02	0,384	11,97
Manyetik Alan (D)	2	0,51	0,25	0,06	0,940	0,82
Hata	6	19,79	13,29	-	-	1,87
Toplam	17	81,59	-	-	-	100

Anlamlılık düzeyi α=0,05



Şekil 7.11. MAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki katkıları



Şekil 7.12. UDMAİ yönteminde işleme parametrelerinin beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki katkıları

7.2. Gri İlişkisel Analiz Yöntemi

Gri ilişkisel analiz (GİA), faktörler arası karmaşık ilişkilerin bulunduğu karar problemlerine uygulanabilen bir "çok kriterli karar verme" yöntemidir [92]. GİA yönteminde asıl amaç gri bir sistem içerisinde yer alan her bir faktör ile referans olarak kabul edilen faktörleri kıyaslamak ve bu faktörler arasındaki ilişkinin derecesini belirlemektir. Deney sonuçları ile faktörler arasındaki ilişkinin karmaşık ve değerlendirmenin zor olduğu durumlarda bu yöntem istatiksel regresyon yöntemlerinin yerine kullanılabilmektedir [93].

7.2.1. Gri ilişkisel analiz adımları

GİA yönteminde karar verme mekanizmasını çalıştırıp anlamlı sonuçlar elde edebilmek için 6 adımdan oluşan bir hesaplama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [94]. Bu adımlar;
1-Veri setinin hazırlanarak karar matrisinin oluşturulması,
2- Referans serisinin ve karşılaştırma matrisinin oluşturulması,
3- Karar matrisinin normalizasyonu ve normalizasyon matrisinin oluşturulması,
4- Mutlak değer tablosunun oluşturulması,
5- Gri ilişkisel katsayı matrisinin oluşturulması,
6- Gri ilişkisel derecelerin hesaplanması adımlarıdır.

Veri setinin hazırlanarak karar matrisinin oluşturulması

Karşılaştırılacak m adet faktör serisi belirlenir.

$$x_i = \big(x_i(j), \dots, x_i(n)\big), \qquad i = 1,2, \dots, m \quad j = 1,2, \dots, n \tag{7.19}$$

Çok kriterli karar verme problemlerinde alternatifler x_i'lerle alterantfilerin her bir kriter için aldığı değerler ise $x_i(j)$'ler ile gösterilmektedir. m adet seri oluşturulduktan sonra X matrisi üzerinde gösterilmek kaydıyla karar matrisi oluşturulmuş olur.

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \cdots & x_m(n) \end{bmatrix} \tag{7.20}$$

Referans serisinin ve karşılaştırma matrisinin oluşturulması

Karar probleminde faktörleri kıyaslamak üzere belirlenecek olan referans seri,

$$x_0 = (x_0(j)) \;\; j = 1,2, \dots, n \tag{7.21}$$

şeklinde oluşturulur.

Burada $x_0(j)$, j. Kriterin normalize değerler içindeki en büyük değerini göstermektedir. Referans serisi, bir önceki adımda oluşturulan karar matrisinin ilk satırına eklenerek karşılaştırma matrisi oluşturulur.

Karar matrisinin normalizasyonu ve normalizasyon matrisinin oluşturulması

Farklı ölçek ve farklı birimlerde olan serilerin karşılaştırılabilir olması için verilerin aynı birime dönüştürülmeleri gerekmektedir. Serilerin çok büyük aralıklardan daha küçük aralıklara çekilmesi işlemine normalizasyon adı verilmektedir.

Normalizasyon işlemi amaç fonksiyonunun yaklaşımına göre 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Eğer amaç "daha yüksek olan daha iyidir" yaklaşımı ise, normalizasyon işlemi Eş. 7.22 aracılığıyla hesaplanır.

$$x_i^* = \frac{x_i(j) - \min_j x_i(j)}{\max_j x_i(j) - \min_j x_i(j)} \tag{7.22}$$

Eğer amaç "daha düşük olan daha iyidir" yaklaşımı ise normalizasyon işlemi Eş. 7.23 aracılığıyla hesaplanır.

$$x_i^* = \frac{\max_j x_i(j) - x_i(j)}{\max_j x_i(j) - \min_j x_i(j)} \tag{7.23}$$

Eğer amaç "ortalama değer daha iyidir" yaklaşımı ise normalizasyon işlemi Eş. 7.24 aracılığıyla hesaplanır.

$$x_i^* = \frac{|x_i(j) - x_{0b}(j)|}{\max_j x_i(j) - x_{0b}(j)} \tag{7.24}$$

Burada yer alan $x_{0b}(j)$ değeri maksimum ve minimum değerler arasında yer alan optimum değeri ifade etmektedir.

Normalizasyon işleminin tamamlanmasının ardından karar matrisi normalizasyon matrisine dönüştürülür.

$$X^* = \begin{bmatrix} x^*_1(1) & x^*_1(2) & \cdots & x^*_1(n) \\ x^*_2(1) & x^*_2(2) & \cdots & x^*_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x^*_m(1) & x^*_m(2) & \cdots & x^*_m(n) \end{bmatrix} \tag{7.25}$$

Mutlak değer tablosunun oluşturulması

Δ_{0i} mutlak fark değeri x^*_1 ile x^*_0 arasındaki mutlak farkın değeri ile Eş. 7.26 yardımıyla hesaplanır ve mutlak değer tablosu oluşturulur.

$$\Delta_{0i} = |x_0^*(j) - x_1^*(j)| \qquad \begin{matrix} i = 1,2,\dots,m \\ j = 1,2,\dots,n \end{matrix} \tag{7.26}$$

$$\Delta_{0i} = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \cdots & \Delta_{01}(n) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{02}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{0m}(1) & \Delta_{0m}(2) & \cdots & \Delta_{0m}(n) \end{bmatrix} \tag{7.27}$$

Gri ilişkisel katsayı matrisinin oluşturulması

Gri ilişkisel katsayı matrisinin elemanları Eş. 7.28 aracılığıyla hesaplanır.

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\Delta_{min} + \xi\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(j) + \xi\Delta_{max}} \tag{7.28}$$

Burada ξ parametresi, ayrıcı katsayı olup [0,1] aralığında değerler almakla birlikte literatürde genellikle $\xi = 0{,}5$ olarak alınmıştır [95].

Gri ilişkisel derecelerin hesaplanması

Gri ilişkisel derece, gri bir sistem içerisinde bulunan x_i^* serisi ile x_0^* referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçütü olup serilerin birbirleri ile karşılaştırılmasına olanak sunmaktadır. Gri ilişkisel derece ne kadar büyükse x_i^* serisi ile x_0^* referans serisi arasındaki ilişki o derece kuvvetlidir [92].

Gri ilişkisel dereceler kriterlerin önem miktarına göre farklı yöntemlerle hesaplanır. Kriterlerin eşit öneme sahip olduğu durumlarda Eş. 7.29 kullanılırken önem dereceleri farklı olduğu durumlarda Eş. 7.30 kullanılarak hesaplama yapılmaktadır.

$$\Gamma_{0i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \gamma_{0i} \qquad i = 1,2,\dots,m \tag{7.29}$$

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^{n} [w_i(j) \cdot \gamma_{0i}(j)] \qquad i = 1,2,\dots,m \tag{7.30}$$

Burada Γ_{0i}, i. serinin gri ilişkisel derecesini, $w_i(j)$, j kriterinin ağırlığını göstermektedir.
Gri ilişkisel dereceler hesaplandıktan sonra gri ilişkisel dereceler büyükten küçüğe sıralanarak referans seriye olan benzerlikleri gösterilir. En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip seçenek, karar problemi için en iyi alternatif olarak belirlenmiş olur.

7.2.2. MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin gri ilişkisel analizi

MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin gri ilişkisel analizi esnasında MS Office Excel 2016 paket programı kullanılmıştır.
MAİ/UDMAİ yöntemi neticesinde talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı olmak üzere 3 değerlendirme kriteri söz konusu olup, bu 3 kriter için en ideal işleme parametrelerini içeren deneyin tespit edilmesi için GİA yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan veri seti, MAİ ve UDMAİ yöntemleri için sırasıyla Çizelge 7.14 ve 7.15'te görülmektedir.

Çizelge 7.14. MAİ yöntemi karar problemine ait veri seti

	Maks	Maks	Min
	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü İyileşme Oranı (%)	Beyaz Tabaka Kalınlığı (µm)
	K1	K2	K3
1	3,200	24,953	7,792
2	4,300	13,526	6,092
3	6,800	15,503	4,870
4	4,250	21,680	7,160
5	6,000	16,862	4,590
6	5,350	37,986	3,138
7	4,500	60,593	5,640
8	5,600	41,692	3,104
9	5,000	14,082	3,212
10	5,300	47,807	2,372
11	3,500	41,198	3,554
12	6,000	27,239	2,145
13	5,200	43,421	2,836
14	4,980	66,275	1,874
15	4,820	17,974	2,308
16	5,000	81,223	1,890
17	4,700	28,103	2,328
18	4,700	50,092	1,518

Çizelge 7.15. UDMAİ yöntemi karar problemine ait veri seti

	Maks	Maks	Min
	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü İyileşme Oranı (%)	Beyaz Tabaka Kalınlığı (µm)
	K1	K2	K3
1	4,000	48,486	7,248
2	4,700	35,824	5,756
3	7,200	23,718	4,554
4	5,500	46,633	6,622
5	6,500	37,183	4,454
6	6,050	61,025	2,734
7	5,200	80,234	4,934
8	6,600	64,607	2,372
9	6,300	14,885	2,956
10	6,500	73,069	1,892
11	4,950	64,422	3,162
12	6,850	57,628	1,716
13	5,620	72,699	2,228
14	5,540	89,993	1,254
15	5,480	40,086	1,766
16	5,600	90,549	1,344
17	5,600	55,281	1,804
18	5,200	74,366	0,988

MAİ ve UDMAİ yöntemlerin talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı parametrelerinin maksimum olması istenirken, beyaz tabaka kalınlığı parametresinin minimum olması istenmektedir.

Veri setleri oluşturulduktan sonra MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde her bir kriter için referans serisinin oluşturulması gerekmektedir. MAİ yöntemi için bu referans seri, TKO ve YPİO değerlerinin mevcut sonuçlar içerisinde en yüksek olduğu ve beyaz tabaka kalınlığının en düşük olduğu durumu kapsar nitelikte $x_0 = \{6{,}8;\ 81{,}223;\ 1{,}518\}$ şeklinde belirlenirken UDMAİ yönteminde ise yine aynı koşullarla $x_0 = \{7{,}2;\ 90{,}549;\ 0{,}989\}$ şeklinde belirlenmiştir.

Referans serisinin belirlenmesinden sonra normalizasyon işlemine geçilmiştir. Normalizasyon işlemi sırasında TKO ve YPİO değerleri için "daha büyük olan daha iyidir" yaklaşımına göre hesaplama yapılırken beyaz tabaka kalınlığı değerleri için "daha düşük olan daha iyidir" yaklaşımına göre hesaplama yapılmıştır. MAİ ve UDMAİ yöntemleri için normalizasyon işlemi sonrası elde edilen değerler sırasıyla Çizelge 7.16 ve 7.17'de görülmektedir.

Çizelge 7.16. MAİ deneylerine ait normalizasyon tablosu

	K1	K2	K3
Referans	1,000	1,000	1,000
1	0,000	0,168	0,000
2	0,305	0,000	0,270
3	1,000	0,029	0,465
4	0,291	0,120	0,100
5	0,777	0,049	0,510
6	0,597	0,361	0,741
7	0,361	0,695	0,340
8	0,666	0,416	0,747
9	0,500	0,008	0,730
10	0,583	0,506	0,863
11	0,083	0,408	0,675
12	0,777	0,202	0,900
13	0,555	0,441	0,789
14	0,494	0,779	0,943
15	0,450	0,065	0,874
16	0,500	1,000	0,940
17	0,416	0,215	0,879
18	0,416	0,540	1,000

Çizelge 7.17. UDMAİ deneylerine ait normalizasyon tablosu

	K1	K2	K3
Referans	1,000	1,000	1,000
1	0,000	0,444	0,000
2	0,218	0,276	0,238
3	1,000	0,116	0,430
4	0,468	0,419	0,100
5	0,781	0,294	0,442
6	0,640	0,609	0,721
7	0,375	0,863	0,369
8	0,812	0,657	0,778
9	0,718	0,000	0,685
10	0,781	0,768	0,855
11	0,296	0,654	0,652
12	0,890	0,564	0,883
13	0,506	0,764	0,801
14	0,481	0,992	0,957
15	0,462	0,333	0,875
16	0,500	1,000	0,943
17	0,500	0,533	0,869
18	0,375	0,786	1,000

Normalize edilmiş referans değer ile normalize edilmiş alternatif değer arasındaki farkın mutlak değerleri tarafından oluşturulan mutlak değerler tablosu MAİ ve UDMAİ yöntemleri için sırasıyla Çizelge 7.18 ve 7.19'da görülmektedir.

Çizelge 7.18. MAİ deneylerine ait mutlak değer tablosu

	K1	K2	K3
1	1,000	0,831	1,000
2	0,694	1,000	0,729
3	0,000	0,971	0,534
4	0,708	0,880	0,899
5	0,222	0,951	0,490
6	0,403	0,639	0,258
7	0,639	0,305	0,657
8	0,333	0,584	0,253
9	0,500	0,992	0,270
10	0,417	0,494	0,136
11	0,917	0,591	0,325
12	0,222	0,797	0,100
13	0,444	0,558	0,210
14	0,506	0,221	0,057
15	0,550	0,934	0,126
16	0,500	0,000	0,059
17	0,583	0,785	0,129
18	0,583	0,460	0,000

Çizelge 7.19. UDMAİ deneylerine ait mutlak değer tablosu

	K1	K2	K3
1	1,000	0,556	1,000
2	0,781	0,723	0,762
3	0,000	0,883	0,570
4	0,531	0,580	0,900
5	0,219	0,705	0,554
6	0,359	0,390	0,279
7	0,625	0,136	0,630
8	0,188	0,343	0,221
9	0,281	1,000	0,314
10	0,219	0,231	0,144
11	0,703	0,345	0,347
12	0,109	0,435	0,116
13	0,494	0,236	0,198
14	0,519	0,007	0,042
15	0,538	0,667	0,124
16	0,500	0,000	0,057
17	0,500	0,466	0,130
18	0,625	0,214	0,000

Mutlak değer tablolarının oluşturulması sonrası bu tablodaki değerlerden faydalanarak Δ_{max} ve Δ_{min} değerleri sırasıyla 1 ve 0 olarak belirlenmiştir. Ayrıcı katsayı olarak da ξ= 0,5 kullanılmıştır. Gri ilişkisel katsayılar ise Eş. 7.28 aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan gri ilişkisel katsayılarla birlikte gri ilişkisel derecelerin de yer aldığı sıralama tabloları MAİ ve UDMAİ deneyleri için sırasıyla Çizelge 7.20 ve 7.21'de yer almaktadır. Çizelgelerin oluşturulması sırasında bütün kriterlerin eşit öneme sahip olduğu varsayımı yapılmıştır.

Çizelge 7.20. MAİ deneylerinde gri ilişkisel dereceler ve sıralamaları

	K1	K2	K3	Γ_{0i}	Sıralama
1	0,333	0,376	0,333	0,347	18
2	0,419	0,333	0,407	0,386	16
3	1,000	0,340	0,483	0,608	6
4	0,414	0,362	0,357	0,378	17
5	0,692	0,345	0,505	0,514	12
6	0,554	0,439	0,659	0,551	9
7	0,439	0,621	0,432	0,497	13
8	0,600	0,461	0,664	0,575	7
9	0,500	0,335	0,649	0,495	14
10	0,545	0,503	0,786	0,612	5
11	0,353	0,458	0,606	0,473	15
12	0,692	0,385	0,833	0,637	4
13	0,529	0,472	0,704	0,569	8
14	0,497	0,694	0,898	0,696	2
15	0,476	0,349	0,799	0,541	11
16	0,500	1,000	0,894	0,798	1
17	0,462	0,389	0,795	0,549	10
18	0,462	0,521	1,000	0,661	3

Çizelge 7.21. UDMAİ deneylerinde gri ilişkisel dereceler ve sıralamaları

	K1	K2	K3	Γ_{0i}	Sıralama
1	0,333	0,474	0,333	0,380	18
2	0,390	0,409	0,396	0,398	17
3	1,000	0,361	0,467	0,610	8
4	0,485	0,463	0,357	0,435	16
5	0,696	0,415	0,475	0,528	15
6	0,582	0,562	0,642	0,595	10
7	0,444	0,786	0,442	0,558	12
8	0,727	0,593	0,693	0,671	6
9	0,640	0,333	0,614	0,529	14
10	0,696	0,684	0,776	0,719	4
11	0,416	0,592	0,590	0,532	13
12	0,821	0,535	0,811	0,722	3
13	0,503	0,679	0,716	0,633	7
14	0,491	0,986	0,922	0,799	1
15	0,482	0,428	0,801	0,570	11
16	0,500	1,000	0,898	0,799	2
17	0,500	0,518	0,793	0,604	9
18	0,444	0,700	1,000	0,715	5

Çizelgeler incelendiğinde GİA yöntemine göre MAİ ve UDMAİ yöntemlerinde TKO ve YPİO değerlerinin maksimum, beyaz tabaka kalınlığının minimum olması için tercih edilebilir deneylerin sırasıyla 16 ve 14. deneyler olduğu görülmektedir.
16 numaralı MAİ deneyi incelendiğinde, işleme süresinin 360 sn, aşındırıcı boyutunun 75 µm, devir sayısının 800 dev/dk ve manyetik alan miktarının 145 mT olduğu görülmektedir.

14 numaralı UDMAİ deneyi incelendiğinde işleme süresinin 300 sn, aşındırıcı boyutunun 106 µm, devir sayısının 800 dev/dk ve manyetik alan miktarının 130 mT olduğu görülmektedir.

Her bir deney parametresine ait ortalama gri ilişkisel dereceleri MAİ ve UDMAİ yöntemi için sırasıyla Çizelge 7.22 ve 7.23'te verilmiştir. Çizelgelerde her bir parametrenin maksimum olduğu derece * işareti ile belirlenmiştir. Bu değerler optimum parametre seviyelerini göstermektedir. Çizelgeler incelendiğinde hem MAİ hem de UDAMİ yöntemlerinde optimum deney sonuçlarının işleme süresinin 360 sn, aşındırıcı boyutunun 150 µm, devir sayısının 800 dev/dk ve manyetik alan miktarının 170 mT olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.22. MAİ deneylerinde ortalama gri ilişkisel dereceler

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme süresi (sn)	0,447	0,481	0,522	0,574	0,602	0,669*
Aşındırıcı boyutu (µm)	0,533	0,532	0,582*			
Devir sayısı (dev/dk)	0,463	0,544	0,64*			
Manyetik alan (mT)	0,537	0,552	0,557*			

Çizelge 7.23. UDMAİ deneylerinde ortalama gri ilişkisel dereceler

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
İşleme süresi (sn)	0,462	0,519	0,586	0,657	0,667	0,706*
Aşındırıcı boyutu (µm)	0,587	0,588	0,623*			
Devir sayısı (dev/dk)	0,508	0,592	0,698*			
Manyetik alan (mT)	0,596	0,599	0,603*			

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımından imal edilmiş ve tel erozyon yöntemiyle kesilmiş plakalar, yüzey kalitelerinin artırılması amacıyla manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle işlenmiştir. Çalışmada MAİ yönteminin verimini artırmak amacıyla iş parçasına yüksek frekanslarda titreşim verilmiş ve yöntemin talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda yapılan araştırma ve incelemeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Manyetik aşındırıcılarla işleme deneyleri neticesinde ortalama olarak 4,95 mg/dk'lık bir talaş kaldırma oranı elde edilirken, bu değer uygun işleme parametreleri ile 6,80 mg/dk değerlerine kadar yükselmektedir. Ultrasonik destekli manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminde ise ortalama talaş kaldırma oranı 5,74 mg/dk olurken uygun işleme parametreleri ile bu değer 7,20 mg/dk değerine çıkmaktadır.

Talaş kaldırma oranı, hem MAİ hem de UDMAİ yöntemlerinde aşındırıcı boyutunun artmasıyla artmaktadır. Aşındırıcı boyutu açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin TKO üzerinde % 15,79'lık bir olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Devir sayısının artması da hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde TKO değerinin artmasına sebep olmaktadır. UDMAİ yönteminde bu artış doğrusal olarak gerçekleşmekte iken MAİ yönteminde azalan bir artış hızı söz konusudur. Devir sayısı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin TKO üzerinde %16,23'lük bir olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

Manyetik alan miktarındaki artış hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde TKO oranını artırmıştır. Bu artış 1. seviyeden 2. seviyeye geçerken keskin bir şekilde gerçekleşirken 2. seviyeden 3. seviyeye daha yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir. Manyetik alan miktarı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin %15,76'lık bir olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

İşleme parametrelerinin istatistiksel olarak etkileri varyans analizi yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda MAİ yönteminde TKO değeri üzerinde işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin sırasıyla %3, %18, %39 ve %30 katkılarının olduğu; aynı parametrelerin UDMAİ yöntemi için ise yine sırasıyla %16, %17, %24 ve %34 olduğu tespit edilmiştir.

TEİ yöntemi ile kesilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 1,60-1,63 µm aralığında değişmektedir. MAİ ve UDMAİ işlemi sonrası elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini daha iyi kıyaslayabilmek amacıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları hesaplanmıştır. MAİ deneyleri neticesinde ortalama %36,12'lik bir YPİO değeri elde edilirken UDMAİ deneylerinde ortalama %57,26'lik bir değer elde edilmiştir. YPİO değerleri uygun işleme parametreleriyle MAİ ve UDMAİ yöntemleri için sırasıyla %81,22 ve % 90,55 değerlerine kadar yükselmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı, hem MAİ hem de UDMAİ yöntemlerinde işleme süresinin artmasıyla artmaktadır. İşleme süresi açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde %58,52'lik bir olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

Aşındırıcı boyutunun artmasıyla birlikte hem MAİ hem de UDMAİ yöntemlerinde YPİO değeri azalmaktadır. Aşındırıcı boyutu açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde % 58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

Devir sayısının artmasıyla birlikte MAİ ve UDMAİ yöntemlerinin ikisinde de YPİO değeri artmaktadır. Devir sayısı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin YPİO değeri üzerinde %58,54'lük bir olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Manyetik alan miktarındaki artış YPİO değerini olumsuz etkilemektedir. Manyetik alan miktarı parametresinin 1. seviyesinden 2. seviyesine geçişte YPİO değerinde keskin bir azalma söz konusu iken 2. seviyeden 3. seviyeye geçişte azalış hızı azalmaktadır. Manyetik alan miktarı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin YPİO üzerinde %58,54'lük bir olumlu etki yaptığı görülmektedir.

İşleme parametrelerinin MAİ yönteminde YPİO üzerindeki istatistiksel katkıları ise işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan parametreleri için sırasıyla %36, %18,

%26 ve %17 olmaktadır. Aynı parametrelerin UDMAİ yöntemi için istatistiksel katkıları ise sırasıyla %37, %21, %19 ve %22 olmaktadır.

TEİ yöntemiyle kesilmiş numuneler SEM aracılığıyla incelendiğinde yüzey üzerinde krater, boşluk ve mikro çatlaklar gibi istenmeyen yapıların olduğu tespit edilmiştir. Yeniden katılaşma bölgesi ya da beyaz tabaka olarak adlandırılan bu tabakanın kalınlığı ortalama 9,63 µm boyutlarındadır. Yapılan MAİ ve UDMAİ işlemleri sonucunda bu tabakaların ortalama kalınlık değerleri sırasıyla 3,69 µm ve 3,21 µm olarak tespit edilmiştir. Bu değerler MAİ ve UDMAİ yöntemleri için beyaz tabaka kalınlığında sırasıyla % 61,68 ve % 66,66 oranında bir azalmaya tekabül etmektedir. MAİ ve UDMAİ yönteminin uygun işleme parametreleri ile beyaz tabaka kalınlık değerleri sırasıyla 1,51 µm ve 0,98 µm değerine kadar düşmektedir. Öte yandan hem MAİ hem de UDMAİ yöntemleri neticesinde yüzey üzerinde bulunan krater, boşluk ve mikro çatlakların büyük oranda yok edildiği de tespit edilmiştir.

İşleme süresinin artması hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığının azalmasına sebep olmaktadır. Bu azalış işleme süresinin ilk 4 seviyesinde keskin bir şekilde gerçekleşirken 4. seviyeden sonra daha yavaş devam etmektedir. İşleme süresi açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde %14,64'lük bir olumlu etki yaptığı görülmüştür.

Aşındırıcı boyutunun artmasıyla hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı azalmaktadır. Aşındırıcı boyutu açısından ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde %13,02'lik bir olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

Devir sayısının artması hem MAİ hem de UDMAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığının azalmasına yol açmaktadır. Devir sayısı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde %13,11'lik olumlu bir etkiye sebep olduğu görülmektedir.
Manyetik alan miktarındaki artış hem MAİ hem de UDMAİ yöntemi için beyaz tabaka kalınlığının azalmasına yol açmaktadır. Manyetik alan miktarı açısından değerlendirildiğinde ultrasonik desteğinin %12,94'lük bir olumlu etkiye sebep olduğu tespit edilmiştir.

İşleme parametrelerinin MAİ yönteminde beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki istatistiksel katkıları ise işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan parametreleri için

sırasıyla %70, %15, %11 ve %2 olmaktadır. Aynı parametrelerin UDMAİ yöntemi için istatistiksel katkıları ise sırasıyla %73, %12, %12 ve %1 olmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ve beyaz tabaka kalınlığı kriterleri açısından en uygun sonucu bulabilmek adına elde edilen veriler gri ilişkisel analiz yöntemiyle incelenmiş ve MAİ yöntemi için en uygun sonucun işleme süresinin 6 dk, aşındırıcı boyutunun 75 µm, devir sayısının 800 dev/dk ve manyetik alan miktarının 145 mT olduğu deneyde elde edildiği tespit edilmiştir. UDMAİ yöntemi için en uygun sonucun işleme süresinin 5 dk, aşındırıcı boyutunun 106 µm, devir sayısının 800 dev/dk ve manyetik alan miktarının 130 mT olduğu deneyde elde edildiği tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda tel erozyon yöntemiyle işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla manyetik aşındırıcılarla işleme yönteminin kullanılabileceği ve bu yönteme ultrasonik desteğinin yöntemin performansına olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

Yapılan çalışmada edinilen tecrübeler neticesinde gelecek çalışmalar için sunulabilecek öneriler aşağıda listelenmiştir.

- Yapılan çalışmada kullanılan ultrasonik sistem bir soğutma sistemiyle desteklenerek daha uzun süreli ultrasonik destekli deneyler yapılabilir.
- Numunelerin yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı gibi özellikleri incelenebilir.
- İş parçasına yatay eksende verilen ultrasonik titreşimler yerine dikey eksende titreşimler uygulanarak işleme performansına etkisi incelenebilir.
- Farklı aşındırıcı tanecikler kullanılmak suretiyle işleme performansları kıyaslanabilir.
- Sabit mıknatıslar yerine elektromıknatıslar kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yang, S., Li, W., Yang, S., and Li, W. (2018). Surface Quality and Finishing Technology. In *Surface Finishing Theory and New Technology*, Berlin: Springer. 1-3.

2. Çaydaş, U., Çelik, M., and Köklü, U. (2019). Investigation of material removal rate and surface roughness in finishing of internal surfaces of AISI 304 L austenitic stainless steel pipes by magnetic abrasives. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1213–1225.

3. Chen, S. L., Yan, B. H., and Huang, F. Y. (1999). Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6A1-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1–3), 107–111.

4. He, P., Zhang, J., Zhou, R., and Li, X. (1999). Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer. *Materials Characterization*, 43(5), 287–292.

5. Uzun, İ. H., ve Bayındır, F. (2010). Dental Uygulamalarda Titanyum ve Özelllikleri. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 20(2), 213–220.

6. Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., and Wicker, R. B. (2009). Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2(1), 20-32.

7. Ulutan, D., and Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-280.

8. Krishna Alla, R., Ginjupalli, K., Upadhya, N., Shammas, M., Krishna Ravi, R., and Sekhar, R. (2011). Surface Roughness of Implants: A Review. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 25(3), 112-118.

9. Bai, T., Liu, J., Zhang, W., and Zou, Z. (2014). Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade. *Propulsion and Power Research*, 3(2), 82–89.

10. Çelik, Y. H., ve Kiliçkap, E. (2018). Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar: Derleme. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 163–175.

11. Minton, T., Ghani, S., Sammler, F., Bateman, R., Fürstmann, P., and Roeder, M. (2013). Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 75, 27–35.

12. Manjaiah, M., Narendranath, S., and Basavarajappa, S. (2014). A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM. *Reviews on Advanced Materials Science*, 36(2), 89–111.

13. Shabgard, M. R., and Alenabi, H. (2015). Ultrasonic Assisted Electrical Discharge Machining of Ti–6Al–4V Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(8), 991–

1000.

14. Lin, Y. C., Hung, J. C., Chow, H. M., Wang, A. C., and Chen, J. T. (2016). Machining Characteristics of a Hybrid Process of EDM in Gas Combined with Ultrasonic Vibration and AJM. *Procedia CIRP*, 42, 167–172.

15. Shabgard, M. R., Gholipoor, A., and Mohammadpourfard, M. (2018). Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5–8), 2657–2669.

16. Le, V. T., Banh, T. L., Tran, X. T., and Thi Hong Minh, N. (2019). Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with Tungsten Carbide Powder Mixing in Kerosene Fluid. *Applied Mechanics and Materials*, 889, 115–122.

17. Kumar, V., Kumar, A., Kumar, S., and Singh, N. K. (2018). Comparative study of powder mixed EDM and conventional EDM using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18089–18094.

18. Shard, A., Shikha, D., Gupta, V., and Garg, M. P. (2018). Effect of B4C abrasive mixed into dielectric fluid on electrical discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(12), 554.

19. Kolli, M., and Kumar, A. (2019). Assessing the Influence of Surfactant and B4C Powder Mixed in Dielectric Fluid on EDM of Titanium Alloy. *Silicon*, 11(4), 1731–1743.

20. Toshimutsu, R., Okada, A., Kitada, R., and Okamoto, Y. (2016) Improvement in Surface Characteristics by EDM with Chromium Powder Mixed Fluid. *Procedia CIRP*, 42, 231-235.

21. Nguyen, T. D., Nguyen, P. H., and Banh, L. T. (2019). Die steel surface layer quality improvement in titanium μ-powder mixed die sinking electrical discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *100*(9–12), 2637–2651.

22. Unses, E., and Cogun, C. (2015). Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 61(6), 409–418.

23. Çaydaş U, (2008) *Ti6Al4V Alaşımının Elektro Erozyon Ve Elektro Kimyasal İşleme Yöntemleriyle İşlenebilirliğinin Araştırılması.* Yayımlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

24. Yan, B. H., Wang, C. C., Chow, H. M., and Lin, Y. C. (2000). Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball burnishing for Al2O3/6061Al composite. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(10), 1403–1421.

25. Hasçalik, A., and Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science*, 253(22), 9007–9016.

26. Wang, C. C., Chow, H. M., Yang, L. D., and Lu, C. Te. (2009). Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis: A feasibility study. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 4134–4140.

27. Bhattacharyya, B., and Doloi, B. (2020). Advanced finishing processes. In *Modern machining technology: Advanced, hybrid, micro machining and super finishing technology*. United Kingdom: Academic, 716-724.

28. Ho, K. H., and Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287–1300.

29. Boothroyd, G., and Winston, A. K. (2006). Non-conventional machining processes. In *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Florida: Taylor & Francis, 505-507.

30. Schumacher, B. M. (1990). About the Role of Debris in the Gap During Electrical Discharge Machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39(1), 197–199.

31. Gowthaman, P. S., and Jeyakumar, S. (2019) A Review on machining of High Temperature Aeronautics Super-alloys using WEDM. *Materials Today: Proceedings* 18, 4782–4791.

32. Antar, M. T., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Cuttell, M., Perez, R., and Winn, A. J. (2010). WEDM of aerospace alloys using "clean cut" generator technology. *16th International Symposium on Electromachining, ISEM 2010,* 285–290.

33. Pramanik, A. (2014). Developments in the non-traditional machining of particle reinforced metal matrix composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86, 44-61.

34. Yan, M. T., & Lai, Y. P. (2007). Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1686–1694.

35. Yang, S., and Li, W. (2017). Magnetic Abrasive Finishing Technology, In *Surface finishing theory and new technology.* China. National defence Industry Press, 225-334.

36. Shinmura, T., Hamano, Y., and Yamaguchi, H. (1998). A New Precision Deburring Process for Inside Tubes by the Application of Magnetic Abrasive Machining. *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 64(620), 1428–1434.

37. Ko, S. L., Baron, Y. M., Chae, J. W., and Polishuk, V. S. (2003). Development of Deburring Technology for Drilling Burrs using Magnetic Abrasive Finishing Method. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21*, 2003, 367–372.

38. Yamaguchi, H., Shinmura, T., Sato, T., Taniguchi, A., and Tomura, T. (2006). Study of Surface Finishing Process using Magneto-rheological Fluid (MRF). *Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Contributed Papers*, 72(1), 100–105.

39. Singh, D. K., Jain, V. K., and Raghuram, V. (2006). Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(7–8), 652–662.

40. Shinmura, T., Takazawa, K., Hatano, E., Matsunaga, M., and Matsuo, T. (1990). Study on Magnetic Abrasive Finishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39(1), 325–328.

41. Smolkin, M. R., and Smolkin, R. D. (2006). Calculation and analysis of the magnetic force acting on a particle in the magnetic field of separator. Analysis of the equations used in the magnetic methods of separation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(11), 3682–3693.

42. Judal, K. B., and Yadava, V. (2013). Modeling and simulation of cylindrical electro-chemical magnetic abrasive machining of AISI-420 magnetic steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2089–2100.

43. Jayswal, S. C., Jain, V. K., and Dixit, P. M. (2005). Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(5–6), 477–490.

44. Venkata Rao, R. (2011). Modeling and Optimization of Nano-finishing Processes, In *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes,* London, Springer, 285–316.

45. Heng, L., Kim, Y. J., and Mun, S. D. (2017). Review of Superfinishing by the Magnetic Abrasive Finishing Process. *High Speed Machining*, 3(1).

46. Heng, L., Yang, G. E., Wang, R., Kim, M. S., and Mun, S. D. (2015). Effect of carbon nano tube (CNT) particles in magnetic abrasive finishing of Mg alloy bars. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(12), 5325–5333.

47. Yu, M. F., Lourie, O., Dyer, M. J., Moloni, K., Kelly, T. F., and Ruoff, R. S. (2000). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science*, 287(5453), 637–640.

48. Wu, J., Zou, Y., and Sugiyama, H. (2015). Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using low frequency alternating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 386, 50–59.

49. Guo, Z. N., Lee, T. C., Yue, T. M., and Lau, W. S. (1997). A study of ultrasonic-aided wire electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 63(1–3), 823–828.

50. Chen, Y. F., and Lin, Y. C. (2009). Surface modifications of Al-Zn-Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4343–4350.

51. Srivastava, V., and Pandey, P. M. (2012). Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(3), 393–402.

52. Goiogana, M., Sarasua, J. A., Ramos, J. M., Echavarri, L., and Cascón, I. (2016). Pulsed ultrasonic assisted electrical discharge machining for finishing operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 109, 87–93.

53. Wang, T., and Kunieda, M. (2004). Dry WEDM for Finish Cut. *Key Engineering Materials* 258–259, 562–566.

54. Yu, Z. B., Jun, T., and Masanori, K. (2004). Dry electrical discharge machining of

cemented carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 149, 353–357.

55. Kunieda, M., Miyoshi, Y., Takaya, T., Nakajima, N., Bo, Y. Z., and Yoshida, M. (2003). High speed 3D milling by dry EDM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1), 147–150.

56. Zhanbo, Y. U., Takahashi, J., Nakajima, N., Sano, S., Kara To, K., and Kunieda, M. (2005). Feasibility of 3-D Surface Machining by Dry EDM. *International Journal of Electrical Machining*, 10(0), 15–20.

57. Wong, Y. S., Lim, L. C., Rahuman, I., and Tee, W. M. (1998). Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 79(1–3), 30–40.

58. Peças, P., and Henriques, E. (2003). Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(14), 1465–1471.

59. Klocke, F., Lung, D., Antonoglou, G., and Thomaidis, D. (2004). The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 191–197.

60. Wu, K. L., Yan, B. H., Huang, F. Y., and Chen, S. C. (2005). Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10), 1195–1201.

61. Simons, A. (1929). Method of Polishing Wire-Drawing Dies and Apparatus Therefor. Patent no: 1 698 458

62. Coats, H. P. (1940). Method of and Apparatus for Polishing Containers. Patent no: 2 196 059

63. Kang, J., George, A., and Yamaguchi, H. (2012). High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing. In *Procedia CIRP*, 1, 414–418.

64. Wang, Y., Shih, A., Nteziyaremye, V., Li, W., and Yamaguchi, H. (2014). Surface Finishing of Needles for High-performance Biopsy. *Procedia CIRP*, 14, 48–53.

65. Li, W., Li, X., Yang, S., and Li, W. (2018). A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, *260*, 20–29.

66. Kajal, S., Jain, V. K., Ramkumar, J., and Nagdeve, L. (2019). Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *100*(5–8), 1105–1122.

67. Yamaguchi, H., & Shinmura, T. (2004). Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process. *Precision Engineering*, 28(2), 135–142.

68. Mulik, R. S., & Pandey, P. M. (2011). Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(5–8), 501–515.

69. Wu, J. Z., & Zou, Y. H. (2013). Study on an ultra-precision plane magnetic abrasive finishing process by use of alternating magnetic field. *Applied Mechanics and Materials* 395–396, 985–989.

70. Jiao, A. Y., Quan, H. J., Li, Z. Z., and Zou, Y. H. (2015). Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9–12), 1613–1623.

71. Kanish, T. C., Narayanan, S., Kuppan, P., and Denis Ashok, S. (2018). Investigations on wear behavior of Magnetic Field Assisted Abrasive Finished SS316L material. *Materials Today: Proceedings* 5, 12734–12743.

72. Kim, T. W., and Kwak, J. S. (2010). A study on deburring of magnesium alloy plate by magnetic abrasive polishing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(2), 189–194.

73. Lin, C. T., Yang, L. D., and Chow, H. M. (2007). Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(1–2), 122–130.

74. Vahdati, M., and Rasouli, S. A. (2016). Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-14.

75. Yin, S., and Shinmura, T. (2004). Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12–13), 1297–1303.

76. Mulik, R. S., and Pandey, P. M. (2011). Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29(1), 68–77.

77. Misra, A., Pandey, P. M., and Dixit, U. S. (2017). Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 133, 344–356.

78. Misra, A., M. Pandey, P., and Dixit, U. S. (2017). Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131–132, 853–867.

79. Liu, G. Y., Guo, Z. N., Jiang, S. Z., Qu, N. S., and Li, Y. B. (2014). A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing. *Procedia CIRP*, 14, 234–238.

80. Sihag, N., Kala, P., and Pandey, P. M. (2015). Chemo assisted magnetic abrasive finishing: Experimental investigations. *Procedia CIRP*, 26, 539–543.

81. Pandey, K., and Pandey, P. M. (2018). Use of chemical oxidizers with alumina slurry in Double Disk Magnetic Abrasive Finishing for improving surface finish of Si (100). *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 138–150.

82. Singh, G., Kumar, H., Kansal, H. K., and Srivastava, A. (2020). Effects of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on material removal of inconel 625 tubes. *Procedia Manufacturing* 48, 466–473.

83. Singh, G., and Kumar, H. (in press). Influence of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on external roundness of Inconel 625 tubes. *Materials Today: Proceedings*.

84. Singh Farwaha, H., Deepak, D., and Singh Brar, G. (2020). Design and performance of ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process set up for machining and finishing of 316L stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1626–1631.

85. Sihag, N., Kala, P., and Pandey, P. M. (2017). Analysis of Surface Finish Improvement during Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing on Chemically treated Tungsten Substrate. *Procedia Manufacturing*, 10, 136–146.

86. Taylan D. (2009). *Taguchi deney tasarımı uygulaması,* yayımlanmamış yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

87. İnternet: Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. (2002, Jul). *AZO Materials.* Web: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1547 10 Mart 2021'de alınmıştır.

88. Buj-Corral, I., Álvarez-Flórez, J. and Domínguez-Fernández, A. (2019). Effect of grain size and density of abrasive on surface roughness, material removal rate and acoustic emission signal in rough honing processes. *Metals,* 9(8):860.

89. Kanish, T. C., Narayanan, S., Kuppan, P. and Denis, A., S. (2019). Experimental Investigations on Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS 316L. *Procedia Manufacturing,* 30, 276-283.

90. Singh, D. K., Jain, V. K. and Raghuran, V. (2004). Parametric study of magnetic abrasive finishing process. *Journal of Materials Processing Technology,* 149, 22-29.

91. Yan, B. H., Chang, G. W., Chang, J. H. and Hsu, R. T. (2004). Improving Electrical Discharge Machined Surfaces Using Magnetic Abrasive Finishing. *Machining Science and Technology*, 8:1, 103-118.

92. Yıldırım, B. F. (2018). Gri İlişkisel Analiz. B. F. Yıldırım & E. Önder (Editörler). *İşletmeceiler, Mühendisler ve Yöneticiler İçin Operasyonel, Yönetsel ve stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.* 3. Baskı. Bursa: Dora Basım-Yayın.s. 229–244.

93. Lin, Z. C., & Ho, C. Y. (2003). Analysis and application of grey relation and ANOVA in chemical-mechanical polishing process parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(1), 10–14.

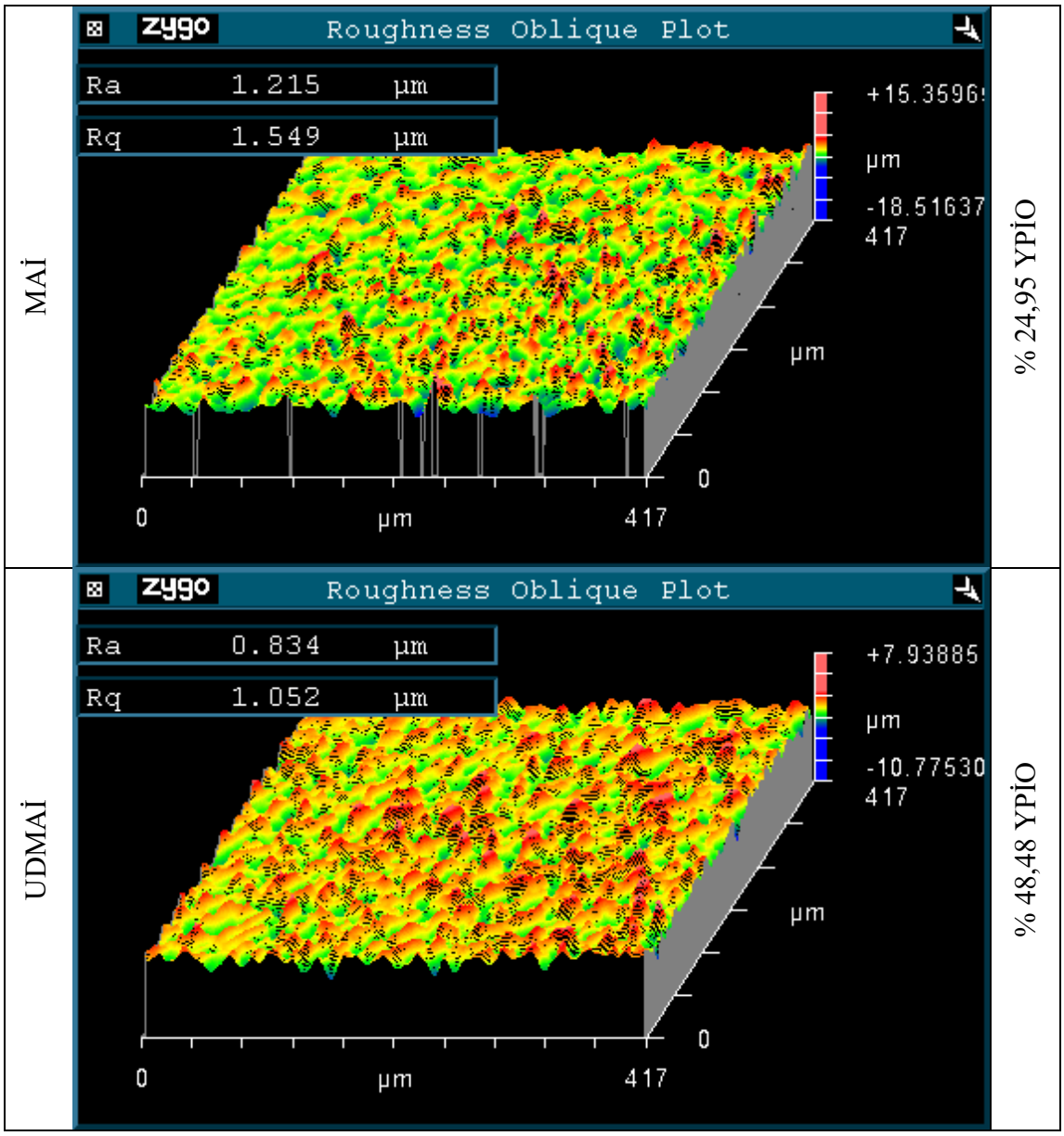
94. Wu, H.-H. (2002). A Comparative Study of Using Grey Relational Analysis in Multiple

Attribute Decision Making Problems. *Quality Engineering*, 15(2), 209–217.

95. Baş. M. (2010) *İşletmelerde finansal başarısızlığın öngörülmesinde gri ilişkisel analiz tekniği: Tekstil ve deri sektöründe bir uygulama* , Yayımlanmamış Doktora Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü. Kütahya.

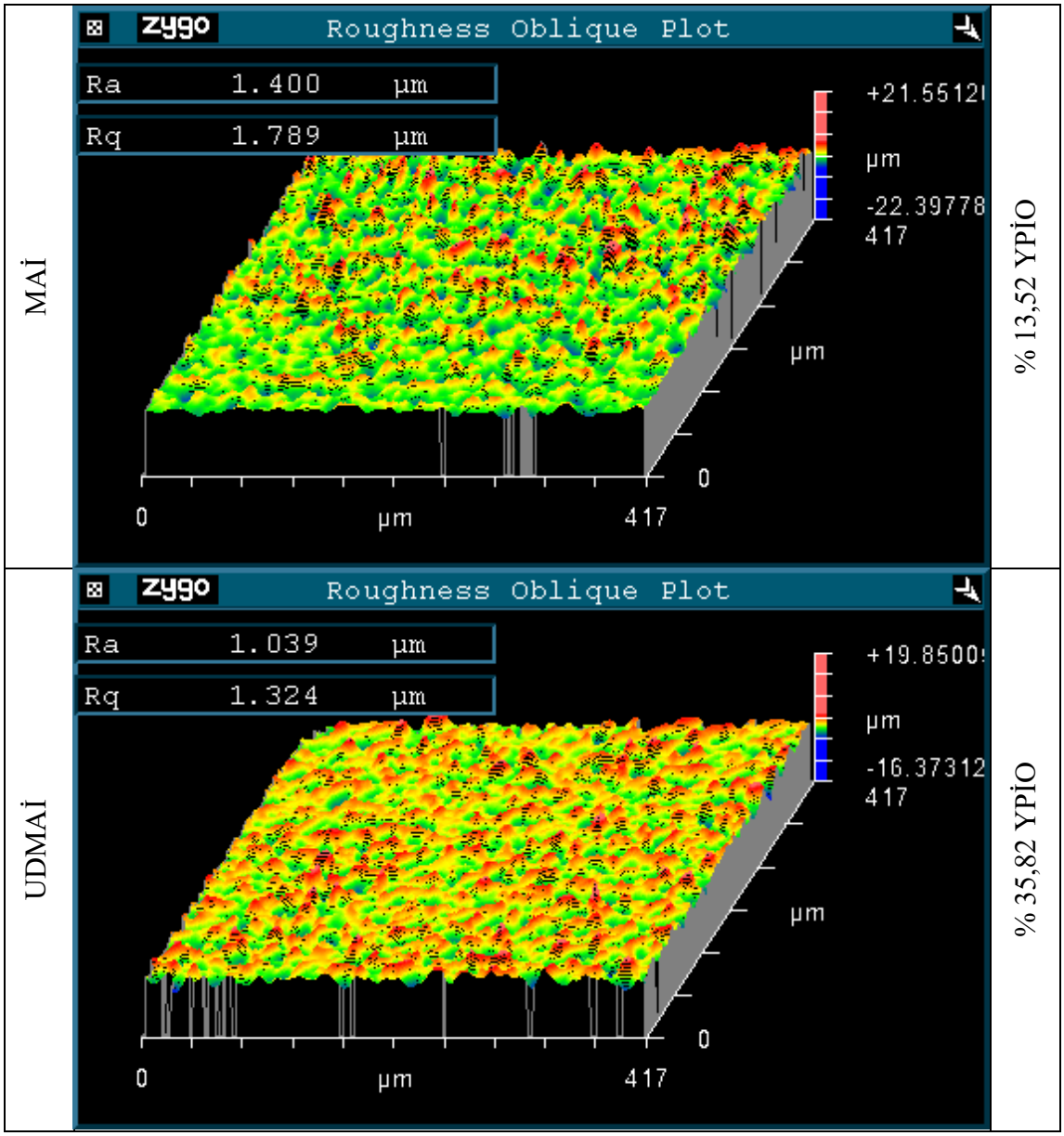
EKLER

EK-1. Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



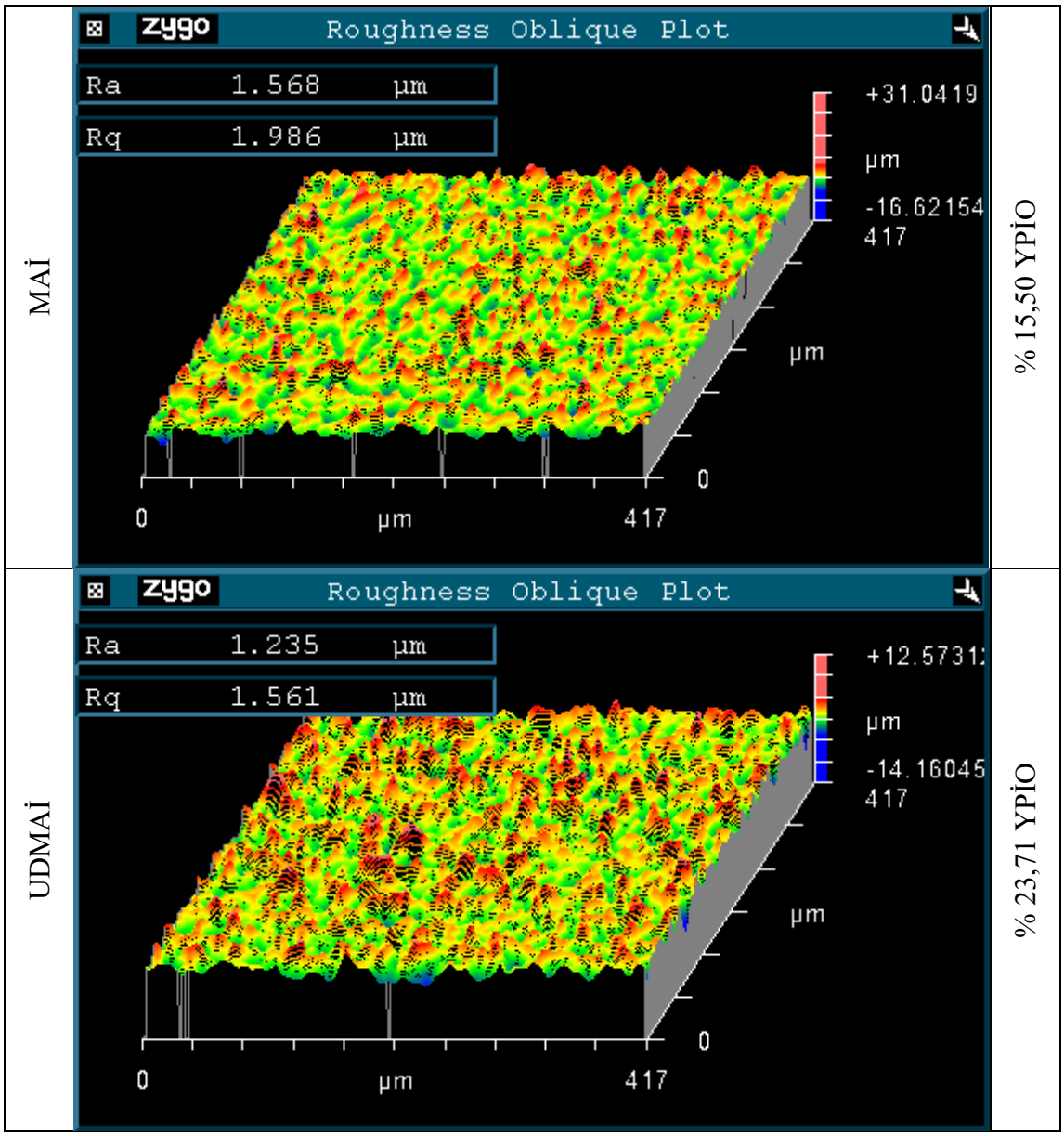
Resim 1.1. 1. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



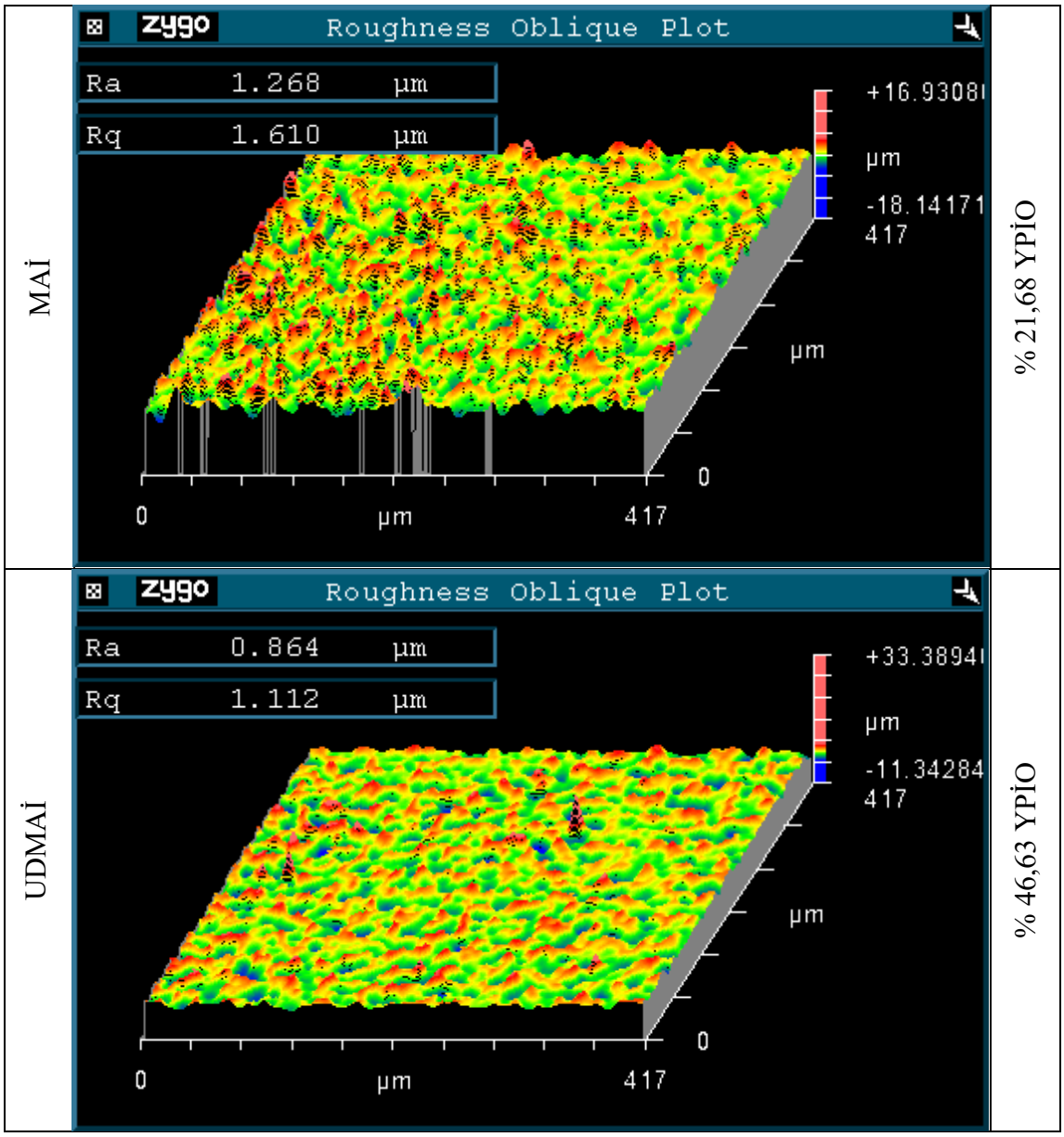
Resim 1.2. 2. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



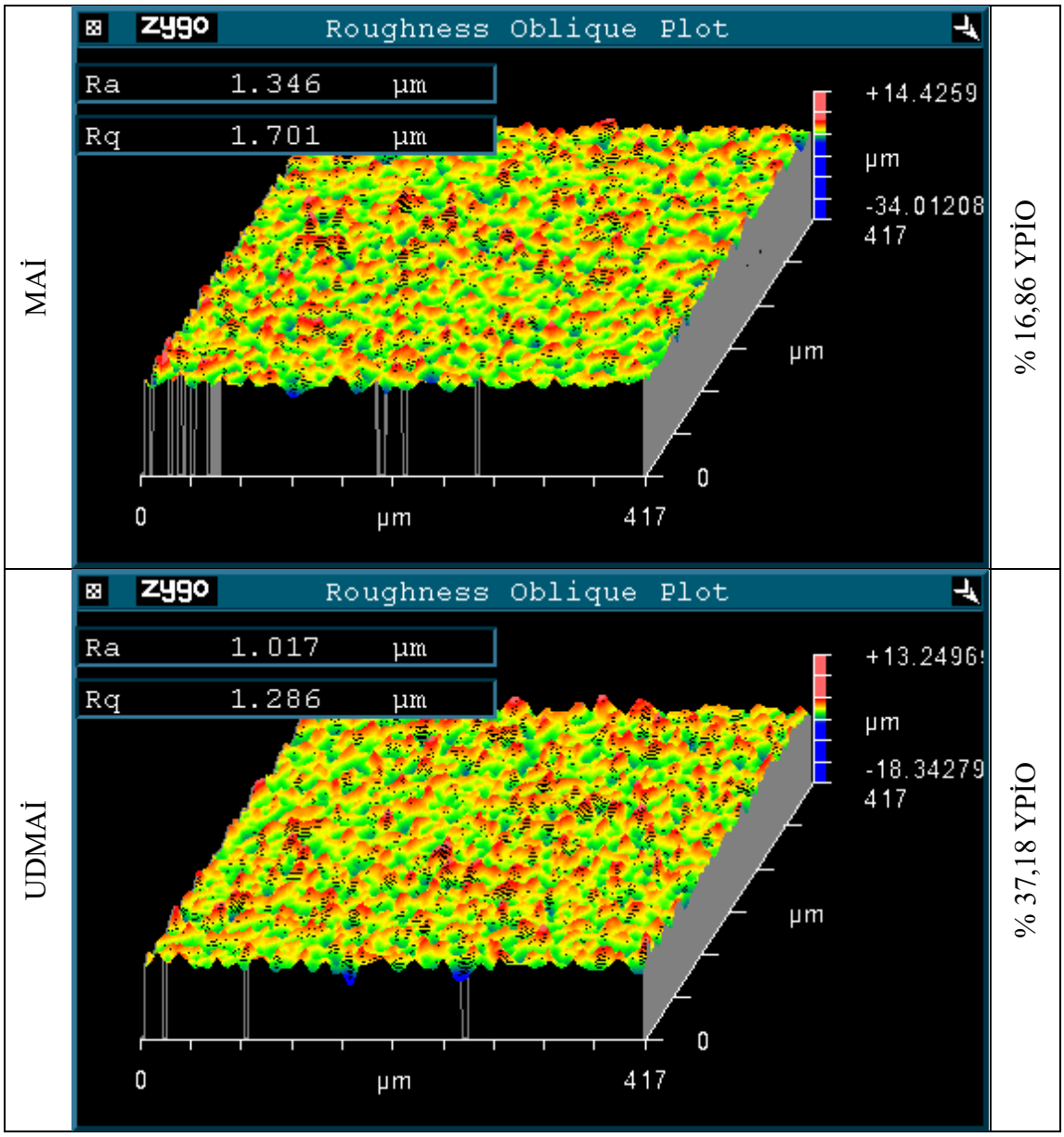
Resim 1.3. 3. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



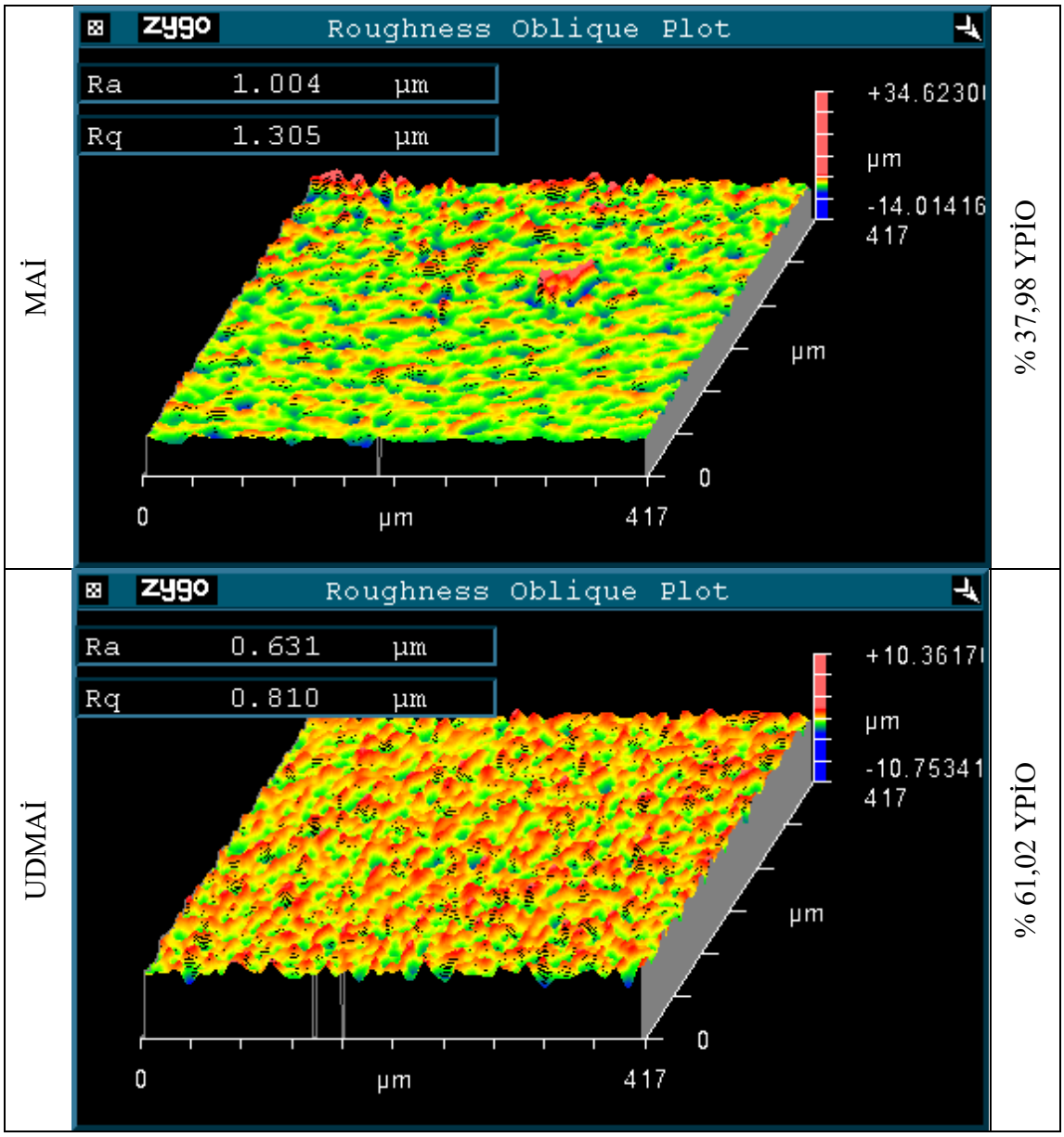
Resim 1.4. 4. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



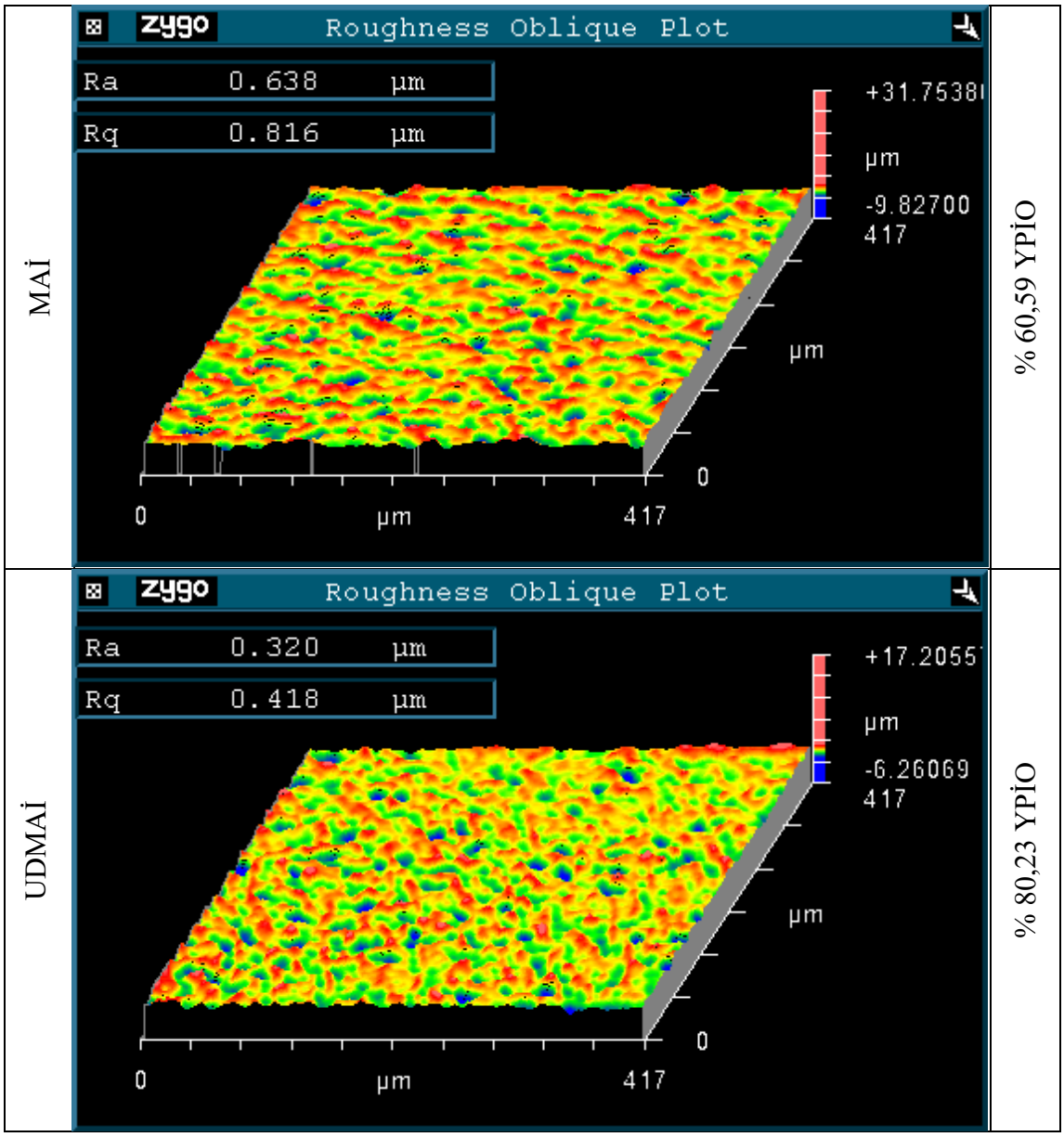
Resim 1.5. 5. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



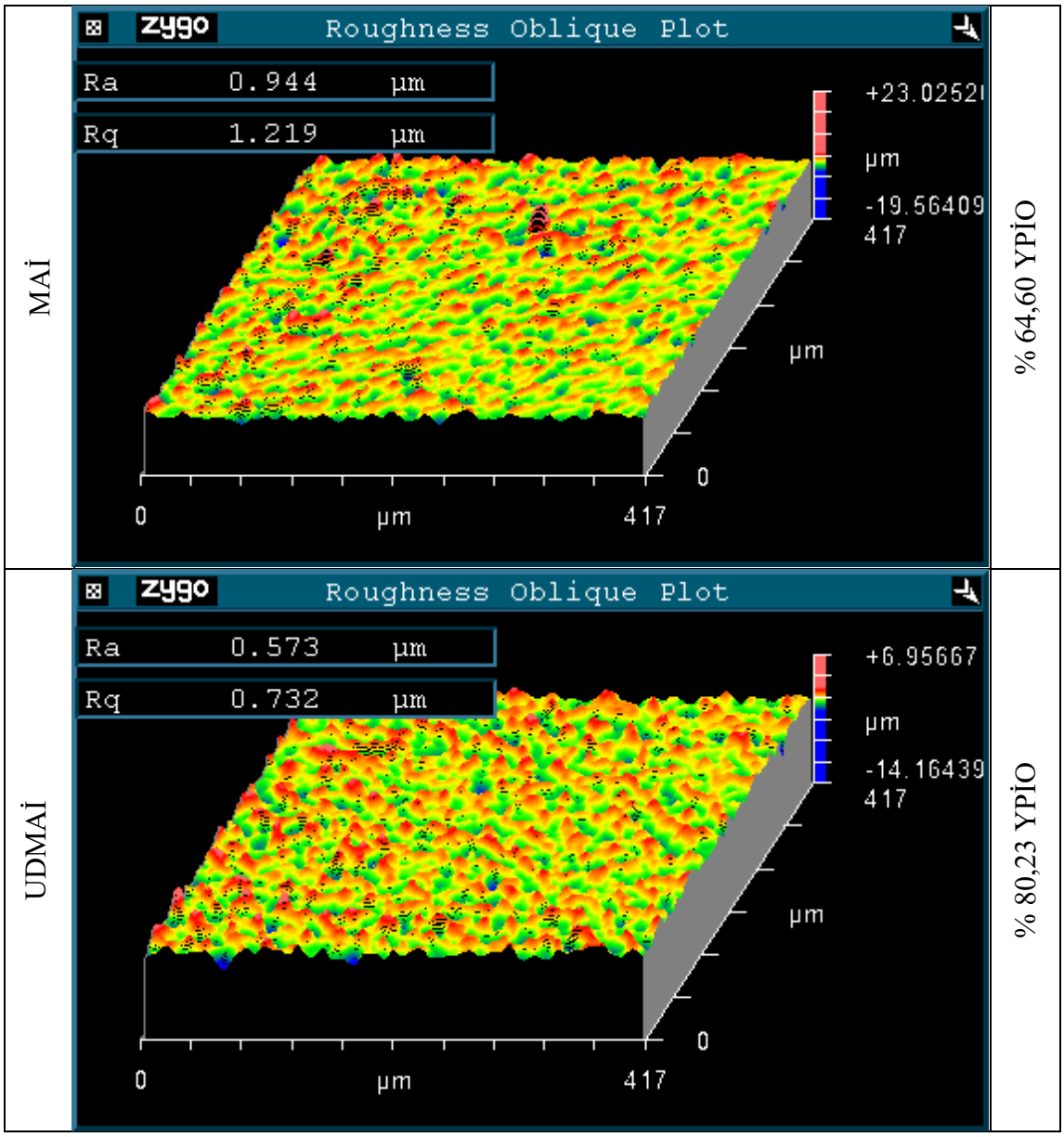
Resim 1.6. 6. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



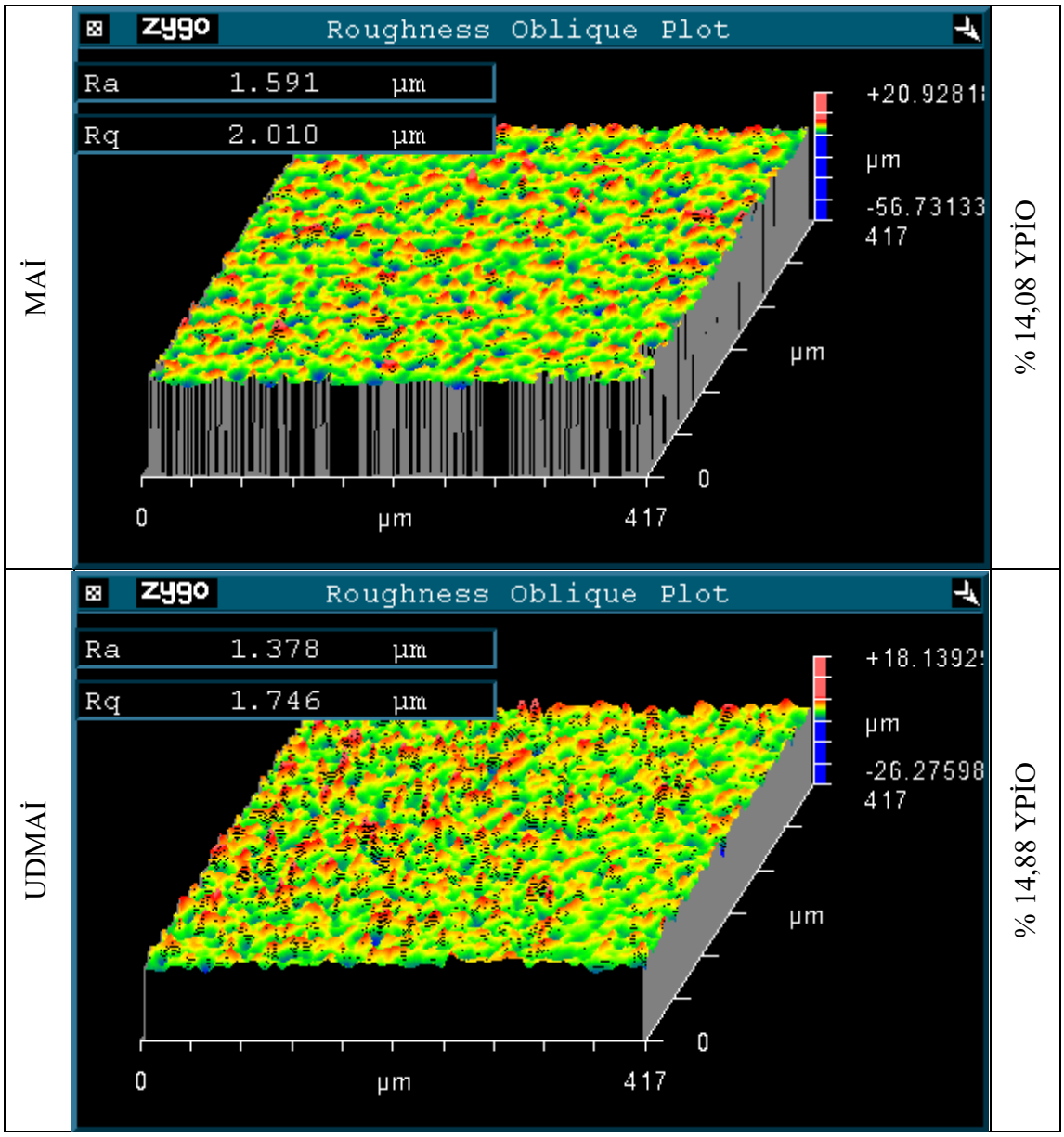
Resim 1.7. 7. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



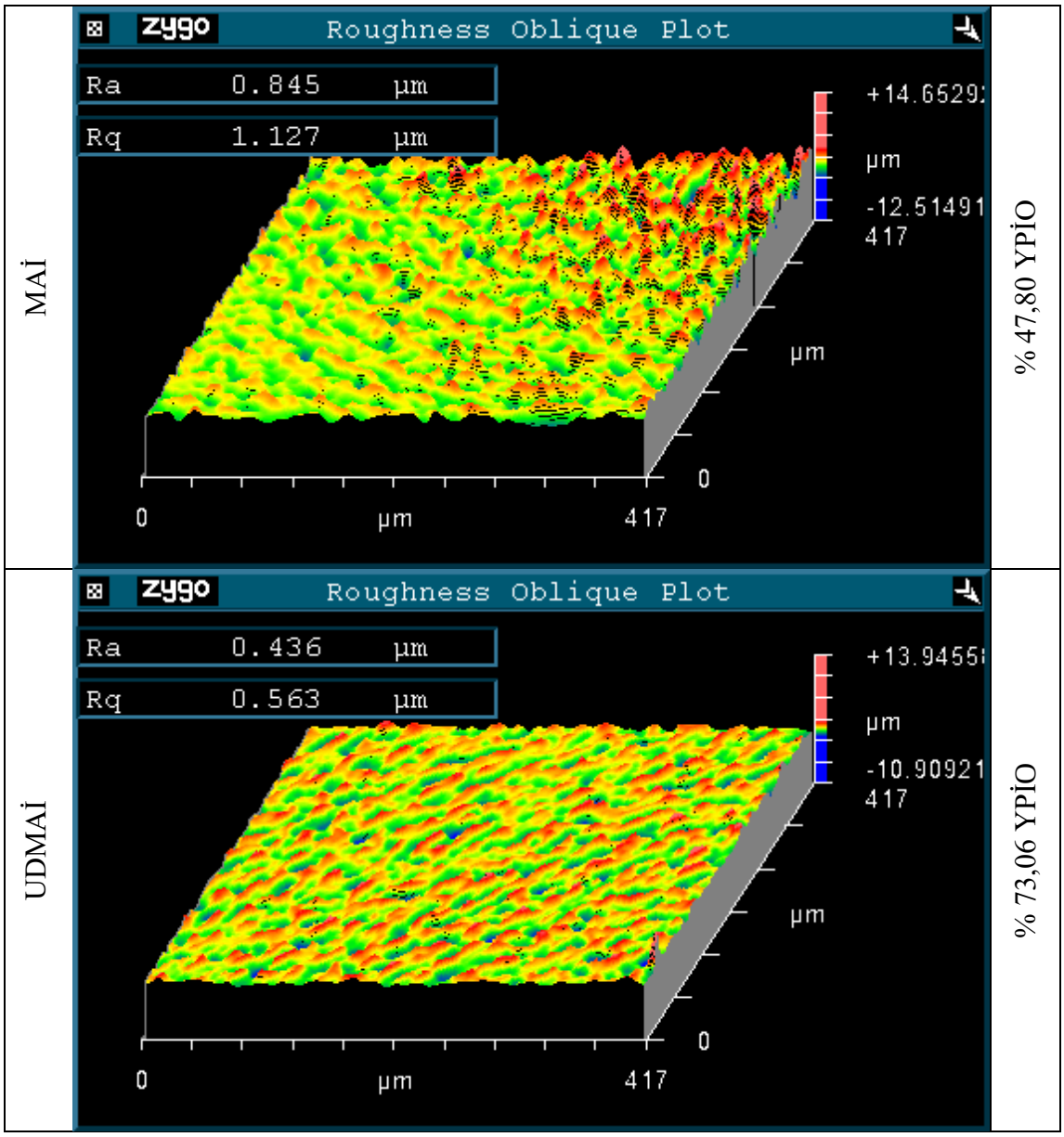
Resim 1.8. 8. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



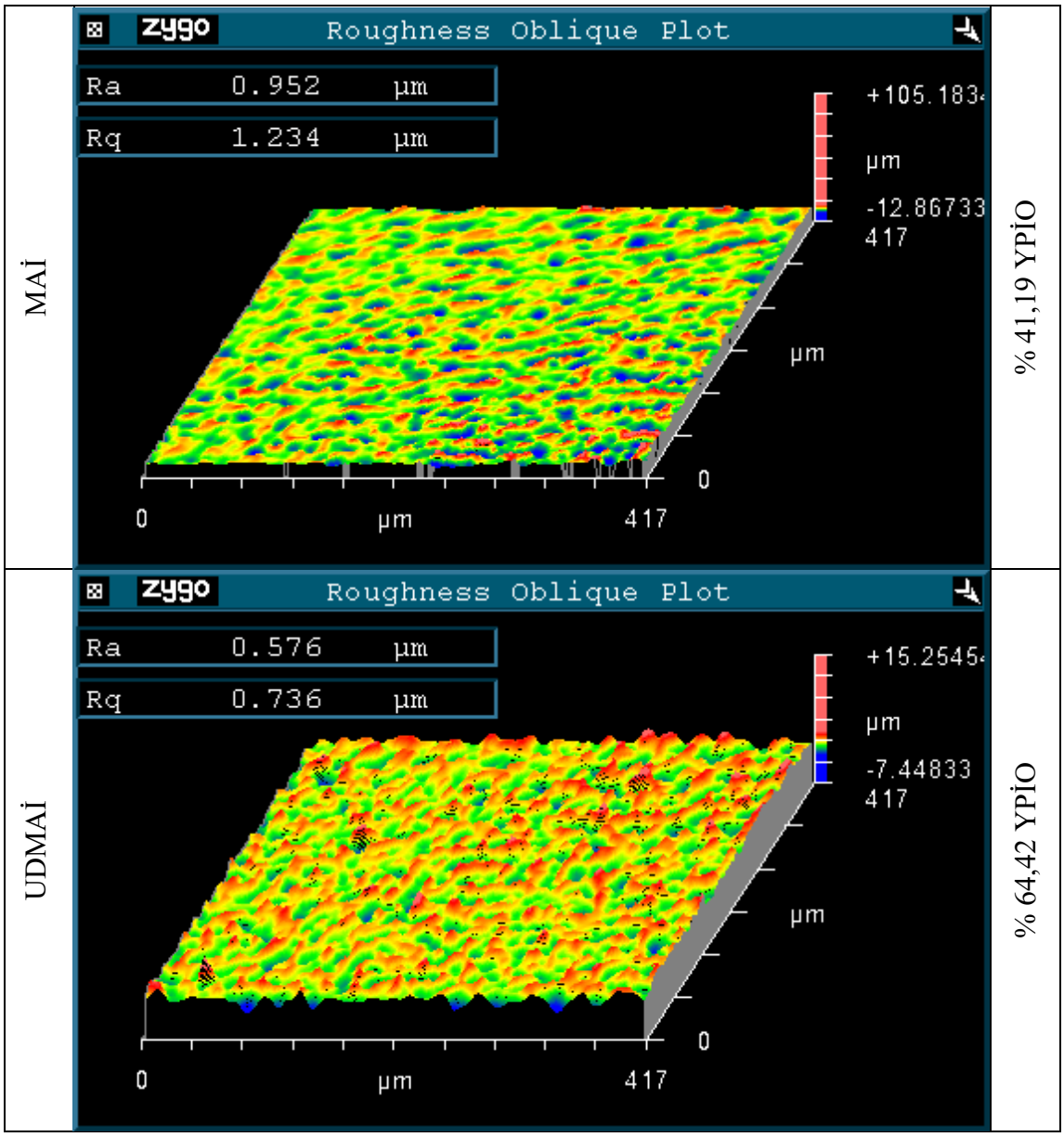
Resim 1.9. 9. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



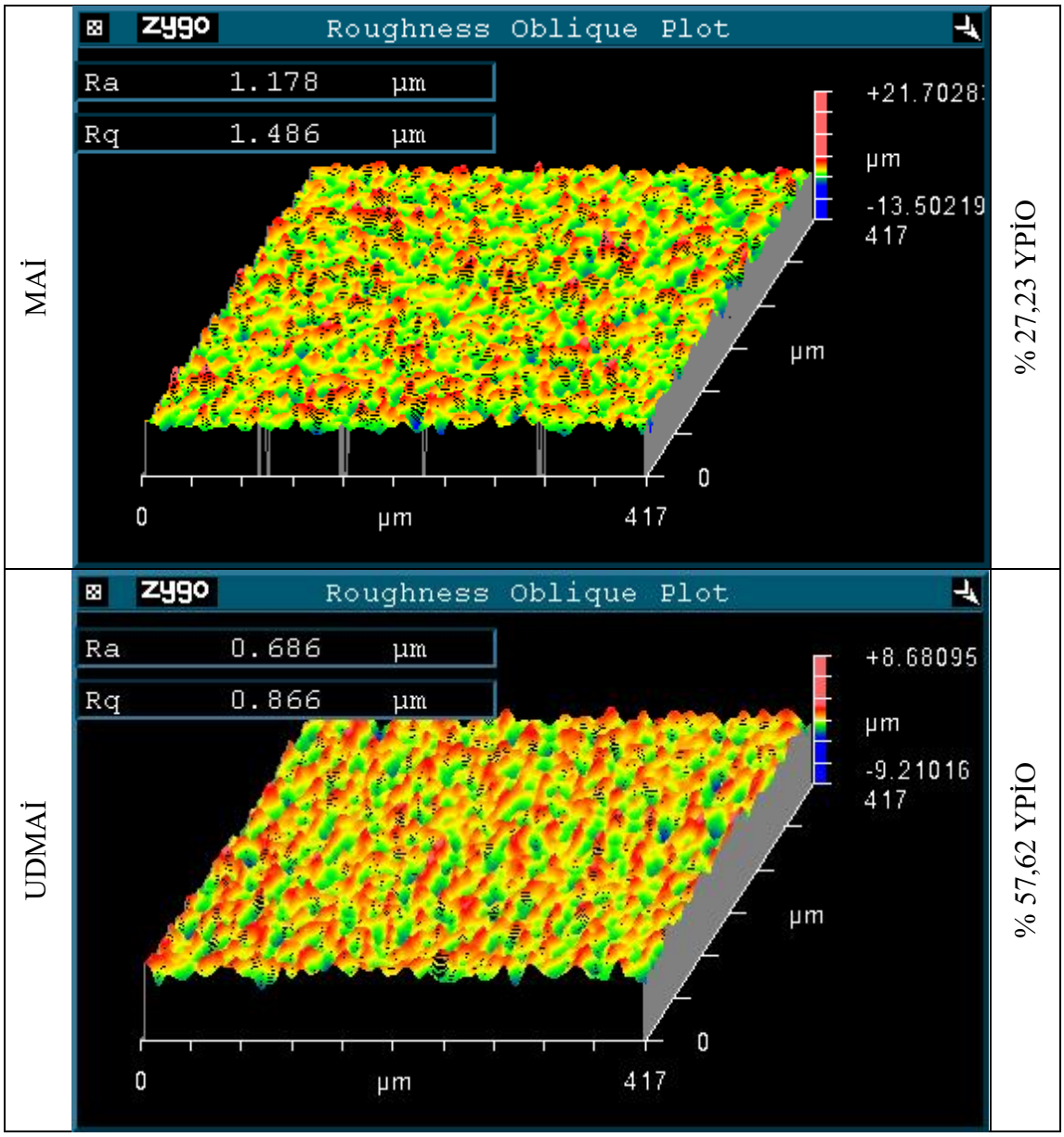
Resim 1.10. 10. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



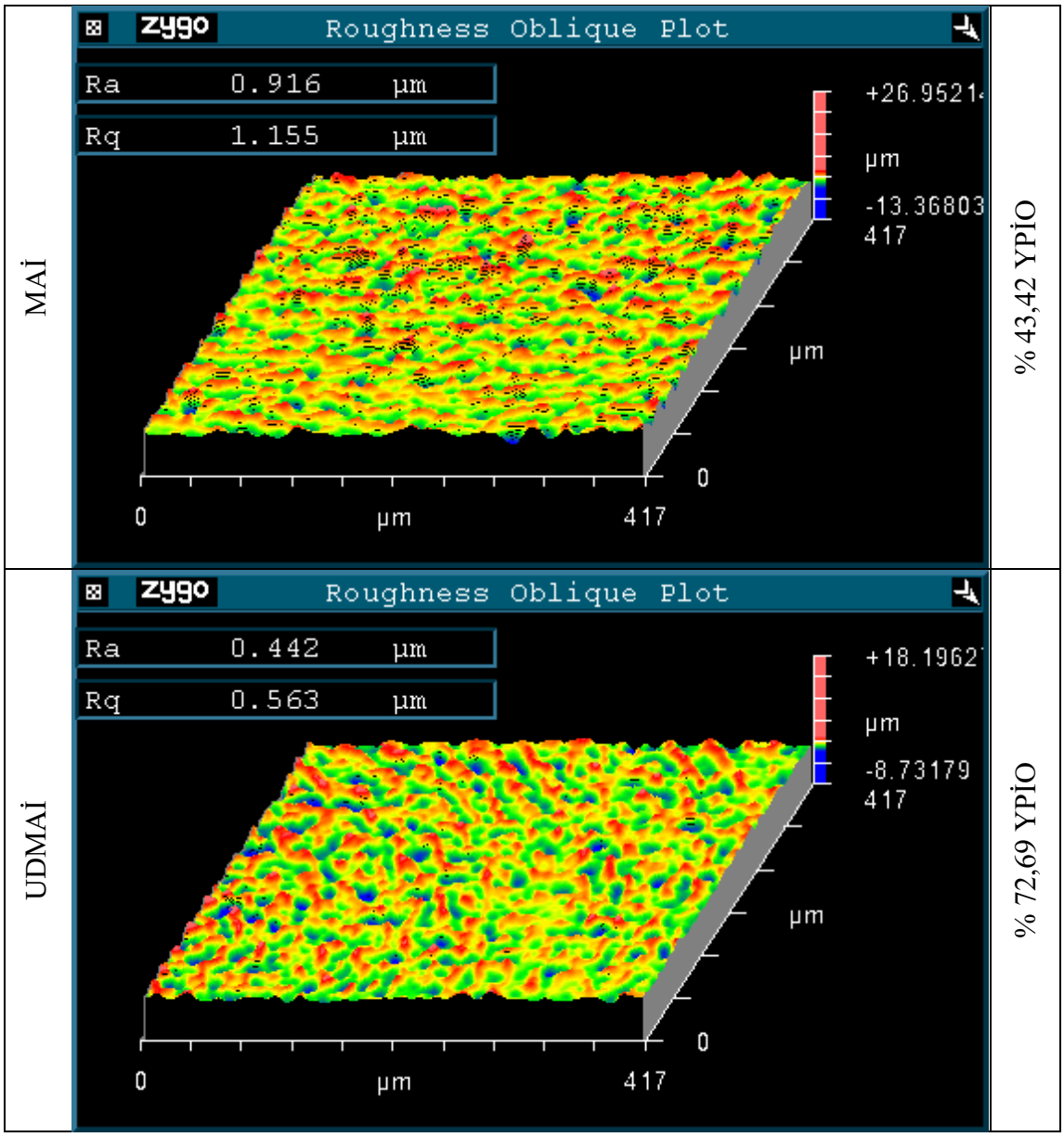
Resim 1.11. 11. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



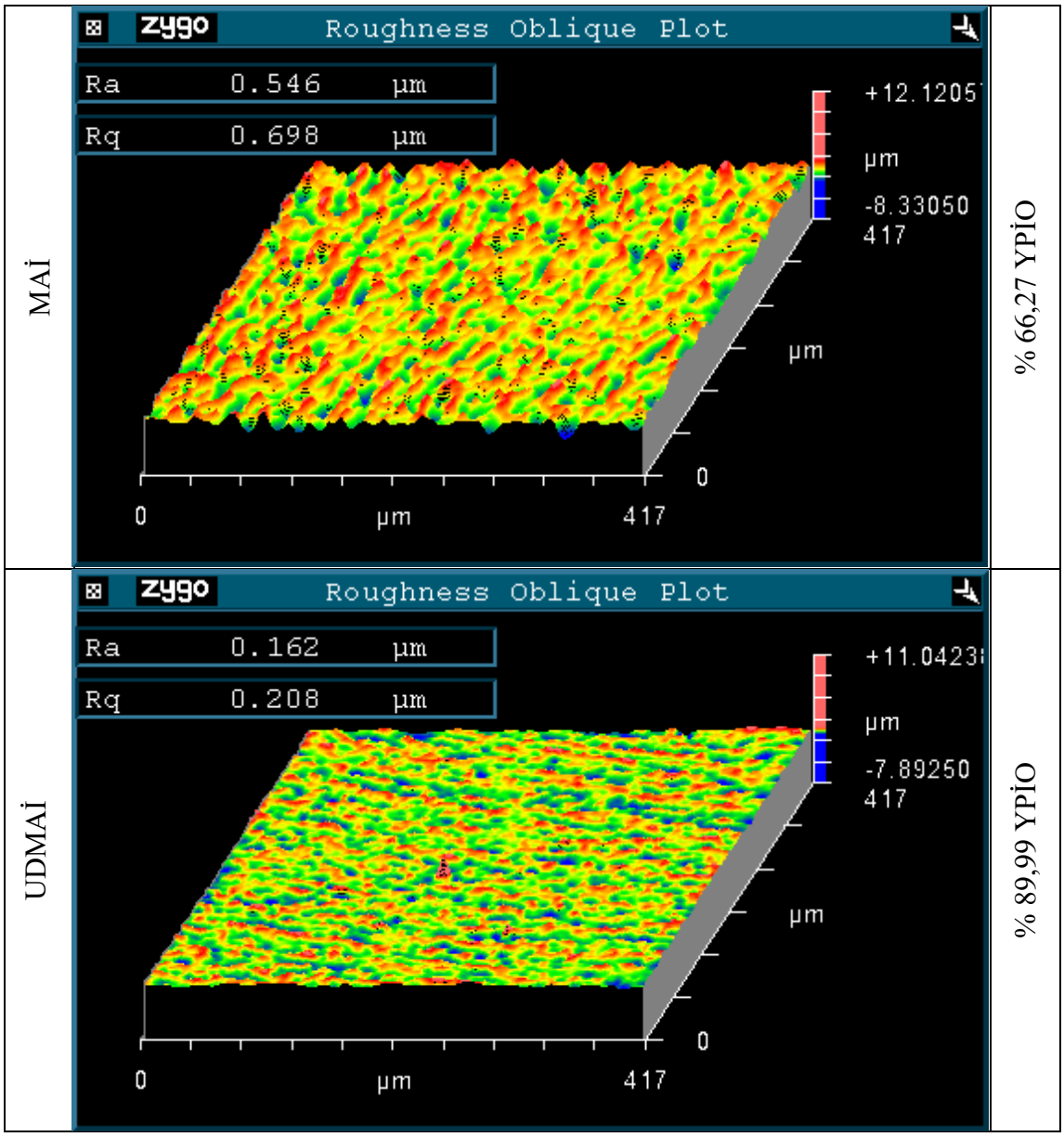
Resim 1.12. 12. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



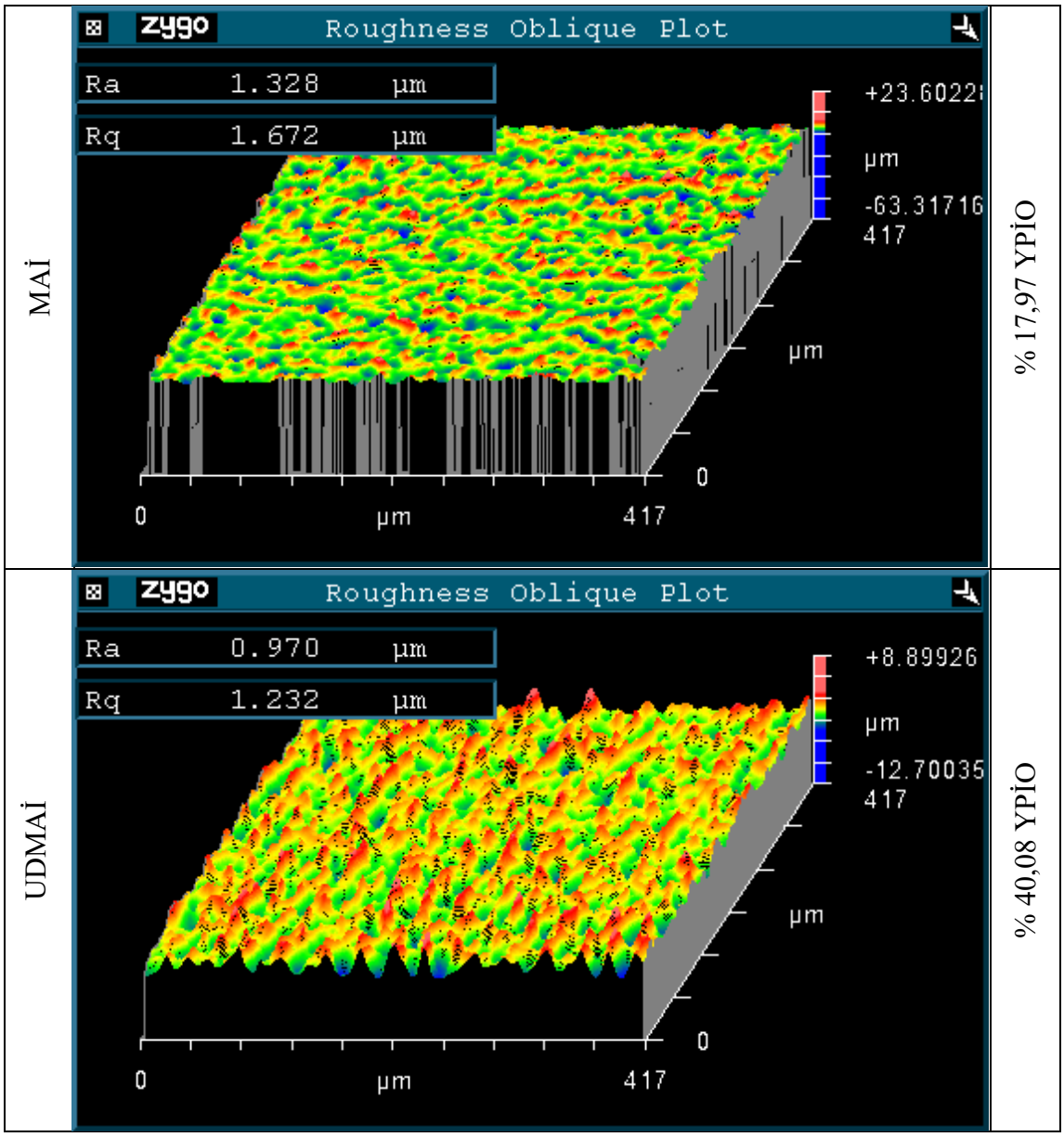
Resim 1.13. 13. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



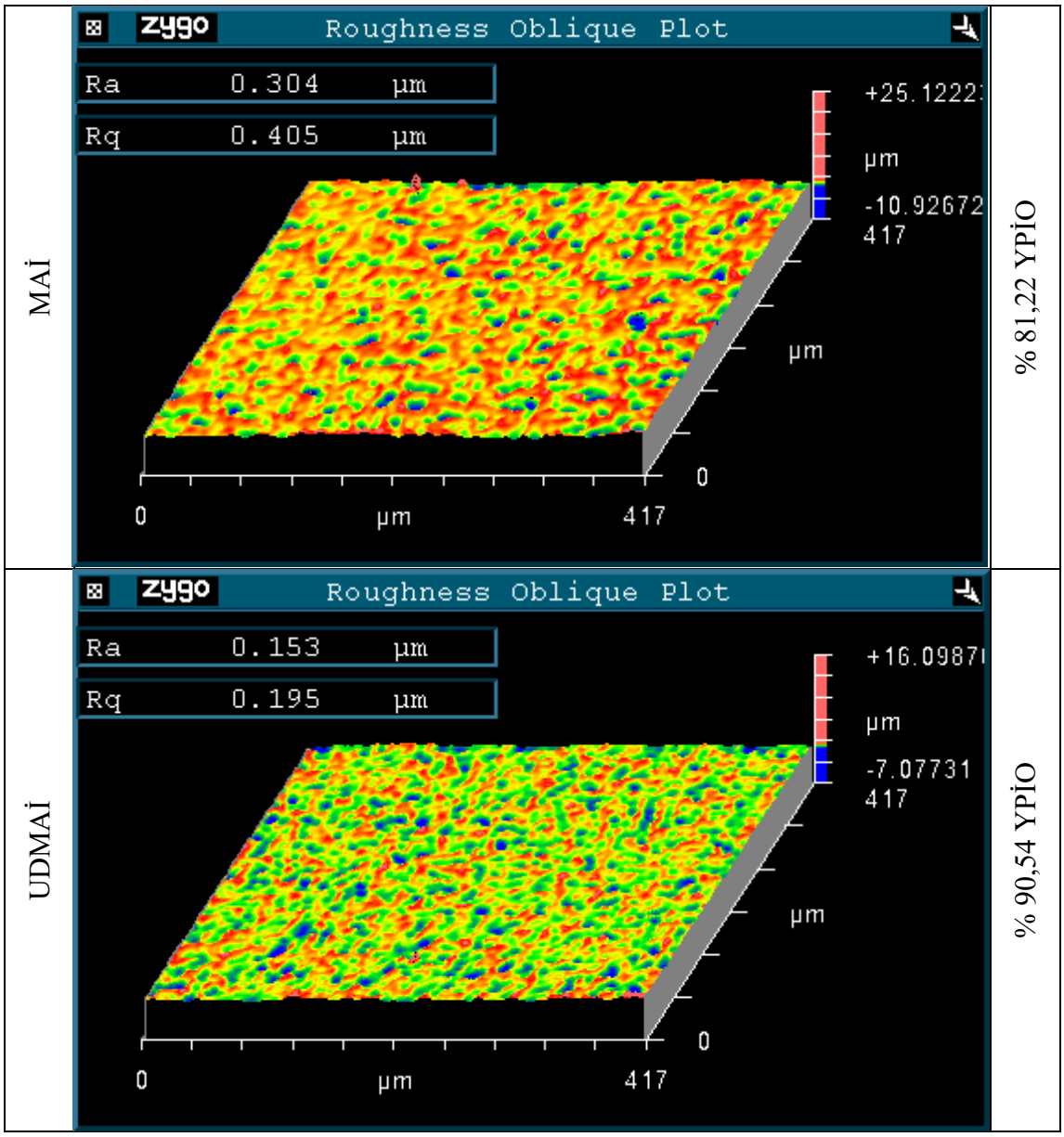
Resim 1.14. 14. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



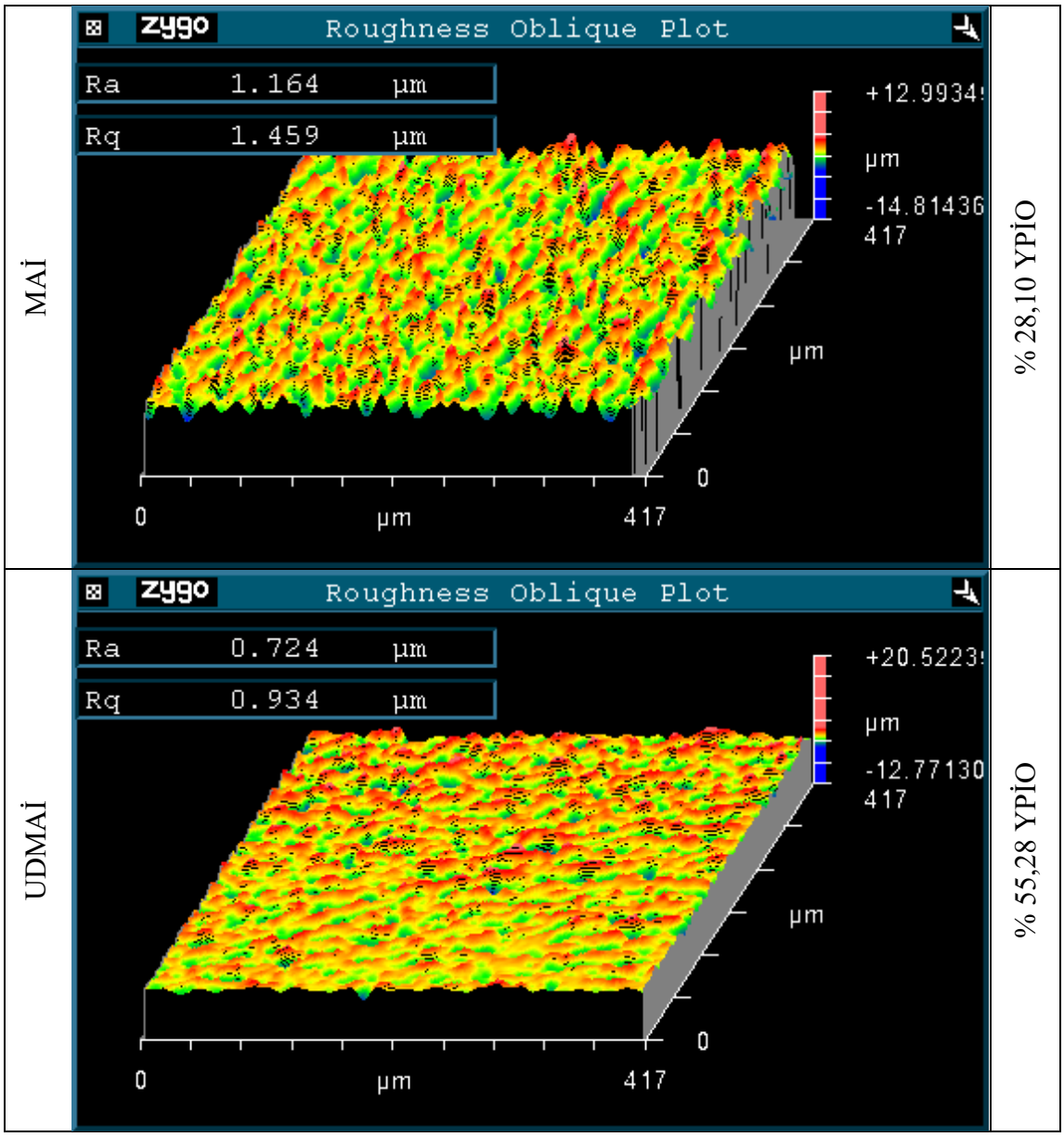
Resim 1.15. 15. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



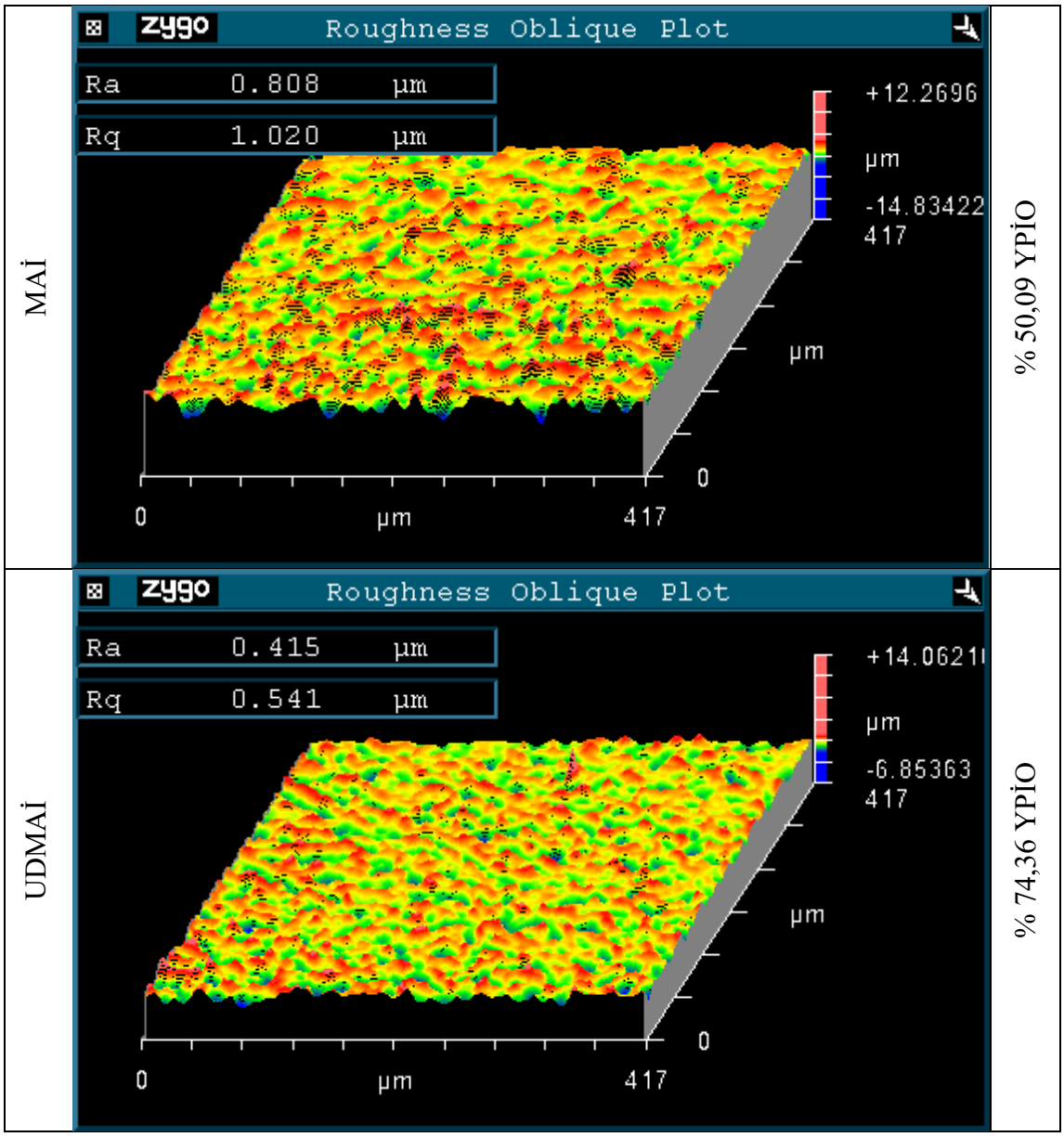
Resim 1.16. 16. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



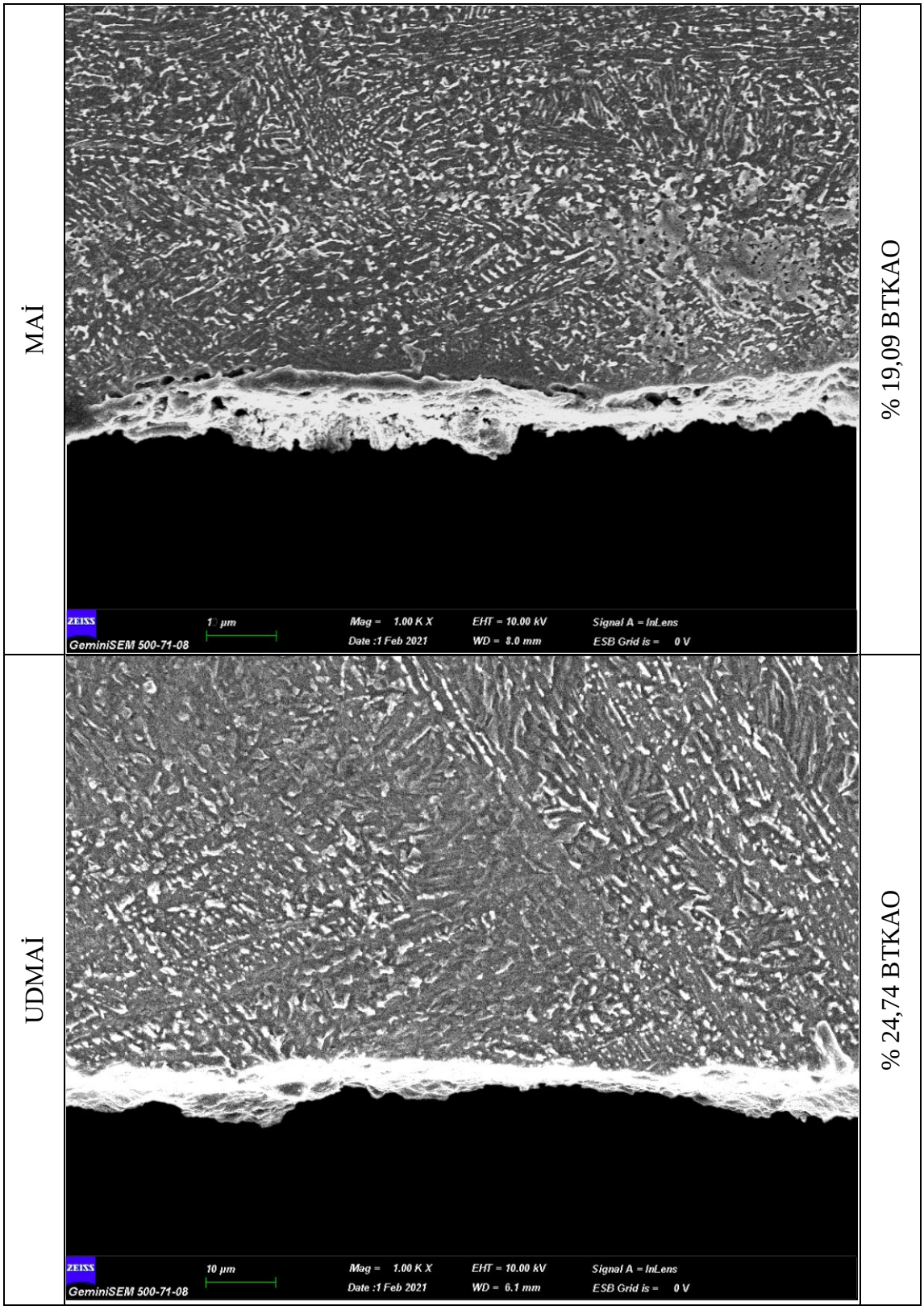
Resim 1.17. 17. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-1. (Devam) Deneylere ait yüzey topografyaları görüntüleri



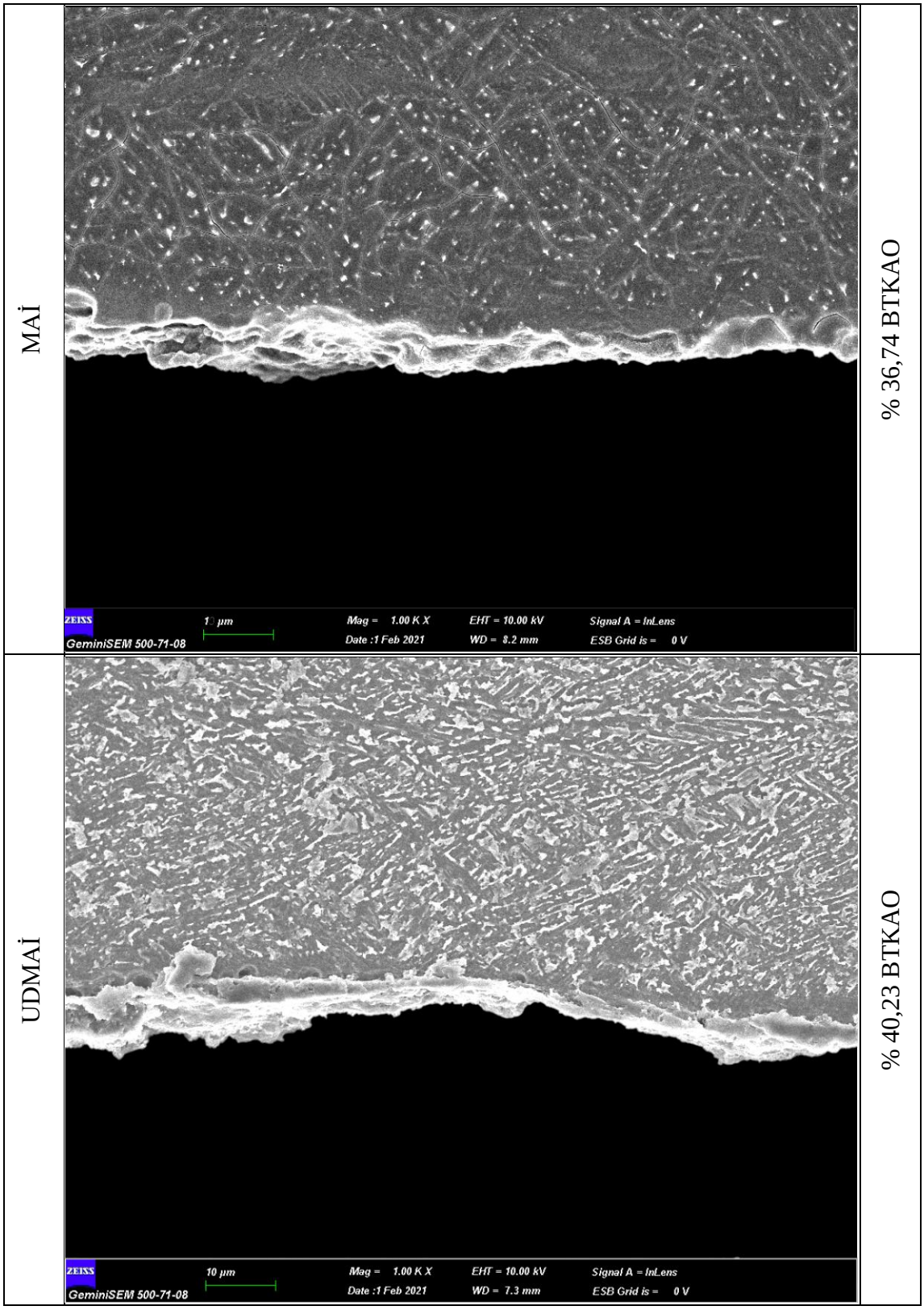
Resim 1.18. 18. deneylere ait numunelerin 3B yüzey topografyası

EK-2. Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



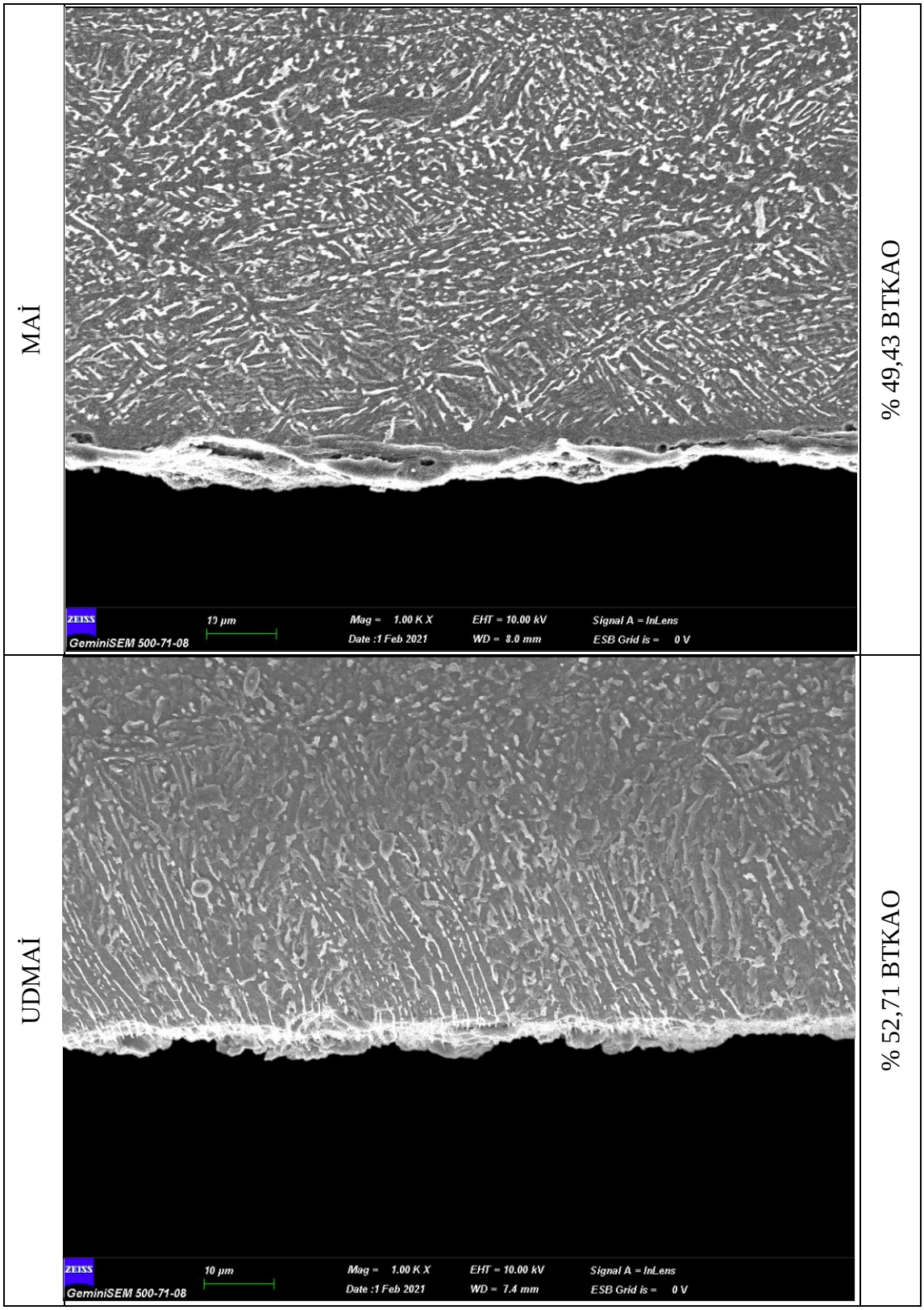
Resim 2.1. 1. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



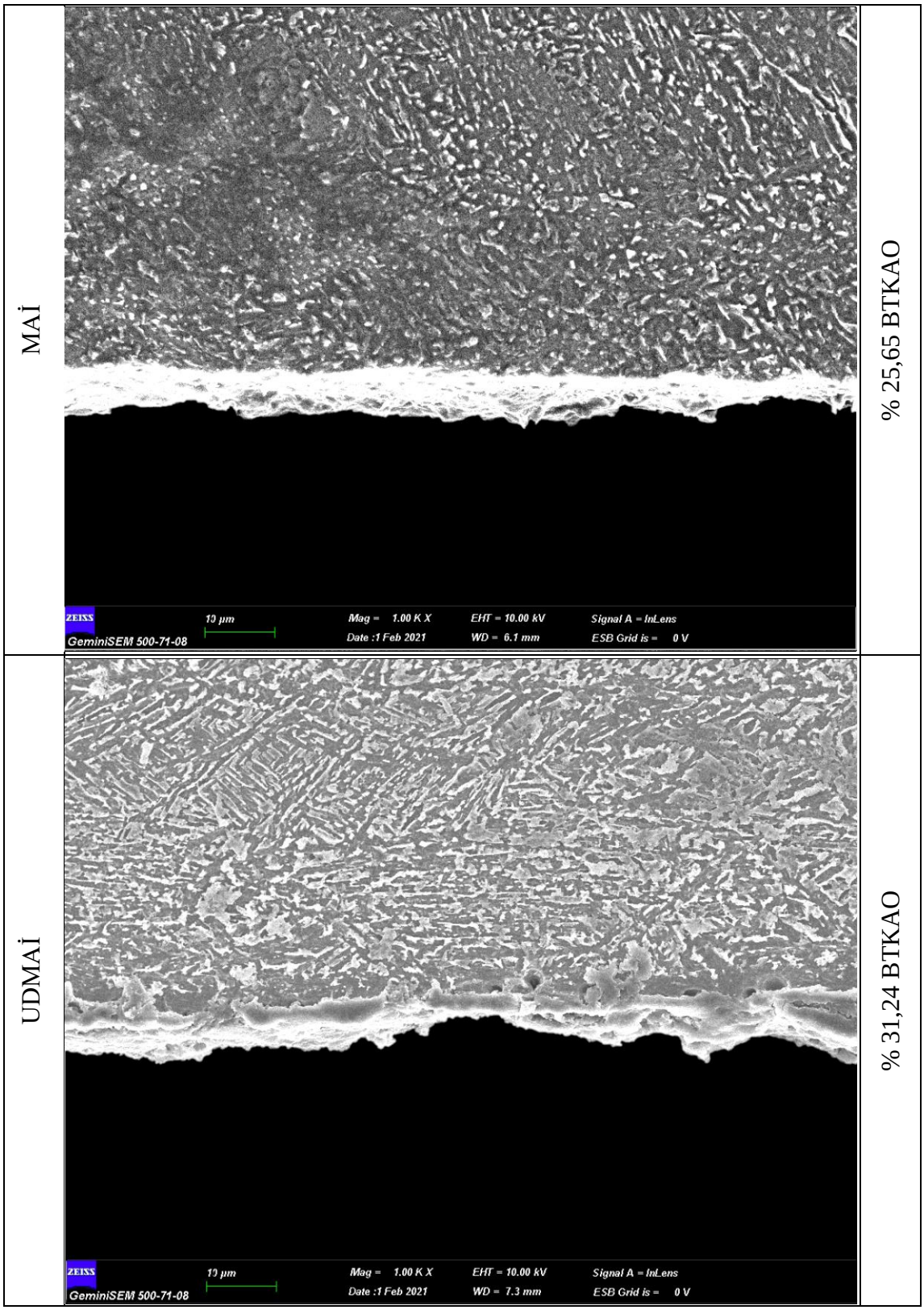
Resim 2.2. 2. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



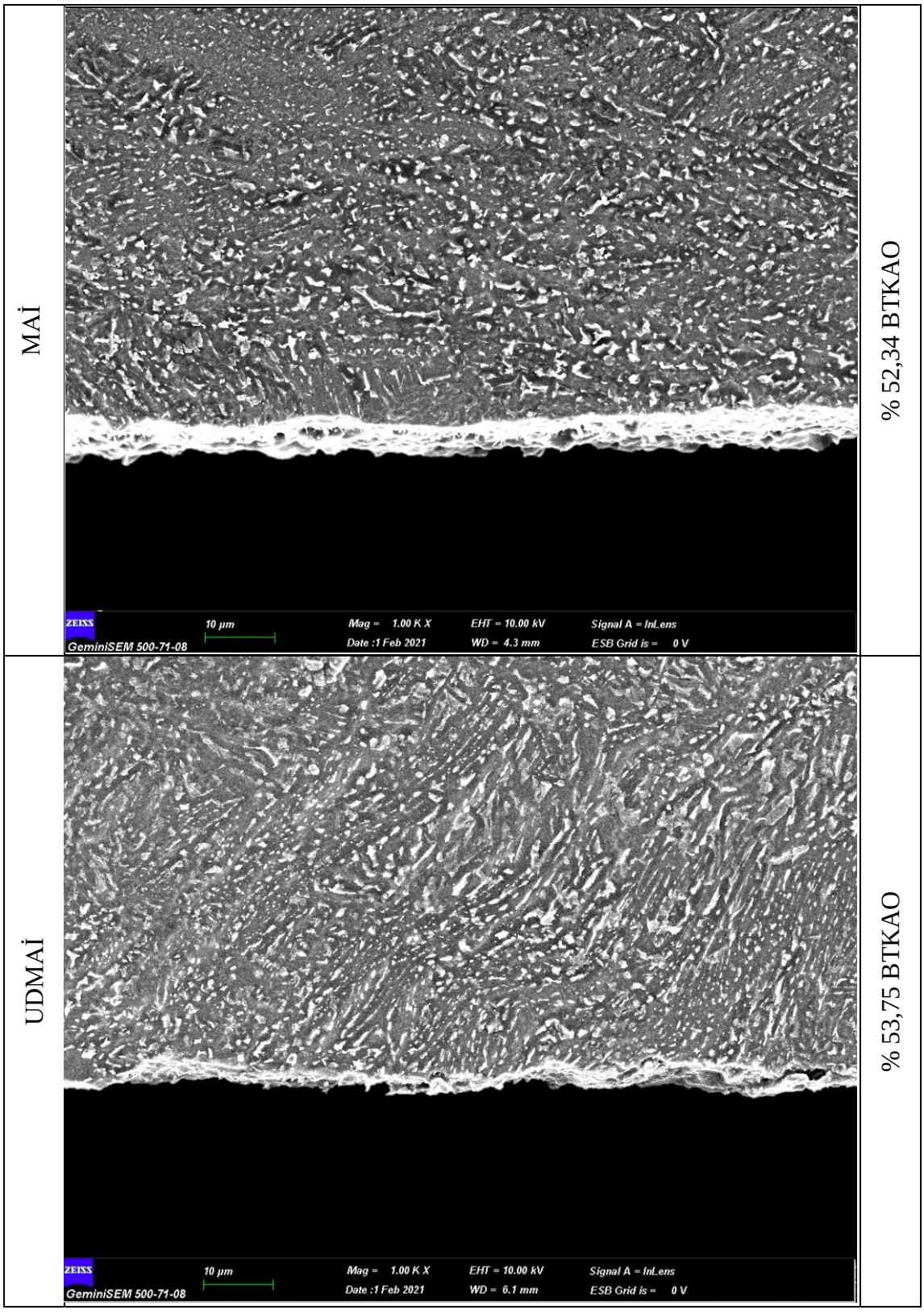
Resim 2.3. 3. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



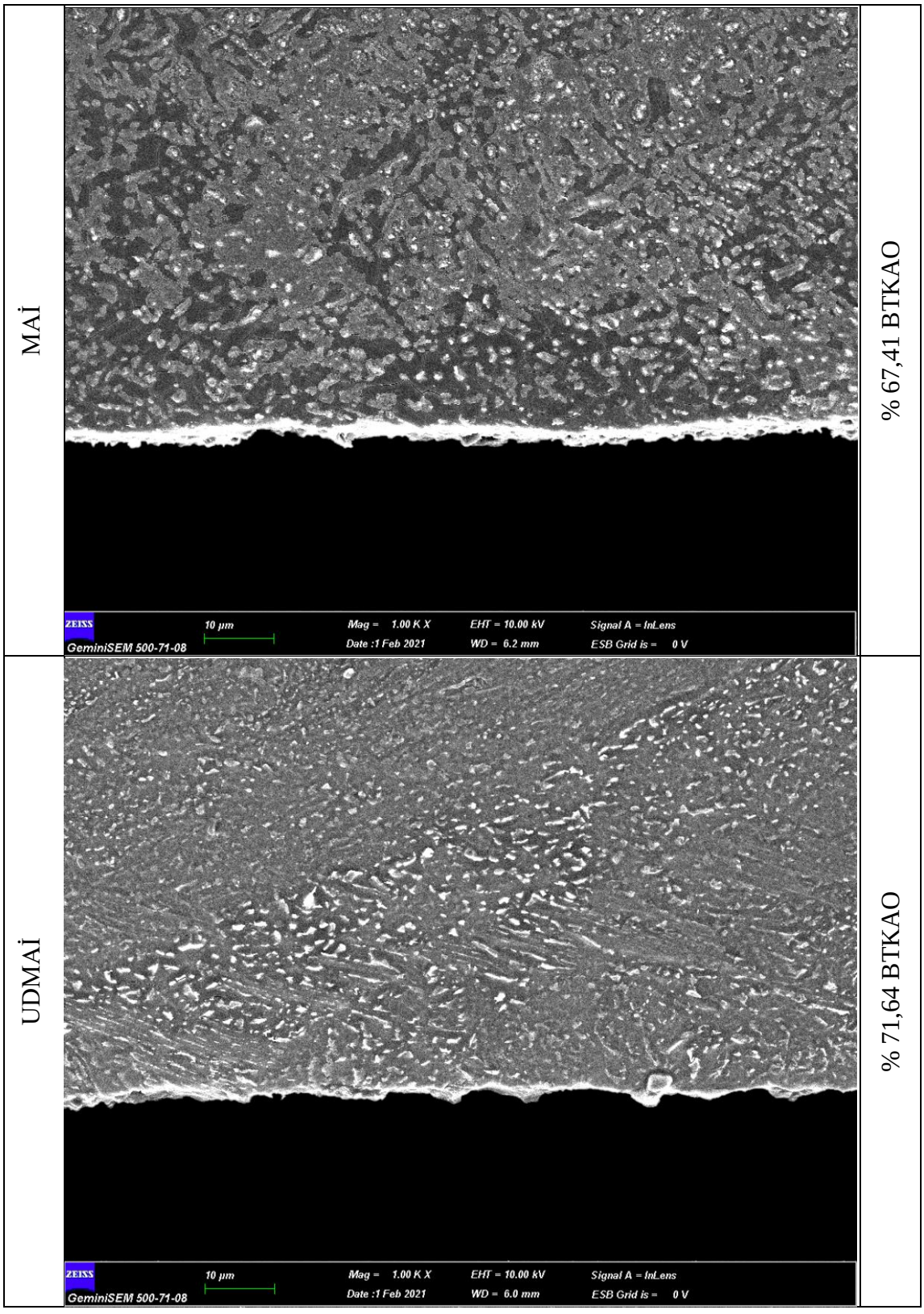
Resim 2.4. 4. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



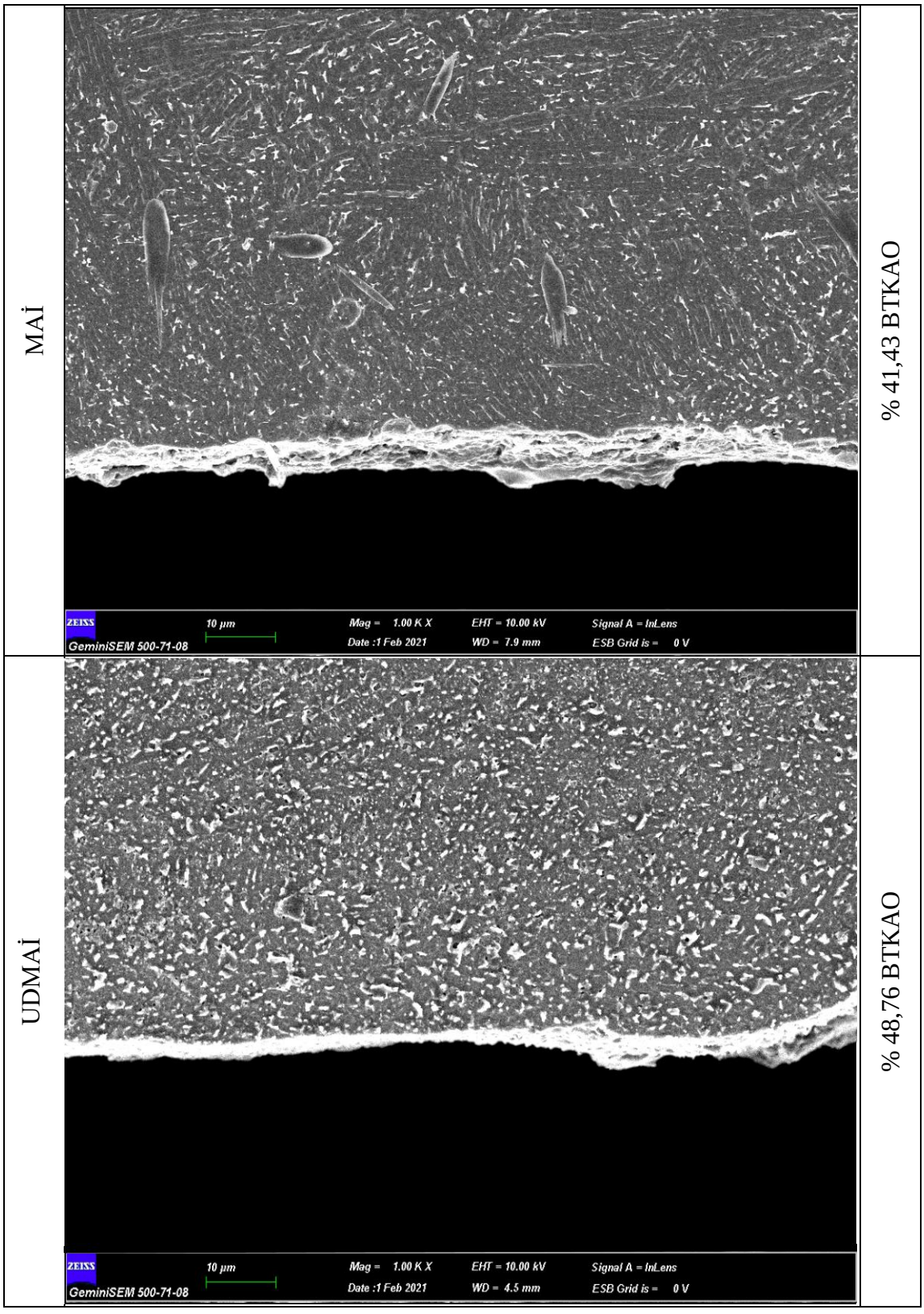
Resim 2.5 5. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



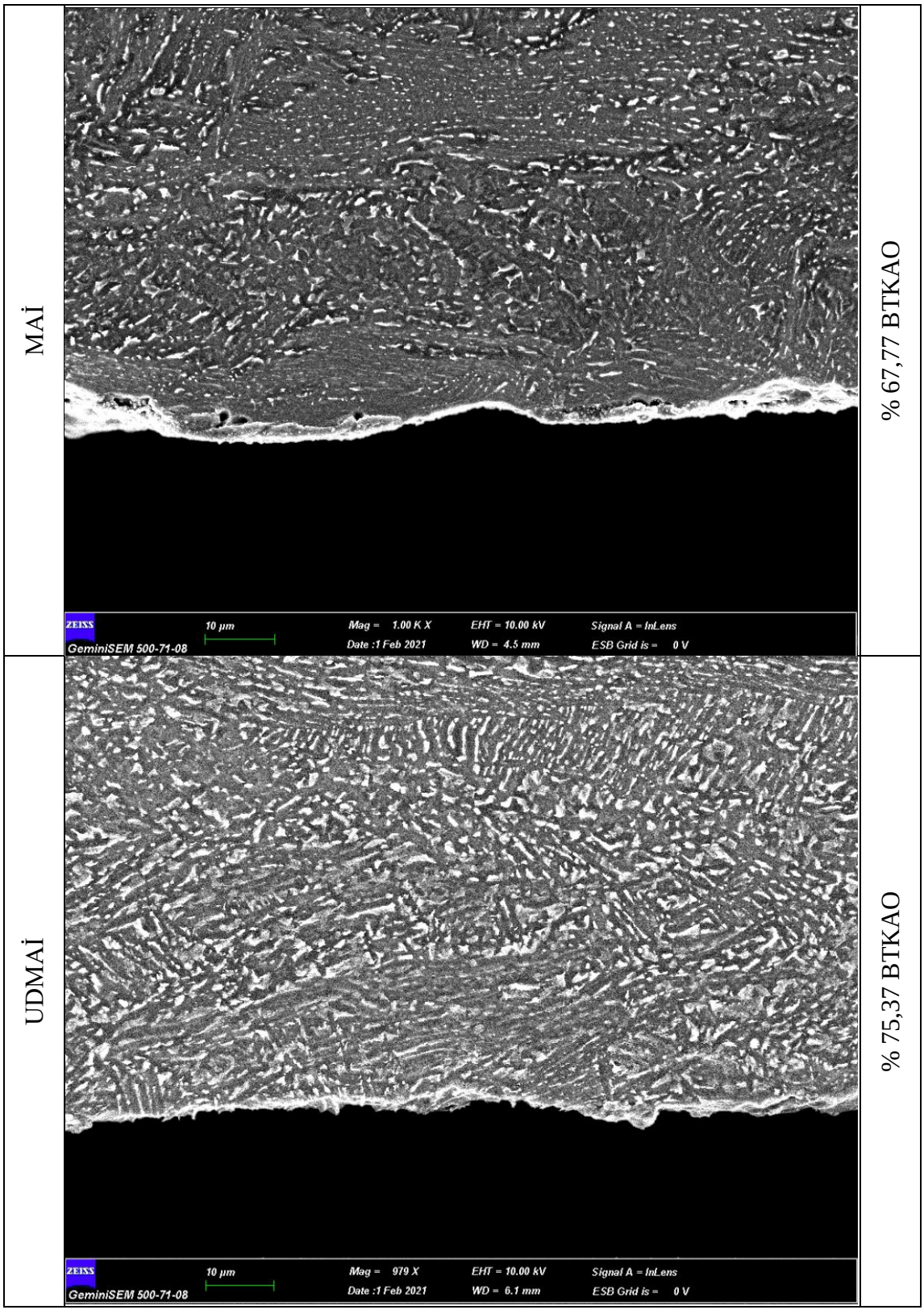
Resim 2.6. 6. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



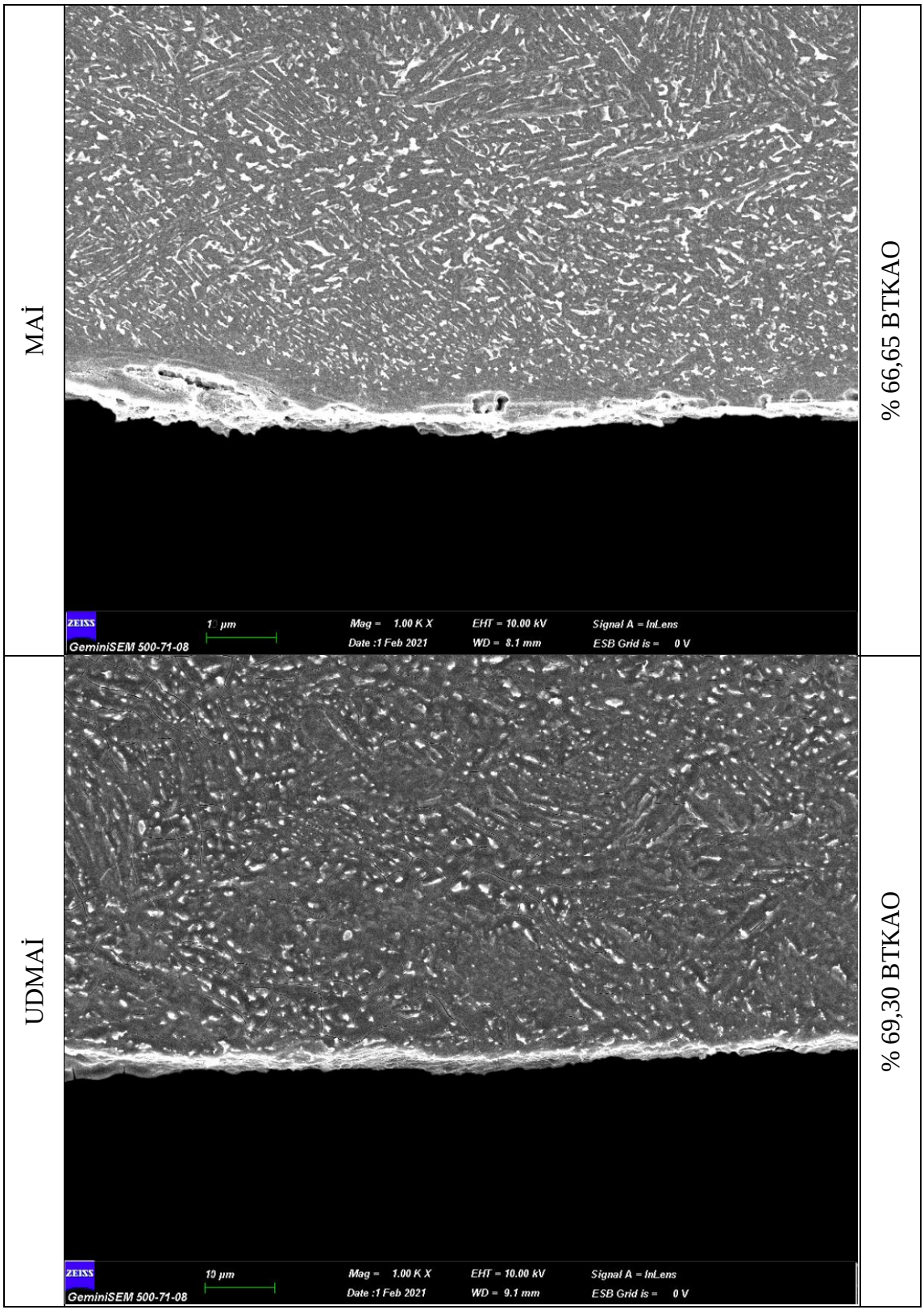
Resim 2.7. 7. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



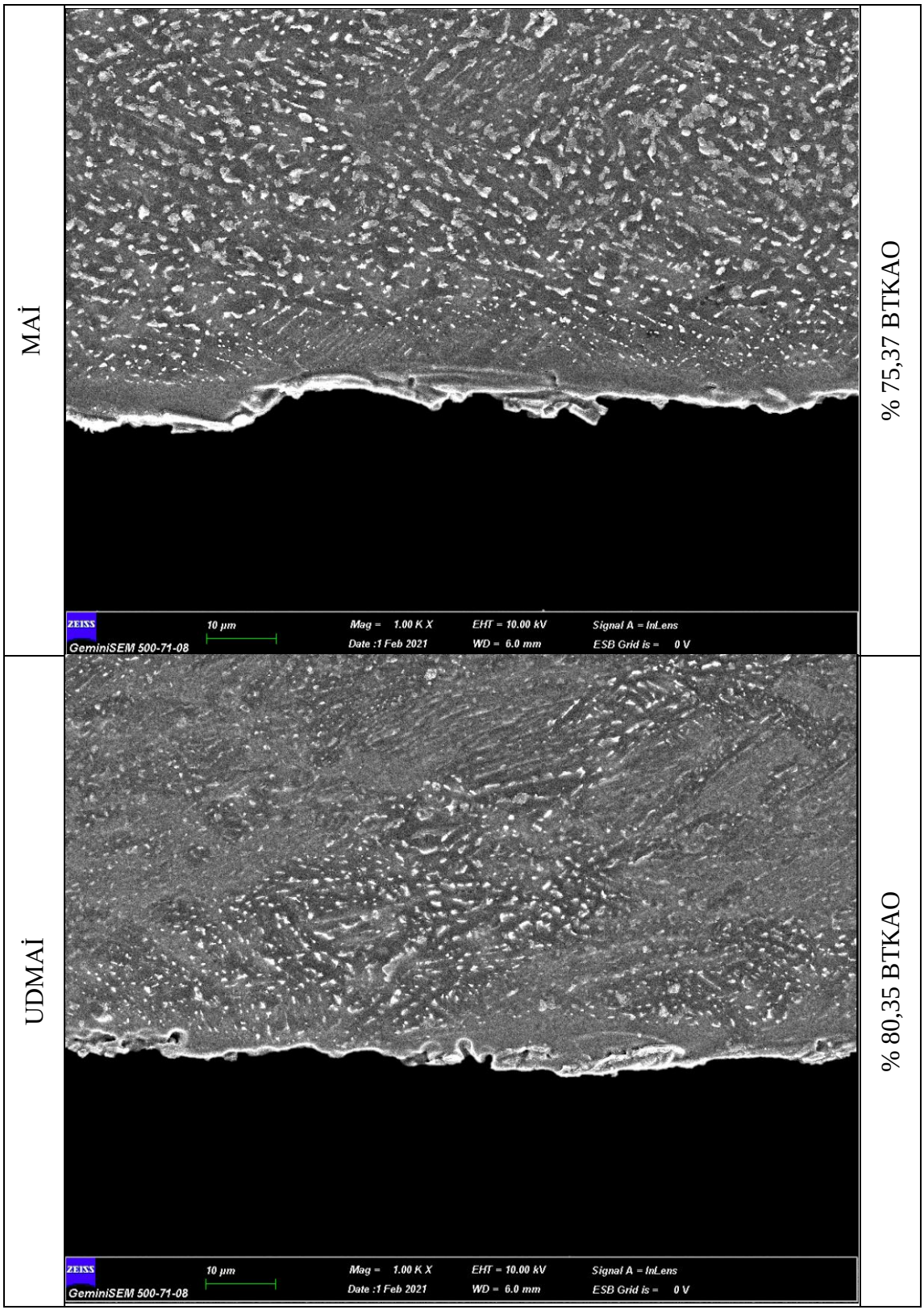
Resim 2.8. 8. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



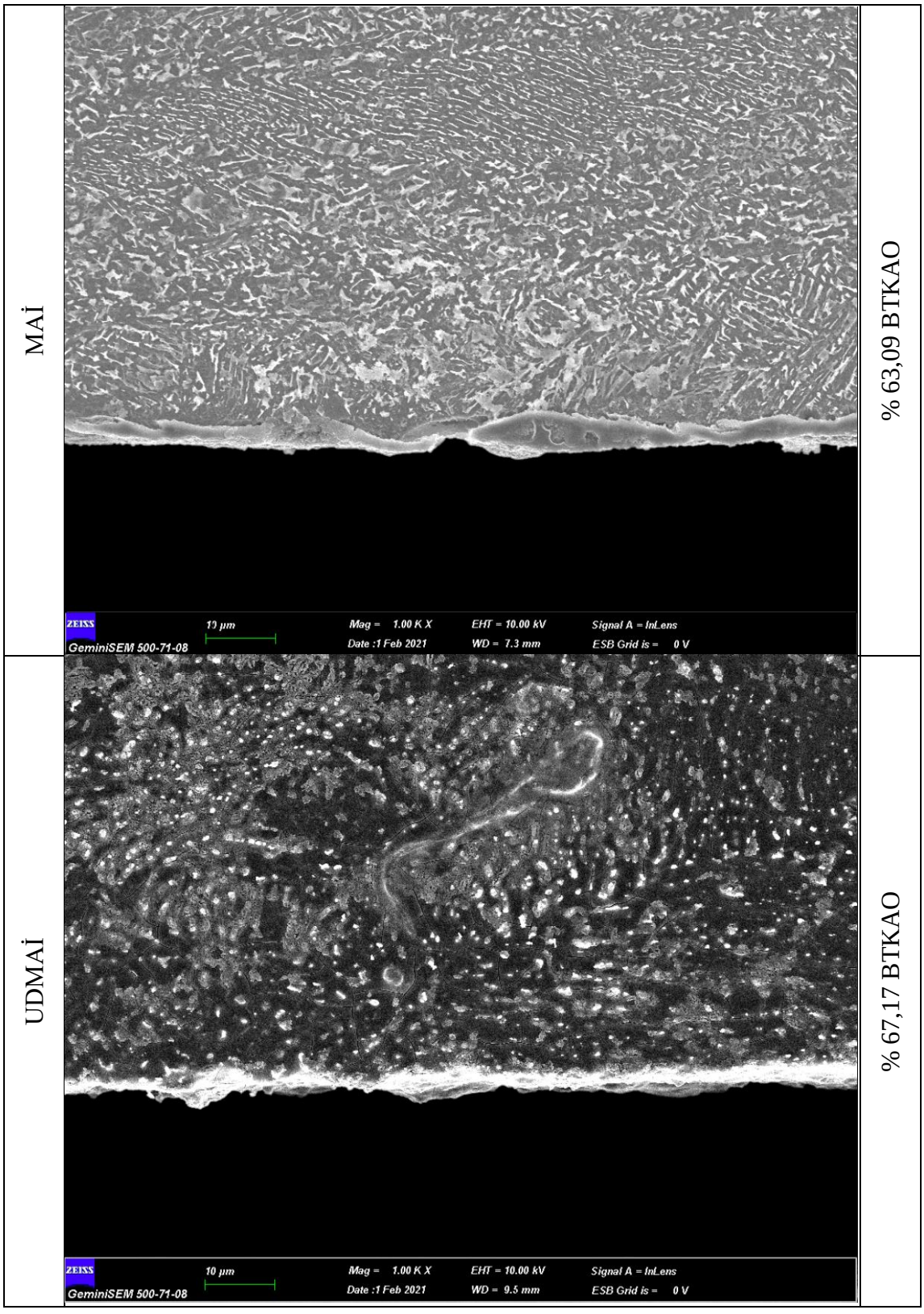
Resim 2.9. 9. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



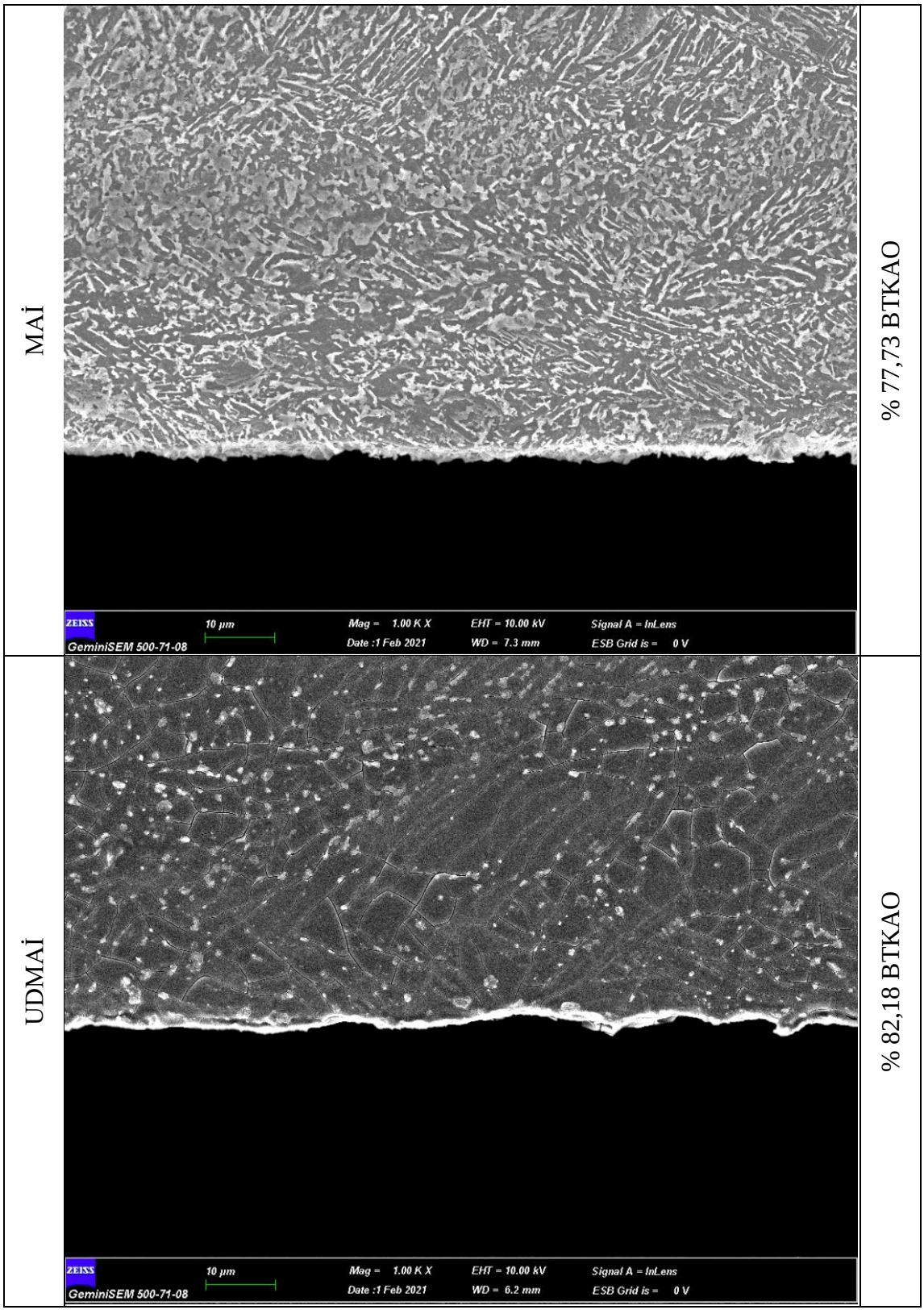
Resim 2.10. 10. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



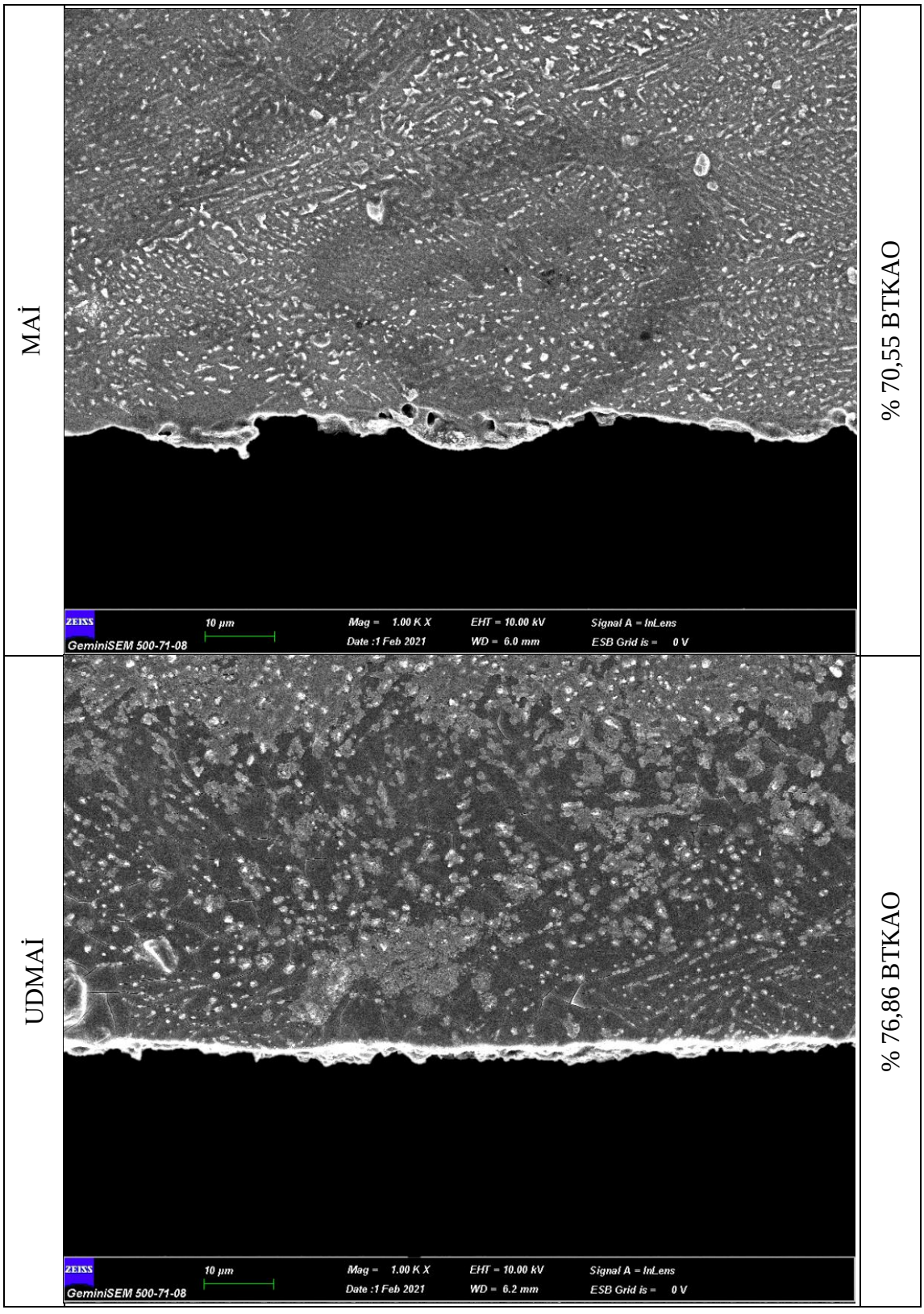
Resim 2.11. 11. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



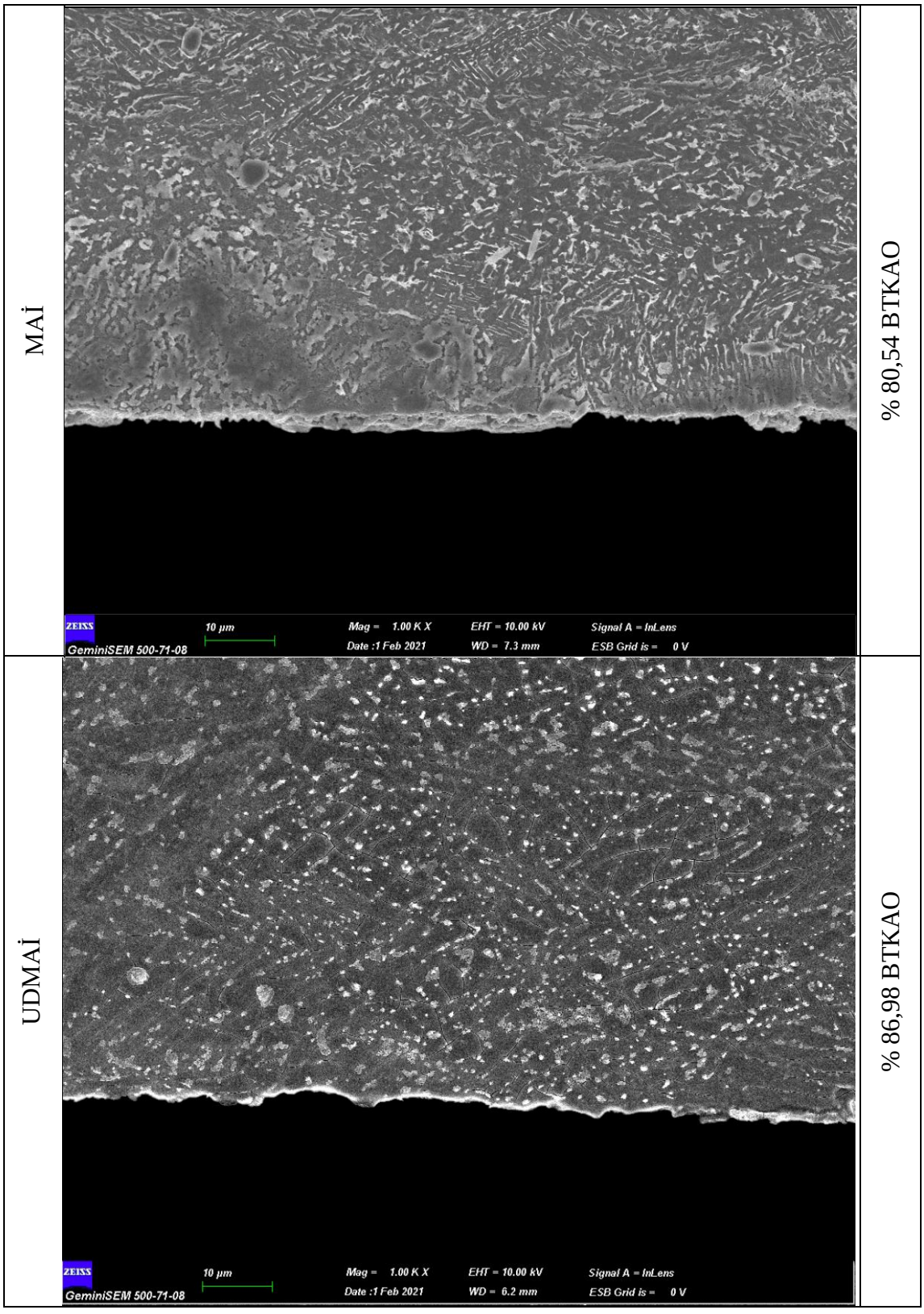
Resim 2.12. 12. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



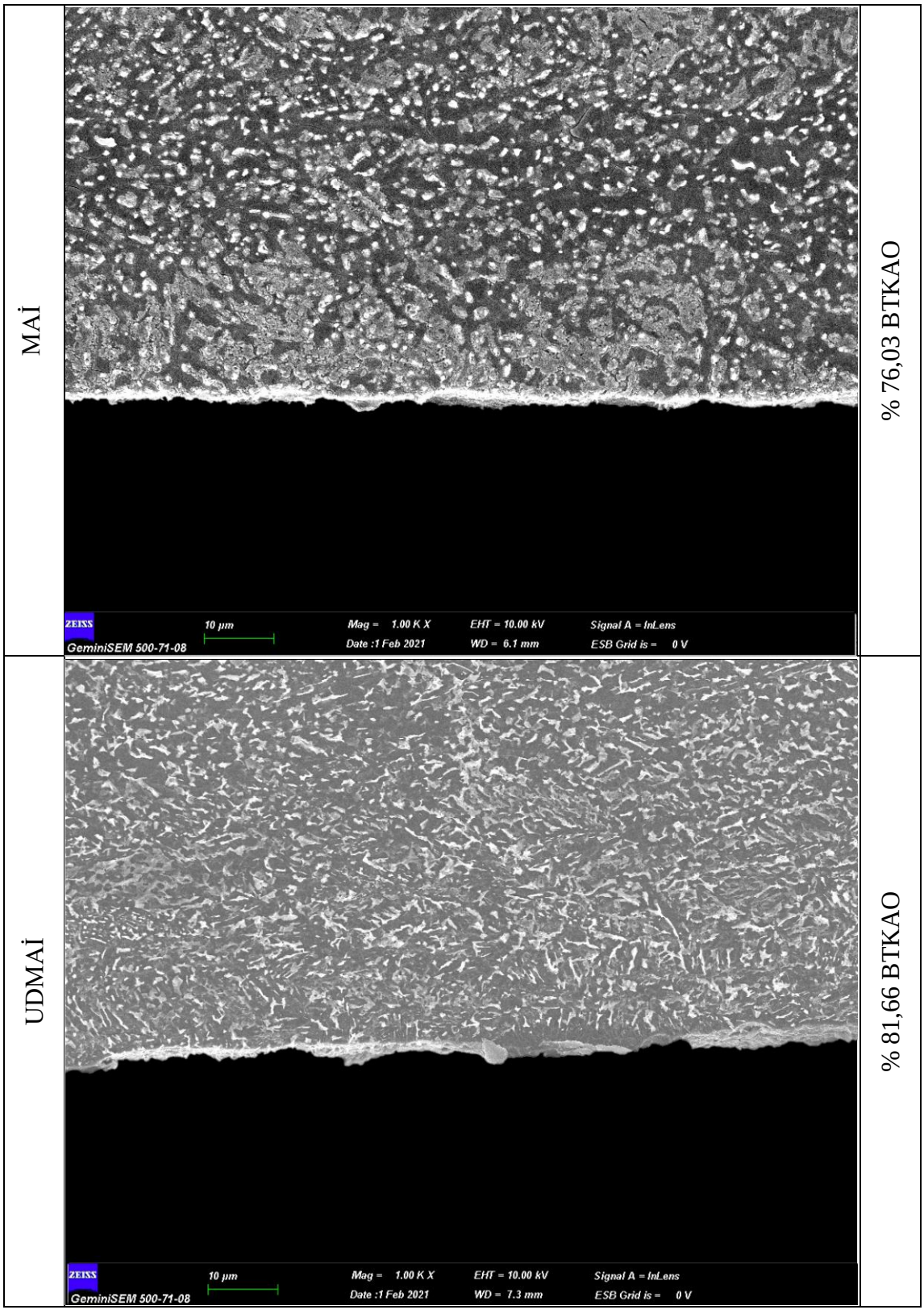
Resim 2.13. 13. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



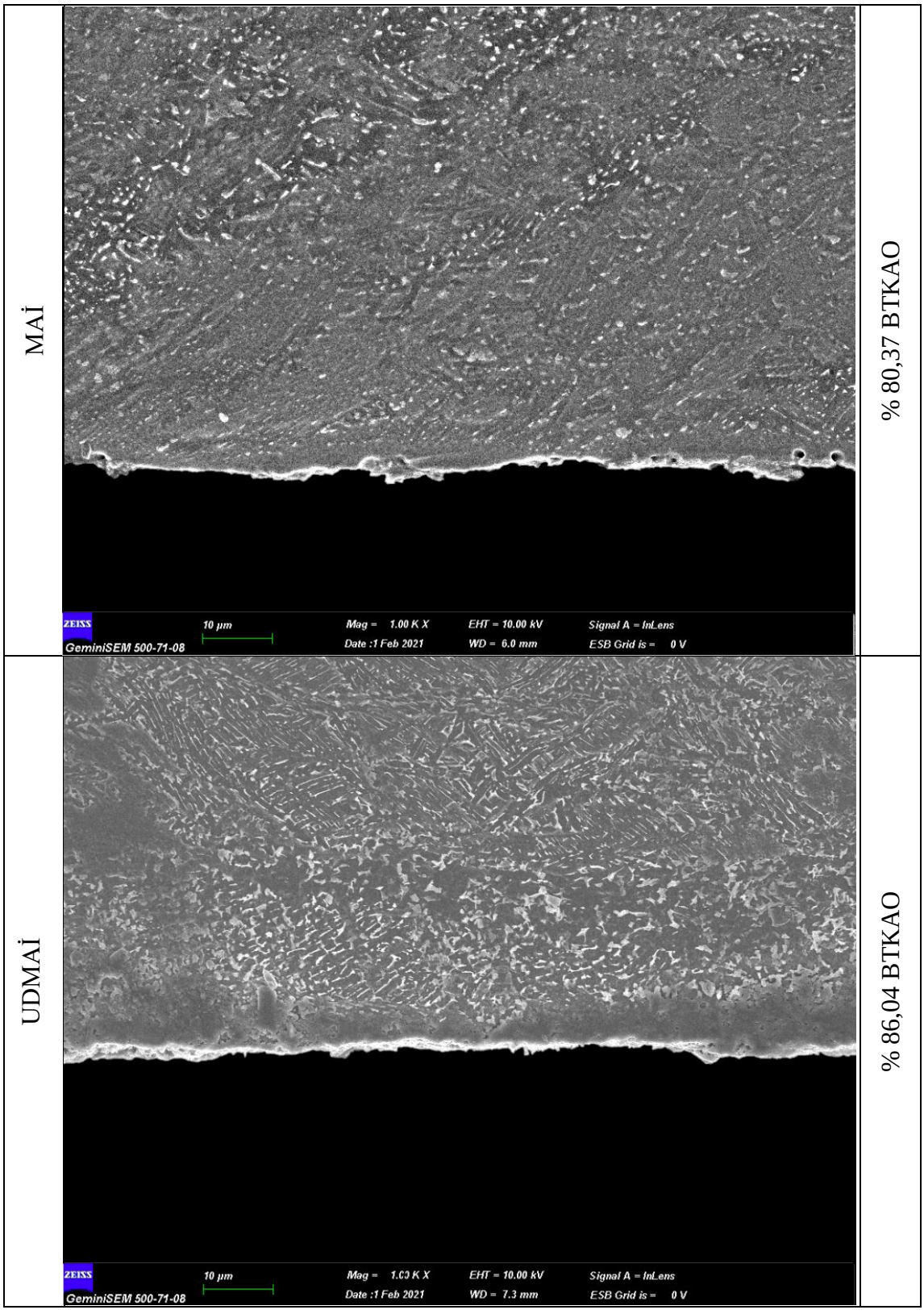
Resim 2.14. 14. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



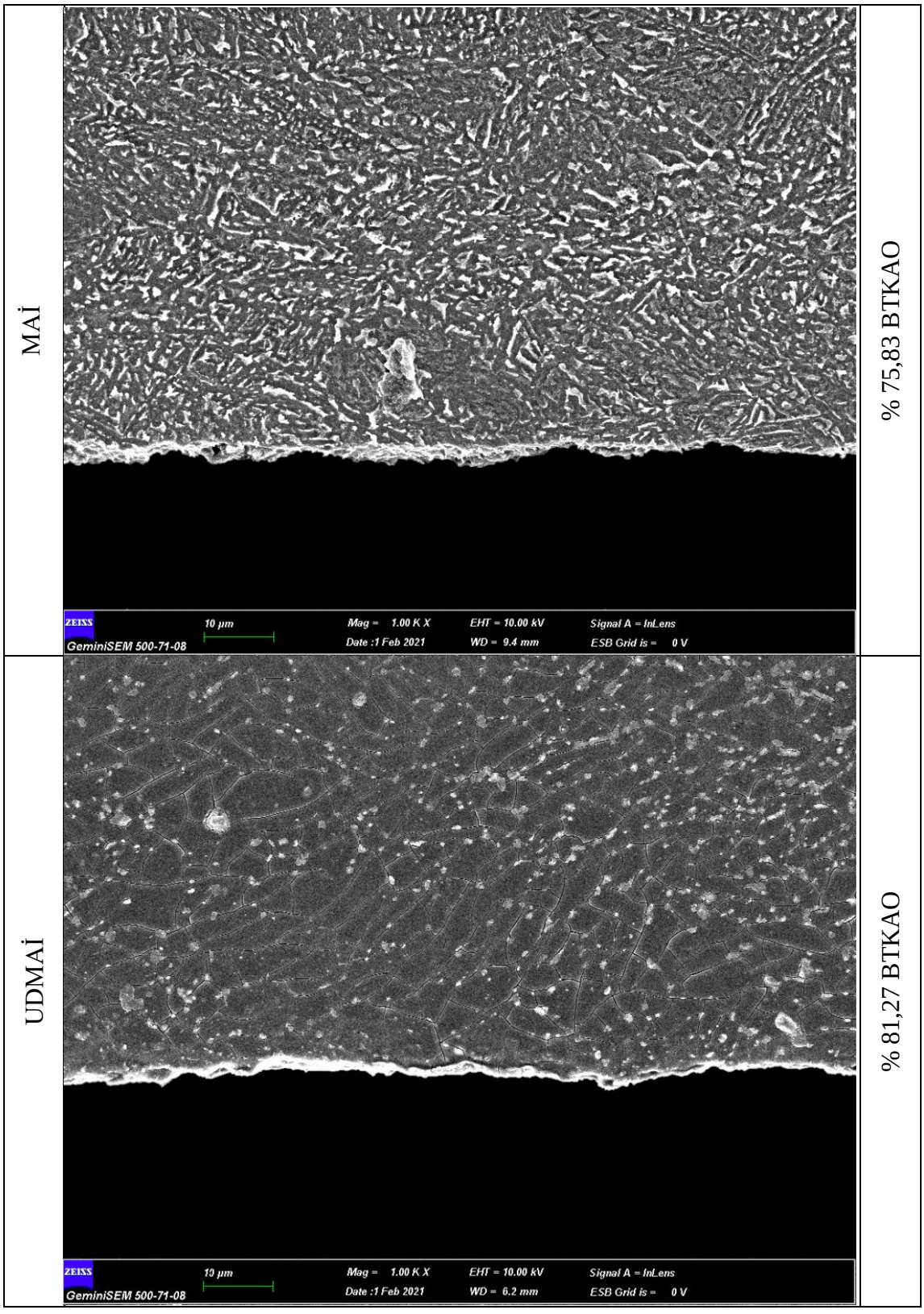
Resim 2.15. 15. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



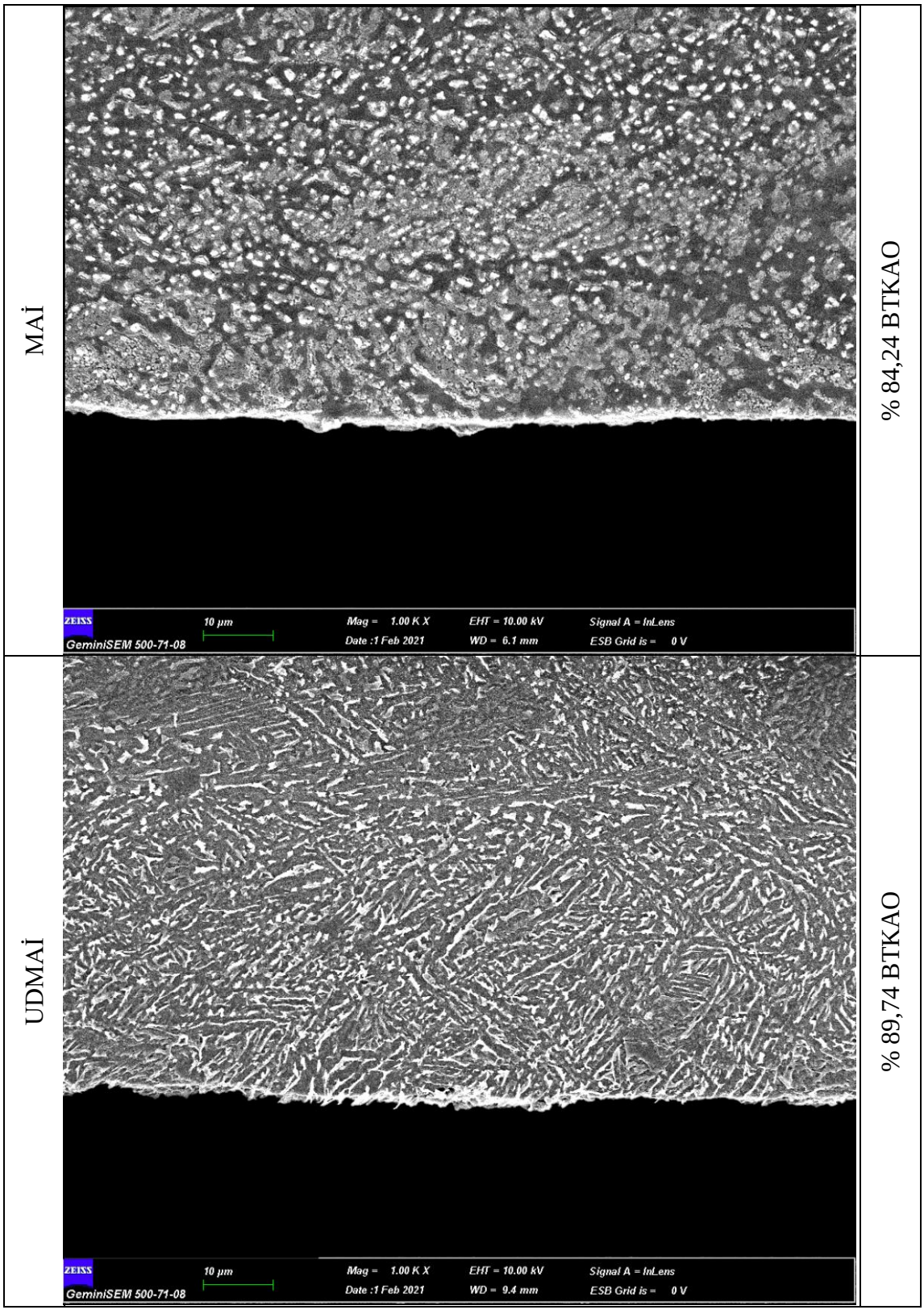
Resim 2.16. 16. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



Resim 2.17. 17. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri

EK-2. (Devam) Deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



Resim 2.18. 18. deneylere ait beyaz tabaka görüntüleri



GAZİ GELECEKTİR..