PROTOTİP FOTOKİMYASAL İŞLEME MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI, PERFORMANS TESTLERİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

2023
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Murat TUNÇ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

PROTOTİP FOTOKİMYASAL İŞLEME MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI, PERFORMANS TESTLERİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Murat TUNÇ

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK
Mart 2023

Murat TUNÇ tarafından hazırlanan "PROTOTİP FOTOKİMYASAL İŞLEME MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI, PERFORMANS TESTLERİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU" başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA .....
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 02/03/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)	İmzası
Başkan : Prof. Dr. Ali Rıza MOTORCU (ÇOMÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Sıtkı AKINCIOĞLU (DÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Murat TUNÇ

ÖZET

Doktora Tezi

PROTOTİP FOTOKİMYASAL İŞLEME MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI, PERFORMANS TESTLERİ VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Murat TUNÇ

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Mart 2023, 113 sayfa

Bu çalışmada, prototip fotokimyasal işleme makinasının (PCM) tasarımı, imalatı, performans testleri ve proses parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. PCM makinasının tüm prosesleri üzerine monte edilmiş ve tüm sistemin diğer ünitelerle senkronizasyonu sağlanmıştır. Tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilen PCM işleme makinasının tüm sistemlerinin birlikte çalışmasını test etmek ve makinenin fotokimyasal işleme kapasitesini belirlemek üzere PCM işleme/aşındırma ön deneyleri yapılmıştır. Ön deney testlerinde iş parçası olarak AISI 304 paslanmaz çeliği seçilmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliği üzerinde gerçekleştirilen işlenebilirlik deneyleri çerçevesinde maksimum işleme/aşındırma derinliği (ED), minimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve optimal boyutsal tamlık (DA) elde etmek için proses parametrelerinin optimum seviyeleri belirlemek amaçlanmıştır. Prototip fotokimyasal makinesi üzerinde gerçekleştirilen işlenebilirlik deneyleri için Taguchi L18 ortogonal

dizi kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin (Film çeşidi, pozlama süresi, aşındırma süresi ve kaplama yüzey temizlik süresi) kalite karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmak ve optimal seviyelerini belirlemek için Taguchi metodu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ve istatistiki değerlendirmeler sonucunda AISI 304 paslanmaz çeliğinin PCM ile işlenmesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü ve aşınma derinliği üzerinde aşındırma süresinin en etkili işleme parametresi olduğu tespit edilmiştir. AISI 304 çeliğinin PCM işleme makinesiyle düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü, nominal ölçülere en yakın boyutsal tamlık ve maksimum aşındırma derinliği elde etmek için işleme parametrelerinin optimal seviyeleri; pozitif film tipi, 160 sn pozlama süresi, 300 sn aşındırma süresi ve 80 sn temizlik süresi olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında tamamlanan tasarım, prototip imalat ve işlenebilirlik deneyleri çalışmaları sonucunda, tüm sistemlerin PCM işleme makinası üzerinde senkronize bir şekilde çalıştığı, PCM işleme makinasının efektif bir şekilde aşındırma işlemini gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, PCM işleme makinası üzerinde gerçekleştirilen aşındırma işlemlerinde seçilen proses parametrelerinin seviyelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü boyutsal tamlık ve aşındırma derinliği gibi kalite karakteristiklerinin değişimi gözlenebilmektedir.

Anahtar Sözcükler : Fotokimyasal işleme (PCM), Boyutsal tamlık, Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Aşındırma derinliği, Varyans analizi.

Bilim Kodu **:** 91438

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

DESIGN, MANUFACTURING, PERFORMANCE TESTS AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS OF A PROTOTYPE PHOTOCHEMICAL PROCESSING MACHINE

Murat TUNÇ

Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Machine Engineering

Thesis Advisor:
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA
March 2023, 113 pages

In this study, the Design, Manufacturing, Performance Tests and Optimization of the Process Parameters of the Prototype Photochemical Processing Machine were carried out. All processes of the photochemical processing machine are mounted on it and the whole system is synchronized with other units. Photochemical processing / etching preliminary experiments were carried out in order to test the interoperability of all systems of the photochemical processing bench, of which the design and prototype production was carried out, and to determine the photochemical processing capacity of the machine. AISI 304 stainless steel was chosen as the workpiece in the preliminary test tests. Within the framework of machinability tests carried out on AISI 304 stainless steel, it is aimed to determine the optimum levels of process parameters in order to obtain maximum machining/abrasion depth (ED), minimum surface roughness (Ra) and optimal dimensional accuracy (DA). Taguchi L18 orthogonal array was used for machinability experiments performed on the prototype photochemical machine. The Taguchi method

was used to investigate the effects of control factors (film type, exposure time, etching time and coating surface cleaning time) on quality characteristics and to determine their optimal levels. As a result of the experimental study and statistical evaluations, it has been determined that the etching time on the surface roughness and the etching time on the wear depth are the most effective machining parameters in the photochemical processing of AISI 304 stainless steel. Optimal levels of machining parameters to simultaneously achieve minimum surface roughness, dimensional accuracy closest to nominal sizes, and maximum etching depth in the photochemical machining of AISI 304 steel; The positive film type was determined as 160 sec exposure time, 300 sec etching time and 80 sec cleaning time. As a result of the design prototype manufacturing and machinability experiments completed within the scope of this project, it was determined that all systems work synchronously on the photochemical processing machine, and the photochemical processing machine performs the etching process effectively. In addition, changes in quality characteristics such as surface roughness, dimensional accuracy and etching depth can be observed depending on the levels of the selected process parameters in the etching processes performed on the photochemical processing machine.

Key Word **:** Photochemical machining (PCM), Dimensional accuracy, Surface roughness, Etch depth, Analysis of variance.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren başta danışman hocam Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA, olmak üzere, tez izleme komisyonunda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Ali Rıza MOTORCU, Doç. Dr. Sıtkı AKINCIOĞLU, Doç. Dr. Gökhan SUR ve Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımda sağladıkları imkanlardan dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştirma Projeleri Koordinasyon birimine teşekkür ederim. Tek motivasyon kaynağım, beni sabırla bekleyen, anlayan, bereketi ile gelen herşeyim canım kızım Nil Eylül TUNÇ'a, anlayışı, desteği ve hoşgörüsü ile hep yanımda olan biricik eşim Nevin TUNÇ'a, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen canım annem Sabiha TUNÇ'a, oğlu olduğum için gurur duyduğum İlhan TUNÇ'a, canım ablalarıma ve abime, ÖZER ailesine, sahibi olduğum MEDSAN SAVUNMA ve SPACE DYNAMICS'te bulunan ortaklarım, çalışma arkadaşlarıma, Burak Kaan Kale ve Dr.Öğr.Üyesi Faruk MERT'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvii

BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 3
FOTOKİMYASAL İŞLEME 3
2.1. FOTOKİMYASAL İŞLEME İLE ŞEKİLLENDİRMENİN ADIMLARI 3
2.1.1. Çizimin Hazırlanması 4
2.1.3. Malzeme Yüzey Temizleme 6
2.1.4. Yüzey Kaplama 6
2.1.5. Pozlama 7
2.1.6. Banyolama 10
2.1.7. Aşındırma 10
2.2. FOTOKİMYASAL İŞLEMEDE KULLANILAN İŞLEME PARAMETRELERİ 13

BÖLÜM 3 14
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 14
3.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ 46

Sayfa

BÖLÜM 4 47
MALZEME VE YÖNTEM 47
4.1. MAKİNE TASARIMI 47
4.1.1. Birinci Prototip Fotokimyasal İşleme Makinesi (PCM) Tasarımı 51
4.1.1.1. Yıkama Ünitesi 51
4.1.1.2. Boya Ünitesi 53
4.1.1.3. Kurutma Ünitesi 54
4.1.1.4. Pozlama Ünitesi 55
4.1.1.5. Banyolama Ünitesi 57
4.1.1.6. Aşındırma Ünitesi 58
4.1.1.7. Temizleme Ünitesi; 59
4.1.2. İkinci Prototip PCM Makinesi Yapım Süreci 61
4.1.3. Üçüncü ve Nihai Prototip PCM Makinesi Yapım Süreci 64
4.2. MALZEME SEÇİMİ 74
4.3. DENEY TASARIMI 75
4.4. DENEYLER VE ÖLÇÜMLER 81
4.4.1. Fotokimyasal İşleme Deneyleri 81
4.4.2. Aşındırma Derinliği 82
4.4.3. Boyutsal Tamlık 83
4.4.4. Yüzey Pürüzlülüğü 84
4.4.5. Yüzey Topolojisi 85

BÖLÜM 5 87
BULGULAR DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 87
5.1. MAKİNE TASARIMI 87
5.1.1. Tahmini Maliyet Hesabı 88
5.2. AŞINDIRMA DERİNLİĞİ 89
5.3. BOYUTSAL TAMLIK 92
5.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 94
5.5. YÜZEY TOPOLOJİSİ 97

Sayfa

BÖLÜM 6 101
SONUÇ VE ÖNERİLER 101
KAYNAKLAR 104

EK AÇIKLAMALAR A. 109
NUMUNELERE AİT TOPOLOJİ VE DENEY GÖRÜNTÜLERİ 109

ÖZGEÇMİŞ 113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fotokimyasal işleme yönteminin uygulama aşamaları 4
Şekil 2.2. Tolerans sınırlamalarını etkileyen faktörler 5
Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrum 7
Şekil 2.4. UV ışınlarının etkisi sonucunda film tabakasının oluşması 8
Şekil 2.5. UV ışınları ile mürekkebin tepkimesi 9
Şekil 2.6. Banyolama sonrası aşındırmaya hazır deney numunesi 10
Şekil 2.7. Aşındırma işlemi 11
Şekil 3.1. Aşındırma banyosu 14
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi 16
Şekil 3.3. Film şematik diyagramı 24
Şekil 3.4. a) Kuru film pozlama, b) Sıvı film pozlama 25
Şekil 3.5. Deneysel model şekli 26
Şekil 3.6. Tasarlanan sistem çalışma prensibi 33
Şekil 3.7. Patenti alınan stentin üretim prosedürü 34
Şekil 3.8. Her üç yöntem için işlenme 35
Şekil 3.9. İşlem adım dizisinin şematik bir gösterimi 39
Şekil 3.10. Alt aşınma 40
Şekil 3.11. Stent prototipi 42
Şekil 3.12. Hazırlanan numune 44
Şekil 3.13. Aşındırma sonrası malzeme görüntüsü 45
Şekil 4.1. Kavram geliştirme akış şeması. 47
Şekil 4.2. Literatürde yaygın olarak kullanılan PCM düzeneğine ait şematik görüntü. .. 48
Şekil 4.3. Üretimi hedeflenen yeni yarı otomatik PCM makinesinin proses adımları. .. 49
Şekil 4.4. Yarı otomatik fotokimyasal işleme makinesinin yapım aşamasında yapımları gerçekleştirilen prototiplerin tasarım akışları 50
Şekil 4.5. a) PCM makinesinin ilk 3 boyutlu tasarımı, b) Prototipi gerçekleştirilen ilk PCM makinesinin fotoğraf gösterimi 50
Şekil 4.6. Prototip üretimi gerçekleştirilen birinci PCM makinesinin fotoğraf görüntüsü 51
Şekil 4.7. Yıkama işlemlerinde kullanılan %99.9 saflıkta izopropil alkol 52

Sayfa

Şekil 4.8. PCM makinesi yıkama ünitesi detaylı gösterimi. 52
Şekil 4.9. PCM makinesinde kullanılan boya ve uygulama şekli, a) Işığa duyarlı yüzey kaplama boyası, b) Boya uygulama şekli. 53
Şekil 4.10. PCM makinesi boyama ünitesi detaylı gösterimi. 54
Şekil 4.11. PCM makinesinde kullanılan ısıtıcı fan. 54
Şekil 4.12. PCM makinesi kurutma ünitesi gösterimi. 55
Şekil 4.13. Deneyler için hazırlana fototakım retro baskı şablonu gösterimi. 56
Şekil 4.14. PCM makinesi pozlama ünitesi gösterimi 56
Şekil 4.15. Deneylerde kullanılan sıvı Na_2CO_3 ürünün fotoğraf görünütüsü. 57
Şekil 4.16. PCM makinesi banyolama ünitesi gösterimi. 57
Şekil 4.17. Aşındırma işlemlerinde kullanılan $FeCl_3$ ürün görseli. 58
Şekil 4.18. PCM makinesi aşındırma ünitesi gösterimi 59
Şekil 4.19. PCM makinesi temizleme ünitesi görüntüsü. 60
Şekil 4.20. İkinci prototip PCM makinesi genel görüntüsü. 61
Şekil 4.21. PCM makinesi boyama ünitesi görüntüsü. 62
Şekil 4.22. Kurutma ünitesinde ısıya bağlı olarak oluşan hatalı ve hatasız numune görüntüleri. 63
Şekil 4.23. PCM makinesi kurutma ünitesi görüntüsü. 63
Şekil 4.24. PCM makinesi pozlama ünitesi görüntüsü. 64
Şekil 4.25. PCM makinesi püskürtme sistemi şematik gösterimi. 65
Şekil 4.26. Üretimi gerçekleştirilen nihai, prototip PCM işleme makinesinin genel görünümü. 65
Şekil 4.27. Temizleme işlemi uygulanmış numune görüntüsü. 66
Şekil 4.28. Kirli yüzeye uygulanan kaplama görüntüsü. 66
Şekil 4.29. PCM makinesi serigrafi işlemi görüntüsü. 67
Şekil 4.30. Rakle (sıyırıcı). 68
Şekil 4.31. PCM makinasında iş parçası numunesinin fırınlanma görüntüsü. 69
Şekil 4.32. İş parçası numune yüzeyine yerleştirilen fototakım görüntüsü. 70
Şekil 4.33. PCM makinası pozlama ünitesinin açık kapak görünümü. 70
Şekil 4.34. Pozlama işlemi uygulanan iş parçası numune görüntüsü. 71
Şekil 4.35. PCM makinası banyolama ünitesinin çalışma prensibi görüntüsü. 72
Şekil 4.36. Banyolama işlemi tamamlanan iş parçası numune görüntüleri. 72
Şekil 4.37. PCM makinası aşındırma ünitesinin çalışma prensibi. 73
Şekil 4.38. Aşındırma işlemi tamamlanan iş parçası numune görüntüsü. 73

Şekil 4.39. Son temizleme işlemi tamamlanan iş parçası. 74
Şekil 4.40. Deneysel iş parçası ve kullanılan fototakım. 77
Şekil 4.41. Deneyler işlem sırası, a) Deneysel iş parçaları, b) Serigrafi işlemi, c) Fırın ısıtma işlemi, d) Fototakım yerleşimi. 78
Şekil 4.42. Deneyler sırasında kullanılan tüm ölçüm cihazları, a) Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı, b) Microtecnica Helios 350V profil projektör, c) CMM (Dea Global Silver), d) Huvitz. ... 80
Şekil 4.43. Üretimi gerçekleştirilen prototip PCM ile işlenen iş parçası numunesi. 81
Şekil 4.44. PCM makina ile AISI 304 iş parçası numunesi aşındırma işlemi sonrası elde edilen aşınma derinliğinin CMM cihazı ile ölçümü 82
Şekil 4.45. CMM cihazı ile aşındırma derinliği ölçme anı görüntüsü. 83
Şekil 4.46. Boyutsal tamlık ölçümünün yapıldığı microtecnica Helios 350V profil projektörü. 83
Şekil 4.47. Boyutsal tamlık ölçümü yapılan iş parçası numunesinin ekran görüntüsü. 84
Şekil 4.48. Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı. 84
Şekil 4.49. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm görüntüsü. 85
Şekil 4.50. Yüzey topoloji ölçümlerinin yapıldığı Huvitz mikroskobunun genel görüntüsü. 85
Şekil 4.51. Yüzey topografi ölçüm görüntüsü. 86
Şekil 5.1. S/N grafiği Proses parametrelerinin aşındırma derinliği üzerine etkisi. 91
Şekil 5.2. Proses parametrelerinin boyutsal tamlık üzerine etkileri. 93
Şekil 5.3. Proses parametrelerinin Ra yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi. 96
Şekil 5.4. Dijital mikroskop görüntüleri, (a) Deney 3 için DET kullanımı ve deney 12 için RET kullanım görüntüleri. 97
Şekil 5.5. El Deney 3 için elde edilen topolojik görüntü. 98
Şekil 5.6. Deney 6 için elde edilen topolojik görüntü. 99
Şekil 5.7. Dijital mikroskop görüntüleri, (a) Deney 3, (b) Deney 6 için desen tipine göre karşılaştırmalı görüntüler. 99
Şekil 5.8. Deney 7 için elde edilen topolojik görüntü. 100
Şekil Ek A.1. Ön deney 1 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü... 110
Şekil Ek A.2. Ön deney 2 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü... 110
Şekil Ek A.3. Ön deney 3 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü... 111
Şekil Ek A.4. Ön deney 4 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü... 111
Şekil Ek A.5. Ön deney 5 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü... 111
Şekil Ek A.6. İlk prototip aşındırma sistemi. 112
Şekil Ek A.7. Makine ardunio kodları prototipi. 112

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Fotokimyasal işleme yönteminde kullanılan malzemeler 6
Çizelge 2.2. Farklı malzemeler için kullanılan aşındırma çözeltileri 11
Çizelge 3.1. Deney işlem parametreleri 15
Çizelge 3.2. Deney işlem parametreleri 16
Çizelge 3.3. Deney işlem parametreleri 17
Çizelge 3.4. Deney işlem parametreleri 18
Çizelge 3.5. Deney işlem parametreleri 19
Çizelge 3.6. Deney işlem parametreleri 20
Çizelge 3.7. Deney işlem parametreleri 21
Çizelge 3.8. Deney işlem parametreleri 22
Çizelge 3.9. Deney işlem parametreleri 26
Çizelge 3.10. Deney işlem parametreleri 28
Çizelge 3.11. Deney işlem parametreleri 29
Çizelge 3.12. Maliyet çizelgesi 30
Çizelge 3.13. Deney işlem parametreleri 31
Çizelge 3.14. Deney işlem parametreleri 37
Çizelge 3.15. Fotorezist varyasyonu 38
Çizelge 3.16. Deney işlem parametreleri 40
Çizelge 3.17. Deney işlem parametreleri 41
Çizelge 3.18. Deney işlem parametreleri 43
Çizelge 3.19. Deney işlem parametreler 44
Çizelge 3.20. Deney işlem parametreleri 45
Çizelge 4.1. Deney numunesi AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşenleri 75
Çizelge 4.2. Ortogonal diziye göre deneysel tasarım. 79
Çizelge 5.1. PCM makinasına ait maliyetler çizelgesi. 88
Çizelge 5.2. PCM mevcut sistem maliyetler çizelgesi. 89
Çizelge 5.3. Taguchi L18 deney düzeneğine göre yapılan AISI 304 paslanmaz çeliğin aşınma derinliğinin deneysel sonuçları. 90
Çizelge 5.4. Aşındırma derinliği için ANOVA yanıt çizelgesi. 90
Çizelge 5.5. Aşındırma derinliği için parametrelere bağlı ANOVA yanıt çizelgesi. . 91

Çizelge 5.6. AISI 304 paslanmaz çeliğin boyutsal tamlık deneysel sapma. 92
Çizelge 5.7. Boyutsal tamlık için ortalama yanıt toplamları. 93
Çizelge 5.8. Boyutsal tamlık için ANOVA yanıt çizelgesi. 94
Çizelge 5.9. AISI 304 paslanmaz çeliğin PCM ortalama yüzey pürüzlülüğü için deneysel sonuçları. 95
Çizelge 5.10. Ra için yanıt çizelgesi. 95
Çizelge 5.11. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA yanıt çizelgesi. 96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

° : Derece

°C : Derece santigrat

% : Yüzde oran

µm : Mikron metre

Ag : Gümüş

Al : Alüminyum

Al_2O_3 : Alüminyum oksit

Au : Altın

C : Karbon

Ca : Kalsiyum

CN : Siyanid

Co-Cr : Kobalt krom

Cp : Dinamik vizkozite

Cst : Kinematik viskozite

Cu : Bakır

$CuCl_2$: Bakır klorür

$FeCl_3$: : Demir klorür

f : İlerleme hızı

Fe : Demir

g : Gram

SİMGELER

H_2SO_4 : Sülfürik asit
H_3PO_4 : Hidrofosforik
HBr : Hidrobromik
HCL : Hidroklorik asit
L16 : Taguchi L16 deney düzeni sırası
M : Metre
M : Metre
Mg : Magnezyum
MPa : Mega paskal
Na_2CO_3 : Sodyum karbonat
NaOH : Sodyum hidroksit
Ø : Çap (mm)
O : Oksijen
P : Basınç (bar)
Ra : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)
Rz : Maksimum yüzey pürüzlülüğü
s : Saniye
Si : Silisyum
SiO_2 : Silisyum oksit
SN : Sinyal/Gürültü
SS304 : Stainless steel

KISALTMALAR

ANOVA : Varyans analizi
As : Aşındırma süresi
DA : Boyutsal tamlık
DE : Aşındırma derinliği
DET : Pozitif film pozlama
DP : Doğrudan projeksiyon
DRM : Development rate monitor
Dtube : Tüpün dış çapı
ED : Kenar sapması
GIA : Gri ilişkisel analiz
JPFA : Japanese Photo Fabrication Association
MAV : Micro air vehicle
max : Maksimum
MMK : Metal matrix kompozit
MRR : Malzeme uzaklaştırma hızı
OFHC : Oksijensiz yüksek iletken bakırın
ORP : Oksidasyon indirgeme potansiyeli
PCM : Fotokimyasal aşındırma
RED : Negatif film pozlama
RSM : Yanıt yüzey metodu
SEM : Taramalı elektron mikroskobu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fotokimyasal işleme (PCM-Photo Chemical Manufacturing) fotokimyasal frezeleme veya foto aşındırma olarak da tanımlanmaktadır. PCM ile işleme, seçilen alanları aşındırmak için fotorezist ve aşındırıcılar kullanarak sac metal bileşenlerin imal edilmesi işlemidir. Günümüzde birçok sektörde ihtiyaç duyulan sert, hafif, mikro ölçekte parça ihtiyacı önem kazanmaktadır. PCM aşındırma işlemi ile çok ince ayrıntılarla doğru ve ekonomik olarak son derece karmaşık parçalar üretebilmektedir. PCM işleme yöntemi ince ve hassas parçaların presleme, punch, lazer, su jeti kesimine veya elektro erozyon işlemeye (EDM) göre daha ekonomiktir. PCM makinasının üretiminde veya seri üretimin her aşamasında istenilen değişiklik çok kolaylıkla yapılabilmektedir. PCM işleme makinası ile 0.013-2.03 mm arası kalınlıktaki alüminyum, pirinç, bakır, inconel, magnazyum, nikel, gümüş, çelik, paslanmaz çelik ve titanyum çok rahatlıkla işlenmektedir. Geleneksel olmayan imalat yöntemleri içinde yerini alan fotokimyasal işleme yönteminde aşındırma işlemi, şekillendirilecek malzemenin işlenmeyecek bölgelerinin çeşitli maskeler ile kaplanarak işlenecek bölgelerin kimyasal aşındırıcı olarak tanımlanan çözeltiler yardımıyla kontrollü bir şekilde korozyona uğratılması ile yapılmaktadır [1]. PCM işleme yöntemi ile şekillendirme dokuz aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; çizimin (foto takım) hazırlanması, malzeme seçimi, yüzey temizleme, yüzey kaplama, UV ışını uygulama, banyolama (Aşındırılacak bölgenin ortaya çıkarılması), aşındırma, yüzey temizleme (Kalıntı kaplamanın uzaklaştırılması) ve kalite kontroldür. PCM işleme yöntemi mikro akışkan kanallar, silikon entegre devreler, bakır baskılı devre kartları ve dekoratif öğeler gibi çeşitli hassas parçaların üretiminde rahatlıkla kullanılmaktadır. Özellikle elektronik, havacılık ve medikal gibi çeşitli alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. PCM işleme prosesi; fotokimyasal kazıma, kimyasal öğütme, kimyasal aşındırma, fotoğraflama olarak da adlandırılmaktadır [2, 3].

Bu çalışmada, PCM işleme makinesinin tasarımı ve prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Prototip imalatın tamamlanmasından sonra PCM işleme tezgâhına/makinesine montajı gerçekleştirilerek ünitelerin makinenin diğer sistemleriyle senkronizasyonu sağlanmıştır. Montaj işlemi tamamlandıktan sonra PCM işleme makinesinin iş parçası üzerindeki aşındırma kalite karakteristiklerini belirlemek üzere işlenebilirlik ön deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma ile fotokimyasal işleme makinesinin prototip olarak üretilmiş ve işlemeye uygun hale getirilmiştir.

BÖLÜM 2

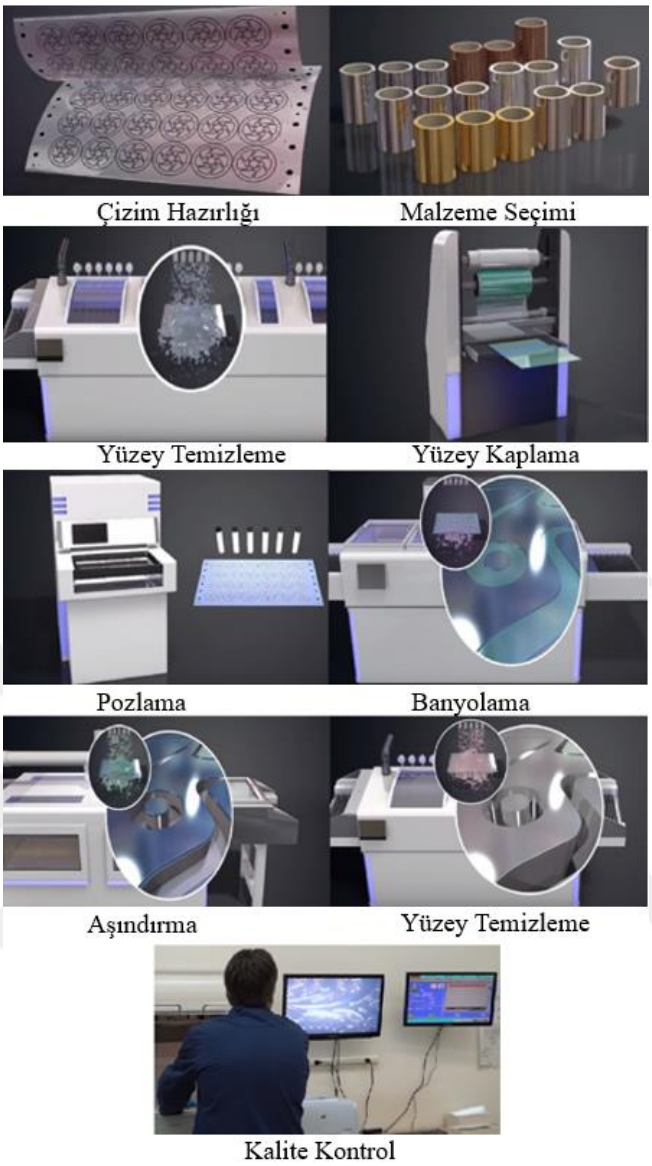
FOTOKİMYASAL İŞLEME

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri içinde yerini alan PCM işleme yönteminde imalat, şekillendirilecek malzemenin işlenmeyecek bölgelerinin çeşitli maskeler ile kaplanarak işlenecek bölgelerin kimyasal aşındırıcı olarak tanımlanan çözeltiler yardımıyla kontrollü bir şekilde korozyona uğratılması ile yapılmaktadır. Yöntem özellikle karmaşık şekilli ve düşük kalınlığa sahip her türlü malzemenin işlenmesinde kolaylıkla kullanılabilmektedir [4].

2.1. FOTOKİMYASAL İŞLEME İLE ŞEKİLLENDİRMENİN ADIMLARI

Fotokimyasal işleme yöntemi ile şekillendirme dokuz aşamadan oluşmaktadır Şekil 2.1'de gösterilmektedir [4].

1. Çizimin (foto takım) hazırlanması
2. Malzeme seçimi
3. Yüzey temizleme
4. Yüzey kaplama
5. UV ışını uygulama
6. Banyolama (Aşındırılacak bölgenin ortaya çıkarılması)
7. Aşındırma
8. Yüzey temizleme (Kalıntı kaplamanın uzaklaştırılması)
9. Kalite kontrol dür.

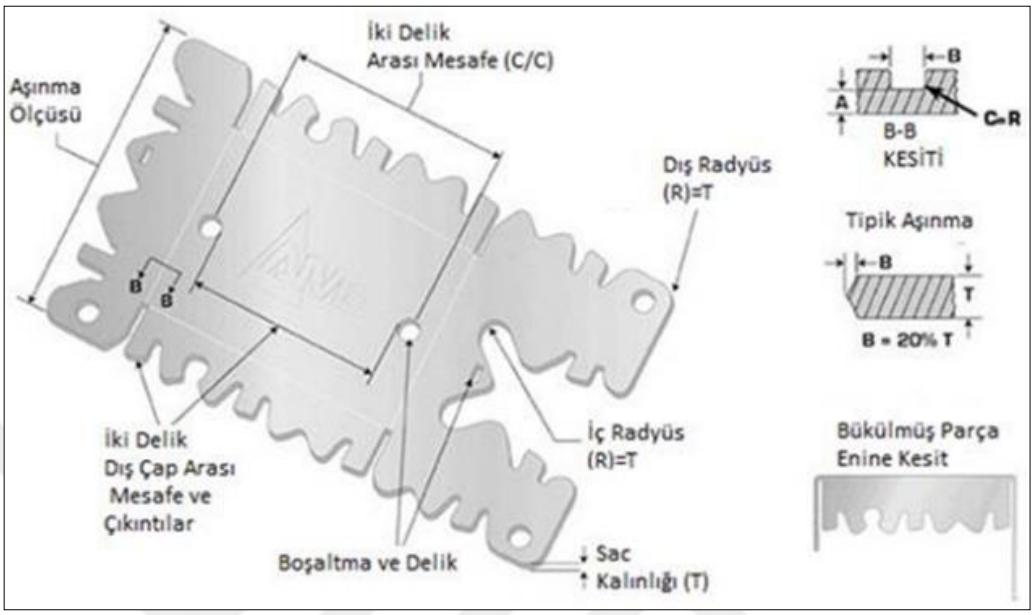


Şekil .1. Fotokimyasal işleme yönteminin uygulama aşamaları [4].

2.1.1. Çizimin Hazırlanması

Fotokimyasal aşındırma ve frezelemede parçaları tasarlarken veya belirlerken, projeyi hızlandırmaya yardımcı olacak belirli kurallar vardır [3,4]. Bu kuralları kullanılan malzeme kalınlığı, aşındırma miktarı (aşındırma işlemi veya frezeleme), kullanılacak malzeme cinsi büyük ölçüde belirlemektedir. Ayrıca işlemede kullanılan geometriler, tolerans değerlerini sağlamada ve istenilen şeklin elde edilmesinde önemli faktörlerdir. Şekil 2.2'de tolerans sınırlamalarını etkileyen faktörler verilmektedir. Bu faktörler

tasarım aşamasındaki ve üretim sonrası kalite kontrol kriterlerini belirlemektedir [3, 4].



Şekil .2. Tolerans sınırlamalarını etkileyen faktörler [3, 4].

PCM işlemede, tasarım detayları ve malzeme kalınlığı önemlidir. PCM işleme yönteminde diğer işleme metotlarından farklı olarak G kodu üretmeye ihtiyaç bulunmamaktadır. İki veya üç boyutlu çizim programlarından alınan DWG, DXF, PDF, Step, Gerber, IGES, CorelDraw ve Adobe Illustrator formatları ile baskı yapılarak takım hazırlanır [3, 4].

2.1.2. Malzeme Seçimi

PCM işleme yöntemi işleme esnasında malzeme iç yapısında stres yaratmaması ve çok ince kalınlığa sahip malzemeleri işleme işleme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, PCM işlemi yöntemini diğer imalat yöntemlerinden farklı kılmaktadır [2-5]. PCM işleme yöntemiyle yaygın olarak işlenmekte olan malzeme çeşitleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [2, 4].

Çizelge .1. Fotokimyasal işleme yönteminde kullanılan malzemeler [2,4].

Standart Malzemeler	Egzotik Malzemeler
Alüminyum	Tungsten
Berilyum	Molibden
Nikel	Niyobyum
Paslanmaz çelik	Zirkonyum
Pirinç	Titanyum
Bakır	
Invar ™	
Kovar®	
Bronz	

PCM işleme yönteminde tasarım yapılırken belirlenmesi gereken en önemli parametrelerden biri malzeme seçimi ve malzeme kalınlığıdır. Belirlenen malzeme sonrası kullanılacak kimyasal, aşındırıcı sıcaklığı, aşındırma süresi, pozlama süresi vb. parametreler belirlenmektedir [2, 4].

2.1.3. Malzeme Yüzey Temizleme

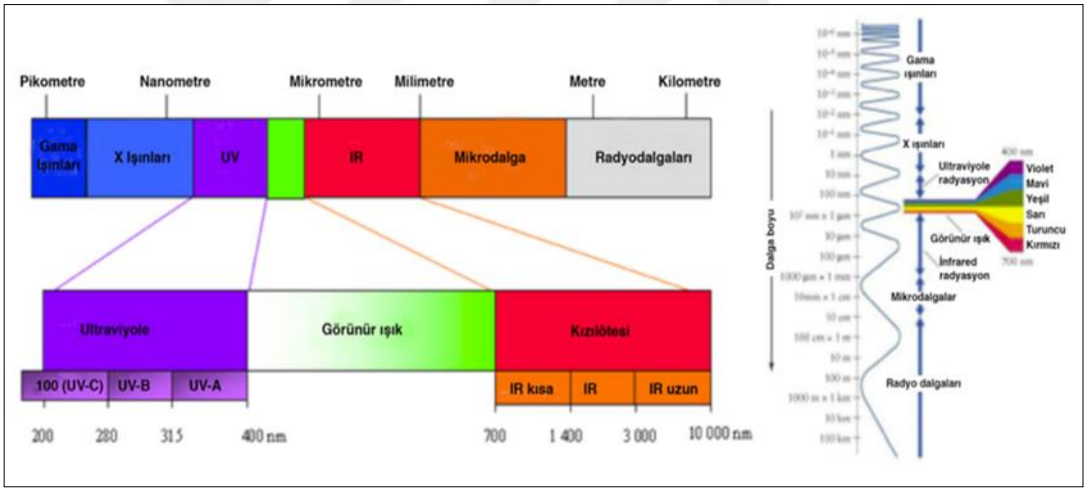
PCM işlemenin en önemli adımı olan UV duyarlı boyayı malzeme yüzeyine uygulamadan önce malzeme yüzeyinde bulunan kalıntı, toz ve pisliklerin yüzeyden uzaklaştırılmasıdır. Boya tutunmasının metal yüzeyde sağlanması ve mikro boyutta hataların oluşmaması için kirlerin tezlenmesi gerekmektedir [2, 4].

2.1.4. Yüzey Kaplama

PCM işleminde şeklin malzeme yüzeyine aktarılmasını sağlayan UV ışıkla sertleşen malzemeye fotorezist adı verilmektedir [6]. Fotoreziste uygulanan yüzeye UV ile açıkta kalan bölgelerde bir fotokimyasal reaksiyon meydana gelir ve daha sonra son temizlik adımında uygulanan solüsyonda kolayca çözülür. Endüstride yaygın olarak üç farklı tipte fotorezist kullanılmaktadır: sıvı fotorezist, kuru film ve SU-8 foto epoksi. Fotorezistlerin her birinin kullanım yerine göre avantajları ve dezavantajları vardır [6].

2.1.5. Pozlama

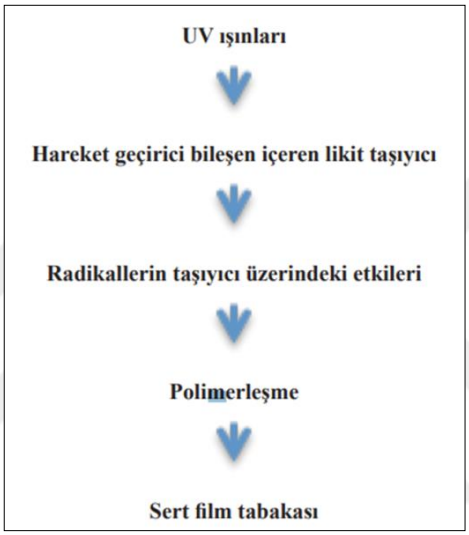
Fotokimyasal işleme yönteminde ve türevleri olan tüm işlemlerde pozlama adımı iş parçasının oluşturulduğu adımdır. Bu adımda kaplanan iş parçası yüzeyi bir fototakım ile birlikte UV ışığa maruz bırakılır. Maskeler genel olarak kullanım şekline göre cam, asetat kâğıdı vb. şablonlardan oluşmaktadır. Fototakım üzerinde ışığı geçirmeyecek bölgeler yine kullanıldığı yönteme göre kromla kaplanarak veya yazıcıdan çıktı alınarak malzemenin gelen radyasyonu geri yansıtması sağlanır. UV uygulanan fotorezist yüzeyde ışık gören kısımlardaki moleküler bağlar kuvvetlenerek plastikleşme meydana getirirler. Işın gören yerler, kalıcı hale gelirken, ışın görmeyen kısımlar çözücü içerisinde çözünür. 100 ile 400 nm dalga boyu arasındaki ışınıma morötesi ya da UV denir. Şekil 2.3'te elektromanyetik spektrum görünüm bölgeleri verilmektedir [7].



Şekil .3. Elektromanyetik spektrum [7].

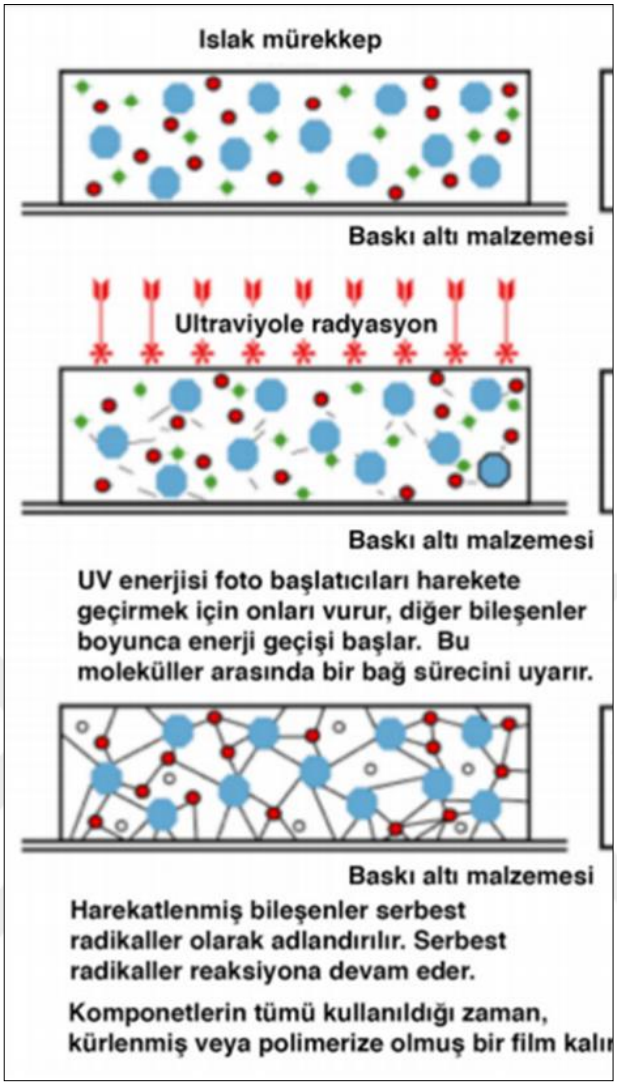
UV radyasyon, güneşten gelen ışık enerjisinin bir şeklidir. Işık enerjisi dalga boylarına göre sınıflandırılır. Pozlama işleminde UV seçimi çok önemlidir. Yüksek enerjili ve kısa dalga boyuna sahip olan ultraviyole C ışınlar (UVC 100-280 nm) fotorezist film derinliğinin tümüne nüfuz edemez ve sadece üst yüzeyde iyi kürleme özelliğine sahiptir. Dolayısıyla banyolama aşamasında bozulmalara sebep olmaktadır. Dalgaları daha büyük ve mürekkep filmin içine girebilen ultraviyole B (UVB 280-315nm) ise mürekkebin iç kısmını kurutmaktadır. Fotokimyasal ve türevi işlemler için fotorezist üreticilerinin en uygun dalga boyu olarak tavsiye ettiği radyasyon türü, uzun bir dalga

boyuna sahip olan ultraviyole A'dır (UVA 315-400 nm). Bu özelliğinden dolayı mürekkep filmin dibine kadar nüfuz edebilmektedir. Kürleme işleminde sıvı bir film tabakasını katıya dönüştürmek için 200-400nm dalga boyu aralığında mor ötesi ışınlar kullanılmaktadır. Bu işlemin bir diğer tanımı da çapraz bağlanmadır. Likit bileşenlerin UV radyasyon enerjisi ile çapraz bağlanmasını sağlayan zincir reaksiyon şeklinde gerçekleşen kimyasal bir süreçtir. Şekil 2.4'te UV ışınlarının etkisi sonucunda film tabakasının oluşma süreci verilmiştir [7].



Şekil .4. UV ışınlarının etkisi sonucunda film tabakasının oluşması [7].

Mürekkebin kuruması esnasında oluşan polimerizasyon işlemi devam ettikçe mürekkep film daha yüksek oranda mekanik kaynaşma sağlayacak hale gelir ve mürekkep filme sertlik, parlaklık, esneklik ve tutunma özellikleri kazandırılır. Şekil 2.5'te UV ışınları ile mürekkebin tepkimesi verilmiştir [7].

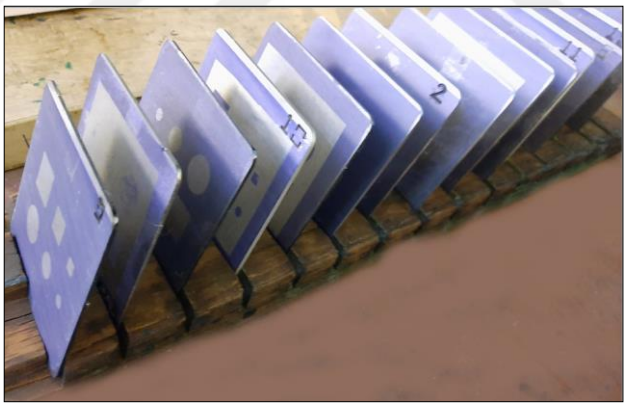


Şekil .5. UV ışınları ile mürekkebin tepkimesi [7].

Kürlenmenin performansı UV miktarı, UV yoğunluğu, termal çalışma alanı, mürekkep özellikleri, mürekkep film kalınlığı ve baskı hızına bağlı olarak değişmektedir. UV LED veya UV kürlenmede, Islak tabaka UV dalga boyundaki enerjiye maruz kaldığında %100 polimerleşme gerçekleşmez. Foton başlatıcılar aldıkları enerji ile polimerleşmeyi başlatmış olurlar. Gerçek kürlenme 24-48 saat sonra gerçekleşir veya bunu hızlandırmak için üreticinin tavsiye etmiş olduğu fırında 5 ile 10 dk arasında 85-90 ^{o}C bekletilmesi gerekmektedir [7].

2.1.6. Banyolama

Banyolama, aşındırma işlemine geçmeden önceki son işlemdir. Polimer film banyolama ile birlikte çıkarılır. Banyo işleminden sonra, hazırlanan malzeme ultraviyole ışığa duyarlı değildir ve baskı odası alanının kontrollü ışık spektrumuna serbestçe çıkarılabilir. Banyolama işlemi sonrasında yüzeyde polimer film kalıntısı kalmaması gerekmektedir. Malzeme yüzeyinde bulunan küçük bir fotorezist parçası, aşınma kalitesini negatif yönde etkilemektedir. Bir kesim hattında bulunan en küçük fotorezist bile, bu bölgeye etki eden aşındırıcıyı engelleyebilmektedir. Eğer çift taraflı fotorezist söz konusu ise banyolamanın çift taraflı gerçekleşmesi zorunluluktur. Pozitif fototakım ile pozlanan bir filmin pozlanan alanları banyolama prosesinde çözünür hale gelir, pozlanmamış alanlar çözünmez kalır. Dolayısıyla, filmin "açığa çıkmış" kısmı "pozlanmamış" kısımdan daha yüksek bir çözünme oranına sahip olmaktadır. Bir foto takımın banyolama süresinin belirlenmesi için gerçek zamanlı bir ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Birden fazla kalınlıkta fototakım kullanılarak değerler belirlenir Şekil 2.6'da banyolama sonrası aşındırmaya hazır deney numunesi verilmiştir [8].

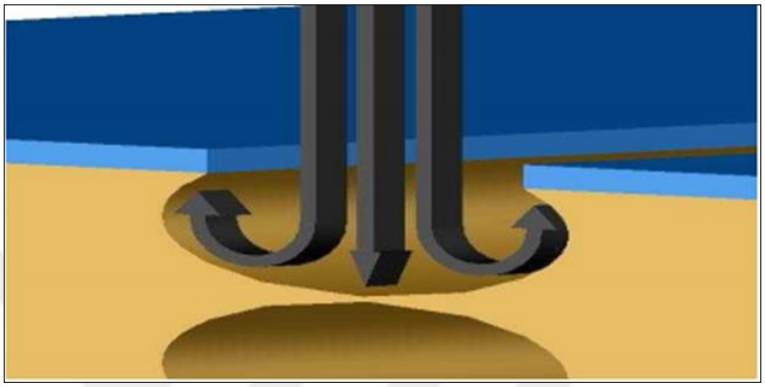


Şekil .6. Banyolama sonrası aşındırmaya hazır deney numunesi.

2.1.7. Aşındırma

Aşındırma (oyma), banyolama işlemi tamamlanan malzemeden ayrılan film tabakası sonrası işlenmesi istenen yüzeylerin kimyasal kullanılarak şekil verilme işlemidir. Bitmiş ürünü elde etmek için açıkta kalan metal yüzeyine kullanılan malzeme özelliğine göre değişiklik gösteren aşındırıcı kimyasal uygulanır. Fotokimyasal

işlemede, metal levhanın aşındırıcıya maruz kalan kısmı aşınırken, metalin fotorezist ile kaplanmış kısmı bozulmadan kalır ve böylece metal levha üzerinde istenilen son şekil elde edilir. Aşındırıcıdaki asit konsantrasyonu yüksekse, MRR iyileşir, ancak metal yüzeyin yüzey kalitesi düşer ve Uc'ye sebep olur [9]. Şekil 2.7'de aşındırma işlemine ait görsel verilmiştir [10].



Şekil .7. Aşındırma işlemi [10].

Aşındırma işleminde yaygın olarak kullanılan kimyasal aşındırıcılar Çizelge 2.2'te verilmiştir [11].

Çizelge .2. Farklı malzemeler için kullanılan aşındırma çözeltileri [11].

Bileşenler	Konsantrasyon	Uygulama şekli	Malzeme
Amonyak (NH_3) Hidrojen Peroksit (H_2O_2) (% 3) Saf Su	62.5 ml 125 ml 62.5 ml	Peroksit eklemeden önce Amonyak ve su karıştırın. Çubuk ile 5-45 saniye karıştırın ve yaklaşık 1 dk. boyunca bekletin veya püskürtün.	Bakır, bakır alaşımları ve bakır-gümüş alaşımları aşındırmak için.
Amonyum klorür (NH_4Cl) Hidroklorik asit (HCL) Demir III Klorür ($FeCl_3$) Saf Su	9 gram 150 ml 45 gram 75 ml	Daldırma için birkaç saniye önerilir.	300 serisi paslanmaz çelik ve Hastelloy süper alaşımları aşındırma için.

Çizelge 2.2. (devam ediyor).

Demir III Klorür ($FeCl_3$) Bakır Klorür ($CuCl_2$) Hidroklorik asit (HCL) Nitrik asit (HNO_3) Etanol (C_2H_5OH)	8.5 gram 2.4 gram 122 ml 6 ml 122 ml	Karışım hazırlandıktan sonra 20 ^oC daldırma ile uygulayın.	Dubleks ve 300 serisi paslanmaz çeliklerin aşındırılması için.
Bakır Klorür ($CuCl_2$) Hidroklorik asit (HCL) Etanol (C_2H_5OH)	5 gram 100 ml 100 ml	20 ^oC daldırma veya püskürtme.	Dubleks ve 400 serisi paslanmaz çelikler ve Nikel-Bakır (Ni-Cu) alaşımları ve süper alaşımları aşındırmak için.
Saf su Nitrik asit (HNO_3) Hidroklorik asit (HCL) Hidroflorik asit (HF)	190 ml 5 ml 3 ml 2 ml	10-30 saniye daldırma.	Alüminyum ve titanyum alaşımları aşındırma için mükemmeldir.
Sodyum tiyosülfat ($Na_2S_2O_3$) çözeltisi Potasyum metabisülfit ($K_2S_2O_5$)	250 ml Doymuş 5 gram	Birkaç saniye için dakikalar	Alfa-beta pirinç, bonze, kalay, dökme demir, çinko ve çelik (kırılgan malzemeler) aşındırma için.
Saf su Nitrik asit (HNO_3) Hidroflorik asit (HF)	92 ml 6 ml 2 ml	20 saniyeye kadar püskürtme	Titanyum ve alaşımlarını aşındırma için.
Nitrik asit (HNO_3) Etanol (C_2H_5OH)	100 ml 1-10 ml	Yaklaşık 1 dk. bekletilmeli	Demir, alaşım çelikleri ve dökme demir aşındırma için.
Bakır sülfat ($CuSO_4$) Hidroklorik asit (HCL) Saf su	10 gram 50 ml 50 ml	5-60 saniye boyunca batırın veya sürün.	Nikel (Ni), Nikel-Bakır (Ni-Cu) ve Nikel-Demir (Ni-Fe) alaşımları ve süper alaşımları aşındırmak için. Aktiviteyi artırmak için birkaç damla sülfürik asit (H_2SO_4) ekleyin.
Potasyum Ferrosiyanür $K_3Fe(CN)_6$ Potasyum Hidroksit (KOH) Saf su	10 gram 10 gram 100 ml	K3Fe (CN) eklemeden önce KOH ve su karıştırın	Krom (Cr) ve alaşımlar, demir ve çelikler, Mo ve alaşımlar, Nikel-Bakır (Ni-Cu) alaşımları 75 ^oC'de kullanılır; W (Tungusten) WC-Co (Tungusten Karpit Kobalt) aşındırma için.

Çizelge 2.2. (devam ediyor).

Etanol (C_2H_5OH) Pikrik asit ($C_6H_3N_3O_7$)	100 ml 2-4 gram	Yaklaşık 1 dk. bekletilerek aşındırıcının kristalleşmesini ya da kurumaya bırakın	Demir, manyetik alaşımlar, dökme demir, yüksek alaşımlı paslanmaz çelikler ve magnezyum aşındırma için de kullanılır.
Pikrik asit ($C_6H_3N_3O_7$) Hidroklorik asit (HCL) Etanol (C_2H_5OH)	1 gram 5 ml 100 ml	Yaklaşık 1 dk. bekletilmeli	Demir ve çelikte aşındırma için.

2.2. FOTOKİMYASAL İŞLEMEDE KULLANILAN İŞLEME PARAMETRELERİ

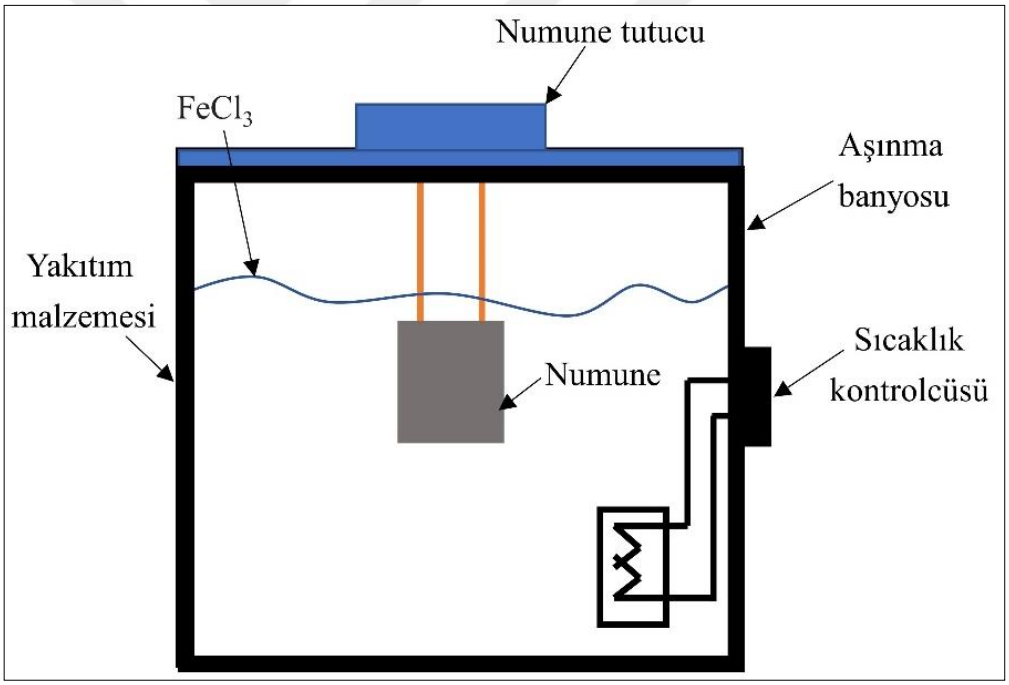
PCM işleme yönteminde işleme parametreleri her işleme yönteminde olduğu gibi önem arz etmektedir. PCM işleme yönteminde konsantrasyon, aşındırıcı sıcaklığı, pozlama süresi, kaplama kalınlığı, kullanılan aşındırıcı önemli işleme parametreleridir. Bu parametrelere kontrol veya girdi parametresi denir. Kontrol parametrelerinin etkisi sonucu çıkış parametreleri şekil almaktadır. PCM işleme yönteminde Ra, MRR, ED önemli çıkış parametreleridir.

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

PCM ile işleme üzerine yapılan literatür araştırması aşağıda özetlenmiştir

Saraf vd. (2011), PCM yöntemi ile oksijensiz yüksek iletken bakırın (OFHC- Oxygen-Free High Conductivity) işlemesi esnasında işleme parametrelerinin Uc miktarı ve Ra üzerine etkisini araştırmışlardır. Deney düzeneği ile ilgili şematik görsel Şekil 3.1'de gösterilmiştir [12].



Şekil .1. Aşındırma banyosu [12].

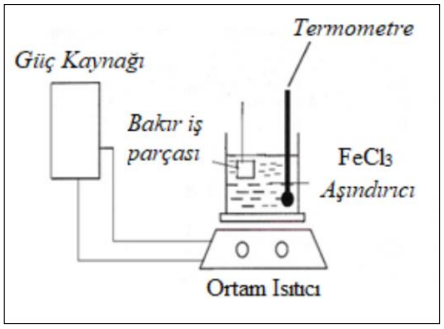
Araştırmacılar Şekil 3.1'de yer alan deney düzeneği ile Çizelge 3.1'de verilen işleme parametreleri ile deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge .1. Deney işlem parametreleri [12].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	600	700	800
	Sıcaklığı, ^{0}C	45	50	55
	Süre, dk	15	20	25
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Cu		

Saraf ve arkadaşları, yapmış oldukları deneysel çalışmalarında, başlangıçta Uc'nin düşük miktarda olduğunu, sürenin artması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Konsantrasyon miktarının ihmal edilebilir olduğunu, Uc miktarına etki eden parametreler arasında sürenin en baskın etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar bu durumu, işleme süresinin artışına bağlı olarak kimyasalın sıcaklığının artmasına bağlamışlardır. Uc'nin en az miktarda oluşması için optimum işleme parametrelerinin 45 °C sıcaklık, 600 g/l konsantrasyon ve 15 dk. aşındırma süresi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca PCM işlemi sorasında elde edilen yüzeyin pürüzlülüğü üzerinde, aşındırma süresinin ve aşındırıcı konsantrasyonun önemli etkisi olduğunu, sıcaklığın ise dikkate değer bir etkiye sahip olmadığını tespit etmişlerdir [12].

Sadaiah ve Misal (2013) bakırın aşındırılma işlem parametrelerinin optimizasyonunda deney tasarımı yöntemi ile gri ilişkisel analiz yönteminin karşılaştırmasını yapmışlardır. Araştırmacılar, işlem parametrelerinin Uc ve MRR değerlerine etkisini incelemişlerdir. Şekil 3.2'de deneysel düzeneğine ait şematik görüntü verilmiştir [8].



Şekil .2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi [13].

Araştırmacıların deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları deney parametreleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir

Çizelge .2. Deney işlem parametreleri [13].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	600	700	800
	Sıcaklığı, ^{0}C	45	55	60
	Süre, dk	5	10	15
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Cu		

Sadaiah ve Misal yaptıkları çalışmaların sonunda her iki tekniği karşılaştırarak, ANOVA için optimum fotokimyasal işlem parametrelerini aşındırma sıcaklığını 47 °C, konsantrasyon 800 g/l ve işleme süresini 5 dk., gri ilişkisel yöntem için aşındırma sıcaklığını 47 °C ve konsantrasyonu 700 g/l ve işleme süresi 5dk. olarak tespit etmişlerdir [13].

Çakır vd. (2011), özellikle elektronik endüstrisinde yaygın kullanıma sahip bakırın (DIN EN 1652 standardına uygun %99.9 Cu içerikli) kimyasal işleme yöntemiyle işlenmesi isimli çalışmalarında, işleme derinliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün kimyasal aşındırıcı derişikliğine ve işleme sıcaklığına bağlı olarak değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar Çizelge 3.3'te verilen işleme parametreleri ile deneyleri gerçekleştirmişleridir [14].

Çizelge .3. Deney işlem parametreleri [14].

	Parametreler	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, Molar	2.04	2.33	2.65
	Sıcaklığı, ^{0}C	30	50	70
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$CuCl_2$		
	Deney Malzemesi	Cu		
	Süre, dk	20		

Çakır vd., işleme derinliğinin kullanılan kimyasal aşındırıcının derişik değeri ile değiştiğini, derişik değeri arttıkça işleme derinliği değerinin arttığı sonucunu elde etmişlerdir. Seçilen üç farklı kimyasal aşındırıcının derişik değeri içinde en yüksek işleme derinliği 2.65 Mol değerinde elde edilmiştir. İşleme derinliğini etkileyen diğer faktörün kimyasal işleme sıcaklığı olduğunu ve işleme sıcaklığı arttıkça işleme derinliği değerinin de arttığını belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün hem kimyasal aşındırıcının derişik değeri ile hem de işleme sıcaklığı ile değiştiğini, genel olarak düşük işleme sıcaklık değerinin seçilmesinin daha uygun olacağını tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerini yaklaşık olarak 0.5-2 μm aralığında elde etmişlerdir [14].

Çakır (2008), mühendislik malzemelerinin fotokimyasal ile işlenmesi adlı çalışmasında, malzemelerin aşındırılmasında ana etmenler olan aşındırıcılar, aşındırma sıcaklığı ve aşındırma parametrelerinin seçimi hakkında bilgi vermiştir. Aşındırıcının seçimi iş parçası malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Demir esaslı malzemeler için yaygın olarak $FeCl_3$ kullanıldığını, bakır ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları vb. için de aynı aşındırıcının kullanılabileceğini belirtmiştir. $CuCl_2$'nin ise çoğunlukla bakır ve alaşımları için kullanıldığını, Hidroflrük asidin (HF) çok tehlikeli olduğunu ve korozyon direnci yüksek alaşımlarda kullanıldığını belirlemiştir. Fotokimyasal işlemede aşındırma sıcaklığı için seçilen değer, $FeCl_3$ ve $CuCl_2$ yaklaşık 45-55 °C'dır. Fotokimyasal işleme deneylerinde; temizleme, şeklin iş parçasına işlenmesi, aşındırma ve durulama işlemleri içim çeşitli kimyasal konsantrasyonlar kullanılmaktadır. Kullanılan

kimyasalların tamamı çevre dostu değildir. Bu nedenle, fotokimyasal işleme yöntemi için kritik konu, kullanılan kimyasal maddelerin çevreye zarar vermelerini engelleyici çözümler bulmaktır. Ayrıca ilgili mevzuat gereği kimyasal aşındırıcıların tehlikeli etkileri nedeniyle kanalizasyon sistemine atılmasına izin verilmemekte olduğunu ifade etmişlerdir [15].

Mumbare ve Gujar (2016), ASME 316 çelik için fotokimyasal işlemenin çok amaçlı optimizasyonu isimli çalışmalarında, ASME 316 çelik için GRA yöntemini kullanarak fotokimyasal işlemenin çoklu optimizasyonunu yapmışlardır. Araştırmacılar Çizelge 3.4'te verilen işleme parametreleri ile deneyleri gerçekleştirmişleridir.

Çizelge .4. Deney işlem parametreleri [16].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	500	600	700	800
	Sıcaklığı, ^{0}C	40	45	50	55
	Süre, dk	15	20	25	30
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$			
	Deney Malzemesi	ASME316			
	Banyo Süresi, sn	90			
	Pozlama Süresi, sn	15			

Çalışmalarında işleme parametresi olarak kullanılan aşındırıcı konsantrasyonu, aşındırma sıcaklığı ve aşındırma süresinin MRR ve Ra'ya olan etkileri GRA tekniği kullanılarak analiz edilmiş ve optimal koşulları değerlendirmişlerdir. Maksimum malzeme kaldırma hızı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 55 °C aşındırma sıcaklığı, 800 g/l aşındırma konsantrasyonu ve 15 dk. aşındırma süresinde tespit edilmiştir. Elde edilen optimum malzeme uzaklaştırma hızının 0.340 mm^3/dk. ve ortalama yüzey kalitesinin 0.58 μm olduğunu belirlemişlerdir. Aşınma süresinin ve etken madde konsantrasyonunun optimum malzeme uzaklaştırma hızı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için en önemli etken olduğunu belirlemişlerdir [16].

Wagh ve Dolas (2015), tepki yüzey metodolojisini kullanarak Inconel 600 malzemenin fotokimyasal yöntemle işlemesinin deneysel olarak incelenmesi adlı çalışmalarında, Inconel 600 malzemenin fotokimyasal işlenmesinde tepki yüzeyi metodolojisini kullanarak süreç parametrelerinin işlem üzerindeki etkilerinin matematiksel modellemesini yapmışlardır. Çizelge 3.5'te verilen işleme parametreleri ile deneyleri gerçekleştirmişleridir [17].

Çizelge .5. Deney işlem parametreleri [17].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	300	500	700
	Sıcaklığı, ^{0}C	55	60	65
	Süre, dk	30	50	70
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Inconel600		

Araştırmacılar, Inconel 600 malzemenin işlenmesi sırasında $FeCl_3$ konsantrasyonu kullanarak, aşındırma sıcaklığını 55.2760 °C, aşındırma konsantrasyonunu 470.781 mg/l ve minimum aşınma süresini 55.276 dk., optimum malzeme aşınma değerini ise 0.0029 mm bulmuşlardır [17].

Çakır vd. (2011), kimyasal işleme adlı çalışmalarında, kimyasal işleme prosesinin endüstriyel uygulamaları, aşındırıcıların kimyasal etkenleri, işlenmiş materyallerin detayları ve kimyasal işlemenin avantaj ve dezavantajları hakkında bilgi vermişlerdir. Araştırmacılar kimyasal işleme işleminin, endüstriyel uygulamaları, kullanılan kimyasalın etkileri ve işlenmiş malzemelerden bahsettikleri bu çalışmada, istenen geometriyi üretmek için işlemin dikkatli bir şekilde yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kimyasal işlemede kullanılan kimyasalın çevre etkilerinden ve öneminden bahsetmişlerdir [18].

Çakır vd. (2011), X5CrNi18-8 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi isimli çalışmalarında X5CrNi18-8 paslanmaz çeliğin işlenmesini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacıların yaptıkları çalışmaya ait deney parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir [19].

Çizelge .6. Deney işlem parametreleri [18].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, Molar	1.90	2.33	2.783
	Sıcaklığı, °Bé	28	32	36
	Yoğunluk	1.240	1.292	1.33
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	X5CrNi18-8		
	Süre, dk	15		

Çakır vd., X5CrNi18-8 paslanmaz çeliğin $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı ile kimyasal işlenmesi sonucunda elde etmiş oldukları sonuçları; kimyasal aşındırıcının 32-36 °Bé yoğunluklarında olmasının uygun olacağı, bu yoğunluk değerlerinde, paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde en yüksek işleme derinliğinin elde edilebileceği şeklinde açıklamışlardır. Sıcaklığın etkisinin önemli olduğunu, düşük aşındırma sıcaklıklarında (30 °C) işleme derinliğinin her üç kimyasal aşındırma yoğunluğunda da az olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte yüksek aşındırma sıcaklıklarının seçilmesi durumunda işleme derinliğinin arttığını ve 70 °C aşındırma sıcaklığında en büyük işleme derinliğinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü açısından deneysel sonuçlarını incelediklerinde ise genel olarak 32 °Bé kimyasal aşındırıcı yoğunluğunda en iyi değerlerin elde edildiğini belirlemişledir. Düşük kimyasal yoğunluk ve düşük aşındırma sıcaklığı değerlerinin seçilmesi durumunda ise yüzey kalitesinin bozulduğunu ve yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığını belirlemişledir. Aşındırma sıcaklığının yüzey kalitesi üzerindeki etkisini de incelediklerinde genel olarak aşındırma sıcaklığının artması ile birlikte yüzey kalitesinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [19].

Misal ve Sadaiah (2013), fotokimyasal işlemede Inconel 718' in yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi isimli çalışmalarında, Inconel 718 malzemesinin fotokimyasal işleme için gerekli en iyi işleme parametrelerini ve bu parametrelerin yüzey topolojisi üzerindeki etkilerini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Çizelge 3.7'de verilen işleme parametreleri ile deneyleri gerçekleştirmişleridir [20].

Çizelge .7. Deney işlem parametreleri [20].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	500	550	600
	Sıcaklığı, ^{0}C	45	50	55
	Süre, sn	20	30	40
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Inconel718		

Misal ve Sadaiah, ölçümleri değerlendirdiklerinde 55 °C'de, 600 g/l konsantrasyon için en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini 0.201 µm olarak tespit etmişlerdir. 45 °C sıcaklıkta 500 g/l konsantrasyon için, ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0.56 µm'dir. 500 g/l konsantrasyon için ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.44 µm, 600 g/l konsantrasyon için ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.31 µm olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde Misal ve Sadaiah, Inconel 718'in işlenmesi için fotokimyasal işlemenin uygun bir işleme yöntemi olduğunu, yüksek sıcaklığın daha iyi yüzey elde etmek için önemli olduğunu, yüksek konsantrasyonlarda daha iyi yüzeyler elde edilebildiğini, en iyi işlemenin 55 °C sıcaklık, 600 g/l aşındırıcı konsantrasyonu ve 40 dk. işleme süresinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sıcaklık ve konsantrasyona kıyasla işleme süresinin yüzey pürüzlülüğünde daha az öneme sahip olduğu sonucuna varmışlardır [20].

Chemcut (2015) adlı şirketin yapmış olduğu çalışmada titanyumun, HF ve NHO_3 ile işlenmesi araştırılmıştır. Şirket yapmış olduğu çalışmalarında 0.508 mm ve 0.889 mm kalınlıkta titanyum kullanmıştır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde NHO_3

konsantrasyonu arttıkça aşındırma oranın arttığı belirtilmiştir. Aşındırma oranı artışı yüzdesi, %10 NHO_3 seviyesine ulaştıktan sonra düşmeye başladığını belirtmiştir. Aşındırma işleminden sonra parçalar ölçülmüş, kimyasal konsantrasyonlar arttıkça ölçümlerin daha fazla tutarsızlık gösterdiğini saptamışlardır. Çalışmada, NHO_3 konsantrasyonu arttıkça aşındırma hızının arttığını ve yüzeye nüfuz etme hızının daha düzensiz ve kontrol edilemez hale geldiği ifade edilmiştir [21].

Allen vd. (2004), fotokimyasal işlemenin maliyeti adlı çalışmalarında fotokimyasal işleme sürecinde yer alan maliyetleri tanımlayarak, ideal fotokimyasal işleme maliyet modeli elde etmeyi hedeflemişlerdir. Allen vd., geliştirmiş oldukları maliyet modelinin, sistematik olarak düzenlenmiş matematiksel ilişkilerinin bir kümesi olduğunu belirtip, miktarlar ve fiyatları kullanarak bu denklemlerin girdileri ile maliyet tahminlerini çıkarmışlardır [1].

Sadaiah vd. (2012), fosforlu bronz numunesinin fotokimyasal işlemesine yönelik yaptıkları çalışmalarında, işleme parametreleri olarak aşındırıcı konsantrasyonu, aşındırma sıcaklığı ve aşınma süresinin Uc üzerinde etkisini araştırmışlardır. Araştırmacıların deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları deney parametreleri Çizelge 3.8'de deney parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge .8. Deney işlem parametreleri [22].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	600	700	800
	Sıcaklığı, ^0C	40	50	60
	Süre, sn	15	25	35
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Fosfor Bronz		

Araştırmacılar, aşındırma süresinin ve aşındırıcının sıcaklığının, seçilen parametreler arasındaki Uc değişkenliği üzerindeki etkisinin fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

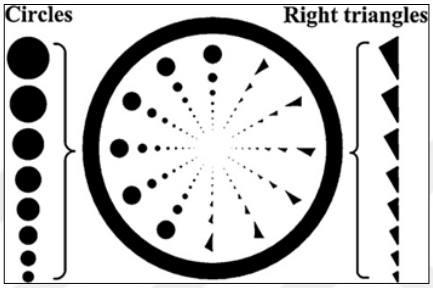
Bununla birlikte, konsantrasyonun zayıflamasının Uc üzerinde daha az etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Uc miktarı için işleme süresi ve sıcaklığın etkisinin en önemli parametreleri olduğunu belirtmişlerdir. Minimum Uc miktarının 40°C'lik bir sıcaklıkta, 600 g/l konsantrasyonda ve 15 dk. aşındırma süresinde elde edildiği sonuçlarına ulaşmışlardır [22].

Allen ve Almond (2004), endüstriyel fotokimyasal işleme için kullanılan $FeCl_3$ aşındırıcılarının karakterizasyonu adlı çalışmalarında, kullanım sonrası endüstriyel aşındırıcıların analizlerini yaparak kimyasalın özgül ağırlığının, sıcaklığının, HCl içeriğinin, oksidasyon indirgeme potansiyelinin ve çözünmüş metal içeriğinin parça ölçüsü ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırarak standartlarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Allen ve Almond, aşındırma işleminde kullanılan aşındırıcı kimyasalın kalitesini değerlendirmek için satın alma işlemi yapılan firmadan gelen kimyasalın kullanılmadan önce ölçümlerinin yapılmasının, içerikte bulunan özgül ağırlığının, sıcaklığının, HCl içeriğinin, oksidasyon indirgeme potansiyelinin ve çözünmüş metal içeriğinin takibinin önemini vurgulamışlardır. Aşındırıcının kullanım sonrası da takibinin çok önemli olduğunu ve gün, hafta, ay, yıl olarak sürekli kontrolünün sağlanması gerektiğini, sabit aşındırma oranını muhafaza etmek ve dolayısıyla, aşındırma süresine bağlı olarak parça boyutlarının kontrolünü sağlamak için aşındırma işleminde kullanılan aşındırıcı bileşenlerinin sabit tutulması gerektiği sonucuna varmışlardır [23].

Allen ve Ler (1995), $FeCl_3$ çevre üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları araştırmalarda, atık kimyasalların bir kısmı (%18) toprağa gömülmektedir fakat sıvı halde iken ağır metal iyonlarının yeraltı suyuna karışma riski oldukça fazla olduğunu dolayısıyla bu tür sızıntıların olmaması için katılaştırma yapılarak toprağa gömüldüğünü belirtmişlerdir. Araştırmacılar, fotokimyasal şirketlerinin yarısından fazlasının yenileme kullanmakta olduğunu fakat yenilemenin yapılmamasını yenileme sistemleri ile ilgili temel bilgi birikimi ve teknik bilgi eksikliğine bağlamışlardır. Eğer ilgili şirketlere teknik eğitim verilirse, yenileme kullanan şirketlerin oranının artabileceği, şirketlerin çoğunluğunun, maliyetlerin yüksek olmasına rağmen, daha çevre dostu bir yenileme sistemi kullanacağı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, $FeCl_3$

kullanan firmalardan yenileme işlemi yapan firmaların 135 kat daha az aşındırıcı kullandığını tespit etmişlerdir [24].

Zhang ve Meng (2012), karbon çelik yüzeyler üzerinde mikro aşındırmanın fotokimyasal işleme yöntemi ile işlenmesini araştırmışlardır. Maske kaplama hızı, pozlama süresi, banyo süresinin kaplama folyo üzerindeki etkilerini araştırarak optimum işleme parametrelerini elde etmişlerdir. Deneylerde AISI 1020 çeliğini mikro aşındırma için kullanmışlardır. İşlenen film diyagramı Şekil 3.3'te verilmiştir [25].



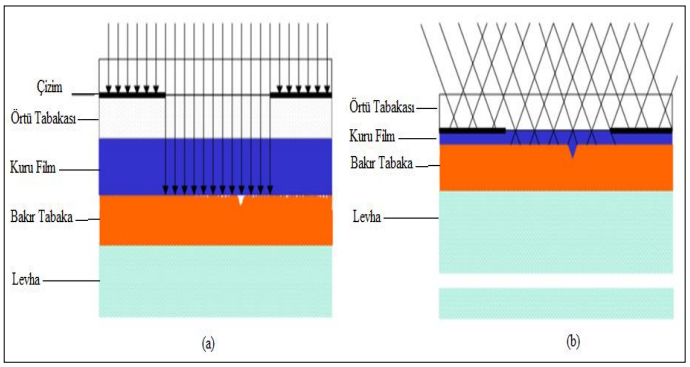
Şekil .3. Film şematik diyagramı [25].

Kaplama film kalınlığının esas olarak aşındırma hızı ile belirlendiğini, pozlama ve aşındırma süresinin kaplama üzerindeki şekillerin hassasiyetine etki ettiği, dönüş hızının, pozlama süresinin ve aşındırma süresinin optimum parametrelerinin sırasıyla 4000 dev./dk., 12 sn. ve 10 sn. olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Ayrıca araştırmacılar daire ve dik üçgen aşınmalarının derinlikleri 20 μm'dan az olduğu sürece ölçülen değerlerle uyumlu olduğu, daire ve dik üçgen aşınmasında sorun yaşanmadığı, diğer geometrik şekillerde, dikdörtgen, çokgen vb. diğer desenlerdeki aşındırmalarda da uygulanabileceği sonucuna varmışlardır [25].

Allen (2005), imalatı gizli tutulan yıllık 6 milyar dolarlık üretim süreci isimli çalışmasında fotokimyasal işleme endüstrisinin araştırılması gereken yönlerini ve ekonomik yönlerini incelemiştir. Yapılan araştırmada 2000 yılında 31 PCM şirketi tarafından en sık kullanılan metallerin, paslanmaz çelikler (%94), bakır ve alaşımları (özellikle pirinç) (% 84), nikel ve demir alaşımları (% 66), alüminyum ve alaşımları (% 55), hafif, karbon ve silikon çelikler (% 52), molibden (% 32) olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacı, Fotokimyasal Frezeleme Enstitüsüne (PCMI) üye şirketleri

için 1996–1999 yılları arasındaki satış rakamlarının 132 şirket için 778.2 milyon dolar olduğunu belirtmiştir. Satış rakamlarından yola çıkılarak dünya çapında yaklaşık 200 şirket olduğu, toplam satış rakamlarının dünya çapında yıllık 1.179 milyar dolar olduğu hesaplanmıştır. Araştırmacı sonuçları değerlendirdiğinde; 20. yüzyılın sonunda PCM satışlarının yaklaşık 5.8 milyar dolar olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, üretim sisteminin gelişimi arttıkça, ürünlerde daha egzotik materyallerin kullanılmasına yönelik bir eğilim tespit etmiştir. Bu malzemelerin çoğunlukla korozyona dirençli, genellikle pahalı maliyeti olan ve dolayısıyla kabul edilebilir bir metal çözünme oranına ulaşmak için hibrid fotokimyasal işleme sürecine ihtiyaç duymakta olduğunu öngörmüştür [3].

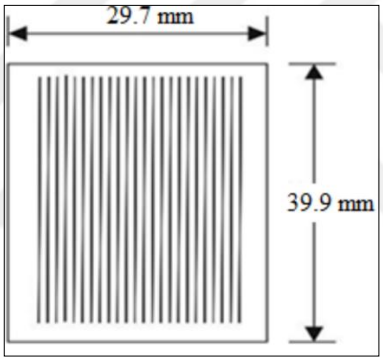
Meier ve Gantner (1997), kimyasal işlemede sıvı kaplama malzemesi adlı çalışmasında işlevsel veya dekoratif metal parçaların üretiminde kullanılan sıvı kaplama malzemelerini ele almıştır. Çalışmalarında farklı kaplama tiplerinin kimyasal niteliği, bu özel uygulama için sağladıkları faydalar açısından uygulama yöntemlerine genel bir bakış sunulmaktadır (Şekil 3.4). Araştırmacılar, kullanılan tüm kaplamaların çözelti olduğu ve direnç türüne, uygulama yöntemine bağlı olarak, formülasyonlarının %50–80 çözücüler içermekte olduğu, sıvı bir kaplamanın viskozitesinin oldukça düşük olduğu bunun da 100–1000 MPa değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaplamaların yapışmasının, kaplamanın kimyasal niteliği ve alt tabakanın belirli bir yüzeyi ile olan etkileşiminden kuvvetle etkilendiğini ve farklı metallerde bunun farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir. Genel olarak, sıvı kaplamaların kuru film kaplamadan daha üstün bir yapışma sergilediğini, çünkü başlangıçta kendiliğinden iyi bir yüzey ıslatma özelliğine sahip olduklarını belirtmektedirler [26].



Şekil .4. a) Kuru film pozlama, b) Sıvı film pozlama [26].

Araştırmacılar, kaplamanın ışına maruz bırakılma sırasında ise pozlanan alanlar ile pozlanmayan alanlar arasındaki kontrastın, kuru bir filmden çok daha iyi olduğunu, bunun da sıvıya karşı dirençli bir kaplamadan daha kalın olduğunu belirtmişleridir. Şekil 3.4-a ve Şekil 3.4-b'de kuru film pozlama ile sıvı film pozlamaya ait görseller verilmiştir. Sonuç olarak araştırmacılar sektörde yeni teknikler ve teknolojilerin sürekli tanıtıldığını, PCM uygulamaları için zengin görüntüleme imkânı oluştuğunu belirtmişlerdir [26].

Sadaiah vd. (2012), Monel 400 malzemenin kimyasal işlenmesi adlı çalışmalarında 100 µm genişliğinde mikro kanal üzerinde aşındırma koşullarının etkisini araştırmışlardır. Deneylerde kullanılan model çizimi Şekil 3.5'te verilmiştir [27].



Şekil .5. Deneysel model şekli [27].

Çalışmalarda Şekil 3.5'te gösterildiği gibi 100 µm genişliğinde kanallardan oluşan şablon kullanılmıştır. Çizelge 3.9'da deney parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge .9. Deney işlem parametreleri [27].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**	**Seviye-4**	**Seviye-5**	**Seviye-6**	**Seviye-7**
Değişken Parametreler	Pozlama Süresi, sn	30	60	90	120	150	180	210
	Sıcaklığı, ^{0}C	50	70					
	Konsantrasyon, g/l	450	650					
Sabit Paramet	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$+ %30 HNO_3						

	Deney Malzemesi	Monel 400						

Araştırmacılar deney çıktılarını değerlendirdiklerinde sonuç olarak döndürmeli kaplama süresinin, kaplama film kalınlığını etkilediğini, süre arttıkça kaplama kalınlığının azaldığını tespit etmişlerdir. Daha düşük kalınlık nedeniyle, aşındırma sırasında kaplamanın soyulduğunu, döndürmeli kaplama işleminin 30. saniyesinde kaplama kalınlığının 16.01 µm olduğunu ve 70 saniye boyunca 12.89 µm'a kadar düştüğünü belirlemişlerdir. 120 sn.'lik ve 99.72 µm'luk görüntü genişliğinin açığa çıkması için kaplama mukavemetinin 20 N olduğu gözlenmiştir. Işığın saçılma ve kırınım etkisi nedeniyle, pozlama süresi arttıkça modelin genişliğinin başlangıçta azaldığını tespit etmişlerdir. 120 sn. pozlama süresinde 100 µm çizgi genişliği elde etmişlerdir. Konsantrasyon ve işleme süresindeki artışın aşınmayı kolaylaştırdığını, işleme süresi ve konsantrasyondaki artışın, aşındırma derinliğini ve alt aşınmayı arttırdığını belirlemişlerdir. Sıcaklık, aşındırma miktarı ve alt aşınmayı arttıran ana parametredir. 500 °C'de, 16.5 µm'luk alt aşınma ve 11.94 µm'luk aşınma derinliği gözlemlenmiş, 700 °C'de, 149 µm aşınma miktarı ve 98 µm alt aşınma gözlemlenmiştir [27].

Nakahara vd. (2008), nano kristal nikelin kimyasal işlemesi adlı çalışmalarında, $FeCl_3$ ile işleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle kaybını araştırmışlardır. Nano kristal nikel numunelerini kimyasal olarak işlemek için 25 °C ile 55 °C arasında değişen sıcaklıklarda $FeCl_3$ çözeltileri kullanmışlardır. Nakahara vd., $FeCl_3$ konsantrasyonunun oda sıcaklığında işleme hızını (r), kütle kaybının eğimini hesaplayarak elde etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, ilk kez nano kristal elektrotların kimyasal işlemesini araştırmışlardır. Bu yöntem sadece düşük sıcaklıkta bir işleme operasyonu sağlamakla kalmadığını, aynı zamanda nano kristalin materyaller, daha yüksek aşındırma hızları ve lokal paslanma dirençlerinden dolayı geleneksel polikristaline göre kimyasal işleme için daha uygun olabileceğini ifade etmektedirler. Her bir işleme koşulları için beş numune test edilmiştir. Kesin toplam kütle kaybı (~%5 ve ~%50) sonrasında işlenmiş numunelerin görünümü yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile bakılmıştır. Araştırmacılar, kimyasal işlemede, nano kristal Ni'in umut verici bir yöntem olacağını, aynı işleme

koşullarında geleneksel polikristaline Ni'e kıyasla nano kristal Ni'nin altı kat daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. [28].

Allen ve Jefferies (2006), fotokimyasal işlemede kullanılan $FeCl_3$ aşındırıcı için ekonomik, çevre dostu oksijen-hidroklorik asit rejenerasyon sistemi adlı çalışmalarında ticari bir aşındırma hattına düşük maliyetli, çevre dostu oksijen bazlı rejenerasyon sistemini teknik ve ekonomik açıdan araştırmışlardır. Alternatif rejenerasyon tekniklerinden daha ucuz olmakla birlikte, demir tozlarının çökelmesini önlemek için, aşındırıcı parametrelerin izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu deneylerde, rejenerasyon sonuçlarının takibinde ve izlenmesinde bir yıldan fazla süreye ihtiyaç duyulduğundan sadece oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP) ve Ph ölçümünü dikkate almışlardır. Araştırmalar süresince, bazı 85Mb veri toplanmış ve analiz edilmiştir. ORP ve pH'ın en az 26 haftalık bir süre boyunca sabit bir seviyede kaldığını ve kontrol edilecek en önemli parametrenin, aşındırıcının pH'ı olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sadece rejenerasyon kabiliyetini etkilemekle kalmadığını, aynı zamanda aşınmış ürünün yüzeyini de etkilediğini belirtmişlerdir [29].

Sadaiah vd. (2016), fotokimyasal işlemenin matematiksel modellemesi ve optimizasyonu adlı çalışmalarında fotokimyasal işleme tekniği için proses parametrelerinin modellenmesini ve optimizasyonunu ele almışlardır. Sadaiah vd., SS316L'nin işlenmesinde değişken olarak, aşındırıcı sıcaklığını, işlem süresini ve aşındırıcı konsantrasyonunu belirlemişlerdir. En önemli çıkış parametrelerinden biri olan Uc'yi farklı parametre ayarlarına göre değerlendirmişlerdir. Aşındırma deneylerinde kullanılmış oldukları deney parametreleri Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge .10. Deney işlem parametreleri [30].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	600	700	800
	Sıcaklığı, ^0C	40	50	60
	Süre, sn	80	160	240
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	SS316L		

Araştırmacılar deney sonuçlarını değerlendirdiklerinde, Uc için işleme süresi ve sıcaklığın en önemli parametreler olduğunu aynı zamanda konsantrasyon, işleme süresi ve sıcaklığının daha düşük bir seviyede ayarlanmasının da daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Aşınma için optimum aşınma performansının 600 g/l konsantrasyonda ve 80 dk. aşındırma süresinde belirlenmişlerdir. Faktörler arasındaki etkileşim olduğu ve bir faktörün etkisinin başka bir faktöre bağlı olduğunu belirlemişlerdir [30].

Yadav vd. (2016), fotokimyasal işlemede SS304 için alt aşınma analizi adlı çalışmalarında SS304 paslanmaz çelik malzemenin fotokimyasal işleme yöntemi kullanılarak işlenmesini incelemişlerdir. Araştırmacılar, deneylerinde aşındırıcı konsantrasyonu, sıcaklığı ve aşınma süresinin alt aşınma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney parametrelerine ait bilgiler Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

Çizelge .11. Deney işlem parametreleri [31].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	650	750	850
	Sıcaklığı, ^{0}C	45	55	65
	Süre, sn	90	150	220
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	SS304		

Deneysel verileri değerlendirildiğinde sıcaklık arttıkça Uc miktarının da arttığını gözlemlemişlerdir. Uc için optimum aşındırma parametreleri 45 °C'lik bir sıcaklıkta, 650 g/l'lik bir konsantrasyonda ve 90 dk. aşındırma süresinde gözlenmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, aşındırma süresi, sıcaklığı ve aşındırıcı konsantrasyonun Uc miktarı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [31].

Combe vd. (2013), kuru film kaplama ile döndürerek kaplama yönteminin karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarında, her bir yaklaşım için

süreç akışlarını, süreç geliştirme zorluklarını, kapasite ve maliyet karşılaştırmasını ele almışlardır. 100 μm'luk film kalınlıklarını kaplarken, tek kat kaplama işleminde elde edilmesinin çok zor olduğunu belirtmişlerdir. Döndürme ile kaplama yaklaşımının bunda başarılı olduğunu, fakat kuru filmi incelemek için yeterli farklı gerekçeler olduğunu belirtmişlerdir. Bunlar verimlilik (uzun kaplama, fırınlamanın ortadan kalkması ve daha hızlı fotoğraflama), film kalınlığı kontrolü ve maliyet azaltma potansiyeli şeklinde sıralanabilir. Çizelge 3.12'de verilen film kaplama süreçleri maliyeti incelendiğinde, en büyük maliyetin film kaplama ve aşındırıcı kimyasal tüketiminin yanı sıra, silikon devre levha işleme ile ilgili doğrudan işçilik maliyetleri olduğunu belirtmişlerdir [32].

Çizelge .12. Maliyet çizelgesi [32].

Döndürerek Kaplama			**Kuru Film Kaplama**		
	İşçilik*Saat	**Malzeme/$**		**İşçilik*Saat**	**Malzeme/$**
Kaplama-1	0.08x20=1.6	6.4	Film kaplama	0.08x20=1.6	1.4
EBR	0.08x20=1.6	0.6			
Kaplama-2	0.08x20=1.6	6.4			
Fırınlama	1.6x2=3.2		Fırınlama	1.6x1=1.6	
UV	0.08x20=1.6		UV	0.08x20=1.6	
Aşındırma	0.08x20=1.6	0.3	Aşındırma	0.08x20=1.6	0.1
PDB	0.08x20=1.6		PDB	0.08x20=1.6	
Toplam	12.8$	13.7$		8.0$	1.5$
Gene Toplam	26.5$			9.5$	

Baskı devre kartı işlem adımlarının sayısının artması nedeniyle doğrudan işçilikte daha yüksek bir maliyete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Daha belirgin olarak, bu spesifik örnekte bulunan materyallerin maliyeti, kuru film lamine edilmiş direnç yaklaşımında baskılı devre kartı maliyetini önemli ölçüde azaltma potansiyeli göstermekte olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar işlemenin basitliği, potansiyel maliyetleri düşürmesi ve dayanıklılığı bu uygulamanın gelişime açık olduğunu belirtmişlerdir [32].

Kanikella (2007) tarafından yapılan banyolama prosesi ve kuru film uygulamaları isimli çalışmada kuru film kaplamanın UV uygulanarak resim aktarımı, yan duvar profili ve dikey yan duvarlar elde etmek için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yan duvar dikliğinin yakalanmasında UV ışınına maruz bırakma prosesinin çok önemli olduğu belirtilmiştir. Deneylerinde 100 mm tek taraflı kaplanmış üç ayrı tabaka kullanmıştır. Birinci tabaka asetonla üç dakika temizlendikten sonra 30 saniye hava ile kurutulmuştur. İkinci tabaka ise etanolde üç dakika temizlendikten sonra 30 saniye hava ile kurutulmuştur ve üçüncü tabaka saf suyla üç dakika durulandıktan sonra 90 saniye kurutulmuştur. Tabaka, beş dakika boyunca 200 ° C'de bir dehidrasyon fırında geçirilmiştir. Tabakalara kuru film uygulandıktan sonra daha iyi yapışma sağlamak için 100 ° C'de 15 dk. fırında tutulmuştur. Kesilecek yüze aktarımını sağlamak için 60 MJ/cm^2 yoğunluğunda UV ışınına 60 sn. maruz bırakılmıştır. UV sonrası kesim hattının belirlenmesinde çok düz kuru film yan yüzey elde etmek için 90 ° C'de 30 dk. bekletmiştir. Araştırmanın değerlendirilmesinde UV maruz kalma faktörünün önemli olduğunu belirtilmiştir. Araştırmacı, yan duvar dikliğini iyileştirmede diğer faktörlerinin de anlamlı olduğunu belirtmiştir. Yaptığı çalışmada yan duvar açılarının 64 ± 5 ° ila 86 ± 5 ° arasında olduğunu belirlemiştir. Yan duvar eğiminin, UV maruz kalma enerjisinde bir azalma ile arttığını belirlemiştir [33].

Allen ve Almond (2010), havacılık ve biyomedikal mikro mühendislik uygulamalarında magnezyum için yeni bir fotokimyasal işleme süreci adlı çalışmalarında, fotokimyasal işleme prosesi kullanılarak metal kalınlıklarının metal tel genişlikleri ile delikli (telkâri) magnezyum mikro parçaların imalatında uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Deney parametrelerine ait bilgiler Çizelge 3.13'de gösterilmiştir [34].

Çizelge .13. Deney işlem parametreleri [34].

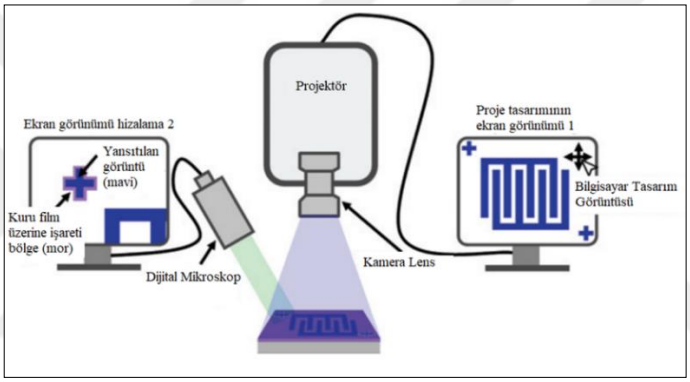
	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**
Değişken Parametreler	Sıcaklığı, 0C	25	45
	Malzeme Kalınlığı	0.8	1
Sabit Parametre	Kimyasal Aşındırıcı	%10 HNO3	

	Konsantrasyon, g/l	700	
	Sıcaklığı, 0C	70	
	Deney Malzemesi	AZ31B	

Araştırmacılar yaptıkları çalışmada sıcaklık, konsantrasyon ve yoğunluğun ve iş parçası ve metal kalınlığı parametrelerinin kontrolünün magnezyumun fotokimyasal işlenmesinde önemli olduğunu tespit etmişlerdir. Magnezyumun reaktif doğası ve çözünmeden evrilen ısı nedeniyle, sıcaklık kontrolü ince ve eşit dağılımlı yüzey elde etmek için hayati öneme sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu deneysel çalışmada, PCM ile ince karmaşık çizgi genişlikleri ile bir 2D magnezyum bileşeninin imal edilmesi için fizibilite çalışması yapılmıştır. Daha ileri çalışmalarda, klinik çalışmaların gerçekleştirilmesi amacıyla bir 3D stendin geliştirilmesi için optimize edilmiş bir teknik uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Minyatür havacılık ve biyomedikal uygulamaları için delikli magnezyum bileşenlerinin imal edilebilirliğinin belirlenmesi için araştırmalar devam ettiğini belirtmişlerdir. 0.15 mm'den daha küçük çizgi genişliklerinin, daha ince metal numuneleri (<0.25 mm) kullanılarak yapılan çalışma ile elde edilebilir olduğunu, daha fazla araştırma yapılarak, daha çevre dostu bir aşındırma sürecinin uygulanabileceğini, çünkü yapılan deneysel çalışma sonucunda, HNO_3 üretildiği bol miktarda atık oluştuğunu belirtmişlerdir. Potansiyel aşındırıcının rejenerasyonunun ve atık aşındırıcının, magnezyumun geri kazanılmasında kullanımının araştırılmasının da imalat maliyetlerini azaltacağını tavsiye etmişlerdir [34].

Zhao ve arkadaşları (2009), kuru film fotorezistin de doğrudan projeksiyon (DP2) olarak adlandırılan 10 μm çözünürlükteki üç boyutlu çok katmanlı mikro akışkan yapıların temiz oda mikro fabrikasyonu için yeni bir hızlı prototip oluşturma sürecini çalışmışlardır. Ticari olarak temin edilebilen dijital projektör ve kuru film mikro akışkan yapı olarak kullanılırsa, doğrudan maske üretimi ve pozlama sistemi olarak işlev görmek üzere özelleştirilmiştir. Maskelemesiz katmanlar arasındaki çok katmanlı hizalamaların, 10 μm'dan daha az hassasiyete sahip bir yazılım hizalama tekniği kullanıldığında, mekanik hareket aşamasının kullanımını ortadan kaldırarak güvenilir bir şekilde elde edilebileceği üzerine çalışmışlardır, Araştırmacılar deneysel

çalışmalarında, Şekil 3.6'da gösterilen bilgisayar tarafından doğrudan kontrol edilen ve hem doğrudan maske üreteci hem de fotoğraf pozlama birimi olarak hizmet eden ticari olarak temin edilebilen bir projektörün projeksiyon, bir kamera lensi, bir dijital mikroskop ve iki bilgisayar ekranından oluştuğunu göstermektedirler. Projektörün içinde, her biri alttaki entegre dijital devrelerin kapasitif yükleri tarafından ayarlanan küçük bir yansıtıcı alüminyum yüzeyden oluşan çok sayıda dijital mikro ayna bulunmaktadır. Projektörden mikroskobik görüntüler görüntülemek için, projeksiyon lensinin yerine ayarlanabilir bir kamera merceği yerleştirilmiştir. Bu sistemde, dijital mikro aynaların cihaz çipinden gelen dijital bir görüntüyü 0.8x'den 2x'ye ayarlanabilir bir büyütme ile üretilebildiğini belirtmişlerdir [35].

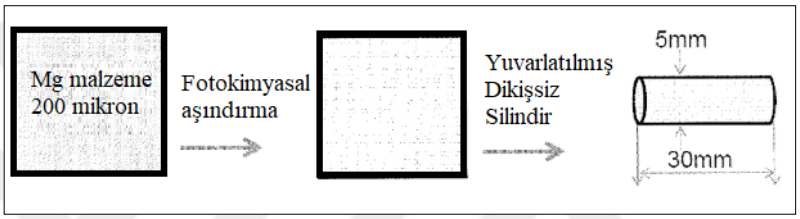


Şekil .6. Tasarlanan sistem çalışma prensibi [35].

Araştırmacıların yaptığı çalışmada, yeni bir güçlü mikro işlem sürecinde DP2 ayrıntılı olarak sunulmuştur. Özel bir DP2 sistemi ile, temassız pozlama modunda yüksek çözünürlükte 10 µm kolay işlenen bir kuru film hedeflemişlerdir. DP2 sürecindeki bu yeni kombinasyonların, hızla büyüyen tıp alanında yaygın olarak görülen temiz oda ve hızlı prototipleme uygulamaları için basit bir entegre üretim çözümüne yol açtığını belirtmişlerdir. Bu sistem ile karmaşık bir mikro akışkan çipin geliştirilmesinin bir saat içinde gerçekleştirilebildiğini tespit etmişlerdir [35].

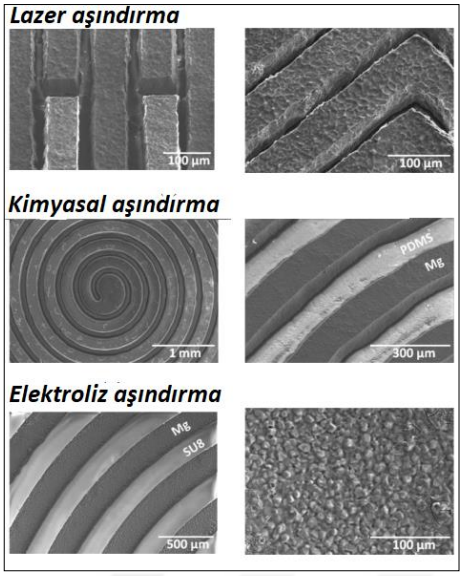
Shanov ve arkadaşları (2012), yaptıkları patent çalışmasında tıbbı implant uygulamaları için magnezyum biyobozunur stent yapılmasını çalışmışlardır. Araştırmacılar üreter, safra kanalları ve bronşlar gibi bölgelere ve arteriovenöz fistüllere yerleştirmek için magnezyum biyobozunur stentler üzerinde çalışmışlardır.

Araştırmacılar, yaptıkları bu çalışmada biyobozunur magnezyum stent yapmada kullanılan geleneksel yöntemleri devre dışı bırakacak bir üretim yöntemi hedeflemişlerdir. Araştırmacılar, özel düzenek yardımı ile yaklaşık 200 µm kalınlığında saf magnezyum ve magnezyum alaşımı AZ31'den yapılmış yaklaşık 250 mikrometre kalınlığında folyo kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Shanov ve arkadaşları, çalışmalarında uyguladıkları fotokimyasal işleme prosedürlerinden sonra elde edilen düz stent plakasının yan kenarlar boyunca ultrasonik nokta kaynağı ile birleştirilmesini sağlamışlardır. Elde edilen stent için patent almışlardır. Patenti alınan stentin üretim prosedürü şematik olaran Şekil 3.7'de verilmiştir [36].



Şekil .7. Patenti alınan stentin üretim prosedürü [36].

Tsang ve arkadaşları (2013), magnezyum için mikro fabrikasyon yöntemleri isimli çalışmalarında magnezyumun mikro fabrikasyonunda üç yaklaşımı incelemişlerdir. Araştırmacılar, lazer, kimyasal ve elektroliz çökelme teknikleriyle 70 µm kalınlığında % 99.9 saf magnezyum işlemişlerdir. Kesme işlemleri sonrası oluşan çapaklar sitrik asit ile işlem sonrası temizlenmiştir. Numuneler daha sonra 50 µm kalınlığında polidimetilsiloksan (PDMS) ile korozyona karşı kaplanmıştır. Magnezyumun kimyasal aşınmasında, deiyonize su içerisine 1:50 oranında HCl eklenerek aşındırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. İşlem sonrası kaplamayı yüzeyden uzaklaştırmak için aseton kullanmışlardır. Şekil 3.8'de her üç yöntemle işlenmesine ait görsel verilmektedir [37].



Şekil .8. Her üç yöntem için işlenme [37].

Bu çalışmada araştırılan üç yaklaşım arasından lazer ile işlemenin kimyasal aşındırmaya göre keskin kenar elde etmede avantajlı olduğunu, seyreltilmiş HCl ile kimyasal aşındırmanın pürüzsüz, eğimli yüzeyler elde etmede ve seri üretime uygun olduğunu belirtmişlerdir. Elektroliz ile işlemede lazer ile kesmenin aksine daha keskin ve pürüzsüz yüzey elde edildiğini belirlemişlerdir. Bunun dışında elektroliz yöntemi ile aşındırmanın düzlemsel olmayan mikro yapı elde edilmesinde önemli olduğunu, bu yaklaşımda yaygın olarak kullanılan negatif fotorezistin uygun olmadığını ve elektron kaplamanın oksijensiz nemsiz bir ortamda yapılması gerektiğini tespit etmişlerdir [37].

Demir ve arkadaşları (2013), biyobozunur stentlerin üretimi için AZ31'in fiber lazer kesimi ve kimyasal aşınması isimli çalışmalarında biyobozunur bir malzeme olan magnezyumun işlenmesini ele almışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarında, AZ31 magnezyum alaşımıyla üretilen biyobozunur stentlerin üretim aşamalarını çalışmışlardır. Çalışmalarında, lazer mikro kesme adımı için inert ve reaktif gazlarla kesme koşulları ve kimyasal aşındırma işleminin malzeme kalınlığına ve çapak giderilmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, stent üretimi için Q-anahtarlı bir fiber lazer ile mikro kesmeyi ve daha sonra yüzey temizleme, çapak giderme işlemleri için kimyasal aşınma yöntemlerini kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın ilk bölümünde lazer ile kesme ikinci bölümünde ise 10 ml HNO_3 ve 90 ml etanol ile kimyasal aşındırma işlemi uygulamışlardır. Aşındırma süresi olarak 5 ile 600

sn arasında değişken sürede aşındırma işlemini yapmışlardır. Araştırmacılar deneysel çalışma sonucunda lazerle işlenen bölgelerde oluşan termal gerilmeleri ve çapakları uzaklaştırmada iyi bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [38].

Agrawal ve Kamble (2017), Al/SiC kompozitlerinin fotokimyasal işleme için DoE ve GRA yöntemleri entegre edilerek yaptıkları çalışmalarında metal matrix kompozit (MMK), Al/Sic'in fotokimyasal işlenmesinde aşındırma zamanı, aşındırıcı sıcaklığı ve aşındırıcı konsantrasyonu parametrelerinin malzeme kaldırma oranı, alt aşınmaya ve aşındırma faktörü üzerindeki etkisini, entegre DoE ve GRA kullanarak incelemişlerdir. İşleme parametrelerinin performansına ilişkin matematiksel modeller formüle etmişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları çalışma sonucu optimum işleme parametresini, 60 °C aşındırıcı sıcaklığı, 700 mg/litre dağılma konsantrasyonu ve 12 dk. aşındırma süresi olarak gözlemiştir [39].

Al-Radha (2013), farklı aşındırıcıların titanyum diş implant yüzeyi üzerinde etkisi adlı çalışmasında, farklı asit çeşitlerinin, konsantrasyonlarının, sürelerinin ve sıcaklıklarının titanyum diş implant topografyasına etkisini araştırmıştır. Araştırmacı, saf parlatılmış titanyum diskleri çeşitli asitlere maruz bırakmıştır. Disk örnekleri, HCl sülfürik asit (H_2S0_4) ve HNO_3 çözeltileri kullanılarak ayrı ayrı 5, 15, 30, 45 ve 60 dk. aşındırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü profilometre kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey topografyası taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Araştırmacı, çeşitli asit konsantrasyonlarından sonra titanyum disklerin morfolojisi ve yüzey pürüzlülüğünün ve aşındırma sürelerinin farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, HNO_3 ile aşınmış yüzey tüm zaman aralıklarında en düşük Ra değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. H_2SO_4 asitli aşınmış yüzeylerin ilk 5 dk. sında en yüksek Ra değerine sahip olduğu, HC1 ile kazınan yüzeylerin, 30, 45 ve 60. dk. da sürelerinin ardından yüzeyde en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu tespit etmiştir [40].

Thorat ve arkadaşları (2016), kobalt-krom (Co-Cr) L605'in fotokimyasal ile işlenmesi üzerine yaptıkları çalışmalarında, biyo-tıbbi (stent, ortopedik implantlar ve diş protezleri) uygulamalarda çok kullanılan Co-Cr L605 alaşımı üzerinde çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, malzeme sertliği 250-275 HB olan 15x10x0.5mm boyutlarında iş parçası işlemişlerdir. Numuneyi, istenmeyen kirlenmeleri gidermek

için krom tozu ve saf su çözeltisi kullanarak ultrasonik temizleme makinesi ile temizlemişlerdir. Temizleme işlemini 30 °C'de 30 dk. boyunca uygulamışlardır. Daha sonra diğer işlem adımlarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında uyguladıkları deney parametreleri Çizelge 3.14'te verilmiştir. Deney sonrası yüzeyde kalan maskeleme malzemesin temizlemek için saf suda durulamışlardır [41].

Çizelge .14. Deney işlem parametreleri [41].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**	**Seviye-4**	**Seviye-5**
Değişken Parametreler	Aşındırma Süresi, sn	20	25	30	35	40
	Sıcaklığı, ^{0}C	40	45	50	55	
	Konsantrasyon, g/l	80	20	2		
	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$	CH_4O	HCl		
	Deney Malzemesi	Co-Cr L605				

Araştırmacılar aşındırma süresinin yüzey pürüzlülüğü ve aşındırma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit etmişlerdir. Daha uzun aşındırma süresinin yüzey pürüzlülüğünü ve aşındırma derinliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca aşındırıcı çözeltisindeki HCl reaksiyon hızını ve sonuçta korozyon oranını arttırdığını tespit etmişlerdir. En yüksek aşınma derinliğinin, 60 °C'de 30. dakika içinde 3.04 µm olduğunu tespit etmişlerdir. Zamanla aşınmanın kademeli ve doğrusal olarak arttığını, düşük alt aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve kabul edilebilir alt aşınma değeri verdiğini tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta fotorezistin dayanmadığını ve bunun alt aşınmada artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, Co-Cr L605 alaşımının aşınması için en uygun optimize edilmiş parametreleri tespit etmişlerdir. Optimum koşulun aşındırma işleminin 20. dakikasında ve 40 ° C'lik sıcaklıkta elde edildiğini, en iyi değerin 1.26 µm olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca en yüksek aşınmanın ise 40. dakikada ve 60 °C sıcaklıkta gerçekleştiğini belirlemişlerdir [41].

Raharja ve arkadaşları (2018), fotorezistin X-ışını ve UV ışına karşı duyarlılığını inceledikleri çalışmalarında, epoksi reçine bazlı fotorezist her iki pozlama ışınına göre duyarlılığını araştırmışlardır. Araştırmacılar, epoksi reçine bazlı fotorezistin 100 rpm

hızında manyetik ısıtıcılı karıştırıcı ve 75 °C sıcaklıkta ısıtılmış manyetik karıştırıcı kullanılarak reçine (polimer), sodyum asetat trihidrat ($NaC_2H_3O_2$) ve etanolün (C_2H_5OH) kütle varyasyonunda karıştırılmasıyla üretildiğini belirtmişlerdir. Araştırmada ekipmanlar arasında dijital terazi, manyetik ısıtıcılı karıştırıcı, termometre, beher cam, ölçme camı, süzme eleği, alt tabaka camı, döner kaplayıcı, fırın, viskozite ölçer, spektrometre, mikroskop, baskı devre kartı (PCB), alüminyum folyo, UV ışığı ve X-ışını makinesi, fotorezist, film banyosu, saf su, epoksi (polimer matrisi), $NaC_2H_3O_2$ (fotoaktif bileşik, PAC) ve C_2H_5OH (çözücü) kullanılmıştır. Araştırmacılar beş varyasyonunda epoksi reçine hazırlamışlardır. Diğer taraftan, NaC_2H_3O miktarını Çizelge 3.15'te gösterildiği gibi sabitlemişlerdir. Her bir çözelti için C_2H_5OH kütlesi, bağımsız değişken olarak seçilmiştir ve karakterize edilen malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır [42].

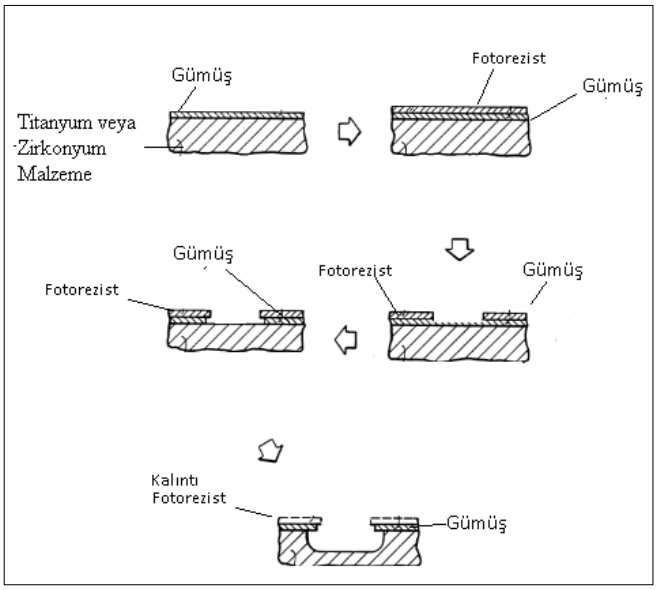
Çizelge .15. Fotorezist varyasyonu [42].

Örnek	**Epoksi (g)**	**C_2H_5OH 96%(g)**	**$NaC_2H_3O_2$ (g)**
A	20	12	4
B	20	14	4
C	20	16	4
D	20	18	4
E	20	20	4

Fotorezist, epoksi reçinesi, fotoaktif bileşiği olarak $NaC_2H_3O_2$ ve çözücü olarak C_2H_5OH kullanılarak imal edilmiştir. Oluşturulan bileşik manyetik karıştırıcı yardımıyla 75 ° C'ye kadar ısıtılmıştır ve yoğunlukları ve vizkoziteleri ölçülmüştür. Daha sonra fotorezist, PCB üzerinde 15 dakika boyunca 150°C'de döndürülerek kaplanmıştır ve UV ve X ışınına maruz bırakılmıştır. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçları değerlendirdiklerinde, üretilen en iyi fotorezistin 1 g. mL-1 ila 1.23 g.mL-1 yoğunluğunda olduğunu, 7 Cp (dinamik vizkozite) ila 22 Cp arasındaki dinamik viskoziteye ve 7 Cst (kinematik vizkozite) ila 18 Cst arasındaki kinematik viskoziteye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. İnce filmlerin emilimlerinin maksimum 0.2 ila 0.5 emiliminde 350 nm ila 1050 nm dalga boyu aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Üretilen epoksi bazlı fotorezistin mikro yapılarının homojen olduğunu belirlemişlerdir. Pozlama oluşumunun ise fotorezist üzerinde meydana gelen bir fotokimyasal reaksiyon olması gerektiğini ve UV uygulandığında bu reaksiyonun

gerçekleştiğini ancak X-ışınına maruz bırakıldığında bu reaksiyonun gerçekleşmediğini gözlemlemişlerdir [42].

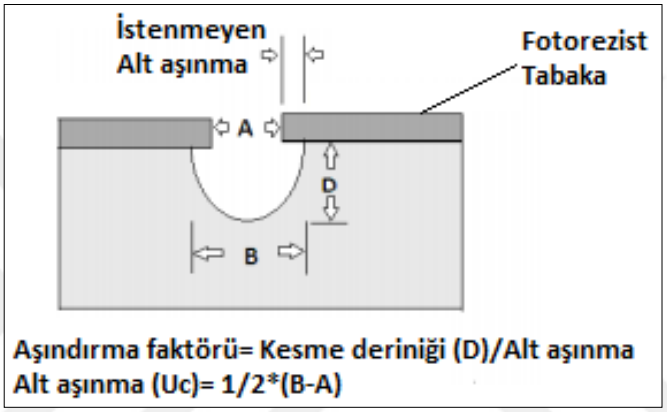
Manty (1992), US5092968A patenti ile yaptığı çalışmada, titanyum, zirkonyum ve bunların alaşımlarının fotokimyasal işleme yöntemi ile işlenmesini çalışmıştır. Titanyum veya zirkonyumun fotokimyasal işlemesi için uygulanacak kaplamayı işlenecek malzeme yüzeyinde gümüş (Ag) biriktirerek sağlamaya çalışmıştır. Araştırmacı, 0.2794 mm kalınlığında saf titanyum bir panel hazırlamıştır. Titanyum panel daha sonra saf su ile yıkanarak gümüş biriktirme işlemi uygulanmıştır. Malzeme yüzeyine daha sonra fotorezist uygulanmıştır. Gümüş kaplama 0.25 ila 5 µm, tercihen 1 ila 2 µm arasında bir kalınlığa sahip olabilir ve tercihen elektro kaplama ile uygulanır. Daha sonra fotorezistin UV ışına maruz kalmayan alanlarından ve alttaki gümüşten çıkarılmıştır. Gümüş kaplama, HNO_3 veya bir siyanid (CN^-) çözeltisi ile temas ettirilerek çıkarılabilir. Son aşamada ise gümüşle kaplanmayan alanlarda parçayı çıkarmak için kimyasal aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal aşındırma için hidroflorik asit çözeltisini kullanmıştır. Şekil 3.9'da işlem adım dizisinin şematik gösterimi verilmiştir [43].



Şekil .9. İşlem adım dizisinin şematik bir gösterimi [43].

İşlenen malzeme incelendiğinde, maskelenmemiş kısmın tam olarak aşındığı, diğer maskeleme tekniklerinde görüldüğü gibi alt aşınmanın olmadığı ve istenen ölçülerde ve özelliklerde tutarlı yüzeyler elde edildiği görülmüştür [43].

Agrawal ve arkadaşları (2014), fosfor bronzun PCM ile işlenmesinde aşındırma süresi, aşındırıcı sıcaklığı ve aşındırıcı konsantrasyonun aşındırma oranına, alt aşınma parametrelerine etkisini incelemiş ve optimal koşulları değerlendirmişlerdir. Şekil 3.10'da alt aşınma ile ilgili şematik gösterimi verilmiştir [44].



Şekil .10. Alt aşınma [44].

Araştırmacılar, amaçlarının fotokimyasal işlemede en iyi alt aşınmayı elde etmek için parametreleri optimize etmek olarak belirtmiştir. Ön deneyler sonrası işlem parametreleri belirlenmiştir. İşleme parametreleri, Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge .16. Deney işlem parametreleri [44].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	500	600	700
	Sıcaklığı, ^{0}C	50	55	60
	Süre, dk	4	8	12
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$		
	Deney Malzemesi	Fosfor Bronzun		

Araştırmacıların yaptıkları deneyler sonrası yaptıkları incelemede en iyi malzeme MRR ve minimum Uc, 55 °C sıcaklıkta, 500 g/l konsantrasyonda ve 12 dk. aşındırma süresinde olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, konsantrasyonu sabit tuttuklarında aşındırma zamanının ve aşındırma sıcaklığının MRR ve Uc üzerinde daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir [44].

Dugad ve Mudigonda (2017), fotokimyasal işleme kullanarak boş metal kroner stentin tasarımı, üretimi ve analizi adlı çalışmalarında, koroner kalp hastalıklarının (CHD) tedavisinde kullanılan stent üretimi üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar, minimum yüzey pürüzlülüğü ile tasarlanmış şekillendirilmiş çıplak metal stent prototip üretmeyi hedeflemişlerdir. Deneylerde dış çapı 4 mm ve kalınlığı 0.2 mm olan SS316L borular kullanılmıştır. Araştırmacılar, bu çalışmanın amacının, minimum yüzey pürüzlülüğü ile tasarlanmış şekillendirilmiş metal stent prototip üretmek olduğunu belirtmiştir. İşleme parametreleri, Çizelge 3.17'de verilmiştir [45].

Çizelge .17. Deney işlem parametreleri [45].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	400	800
	Sıcaklığı, ^{0}C	40	80
	Süre, dk	30	50
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_{3+}$ HCI+ HNO_3	
	Deney Malzemesi	SS316L	

Araştırmacılar sonuçları değerlendirdiklerinde, bir reaksiyonun sıcaklığındaki artışın aşınma oranını arttırdığını tespit etmişlerdir. Sıcaklıktaki artışın doğrudan aşındırıcı viskozitesi ve iyonların hareketliliğini etkilediğini, aşındırıcının çalkalanmasının ise atomların kinetik enerji seviyesini kendiliğinden arttırdığını belirlemişlerdir.

Yapılan deney sonrası belirlenen optimum işleme parametreleri olarak 500 g/l aşındırıcı konsantrasyonu, aşındırma süresini 50 dk ve aşındırma sıcaklığını 50°C

olarak tespit etmişlerdir. İşlem sonrası elde edilen stent prototipine ait görsel Şekil 3.11'de verilmiştir [45].



Şekil .11. Stent prototipi [45].

Ashby ve arkadaşları (1989), yarı iletken cihaz imalatında elektronik sürücü kontrollü fotokimyasal aşındırma işlemi isimli US4880493A patent çalışmalarında yarı iletken cihaz imalatı ve daha özel olarak yarı iletken cihaz imalatında malzemenin modellenmesi ve seçilmesi için elektronik sürücü kontrollü bir fotokimyasal aşındırma işlemi üzerine çalışmışlardır. Araştırmacılar, maske kullanımını ortadan kaldırmak ve bunun yerine, aşındırma aşamasında kullanılmak üzere yarı iletken malzemesinde bir maske oluşturmak için iyon implantasyonu kullanmışlardır. Araştırmacılar sonuçları değerlendirdiklerinde, daha düşük enerji kullanarak daha iyi sonuç elde edildiğini ve diğer işleme tekniklerine göre daha verimli bir metot geliştirdiklerini belirtmişlerdir [46].

Bing ve arkadaşları (2010), kimyasal aşındırma ile işlenebilir cam seramiklerin aşındırma hızı ve boyutsal tamlığı adlı çalışmalarında, mikro elektromekanik sistemlerde ve yarı iletken endüstrisinde sıklıkla kullanılan işlenebilir cam seramiklerin (MGC- Machinable Glass Ceramic), aşındırma hızını ve endüstrideki yeni kabul edilen çentik kontrolü yöntemiyle doğruluğunu incelemişlerdir. Araştırmacılar, uygun kimyasal aşındırıcı türü, aşındırma sıcaklığı, aşındırma sıcaklığı üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında HC1, hidrofosforik (H_3PO_4) ve hidrobromik (HBr) asitleri kullanmışlardır. Sonuçları değerlendirdiklerinde, geçmiş çalışmalarda yapılan incelemede birçok araştırmacının aşındırma işleminde aşındırıcı sıcaklığının temel değişkenlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, boyutsal tamlığınn, aşındırma oranıyla yakından ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle yüksek aşındırma oranında, kusurların ve alt aşınmanın meydana geldiğini belirlemişlerdir. Deney sonuçlarını değerlendiklerinde en iyi sonuç HCL asidi ile elde etmişlerdir.

Düşük aşınma süresi ile en yüksek aşındırma oranı ve boyutsal tamlığı elde etmişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar aşındırma oranı ve boyutsal tamlığın kimyasal aşındırmaya ve aşınma sıcaklığına karşı çok hassas olduğunu tespit etmişlerdir [47].

El-Awadi vd. (2016), Farklı aşındırıcı koşullarında paslanmaz çelik, alüminyum ve bakır levhalar için kimyasal işlemesi üzerine çalışmışlardır. İşleme parametrelerine ait veriler Çizelge 3.18'de verilmiştir [48].

Çizelge .18. Deney işlem parametreleri [48].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	300	400	500
	Malzeme	Paslanmaz	Alüminyum	Bakır
	Süre, dk	30	50	
Sabit Parametreler	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_{3+}$ HCI+ HNO_3		
	Sıcaklığı, ^0C	50		

Araştırmacılar yaptıkları deneyleri değerlendirdiklerinde, MRR'nin en yüksek değerlerinin, tüm metaller için %33 $FeCl_3$ konsantrasyonunda 50 ±2 oC ile elde edildiğini tespit etmişlerdir; bu, alüminyum için 0.738 mm^3/dak., bakır için 0.287 mm^3/dak. ve paslanmaz çelik için 0.224 mm^3/dk. olarak belirlenmiştir. MRR değerinin, sırasıyla oda sıcaklığında alüminyum, paslanmaz çelik ve bakır işleme için HNO_3 ila $FeCl_3$'e ilave edilerek yaklaşık 10, 8 ve 3 kat arttırılabileceğini belirlemişlerdir. Aşındırma sıcaklığının yükseltilmesi MRR'yi arttırır ve işleme süresini azatlığını tespit etmişlerdir [48].

Al-Ethari, paslanmaz çelik 420'nin kimyasal işlemesini etkileyen değişkenler adlı çalışmasında, bir asit karışımı (H_2O + HCl + HNO_3 + HF+ HCOOH) kullanarak işleme sıcaklığı ve işleme süresinin malzeme kaldırma oranına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi üzerine çalışmıştır. İşleme parametrelerine ait veriler Çizelge 3.19'da verilmiştir.

Çizelge .19. Deney işlem parametreleri [49].

	Parametreler	Seviye-1	Seviye-2	Seviye-3	Seviye-4	Seviye-5
Değişken Parametreler	Sıcaklığı, ^{0}C	45	50	55	58	
	Süre, dk	2	4	6	8	10
Sabit Parametreler	Malzeme	Paslanmaz 420				
	Konsantrasyon, g/l	1800				

Maskeleme işlemi öncesi numuneler toz, yağ, pas ve organik bileşiklerden arındırmak için alkol (etanol %98) kullanılarak temizlenmiştir. Polimerik maske malzemesi kaplandıktan sonra, kurutma için 30 dakika boyunca 80 °C'de bir fırında pişirilmiş ve sertleştirilmiştir (Şekil 3.12) [49].



Şekil .12. Hazırlanan numune [49].

Araştırmacı sonuçları değerlendiğinde, işleme süresinin ve işleme sıcaklığının kimyasal işleme ürünlerinde önemli etkiye sahip olduğunu, bu değişkenler arasında işleme sıcaklığının en büyük etkiye sahip olduğunu tespit etmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün, işleme sıcaklığı ve işleme süresi ile artarken, düşük sıcaklıklarda azaldığını tespit etmiştir. Malzeme kaldırma oranının işleme sıcaklığı ile arttığını ve düşük sıcaklıklarda azaldığını tespit etmiştir. Paslanmaz çelik 420'nin işlenmesinde [H2O + HCl + HNO3 + HF + HCOOH] aşındırıcı için en uygun işleme koşullarını 40 ºC'de 6 dakika olarak belirlemiştir [49].

Khake ve arkadaşları (2018), Monel 400'ün fotokimyasal işlenmesinde $FeCl_3$ ve $CuCl_2$ kullanılarak geometrik özellikleri üzerinde karşılaştırması isimli çalışmalarında, Monel 400'ün $FeCl_3$ ve $CuCl_2$ kullanılarak farklı sıcaklıklarda, konsantrasyonlarda farklı geometrilerde (daire, altıgen, kare, dikdörtgen ve üçgen) işlenmesini araştırmışlardır. Çalışmada, süreç parametrelerinin aşındırıcı, alt aşınma, aşınma derinliği ve ağırlık kaybına karşılaştırmalı etkisine odaklanılmıştır. İşlem parametreleri ait veriler Çizelge 3.20'de verilmiştir [50].

Çizelge .20. Deney işlem parametreleri [50].

	Parametreler	**Seviye-1**	**Seviye-2**	**Seviye-3**	**Seviye-4**	**Seviye-5**
Değişken Parametreler	Konsantrasyon, g/l	300	400	500	600	700
	Sıcaklığı, ^0C	40	50	60	70	80
	Kimyasal Aşındırıcı	$FeCl_3$	$CuCl_2$			
Sabit Parametreler	Malzeme	Monel 400				

Aşındırılan parça görseli Şekil 3.13'de verilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında tek taraflı maskelene yapmışlardır [50].



Şekil .13. Aşındırma sonrası malzeme görüntüsü [50].

Araştırmacılar yapıkları deney sonuçlarını değerlendirdiklerinde, $FeCl_3$ ve $CuCl_2$'nin genel performanslarının karşılaştırılmasında $FeCl_3$'ün Monel 400'ün aşındırılma

işlemi için en iyi sonucu verdiğini belirlemişlerdir. $FeCl_3$'te gözlenen alt aşınmanın $CuCl_2$'den daha fazla olduğu, ancak $CuCl_2$'e göre daha iyi geometrik hassasiyet verdiğini belirlemişlerdir. $FeCl_3$ ile aşındırmada aşınma derinliği ve malzeme ağırlık kaybının $CuCl_2$'e göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. $FeCl_3$ ile işlemede ağırlık kaybı ve aşınma derinliğinin sırasıyla 0.0504, 0.0737 ve 0.0436 µm ila 0.1547 µm olduğunu ve benzer şekilde, $CuCl_2$ için bu değerlerin sırasıyla 0.0386 g ila 0.0686 g ve 0.0236 µm ila 0.117 µm arasında olduğunu tespit etmişlerdir [50].

3.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

Fotokimyasal işlemede işleme esnasında işlenen malzemede, aşındırıcı kimyasalın türü ve konsantrasyon oranı ile birlikte diğer proses parametrelerinin seçilen değerlerine bağlı olarak undercut (Uc) oluşmakta ve bu Uc iş parçası üzerindeki istenen şeklin/geometrinin ölçü tamlığını etkilemektedir. Aşındırıcı kimyasal konsantrasyon oranı, aşındırma süresi, pozlama süresi, kaplama yüzeyinin temizlik süresi gibi proses parametrelerinin değerlerinin doğru seçilmemesi durumunda aşındırılması istenen alanın aşınma derinliğinde ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünde istenilen değerlerden sapmalar oluşmaktadır. Bu nedenle, PCM'de istenilen kalite karakteristikleri içerisinde aşındırma işlemi yapılabilmesi için en uygun parametrelerin belirlenmesi ve parametre etkilerinin gözlemlenmesi gerekmektedir. Deneysel tasarım ve tahmini modelleme yöntemleri, harcanan zamanı ve malzemeyi azaltarak proses parametrelerinin etkilerinin ve optimum seviyelerinin belirlenmesini, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal tamlık gibi bağımlı değişkenlerin (çıkış parametrelerinin) tahmini olarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Birçok deneysel tasarım ve modelleme yönteminde deney sayısı fazla olmasına rağmen Taguchi yönteminde daha az deney yapılmaktadır. Bu bağlamda daha ekonomik bir yöntem olması ve sistematik bir yaklaşım sunması nedeniyle tercih edilmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında aşındırma yöntemiyle işlenmesi zor olan çalışmalar paslanmaz çeliklerin fotokimyasal işlenebilirliği ile ilgili çalışmaların yetersiz olduğu, tasarımı ve prototipi yapım çalışmalarının yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada literatürde tespit edilen eksiklerin tamamlanması planlanması yapılmıştır.

BÖLÜM 4

MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, özgün olarak tasarlanan Fotokimyasal işleme makinesinin tasarım aşamaları, deney numunesi seçimi, deney tasarımının oluşturulması, deneylerin ve ölçümlerin yapılması hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. MAKİNE TASARIMI

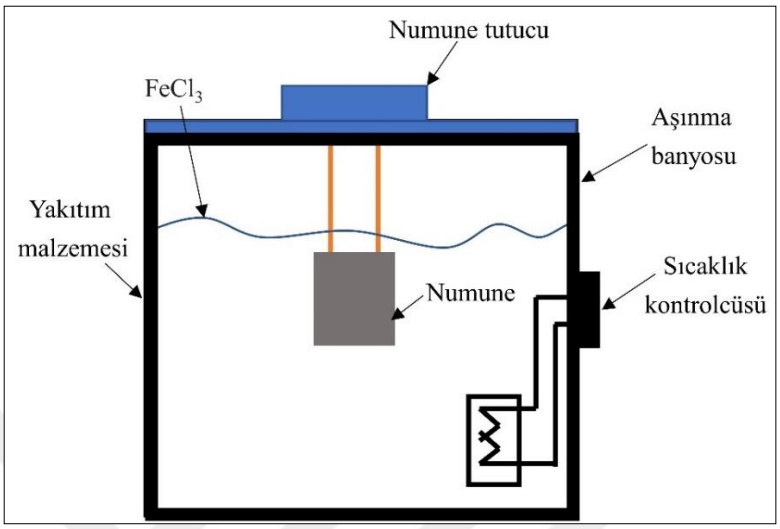
Bu çalışmada, literatürden farklı olarak seri üretime uygun yarı otomatik fotokimyasal işleme makinesi (PCM) üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla, üretimi hedeflenen PCM makinesi endüstride kullanılan makinelerden faydalanarak farklı proseslerle yapılan işlemler tek sistemde yapılacak şekilde bir araya getirilmiştir. Bu tasarım fikrinin ortaya çıkması ve üretim süreci Şekil 4.1'de kavram geliştirme olarak belirtilmiştir.



Şekil .1. Kavram geliştirme akış şeması.

Kavram geliştirme akış şemasına göre yeni ürün fikrinin üretilmesi ve değerlendirilmesi aşamasında literatür araştırmasının yanı sıra bu alanda çalışan firmalar ziyaret edilerek endüstrinin ihtiyaçları da göz önüne alınmıştır. PCM makinesi ile işleme dışında, çalışanın sağlığı ve güvenliği gibi hususlar da dikkate alınmıştır. Uygun ürün tanımının yapılması aşamasında, ürün tasarlanırken oluşturulan teknik dökümanlarda uygun üretim yöntemi ve kullanılacak malzemelerle oluşturulacak makine tanımı yapılmıştır. Hedeflerin belirlenmesi ve risk analizi aşamasında, sistem versiyon hedefi gözetilerek çalışmalar düşünülmüş ve alternatif tasarımlar geliştirilmiştir. Literatürde benzer ürün taraması aşamasında, aşındırma işlemlerinin mevcut sistem mantığında olduğu gibi yapıldığı gözlemlenmiştir. Literatürde tüm modüllerin bir arada bulunduğu bütünleşik olarak çalışan bir PCM makinesine

rastlanılmamıştır. Literatürde çoğunlukla kullanılan fotokimyasal işleme deney düzeneğine ait görsel Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

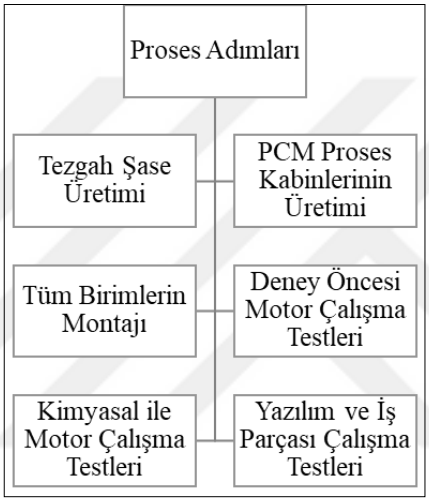


Şekil .2. Literatürde yaygın olarak kullanılan PCM deney düzeneğine ait şematik görüntü [7].

Şekil 4.2'deki PCM makine deney düzeneği, aşındırıcının konulduğu bir kap, ısıtıcı, aşındırıcı ve termometreden oluşmaktadır. Kimyasal içerisine daldırılan iş parçası, belirlenen sürelerde ve sıcaklıkta aşındırılmaktadır. Çalışmalarda, tek taraflı yüzey koruması yapıldığından malzemelerde oluşan kalınlık kaybı göz ardı edilmektedir. Bu çalışmada, özgün olarak tasarlanan PCM makinesinde ise fotokimyasal işleme mantığına uygun olarak pozlama, banyolama, aşındırma ve temizleme sistemlerinin tümü bir araya getirilerek fotokimyasal işleme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen PCM makinesinin mevcut sistemlerden farkı seri üretime uygun, insan faktörünü azaltan bir sisteme sahip olmasıdır. İş parçası numunesinin temizlenmesi ve kaplama işlemi ünite dışında, pozlama, banyolama, aşındırma, temizlik işlemleri yarı otomatik olarak makine içinde yapılmaktadır. Üretimi gerçekleştirilen yarı otomatik PCM makinesi mevcut sistemlerle kıyaslandığında kontrollü bir aşındırma, operatörün sağlığı, parametre kontrolü, stabil şartlarda seri ve hızlı numune üretimi gibi avantajlara sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalarda PCM makinesi ya da makinenin bir ünitesinin tasarımı yerine araştırmacılar daha çok fotokimyasal aşındırma proses parametrelerinin etkilerinin araştırılması ve işlenmesi zor malzemelerin fotokimyasal ile işleme özelliklerinin araştırılması üzerine yoğunlaşmışlardır. Literatür çalışmaları

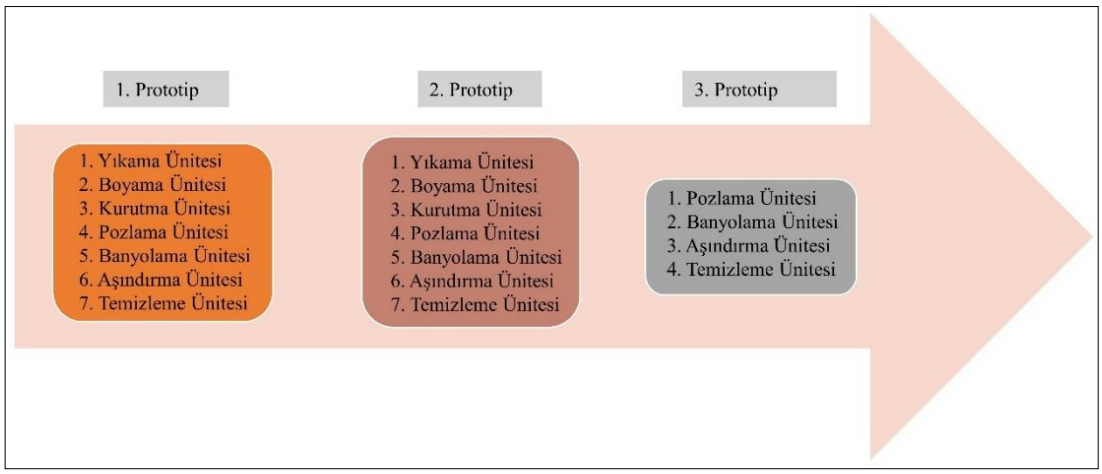
ve saha araştırmaları, aşındırma süresi, aşındırma miktarı, konsantrasyon miktarı, konsantrasyon sıcaklığının, Ra, ED ve Uc üzerindeki etkiler üzerinedir. Yapılan literatür çalışması sonucunda elde edilen bulgular ışığında fotokimyasal işleme makinesinin kavramsal tasarım boyutu tamamlanmıştır.

Kavram geliştirmesi tamamlanan yeni ürün fikrinin üretilmesi adımında literatür ve endüstrideki çalışmalar harmanlanarak sistem tasarımı geliştirilmiştir ve proses adımları oluşturulmuştur. Şekil 4.3'te proses adımları verilmiştir.



Şekil .3. Üretimi hedeflenen yeni yarı otomatik PCM makinesinin proses adımları.

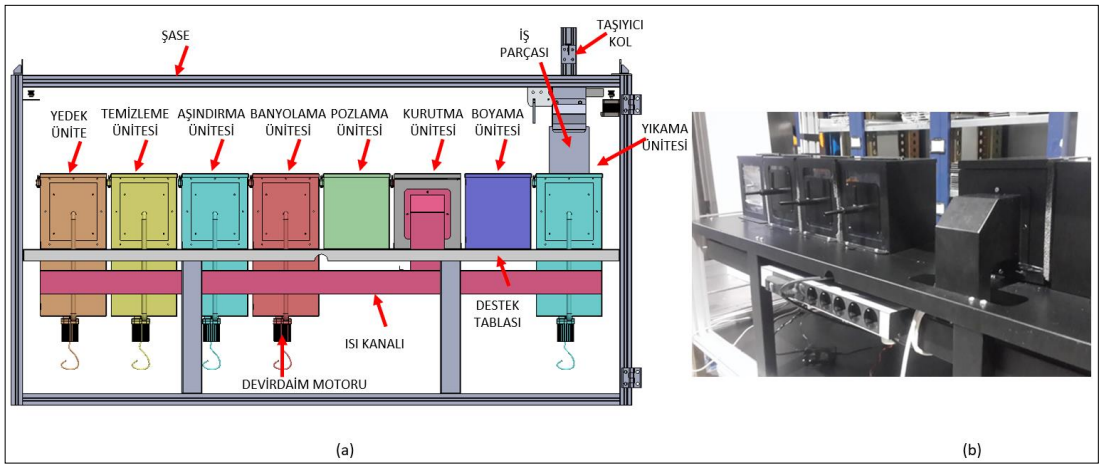
Hedeflenen yarı otomatik fotokimyasal işleme makinesinin yapımına kadar üç farklı fotokimyasal işleme makinesi prototipleri yapılmıştır. Prototipleri yapılan 3 farklı PCM makinelerine ait tasarım akışları Şekil 4.4' te gösterilmiştir. İki farklı prototip PCM makinesi yapımından sonra hedeflenen PCM makinesi nihai haline getirilmiştir.



Şekil .4. Yarı otomatik fotokimyasal işleme makinesinin yapım aşamasında yapımları gerçekleştirilen prototiplerin tasarım akışları.

Yapımı gerçekleştirilen birinci ve ikinci prototipte yedi ünite, üçüncü ve son prototipte dört adet ünitenin yapımı gerçekleştirilmiştir. Ünite sayısı yapılan ön deneyler sonrasında elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Teknolojik, teknik ve ekonomik yapılabilirlik etüdü ile yapılan prototip PCM makinesinin kavramsal tanımının ve tasarımının belirlenmesi sonrasında üretimi gerçekleştirilmiştir.

Solidworks programı ile tasarımı yapılan PCM makinesinin ilk tasarım ve prototipi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

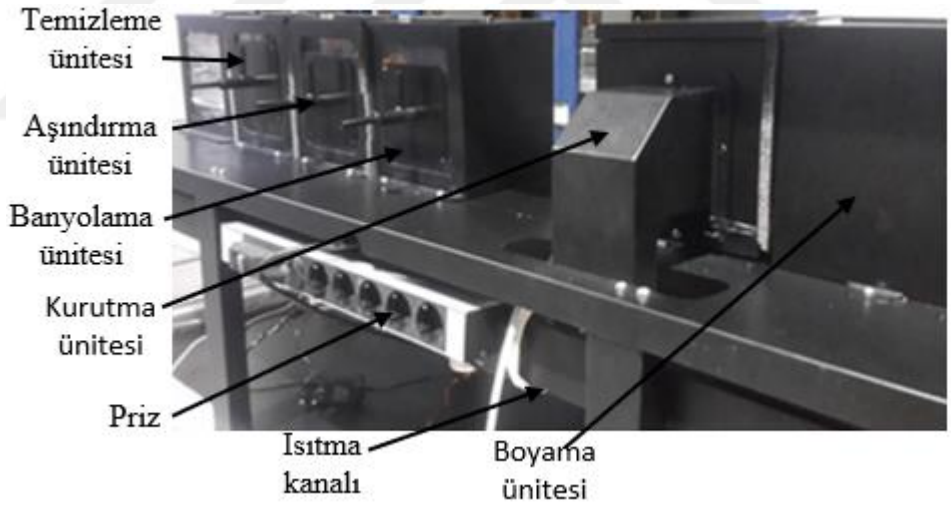


Şekil .5. a) PCM makinesinin ilk 3 boyutlu tasarımı, b) Prototipi gerçekleştirilen ilk PCM makinesinin fotoğraf gösterimi.

Yapılan ilk tasarımda, PCM makinesi yedi üniteden oluşmaktadır. Bunlar; yıkama ünitesi, boya ünitesi, kurutma ünitesi, banyolama ünitesi, pozlama ünitesi, aşındırma ünitesi temizleme ünitesidir. PCM makinesinin üzerinde yedi ünitenin bulunması makineye farkındalık kazandırmıştır. Endüstride var olan PCM makinelerinin her bir işlemi farklı modellerde yapılmaktadır. PCM ile işleme alanında birçok çalışması bulunan David Allen, yaptığı çalışmalarında gelecekte hibrit diye tanımladığı tüm modülleri ve işleme disiplinlerini barındıran bu tür tasarımın yapılması gerektiğini bildirmiştir [2]. PCM makinesinin tasarımında kullanılan yedi modül aşağıda açıklanmıştır.

4.1.1. Birinci Prototip Fotokimyasal İşleme Makinesi (PCM) Tasarımı

Kavram geliştirmesi ve tasarımı tamamlanan birinci prototip PCM makinesinin fotoğraf görüntüsü Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil .6. Prototip üretimi gerçekleştirilen birinci PCM makinesinin fotoğraf görüntüsü.

4.1.1.1. Yıkama Ünitesi

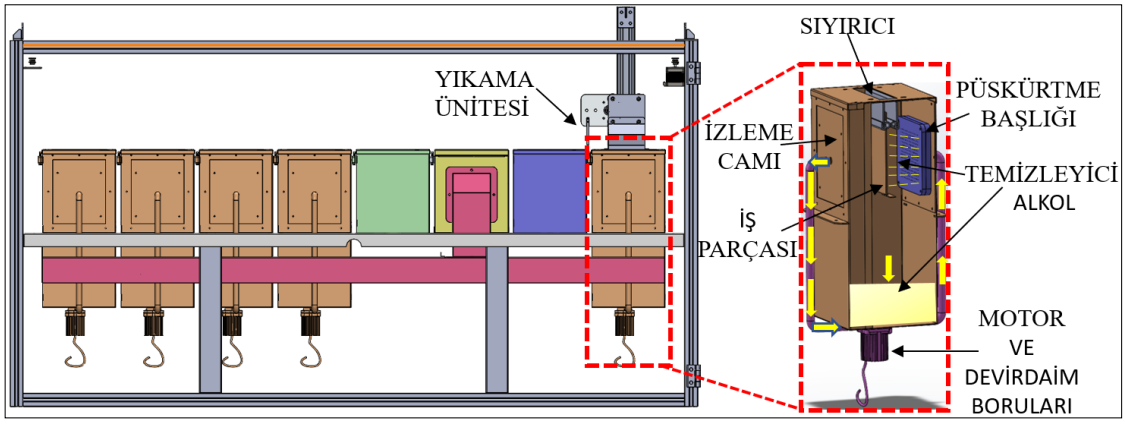
Yıkama işlemi, fotokimyasal işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyindeki yağ, toz vb. kalıntıların giderilme işlemidir. Yıkama ünitesi ise tasarlamış olduğumuz PCM makinemizdeki yıkama işlemini yapan ilk ünitedir. Bu ünitede, yıkama işlemi için

%99.9 saflıkta izopropil alkol kullanılmıştır. Kullanılan alkole ait görsel Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil .7. Yıkama işlemlerinde kullanılan %99.9 saflıkta izopropil alkol.

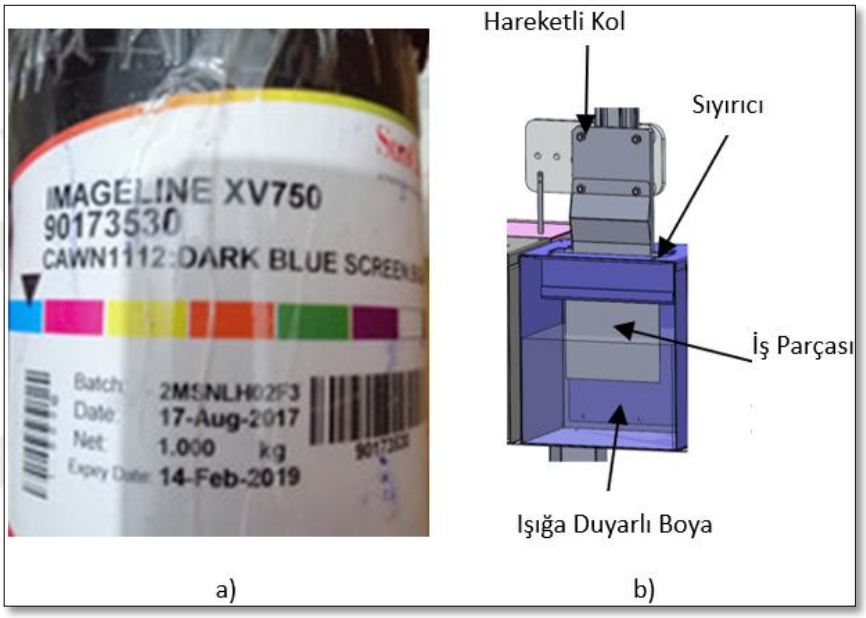
%99.9 saflıkta izopropil alkol saflık derecesi ve hızlı buharlaşması özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. Yıkama havuzunda durgun halde bulunan alkol, motor ve devir daim boruları ile püskürtme başlığına oradan da numune yüzeyine püskürtülerek yüzeyde bulunan, yağ ve kirler arındırılmaktadır. Tasarlanan fotokimyasal işleme ünitesi Ardunio programı yardımıyla yazılan yazılım ile kontrol edilmektedir. Yıkama ünitesine ait görsel Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil .8. PCM makinesi yıkama ünitesi detaylı gösterimi.

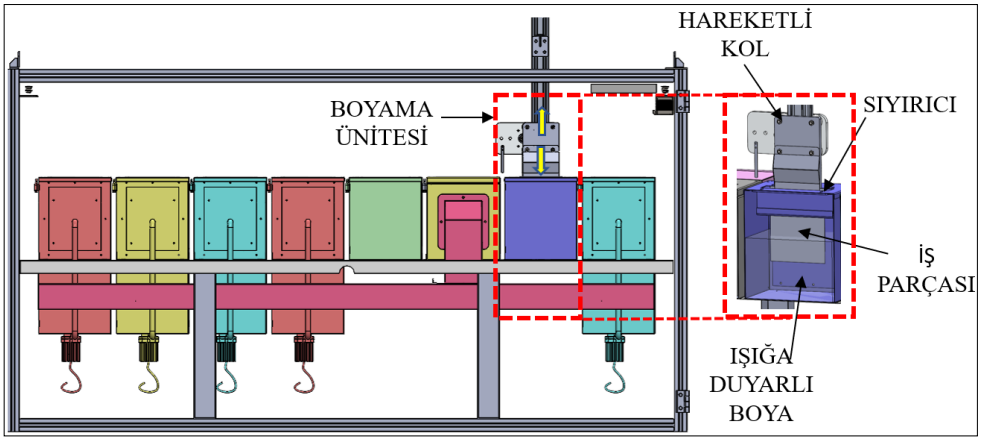
4.1.1.2. Boya Ünitesi

Boyama işlemi, PCM işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması işlemidir. Boyama ünitesi, PCM makinesindeki boyama işlemini yapan ikinci aşamadır. Bu ünitede boyama işlemi için özel ışığa duyarlı yüzey kaplama boyası kullanılmıştır. Kullanılan boya ve uygulama şekline ait görsel Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil .9. PCM makinesinde kullanılan boya ve uygulama şekli, a) Işığa duyarlı yüzey kaplama boyası, b) Boya uygulama şekli.

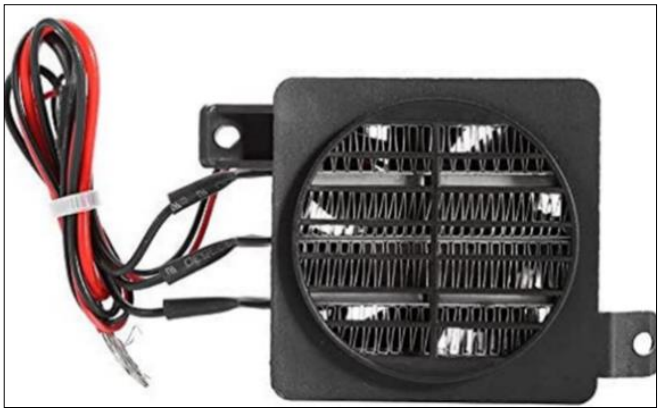
Deneylerde kullanılan yüzey kaplama boyası UV ışığına duyarlılığından dolayı tercih edilmiştir. Boyama havuzunda durgun halde bulunan yüzey kabalama boyası, numunenin boya haznesine daldırma işlemi sonrasında sıyırıcılar yardımıyla numune yüzeyine tutunması sağlanmıştır. Tasarlanan PCM işleme makinesinin boyama ünitesi, Arduino programı yardımıyla yazılan yazılım ile kontrol edilmiştir. Kontrol süresi deney numunesi üzerinde kalan boyanın akma özelliğine göre belirlenmektedir. Boyanan numune tamamen ışıktan korunmaktadır. Boyama ünitesine ait görsel Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil .10. PCM makinesi boyama ünitesi detaylı gösterimi.

4.1.1.3. Kurutma Ünitesi

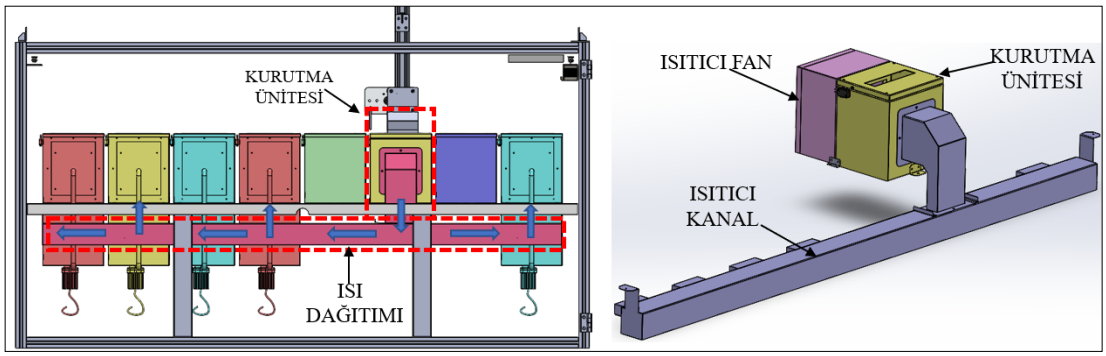
Kurutma işlemi, PCM işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması sonrası boyanın kurutulması işlemidir. Kurutma ünitesi ise prototipi gerçekleştirilen PCM makinesindeki kurutma işlemini yapan üçüncü aşama ünitedir. Kurutma ünitesinde ışığa duyarlı yüzey kaplama boyasının teknik spektlerinde verilen sıcaklık ve süre kullanılmaktadır. Kurutma kabini içerisinde bulunan ısıtıcı fan sürekli olarak sistem döngüsü içerisinde çalışmaktadır. Isıtıcı fana ait görsel Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil .11. PCM makinesinde kullanılan ısıtıcı fan.

Fan sıcaklığı yüzeye kaplanan koruyucu film tabakanın verilen teknik özelliklerine göre set edilmiştir. Kurutma ünitesine montajı yapılan fan üniteye giren numunenin

sağlıklı şekilde kurutulmasını sağlamaktadır. Kurutma ünitesine ait görsel Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

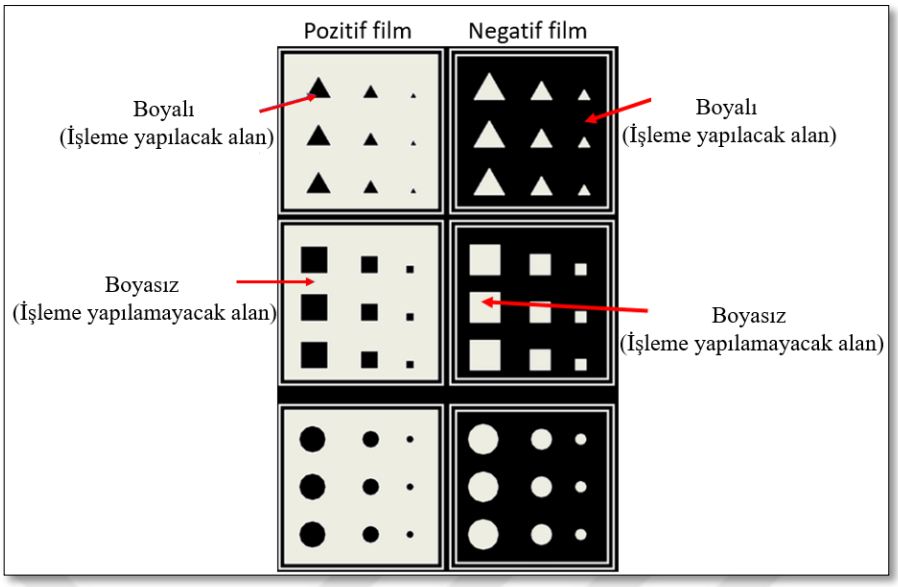


Şekil .12. PCM makinesi kurutma ünitesi gösterimi.

Tasarlanan PCM işleme makinesinin kurutma ünitesi Arduino programı yardımıyla yazılan yazılım ile kontrol edilmektedir. Isıtıcı, sistem döngüsü içinde çalışırken ısıtıcı kanal yardımı ile tüm kabinlere ısı dağıtılarak kabinlerde ısı stabil tutulması hedeflenmektedir.

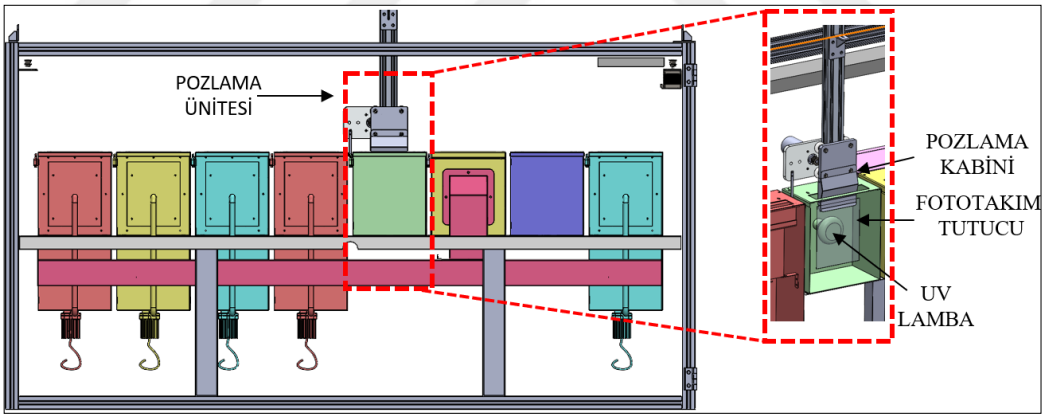
4.1.1.4. Pozlama Ünitesi

Pozlama işlemi, PCM işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması ve boyanın kurutulması sonrası fototakım yardımı ile işlenecek şeklin numune yüzeyine aktarılması işlemidir. Pozlama ünitesi ise prototipi gerçekleştirilen PCM makinesindeki dördüncü ünitedir. Pozlama süresi ön deneyler, endüstrideki uzmanlardan alınan bilgiler ve literatür araştırması sonrası elde edilen verilerle belirlenmiştir. Pozlama için tasarlanan takım sistem içine önceden yerleştirilerek hazır konumda ve sabit olarak bekletilmektedir. Hazırlanan ilk fototakım retro baskı şablonuna ait görsel Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Baskısı alınan takım kesilerek istenilen işleme şekline göre ayrılmaktadır. Baskı işleminin yüksek çözünürlükte olması işleme kalitesini eklemektedir. Ayrıca işlenecek geometriler seçilirken daire ve dik üçgen aşınmasında sorun yaşanmadığı dikdörtgen, çokgen vb. diğer desenlerdeki ve boyutsal değişikliklerde aşındırma uyguluğuna bakılmak istenmiştir [25].



Şekil .13. Deneyler için hazırlana fototakım retro baskı şablonu gösterimi.

Pozlama ünitesine içerisine numune geldiği anda UV ışık kaynağı çalışarak pozlama işlemini başlatmaktadır. Pozlama ünitesine ait görsel Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil .14. PCM makinesi pozlama ünitesi gösterimi

Tasarlanan PCM makinesinin pozlama ünitesini kontrol eden ünite için Arduino programı yardımıyla yazılan yazılım ile pozlama süresi belirlenmiştir. Sistem tasarlanırken tüm prosesler ışıktan korunmaktadır.

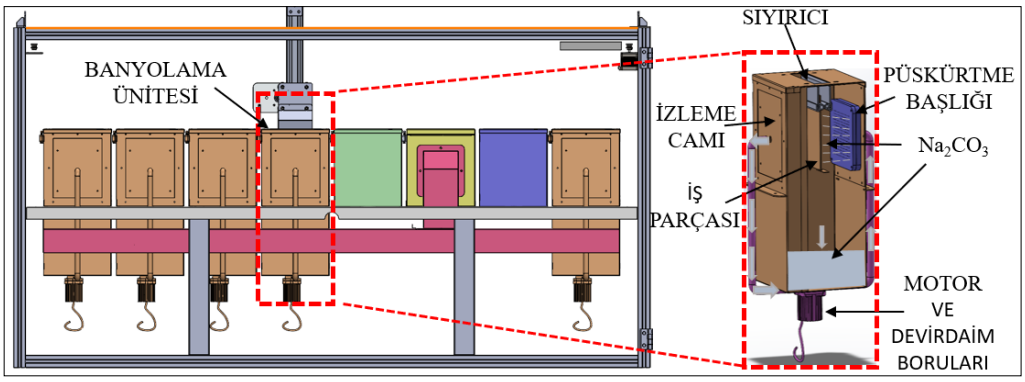
4.1.1.5. Banyolama Ünitesi

Banyolama işlemi, fotokimyasal işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması, boyanın kurutulması ve pozlanması sonrası kurumayan boyanın yüzeyden uzaklaştırılması işlemidir. Banyolama ünitesi, tasarlamış olduğumuz PCM makinesindeki banyolama işlemini yapan beşinci aşama ünitedir. Banyolama süresi ön deneylerle belirlenmiştir. Banyolama ünitesin de kullanılan sıvı sodyum karbon (Na_2CO_3)'a ait görsel Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil .15. Deneylerde kullanılan sıvı Na_2CO_3 ürünün fotoğraf görünütüsü.

Sıvı Na_2CO_3 pozlanan yüzey dışında kalan bölgelerin kaplamadan arındırılması için iyi bir çözücüdür. Sistem içerisinde devir daim motoru sayesinde malzeme yüzeyine püskürtülerek kalıntıların uzaklaşması sağlanmaktadır. Şekil 4.16'da Banyolama ünitesine ait görsel verilmiştir.



Şekil .16. PCM makinesi banyolama ünitesi gösterimi.

Banyolama işlemi yapıldıktan sonra dışarıya çıkarılan numune yüzeydeki kalıntı kimyasallar sıyırıcı yardımı ile yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Bu işlem bir sonraki adımda kullanılacak kimyasalın konsantrasyonunun değişimini önlemek için yapılmaktadır.

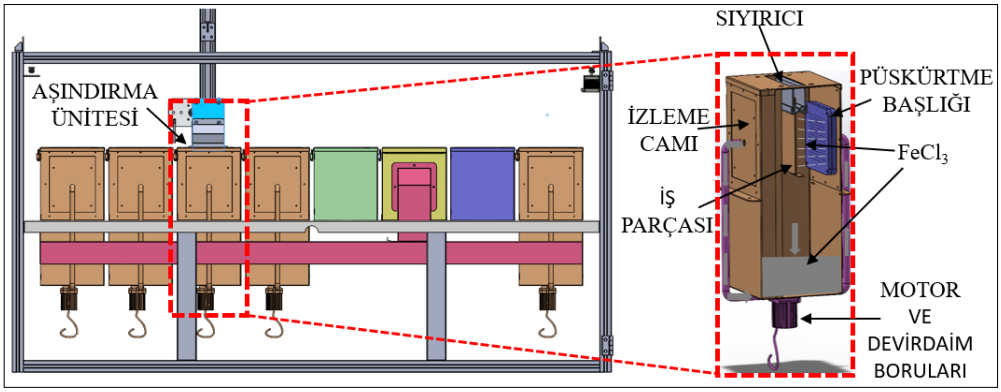
4.1.1.6. Aşındırma Ünitesi

Aşındırma işlemi, PCM işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması, boyanın kurutulması, pozlanması ve banyolanması sonrası ortaya çıkan şeklin numune yüzeyinde aşındırılması işlemidir. Bu işlem üretilmek istenen şeklin elde edildiği adımdır. Aşındırma ünitesi, PCM makinesindeki aşındırma işlemini yapan altıncı aşama ünitesidir. PCM makinesi içerisinde kullanılan kimyasal seçilen malzemeye göre değişkenlik göstermektedir. Ön deneylerde paslanmaz çelik numunesi için $FeCl_3$ kullanılmıştır. (Şekil 4.17)



Şekil .17. Aşındırma işlemlerinde kullanılan $FeCl_3$ ürün görseli.

Aşındırma işlemlerinde aşındırma süresi, literatür ve ön deneylerde elde edilen bilgilerle belirlenmiştir. Aşındırma işlemi içerisinde bulunan devir daim motoru vasıtasıyla malzeme yüzeyine kimyasal püskürtülerek kalıntıların uzaklaşması sağlanmaktadır. Aşındırma ünitesine ait görsel Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



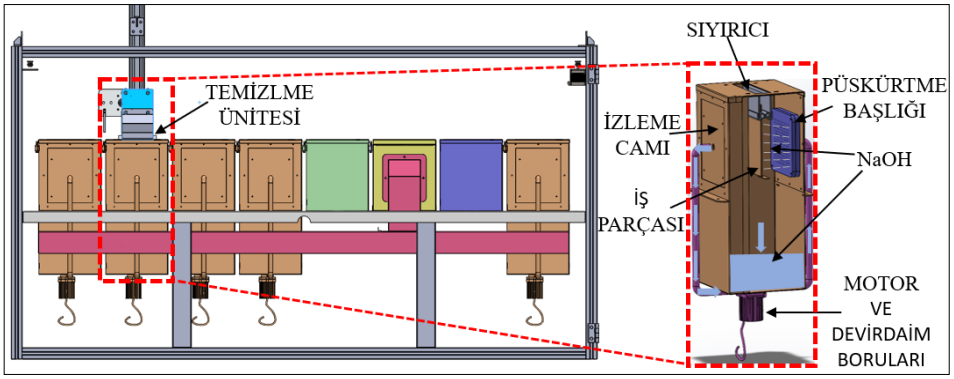
Şekil .18. PCM makinesi aşındırma ünitesi gösterimi

Aşındırma işleminde, kurumamış boyaların uzaklaştırılması ile açığa çıkan çıplak yüzey asıl aşındırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sırasında malzeme cinsine göre aşındırıcı kimyasal değişkenlik göstermektedir. Aşındırılan yüzey yukarı doğru çekildiğinde sıyırıcı vasıtasıyla yüzeyde kalan kimyasallar yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle kimyasalın dışarı akması ve kullanıcıya zarar vermesi engellenmektedir. Aynı zamanda sonrasındaki kimyasala karışması engellenmektedir.

4.1.1.7. Temizleme Ünitesi;

Temizleme işlemi, fotokimyasal işleme deneylerinde kullanılan numune yüzeyinin ışığa duyarlı kaplama ile kaplanması, boyanın kurutulması, pozlanması ve banyolanması sonrası ortaya çıkan şeklin numune yüzeyinde aşındırılmasından sonraki kalan koruyucu tabakanın yüzeyden uzaklaştırılıp yüzeyin tamamen temizlenmesi işlemidir.

Temizleme ünitesi, tasarlanan PCM makinesindeki temizleme işlemini yapan yedinci ve son aşama ünitedir. Aşındırma süresi ön deneyler sonrası belirlenmiş ve kullanılmıştır. Aşındırma ünitesine ait görsel Şekil 4.19'da verilmiştir.



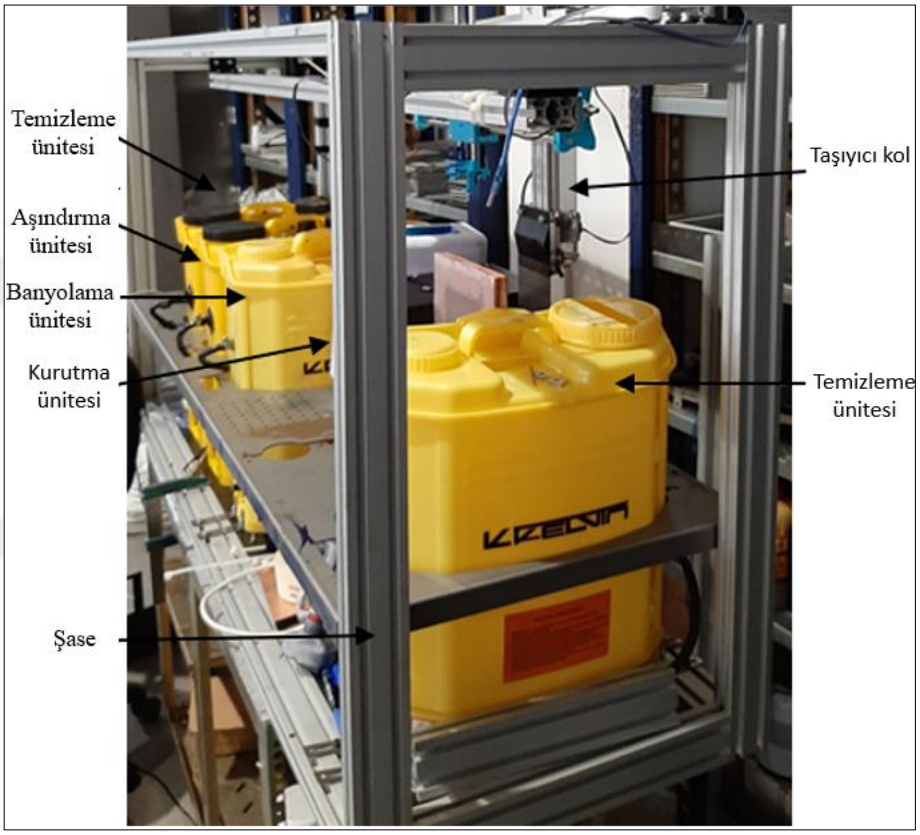
Şekil .19. PCM makinesi temizleme ünitesi görüntüsü.

Bu aşamada kurumamış boyaların uzaklaştırılması ile açığa çıkan çıplak yüzey asıl aşındırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sırasında malzeme cinsine göre aşındırıcı kimyasal değişkenlik göstermektedir. Aşındırılan yüzey yukarı doğru çekildiğinde sıyırıcı vasıtasıyla yüzeyde kalan kimyasallar yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle kimyasalın dışarı akması, kullanıcıya zarar vermesi ve sonrasındaki kimyasala karışması engellenmektedir.

Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen makine ilk olarak su kullanılarak motor performansları denenmiştir. Daha sonra kimyasal denemelerde kimyasalın vizkozitesi sebebiyle performans kaybı yaşansa da hava girişi ile makinenin performansı artırılmıştır. Prototip çalışmalarında sıklıkla yaşanan problemlerden biri kavram geliştirme ile tecrübenin harmanlanmamasıdır. Yapılan deneylerde ilk karşılaşılan problemlerden birisi motor gücünün yetersiz kalışı olmuştur. Yapılan araştırma ve denemelerle hava akışının bir boya tabancası çalışma prensibine benzetilerek değiştirilmesi sorunu ortadan kaldırmıştır. Yıkama ve kurutma prosesleri sorunsuz bir şekilde çalıştırılmış ve boyama prosesine geçilmiştir. Yapılan çalışmada, iş parçası numunesi boya dolu bir hazneye daldırılarak silindir sıyırıcılar yardımı ile belirli bir kalınlıkta boya iletilmesi planlanmıştır. Denemeler esnasında düşünülen bu prensipte başarı sağlanamamıştır ve bu prosesin revize edilmesi gerektiği not edilerek pozlama prosesine geçilmiştir. Diğer tüm birimler bu iki proses yapılmış gibi kabul edilerek değerlendirilmiş ve bir süre sonra kullanılan motorların zarar görmesi ve akış problemi yaşanması sebebiyle sistemin komple revize edilmesine karar verilmiştir. Bu doğrultuda ikinci prototip tasarlama aşamasına geçilmiştir.

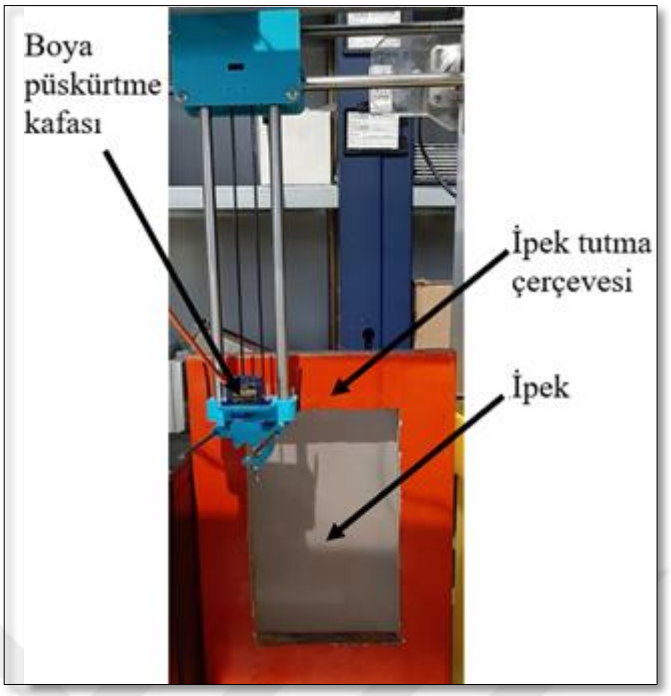
4.1.2. İkinci Prototip PCM Makinesi Yapım Süreci

Yapılan ikinci prototip PCM makinesinde aşındırma hazneleri kapalı devre çalışan ilaçlama çantası ile değiştirilerek daha önce yapılan şaseye adapte edilmiştir. Sistem ve yazılım değiştirilmeden motorlarda yaşanan sorunlar ortadan kaldırılmıştır. Sisteme ait görsel Şekil 4.20'de verilmiştir.



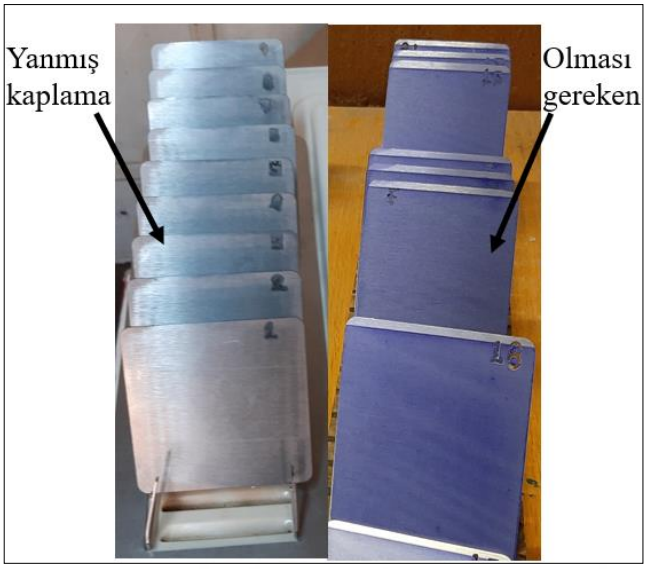
Şekil .20. İkinci prototip PCM makinesi genel görüntüsü.

Sistemin revizyonu yapılırken fotorezist kaplama adımında yaşanan sorunlar için de revizyona gidilmiştir. Boyanın vizkozitesinin yüksek olmasından dolayı daha önce denenen sıyırma sistemi iptal edilerek 120 µm gözenek genişliğine sahip ipek bez yardımı ile malzeme yüzeyine aktarılması için yeni bir düzenek tasarlanmıştır. Tasarlanan düzeneğe ait görsel Şekil 4.21'de verilmiştir. Hazırlanan yazılım yardımı ile bekleme süreleri kontrol altında tutulmuştur.



Şekil .21. PCM makinesi boyama ünitesi görüntüsü.

İkinci prototipte ipek bez yüzeyine boyanın püskürtülmesi sonrası aşağı yukarı hareket eden sıyırma kafası ile boyanın yüzeye aktarılması mantığına göre tasarlanmıştır. İpek bez üzerinde milimetrekarede 120 adet gözenek bulunan serigrafi işlemi için ipekten üretilmiş bir malzemedir. Tasarlanan düzeneğin mevcut sisteme adapte edilmesi sağlansa da istenilen performans alınamamıştır. Yapılan araştırma sonucu endüstride serigrafi işleminin yatay olarak yapıldığı ve boyanın iş parçası numune yüzeyine belli bir baskı ile iletilmesi gerektiği görülmüş ve sistemde revizyona gidilmiştir. Bu doğrultuda bazı proseslerin tam otomatik yerine manuel yapılması kararlaştırılmıştır. Diğer iki proses olan kurutma ve pozlama ünitelerinde yapılan revizyonlarda da sorunlarla karşılaşılmıştır. Kurutma prosesinde kullanılan boya ile spesifikasyonlarında verilen 90 derece sıcaklıkta bekletilerek kuruma ve sertleşme sağlamamıştır. Yapılan düzenekte ısı kontrolü sağlanamadığından dolayı boya özelliğini kaybederek plastikleşmiş ve tüm yüzeyi kaplamıştır. Polimerleşmenin istenmeyen bölgelerde oluşması istenen şeklin kaybolmasına neden olmaktadır. Şekil 4.22'de hatalı ve hatasız kaplama örnekleri gösterilmiştir.



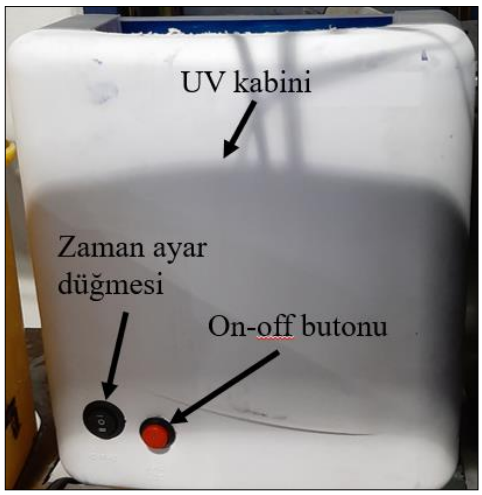
Şekil .22. Kurutma ünitesinde ısıya bağlı olarak oluşan hatalı ve hatasız numune görüntüleri.

Revizyonu yapılan kurutma ünitesine ait görsel Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil .23. PCM makinesi kurutma ünitesi görüntüsü.

İkinci prototipte karşılaşılan bir diğer problem ünite pozlama ünitesinde olmuştur. Pozlama sırasında kullanılan 3 adet 15 watt UV led lamba yetersiz kalmıştır. Pozlama ünitesine ait görsel Şekil 4.24'te verilmiştir.

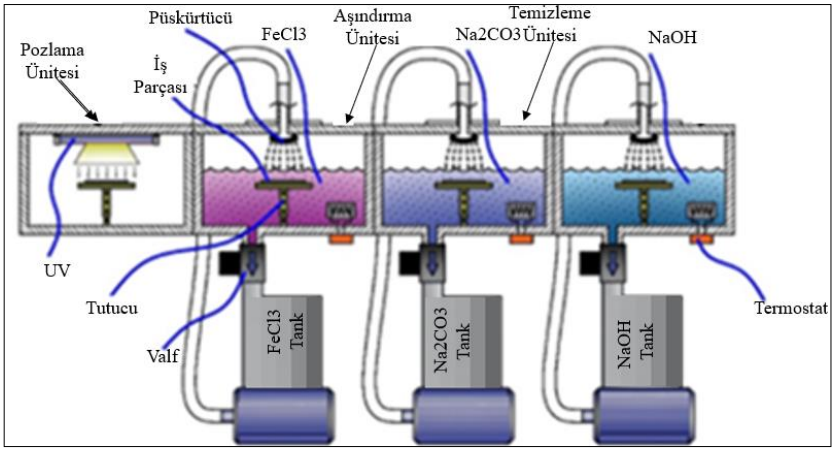


Şekil .24. PCM makinesi pozlama ünitesi görüntüsü.

Yaşanan problemlere bağlı olarak sistemin bazı proseslerinin manuel olarak yapılması kararlaştırılmış ve sistem revizyonuna gidilmiştir.

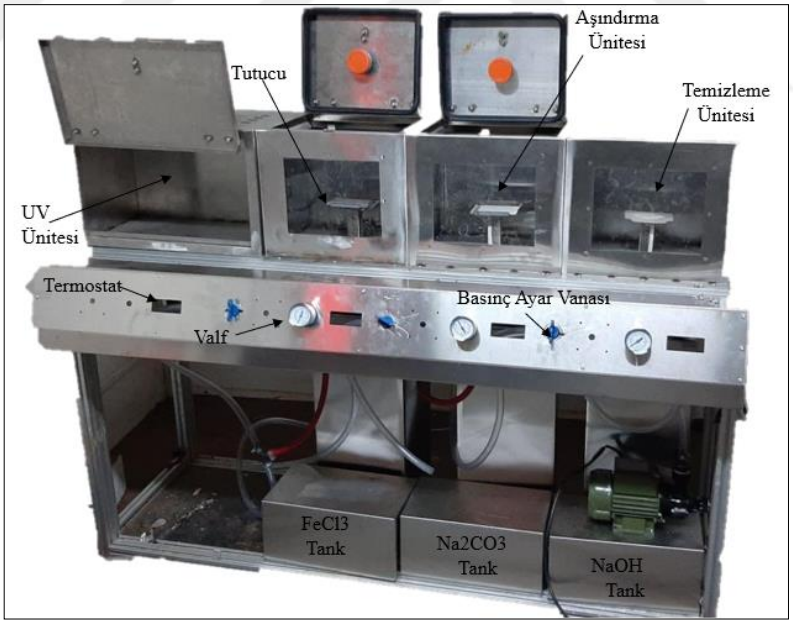
4.1.3. Üçüncü ve Nihai Prototip PCM Makinesi Yapım Süreci

Daha önce yapılan iki prototipte edinilen tecrübe ile PCM makinesi yeniden tasarlanmıştır. Fotokimyasal işleme prosesi; yıkama, fotorezistin uygulanması, uygulanan fotorezistin kurutulması, pozlama, banyolama, aşındırma ve son temizlik işlemi ile fotorezistin yüzeyden uzaklaştırılması işlemlerinden oluşmaktadır. Tüm püskürtme sistemi Şekil 4.25'de gösterilmiştir. Yeni yapılan tasarımda, yapılacak işlemlere uygun tankalar içerisinde bulunan kimyasallar pompa vasıtasıyla püskürtme kafasına iletmektedir. Püskürtme kafasından kabin içerisinde bulunan iş parçasının yüzeyine direkt olarak kimyasal püskürtülmektedir. Kontrol panelinde bulunan basınç saati ve vana vasıtasıyla pompa basıncı kontrol edilmektedir. Tank altında bulunan bir ısıtıcı tankın içinde bulunan kimyasalı ısıtmaktadır. Isıtıcı kontrolü, kontrol panelinde bulunan dijital bir termostat yardımı ile sağlanmaktadır. Tank ve kabinler SS316L paslanmaz çelikten imal edilerek iç kısmı kimyasala dayanıklı boya ile kaplanmıştır. Transferde kullanılan pompaların salyangoz bölümünün kimyasala temas eden kısımları kimyasala dayanıklı boya ile kaplanmıştır. Birinci ve ikinci prototip PCM makinelerinde edinilen tecrübeler ışığında sistemin çalışmasında bir problem yaşanmamıştır.



Şekil .25. PCM makinesi püskürtme sistemi şematik gösterimi.

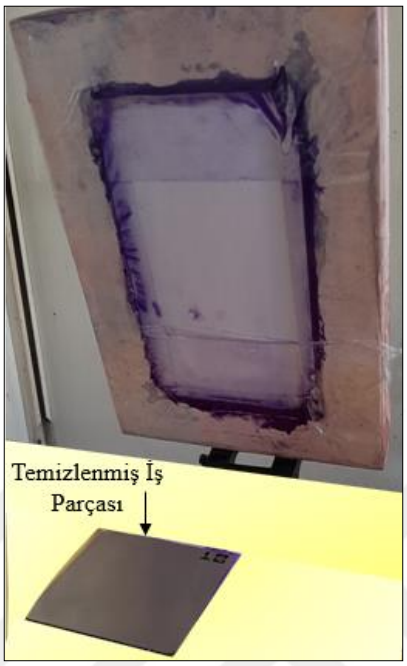
Üretimi tamamlanan ünite hazırlanan şase üzerine montajlanmış, hortum ve kablo bağlantıları ve elektrik tesisatı yapılarak PCM işleme makinesi hazır hale getirilmiştir. Ön deneyler için hazır hale getirilen PCM işleme makinesine ait görsel Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil .26. Üretimi gerçekleştirilen nihai, prototip PCM işleme makinesinin genel görünümü.

PCM işleme makinesi, dört bölümden oluşmaktadır. Proses gerekliliği olan yedi aşamanın ilk üç tanesi tezgâh dışından yapılmaktadır. Bunlar; ön temizleme, serigrafi baskı ve kurutma işlemidir. Pozlama ünitesine ulaşıncaya kadar iş parçası üzerinde bu

üç işlem harici uygulanmaktadır. Temizlenen numuneye ait görsel Şekil 4.27'de verilmiştir.



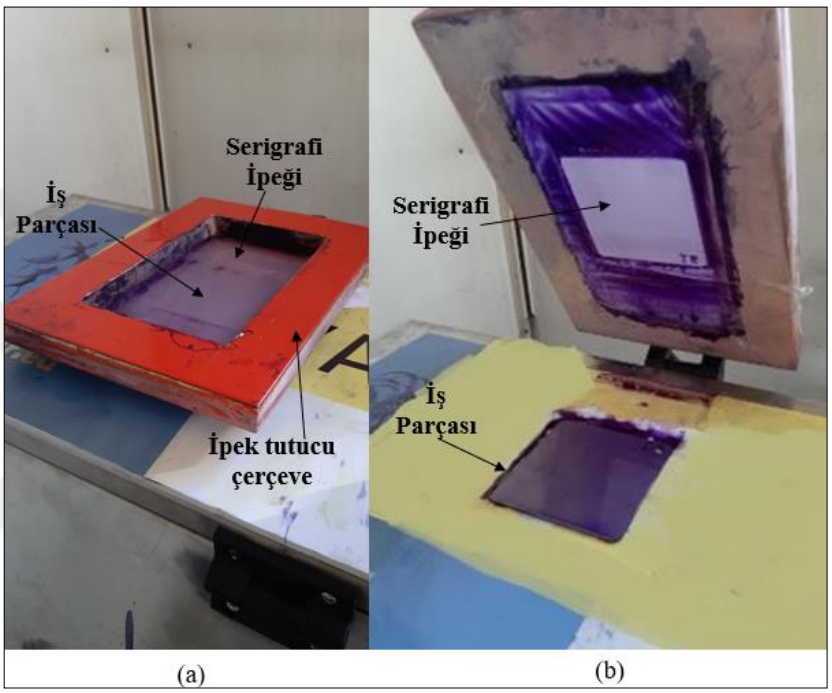
Şekil .27. Temizleme işlemi uygulanmış numune görüntüsü.

%99.9 saflıkta manuel olarak temizlenen numune kaplama işlemine hazır durumdadır. Temizlik işleminin yapılmasının ana nedeni malzeme yüzeyindeki kir, yağ ve tozlardan arındırmaktır. Yağ, kaplamanın yüzeye tutunmamasına neden olurken toz ve kirler ise pozlamada çıkacağı için bunları işlemeden önce temizlemek gerekmektedir. Ön deneyler sırasında gözlemlenen yüzey kirlenmesine bağlı olarak hatalı kaplama görüntüsü Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



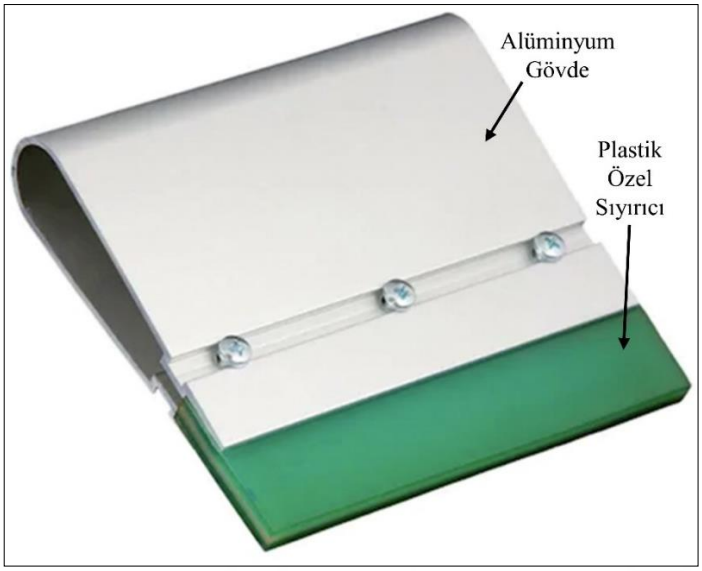
Şekil .28. Kirli yüzeye uygulanan kaplama görüntüsü.

Temizlenmemiş yüzeye kaplama yapılması sonucu istenilen formun elde edilememesi görüntüsü Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Bu durum mikro ve hassas parçalarda bu önemli bir kriterdir. Temizleme işlemi biten numune serigrafi işlemine tabi tutulmaktadır. Serigrafi işleminin karanlık bir ortam içerisinde yapılması gerekmektedir. Kaplama işlemi PCM işleminde şeklin oluşturulduğu ve yüzeyin korunduğu işlem adımıdır. Şekil 4.29'da serigrafi işlemine ait görsel verilmiştir.



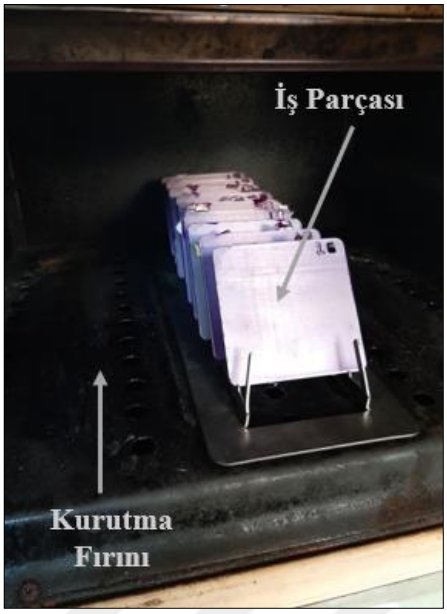
Şekil .29. PCM makinesi serigrafi işlemi görüntüsü.

Şekil 4.29 a'da baskıya hazır iş parçası numunesi verilmiştir. Bu aşamadan sonra ışığa duyarlı boya malzeme yüzeyine aktarılacaktır. Şekil 4.29 b'de ışığa duyarlı boyanın tamamen yüzeye aktarılması verilmiştir. Baskısı bitmiş yüzeye tamamen geçirilen kaplanmış numune fırınlama işlemine hazır hale gelmiştir. Kaplamayı yüzeye aktarmaya yarayan rakle (sıyırıcı) görüntüsü Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



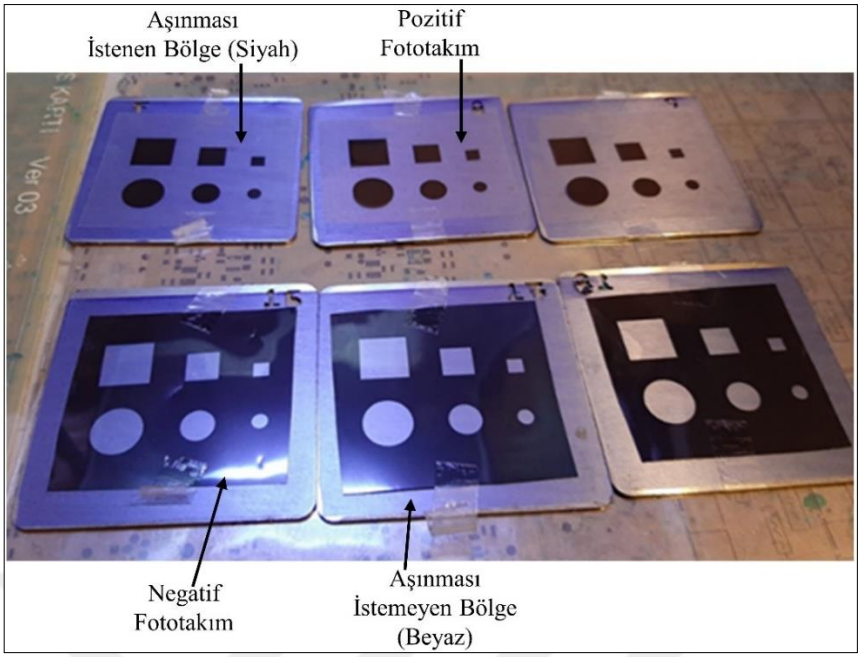
Şekil .30. Rakle (sıyırıcı).

Rakle özel ucuyla ipek yüzeyine zarar vermeden ışığa duyarlı boyayı numune yüzeyine aktarmak için kullanılmaktadır. Ucundaki plastiğin sert veya keskin olması durumunda ipeğe zarar vermektedir. Rakle yardımı ile yüzeye kaplanan boya kuruması için fırınlanma işlemine alınarak üreticinin belirlediği derecede (90^o C) ve sürede (15dk.) yapılmaktadır. Kurutma işleminin düzgün yapılmaması foto takımın malzeme yüzeyine yapışmasına ve işlenecek şeklin bozulmasına sebep olmaktadır. Fırınlanması tamamlanan iş parçası pozlamaya hazırdır ve bu noktada üzerine fototakım yerleştirilerek UV ışığına maruz bırakılabilir. Şekil 4.31'de fırınlanmış ve pozlamaya hazır iş parçasına ait görsel gösterilmiştir.



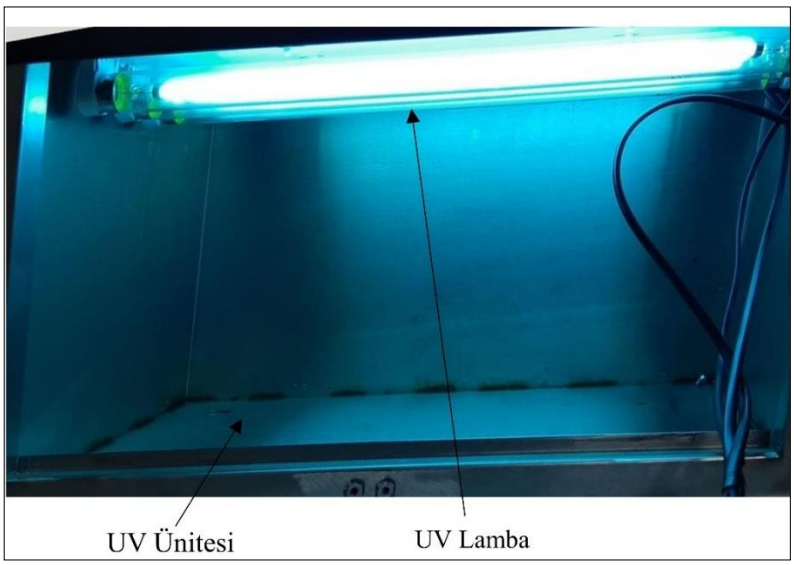
Şekil .31. PCM makinasında iş parçası numunesinin fırınlanma görüntüsü.

Şekil 4.32'de fototakım yerleştirilmiş iş parça numuneleri gösterilmiştir. Fototakımın yerleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken önemli husus takımın istenilen bölgeye doğru yerleştirilmesidir. İş parçası numunesine birden farklı işlem uygulanması durumunda (kazıma ve kesme işlemlerinin aynı anda istendiği durumlarda) veya çok hassas küçük kesitlerin olması durumunda, hizalama için büyüteç veya özel geliştirilen takımlar kullanılmaktadır. İş parçası numunesi pozlama ünitesine geldiğinde pozlamaya hazır boyalı ve kuru bir yüzeye sahip olmalıdır. Amaç işlenecek formun iş parçası numune yüzeyine geçmesini sağlamaktır. Pozlama ve boya serme işlemleri manuel olarak çalışmaktadır. Pozlama ünitesi şase, kapak, ışık kaynağı ve seviye ayarlama bölümünden oluşmaktadır. Şase ve kapak bölümü kullanıcıyı ışık kaynağından çıkan UV ışınından koruyarak gözde oluşacak hasarı önlemek için kullanılmıştır. Işık kaynağı, ışığa duyarlı boya üzerine yerleştirilen fototakım üzerinde bulunan formun iş parçası numune yüzeyine geçmesini sağlamak bu prosesin ana görevidir.



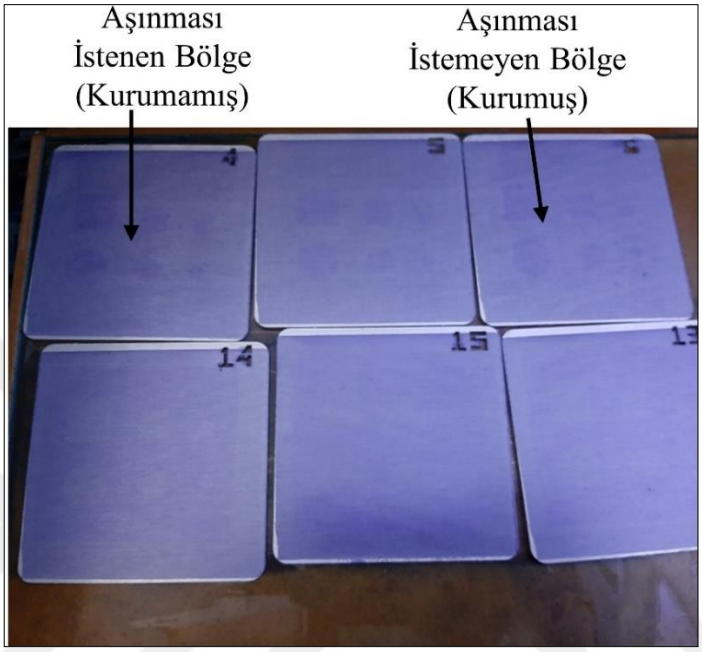
Şekil .32. İş parçası numune yüzeyine yerleştirilen fototakım görüntüsü.

Bütün bu işlemler bittikten sonra iş parçasına asıl şeklini vermekte olan UV pozlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Pozlama işleminde ön deneylerde elde edilen tecrübelerden yola çıkılarak, 350 ile 400 nm dalga boyuna sahip 60W'lık dört adet pozlama lambası kullanılmıştır. PCM makine üzerine montajı yapılan lambaların fotoğraf görüntüsü Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil .33. PCM makinası pozlama ünitesinin açık kapak görünümü.

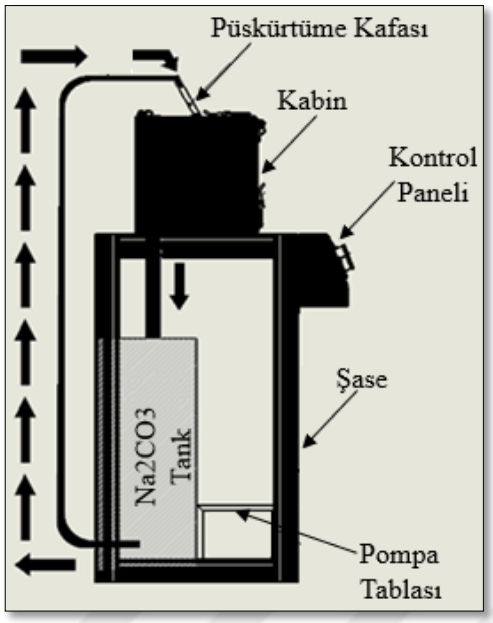
Pozlama işlemi PCM işleme yönteminin en önemli adımıdır. Pozlama süresi yapılan deneylerde değişken parametre olarak atanmış ve aşındırma işleminde etkisi araştırılmıştır. Pozlama işlemi yapılmış iş parçasına ait görsel Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil .34. Pozlama işlemi uygulanan iş parçası numune görüntüsü.

Pozlanan iş parçası numunesine bakıldığında formların belirginliğinin çok az olduğu görülmektedir. Asıl belirginlik banyolama işlemi sonrası ortaya çıkmaktadır.

Prosesteki banyolama ünitesi, pozlanan üründe kürleşmenin olmadığı bölgelerde kalan boyanın yüzeyden uzaklaştırılması ile aşındırma öncesi işlenecek şeklin ortaya çıkarıldığı prosestir. Proses depodan çektiği Na_2CO_3 yardımı ile bu işlemi gerçekleştirmektedir. Na_2CO_3 kimyasalı kürleşen yüzeye zarar vermemekte, kürleşmenin olmadığı yüzeyi ise temizlemektedir. Banyolama ünitesinin çalışmasını gösteren görsel Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil .35. PCM makinası banyolama ünitesinin çalışma prensibi görüntüsü.

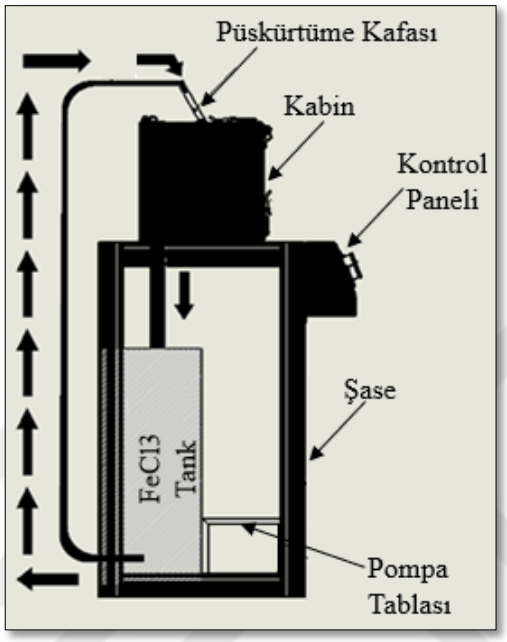
Banyolama işlemi sonrasında iş parçası numunesi aşındırma işlemine hazır hale gelmektedir. Aşındırmaya hazır hale gelen iş parçalarının görseli Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil .36. Banyolama işlemi tamamlanan iş parçası numune görüntüleri.

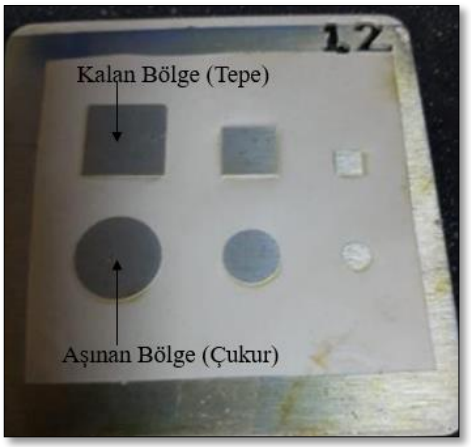
Prosesin devamında, banyolanması biten numune aşındırma ünitesine alınarak polimerizasyon olmayan bölgelerin yarattığı boşlukların aşındırılması gerçekleştirilir.

Proses depodan çektiği $FeCl_3$ yardımı ile bu işlemi gerçekleştirmektedir. $FeCl_3$ kimyasalı polimerleşen yüzeye zarar vermemekte, polimerleşmeyen yüzeyi ise aşındırmaktadır. Aşındırma ünitesinin çalışmasını gösteren görsel Şekil 4.37'de verilmektedir.



Şekil .37. PCM makinası aşındırma ünitesinin çalışma prensibi.

Aşındırma işlemi sonrasında iş parçası numunesi istenen şekilde işlenmiş ve son temizleme işlemine hazır hale gelmiştir. Aşındırılmış iş parçası numunesi görseli Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil .38. Aşındırma işlemi tamamlanan iş parçası numune görüntüsü.

Aşındırılması biten numune son temizleme ünitesine alınarak polimerizasyon olan bölgeler iş parçası üzerinden uzaklaştırılır. Proses depodan çektiği NaOH yardımı ile bu işlemi gerçekleştirmektedir. NaOH kimyasalı iş parçası yüzeyine zarar vermememekte, kürlenen yüzeyi malzeme yüzeyinden uzaklaştırmaktadır. Son temizleme işlemi sonrası iş parçası numunesi istenen formu hazır hale gelmiştir. Son temizleme sonrası elde edilen iş parçası numune görseli Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil .39. Son temizleme işlemi tamamlanan iş parçası.

Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra iş parçası numunesinin PCM makinası ile şekilendirilen iş parçası numunelerinin kalite kontrolü yapılarak proses sonlandırılır.

4.2. MALZEME SEÇİMİ

PCM, birçok malzeme çeşidini, şekil ve sertlik sınırlaması olmadan işleyebilme kabiliyetine sahiptir [2-5]. Bu çalışmada, yapılan literatür araştırması sonrası endüstride yaygın kullanım alanına sahip AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. AISI 304 paslanmaz çeliğin kullanılma nedeni, endüstride kullanım alanın fazla ve

işlenebilirliliğin zor olmasıdır. AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşenleri Çizelge 4.1'de verilmiştir [51].

Çizelge .1. Deney numunesi AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşenleri [51].

Kalite	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
304 (1.4301)	%0.08 maks.	%2.0 maks.	%0.045 maks	%0.03 maks.	%0.75 maks.	%18-20	%8-10.5

Literatürde yapılan çalışmalarda, paslanmaz çelik malzeme kullanan araştırmacılar aşındırıcı konsantrasyonu, aşındırma sıcaklığı ve aşındırma sürelerinin Ra, MRR ile Uc üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

4.3. DENEY TASARIMI

AISI 304 paslanmaz çeliğinin fotokimyasal yöntemle işlenmesinde proses parametrelerinin/kontrol faktörlerinin kalite karakteristiği olarak seçilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), boyutsal tamlık (DA) ve aşındırma derinliği (ED) üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla Taguchi Metodu (TM) kullanılmış ve en uygun ortogonal dizi olarak L18 (21 x33) seçilmiştir. TM daha az sayıda deney ile süreç ve ürün kalitesinin arttırılması için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde en iyi parametre değerleri belirlenirken performans özellikleri de optimize edilebilmektedir. İş parçası üzerinde yapılan ön deneyler, literatür önerileri, prototip üretimi gerçekleştirilen fotokimyasal işleme makinesinin performansları prosesleri göz önünde bulundurularak Çizelge 4.2'de verilen deneysel tasarımda işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Fotokimyasal işleme parametreleri ve seviyeleri, uygun ortogonal dizi (L18) ve kalite özellikleri (Ra, DA ve ED) belirlendikten sonra kontrol faktörleri/işleme prosesleri ile kalite karakteristikleri arasındaki ilişkiler Taguchi Metodunun aşağıdaki adımları uygulanarak gerçekleştirilmiştir:

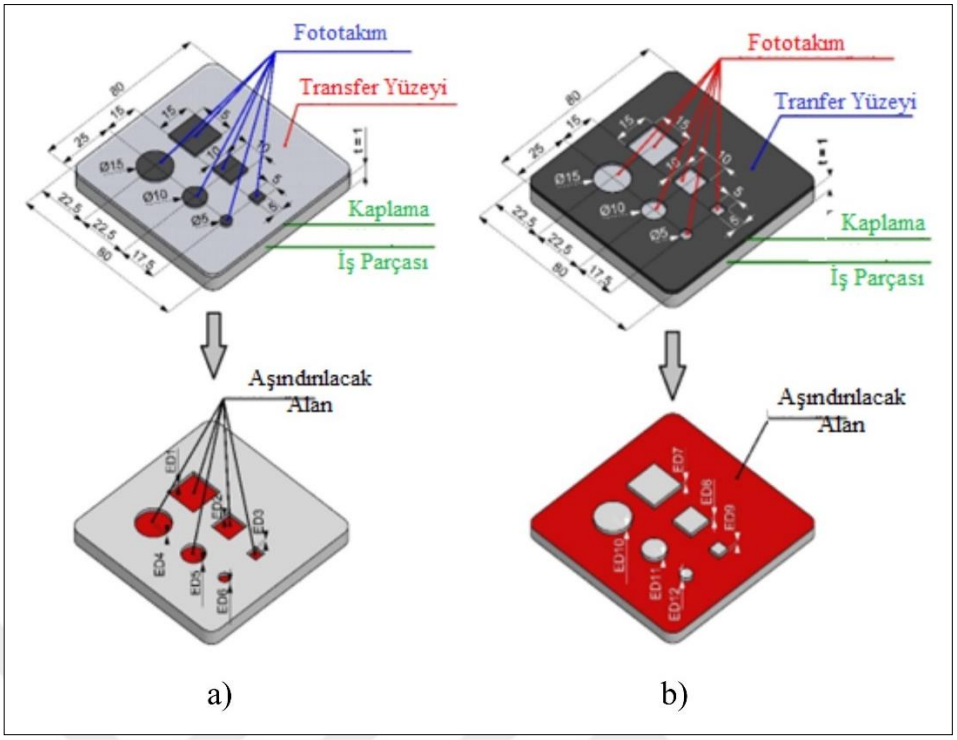
Adım 1: Bu çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğinin fotokimyasal işlenmesinde aşındırılmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin minimum olması istendiğinden "Daha küçük daha iyi" yaklaşımı, aşındırılarak elde edilmiş kare ve dairesel geometrilerin

teknik resimde verilen ölçülerinde olması istendiğinden boyutsal tamlık için “Nominal en iyi” yaklaşımı ve aşındırma derinliğinin maksimum olması istendiğinden “Daha büyük daha iyi” yaklaşımı seçilerek sinyal/gürültü (S/N) oranları desibel (dB) cinsinden hesaplanmıştır.

Adım 2: Deneysel sonuçlar kullanılarak yüzey pürüzlülüğü, boyutsal tamlıktan sapma ve aşındırma derinliği için sinyal gürültü oranları (S/N) hesaplanmıştır. Daha sonra her bir kalite karakteristiği için kontrol faktörlerinin ana etkileri ve yine her bir kalite karakteristiğinin minimum değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir.

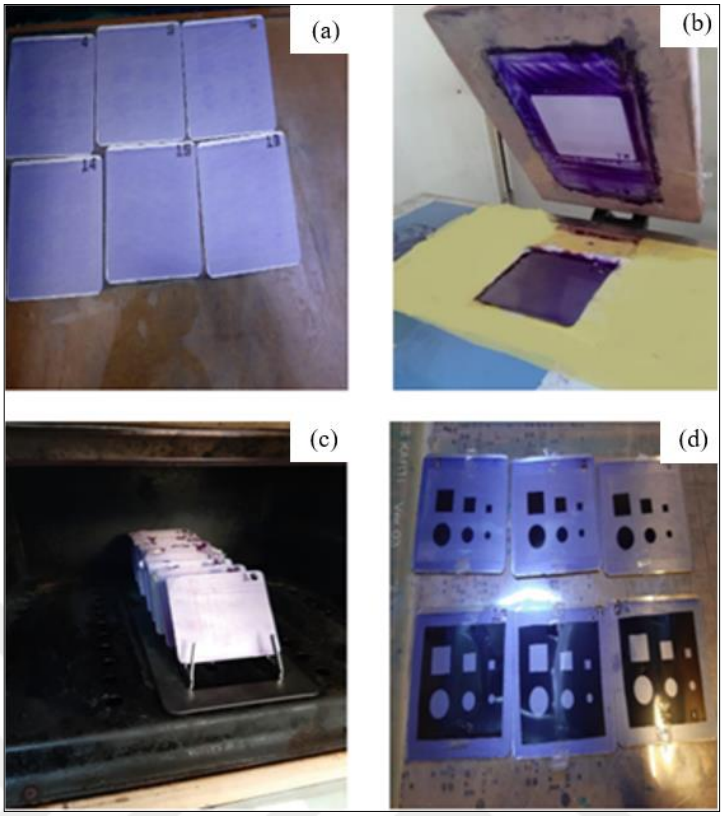
Adım 3: Proses parametrelerinin ve etkileşimlerinin kalite özellikleri üzerindeki etki derecelerini belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA, $P \leq 0.05$ anlamlılık düzeyinde (P) ve %95 güven düzeyinde gerçekleştirilmiştir.

İş parçası numunesi ölçüleri 80x80x1 mm olarak seçilmiştir. Şekil 4.40'ta kullanılan fototakım tasarımına ait görsel verilmiştir. Şekil 4.40 a'da bu çalışmada “Doğrudan maruz bırakma aracı (DET)” olarak adlandırılan ilk takımın tasarımı, Şekil 4.40 b'de “Ters pozlama aracı (RET)” olarak adlandırılan ikinci model fototakım veilmiştir. Şekil 4.40'ta görüldüğü gibi, korunmak istenen alanlar örtünün opak bölgeleri ile kaplanırken, aşındırılacak alanlar takımın koyu yüzeyleri ile maskelenmiştir. PCM işleminden sonra maksimum aşındırma derinliği, Ra ve boyutsal tamlık DA gibi performans parametreleri geometrik farklılıklardan dolayı farklı olabilmektedir. Bu nedenle, bu çıktı parametreleri her bir model için ölçülecektir.



Şekil .40. Deneysel iş parçası ve kullanılan fototakım.

Tasarımın ardından, Şekil 4.41-a'da gösterildiği gibi deneysel iş parçaları elde edilir. İş parçaları, Brinell sertlik değeri 180HB30 olan AISI 304 paslanmaz çelik (SS-304) plakalardan lazer kesim ile üretilmektedir. PCM işlemeden önce, iş parçasının yalnızca UV ışınlarına maruz kalan yüzeylerinin kimyasal aşındırma yoluyla aşındırılması için iş parçaları UV'ye duyarlı boya ile kaplanmakdır. Ayrıca, UV'ye duyarlı boyanın uygulanmasında oluşan kusurları önlemek için fototakım yerleştirmeden önce iş parçası numuneleri kurutulmaktadır. Bu nedenle aşındırma işlemlerinden önce ön temizleme, kaplama ve kurutma işlemleri yapılmıştır. Ön temizleme işleminin süresi 15 sn. ve tüm iş parçaları için sabit tutulmuştur. Kaplama işlemi, Şekil 4.41-b'de gösterildiği gibi bir serigrafi işlemi ile gerçekleştirilmiştir. UV'ye duyarlı boyanın kalınlığı tüm iş parçaları için 120 µm'dur. Kaplanmış levhalar Şekil 4.41-c'de gösterildiği gibi bir fırın içinde ısıtma işlemi ile kurutulurken, kurutma sıcaklığı ve süresi her iş parçası için 90°C ve 15 dakika olarak belirlenmiştir. Kurutma işleminden sonra, Şekil 4.41-d'de gösterildiği gibi paslanmaz çelik plakaların üzerine tasarlanan fototakım yerleştirilmiştir. Fotorezist desenleri, 250 µm kalınlığında 300 DPI görüntü kalitesinde selüloz asetat filmlere basılmıştır. Desenler AutoCAD yazılımında çizilmiştir.



Şekil .41. Deneyler işlem sırası, a) Deneysel iş parçaları, b) Serigrafi işlemi, c) Fırın ısıtma işlemi, d) Fototakım yerleşimi.

Ön deneyler, literatür önerileri ve fotokimyasal işleme makinesinin kapasitesi bu çalışmada kullanılan parametrelerin sınırlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmada, sadece fototakım model tipinin ($P_{takım}$), UV'ye maruz kalma süresinin (t_{uv}) ve aşındırma süresinin ($t_{aşınma}$) etkileri incelenmiştir. Çıktı parametreleri Ra, ED ve boyutsal tamlık DA olarak belirlenmiştir. Boyutsal tamlık, dairesel ve kare desenler için hesaplanan nominal ve gerçek boyutlar arasındaki yüzde farkı olarak tanımlanabilir;

$$(DA)_{diresel} = 100\% - \frac{D_{gerçek} - D_{nominal}}{D_{nominal}} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$(DA)_{kare} = 100\% - \frac{L_{gerçek} - L_{nominal}}{L_{nominal}} \times 100\% \quad (4.2)$$

Burada gerçek ve nominal dairesel modellerin gerçek ve nominal çaplarıdır ve $L_{gerçek}$ ve $L_{nominal}$ kare modelin gerçek ve nominal boyutlarını temsil eder. Diğer parametreler,

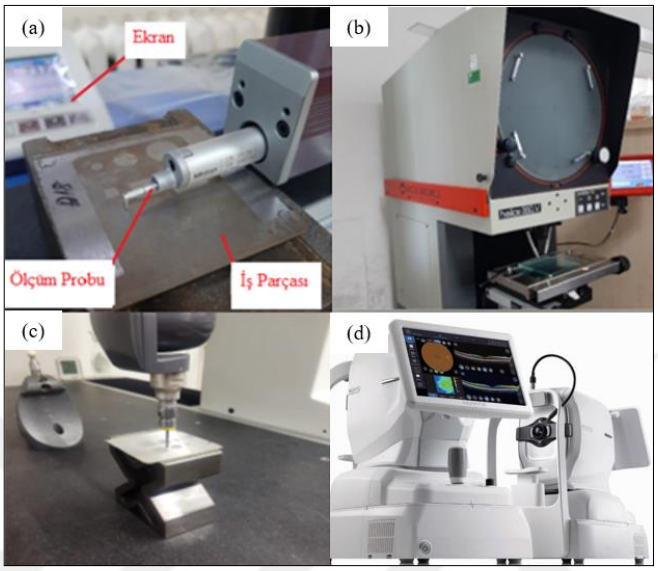
ön temizleme süresi ($t_{ön\ temizleme}$), kurutma sıcaklığı ($T_{kurutma}$), kurutma süresi ($t_{kurutma}$), banyolama süresi ($t_{banyolama}$) olup, deneyler sırasında tüm kimyasal işlem birimlerinin (T_{ort}) ortalama sıcaklığı sabit tutulmuştur. Deneysel prosedürleri optimize etmek için, kontrol faktörlerinin etkileri üç büyüklük seviyesinde değerlendirilmiştir.

Çizelge .2. Ortogonal diziye göre deneysel tasarım.

Deney. No	**$P_{takım}$**	**t_{uv}**	**$t_{aşınma}$**
1	DET	80	300
2	DET	80	600
3	DET	80	1200
4	DET	120	300
5	DET	120	600
6	DET	120	1200
7	DET	160	300
8	DET	160	600
9	DET	160	1200
10	RET	80	300
11	RET	80	600
12	RET	80	1200
13	RET	120	300
14	RET	120	600
15	RET	120	1200
16	RET	160	300
17	RET	160	600
18	RET	160	1200

Tüm ölçüm cihazları Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Tüm çıktı parametreleri her model tipi ve boyutu için değişken olduğundan, çıktı parametrelerinin ölçümleri her model tipi ve boyutu için tekrarlanmıştır. PCM işleme deneyleri tamamlandıktan sonra Ra değerleri, Şekil 4.42-a'da gösterilen Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile 0.01-100 µm ölçüm aralığı ile her aşınmış yüzey için ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri, işlenmiş her dairesel ve kare modelde ölçülmüştür. Boyutsal tamlık ölçümleri, Şekil 4.42-b'de verilen 1 µm çözünürlüğe sahip Microtecnica Helios 350V profil projektörü ile yapılmıştır. Şekil 4.42 c'de sunulan bir CMM (DEA GLOBAL SILVER), aşındırma derinliğini <1 µm hassasiyetle ölçmek

için kullanılmıştır. Her iş parçasının yüzey özellikleri, Şekil 4.42-d'de gösterilen Huvitz mikroskobu ile incelenmiştir. Tüm ölçümler her ölçüm için üç kez tekrarlanmış ve tüm sonuçlar ortalama değerler olarak elde edilmiştir.



Şekil .42. Deneyler sırasında kullanılan tüm ölçüm cihazları, a) Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı, b) Microtecnica Helios 350V profil projektör, c) CMM (Dea Global Silver), d) Huvitz.

Taguchi yöntemi, optimal deney sayısını hesaplamak için deneysel prosedürü optimize etmek için uygulanır. Buna göre, deney sonuçlarına üç ana faktör ($P_{takım,\ uv\ ve\ aşınma)}$ etki ederken, $P_{takım}$ faktörü 2, diğer faktörler 3 seviyelidir. Bu nedenle, her bir kontrol faktörünün kombinasyonu ile Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi L18 (2^1x3^2) ortogonal dizi kullanılmıştır ve her deney üç kez tekrarlanmıştır.

Sistemin kontrol parametrelerine yönelik varyanslara verdiği yanıtları değerlendirmek için, her bir kontrol parametresi için seviyeleri ile birlikte ortalama yanıt toplamları belirlenmiştir. Optimum Ra "en düşük" olarak kabul edilirken, ED ve DA optimal değerleri "en yüksek" olarak kabul edilmiştir. Gürültü faktörlerinin sistemin tepkileri üzerindeki etkilerini hesaplamak için, Sinyal Gürültü (S/N) oranları aşağıdaki denklem ‘den hesaplanır ve ortalama yanıt toplamlarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$S/_N = -10\log[\sum_{i=1}^{n} y_i{}^2]$$

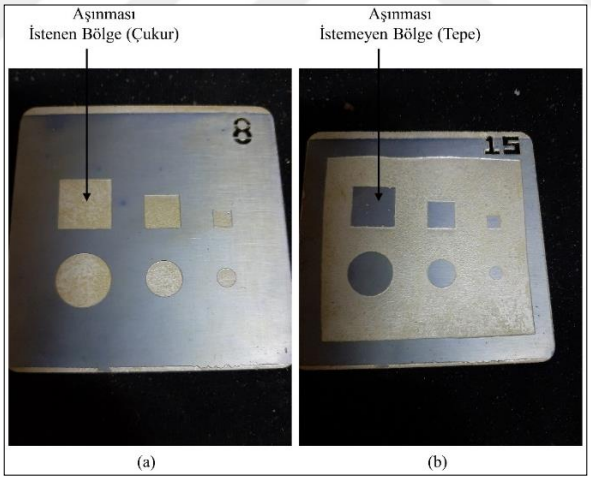
Her bir kontrol faktörünün yanıtlar üzerindeki ana etkisini belirlemek için Varyans Analizi yapılmıştır. ANOVA değerlendirmeleri, 0.05'ten düşük bir anlamlılık düzeyi (P) ve %95 güven düzeyi (CL) için gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel hesaplamalar, Minitab yazılımında yapılmıştır.

4.4. DENEYLER VE ÖLÇÜMLER

Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi Taguchi L18 ortogonal dizine göre hazırlanan numuneler numaralandırılarak temizleme, kaplama, fırınlama işlemi uygulanmıştır.

4.4.1. Fotokimyasal İşleme Deneyleri

PCM işleme deneyleri hazırlanan yarı otomatik sistemde gerçekleştirilmiştir. İşlemler kontrollü olarak deney tasarım sırasına göre yapılmıştır. Hazırlanan numunelere ait görsel Şekil 4.43'te göterilmiştir.



Şekil .43. Üretimi gerçekleştirilen prototip PCM ile işlenen iş parçası numunesi.

Deneyler sırasında işlem parametrelerinden sabit tutulanlar kontrollü olarak işleme alınmıştır. Sapmalar oluştuğu anda sistem durdurulmuş veya istenen değerlere ulaşılana kadar beklenmiştir. Aşındırmanın kontrollü yapılmasının nedeni istenen ölçü ve tamlıkta iş parçası numuneleri elde etmektir. Deneyler sırasında sapmalar, sıcaklık kaybı ve püskürtme kafalarında oluşan tıkanmalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Tıkanmalar kimyasalın her tarafa eşit dağılmaması ve bunun sonucu olarak aşınma

düzlemselliğinin kaybına sebep olmaktadır. Düzlemsellik kaybı kesme olarak tabir edilen işlemede önemli olmasa da belli bir ölçüye kadar aşındırılması istenen işlemlerde önemi yüksektir. Yüzey topolojisi ve CMM ölçümleri incelendiğinde gözle görülmeyen bu eğik aşınmalarla karşılaşılmıştır. Tüm aşındırmalar yapıldıktan sonra yapılan aşındırmaların derinlik, boyutsal tamlık, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topolojilerine bakılmıştır.

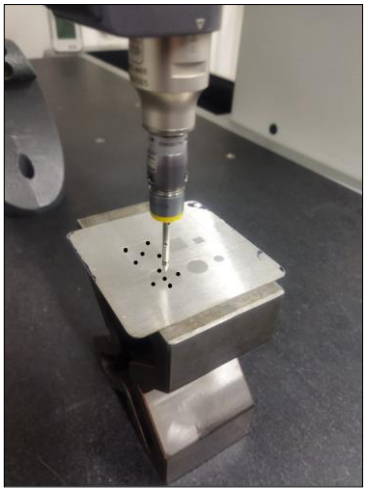
4.4.2. Aşındırma Derinliği

Aşınma derinlik değeri bize aşındırmanın verimliliği hakkında bilgi vermektedir. PCM işleme ile AISI 304 kalite çeliğinin aşındırma işlemi yapılmadan önce kullanılan kimyasalın uygunluğu hakkında araştırma yapılmıştır. Yapılan aşındırma işlemi sonrasında her numune üzerinde 5 farklı noktadan 3 tekrarlı ölçümü alınarak ortalama değerler elde edilmiştir. Ölçümler CMM (DEA GLOBAL SILVER) cihazında yapılmıştır. Yapılan ölçümlere ait görsel Şekil 4.44 ‘te gösterişlmiştir.



Şekil .44. PCM makina ile AISI 304 iş parçası numunesi aşındırma işlemi sonrası elde edilen aşınma derinliğinin CMM cihazı ile ölçümü

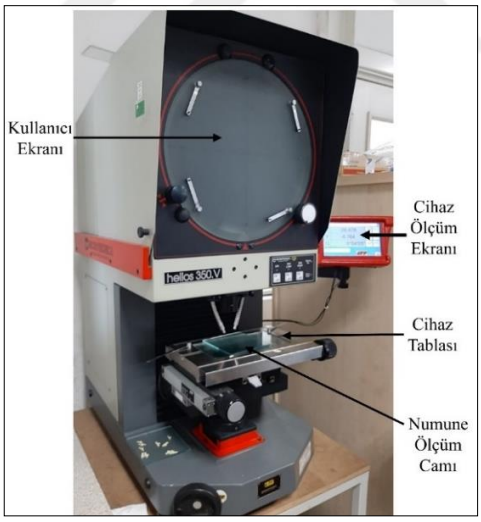
Ölçümler her şeklin beş farklı noktasından üçer kez alınmıştır. CMM cihazı ile aşındırma derinliğin elde adilmesi ani görüntüsü Şekil 4.45’te gösterilmiştir.



Şekil .45. CMM cihazı ile aşındırma derinliği ölçme anı görüntüsü.

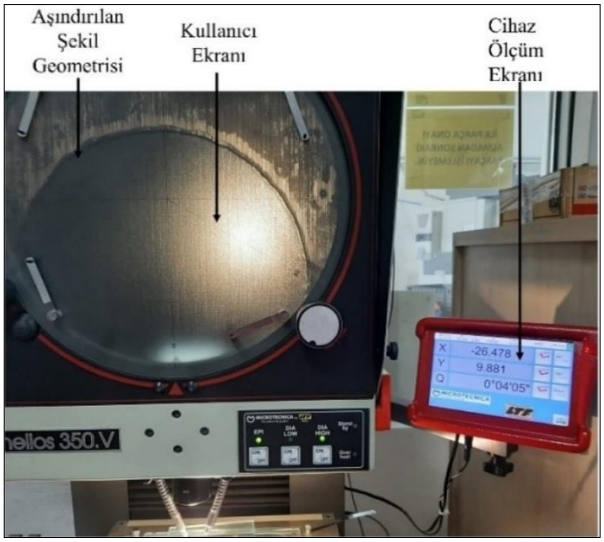
4.4.3. Boyutsal Tamlık

Boyutsal tamlık ölçümleri Şekil 4.46'da verilen 1 μm çözünürlüğe sahip Microtecnica Helios 350V profil projektörü ile yapılmıştır.



Şekil .46. Boyutsal tamlık ölçümünün yapıldığı microtecnica Helios 350V profil projektörü.

Şekil 4.47'de ölçüm yapılan numuneye ait görsel verilmiştir.



Şekil .47. Boyutsal tamlık ölçümü yapılan iş parçası numunesinin ekran görüntüsü.

Ölçümler her numune için üç kez tekrarlanmıştır. Yapılan ölçümlerin ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir.

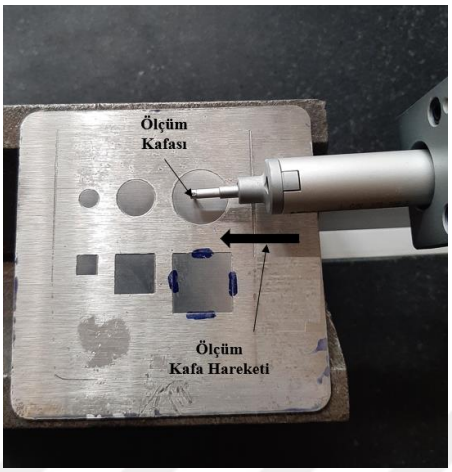
4.4.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Şekil 4.48'de gösterilen Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri 3 farklı bölgeden 3 tekrarlı yapılmıştır.



Şekil .48. Mitutoyo Surftest SJ-201 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

Yüzey pürüzlülük cihazı ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü anı Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



Şekil .49. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm görüntüsü.

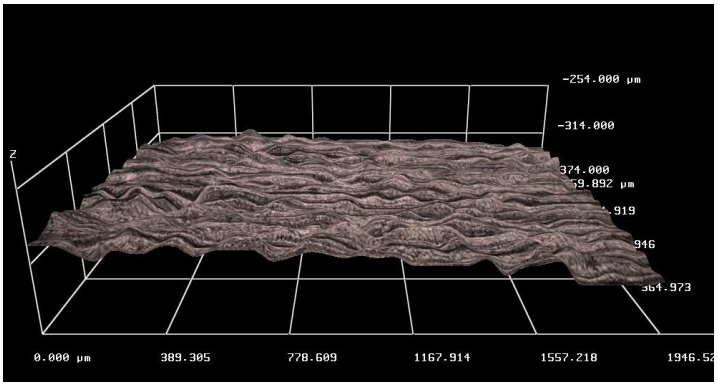
4.4.5. Yüzey Topolojisi

Yüzey topoloji ölçümleri Şekil 4.50'de gösterilen Huvitz mikroskobu cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil .50. Yüzey topoloji ölçümlerinin yapıldığı Huvitz mikroskobunun genel görüntüsü.

Huvitz mikroskobu, 3D topografi elde etmek ve bu görüntülerden yola çıkarak profil ve ölçüm yapmak üzere dizayn edilmiş bir mikroskoptur. Huvitz mikroskobu ile yüzey topolojisi ölçümü sonucu elde edilen görüntüsü Şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil .51. Yüzey topografi ölçüm görüntüsü.

Ölçümler her numune için üç kez tekrarlanmıştır. Yapılan ölçümlerin ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan ölçüm değerlendirmelerine bölüm beşte detaylıca değinilecektir.

BÖLÜM 5

TASARIM, BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde özgün olarak tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen PCM makinesinde yapılan fotokimyasal işleme deneyleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla tartışılarak yorumlanmıştır.

5.1. MAKİNE TASARIMI

Tasarımı ve imalatı yapılan prototip PCM makinede, optimum işleme parametrelerin belirlenmesi için farklı aşındırma şartlarında fotokimyasal işleme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde, her parametrede üç tekrarlı sistematik deneyler ve ölçümler yapılmıştır. Fotokimyasal işleme prosesi yıkama (yüzey temizleme) işlemi ile başlayıp, fotorezistin uygulanması, uygulanan fotorezistin kurutulması, pozlama, banyolama (develop), aşındırma ve son temizlik işlemi ile fotorezistin yüzeyden uzaklaştırılması işlemi ile son bulmaktadır. Bu proje kapsamında tasarlanan fotokimyasal işleme makinesi dört bölümden oluşmaktadır. Proses gerekliliği olan yedi aşamanın ilk üç tanesi makine dışından yapılmaktadır. Bunlar ön temizleme, serigrafi baskı ve kurutma işlemidir. AISI 304 paslanmaz çeliği üzerinde ön deneylerinde başarılı bir şekilde tamamlanmasından sonra tasarımı ve üretimi yapılan fotokimyasal işleme makinesinin tüm proseslerinin senkronize bir şekilde çalışmasını kontrol etmek için makine ve üniteler üzerinde tekrar detaylıca mekaniksel ve elektriksel testleri yapılmıştır. Bu kontrol testlerinden sonra tüm sistem bileşenlerinin adaptasyonu başarılı bir şekilde sağlanmış olduğu teyit edilmiştir.

5.1.1. Tahmini Maliyet Hesabı

PCM makinasının tasarımı, endüstride sürekli olarak kullanılması amaçlanarak endüstrinin beklentilerine cevap verecek nitelikte yapılmıştır. Bu tasarıma başlanmadan önce ilk olarak PCM işleme yapan olan firmaların talepleri göz önüne alınmıştır. Firmaların talepleri şu şekildedir: Üretim hızı yüksek bir makina, mevcut makinaların sahip olmadığı hassasiyeti ve yüksek verimlilik, kimyasal maliyeti ve açığa çıkan gazların vermiş olduğu rahatsızlık ile üretilen parçalarda oluşan bireysel hataların an aza indirilmesi. PCM makinasının parça ve bileşenleri literatür araştırmaları, firma talepleri ve üretim esnasında görülen problemlerin çözümleri doğrultusunda tasarlanmıştır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak maliyet hesabı yapılmıştır. Maliyeti düşürmek için makina parçaları olabildiğince sade tasarlanmıştır. Gereksiz ayrıntılara ve karmaşıklığa yer verilmemiştir. Ürüne yüksek talep gelmesi durumunda piyasanın beklentisini en kısa sürede karşılamak için temini ve imalatı kolay malzemeler seçilmiştir. Bu seçimler yapılırken kaliteden hiçbir şekilde ödün verilmemiştir. PCM makinasına ait maliyetler Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge .1. PCM makinasına ait maliyetler çizelgesi.

Makine parçası	**Maliyet**	**Yüzdelik pay**
Şase	500$	5,2
Motor ve Sürücüler	750$	7,9
Kimyasal Tanklar	2000$	20,9
Kimyasal Motorlar	3000$	31,4
Elektronik Sarf Malzemeler	800$	8,4
Hortumlar	150$	1,6
Sarf Malzemeler	900$	9,4
Kimyasal Filtre	400$	4,2
Fırın	200$	2,1
Kurutma Ünitesi	200$	2,1
Kaplama Boya	300$	3,1
UV Kabini	350$	3,7
Toplam	9550$	%100

PCM makinası için yapılan tahmini maliyet hesabı, 2023 yılına göre yapılmıştır. Üretim yapılacağı zaman farklı malzeme tercihleri ve parça boyutunda değişiklikler

yaparak maliyet düşürülebilir. Hesaplanan maliyete kâr ve üretim esnasındaki işçilik gideri eklenmemiştir. Mevcut sistemlerin piyasa araştırması yapılmıştır. Yapılan piyasa araştırmasına göre oluşturulan fiyat çizelgesi Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge .2. PCM mevcut sistem maliyetler çizelgesi.

Makine adı	**Maliyet**
Temizleme Ünitesi	8000$
Fototakım Baskı Makinası	6500$
Pozlama Ünitesi	4000$
Banyolama Ünitesi	8000$
Aşındırma Ünitesi	8000$
Kurutma Ünitesi	2500$
Son Temizleme Ünitesi	8000$
Toplam	45000$

Fiyatlar ve üretilen makine karşılaştırıldığında piyasa koşullarına göre sistemin geliştirilmesi ve üretilmesi ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Makinanın en kritik parçaları farklı imalat yöntemleri ile üretilebildiği gibi, firmalardan hazır şekilde de alınabilmektedir. Sonuç olarak PCM makinasını geliştirmek için; piyasada kullanılan cihazlar ve literatürde kullanılan cihazlar irdelenmiş. PCM makinası en verimli ve en hızlı şekilde gerçekleştirebilmek adına bileşen tercihleri, mekanizmayı oluşturacak parçaların tasarımı ve montajı yapılarak PCM makinası çalışması tamamlanmıştır.

5.2. AŞINDIRMA DERİNLİĞİ

Taguchi L18 deney düzeneğine göre yapılan testler sonucunda elde edilen aşındırma derinlikleri Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. PCM işlemine göre aşındıra derinliği en yüksek en iyi karakteristiğine göre belirlenmiştir. Buna göre 3. deneyde en yüksek aşındırma derinliğine ulaşılmıştır. Beklendiği gibi, aşındırma süresinin arttırılması, ön deneyler ve literatürdeki çalışmalarla paralel olarak aşındırma derinliğini artırmaktadır.

Çizelge .3. Taguchi L18 deney düzeneğine göre yapılan AISI 304 paslanmaz çeliğin aşınma derinliğinin deneysel sonuçları.

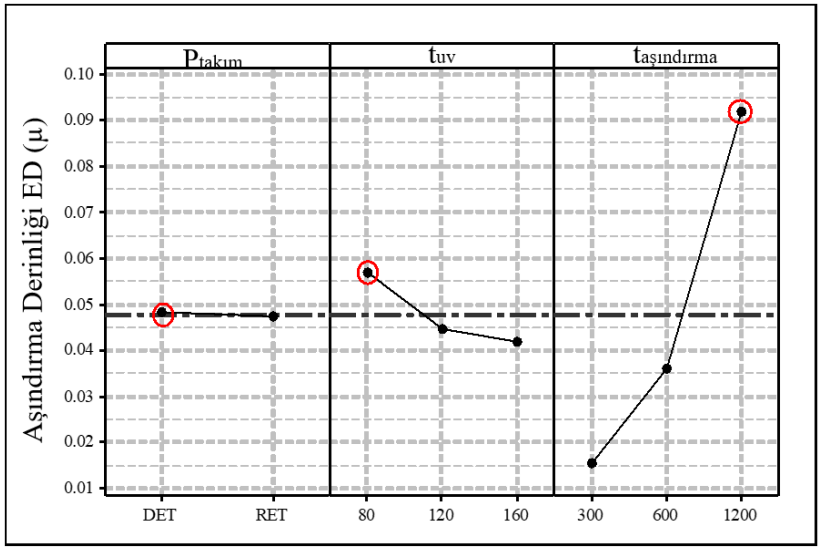
Dny. No	Kontrol Parametreleri			Aşındırma Derinliği Ölçümleri								
	$P_{takım}$	t_{uv}	$t_{aşındırma}$	ED1	ED2	ED3	ED4	ED5	ED6	ED7	ED8	EDort
1	DET	80	300	0.010	0.012	0.020	0.020	0.013	0.015	0.010	0.009	0.0136
2	DET	80	600	0.030	0.025	0.025	0.040	0.040	0.030	0.018	0.050	0.0323
3	**DET**	**80**	**1200**	**0.120**	**0.120**	**0.150**	**0.130**	**0.190**	**0.100**	**0.120**	**0.160**	**0.1363**
4	DET	120	300	0.020	0.023	0.032	0.020	0.010	0.018	0.018	0.020	0.0201
5	DET	120	600	0.030	0.040	0.040	0.045	0.020	0.030	0.020	0.035	0.0325
6	DET	120	1200	0.090	0.110	0.120	0.140	0.115	0.090	0.140	0.125	0.1163
7	DET	160	300	0.010	0.011	0.030	0.025	0.032	0.020	0.010	0.010	0.0185
8	DET	160	600	0.045	0.055	0.060	0.040	0.065	0.060	0.045	0.055	0.0531
9	DET	160	1200	0.070	0.050	0.075	0.070	0.040	0.040	0.040	0.050	0.0544
10	RET	80	300	0.010	0.015	0.015	0.010	0.020	0.022	0.022	0.015	0.0161
11	RET	80	600	0.040	0.050	0.030	0.070	0.080	0.045	0.035	0.045	0.0494
12	RET	80	1200	0.100	0.110	0.098	0.085	0.090	0.090	0.092	0.090	0.0944
13	RET	120	300	0.008	0.012	0.008	0.017	0.010	0.020	0.010	0.010	0.0119
14	RET	120	600	0.040	0.030	0.030	0.020	0.018	0.023	0.020	0.015	0.0245
15	RET	120	1200	0.065	0.055	0.075	0.085	0.060	0.050	0.050	0.065	0.0631
16	RET	160	300	0.009	0.008	0.017	0.015	0.008	0.010	0.018	0.013	0.0123
17	RET	160	600	0.022	0.017	0.018	0.030	0.040	0.032	0.022	0.023	0.0255
18	RET	160	1200	0.110	0.070	0.100	0.115	0.085	0.070	0.075	0.070	0.0869

Kontrol faktörlerinin farklı seviyelerindeki ortalama aşınma derinliği (ED) değerleri ve ortalama ED değerleri için ortalama S/N oranı değerleri Çizelge 5.4'de sunulmuştur. Çizelge 5.4'de "*" ile belirtildiği üzere; maksimum değerlerde ED değerleri elde etmek için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri $P_{takım}$=DET, t_{uv}=80sn, $t_{aşındırma}$=1200sn olarak belirlenmiştir.

Çizelge .4. Aşındırma derinliği için ANOVA yanıt çizelgesi.

Seviye	$P_{takım}$	t_{uv}	$t_{aşındırma}$
1	0.04836*	0.05702*	0.01542
2	0.04733	0.04473	0.03622
3	-	0.04178	0.09190*
Fark	0.00102	0.01523	0.07648
Sıralama	3	2	1

Aşındırma derinliği için ortalama tepki toplamları Çizelge 5.4'te verilirken çizelge Şekil 5.1'de grafik olarak gösterilmiştir. DET ve RET kullanımının aşındırma derinliği üzerinde hemen hemen hiçbir etkisi yoktur, oysa aşındırma süresi en etkili faktördür.



Şekil .1. S/N grafiği Proses parametrelerinin aşındırma derinliği üzerine etkisi.

Ayrıca, aşındırma derinliği, pozlama süresinin artmasıyla azalma eğilimindedir. Elde edilen optimum değer için yüksek aşındırma 1200. saniyede elde etmiştir. Bunun etkileşim süresinin artması ve daha fazla tekrarlayan çarpışmanın meydana gelmesine sebep olması sonucunda aşınmanın arttığı tespit edilmiştir (Tiwari vd., 2021).

Çizelge .5. Aşındırma derinliği için parametrelere bağlı ANOVA yanıt çizelgesi.

Kontrol Parametreleri	**DoF**	**Kareler Toplamı**	**Kare Ortalaması**	**F**	**P**	**Kontr. %**
$P_{takım}$	1	0.000005	0.000005	0.01	0.916	0.02
t_{uv}	2	0.000783	0.000392	0.97	0.407	3.21
$t_{aşındırma}$	**2**	**0.018766**	**0.009383**	**23.25**	**0.000***	**76.92**
Hata	12	0.004843	0.000404	-	-	19.85
Toplam	17	0.024397	-	-	-	100.00
S=0.02009, R^2=80.1%, Düzeltilmiş R^2=71.9% * İstatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip kontrol faktörü (P<0.05)						

ANOVA'nın aşındırma derinliği için sonucu Çizelge 5.5'te sunulmuştur. P<0.05 anlamlılık kriterini takiben aşındırma süresi, aşındırma derinliği parametresi üzerinde tek önemli faktördür, aşındırma süresinin F değeri de diğer parametrelerden daha fazladır.

5.3. BOYUTSAL TAMLIK

PCM işlemi sonucunda elde edilen yüzeylerin boyutsal tamlığı değerlendirilmiştir. Boyutsal tamlıkta sonuçlarının ideal değerlere yakın olması istenir. İşleme hassasiyetinin belirlenmesi için boyutsal tamlık ölçümleri yapılmıştır. PCM işlemi sonucunda elde edilen deneyin boyutsal tamlığı için ölçüm sonuçları Çizelge 5.6'da verilmektedir. Yüzey topolojileri üzerindeki görsel inceleme değerlendirmelerine benzer şekilde, DET kullanımı, RET kullanımına kıyasla daha doğru geometriler sağlar. Bu da daha küçük aşındırma alanlarının PCM için daha doğru geometriler sağladığı sonucuna varılabilir. Öte yandan, pozlama süresi ve aşındırma süresinin boyutsal tamlık üzerinde küçük ve belirsiz etkileri vardır. Ayrıca, kare ve dairesel desenler arasında boyutsal tamlıkta önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir. Boyutsal tamlık için en ideal sonuçlar deney 7, Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge .6. AISI 304 paslanmaz çeliğin boyutsal tamlık deneysel sapma.

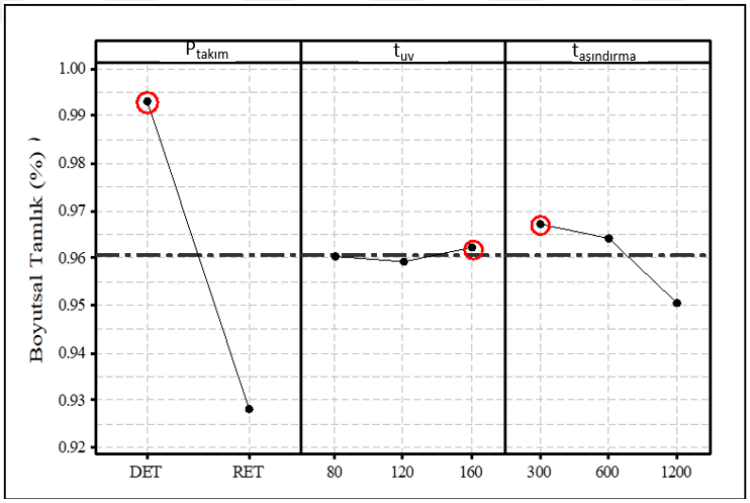
Dny.	**Kontrol Parametreleri**			**Kare için Boyutsal Tamlık**					**Daire için Boyutsal Tamlık**				
No	$P_{takım}$	t_{uv}	$t_{aşındırma}$	DA_1	DA_2	DA_3	DA_{ort}	**%**	DA_1	DA_2	DA_3	DA_{ort}	**%**
1	DET	80	300	14.95	14.86	15.02	14.94	99.61	14.97	14.93	14.97	14.95	99.69
2	DET	80	600	15.14	15.01	14.98	15.05	100.31	15.09	15.01	15.08	15.06	100.39
3	DET	80	1200	15.08	15.11	15.18	15.12	100.82	15.16	15.21	15.16	15.17	101.16
4	DET	120	300	14.90	14.91	14.90	14.90	100.67	15.00	14.88	14.89	14.93	99.51
5	DET	120	600	15.08	14.98	15.05	15.04	100.23	15.05	15.04	15.03	15.04	100.28
6	DET	120	1200	15.05	15.14	15.11	15.10	100.67	15.10	15.33	15.13	15.19	101.24
7	**DET**	**160**	**300**	**15.01**	**14.98**	**14.99**	**15.00**	**99.97**	**14.97**	**14.96**	**14.93**	**14.95**	**99.70**
8	DET	160	600	15.08	15.08	15.11	15.09	100.60	15.09	15.04	15.09	15.07	100.48
9	DET	160	1200	15.21	15.21	15.21	15.21	101.39	15.16	15.12	15.26	15.18	101.21
10	RET	80	300	14.18	14.08	14.15	14.14	94.24	14.05	14.01	14.08	14.04	93.63
11	RET	80	600	14.04	14.08	14.08	14.07	93.79	14.01	14.06	13.99	14.02	93.44
12	RET	80	1200	13.89	13.89	13.79	13.86	92.39	13.75	13.62	13.67	13.68	91.21
13	RET	120	300	14.18	14.18	14.21	14.19	94.59	14.07	14.07	14.14	14.09	93.94
14	RET	120	600	14.02	14.05	13.96	14.01	93.39	13.87	13.93	13.96	13.92	92.79
15	RET	120	1200	13.72	13.80	13.73	13.75	91.66	13.69	13.60	13.58	13.62	90.83
16	RET	160	300	14.24	14.24	14.24	14.24	94.95	14.18	14.08	14.14	14.13	94.22
17	RET	160	600	14.05	14.08	14.12	14.08	93.88	14.06	13.94	14.08	14.03	93.50
18	RET	160	1200	13.86	13.92	13.67	13.82	92.11	13.86	13.65	13.83	13.78	91.87

Boyutsal tamlık için ortalama yanıt toplamları grafik olarak Şekil 5.2'de verilmiştir ve değerler, Çizelge 5.7'de verilen kontrol faktörlerinin seviyelerine göre çizilmiştir.

Çizelge .7. Boyutsal tamlık için ortalama yanıt toplamları.

Level	$P_{pattern}$	$t_{exposure}$	$t_{etching}$
1	99.31%	96.05%	96.72%
2	92.81%	95.92%	96.42%
3	-	96.22%	95.05%
Fark	6.5%	0.3%	1.67%
Sıralama	1	3	2

Buna göre, kullanılan fototakım türü, diğer parametrelere kıyasla boyutsal tamlık üzerinde daha etkilidir. $P_{takım}$=pozitif, t_{uv}=160 sn ve $t_{aşındırma}$=300 sn en iyi boyutsal tamlık değerini elde etmek için ideal değerler olarak bulunmuştur. Ayrıca pozlama süresi ve aşındırma süresinin boyutsal tamlık üzerindeki etkileri, bu faktörlerin değiştirilmesiyle önemli bir değişiklik meydana getirmektedir ve fototakım kullanımına kıyasla neredeyse yok denecek kadar azdır. Sonuçlar ayrıca artan aşındırma alanının parçaların boyutsal tamlığını azalttığı sonucuna varılmıştır. (Bing vd. 2010)



Şekil .2. Proses parametrelerinin boyutsal tamlık üzerine etkileri.

Boyutsal tamlık için ANOVA'nın sonucu Çizelge 5.8'de verilmiştir. P<0.05 önem kriterine göre, tüm kontrol faktörleri süreci önemli ölçüde etkiler. Bununla birlikte, $P_{takım}$'ın F değeri, P= 0.000 ve F=645.30 ile boyutsal tamlık için kullanılan fototakım ve aşındırma alanının tipinin en baskın faktör olduğunu açıkça göstermektedir.

Çizelge .8. Boyutsal tamlık için ANOVA yanıt çizelgesi.

Kontrol Parametreleri	DoF	Kareler Toplamı	Kare Ortalaması	F	P	Kontr. %
$P_{takım}$	1	0.019012	0.019012	645.30	0.000*	93.47*
t_{uv}	2	0.000027	0.000014	0.46	0.642	0.14
$t_{aşındırma}$	2	0.000947	0.000474	16.07	0.000*	4.65*
Hata	12	0.000354	0.000029			1.74
Toplam	17	0.020340				100.00
S=0.005428, R^2=98.3%, Düzeltilmiş R^2=97.5% * İstatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip kontrol faktörü (P<0.05)						

Pozlama için, boyutsal tamlık erken seviyelerde önemlidir. Boyutsal tamlık elde edildikten sonra önemini kaybetmektedir.

Yapılan deneysel çalışmada literatür çalışmalarına benzer doğrultuda sonuçları elde edilmiştir. Aşındırma alanın değişkenliği kimyasalların etkileşim miktarını arttırdığından boyutsal tamlık etkilenmektedir.

5.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Proses parametreleri kalite karakteristikleri olarak belirlenen minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkilerini araştırmak ve onların optimal seviyelerini belirlemek üzere yapılan tüm deneyler için ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları ve yüzey pürüzlülüğü için en ideal sonuçlar deney 10, Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge .9. AISI 304 paslanmaz çeliğin PCM ortalama yüzey pürüzlülüğü için deneysel sonuçları.

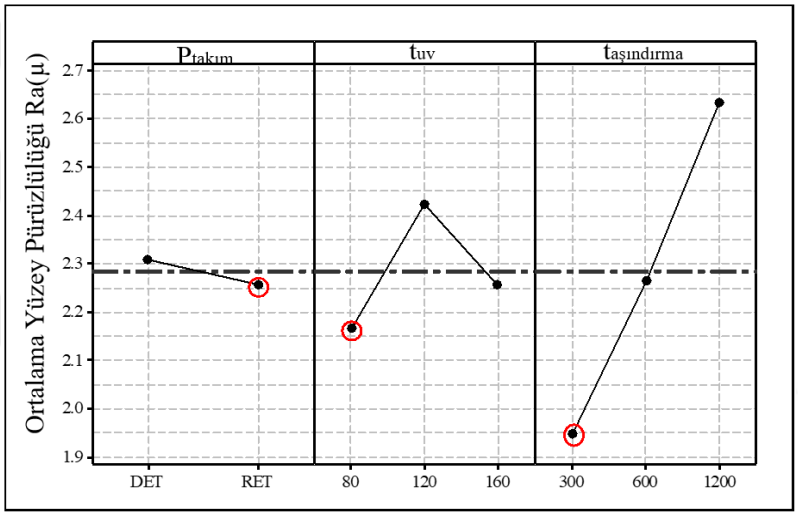
Dny No	Kontrol Parametreleri			Kare için Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri						Daire için Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri					
	$P_{takım}$	T_{uv}	$T_{aşındırma}$	Ra_1	Ra_2	Ra_3	Ra_4	Ra_5	Ra_{ort}	Ra_1	Ra_2	Ra_3	Ra_4	Ra_5	Ra_{ort}
1	DET	80	300	2.26	1.70	2.35	2.47	2.18	2.19	1.33	1.65	1.72	1.50	1.78	1.60
2	DET	80	600	2.66	2.26	2.76	2.94	2.15	2.55	1.87	1.91	2.19	2.07	1.75	1.95
3	DET	80	1200	2.63	2.83	2.91	2.38	2.68	2.69	2.81	2.62	2.37	2.89	2.91	2.72
4	DET	120	300	2.28	1.97	2.32	3.01	2.80	2.47	1.27	1.78	1.43	1.94	1.75	1.63
5	DET	120	600	3.10	2.63	2.94	2.47	2.63	2.75	1.83	2.20	1.90	2.22	2.08	2.05
6	DET	120	1200	3.18	2.89	2.72	3.02	2.71	2.90	3.27	3.39	3.23	3.33	2.84	3.21
7	DET	160	300	2.31	1.94	2.08	2.16	2.33	2.16	1.48	1.88	1.45	1.73	1.37	1.58
8	DET	160	600	2.36	2.18	2.39	2.29	2.26	2.29	1.70	1.77	2.30	2.44	2.52	2.14
9	DET	160	1200	2.21	2.28	2.51	2.29	2.52	2.36	2.30	2.07	2.32	2.48	2.28	2.29
10	**RET**	**80**	**300**	**2.23**	**1.54**	**2.19**	**2.17**	**1.64**	**1.95**	**1.34**	**1.39**	**1.20**	**1.44**	**2.03**	**1.48**
11	RET	80	600	2.30	2.35	2.34	2.05	2.02	2.21	2.10	1.92	1.86	2.13	2.15	2.04
12	RET	80	1200	2.98	2.09	2.24	2.25	2.72	2.45	2.25	2.56	1.97	2.04	2.08	2.18
13	RET	120	300	1.93	1.86	1.30	2.25	2.76	2.02	2.09	2.19	2.06	2.31	2.02	2.14
14	RET	120	600	2.64	2.18	2.19	2.15	2.08	2.25	2.86	2.02	1.91	1.79	2.70	2.26
15	RET	120	1200	2.99	3.49	2.58	3.08	2.32	2.89	3.05	1.92	3.09	2.50	1.99	2.51
16	RET	160	300	2.23	2.67	1.89	1.78	2.26	2.17	2.00	1.95	1.95	1.71	2.30	1.98
17	RET	160	600	2.91	2.79	2.69	2.09	2.18	2.53	2.53	2.02	2.17	1.88	2.21	2.16
18	RET	160	1200	2.43	3.08	2.82	2.41	2.50	2.65	2.42	3.34	2.73	3.00	2.33	2.76

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için parametreleri optimize etmek için, ortalama tepki toplamları, Çizelge 5.10'da verildiği gibi hesaplanır ve elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 5.4'te grafik olarak gösterilmiştir. Buna göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en çok etkisi olan kontrol faktörü, pürüzlülüğü neredeyse lineer olarak etkileyen aşındırma süresidir. Daha uzun aşındırma sürelerinde kimyasal molekülleri arasındaki çarpışmalarının artması nedeniyle düzgün yüzey oluşmayacağından Ra değeri zamanla artar (Agrawal ve Kamble, 2018).

Çizelge .10. Ra için yanıt çizelgesi.

Seviye	$P_{takım}$	t_{uv}	$t_{aşındırma}$
1	2.309	2.168*	1.948*
2	2.257*	2.423	2.266
3	-	2.257	2.635
Fark	0.051	0.255	0.686
Sıralama	3	2	1

Öte yandan pozlama süresi de yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemektedir. Ortalama Ra değeri, pozlama süresi 80 sn'den 120 sn'ye çıktığında artar ve ardından pozlama süresi 120 sn'den 160 sn'ye çıktığında ise azalmaktadır. Seviye 2'de 120 sn pozlama en yüksek yüzey pürüzlülüğünü vermektedir. $P_{takım=negatif}$, t_{uv}=80 sn ve $t_{aşındırma}$=300 sn en düşük yüzey pürüzlülük değerini elde etmek için ideal değerler olarak bulunmuştur. DET ve RET kullanımı arasındaki fark, diğer kontrol faktörlerinden daha az olmasına rağmen, DET kullanımı, RET kullanımına göre daha yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ile sonuçlanır ve bu, deliklerin PCM ile işlenmesinin, levhaları işlemekten biraz daha zor olduğunu göstermektedir.



Şekil .3. Proses parametrelerinin Ra yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi.

ANOVA sonuçları Çizelge 5.11'de sunulmaktadır. P<0.05 göre, yüzey pürüzlülüğü için en önemli kontrol faktörlerinin aşındırma süresi, ($t_{aşındırma}$) olduğu tespit edilmiştir.

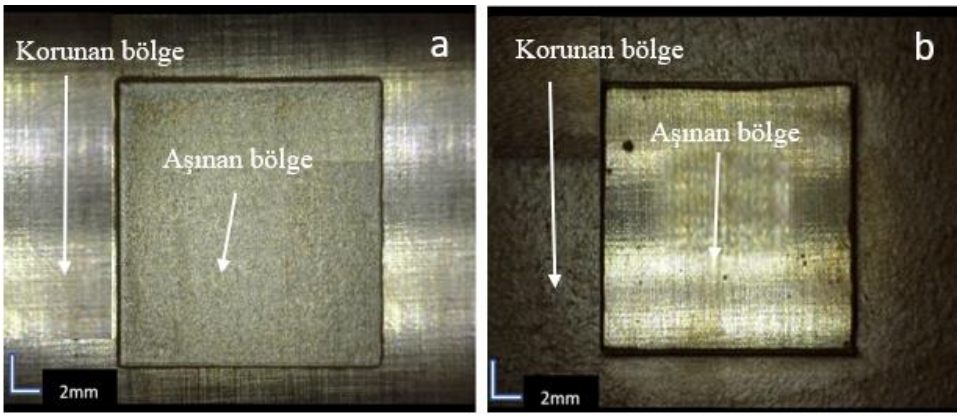
Çizelge .11. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA yanıt çizelgesi.

Kontrol Parametreleri	**DoF**	**Kareler Toplamı**	**Kare Ortalaması**	**F**	**P**	**Kontr. %**
$P_{takım}$	1	0.01186	0.01186	0.43	0.523	0.60
t_{uv}	2	0.20146	0.10073	3.67	0.057	10.28
$T_{aşındırma}$	2	1.41784	0.70892	25.85	0.000*	72.33*
Hata	12	0.32914	0.02743	-	-	16.79
Toplam	17	1.96030	-	-	-	100.00
S=0.1656, R^2=83.2%, Düzeltilmiş R^2=76.2% * İstatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip kontrol faktörü (P<0.05)						

Ayrıca, pozlama süresi (t_{uv}) de $P<0.05$ önem kriterlerine göre uygundur. Bu, pozlamanın yüzey pürüzlülüğü için önemli bir faktör olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, F değeri diğer kontrol faktörlerine kıyasla aşındırma süresi için en büyüktür, bu da aşındırma süresinin yüzey pürüzlülüğü için baskın faktör olduğunu göstermektedir.

5.5. YÜZEY TOPOLOJİSİ

Değişen parametrelerin arasındaki yüzey topolojilerinin ana farklılıkları göstermek için, her bir kontrol faktörünün iki seviyesi için dijital mikroskop görüntüleri alınmıştır. Yüzey topolojileri arasındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Topoloji değerlendirmeleri ED, DA ve Ra çıkış parametreleri üzerinden yapılmıştır. Değerlendirmeler yapılırken her çıkış parametresi ise işlenen şekle göre de ayrıca ele alınmıştır. Böylelikle şekilsel farklılığın işleme özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. ED'nin topoloji üzerinde etkilerini değerlendirmek için en çok ED'nin elde edildiği DET ve RED için deney 3 ve deney 12 incelenmiştir. Bu nedenle, Şekil 5.4'de verilen yüzey görüntüleri 14x büyütülerek karşılaştırmalı yapılmış ve Şekil 5.5'te topolojik görüntüleri verilmiştir.

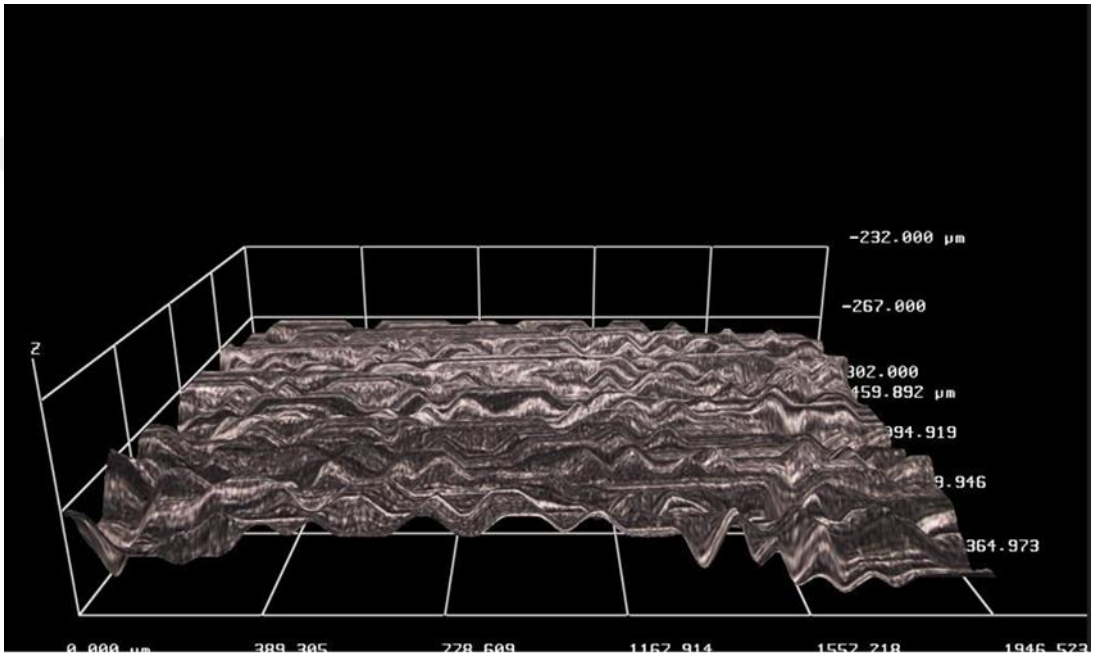


Şekil .4. Dijital mikroskop görüntüleri, (a) Deney 3 için DET kullanımı ve deney 12 için RET kullanım görüntüleri.

Şekil 5.4-a, deney 3 ve deney 12'den elde edilen yüzey topolojilerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, DET kullanımı ile elde edilen aşındırma miktarı, RET kullanımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. DET'te üretilen modellerin RET'e kıyasla daha iyi işlenebilirlik özellikleri gösterdiği anlamına gelmektedir.

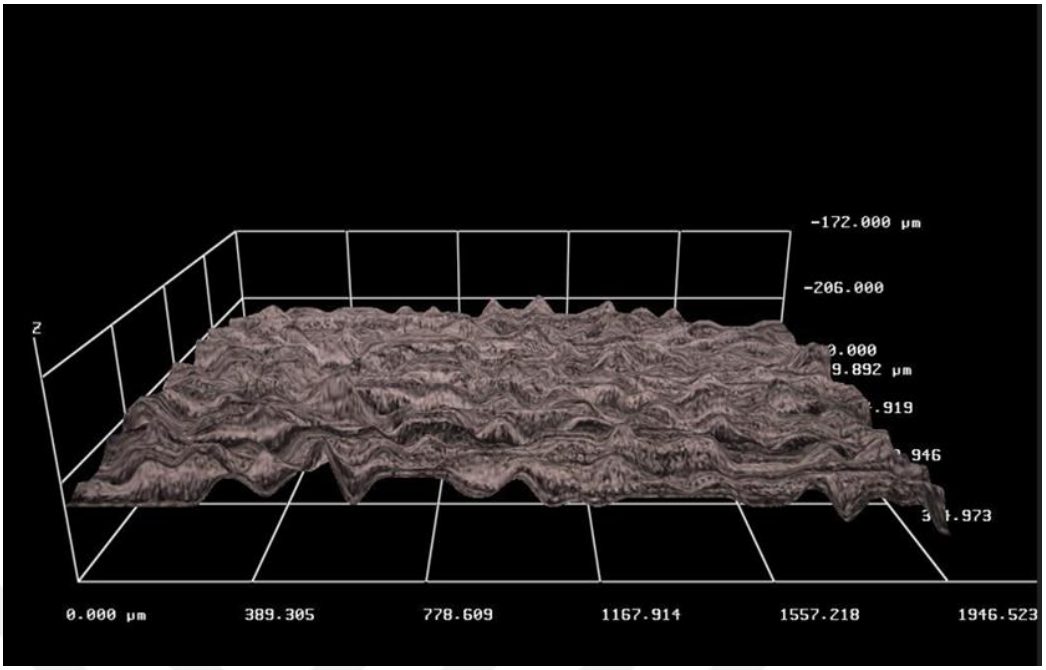
Sonuçlar, pozlama süresinin arttırılmasının daha az pürüzlü yüzey sağladığını göstermektedir. Ayrıca, deney 12'deki aşındırma derinliği, deney 3'tekinden daha fazladır.

Şekil 5.5 deney 3, Şekil 5.6 deney 6'ya ait topolojik ölçümler verilmiştir. Topolojik incelemelerde RET kullanımı ile elde edilen yüzey pürüzlülüğünün, DET kullanımına göre daha düşük olduğu görünmektedir.



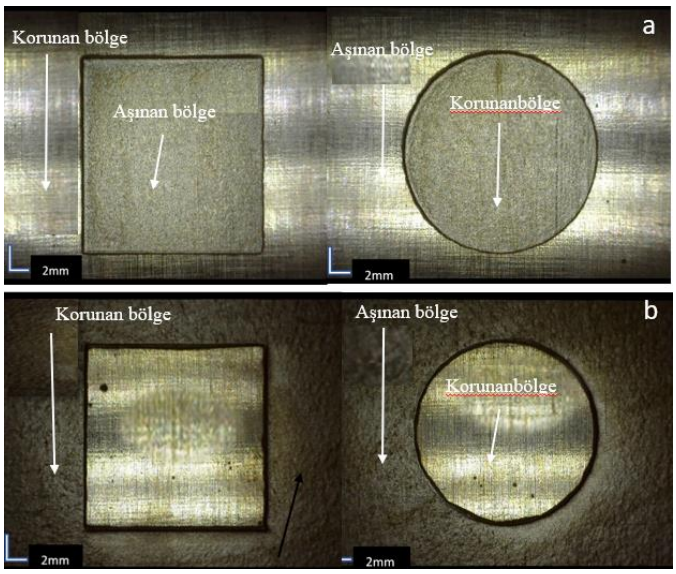
Şekil .5. El Deney 3 için elde edilen topolojik görüntü.

RET kullanımında kimyasala maruz kalan bölge daha fazla olduğu için topolojik etkileri de daha fazla olmaktadır. Topolojik incelemelerde, deney 3'teki pürüzlülük değeri, deney 6'dakinden daha fazladır. Aynı zaman da kimyasalla etkileşimi artan yüzeylerin ED'yi arttırdığını göstermektedir.



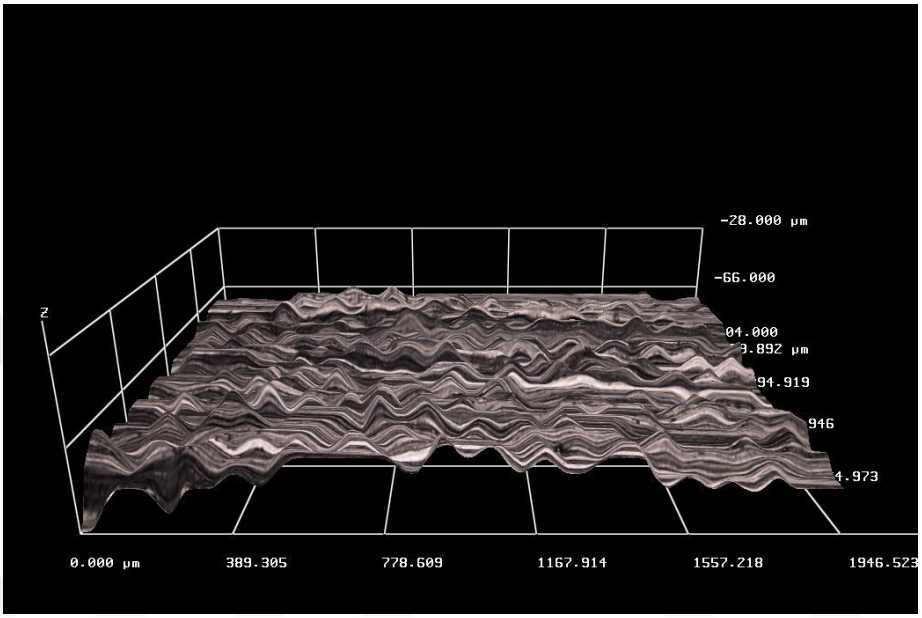
Şekil .6. Deney 6 için elde edilen topolojik görüntü.

Dolayısıyla, aşındırma süresinin arttırılması, yüzey pürüzlülüğünü azaltıp, aşındırma derinliğini artırıyor gibi görünmektedir. Desen tipine bağlı olarak farklılıkları incelemek için, deney 3 için Şekil 5.7-a'da gösterildiği gibi kare ve dairesel desenlerin yüzey topolojileri ve Şekil 5.7-b'de gösterildiği gibi deney 6 için elde edilmiştir.



Şekil .7. Dijital mikroskop görüntüleri, (a) Deney 3, (b) Deney 6 için desen tipine göre karşılaştırmalı görüntüler.

Buna göre kare desenlerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü her iki durumda da dairesel desenlere göre daha fazladır. Bununla birlikte, dairesel desenin geometrik doğruluğu, deney 3'teki kare desenden daha fazladır, oysa bu durum deney 6'da bunun tam tersi gibi görünmektedir. Boyutsal tamlığın en iyi olduğu deney 7'ye ait yüzey topolojisi görüntüsü Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil .8. Deney 7 için elde edilen topolojik görüntü.

Deney 7'nin sonuçları boyutsal tamlık için en ideal sonuçları verirken aşındırma miktarı deney 3'e göre daha az olmaktadır. Bu da aşındırma süresi ve miktarı arttıkça boyutsal tamlıkta azalmalar meydana geldiğini ispatlamaktadır. Aynı durum yüzey pürüzlülüğü içinde geçerlidir. Aşındırma süresi deney 7 için 300sn'dir. En ideal yüzey pürüzlülük değerini veren deney 10'a çok yakın sonuçlar vermektedir.

Deney sonuçları ve yapılan literatür çalışmaları, pozlamanın aşınmayı etkilediği belirlenmiştir. Zhang ve Meng (2012) yaptıkları çalışmada pozlama süresinin fotorezist hassasiyetini etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca desenlerdeki değişikliğin yüzey pürüzlülük değerlerini etkilediği tespiti doğrulanmıştır. Bir başka çalışmada Sadaiah vd. (2012), ışığın saçılma ve kırınım etkisi nedeniyle, pozlama süresi arttıkça modelin genişliğini azaldığı bunun da boyutsal tamlığı etkilediğini tespit etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada literatür çalışmalarına benzer doğrultuda sonuçları elde edilmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelişen teknolojiye bağlı olarak küçük parça üretimi ihtiyacı sürekli artmaktadır. Bu gereklilik yanında geliştirilen egzotik malzemelerinde geleneksel üretim yöntemleri ile üretiminin zor olması durumunda PCM işleme yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, yarı otomatik PCM makinasının tasarımı ve prototipi yapılmıştır. Tasarımı ve prototipi yapılan PCM işleme makinası ile AISI-304 çeliğinin işlenebilirliliği incelenmiştir.

Makine tasarımı ve prototip yapımı:

- Yarı otomatik olarak yapılan PCM makinası geliştirilmesi durumunda seri üretime geçilebilecek şekilde tasarlanmıştır.
- PCM işleme makinasının yapımında kullanılacak malzemelerin plastik bazlı olması gerektiği yapılan prototip çalışmaları ile tespit edilmiştir.
- PCM işleme makinasında aşındırılan materyalden kopan mikro partiküller aşındırıcı konsantrasyonu değiştirdiği tespit edilmiş ve filtrelenerek sisteme aktarılması gerekliliği,
- PCM işleme makinasında kullanılacak motor, nozulun önem arz ettiği ve bunların üretiminin hassas ve ayarlanabilir olması gerektiği,
- PCM işleme makinasında kullanılan kimyasalın ve rejenerasyonun önemli olduğu ve konsantrasyon miktarı kontrolünün yapılması gerektiği,
- PCM işleme makinasında sistem içerisinde kullanılan aşındırıcı ve temizleyici kimyasalların sıcaklığının sürekli kontrol altında olması tespit edilmiştir.

Aşındırma derinliği sonuçları:

- Aşındırma derinliği, pozlama süresinin artmasıyla azalma eğiliminde olduğu,
- Maksimum ED değerlerine ulaşmak için optimum parametre olarak $P_{takım}$ =Pozitif, t_{uv} =80 sn, $t_{aşındırma}$ =1200 sn olduğu,

Boyutsal tamlık sonuçları:

- Boyutsal tamlık aşındırılan alana ve desen tipine bağlı olduğu tespit edilmiştir.
- Fototakım türü, diğer kontrollere kıyasla boyutsal tamlık üzerinde daha etkili olduğu,
- En iyi boyutsal tamlık değerleri, $P_{takım}$=pozitif, t_{uv}=160 sn ve $t_{aşındırma}$=300 sn'de elde edildiği,
- Pozlama süresi ve aşındırma süresinin boyutsal tamlık üzerindeki etkileri, bu faktörlerin değiştirilmesiyle önemli bir değişiklik meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü sonuçları:

- Minimum yüzey pürüzlülük değerini elde etmek için optimum değer olarak $P_{takım=negatif}$, t_{uv}=80 sn, $t_{aşındırma}$ =300 sn olarak belirlenmiştir.
- Kare desenlerdeki yüzey pürüzlülük değerleri, dairesel desenlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Literatürde yapılan araştırmalara katkı olarak, kare ve dairenin aşınmasında sorun yaşanmadığı tespit edilmiş, diğer geometrik şekillerde, dikdörtgen, çokgen vb. diğer desenlerdeki aşındırmalarda da uygulanabileceği önerisine katkıda bulunulmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en çok etkisi olan kontrol faktörü, pürüzlülüğü neredeyse lineer olarak etkileyen aşındırma süresi olduğu tespit edilmiştir.

Yüzey topolojisi sonuçları:

- DET kullanımı ile elde edilen aşındırma miktarı, RET kullanımına göre daha yüksek olduğu,
- RET kullanımı ile elde edilen yüzey pürüzlülüğünün, DET kullanımına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmayı daha ileriye taşımak için,

- PCM işleme makinasının otomasyonu geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] R. Roy, D. Allen, and O. Zamora, "Cost of photochemical machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1-3, pp. 460-465, 2004.

[2] İnternet: Advanced Metal Etching, “Etchitmn”, https://metaletching.com/ (2023).

[3] D. M. Allen, "Photochemical machining: from ‘manufacturing's best kept secret’to a $6 billion per annum, rapid manufacturing process," vol. 53, no. 2, pp. 559-572, 2004.

[4] İnternet: Northwest Etch Technology, “Tech Guide”, https://www.nwetch.com/ tech-guide (2023).

[5] P. Mumbare, A. Gujar, and R. Channamvar, "Process Parameter Optimization of Photchemical Machining for ASME 316 Steel," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2016.

[6] P. R. Kanikella, "Process development and applications of a dry film photoresist," *University of Missouri-Rolla Master of Scıence in Materıals Scıence and Engineering,* 2007.

[7] S. Sönmez, "Ultraviyole flekso mürekkeplerin karboksimetil selüloz ve polivinil alkol ile kaplanmış kartonların basılabilirlikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması," *Politeknik Dergisi*, vol. 20, no. 4, pp. 985-991, 2017.

[8] C. A. Mack, "Development of positive photoresists," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 134, no. 1, p. 148, 1987.

[9] J. Vyas, L. Sawant, S. Tyagi, G. Joshi, S. Deshmukh, and A. Ingle, "An overview on parametric study of photochemical machining process and its applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 1055-1062, 2022.

[10] İnternet: Qualitetch, “Chemical Etching”, https://www.qualitetch.co.uk /service/photo-chemical-etching/ (2023).

[12] A. R. Saraf, M. Sadaiah, S. Devkare, and Technology, "Optimization of photochemical machining," *International Journal of Engineering Science*, vol. 1, no. 3, pp. 7108-7116, 2011.

[13] N. Misal and M. Sadaiah, "Comparison of Design of Experiments and Gray Rational Analysis of Photochemical Machining," *International Journal of Innovational in Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 2319-1058, 2013.

[14] O. ÇAKIR, V. AYDOĞAN, and Z. B. ÖZATEŞ, "Bakırın kimyasal işlenmesi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi,* vol. 2, no. 2, pp. 107-113, 2011.

[15] O. Çakır, "Photochemical Machining of Engineering Materials," *12th International Research/Expert Conference* pp. 109-112, 2008.

[16] P. Mumbare and A. Gujar, "Multi objective optimization of photochemical machining for ASME 316 steel using grey relational analysis," *International Journal of Innovative Research in Science,* vol. 5, no. 7, pp. 12418-12425, 2016.

[17] D. V. Wagh and D. Dolas, "Experimental Investigation of PCM on Inconel 600 using Response surface Methodology‖," *International Journal of Engineering Research,* vol. 3, no. 1, pp. 909-915, 2015.

[18] O. Çakir, A. Yardimeden, T. Özben, and Engineering, "Chemical machining," *Archives of Materials Science,* vol. 28, no. 8, pp. 499-502, 2007.

[19] O. ÇAKIR, B. Mahsum, E. TÜZÜN, V. TOPRAK, M. DİREK, and M. ARIĞTEKİN, "XCrNi18-8 Paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi,* vol. 2, no. 1, pp. 57-66, 2011.

[20] N. D. Misal, M. Sadaiah, and Engineering, "Investigation on surface roughness of Inconel 718 in photochemical machining," *Advances in Materials Science,* vol. 2017, pp. 1-9, 2017.

[21] İnternet: Chemcut Corporation, "Etching Titanium with HF and Nitric Acid Solutions Part1", http://www.chemcut.net/wp-content/uploads/2015/02/Etching-Titanium-with-HF-and-Nitric-Acid-Solutions-Part1.pdf (2023).

[22] A. R. Saraf, N. Misal, M. Sadaiah, A. Chavan, and S. Sathe, "Some Investigation on Photochemical Machining of Phosphor Bronze," *Int. Journal of Advances in Science Technology,* vol. 3, no. 6, pp. 71-85.

[23] D. M. Allen and H. J. Almond, "Characterisation of aqueous ferric chloride etchants used in industrial photochemical machining," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 149, no. 1-3, pp. 238-245, 2004.

[24] D. Allen and L. Ler, "The potential for oxygen regeneration of spent ferric chloride etchant solutions," *PCMI Journal,* vol. 59, pp. 3-7, 1995.

[25] J. Zhang and Y. Meng, "A study of surface texturing of carbon steel by photochemical machining," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 212, no. 10, pp. 2133-2140, 2012.

[26] C. G. K. Meier, "Liquid Resists for Photo Chemical Machining," *HTP HiTech Photopolymer AG,* 1997.

[27] D. H. Patil, S. Mudigonda, and Engineering, "The effect of the rolling direction, temperature, and etching time on the photochemical machining of monel 400 microchannels," *Advances in Materials Science,* vol. 2016, pp. 1-9, 2016.

[28] S. Ho, T. Nakahara, and G. Hibbard, "Chemical machining of nanocrystalline Ni," *Journal of materials processing technology*, vol. 208, no. 1-3, pp. 507-513, 2008.

[29] D. M. Allen and P. Jefferies, "An economic, environment-friendly oxygen-hydrochloric acid regeneration system for ferric chloride etchants used in photochemical machining," *CIRP annals*, vol. 55, no. 1, pp. 205-208, 2006.

[30] A. R. Saraf, N. D. Misal, and M. Sadaiah, "Mathematical modelling and optimization of photochemical machining," in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 548, pp. 617-622: Trans Tech Publ.

[31] S. Yadav, A. Saraf, and M. Sadaiah, "Analysis of Undercut for SS304 in Photochemical Machining," in *International Conference on Communication and Signal Processing 2016 (ICCASP 2016)*, 2016, pp. 284-289: Atlantis Press.

[32] S. Combe, I. Yee, and M. Wait, "Thick film photo resist spun on application vs. Dry film lamination," in *2013 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH 2013*, 2013, pp. 65-68.

[33] P. R. Kanikella, "Process development and applications of a dry film photoresist," 2007.

[34] D. Allen, M. Simpkins, and H. Almond, "A novel photochemical machining process for magnesium aerospace and biomedical microengineering applications," *Journal of micromechanics microengineering*, vol. 20, no. 10, p. 105010, 2010.

[35] S. Zhao, H. Cong, and T. Pan, "Direct projection on dry-film photoresist (DP 2): do-it-yourself three-dimensional polymer microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 8, pp. 1128-1132, 2009.

[36] V. N. Shanov, Roy-Chaudhury, P., Schulz, M. J., Yin, Z., Campos-Naciff, B., Wang, Y., , "Methods for making magnesium," United States, Cincinnati, 2017.

[37] M. Tsang, F. Herrault, R. H. Shafer, and M. G. Allen, "Methods for the microfabrication of magnesium," in *2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2013, pp. 347-350: IEEE.

[38] A. Karataş and Ö. Sonakın, "Mikrofabrikasyon teknolojisi ve ilaç taşıyıcı sistemler üzerinde uygulamaları," *Ankara Ecz. Fak. Derg*, vol. 36, no. 1, pp. 47-74, 2007.

[39] D. Agrawal and D. Kamble, "GRA and ANN integrated approach for photochemical machining of Al/Sic composite," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 8, pp. 7177-7188, 2017.

[40] A. S. D. Al-Radha, "The impact of different acids etch on sandblasted titanium dental implant surfaces topography," *Dent. Med. Sci,* vol. 15, pp. 83-86, 2016.

[41] S. Thorat, V. Lonkar, D. Patil, and M. Sadaiah, "Some Investigations on Photochemical Machining of Cobalt-ChromiumL605 Alloy," presented at the Proceedings of 6th International & 27th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR-2016), 2016.

[42] H. Raharja, "Photoresist: fabrication, characterization and its sensitivity on the exposures of x-ray and ultraviolet," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 367, no. 1, p. 012022: IOP Publishing.

[43] Manty, "Method for photochemical machining of titanumand zirconum," United States Hartford, Connecticut, 1992.

[44] D. Agrawal, K. Gurav, and D. Kamble, "Multi-objective optimization of photochemical machining process based on grey relational analysis method for spray etching," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 612, pp. 77-82: Trans Tech Publ.

[45] S. Thorat, R. Dugad, and S. Mudigonda, "Design, Analysis and Manufacturing of Bare Metal Coronary Stent using PCM," in *Proceedings of 10th International Conference on Precision, Meso, Micro and Nanoengineering*, 2017, pp. 129-132.

[46] C. I. H. Ashby, R. David, L. Frederick, "Electronic-carrier-controlled photochemical etching process in semiconductor device fabrication", *United States Patent US4880493A, Date of Patent: Nov. 14*, Washington D.C., (1989).

[47] T. H. Tze, K. Abou-El-Hossein, and C. H. Bing, "Etch Rate and Dimensional Accuracy of Machinable Glass Ceramic in Chemical Etching," in *12th International- Ceramics Congress*, 2010, vol. 65, pp. 251-256.

[48] G. El-Awadi, T. Enb, S. Abdel-Samad, and M. El-Halawany, "Chemical machining for stainless steel, aluminum and copper sheets at different etchant conditions," *Arab Journal of Nuclear Science and Applications,* vol. 94, no. 2, pp. 132-139, 2016.

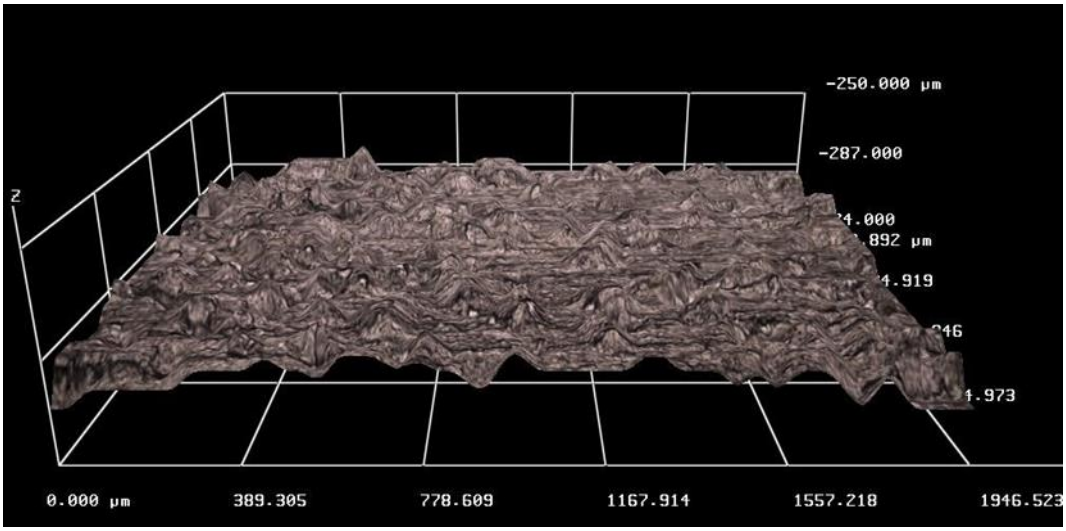
[49] H. A. Al-Ethari, K. F. Alsultani, and N. Dakhil, "Variables affecting the chemical machining of stainless steel 420," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT),* vol. 3, no. 6, pp. 210-216, 2013.

[50] D. H. Patil, S. B. Thorat, R. A. Khake, and S. Mudigonda, "Comparative study of FeCl3 and CuCl2 on geometrical features using photochemical machining of monel 400," *Procedia CIRP Advances in Materials Science,* vol. 68, pp. 144-149, 2018.

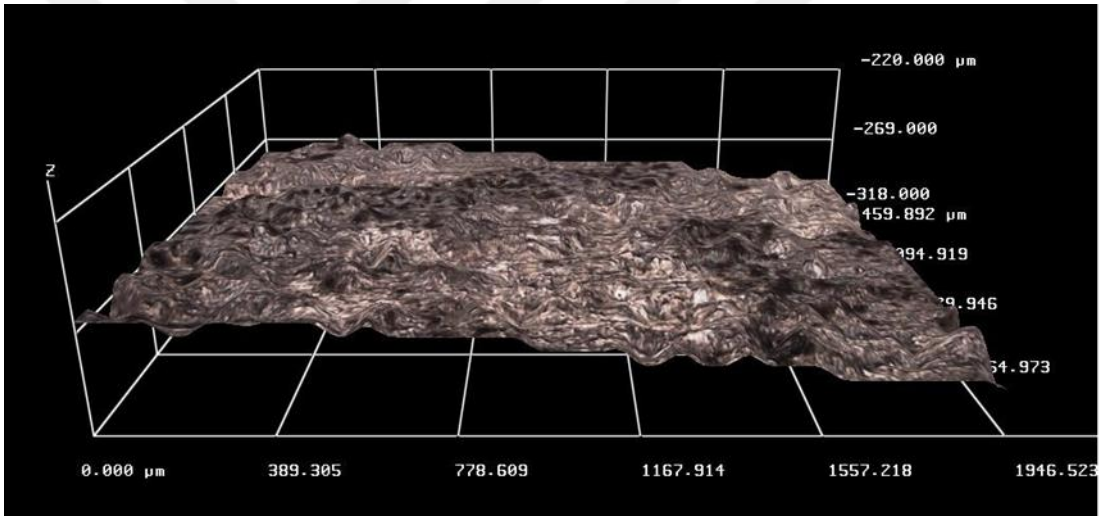
[51] T. Osmanoğlu, "AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

EK AÇIKLAMALAR A.

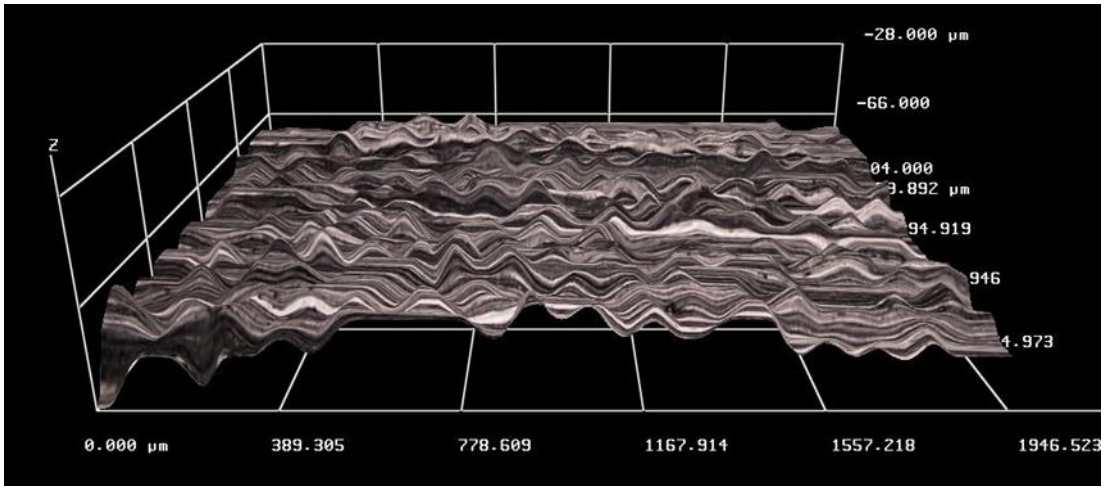
NUMUNELERE AİT TOPOLOJİ VE DENEY GÖRÜNTÜLERİ



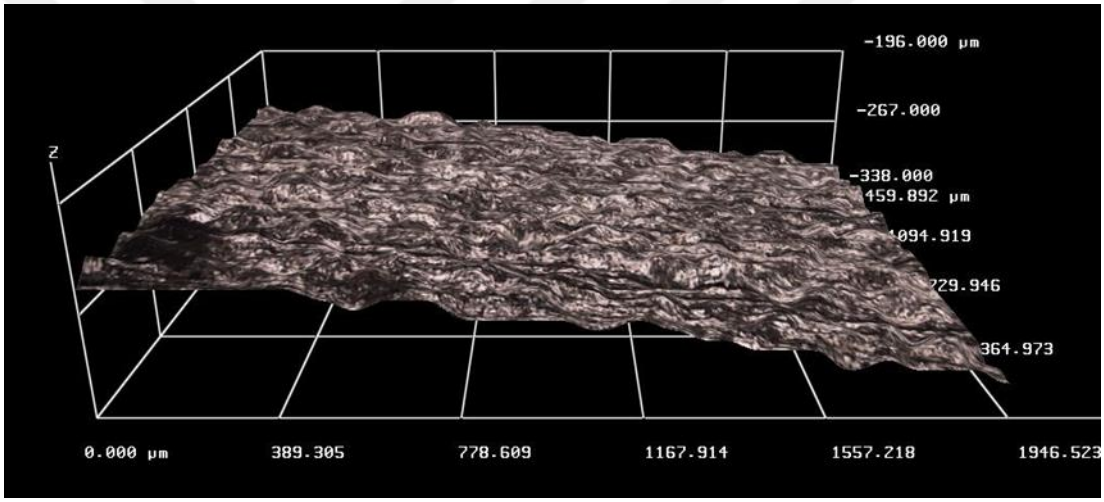
Şekil Ek A.1. Ön deney 1 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü.



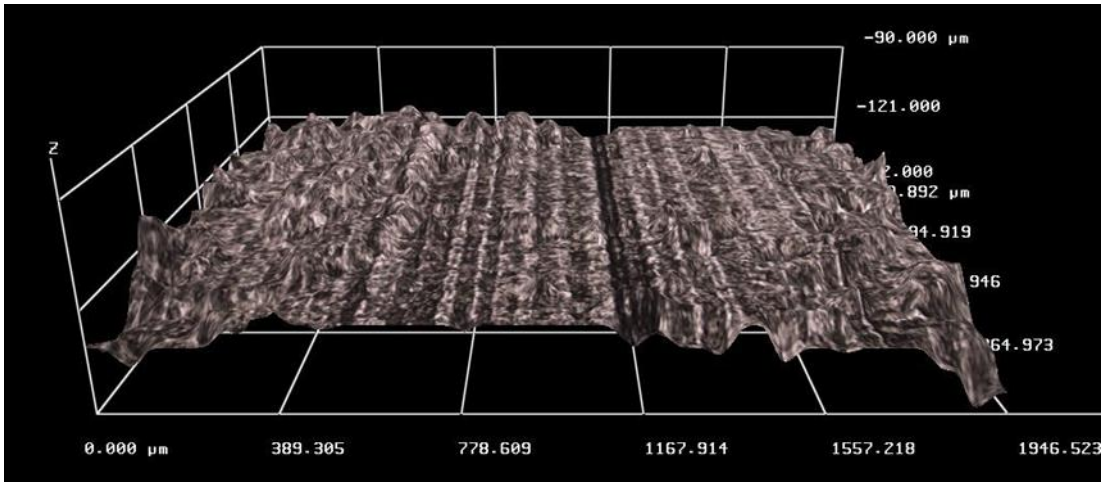
Şekil Ek A.2. Ön deney 2 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü.



Şekil Ek A.3. Ön deney 3 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü.



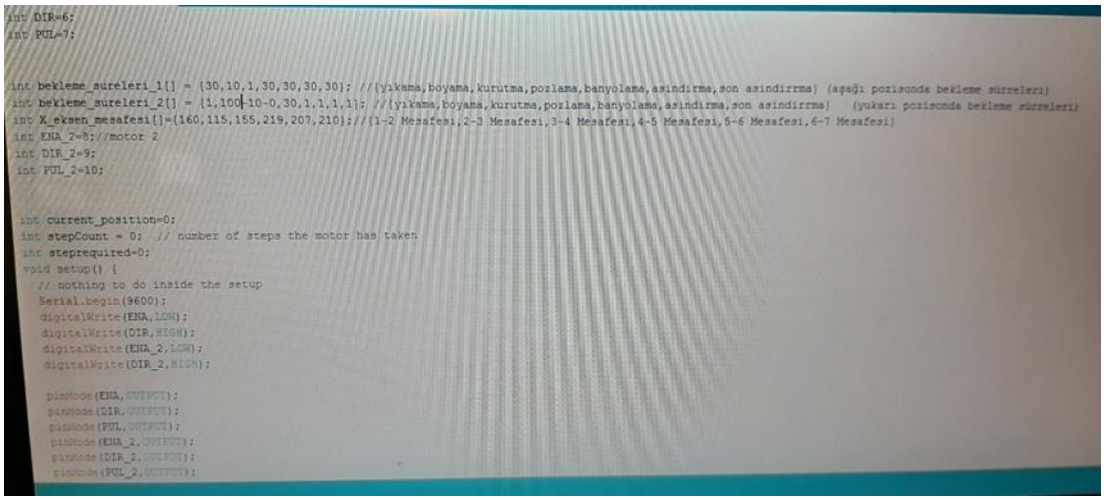
Şekil Ek A.4. Ön deney 4 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü.



Şekil Ek A.5. Ön deney 5 numaralı deney numunesi yüzey topolojisi görüntüsü.



Şekil Ek A.6. İlk prototip aşındırma sistemi.



```
int DIR=6;
int PUL=7;


int bekleme_sureleri_1[] = {30,10,1,30,30,30,30}; //{yıkama,boyama,kurutma,pozlama,banyolama,asindirma,son asindirma} (aşağı pozisonda bekleme sürreleri)
int bekleme_sureleri_2[] = {1,100,10-0,30,1,1,1,1}; //{yıkama,boyama,kurutma,pozlama,banyolama,asindirma,son asindirma}   (yukarı pozisonda bekleme sürreleri)
int X_eksen_mesafesi[]={160,115,155,219,207,210};//{1-2 Mesafesi,2-3 Mesafesi,3-4 Mesafesi,4-5 Mesafesi,5-6 Mesafesi,6-7 Mesafesi}
int ENA_2=8;//motor 2
int DIR_2=9;
int PUL_2=10;


int current_position=0;
int stepCount = 0;  // number of steps the motor has taken
int steprequired=0;
void setup() {
  // nothing to do inside the setup
  Serial.begin(9600);
  digitalWrite(ENA,LOW);
  digitalWrite(DIR,HIGH);
  digitalWrite(ENA_2,LOW);
  digitalWrite(DIR_2,HIGH);

  pinMode(ENA,OUTPUT);
  pinMode(DIR,OUTPUT);
  pinMode(PUL,OUTPUT);
  pinMode(ENA_2,OUTPUT);
  pinMode(DIR_2,OUTPUT);
  pinMode(PUL_2,OUTPUT);
```

Şekil Ek A.7. Makine ardunio kodları prototipi.

ÖZGEÇMİŞ

Murat TUNÇ ilk öğretim ve liseyi İzmirde tamamladıktan sonra 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Kalıpçılık Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayarak 2008 yılında mezun olmuştur. Mezuniyet sonrası 2008 yılında Arçelik A.Ş. Bulaşık makinesi işletmesinde Ar-Ge bölümünde 3 yıl çalıştıktan sonra 2011 yılında Ar-Ge müdürü olarak Telmek A.Ş.'de çalışma hayatını sürdürmüştür. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2015'da tamamlamıştır. Daha sonra 2016 yılında yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başlamış beraberinde 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliğini tamamlamıştır. 2021 yılında Telmek A.Ş.'den ayrılarak Medsan Savunma ve Space Dynamics firmalarını kurmuştur ve halen aynı yerde genel müdür olarak çalışmalarını devam etmektedir.