KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIP PARÇALARININ FREZELENMESİ SONUCUNDA OLUŞAN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

HASAN ÖKTEM

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Prof. İbrahim UZMAN

II. Danışman: Doç.Dr. Fehmi ERZİNCANLI

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIP PARÇALARININ FREZELENMESİ SONUCUNDA OLUŞAN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Hasan ÖKTEM

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 01 Nisan 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 05 Mayıs 2009

Tez Danışmanı	II.Danışman	Üye
Prof. İbrahim UZMAN	Doç.Dr. Fehmi ERZİNCANLI	Doç.Dr. Mustafa ÇÖL
(.....)	(.....)	(.....)
Üye	**Üye**	**Üye**
Yrd.Doç.Dr. M.Ali ARSLAN	Yrd.Doç.Dr. A.Armağan ARICI	Doç.Dr. Cüneyt OYSU
(.....)	(.....)	(.....)

Üye

Yrd.Doç.Dr. Mehmet FIRAT

(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ

Teknolojideki gelişmeler, rekabet ortamı ve müşteri taleplerinin hızlı bir biçimde artması plastik ve mumla hassas dökümden elde edilen kalıp ürünlerinin yüksek yüzey kalitesinde imal edilmesini zorunlu hale getirmiştir. Kalıp ürünlerinin yüksek yüzey kalitesinde olması, en düşük yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesine bağlıdır. Kalıp imal süreçlerinin en son basamağı olan ince yüzey işlemleri sayesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilebilir. Fakat ince yüzey işlemleri oldukça zaman alıcı ve maliyetlidir. Kalıp parçalarının imal edilmesi sırasında en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimum CNC frezeleme parametrelerinin bulunması, ince yüzey işlemlerinin etkisini önemli ölçüde ortadan kaldıracak ve yüksek yüzey kalitesinde ürünlerin imal edilmesini sağlayacaktır. En düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimum CNC frezeleme parametrelerinin bulunması, matematiksel modellerle birleştirilmiş bir optimizasyon tekniğiyle mümkündür. Bundan dolayı, Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network) ve Response Surface Metot yöntemlerine dayalı tahmini modeller ile Genetik Algoritma tekniği birleştirilerek optimizasyon yapılmıştır.

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapılmasında yardımcı olan TSE'ye ve çalışanlarına, frezeleme deneylerinin yapıldığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve SMS TORK A.Ş.'ye, fikir ve bilgileri ile tez boyunca destek olan hocalarım Yrd.Doç.Dr. Mehmet Ali ARSLAN'a Yrd.Doç.Dr. Hasan KURTARAN'a Yrd.Doç.Dr. Armağan ARICI'ya, Doç.Dr. Mustafa ÇÖL'e, Danışman hocalarım Prof. İbrahim UZMAN ile Doç.Dr. Fehmi ERZİNCANLI'ya ve Doktora süresince yanımda olan eşim ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ. i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER viii
ÖZET xi
İNGİLİZCE ÖZET xii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR TARAMASI 3
3. KALIP TASARIM VE İMALAT YÖNTEMLERİ 22
3.1. Kalıp Parçaları için Tasarım Yüzeylerinin Oluşturulması 23
3.2. Kalıp Yüzeylerinin Frezeleme Stratejileri ile İşlenmesi 30
3.2.1. Frezeleme stratejileri ve kalıp yüzeyleri için uygulanması 30
4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK TEORİSİ VE ÖLÇÜMÜ 36
4.1.Yüzey Pürüzlülüğü 36
4.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesinin Nedenleri 36
4.3. Yüzey ve Yüzeyin Dokusu 37
4.3.1. Yüzeydeki düzensizlik tipleri 39
4.3.2. Yüzey pürüzlülük şekli ve ilişkili ifadeler 40
4.3.3. Yüzey pürüzlülük birimi ve dereceleri 41
4.4.Yüzey Pürüzlülüğünde Profil Bilgisi 43
4.4.1. Tepe ve çukur şekilleri 44
4.4.2. Stylus biçimi ve büyüklüğü 45
4.4.3. Ölçme uzunlukları 46
4.4.4. Yüzey profilinin filtrelenmesi 47
4.5. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri 48
4.5.1. Genlik parametreleri 49
4.5.1.1. Referans çizgisi 49
4.5.1.2. Ortalama pürüzlülük 50
4.5.1.3. Ortalama karesel pürüzlülük 51
4.5.1.4. On-noktalı yükseklik 52
4.5.1.5. Tepe-çukur yükseklik parametreleri 53
4.5.1.6. Skewness ve kurtosis parametreleri 54
4.5.2. Aralık-boşluk parametreleri 55
4.5.2.1. Yüksek uçlu sayma 55
4.5.2.2. Tepe sayma 56
4.5.2.3. S ve r_p parametreleri 56
4.5.3. Karma parametreler 57
4.5.3.1. Profilin ortalama eğimleri 57
4.5.3.2. Referans çizgisindeki profilin eğimi 57
4.5.3.3. Dalga boyu parametreleri 58

4.5.3.4. Taşıma-kayma oranı 58
4.5.3.5. Dalgalılık faktörü 59
4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazları 59
4.6.1. Cihazların Doğruluğu.....59
4.6.2. Ölçüm belirsizliği.....60
4.6.3. Ölçümlerin sayısı..... 60
4.6.4. Stylus cihazları 61
4.6.5. Stylus ölçümü..... 61
4.7. Diğer Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri.....62
4.8. Endüstriyel Parçalarda Pürüzlülük Ölçümleri.....63
5. DENEYSEL ÇALIŞMA..... 65
5.1. Deneylerin Planı.....65
5.2. Deney Parametreleri.....66
5.3. Malzeme ve Kesici Takım 67
5.4. Frezeleme ve Ürün Basım İşlemleri.....71
5.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri..... 73
6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ için TAHMİNİ MODELLER GELİŞTİRME.....76
6.1. Tahmini Modeller için Tasarım Teknikleri Geliştirme.....77
6.2. Yapay Sinir Ağları 79
6.2.1. Yapay sinir ağlarının tanımı ve görevleri..... 80
6.2.2. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları..... 80
6.2.3. Yapay sinir ağlarının avantaj ve dezavantajları 81
6.2.4. Yapay sinir ağlarında kullanılan öğrenme modelleri 81
6.2.5. Çok katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı.....82
6.2.5.1. Çok katmanlı algılayıcılarda proses elemanı bileşenleri.....83
6.2.6. Çok katmanlı algılayıcılarda eğitim, test ve öğrenme süreci.....86
6.2.7. İterasyon durdurma süreci.....87
6.3. Response Surface Metodu.....90
6.3.1. Response surface model oluşturma.....91
6.3.1.1. Doğrusal regresyon modelleri.....91
6.3.1.2. Eğri uydurma işlemi.....93
6.3.2. Yüzey pürüzlülüğü için RS model geliştirme.....98
6.4. ANN ve RSM Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....101
7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OPTİMİZASYONU.....103
7.1. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....104
7.2. Optimizasyon Yönteminin Teorisi..... 105
7.2.1. Optimizasyon probleminin formülasyonu.....105
7.2.2. Optimallik şartları.....107
7.3. Genetik Algoritma Tekniğiyle Optimizasyon Yöntemi.....110
7.3.1. GA'ların temel özellikleri ve avantajları.....110
7.3.2. GA'ların çalışma prensibi.....111
7.4. Yüzey Pürüzlülük Probleminin Optimizasyonu.....118
7.4.1. Yüzey pürüzlülük probleminin tanımlanması.....118
7.4.2. Yüzey pürüzlülük probleminin GA ile çözülmesi.....121
8. BULGULAR VE TARTIŞMA 126
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 149

KAYNAKLAR..... 152
EKLER.....159
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER..... 162
ÖZGEÇMİŞ 163

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1: Düz yüzeylerin geometrisi 23
Şekil 3.2: Eğimli yüzeylerin geometrisi 24
Şekil 3.3: Serbest formlu yüzeylerin geometrisi 24
Şekil 3.4: Dış bükey ve iç bükey yüzeyler 25
Şekil 3.6: Bir kapak modeline ait tasarım akış diyagramı..... 25
Şekil 3.6: Ortez parçası için oluşturulan tasarımlar..... 27
Şekil 3.7: CD-ROM kapağı için oluşturulan tasarımlar 27
Şekil 3.8: Ortez parçası için tasarlanan manüel kalıp seti.....28
Şekil 3.9: CD-ROM kapağı için tasarlanan otomatik kalıp seti.....29
Şekil 3.10: Frezeleme yöntemini oluşturan operasyon ve stratejiler diyagramı..... 31
Şekil 3.11: Düz yüzey frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması.....32
Şekil 3.12: Hacimsel frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması..... 33
Şekil 3.13: Profil-kontur frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması.....34
Şekil 3.14: Yüzey frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması 35
Şekil 3.15: Ortez parçası ve CD-ROM kapağının kalıp bileşenleri 35
Şekil 4.1: Üretilen bir parçaya ait ömür aşamaları.....39
Şekil 4.2: Yüzeydeki düzensizlikler..... 40
Şekil 4.3: Yüzey pürüzlülüğünün geometrik şekli 40
Şekil 4.4: 1 µm'nin üstündeki ve altındaki ölçüleri gösteren çevrim 42
Şekil 4.5: Yüzey pürüzlülük dereceleri 43
Şekil 4.6: Tepe-çukur ilişkisi 45
Şekil 4.7: Stylusun bir yüzey profili üzerindeki geometrik konumu..... 45
Şekil 4.8: Stylus ucunun bir yüzey üzerindeki 3 boyutlu SEM görüntüsü..... 46
Şekil 4.9: Numune, değerlendirme ve hareket uzunluklarının birbiriyle ilişkisi 46
Şekil 4.10: Bir pürüzlülük ölçme sistemi ve filtre tipleri..... 48
Şekil 4.11: Referans çizgisinin çıkarılması.....50
Şekil 4.12: R_a parametresinin grafiksel olarak elde edilmesi..... 51
Şekil 4.13: R_z parametresinin grafiksel olarak elde edilmesi..... 52
Şekil 4.14. Tepe-çukur yükseklik parametrelerinin gösterilmesi..... 53
Şekil 4.15: Tepelerin (8 tepe) en yüksek noktalarının sayılması..... 55
Şekil 4.16: Stylus cihazının çalışma prensibi..... 61
Şekil 4.17: Stylus cihazının temel bileşenlerinin gösterilmesi..... 62
Şekil 4.18: Serbest formlu yüzeye sahip kaportalarda pürüzlülük ölçümleri..... 63
Şekil 4.19: Otomotiv parçalarında pürüzlülük ölçümleri..... 64
Şekil 5.1: Kesicilerde meydana gelen yanal aşınmaların SEM görüntüleri 69
Şekil 5.2: Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde frezeleme işlemleri 72
Şekil 5.3: Mum ve hassas döküm işlemlerinden elde edilen ürünler..... 72
Şekil 5.4: AISI 1040 çelik malzeme üzerinde frezeleme işlemleri 72
Şekil 5.5: CD-ROM kapağının basım işlemi ve elde edilen plastik ürün 73
Şekil 5.6: 0.412 µm ve 0.670 µm'lik pürüzlülük profil grafikleri 74
Şekil 5.7: Alüminyum 7075-T6 ve AISI 1040 çelik malzemede pürüzlülük ölçümü.75

Şekil 6.1: Tam faktöriyel tasarımlar..... 77
Şekil 6.2: Merkezi bütünleşik tasarımlar 78
Şekil 6.3: Box-Behnken faktöriyel tasarımlar..... 78
Şekil 6.4: Rasgele (random) tasarımlar.. 78
Şekil 6.5: Latin hiperkübik tasarımlar.....79
Şekil 6.6: Biyolojik bir sinir hücresinin yapısı.....82
Şekil 6.7: Herhangi bir yapay sinir ağında yer alan proses elemanlarının yapısı.....84
Şekil 6.8: Aktivasyon fonksiyonu tipleri.....84
Şekil 6.9: Yüzey pürüzlülüğü için tasarlanan yapay sinir ağı modeli 89
Şekil 6.10: Hataların üç boyutlu düzlemdeki vektörel ilişkisi.....95
Şekil 6.11: Regresyon çizgisi boyunca hataların hesaplanması.....96
Şekil 7.1: Bir f (x) fonksiyonun global ve lokal minimumları.....107
Şekil 7.2: Bir f (x) fonksiyonun global ve lokal minimumlarının gösterilmesi.....108
Şekil 7.3: GA'nın herhangi bir problem için çözüm algoritması.....112
Şekil 7.4: Ölçümler, ANN-RSM ve GA'nın birleştirilmesi.....119
Şekil 8.1: Yüzey pürüzlülüğünün f_t ve m_t parametreleriyle değişimi.....127
Şekil 8.2: Yüzey pürüzlülüğünün V_c ve m_t parametreleriyle değişimi.....127
Şekil 8.3: Yüzey pürüzlülüğünün a_r ve m_t parametreleriyle değişimi.....128
Şekil 8.4: Yüzey pürüzlülüğünün f_t ve a_r parametreleriyle değişimi.....130
Şekil 8.5: Yüzey pürüzlülüğünün V_c ve a_r parametreleriyle değişimi.....130
Şekil 8.6: 243 R_a değeri için ANN modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....132
Şekil 8.7: ANN modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi.....133
Şekil 8.8: 243 R_a değeri için RS modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....133
Şekil 8.9: RS modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi.....134
Şekil 8.10: 81 R_a değeri için ANN modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....135
Şekil 8.11: ANN modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi.....136
Şekil 8.12: 81 R_a değeri için RS modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması.....137
Şekil 8.13: RS modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi..... 137
Şekil 8.14: 243 R_a değeri için RS modellerin mertebe hataları..... 140
Şekil 8.15: 81 R_a değeri için RS modellerin mertebe hataları..... 141

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1: Düzensizliklerin sınıflandırılması..... 39
Tablo 4.2: Doğadaki eşyaların mikron cinsinden ölçüleri 41
Tablo 5.1: Alüminyum 7075-T6 malzemenin frezeleme parametreleri ve seviyeleri 67
Tablo 5.2: AISI 1040 çelik malzemenin frezeleme parametreleri ve seviyeleri 67
Tablo 5.3: Alüminyum 7075-T6 malzemenin mekanik özellikleri 68
Tablo 5.4: Alüminyum 7075-T6 malzemenin kimyasal bileşimi (%)..... 68
Tablo 5.5: AISI 1040 çelik malzemenin mekanik özellikleri 69
Tablo 5.6: AISI 1040 çelik malzemenin kimyasal bileşimi (%) 69
Tablo 5.7: Kesici takımların mekanik ve kimyasal özellikleri..... 70
Tablo 8.1: 243 R_a değeri için Varyans analizi.....128
Tablo 8.2: 81 R_a değeri için Varyans analizi..... 131
Tablo 8.3: 243 R_a değeri için ANN model parametreleri..... 138
Tablo 8.4: 81 R_a değeri için ANN model parametreleri..... 139
Tablo 8.5: 243 R_a değeri için RS modellerin mertebe ve test hataları.....139
Tablo 8.6: 81 R_a değeri için RS modellerin mertebe ve test hataları 140
Tablo 8.7: 243 R_a değeri için ANN modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri..... 142
Tablo 8.8: 243 R_a değeri için RS modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri.....142
Tablo 8.9: 81 R_a değeri için ANN modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri..... 143
Tablo 8.10: 81 R_a değeri için RS modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri.....144
Tablo 8.11: RMSE değerleri, maksimum sapmalar ve eğitim-test hataları.....145
Tablo 8.12: GA'nın temel parametreleri 145
Tablo 8.13: 243 R_a değeri için optimum parametreler ve en düşük pürüzlülük değerleri 146
Tablo 8.14: 81 R_a değeri için optimum parametreler ve en düşük pürüzlülük değerleri.....147
Tablo 8.15: GA'dan elde edilen optimizasyon sonuçlarının doğruluğunun kontrol edilmesi.....147

SİMGELER

a	: Eksenel kesme derinliği, (mm)
B_{max}	: ölçüm aralığı, (mm)
d	: istenen veya beklenen değer hata
DW_{ij}	: ağırlıkların değişim miktarı
E	: ortalama karesel hatalar toplamı
f	: diş basına ilerleme, (mm/diş)
F	: tabla ilerlemesi, (mm/dak)
L	: değerlendirme uzunluğu, (mm)
m	: makine işleme toleransı, (mm)
net_j	: net çıkış değeri
N	: profil içindeki noktaların sayısı
Out_j	: net çıkış değeri, (µm)
P_c	: tepe sayısı, (sayı/cm)
r_p	: tepelerin ortalama eğrilik yarıçapı, (µm)
R_a	: ortalama pürüzlülük, (µm)
R^2	: regresyon katsayısı
R_{ku}	: kurtosis
R_q	: ortalama karekök pürüzlülüğü, (µm)
R_p	: maksimum tepe yüksekliği, (µm)
R_{pm}	: ortalama tepe yüksekliği, (µm)
R_{max}	: en yüksek tepe-çukur arasındaki dikey mesafe, (µm)
R_t	: en yüksek tepe-çukur arasındaki dikey mesafe, (µm)
R_{sk}	: skewness
R_{tm}	: ortalama tepe-çukur yüksekliği, (µm)
R_v	: maksimum çukur derinliği, (µm)
R_y	: değerlendirme uzunluğundaki en yüksek tepe-çukur parametresi, (µm)
R_{3y}	: üç noktalı yükseklik, (µm)
$R_{z\ (DIN)}$	: DIN standartlarında on noktalı yükseklik, (µm)
$R_{z\ (ISO)}$	: ISO standartlarında on noktalı yükseklik, (µm)
S	: bitişik lokal tepelerin ortalama aralığı, (µm)
S_m	: referans çizgisindeki profil tepeleri arasındaki ortalama boşluk, (µm)
S_f	: adımlılık faktörü
t_p	: taşıma-kayma oranı, (%)
X_i	: girdi değeri
V	: kesme hızı, (m/dak)
W_{ij}	: ağırlık katsayısı
W	: dalgalılık
W_f	: dalgalılık faktörü
γ	: referans çizgisindeki profilin eğimi
Φ	: ölçüm belirsizliği

η : öğrenme parametresi
Δ_a : profilin ortalama eğimi, (°)
Δ_q : profilin ortalama eğiminin karekökü, (°)
λ_a : ortalama dalgaboyu, (μm)
λ_q : ortalama dalgaboyunun karekökü, (μm)

Alt indisler

a : eksenel kesme yönü
c : kesme
i : ardışık sayı
ij : ileri-geri katman numarası
ku : kurtosis katsayısı
r : radyal kesme yönü
p : tepe
pm : ortalama tepe
q : karekök
t : diş sayısı
tm : ortalama tepe-çukur
sk : skewness katsayısı
v : çukur
3y : üç nokta

Kısaltmalar

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANOVA : Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ANN : Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
APE : Average Percentage Error (Ortalama Yüzde Hata)
BP : Back Propagation (Geri Beslemeli)
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAE : Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CAM : Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli İmalat)
CNC : Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
DIN : Deutsches Instıtut Für Normung (Alman Standart Enstitüsü)
DOE : Design of Experiments (Deneysel Tasarım)
EDM : Electro Discharge Machining (Elektrikle Kimyasal Aşındırma)
GA : Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GEP : Genetic Expression Programming (Genetik İfadeli Programlama)
HB : Hardness Brinell (Brinell Sertlik)
HSC : High Speed Cutting (Yüksek Hızlı Kesme)
HSM : High Speed Milling (Yüksek Hızlı Frezeleme)
ISO : Uluslararası Standartlar (International Organization for Standardization)
MSE : Mean Square Error (Ortalama Karesel Hata)
PCBN : Poli Kristalin Kübik Boron Nitrür
PVD : Physcial Vapor Deposition (Fiziksel Yöntemle Kaplama)
RC : Rockwell Sertliği
RMSE : Ortalama Karesel Hataların Karekökü

RBNN : Radial Basis Neural Network (Radyal Merkezli Yapay Sinir Ağları)
RSM : Response Surface Metodu
TiCN : Titanyum Karbür Nitrür
TiAlN : Titanyum Alüminyum Nitrür
TiAlCrYN : Titanyum Alüminyum Krom Nitrür
YUS : Yüksek Uçlu Sayma (High Spot Count)

KALIP PARÇALARININ FREZELENMESİ SONUCUNDA OLUŞAN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OPTİMİZASYONU

Hasan ÖKTEM

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Yüzey Pürüzlülüğü, Yapay Sinir Ağları, Response Surface Metot, Genetik Algoritma, Optimizasyon.

Özet: Kalıp imalat endüstrisindeki hızlı gelişmeler CNC frezeleme işlemlerinin önemini daha da artırmıştır. Kalıp parçalarının yüzey kalitesinin belirlenebilmesi, yüzeylerin pürüzlülüğünün ölçülmesi ve en düşük pürüzlülüğü veren en uygun frezeleme parametrelerinin bulunmasına bağlıdır. Bu çalışmada, kalıp parçalarının frezelenmesi sırasında yüzeylerde meydana gelen pürüzlülük tahmin edilerek optimizasyon yöntemiyle en uygun frezeleme parametreleri bulunmuştur. Hassas döküm için mum ve plastik enjeksiyon kalıplarının imal edilmesi amacıyla sırasıyla Alüminyum 7075-T6 ile AISI 1040 çelik malzemeler kullanılmıştır. Bu kalıp malzemelerinin yüzeylerinden pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network) ve Response Surface Metot gibi tahmini matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller kullanılarak en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren ve en uygun frezeleme parametrelerini bulan bir optimizasyon yöntemi Genetik Algoritma tekniğiyle elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan tahmini modeller düşük test hataları üretmiştir. Optimizasyon yardımıyla, pürüzlülüğe bağlı yüzey kalitesinde geliştirmeler sağlanmıştır. Tahmini pürüzlülük modelleriyle birleştirilmiş Genetik Algoritma tekniğinin doğruluğu ilave deneyler yapılarak kontrol edilmiştir. Genetik Algoritmadan elde edilen bu sonuçlar, en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağlayan en uygun frezeleme parametrelerinin endüstrideki kalıp parçalarının işlenmesinde güvenilir ve efektif bir biçimde kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Genetik Algoritma optimizasyon modelleri, yüzey pürüzlülüğü dışında, aşınma, kesme kuvveti ve imalat zamanı gibi metal kesme problemlerinin tespit edilmesi için de kullanılabilir.

OPTIMIZATION OF SURFACE ROUGHNESS OCCURRED IN THE RESULT OF END MILLING MOULD PARTS

Hasan ÖKTEM

Keywords: End milling, Surface Roughness, Artificial Neural Network, Response Surface Method, Genetic Algorithm, Optimization.

Abstract: Rapid developments in mould manufacturing industry have increased more and more the importance of CNC end milling processes. The determining of surface quality on the mould parts based on the measurement of surface roughness and finding of optimum end milling parameters leading to minimum surface roughness. In this study, determination of optimum end milling parameters by predicting roughness occurred in surfaces with optimization technique was investigated. Aluminium 7075-T6 and AISI 1040 steel materials were employed to manufacture the paraffin wax for the investment die-casting and plastic injection moulding parts, respectively. The surface roughness values were measured from these materials' surfaces. For estimation of surface roughness, the prediction mathematical models such as Artificial Neural Network and Response Surface Method were created. By utilizing these models, an optimization method providing minimum surface roughness and finding optimum milling parameters was obtained by using Genetic Algorithm technique. The prediction models generated for surface roughness have created the minimum testing errors. The improvements in the surface quality depended on the roughness were provided by the helps of optimization. The accuracy of Genetic Algorithm technique coupling with the prediction roughness models were controlled by performing the additional experiments. These results obtained from Genetic Algorithm have proved that the optimum milling parameters giving minimum surface roughness can be employed in the way of reliable and effective during machining the mould parts. Genetic Algorithm optimization models can be also used to determine the metal cutting problems such as wear, cutting force, manufacturing cost apart from surface roughness.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kalıp parçalarının imal edilmesi için gerekli olan metal kesme operasyonlarından en önemlisi, CNC frezeleme işlemidir. Kalıp parçalarının yüzeylerinin frezelenmesi sırasında meydana gelen ve kalıp imalat maliyetini doğrudan etkileyen en ciddi problem, yüzey kalitesidir. Kalıp parçalarının yüzey kalitesinin yüksek olması, kalıptan elde edilecek ürünün de yüksek yüzey kalitesinde olmasını sağlayacaktır. İyi planlanmış bir CNC frezeleme işlemi kalıp parçalarının yüzey kalitesini artırırken, ince yüzey temizleme işlemlerinden olan parlatma işleminin etkisini de en aza indirecektir. Kalıp imal endüstrisinde ince yüzey temizleme işlemleri, toplam kalıp imal maliyetinin % 20'sini kapsar [4,5]. Kalıp parçalarının yüzey kalitesini tespit etmenin en pratik yolu, yüzey pürüzlülüğünü ölçmektir. Kalıp parçalarının yüzey kalitesinin tespit edilmesi, doğru malzeme seçimi ve kullanılan CNC frezeleme parametrelerine bağlıdır. Seçilen malzemeye ilişkin optimum frezeleme parametreleri elde edilirse, en düşük yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla yüksek yüzey kalitesine ulaşılır. Optimum frezeleme parametrelerinin elde edilmesi, yüzey kalitesini artırırken kalıp imal zamanını da azaltır. Kalıp imali için harcanan zaman ve işçilik, toplam maliyetin % 15'ini kapsar [17,20]. Bahsedilen bu problemlere matematiksel tahmin yöntemleriyle çözüm bulmak için bu tez çalışmasının konusu; kalıp parçalarının frezelenmesi sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının 1. Bölümünde; tez konusunun önemi, tez konusunun seçilmesinin nedeni, tez çalışmasının bölümlerinin içerikleri ve tez çalışmasının ayrıntıları ifade edilmiştir. 2. Bölümde; tez konusuna ilişkin bugüne kadar yapılmış olan teorik ve deneysel çalışmaların özetlendiği bir literatür taraması yer almıştır. 3. Bölümde; kalıp tasarım ve imalat yöntemleri, bilgisayar ortamında modelleme ve CNC frezeleme işlem stratejileri incelenmiştir. 4. Bölümde; yüzey pürüzlülüğünün tanımlanması, yüzey pürüzlülük ölçüm teorisi, yüzey pürüzlülük ölçüm metotları

açıklanmıştır. 5. Bölümde; frezeleme işlemi deney parametreleri, malzemelerin tipi, kesici takımlar, ürün basma işlemleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi içeren deneysel süreçler yer almıştır. 6. Bölümde; yüzey pürüzlülük değerleri yardımıyla matematiksel tahmine dayalı olan Artificial Neural Network (ANN) ve Response surface method (RSM) modelleri oluşturulmuştur. 7. Bölümde; oluşturulan bu modeller kullanılarak en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimum frezeleme parametrelerinin Genetik Algoritma (GA) optimizasyon tekniğiyle bulunması amaçlanmıştır. 8. Bölümde; tez çalışmasının sonunda elde edilen yüzey pürüzlülük ölçümlerinin grafiklerle gösterilmesi, ANN ve RSM modellerinin ürettiği sonuçların tartışılması, GA tekniğiyle optimizasyon sonuçlarının incelenmesi ve diğer ayrıntılar yer almıştır. 9. Bölümde; ANN ve RSM modellerinin yüzey pürüzlülük tahmin sürecine katkısı, GA optimizasyon tekniğinin yüzey pürüzlülük problemini çözmedeki başarısı ve yüzey pürüzlülük problemi dışındaki diğer metal kesme problemleri üzerinde yapılması düşünülen çalışmalardan bahsedilmiştir.

Bu tez çalışmasında, frezeleme işlemleri boyunca malzeme yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri kullanılarak tahmini modeller yardımıyla optimizasyon yapılacaktır. İki grup frezeleme deneyi üç seviyeli tam faktöriyel deney tasarımına bağlı olarak CNC tezgahlarında kesme sıvısı kullanılarak gerçekleştirilecektir. I. grup frezeleme deneyleri, mum model kalıbının imalatı için Alüminyum 7075-T6 malzeme yüzeyleri üzerinde yapılarak toplam 243 pürüzlülük değeri elde edilecektir. II. grup frezeleme deneyleri, plastik enjeksiyon kalıbının imalatı için AISI 1040 malzeme yüzeyleri üzerinde yapılarak toplam 81 pürüzlülük değeri elde edilecektir. 243 pürüzlülük değeri için ANN ve RSM tahmini modelleri geliştirilerek GA tekniğiyle optimizasyon süreci uygulanacaktır. 81 pürüzlülük değeri için de aynı basamaklar sırasıyla takip edilecektir. ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak MATLAB'ta daha önce yazılan programlar kullanılacaktır. Böylelikle; hassas döküm işleminde kullanılan mum model için Alüminyum 7075-T6 ile plastik enjeksiyon işlemi için kullanılan AISI 1040 çelik malzemelerde oluşan yüzey kalite probleminin ekonomik açıdan en uygun ve efektif olan bir optimizasyon yöntemiyle çözülmesi sağlanacaktır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde; bu tez çalışmasına ait kaynaklar ve literatür bilgisi ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Kaynaklar, tez çalışmasının içeriği göz önüne alınarak üç temel kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda; kalıp yüzeyleri ile bu yüzeylerin işlenmesi için kullanılan metal kesme yöntemleri, ikinci kısımda; yüzeylerin pürüzlülük ölçümünün incelenmesi, üçüncü kısımda ise yüzey pürüzlülük verilerinin matematiksel tahmin metotlarıyla optimizasyonuna ilişkin kaynaklar açıklanmıştır. Bu amaç için, yaklaşık 300 adet ulusal-uluslararası dergi, kitap ve makale arasından tez konusunu en iyi biçimde açıklayan 82 kaynak seçilmiştir. Bu kaynaklar, tez konusunun içeriği göz önüne alınarak aşağıdaki bölümlerde sırasıyla anlatılmıştır.

Talaş kaldırma işlemlerinde uygun malzeme ve kesici seçimi oldukça büyük avantajlar sağlar. Bu avantajlar arasında verimliliğin, kalitenin artırılması ve imalat masraflarının azaltılması yer alır. Yüksek verimlilik, uygun kesme ve ilerleme hızlarının seçilmesi ile sağlanabilir. Uygun kesme ve ilerleme hızları kullanılacak kesme stratejisiyle de doğrudan ilişkilidir. Efektif bir kesme stratejisi kullanılırsa, uygun kesme ve ilerleme hızlarına ulaşılabilir. Dolayısıyla, istenen zamanda istenen kalitede doğru ve hassas parça yüzeyleri elde edilir [1-3].

Özellikle, kalıp parçalarına ait yüzeyler ve bu yüzeylerin talaşlı yöntem uygulanarak şekillendirilmesi, birçok araştırmacı ve üretici için üzerinde durulması gereken bir konu olmuştur. Araştırmacılar, kalıp parçalarının şekillendirilmesinde etkin bir tasarım ve imalat sürecinin gerekliliğinden bahsetmişlerdir. İyi planlanmış bir tasarım sürecinin, ürünün üreticiden tüketiciye kadar geçen zaman sürecine önemli ölçüde etki ettiğini söylemişlerdir. Kalıp parçalarına ait yüzeylerin tasarlanmasında kullanılan temel stratejiler, üreticiden doğrudan müşteriye kadar gelen bir ürünün yüzey kalitesi ve kalıp imalat maliyetiyle önemli ölçüde ilişkilidir [4,5,6,67].

Hassas döküm kalıpçılık uygulamalarında; kolay işlenebilirlik, iyi ısı iletimi, düşük maliyet, yüksek mukavemet ve seri imalat gibi avantajlarından dolayı Alüminyum 7075-T6 malzeme birçok üretici tarafından tercih edilmiştir. Aynı zamanda, birçok akademik çalışmada deneysel bir malzeme olarak kullanılmıştır. Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde, frezeleme işlemleri boyunca meydana gelen kesme kuvvetleri, yüzey morfolojisi ve talaş biçimi incelenmiştir [7-8].

Alberti ve diğerleri, yapmış oldukları deneysel çalışmada; Alüminyum malzemelerinin başka bir alaşımı olan AA5083 üzerinde yüksek kesme hızlarında frezeleme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, AA5083 malzemenin mükemmel bir işlenme kabiliyeti, çok sayıda frezeleme parametresiyle kullanılabilme ve karmaşık şekillerin işlenebilmesine olanak sağladığını görmüşlerdir. Bu çalışmada; frezeleme parametrelerinin ölçüsel doğruluk ve imalat zamanı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Frezeleme parametrelerinden ilerleme ve kesme stratejisinin, imalat zamanı ile ürünün ölçüsel doğruluğunu önemli düzeyde değiştirdiği sonucu ortaya çıkmıştır [9].

Toh, yüksek kesme hızlarında alüminyum ve çelik kalıp malzemeleri üzerinde frezeleme işlemi yapıldığında oluşturulan kesici takım yollarının tasarımı, değerlendirilmesi ve optimizasyonu için bir araştırma çalışması yapmıştır. Araştırmacı; üretkenlik ve yüzey kalitesinin artırılmasında, ince (finish) ve kaba (rough) frezeleme işlemlerinin hayati önem taşıdığını söylemiştir. İnce ve kaba frezeleme işlemlerinin kalıp yüzeylerinde uygulanması sırasında çok sayıda takım yolu oluşturma stratejisinin bulunduğu bu çalışmada ifade edilmiştir. Aynı zamanda, ince ve kaba frezeleme işlemleri için kullanılan her bir takım yolu stratejisinin, kalıp yüzeylerinin imalat zamanı ve kalitesi açısından optimize edilmesi gerektiği araştırmacı tarafından belirtilmiştir [10].

Azalan işlem basamakları, ürünlerin daha fazla geriye kazanımı ve yeni ürünlerin piyasaya sürülmesi için harcanan zamanın azalması, dünya ekonomisindeki gelişmelerin etkisiyle kalıp imalatını daha da artırmıştır. Bu gereklilikler, bir tarafta CAD/CAM/CNC proses zincirinin geliştirilmesini, diğer tarafta HSC (High Speed

Cutting) teknolojisinin sunumunu artırmıştır. Schützer ve diğerleri, bu amaç için metal kesme stratejileri ile kesme zamanı ve parçaların yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi bir deneysel çalışmayla göstermişlerdir. Araştırmacılar, AISI 1045 çelik kalıp malzemesi üzerinde işlenmek için tasarlanan test modelleri geliştirmişlerdir. Follow Periphery, Follow Part, Paralel Lines ve Zig-Zag gibi metal kesme stratejilerini, test modellerinin CNC'de işlenmesi sırasında kullanmışlardır. Daha sonra, bu stratejiler sonunda harcanan zaman ile yüzey kalitesi karşılaştırılmıştır. Her bir kesme stratejisinde; kesici tipi, devir sayısı (n), ilerleme (V_f), kesme hızı (V_c) , diş başına ilerleme (f), kesme derinliği (a) ve kesicideki diş sayısı (Z_n) gibi frezeleme parametreleri burada kullanılmıştır. Sonuç olarak; test modelleri üzerinde kesme stratejileriyle frezeleme parametreleri kullanımının, imalat zamanı, parça geometrisi ve yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir [11].

Kalıp imalatında ince frezeleme işlemi, bir yüzeye uygulanan en son işlemdir. Bu işlem, istenen yüzey kalitesini çoğu kez vermesine rağmen, oldukça zaman alıcıdır. Fakat uygulanan prosedürü kontrol etmek için birkaç tane sistematik yöntem vardır. Lee ve diğerleri, yapmış oldukları deneysel çalışmada; bu sistematik yaklaşımları açıklamışlardır. Araştırmacılar; kritik yüzey pürüzlülüğü ve malzeme çıkarma miktarı için, en az zaman gerektiren bir sistematik frezeleme işlemi geliştirmişlerdir. Çok sayıda pürüzlülük ölçümü plastik enjeksiyon kalıpçılığında kullanılan yüzeyler için alınmıştır. Daha sonra, kullanılan kesicilerin aşınma faktörleri incelenmiş ve malzeme çıkarma miktarı (Q) için deneysel formüller oluşturmuşlardır [12].

Urbanski ve diğerleri, sertleştirilmiş kalıp malzemelerinin imal edilmesi sırasında HSM (High Speed Machining) yönteminin uygulanması ve geliştirilmesi için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; kesme kuvvetleri, kesici takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün yüksek kesme hızlarıyla işlenen kalıp yüzeylerinde nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Farklı türlerde kesici takım malzemeleri (TiCN ve TiCAlCrYN) kullanarak, bu malzemelerin yüksek hızlı kesme yönteminin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. En uzun takım ömrünün TiCN ve TiAlN kaplı kesici takımlarla elde edildiği gözlenirken, aynı malzemelerle kaplanmış kesicilerde yüzey pürüzlülüğünün 1-4 μm olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, her iki

kesici takım kaplama malzemesinin yüksek kesme hızlarında (250-300 m/dak) kullanılabileceği ifade edilmiştir. Çok sayıda kesme deneyi yapılarak kesme kuvvetleri ölçülmüştür ve bu kuvvet değerlerinin değişim aralıklarının kesici takım ömrü ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir kontrol parametresi olduğu sonucuna varılmıştır. 250-300 m/dak kesme hızlarında başlangıç yüzey pürüzlülüğünün 1 μm olduğu, daha sonra yüzey pürüzlülüğünün kesicilerdeki aşınmaya bağlı olarak yükseldiği belirtilmiştir [13].

Viera ve diğerleri, AISI 8640 çelik malzeme kullanarak kesme sıvılarının frezeleme işlemi üzerindeki performansını kontrol etmek için çok sayıda deney yapmışlardır. Deneyler sırasında yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu çalışmada; kesici takım ile talaş ara yüzeyindeki sıcaklık artışının kesme hızının artmasına bağlı olduğu, güç tüketiminin kesici takımdaki aşınmanın artmasıyla yükseldiği, en uzun takım ömrünün kesme sıvısının varlığında gözlendiği ve en iyi yüzey kalitesinin sulu kesme şartlarında ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır [14].

Yüksek kesme hızlarıyla frezeleme yöntemi, son yıllarda artan bir hızla imalat endüstrisindeki yerini almaya başlamıştır. Özellikle, büyük çaplı kesici takımlarla (Ø 8-10 mm) kaba frezeleme işlemi yapmak için yeni teknikler geliştirilmiştir. Büyük çaplı kesici takımlarla kesme yönünde veya kesme yönüne ters (up-down milling) biçimde, büyük hacimli malzeme çıkarma işlemlerinde kullanılmıştır. Toh [15], büyük çaplı kesicilerle yüksek kesme derinliklerinde, up-down milling yöntemleri için talaş yüzey sıcaklığı ile kesme parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Araştırmacı, kesme işlemi sonucunda en önemli faktörün yüzey sıcaklığı olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, talaş yüzey sıcaklığının, kesme performansı üzerinde % 74.04 oranında etkili olduğu ve up-down milling yöntemlerinin kaba frezeleme yöntemleriyle kullanılmasının metal kesme performansını artırdığı sonucuna varılmıştır [15].

Plastik enjeksiyon kalıp endüstrisi, plastik parçaların kullanımını artıran önemli avantajlara sahip bir ekonomik sektördür. Enjeksiyon parçaları çelik kalıplar içinde imal edilirler ve enjeksiyon preslerinin üretkenliği doğrudan kalıp tasarımı ve

performansla ilişkilidir. Plastik enjeksiyon pazarının ekonomik analizinin yapılması, üretkenliğin artırılması için gereklidir. Plastik enjeksiyon pazarının ekonomik açıdan etkileyen üç önemli unsur vardır. Bunlar, kalıp imali için çelik malzeme, işçilik ve kalıp imalat operasyonlarıdır. Kalıp imalat operasyonları arasında yer alan ince ve kaba frezeleme işlemleri, kullanılan çelik malzemenin işlenebilirliğine bağlı olarak değişen en pahalı operasyonlardır. Rech ve diğerleri, kaba frezeleme işlemleri boyunca 300 HB sertlikte üç çelik malzemenin işlenebilirliğini karşılaştırmak için yeni bir metot geliştirmişlerdir. Çok sayıda deney tasarımına bağlı olan ve frezeleme parametreleri ile malzeme değişimini de içine alan yeni bir model, yukarıda bahsedilen durumları incelemek için araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Üç ayrı çelik malzeme ile dört farklı frezeleme parametresi planlanmış deney tasarımına göre; kaba frezeleme işlemi kullanılarak sulu kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda; kesme hızı; 150-300 m/dak, diş başına ilerleme; 0.1-0.35 mm/diş, radyal kesme derinliği; 10-30 mm ve eksenel kesme derinliği; 1-5 mm olarak bulunmuştur. Kalıp malzemesi olarak kullanılan çeliğe sülfür ilavesi işlenebilirliği artırmıştır ve yüzey kalitesini de geliştirmiştir [16].

Kopac ve Krajnik, kalıp parçalarının yüzeylerinin işlenmesi için kullanılan metal kesme yöntemlerini açıklayan bir deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, farklı malzemelere ait işleme yöntemlerini ve kesme parametrelerini incelemişlerdir. EDM (Elektrikle Kimyasal Aşındırma) ve HSM yöntemleri; malzeme, geometri, işleme takımları, zaman, yüzeyleri parlatma ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, bahsedilen faktörleri en uygun ve en optimum seviyede gerçekleştiren ve NC (Sayısal Kontrol) kodlarından oluşan bir bilgisayar programı yazmışlardır. Bu program, işlenen parçanın yüzey kalitesini optimizasyon yöntemiyle değerlendirme yeteneğine sahiptir. Sonuç olarak; toplam işleme zamanının azaltılabileceği, yüzey kalitesinin artırılabileceği, EDM kullanımının azaltılabileceği ve 5 eksenle frezeleme yöntemlerinin kullanılabilmesine olanak verilebileceği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [17, 19].

Kalıp yapımında kullanılan sert çeliklerin işlenebilirliği, metal kesme operasyonunda seçilen kesici takımın mekanik, kimyasal ve geometrik özelliklerine önemli ölçüde

bağlıdır. Bir kesici takımın geometrik özellikleri; boyu, çapı, diş sayısı, helis açısı, yan kenar açısı ve boşluk açısı olarak sıralanmaktadır. Kim ve Ko, kesici takımın tasarımı ve imalatı açısından en zor olan iki geometrik özelliği üzerinde bir deneysel çalışma yapmışlardır. Sert kalıp çeliklerinin işlenmesi amacıyla düz uçlu freze takımları tasarlanmış ve imal edilmiştir. Daha sonra, kesici takımın son şekli bir taşlama işlemiyle verilmiştir. Tasarlanan kesici modeli ile üretilen modelin doğruluğunu belirlemek için bir yazılım programı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım programı, CNC kodu üretme ve kesici takımın tasarım değişkenlerinin girilmesine olanak sağlamaktadır. Yazılım programının doğruluğunu kontrol etmek amacıyla bir dizi frezeleme operasyonu CNC tezgahında yapılmıştır. Kesici takımların boşluk açıları ile yan kenar açıları, lazerle ölçülerek yazılım programının ürettiği sonuçlarla kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar ile tahmin edilen sonuçların birbiriyle uyum içinde olması, geliştirilen yazılımın kalıp imalatında kullanılan sert çeliklerin işlenebilirliğinin kontrol edilmesi için oldukça efektif olduğunu kanıtlamıştır [18].

Bouaziz ve diğerleri, CNC makinelerinde imal edilen kalıpların maliyetini inceleyen teorik bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar, çalışmalarını plastik şişirme kalıplarının imal edilmesi için gerekli olan işlemler üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Bu amacı gerçekleştirmek için yarı analitik olan teknikler kullanmışlardır. Bu tekniklerin birincisi; tasarım unsurlarının kullanılması, ikincisi ise; tasarlanan unsurların imalat unsurlarına dönüştürülmesidir. Araştırmacılar, tasarlanan kalıp yüzeylerinin çok sayıda alt yüzey parçacıklarından oluştuğunu ve her bir yüzeyin doğrudan imalat maliyetine etki ettiğini belirtmişlerdir. İmalat aşamasında; malzeme seçimi ve kalıp yüzeylerinin pürüzlülüğünün de maliyete etki eden önemli unsurlar arasında yer aldığını ifade etmişlerdir. Çalışmada, karmaşık kalıp yüzeylerinin bulunduğu ve en etkin frezeleme stratejilerinin kullanıldığı, ince cidarlı bir plastik ürünün imal edilmesi sırasında geçen tüm tasarım-imalat süreçlerini değerlendiren analitik bir model oluşturulmuştur [20].

Yüzey pürüzlülüğü; sürtünme, aşınma, kaplama, ısı ve elektrik iletimi, temas halindeki bağlantıların sıkılığı, ölçüsel doğruluk ve maliyet gibi çok sayıda temel problemin değerlendirilmesinde önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü, bir metal kesme

işleminin performansının belirlenmesinde en önemli kriterdir ve imal edilmiş bir parçaya ait ömür aşamaları yüzey pürüzlülüğüyle tespit edilebilir. Tüm bu sebeplerden dolayı uzun yıllardan beri, yüzey pürüzlülüğü birçok teorik ve deneysel araştırma için çalışma konusu olmuştur. Sander [21], yüzey pürüzlülüğünün teorik ve pratik ifadelerini, ölçüm metotlarını, cihazlarını ve parametrelerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Gadelmawla ve diğerleri, yüzey pürüzlülük parametrelerinin matematiksel ifadelerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğüne ait toplam 59 parametrenin formülü deneysel ölçümlerden çıkarılmıştır. Araştırmacılar, "Surfvision" adı verilen bir yazılım geliştirmişlerdir ve bu yazılımı pürüzlülük parametrelerini deneysel ortamdan toplamak için kullanmışlardır. Daha sonra, geliştirilen yazılımdaki ifadeler farklı numunelerden alınan 3 boyutlu yüzey topografisini hesaplamak amacıyla kullanılmıştır [23].

Bhushan, yapmış olduğu deneysel çalışmada; yüzeyin dokusundan başlayarak yüzey pürüzlülüğünün analizi, parametreleri ve ölçüm metotlarını ayrıntılı olarak incelenmiştir. Araştırmacı, yüzey pürüzlülük analizini daha çok teorik bir yaklaşımla irdelemiştir. Her bir yüzey pürüzlülük parametresine karşılık gelen matematiksel ifadeleri çıkarmıştır. Fakat yüzey pürüzlülük ölçümünde teorik ifadeler ölçüm metoduna göre pratik ifadelere dönüştürülmüştür. Daha sonra, yüzey pürüzlülük ölçüm metotları kullanım yerlerine ve avantajlarına göre kıyaslanmıştır [24].

Ryu ve diğerleri, düz uçlu freze takımları kullanarak SS420J2 plastik kalıp malzemesi üzerinde kesme operasyonları yapmışlardır. Frezelenmiş yüzeylerin dokusundan yararlanılarak, 3 boyutlu topografiye ait parametreler bulunmuştur. Bu parametreler sayesinde, yüzey karakteristikleri incelenmiştir. Kesme operasyonları içinde kullanılan kesme parametrelerine göre, yüzey topografisi grafikselleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü yüzey topografisiyle açıklayan en önemli parametre, R_{max} incelenmiştir. Daha sonra, R_{max} ve R_a parametreleri deneysel sonuçlara göre karşılaştırılmıştır [25].

Baker ve Giardini, Avusturya'da geliştirilmiş olan bir yüzey pürüzlülük ölçüm sisteminin çalışma prensibi ve özelliklerini inceleyen bir deneysel çalışma

yapmışlardır. Araştırmacılar, geliştirmiş oldukları sisteme dayalı olarak çalışan bir pürüzlülük cihazı üretmişlerdir. Bu cihazın bazı önemli avantajları olduğunu belirtmişlerdir. Pürüzlülük cihazı, % 95'lik bir güvenirlik seviyesinde % 4'ten daha iyi belirsizliğe sahiptir. Pürüzlülük cihazına adapte edilen yazılım sayesinde, olukların (pürüzlülük mastarları) iç kısımları ölçmüştür ve yüzeyleri analiz edilmiştir. Boşluk ve oluk derinlik yüksekliği 0.1-50 μm aralığında olan yüzeylerde, kolaylıkla pürüzlülük ölçümünün yapılabileceği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [26].

İş parçası malzemesi ve bu malzemenin mekanik özellikleri bir metal kesme işlemine önemli ölçüde etki eder. Bir metal kesme işleminin imalat planlaması yapıldığında genellikle sertlik, dayanım, tokluk, ısıl iletkenlik, çalışma sertliği ve iş parçasının kimyasal yapısı gibi temel karakteristikler göz önüne alınır. Sertlik ve dayanım çoğunlukla, malzemenin işlenebilme özelliğiyle ilgilidir. İş parçasının malzeme özellikleri iyileştikçe, yüzey kalitesi de gelişir. Kopac ve Bahor, bir ürünün yüzey pürüzlülüğünün istenilen kalite seviyesinde, kesme parametreleri ve iş parçası özelliklerini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada; karbonlu çelik ile alaşımlı çelik malzemelerin işlenmesi sonucunda meydana gelen yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Çok sayıda deneyi düzenli bir biçimde yapabilmek için deneysel tasarım teknikleri kullanılmıştır. Araştırmacılar, her iki malzeme için kesme şartları ile iş parçası arasındaki ilişkiyi inceleyerek, her iki parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [28].

Korkut ve Donertas, AISI 1020 ve AISI 1040 çelik malzemeler üzerinde frezeleme işlemleri yaparak yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve kesici-talaş uzunluğu gibi çıkış parametrelerini elde etmişlerdir. Araştırmacılar, frezeleme parametrelerinden ilerleme ve kesme hızı gibi iki önemli parametrenin etkisini incelemişlerdir. Bu amaç için bir dizi deney yapmışlardır. Deneylerden, yüzey pürüzlülüğü ile kesme kuvveti ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Araştırmacılar, AISI 1020 malzemede yüksek kesme hızının daha düşük pürüzlülük verdiğini, buna karşın; AISI 1040 malzemede ise daha yüksek pürüzlülük verdiğini söylemişlerdir. Buna ilave olarak; kesme kuvvetlerinin, ilerleme ve kesme hızının yükselmesiyle arttığını da ifade etmişlerdir [29].

Choudhury ve Bajpai, yumuşak bir çelik malzeme üzerinde üç farklı frezeleme parametresinin (devir sayısı, kesici çapı ve kesme derinliği) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; bahsedilen üç frezeleme parametresine karşılık gelen yüzey pürüzlülük değerlerini bir pürüzlülük cihazıyla ölçmüşlerdir. Daha sonra, her bir frezeleme parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde oluşturduğu etkileri araştırmışlardır. Çalışma sonunda bazı sonuçlara varmışlardır: 1. Kesme hızıyla, yüzey pürüzlülüğü doğru orantılı olarak değişmektedir ve kesme hızı azaldığı zaman yüzey pürüzlülüğü maksimum olmaktadır. 2. Yüzey kalitesi, kesici çapının belli bir ölçüsüne kadar çaptaki değişimle gelişmektedir. Aynı durum kesme derinliği için de geçerlidir. 3. Frezeleme işlemi sonucunda oluşturulan yüzeyin kalitesi, geleneksel işleme yöntemlerinden daha iyidir. 4. Deneysel çalışmada kullanılan frezeleme yönteminin, kesme esnasında meydana gelen titreşimden (vibration) önemli ölçüde etkilendiği bir gerçektir [30].

Lacalle ve diğerleri, GG25 gri dökme demir ile GGG70L dökme demir malzemede yüksek hızlı kesme yöntemiyle solid karbür ve takma uçlu küresel kesiciler kullanarak baskı kalıp parçalarının yüzey kalitesini geliştirmek amacıyla bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada; HSM frezeleme ile geleneksel elle frezeleme yöntemleri maliyeti düşürme açısından karşılaştırılmıştır. İşlenen yüzeyler, otomobil endüstrisinde saç metal parçaların imal edilmesi için kullanılan baskı kalıp yüzeylerinden alınmıştır. Bu amaç için, yüksek kesme hızında çok sayıda frezeleme deneyi PCBN kaplı kesici takımlarla gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın daha güçlü olması amacıyla frezeleme işlemleri sırasında kuvvet ölçümleri de yapılmıştır. Aynı zamanda yüzey kalitesi, HSM ve geleneksel elle frezeleme yöntemleri boyunca pürüzlülük cihazıyla ölçülmüştür. Yüzey kalitesini daha iyi incelemek için işlenen yüzeylerin mikro yapısı fotoğraflanmıştır. ,sonuç olarak; 24000 dak^{-1} (devir sayısı), 3000 mm/dak (tabla ilerlemesi), 283-905 m/dak (kesme hızları) ve 0.0625 mm/diş (diş başına ilerleme) gibi frezeleme değerleriyle bir otomobilin yan kapı sacı üzerindeki yüzeyin ortalama pürüzlülüğün 0.99 μm olduğu ve HSM yöntemiyle işlenen bu yüzeyin geleneksel yönteme kıyasla 6 saat daha kısa bir sürede işlendiği belirtilmiştir [31].

Talaşlı imalat işlemleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü, aşınma, kaplama ve kesme kuvveti ölçüm verileri, imalat operasyonlarına ilişkin gelecek tahminlerinin oluşturulmasında oldukça önemlidir. İmalat operasyonlarına ilişkin tahminlerin doğru ve güvenilir olması, ölçümlerin elde edildiği deney sayısı ve şartlarına bağlıdır. Deneylerin belli bir düzen ve sırada yapılabilmesi için uygun deney tasarım teknikleri seçilmelidir. Deneylerden elde edilen ölçüm verileri, sonuç hakkında tahmin yürütmek amacıyla matematiksel modeller haline getirilir. Matematiksel modeller sayesinde, imalat operasyonlarının geleceği için tahminler yapılır. Matematiksel modeller, doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (non-lineer) denklem takımları halinde gruplandırılırlar. Bu sayede, tahmin zamanı, doğruluğu ve çözüm yöntemi kolaylaştırılabilir. İmalat problemlerine matematiksel modellerle çözüm bulmak için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışması boyunca, talaşlı imalat operasyonlarından biri olan CNC frezeleme işlemleri sonucunda parçaların yüzeylerinde oluşan pürüzlülük verilerinin matematiksel modellerle birleştirilmesi ve optimizasyon sürecinin uygulanmasına ilişkin araştırmalar incelenmiştir.

Benardos ve Vosniakos, yüzey pürüzlülüğünü ANN ve RSM gibi matematiksel model oluşturma yöntemleriyle tahmin oluşturma ve optimizasyon yapmak için bir araştırma yapmışlardır. ANN'ye ilişkin matematiksel denklem formatı ve ANN'nin çözüm doğruluğu araştırılmıştır. RSM yöntemiyle ilgili denklemler ve bu denklemlerin mertebelerinin sonuç üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı sayıda deney sonucunun bu iki yöntemle modellenmesi ve frezeleme parametrelerinin GA ile optimizasyonu tartışılmıştır. Araştırmada, deneylerin daha planlı ve efektif olması amacıyla Deneysel Tasarım teknikleri (DOE) kullanılmıştır. Araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü için ANN ve RSM tahmin yöntemlerini GA optimizasyon tekniği ile birleştirerek şu sonuca varmışlardır: Deneysel verilerin tahmin edilmesinde kullanılan çözüm yöntemleri (ANN ve RSM) başarılıdır, fakat araştırmanın doğruluğu açısından bu yöntemlerin hala geliştirilmeye ihtiyacı vardır [32].

Sai ve Bouzid, düz uçla frezeleme işlemleri boyunca AISI 1042 karbonlu çelik malzeme üzerinde meydana gelen yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarını kullanarak 3. mertebeden bir doğrusal denklem takımı oluşturmuşlardır. Araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan matematiksel denklemin kesme hızı ve ilerleme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, oluşturulan matematiksel denklemin mertebesi arttıkça pürüzlülüğü tahmin etmedeki başarısı da artmıştır [33].

Tsai ve diğerleri, yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için ANN yöntemini kullanmışlardır. ANN yönteminin öğrenme algoritmalarından biri olan geri beslemeli (Back-Propagation) öğrenme, bu çalışmada yüzey pürüzlülük verilerinin eğitilmesinde ve test edilmesinde kullanılmıştır. Araştırmacılar, bir CNC tezgahı üzerinde pürüzlülük sonuçlarını toplamak amacıyla deney seti kurmuşlardır. Toplam 48 frezeleme deneyi; ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği ve titreşim parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra, oluşturulan ANN modelin doğruluğu, bir doğrusal çoklu regresyon modeliyle karşılaştırılmıştır. Model oluşturma aşamasında, çoklu regresyonun tahmin hatası % 9.55 iken, ANN modelin % 0.73'tür. Performans testinde ise ANN model % 3.93'lük bir tahmin hatası verirken, çoklu regresyon tekniği % 8.73'lük hata vermiştir [36].

Briceno ve diğerleri, yapmış oldukları deneysel çalışmada; frezeleme işlemi boyunca meydana gelen kesme kuvvetlerini ölçerek geri beslemeli ve Radial Basis Neural Network (RBNN) öğrenmeye dayanan tahmin metotları geliştirmişlerdir. Bu iki metodun birbirine göre üstünlüklerini deneylerle kıyaslamışlardır. Daha sonra, 125 deney frezeleme parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Buradan, kesme kuvveti ölçüm verilerinin geri beslemeli öğrenme algoritmasında daha başarılı olduğu sonucuna varılmışlardır [37].

Ezugwu ve diğerleri, çalışmalarında; bir ANN model oluşturarak Inconel 718 malzemenin yüksek hızla kesilmesi sırasında frezeleme parametreleri arasında meydana gelebilecek ilişkiyi tahmin etmişlerdir. ANN modelin giriş parametreleri; kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, kesme zamanı ve soğutma sıvısı iken, çıkış parametreleri; yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve kesme kuvvetleri ve güç tüketim

miktarıdır. Bu çalışmada kullanılan ANN, üç katmandan (giriş, ara ve çıkış) oluşan ileri beslemeli öğrenme algoritmasına dayanan bir tahmin modelidir. Giriş, ara ve çıkış katmanlarında nöron adı verilen proses elemanları bulunmaktadır. Bu çalışmada; "tanjant sigma" ve "purelin" adı verilen doğrusal ve doğrusal olmayan transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Araştırmacılar, kesme parametrelerinin her birine karşılık gelen yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Çalışmadan; kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını, ilerleme, kesme derinliği, kesme zamanı ve soğutma sıvısı gibi parametrelerle ise yüzey pürüzlülüğünün doğrusal olarak değişmediği gözlenmiştir [38].

Zhong ve diğerleri, çalışmalarında; kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini iki tip ANN modeli geliştirerek incelemişlerdir. Bu amaç için toplam 304 tornalama deneyi, TiAlN kaplı kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce bahsedilen pürüzlülük parametrelerinden R_a ve R_t ölçülerek ANN modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan ANN modellerinin birinde "hiperbolik tanjant" transfer fonksiyonu kullanılırken, diğerinde "sigmoid" tip fonksiyon kullanılmıştır. ANN analizlerinden; hiperbolik tanjant fonksiyonun sigmoid fonksiyona göre daha düşük eğitim ve test hatası verdiği araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [39]. Kohli ve Dixit, ANN temeline dayanan ve çok sayıda deney sonucunda oluşturulan bir yüzey pürüzlülük tahmin modeli geliştirmişlerdir. Kesme deneyleri, % 0.35 karbon içeren bir çelik malzeme üzerinde üç kesme parametresiyle kuru ve sıvı şartlar altında yapılmıştır. Bir MAHR marka ölçüm cihazıyla yüzey pürüzlülük sonuçları toplanarak ANN'de eğitilmiş ve test edilmiştir. Daha sonra, kuru ve sıvı kesme şartlarında elde edilen sonuçlar ANN modelinin doğruluğu ispatlamak için kullanılmıştır [40].

Wang ve Chang, çalışmalarında; Alüminyum 2014-T6 malzemenin frezelenmesi sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerinde, kesme şartlarının etkisini analiz etmek için RSM yöntemine dayanan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu çalışma, RSM yöntemi üzerine yapılmış olan en önemli ve deneysel içeriği en yoğun araştırmalardan biridir. Ortogonal merkezi kompozit deneysel tasarıma dayanan beş kesme parametresi kullanılarak toplam 72 deney, kuru ve sıvı kesme şartlarında

gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları kullanılarak bir doğrusal RS model oluşturulmuştur. Bu RS modeli oluşturan kesme parametrelerinin kareleri ve eşlenikleri (interactions) kullanılmıştır. Araştırmacılar, teorik sonuçlar ile pratik sonuçlar arasındaki farkı ortaya çıkarmak için 3 boyutlu diyagramlar çizmişlerdir. Çalışmadan; RSM yöntemi kullanılarak karmaşık metal kesme problemlerinin deneysel sonuçlar yardımıyla etkili bir şekilde modellenebileceği, kesme sıvısı kullanıldığı durumda sürtünmenin azalmasından dolayı düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edilebileceği ve kuru kesme şartlarında en düşük pürüzlülüğü veren parametrelerin kesme hızı ile eksenel kesme derinliği olduğu sonucuna varılmıştır [41].

Sahin ve Motorcu, yapmış oldukları deneysel çalışmada; solid karbür kaplı kesicilerle yumuşak bir çelik olan AISI 1040 çelik malzemenin işlenmesi sırasında elde edilen verilerle pürüzlülük modeli geliştirmişlerdir. RSM yöntemi kullanılarak kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. 1. ve 2. mertebeden polinom modelleri yüzey pürüzlülüğünü deneysel verilerle tahmin etmek için kullanılmıştır. Deneyler, merkezi kompozit tasarım tekniğine dayalı olarak düzenlenmiştir. RSM yöntemine dayalı olarak oluşturulan 2. mertebeden (parabolik) bir polinom modeli, ilerleme parametresinin yüzey pürüzlülük değişimi üzerindeki en önemli etki olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 1. mertebeden polinom modeli de ilerleme ve kesme hızının önemli olduğunu, buna karşılık kesme derinliğinin önemsiz olduğunu göstermiştir [42].

Monsour ve diğerleri, EN32M karbonlu çelik malzemeyi ilerleme, kesme hızı ve eksenel kesme derinliği gibi frezeleme parametreleriyle işleyerek oluşan yüzey pürüzlülüğünü DOE tekniği ve RSM yöntemine uygun olarak modellemişlerdir. 24 deney, merkezi kompozit tasarıma göre planlanarak genel amaçlı bir CNC tezgahında yapılmıştır. Araştırma sonunda, RSM yöntemine dayalı olan 1. ve 2. mertebe modeller, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en önemli frezeleme parametresi olduğunu ortaya çıkarmıştır [43].

Noordin ve diğerleri, AISI 1045 çelik malzemenin işlenmesi sırasında RSM yöntemini kullanarak çok katmanlı kaplamaya sahip Tungsten karbür kesici takımın performansını modellemişlerdir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçülerek kesme performansı üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, RSM yöntemine bağlı olarak oluşturulan modelle kontrol edilmiştir. Bu model, 3. mertebeden (kübik) bir matematiksel modeli ifade etmektedir. Aynı zamanda, deneysel sonuçlar ANOVA (Analysis of Variance-Varyans Analizi) adı verilen istatiksel bir yöntemle de kontrol edilmiştir. ANOVA, RSM yöntemine dayalı olarak oluşturulan 3. mertebe denklemin % 98.16'lık bir yeterliliğe sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Oluşturulan 3. mertebe denklem, yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamıştır [44].

Singh ve Rao, sert alaşımlı AISI 52100 çelik malzemenin tornalanması sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme şartları ile kesici takım geometrisinin etkilerini belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Tam faktöriyel deney tasarıma dayalı olan toplam 81 deney sonucu kullanılarak 2. mertebeden bir RS model oluşturulmuştur. Daha sonra, ANOVA tekniği ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. 1. mertebe modelin regresyon katsayısı (R^2) 0.9233 bulunurken, 2. mertebe modelin regresyon katsayısı 0.9608 olarak bulunmuştur. Bu iki sonuca dayanarak, oluşturulan bu iki modelin optimizasyon için de efektif bir biçimde kullanılabileceği anlaşılmıştır [45].

Talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan problemlerin çözümünde ANN ve RSM yöntemlerinin yanında, GA tekniğiyle de çözüm yapılabilir. ANN ve RSM yöntemleriyle tahmin modeli oluşturarak GA tekniğiyle optimizasyon yapılması oldukça yaygın bir uygulamadır. GA ile hem tahmin hem de optimizasyon yapılabilir. Fakat GA ile tek başına tahmin modeli oluşturmak zordur ve GA'nın kullanıcı ara-yüzü zayıftır. GA, ANN ve RSM yöntemleriyle birleştirilirse, optimizasyon sonuçları o derecede güçlü ve güvenilir olacaktır. Bu tez çalışmasında da, bu mantığa dayalı olarak yüzey pürüzlülük problemi çözülmüştür [54,55,69].

Brezocknik ve diğerleri, Alüminyum 6061-T6 malzemenin düz uçlu takımlarla frezelenmesi boyunca yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için doğrudan GA tekniğini kullanarak model oluşturmayı amaçlamışlardır. Kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve titreşim gibi bağımsız değişkenlerle toplam 156 deney yaparak bağımlı değişken olan yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşlerdir. GA içindeki 156 ölçüm sonucunun 120'si modelin eğitilmesi için ve 36'sı da test edilmesi için seçilmiştir. GA ile oluşturulan denklem, çözüm süreci içinde yüzey pürüzlülüğünü en iyi tahmin eden modeldir. GA, % 7.44 eğitim hatası ve % 7.74 test hatası bularak diğer metal kesme problemleri için de kolaylıkla kullanılabileceğini ispatlamıştır [48]. Çolak ve diğerleri, bu araştırmaya paralel olan GEP (Genetic Expression Programming-Genetik İfadeli Programlama) tekniğini kullanarak aynı malzeme üzerinde kesme parametreleriyle yüzey pürüzlülük tahmini yapmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, standart bir pürüzlülük denklemi yerine grafiklerle gösterilmiştir. Araştırmacılar, kesme hızının pürüzlülük üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır [49].

Baskar ve diğerleri, frezeleme operasyonları için kesme parametrelerinin belirlenmesinde GA tekniğine dayanan bir optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışma, frezeleme operasyonları için en uygun kesme şartlarını bulan bir optimizasyon sisteminden yararlanmayı ve geliştirmeyi hedeflemiştir. Optimizasyon süreci boyunca yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri, en uygun kesme parametrelerinin bulunmasında önemli birer kısıtlama unsurudur. GA çözüm süreci içinde, en uygun kesme parametrelerine karşılık imalat maliyeti, zaman ve kar oranı hesaplanmıştır [50].

Shunmugam ve diğerleri, bir önceki çalışmaya paralel olan bir çalışma yapmışlardır. Çeşitli frezeleme parametrelerini kullanarak en yüksek imalat miktarını veren en yüksek kar payını hesaplamak için GA tekniği ile optimizasyon yapmışlardır. Daha sonra, toplam ürün maliyet oranını matematiksel formül içinde hesaplamışlardır. Ürün maliyet oranı hesaplanırken yüzey pürüzlülüğü, işleme zamanı, takım ömrü, kesme kuvveti ve kesme gücü gibi alt parametreler de bulunmuştur. Ayrıca, bu alt parametrelerin her biri için kesme işlemi kısıtlamaları da eklenmiştir [51].

Vivankos ve diğerleri, plastik enjeksiyon kalıplarının imalatı için sertleştirilmiş çeliklerin yüksek kesme hızlarıyla işlenmesi sırasında meydana gelen yüzey pürüzlülüğünü kontrol ederek en uygun frezeleme parametrelerini bulmuşlardır. Bu amaç için, DOE tekniğine dayalı olarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin eden 2. mertebe iki model geliştirmişlerdir. Bu modeller, imal edilen kalıp parçalarına ait yüzey kalitesinin daha üst seviyede tespit edilmesine, daha az deneyle sonuca ulaşılmasına ve optimum frezeleme parametrelerinin seçilmesine önemli bir katkı sağlamıştır [52].

Park ve Rhee, çalışmalarında; AA5182 ve AA5356 Alüminyum alaşımlarının lazerle kaynak işleminden elde edilen deneysel sonuçları kullanarak ANN yöntemine dayalı tahmini matematiksel model oluşturmuşlardır. Bu model yardımıyla, lazer kaynağı işlem parametrelerinin optimizasyonu için efektif bir GA tekniğini geliştirmişlerdir. Tahmini modelin oluşturulması için üç giriş parametresine (kaynak yapma hızı, lazer gücü ve tel ilerleme hızı) karşılık bir çıkış parametresini (kopma mukavemeti) kullanmışlardır. Kopma mukavemeti, bu çalışmada kullanılan GA tekniğinin maksimize edilen amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Bu çalışma sonunda, ANN yöntemine dayalı olarak oluşturulan matematiksel modelin ortalama hatası % 1.03 civarında tahmin edilmiştir. GA tekniğiyle, en yüksek kaynak kopma mukavemetini veren optimum lazer işlem parametreleri kaynak yapma hızı 8.4762 m/dak, lazer gücü 4 kW ve tel ilerleme hızı 2.3871 m/dak olarak bulunmuştur [53].

Zuperl ve Cus, ANN ile GA yöntemlerini kullanarak bir sonraki çalışmaya paralel olan bir araştırma yapmışlardır. ANN yöntemiyle bir model geliştirerek yüzey pürüzlülüğü, operasyon maliyeti ve imalat miktarı için tahmin yürütmüşlerdir. Daha sonra, kesme parametreleri ile kesme kuvveti gibi iki kısıtlama altında optimizasyon süreci GA tekniğiyle gerçekleştirilmiştir [54]. Zuperl ve diğerleri, optimum kesme şartlarını belirlemek için ANN ile OPTIS adı verilen yeni bir optimizasyon yöntemini birleştirmişlerdir. ANN ve OPTIS yaklaşımı içinde yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme kuvveti, imalat maliyeti ve talaş yapışması gibi kısıtlamaları kullanmışlardır. ANN ile OPTIS yaklaşımı, GA tekniği ve diğer optimizasyon yöntemleriyle kesme parametreleri dikkate alınarak kesme maliyetleri için karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara

dayalı olarak; ANN yöntemi ile OPTIS yaklaşımları 1.192 $, GA tekniği 1.598 $ ve diğer optimizasyon yaklaşımları ise 1.30 $'lık metal kesme maliyeti bulmuştur [55].

Chiang, bilgisayar işlemcisi üzerindeki soğutma ünitesinin ısıl performansını etkileyen tasarım parametrelerinin modellenmesi ve optimizasyonu için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Efektif bir RSM süreci, ısıl direnç (R_{th}) ve basınç (ΔP) gibi ısıl performans karakteristiklerinin modellenmesi ve optimizasyonunda kullanılmıştır. Sıralı tahmine dayalı optimizasyon metodu, 2. mertebe bir RS modelle birleştirilerek soğutma ünitesinin ısıl performansını etkileyen optimum tasarım parametreleri bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, RSM ile optimizasyon sürecinin R_{th} parametresi üzerinde % 24.86 ve ΔP parametresi üzerinde ise % 35.24 civarında bir geliştirme sağlandığı görülmüştür [56].

Reddy ve Rao, çalışmalarında; AISI 1045 çelik malzeme üzerinde 20 mm çapta TiAlN kaplı kesici takımlarla kuru kesme şartları altında üç seviyeli tam faktöriyel deney tasarımına bağlı, toplam 108 (81+27) frezeleme deneyi yapmışlardır. Kesme hızı, ilerleme, yan kenar açısı ve takım uç yarıçapı gibi frezeleme parametreleriyle elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Pürüzlülük ölçüm sonuçları kullanılarak RSM yöntemine dayalı 1. ve 2. mertebeden RS modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen modeller GA tekniğiyle birleştirilerek yüzey pürüzlülüğü için optimizasyon yapılmıştır. Araştırmacılar, optimizasyon süreci boyunca optimum frezeleme parametrelerine karşılık gelen en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini GA tekniğiyle elde etmişlerdir. Bu araştırma sonuçlarından, RSM ile birleştirilen GA tekniğinin iyi bir tahmin ve güçlü bir optimizasyon yeteneği olduğu sonucuna varılmıştır [57, 58].

Liu, araştırmasında; ince duvarlı bir levhanın optimum ölçülerinin bulunması amacıyla RSM yöntemine dayalı optimizasyon sürecini incelemiştir. Araştırmacı, genişlik (a) ve kalınlık (t) gibi giriş parametrelerine karşılık; ağırlık (W), enerji tutma oranı (SEA) ve maksimum çarpma kuvveti (P_m) gibi çıkış parametrelerini kullanarak toplam 27 sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla, 1. mertebeden 4. mertebeye kadar artan polinom tipi RS modeller

oluşturmuştur. Araştırmacı, bu RS modellere dayalı olarak enerji tutma oranının en yüksek değerini bulan optimum tasarım parametrelerini elde etmeye çalışmıştır. Optimizasyon süreci boyunca en uygun sonuca, 4. mertebe bir RS modelle maksimum çarpma kuvveti kısıtlaması altında ulaşılmıştır. Araştırma sonunda, en yüksek tahmin doğruluğunu veren 4. mertebe RS modelin regresyon katsayısının R^2=0.9935 ve ortalama hatasının % 3.86 civarında olduğu görülmüştür. Optimum tasarım parametreleri ise a=30 mm, t=2.41 mm, W=0.679 kg ve SEA=11,1817 kJ/kg olarak bulunmuştur [59].

Dabnun ve diğerleri, cam-seramik karışımı bir malzemeyi tornalayarak üç seviyeli DOE tekniğine uygun olan 1. mertebeden bir polinom modelini yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için geliştirmişlerdir. Daha sonra, geliştirilen 1. mertebe pürüzlülük modeli yardımıyla malzeme çıkarma oranını da hesaplamışlardır. Araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü ile malzeme çıkarma oranı için MATLAB'ta elde edilen grafikleri kullanarak en uygun kesme şartlarını belirlemişlerdir. Bu çalışmada, malzeme çıkarma oranı MATLAB'ta elde edilen kontur grafiklerine süper-pozisyon yöntemi uygulanarak elde edilmiştir [60].

Quiza ve diğerleri, deneysel çalışmalarında; AISI D2 takım çeliği üzerinde seramik uçlu takımlarla tornalanması sonucunda meydana gelen aşınmaları incelemişlerdir. Tornalama işleminden ölçülen aşınma değerleri kullanılarak ANN ve çoklu regresyona dayanan tahmini modeller geliştirmişlerdir. Çoklu regresyon yöntemiyle 1. ve 2. mertebe doğrusal tahmini modeller oluşturulurken, ANN yöntemiyle 9 farklı model oluşturulmuştur. Her iki yöntemde, üç giriş parametresiyle (Kesme hızı, ilerleme ve zaman) bir çıkış parametresi (aşınma) tahmin edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, çoklu regresyonla oluşturulan aşınma modelinin tahmin hatasının % 2.31, ANN ile oluşturulan aşınma modelinin tahmin hatasının ise % 0.70 olduğu çalışmadan görülmüştür [61].

ANN ve RSM yöntemleri; hassasiyet, çözüm doğruluğu, analiz süresi, denklem tipi (doğrusal, doğrusal olmayan), kullanıcı ara-yüzü, optimizasyon problemlerine uyum ve kısıtlama sayısı bakımından birbiriyle önemli ölçüde farklılıklar gösterir.

Literatürde birçok araştırmacı bu farklılıkları ortaya çıkarmak için çaba harcamıştır. Araştırmacılar, deney sayısı arttıkça model mertebesinin artmasına bağlı olarak RSM yönteminin daha iyi sonuç verdiğini, ANN yönteminin ise GA optimizasyon tekniğiyle daha iyi uyum sağladığını ifade etmişlerdir. Diğer taraftan; ANN ile doğrusal olmayan modellerin, RSM ile doğrusal olan modellerin daha iyi oluşturulabildiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak; ANN ve RSM yöntemleriyle oluşturulan tahmini modellerin GA gibi bir optimizasyon tekniğiyle birleştirilerek metal kesme işlemleri ve endüstride karşılaşılan diğer problemlere çözüm üretmesi, bu üç yöntemin oldukça güçlü, efektif ve güvenilir olduğunu gösterir [68-70].

BÖLÜM 3. KALIP TASARIM VE İMALAT YÖNTEMLERİ

İmalat endüstrisindeki hızlı gelişmeler ve ürün kalitesinin arttırılmasına duyulan ihtiyaç, kalıpçılık sektörünün gerekliliğini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Kalıpçılık; otomobil sanayi, uzay endüstrisi, tıbbı malzemeler, elektronik sistemler ve ev araç-gereçleri gibi günlük hayatta kullanılan ürünlerin üretilmesinde yaygınlaşmıştır. Bütün bu alanlarda tek tek parça yaparak rekabet etmek çok zordur ve seri imalat yapma ihtiyacı kalıpçılık sektörünü zorunlu hale getirmiştir. Karmaşık kalıp yüzeyleri, ölçüsel hassasiyet, yüksek yüzey kalitesi, düşük maliyet ve kontrol, kalıpçığın CAD/CAM/CAE sistemlerine adapte olmasını sağlamıştır. Özellikle, CAD/CAM sistemlerine bağlı olarak eş zamanlı tasarım ve imalat yöntemleri ön plana çıkmıştır. Çeşitli bilgisayar destekli tasarım ve imalat programları kullanılarak kalıp imal teknikleri kolaylaştırılmıştır. Bunun sonucu olarak, kalıpla imalat yöntemleri artan bir hızla endüstrideki yerini almıştır [11,12].

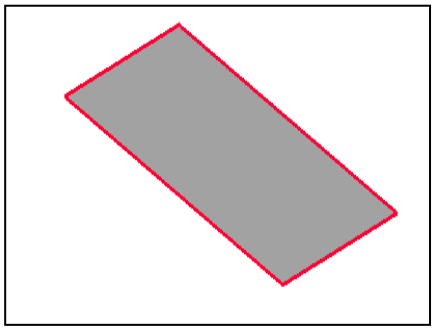
Parça imalatında geliştirilmiş olan çok sayıda kalıpla imal yöntemi mevcuttur. Bu kalıpla imal yöntemleri, plastik enjeksiyon, saç metal, hassas döküm, dövme, çekme ve bükme bu yöntemler olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerin bazıları talaşlı bazıları da talaşsız imalat yöntemidir. Fakat bahsedilen bu yöntemleri uygulamak için kalıp yapmak ve kalıpları da imal etmek için talaş kaldırma işlemlerini kullanmak gerekir. Plastik enjeksiyon ve hassas döküm için mum model kalıplarının imalatı birbirine benzerdir. Kalıpları tasarlamak ve kalıp boşluklarını CAD/CAM ortamında oluşturmak için aynı teknikler kullanılır. Özellikle, hassas döküm için mum ve plastik enjeksiyon, kalıp boşluklarının oluşturması bakımından birbirine çok yakındır. Her iki yöntemde de oluşturulan kalıp boşlukları aynı talaş kaldırma işlemiyle elde edilir. Ancak, bu iki kalıpçılık yöntemini birbirinden ayıran en önemli fark, hassas döküm için mum kalıptan elde edilen ürün bir mum iken plastik enjeksiyonda elde edilen ürün ise bir plastik malzemedir. Bu bölümde, tez çalışmasında hassas döküm işlemi için mum ve plastik enjeksiyon plastik kalıpları

tasarlanarak imal edilmiştir. Hassas döküm işlemi için mum modelinde Alüminyum 7075-T6 malzeme kullanılırken, plastik enjeksiyon işlemi için AISI 1040 çelik malzeme kullanılmıştır. Kalıp boşluklarını oluşturmak için farklı yüzey tasarım teknikleri seçilmiş ve tasarlanan kalıpların gerçek ortamda imal edilmesi için çok sayıda CNC frezeleme stratejisi uygulanmıştır. Bu sayede, hassas döküm işlemi için mum kalıbı ve plastik enjeksiyon işlemi için plastik kalıpların imal edilebilirliği ispat edilmiştir. Bu durum dikkate alınarak, Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzeme tez çalışmasının deney malzemeleri olarak seçilmiştir.

3.1. Kalıp Parçaları için Tasarım Yüzeylerinin Oluşturulması

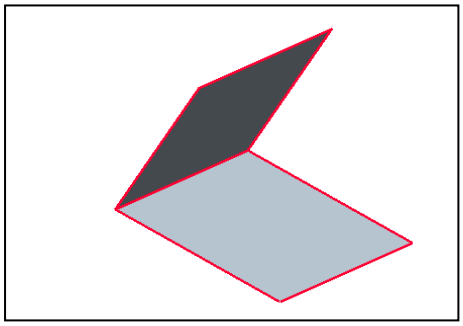
Kalıp parçalarını imal etmek için tasarım yüzeylerinin oluşturulması gereklidir. Tasarım yüzeyleri, kalıp boşluğunun geometrisine ve hacimsel büyüklüğüne bağlı olarak çeşitlilik gösterir. İmal edilmek istenen parçanın yüzey geometrisi karmaşık ise kalıp tasarımı da karmaşık olacaktır. Kalıp parçalarında kullanılan yüzeyleri; düz, eğimli ve serbest formlu yüzeyler olmak üzere 3'e ayırmak mümkündür. Bir parçaya ait kalıp yüzeylerinde düz, eğimli ve serbest formlu yüzeylerin bir arada bulunması mümkündür.

- Düz yüzeyler: Belli bir eğime sahip olmayan ve daha çok büyük parçaların geometrilerini sınırlayan yüzeylerdir. Düz yüzeyler, kalıp yüzeylerinde en çok yer almaktadırlar ve % 45-55 civarındaki bir geometriyi kapsarlar [10,64]. Şekil 3.1, düz bir yüzeyin geometrisini göstermektedir.



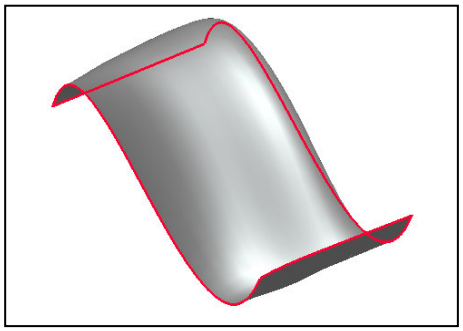
Şekil 3.1: Düz yüzeylerin geometrisi

- Eğimli yüzeyler: Sabit bir eğime sahip ve belli açılardaki yüzey çiftlerinden oluşan hem küçük hem de büyük parçaların geometrilerini sınırlayan yüzeylerdir. Eğimli yüzeyler, kalıp yüzeylerinde % 15-20 civarındaki bir geometriyi kapsarlar [64]. Şekil 3.2, eğimli bir yüzeyin geometrisini göstermektedir.



Şekil 3.2: Eğimli yüzeylerin geometrisi

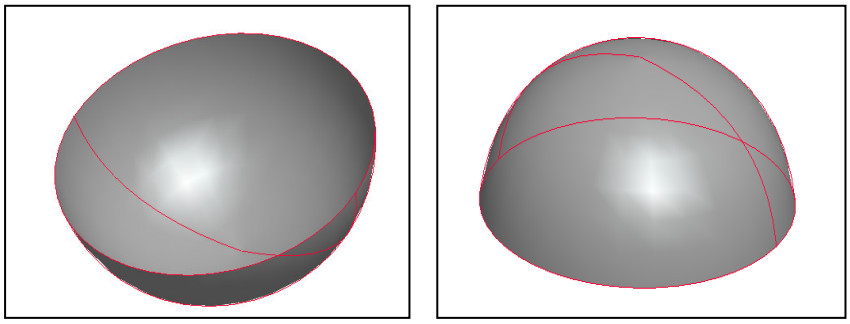
- Serbest formlu yüzeyler: Değişen eğim açılarına sahip olan düz ve eğimli yüzeylerinin bir araya gelmesinden oluşmuş çoklu yüzeylerdir. Bu tip yüzeyler kalıp parçalarında % 35-45 civarındaki bir geometriyi kapsarlar [10,64]. Şekil 3.3, serbest formlu bir yüzeyin geometrisini göstermektedir.



Şekil 3.3: Serbest formlu yüzeylerin geometrisi

Serbest formlu yüzeyler, iç bükey (konveks) ve dış bükey (konkav) olmak üzere ikiye ayrılırlar. İç bükey yüzeyler; düz bir yüzeyin aşağıya doğru çekilmesiyle oluşturulmuş yüzeylerdir. Dış bükey yüzeyler ise iç bükey yüzeylerin tersine düz bir yüzeyin orta noktasından yukarıya doğru çekilmesiyle oluşturulmuş yüzeylerdir.

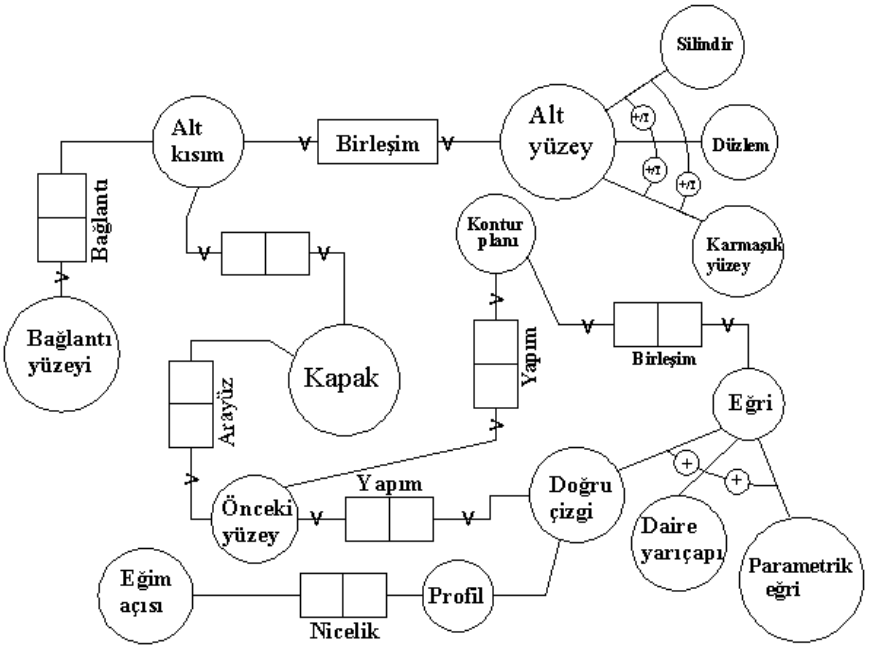
İç bükey ve dış bükey yüzeyler, kalıp yüzeylerinin tasarlanmasında geometrinin önemli bir kısmını oluştururlar. Şekil 3.4, dış ve dış bükey yüzeylere ait geometrileri göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 3.4: İç bükey ve dış bükey yüzeyler

Bir tasarım modeli çok sayıda yüzey unsurunun bir araya gelmesinden oluşur. Kalıp modeli yapılacak herhangi bir parça için de aynı durum geçerlidir. Plastik enjeksiyon kalıpçılık sektöründe kullanılan bir kapak modelinin tasarlanmasında 24 adet yüzey unsuru kullanılmıştır. Bu yüzeyler, 16 adet ana yüzey unsuru ile 8 adet ara yüzey unsurunun birleşmesinden oluşmuştur. Şekil 3.5, bu kapak modeline ait yüzey nesnelerinin birbirleriyle olan tasarım ilişkisini göstermektedir.



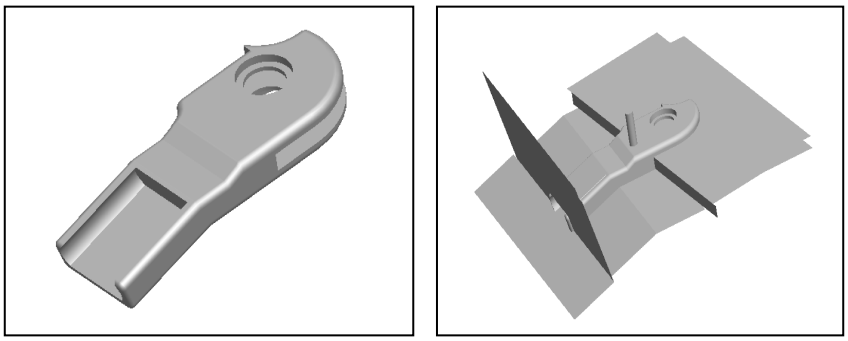
Şekil 3.5: Bir kapak modeline ait tasarım akış diyagramı [20]

Bu tez çalışmasında, tıbbi amaçlı bir Ortez (Orthose) parçası ile CD-ROM kapağına ait kalıpları üretmek için iki tasarım modeli oluşturulmuştur. Bu modellerde düz, eğimli ve serbest formlu yüzeylerin hepsi kullanılmıştır. Serbest formlu yüzeyleri oluşturan dış ve iç bükey yüzeyler, her iki modelin kalıp ayırma yüzeyleri üzerinde yer almıştır.

Kalıp tasarım yöntemi, kalıp imalatı ile her zaman bütünlük sağlamalıdır, çünkü tasarım süreci boyunca uygulanan stratejiler doğrudan kalıp imal sürecini etkiler. Tasarım aşamasında; modelin tasarlanabilirliği, model için kalıbın tasarlanabilirliği ve kalıbın imal edilebilirliği önceden tespit edilmelidir. Bu sayede, zaman ve maliyetten önemli ölçüde kazanç sağlanabilir. Endüstriyel amaçlı kalıp uygulamalarında da bu bakış açısından yararlanılarak imalat süreci planlanır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilen Ortez parçası ve CD-ROM kapağı için bahsedilen tasarım mantığı dikkate alınarak tasarımlar yapılmıştır.

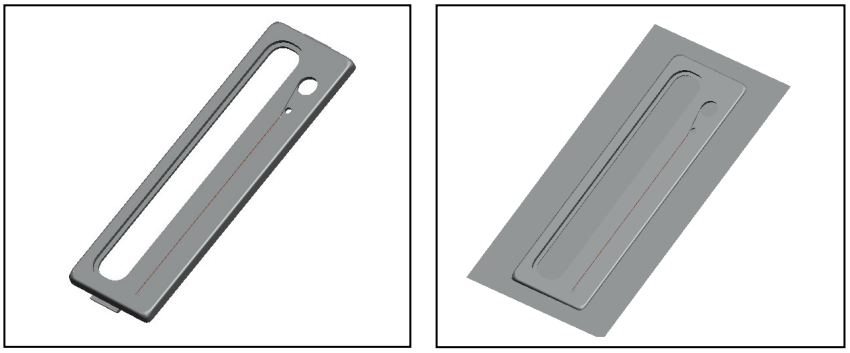
Ortez parçası ve CD-ROM kapağı için uygulanan genel kalıp tasarım aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

- Tasarım fikirlerinin ortaya atılması,
- En uygun tasarım sürecinin planlanması,
- Tasarım modelleri için teknik resim ölçülerinin belirlenmesi,
- Tasarım modellerinin bilgisayar ortamına aktarılması,
- Her iki model için kalıp ayırma yüzeylerinin belirlenmesi,
- Kalıp alt ve üst yarımları üzerinde kalıp boşluklarının oluşturulması,
- Kalıp ayırma yüzeylerine göre kalıp alt ve üst yarımlarının oluşturulması,
- Kalıp yarımlarında Ortez parçası ve CD-ROM kapağı ürünlerinin çıkarılması.



(a) (b)

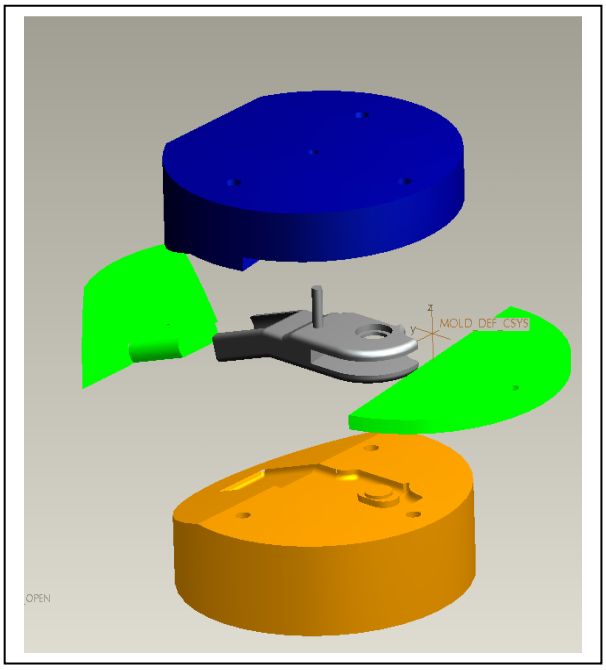
Şekil 3.6: Ortez parçası için oluşturulan tasarımlar



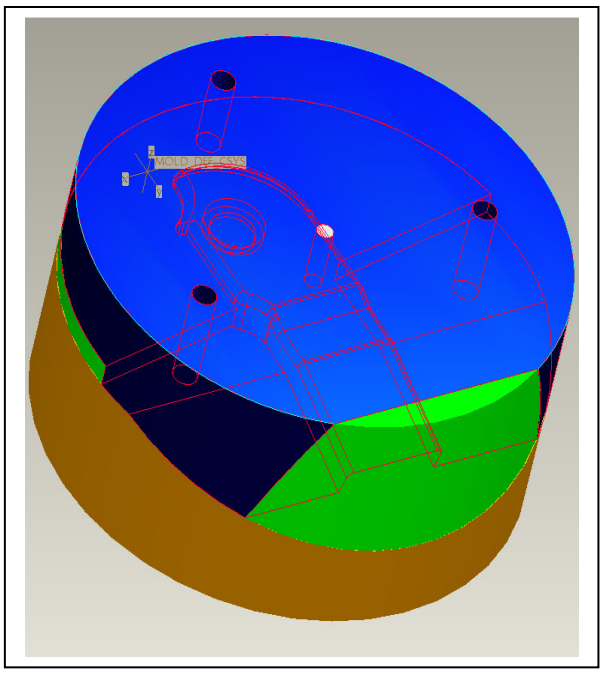
(a) (b)

Şekil 3.7: CDROM kapağı için oluşturulan tasarımlar

Bu tez çalışmasında; hassas döküm işlemi için kullanılan mum modelin daha kolay ve daha efektif bir biçimde basılabilmesi için Ortez parçasına elle çalışan bir kalıp tasarımı yapılırken, CD-ROM kapağının plastik enjeksiyon işleminde ise seri imalat için otomatik çalışan bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.8, Ortez parçası için tasarlanan manüel kalıp seti ve bileşenlerini gösterirken, Şekil 3.9 ise CD-ROM kapağı için tasarlanan otomatik kalıp seti ve elemanlarını göstermektedir.

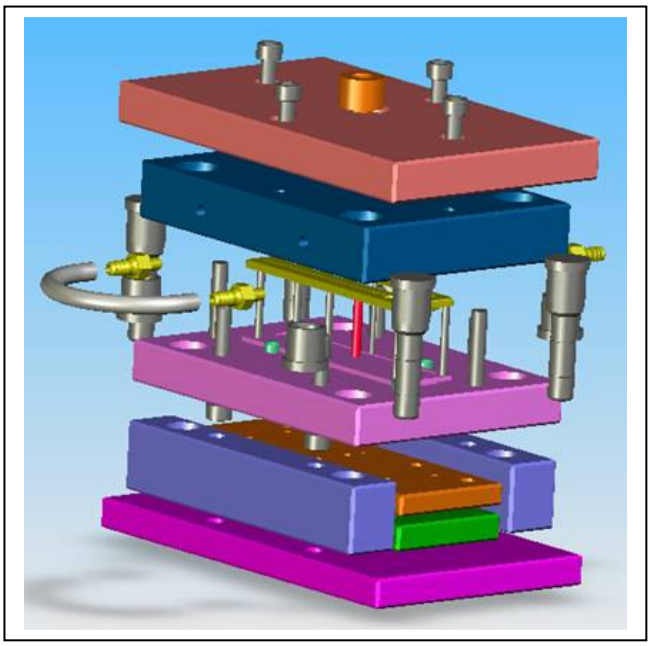


a) Kalıp setinin demontaj resmi

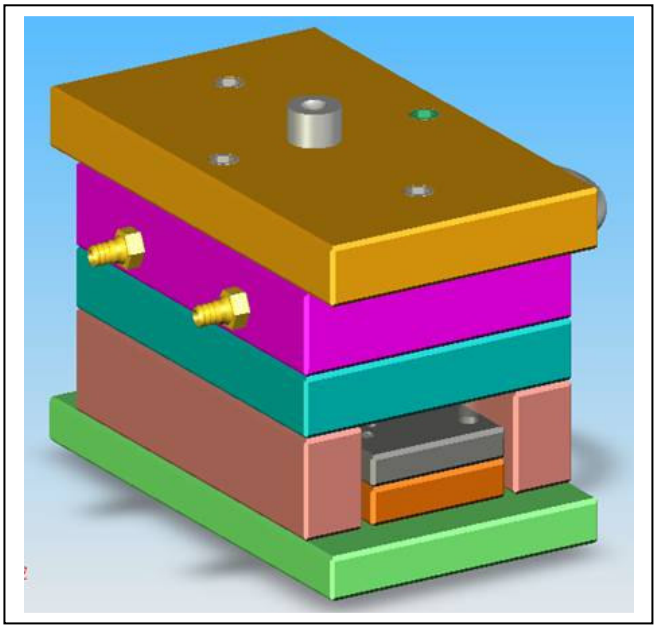


b) Kalıp setinin montaj resmi

Şekil 3.8: Ortez parçası için tasarlanan manüel kalıp seti



a) Kalıp setinin demontaj resmi



b) Kalıp setinin montaj resmi

Şekil 3.9: CD-ROM kapağı için tasarlanan otomatik kalıp seti

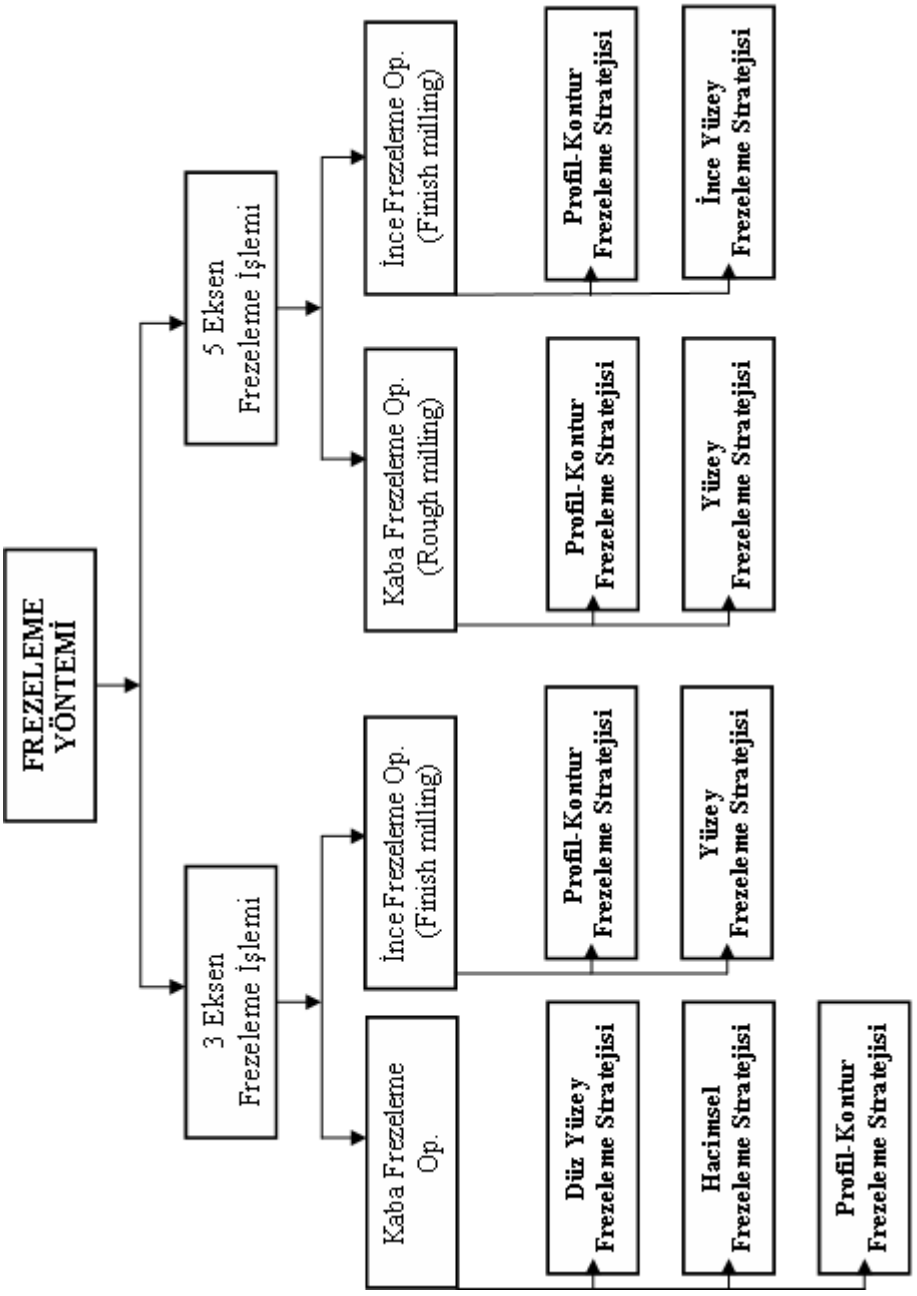
3.2. Kalıp Yüzeylerinin Frezeleme Stratejileri ile İşlenmesi

Kalıp yüzeylerinin işlenmesi ve kalıp yarımlarında bulunan boşlukların (kavitelerin) oluşturulması için çok sayıda metal kesme işlemi mevcuttur. Kalıp imal endüstrisinde kullanılan en önemli ve en yaygın metal kesme operasyonu, frezeleme işlemidir. Günümüzde, frezeleme işlemi CNC tezgahlar ve CAD/CAM programlarının kontrolüyle bütünleşerek geniş bir kullanım alanı bularak hızlı bir biçimde gelişmiştir. Çok karmaşık ve hızlı yapılması gereken işlemler bilgisayar programları yardımıyla CNC frezeleme yönteminde yapılabilmektedir. CNC frezeleme operasyonları; hassas parça geometrisi, yüksek yüzey kalitesi, düşük imalat zamanı, düşük maliyet, karmaşık parça yüzeylerini işleyebilme gibi metal kesme problemlerini daha efektif bir biçimde yapabilmek için alt imalat operasyonları adı verilen frezeleme stratejilerine ayrılmıştır.

Frezeleme stratejileri, metal kesme operasyonun birçok faktörüne bağlıdır ve her bir faktörün birbiriyle eş zamanlı kullanılmasını gerektirir. Literatürde birçok frezeleme operasyonu ve bu operasyonları oluşturan frezeleme stratejileri bulunmaktadır. Araştırmacılar, 3 eksen frezeleme operasyonları için Paralel Seviyede Kontur Frezeleme (Parallel Level Contouring), Raster Milling ve Kontur izlemeli Frezeleme (Contour Map Machining) gibi stratejileri kullanırken, 5 eksen frezeleme operasyonları için Paralel Frezeleme (Parallel Milling) ve Yüzey Akışlı Frezeleme (Surface Flow Milling) gibi stratejileri kullanmışlardır [10-11,17].

3.2.1. Frezeleme stratejileri ve kalıp yüzeyleri için uygulanması

Bu tez çalışmasında, hassas döküm işlemi için mum enjeksiyon yöntemiyle imal edilen Ortez parçasının alt kalıp yarımı ile plastik enjeksiyon yöntemiyle imal edilen CD-ROM kapağının üst kalıp yarımı için uygulanan frezeleme stratejileri incelenmiştir. Bu çalışmada, 3 eksen kaba ve ince yüzey frezeleme operasyonları ile bu operasyonları oluşturan frezeleme stratejileri kalıp yarımlarının işlenmesinde kullanılmıştır. Literatürde yer alan ve tez çalışması boyunca da uygulanan frezeleme yöntemleri, Şekil 3.10'da sırasıyla verilmiştir.

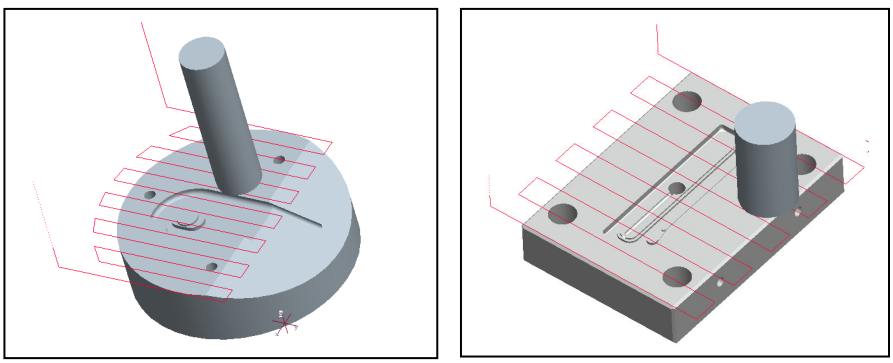


Şekil 3.10: Frezeleme yöntemini oluşturan operasyon ve stratejilerin diyagramı

Ortez parçası ile CD-ROM kapağının kalıp bileşenlerinin imal edilmesi sırasında kullanılan 3 ve 5 eksen CNC frezeleme stratejileri genel olarak 4'e ayrılmıştır. Her bir frezeleme stratejisi yüzeyin geometrisine uygun olarak efektif bir biçimde uygulanmıştır.

a) Düz yüzey frezeleme stratejisi (Face milling)
b) Hacimsel frezeleme stratejisi (Volume milling)
c) Profil-Kontur frezeleme stratejisi (Profile milling)
d) Yüzey frezeleme stratejisi (Surface milling)

a) Düz yüzey frezeleme stratejisi: Düz yüzey frezeleme stratejisi, düz parça yüzeylerinin frezelenerek şekillendirilmesinde kullanılan en etkin 3 eksen metal kesme operasyonu ve büyük çaplı kesici takımların geniş adımlarla hareket ettiği bir frezeleme stratejisidir. Bu stratejide, kesici takımın merkezi referans alınarak parça yüzeyi işlenir. Büyük çaplı kesici takımlarla geniş adımlı hareket, parça yüzeyinin kısa zamanda işlenmesini sağlayarak kesme ekonomisine önemli katkıda bulunur. Düz yüzey frezeleme stratejisinde; ilerleme, devir sayısı, eksenel ve radyal kesme derinlikleri, giriş-çıkış mesafeleri ve kesici takım çapı gibi birçok frezeleme parametresi bilgisayar programı yardımıyla kullanıcı tarafından kolaylıkla kontrol edilebilir [10,11]. Ortez parçasının kalıp bileşenleri ile CD-ROM kapağının kalıp bileşenlerindeki düz yüzeyler, bu stratejiyle işlenmiştir. Şekil 3.11, Ortez parçası ile CD-ROM kapağının en önemli ve en karmaşık kalıp yarımlarının düz frezeleme stratejisiyle işlenmesini göstermektedir.

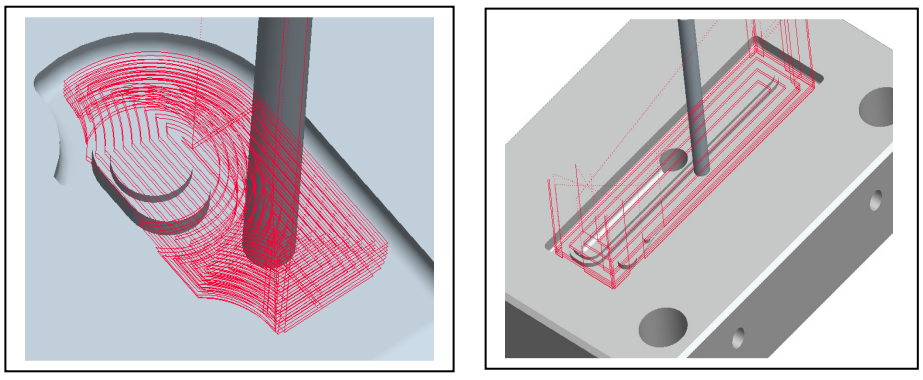


(a) (b)

Şekil 3.11: Düz yüzey frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması

b) Hacimsel frezeleme stratejisi: Hacimsel frezeleme stratejisi, parça yüzeylerinden büyük hacimlerde malzemenin çıkarılması gerektiği durumlarda tercih edilen 3 (üç) eksen metal kesme operasyonudur. Kesici takım alın yüzeyi ile parçaya temas ederek spiral biçiminde takım yolları oluşturur. Hacimsel frezeleme stratejisi, derin ve dar kalıp boşluklarının hızlı ve yüksek kalitede işlenmesini sağlar. Bu stratejide, kesici takım emniyet düzlemine paralel olan takım yolları oluşturarak malzeme çıkarma işlemi yapar. Düz yüzey frezeleme stratejisinde olduğu gibi, bu stratejide de aynı frezeleme parametreleri kullanılmaktadır.

Hacimsel frezeleme stratejisinde düz yüzey frezeleme stratejisinden farklı olarak, alt kontrol parametreleri bulunmaktadır. Alt kontrol parametreleri, kesici takım ve yüzeyin performansını artırmak için oldukça önemlidir. Alt kontrol parametreleri sayesinde, kesici takımın parça yüzeyi üzerine giriş açısı ayarlanarak kesici takımın alın yüzeyindeki aşınma % 60 oranında azaltılabilir [12-17]. Ayrıca, kesici takımın yüzeye uyguladığı kuvvetin etkisiyle oluşan izler ve işleme süresinin azaltılması da alt kontrol parametreleriyle sağlanabilir. Ortez parçası alt kalıp yarımı ve CD-ROM kapağının üst kalıp yarımı üzerinde uygulanan hacimsel frezeleme stratejisi, Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

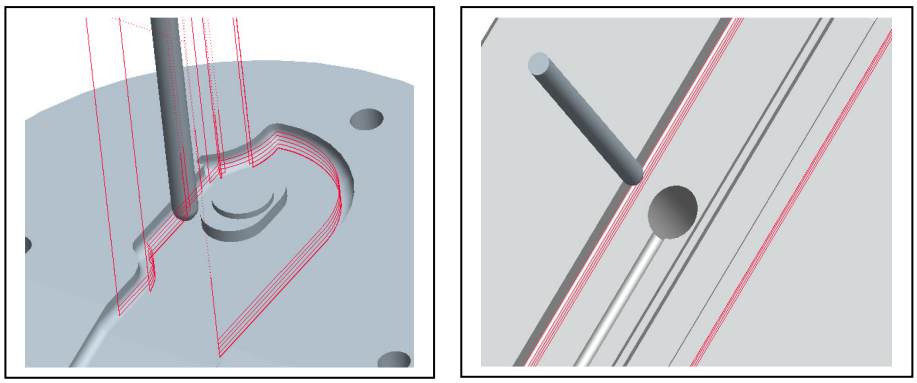


(a) (b)

Şekil 3.12: Hacimsel frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması

c) Profil-Kontur frezeleme stratejisi: Profil ya da kontur frezeleme stratejisi, parçaların yan yüzeylerinin bir profil boyunca ve belli bir kesme derinliğinde işlenmesi için uygulanan 3 ve 5 eksenli metal kesme operasyonudur. Kesici takımın

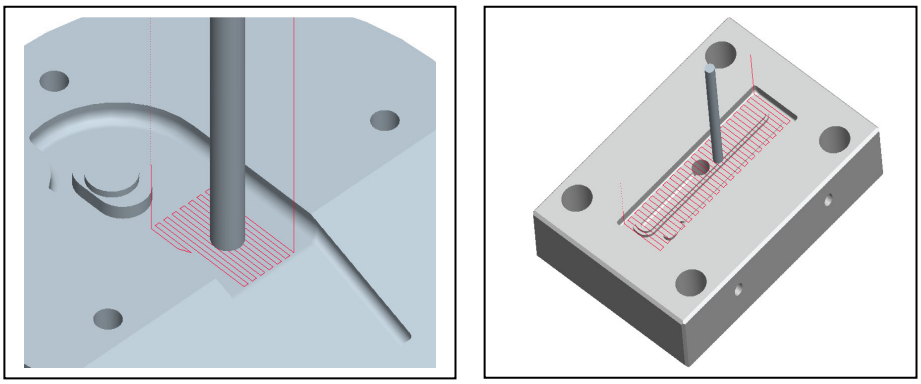
yan yüzeyinin işlenecek hacim yüzeylerine paralel hareketleri sonucunda takım yolu oluşturulur. Profil frezeleme stratejisi, hem 3 eksen hem de 5 eksen kaba ve ince yüzey işlemlerini yapabilmesinden dolayı, diğer frezeleme stratejilerine kıyasla daha yaygın ve kullanışlıdır. Alt kontrol parametrelerinin farklı kombinasyonları kullanılarak metal kesme performansı üst seviyeye çıkarılabilir. Bu stratejiyi diğerlerinden ayıran en önemli fark, işlenecek hacim ölçüsüne göre kesici takımın yarıçapının % 50'si kadar hareket etme olanağını vardır. Böylelikle; frezelenmesi istenen hacim ara operasyonlar yapılmaksızın kısa sürede işlenebilir [10-12]. Şekil 3.13'de, Ortez parçası alt kalıp yarımı ile CD-ROM kapak üst kalıp yarımı üzerinde profil frezeleme stratejisinin uygulanması gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.13: Profil-kontur frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması

d) Yüzey frezeleme stratejisi: Yüzey frezeleme stratejisi, düz, eğimli ve serbest formlu yüzeylerin 3 ve 5 eksende frezelenmesi için kullanılan bir metal kesme operasyonudur. Özellikle, 5 eksen operasyonlarının gerekli olduğu kalıp yüzeylerinin işlenmesi sırasında tercih edilen önemli bir frezeleme stratejisidir. Bu stratejiyi kullanarak kalıp yüzeylerinin işlenebilirliğini artırmak için yüzey oluşturma tekniklerinin çok iyi bilinmesi gereklidir. Düz yönlü kesme (Straight Cut), Yüzeyde ada biçiminde kesme (Surface Isoline), Hat boyunca kesme (Cut Line) ve Yüzeye yansıtmalı kesme (Project Cut) gibi farklı kesme biçimleri de kullanılarak her türlü kalıp ve makine parça yüzeyleri efektif bir biçimde işlenebilir. Yüzey frezeleme stratejisi bir parça yüzeyine en son uygulanan işlem olmasından dolayı, yüksek ölçüsel doğruluk ve yüksek yüzey kalitesi istenir [10-12]. Yüzey frezeleme stratejisinin Ortez parçası ve CD-ROM kapağı kalıp yarımları üzerindeki uygulaması, Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



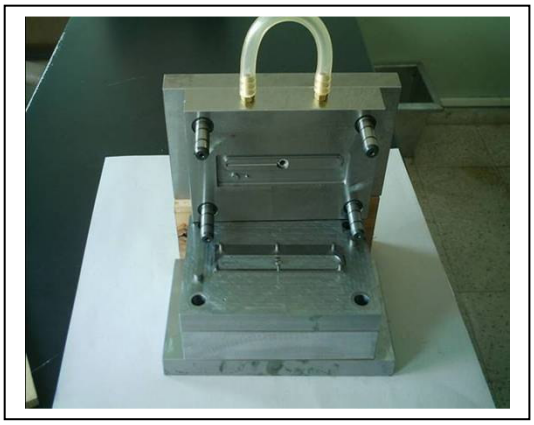
(a) (b)

Şekil 3.14: Yüzey frezeleme stratejisinin kalıplarda uygulanması

Bahsedilen 4 farklı frezeleme stratejisi ile bu stratejilerin alt kontrol parametreleri (kesme biçimleri ve yönleri) 3 eksen yüzey frezeleme işlemi boyunca bütünleşik bir amaçta kullanılarak Ortez parçası kalıp bileşenleri ile CD-ROM kapak kalıp seti bileşenleri CNC freze tezgahında imal edilmiştir. Şekil 3.15, imal edilen Ortez parçası kalıp bileşenleri ile CD-ROM kapak kalıp seti bileşenleri göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.15: Ortez parçası ve CD-ROM kapağının kalıp bileşenleri

BÖLÜM 4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK TEORİSİ VE ÖLÇÜMÜ

Bu bölümde; yüzey pürüzlülüğünün tanımı, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinin nedenleri, yüzey ve yüzeyin dokusu, yüzey pürüzlülüğünü oluşturan parametreler ve bu parametrelerin hesaplanması, yüzey pürüzlülüğünün matematiksel ifadeleri, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazlarının yapısı, yüzey pürüzlülük ölçüm yöntemleri ve endüstriyel parçalarda pürüzlülük ölçümünün yapılması ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Çeşitli imalat operasyonları sonucunda malzeme yüzeyinde meydana gelen mikro seviyedeki düzensizlikler veya bozukluklar olarak tanımlanır. DIN EN ISO 4287 standartlarına göre yüzey pürüzlülüğü, R_a sembolü ile "µm" veya "µinç" birimiyle gösterilir [22]. İmal edilen parçaların yüzey kalitesinin tespit edilmesinde yüzey pürüzlülüğünü ölçmek, izlenecek en efektif ve en doğru yoldur.

4.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesinin Nedenleri

Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinin birçok nedeni vardır. Yüzey pürüzlülüğü, bir makine parçasına ait ömür aşamalarının tespit edilmesinde en önemli kalite belirleyicisidir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan parçalarda birbiriyle temas eden yüzeylerin pürüzlü olması, yüzeyler arasındaki sürtünmeyi artırır ve dolayısıyla bir ısı oluşturur. Bunun sonucu olarak, yüzeylerde aşınma meydana gelir, ses çıkar ve dolayısıyla çalışma verimi azalır [21-22].

Birbiri içine geçen ve birbiriyle eş zamanlı çalışan mil-yatak, delik-pim, dişli-dişli v.b. makine elemanlarında gerekli ölçüsel doğruluğun olmaması, bazı montaj hatalarının ortaya çıkmasına ve dolayısıyla parça yüzeylerindeki pürüzlülük ve biçim hataları gibi istenmeyen montaj işlemlerinin yapılmasına neden olacaktır.

Hidrolik akışkanlar (özelikle yağların) sızmasını önlemek amacıyla araçların hareket iletim elemanlarının bağlantı yerlerinde boyun contaları kullanılır ve bu contaların önemli işlevleri vardır. Boyun contaları, otomobil aksı üzerindeki fren mekanizması ile diferansiyel yatağı arasında kilit görevi yaparlar. Burada kullanılan milin yüzeyi pürüzsüz ise elastik conta ile mil arasındaki akışkan filmin korunması zor olacaktır, buna karşın mil çok pürüzlü ise conta aşınacaktır ve diğer bozukluklar ortaya çıkacaktır.

Motor gövdeleri ile diğer parçalar ve dekoratif yüzeylerin çelik levhalardan yapılması sırasında yüzeyin dış görünüşü oldukça önemlidir. Yüzeyin pürüzlülüğü, yüzeylerin kaplanmasında ve boyanmasında bir kontrol unsurudur. Yüzeyin çok temiz olması boyanın ve kaplamanın çok güzel görünmesini sağlarken, yüzey üzerinde durmasını zorlaştıracaktır. Yüzeyin kaba olması ise boyanın ve kaplamanın yüzey üzerinde kolayca durmasını sağlarken, yüzeyin dalgalı ve pütürlü olmasına neden olacaktır [21-22].

Elektronik cihazlar çalışma sırasında belli bir ısı üretirler ve üretilen bu ısının bir şekilde kullanılan yerden uzaklaştırılması gerekir, aksi durumda elektronik cihaz çalıştığı diğer parçalara zarar verebilir. Elektronik cihaz içindeki herhangi iki metal yüzey arasında var olan bağlantı boyunca iletilen ısının verimliliği metal parça yüzeylerinin pürüzlülük durumlarına bağlıdır. Metal parçaların yüzey pürüzlülüğü düşük ise yüzeylerinden ısı kolay bir şekilde aktarılır ve elektronik cihaz zarar görmez. Bahsedilen bu sebeplerden dolayı, yüzey pürüzlülüğünün daima ölçülmesi ve kontrol edilmesi gereklidir.

4.3. Yüzey ve Yüzeyin Dokusu

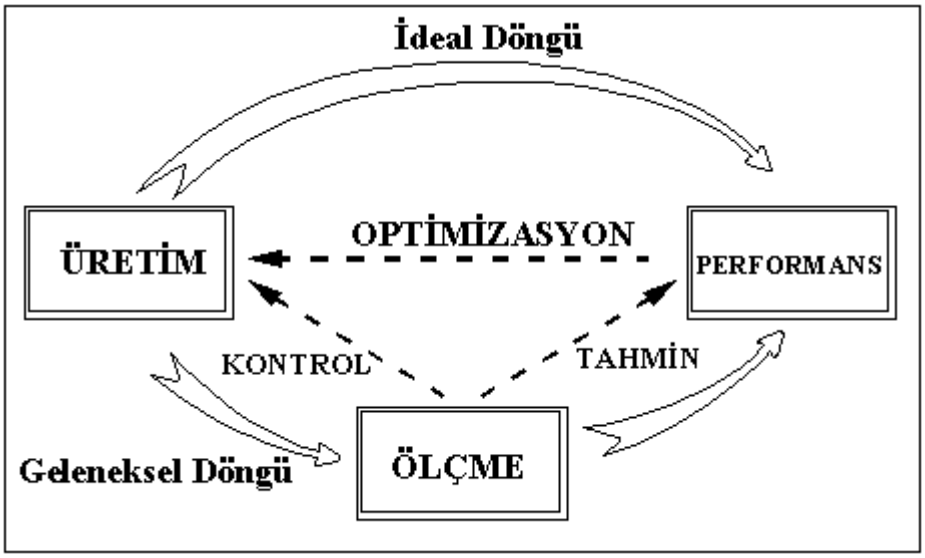
Yüzey pürüzlülüğünü daha iyi anlayabilmek için öncelikle yüzey ve yüzeyin dokusunu anlamak gereklidir. Yüzey, üzerinde dokuyu bulundurur ve bu dokunun karakteristiğine bağlı olarak pürüzlülük oluşur. Yüzey bir alandır ve iki ya da daha fazla malzeme arasındaki sınır olarak tanımlanır. İmalat işlemleri sonucunda elde edilen yüzeyler bir dokuya sahiptir. Yüzeyin bir parçası üzerindeki herhangi bir çizgi

boyunca ölçüm cihazının izlemesiyle elde edilen profil kaydı ile aynı yüzeye ait paralel mesafede ölçülmüş diğer bir profil kaydı birbirinden farklılık gösterebilir. Bunun temel nedeni, aynı yüzeyin değişik noktalarındaki dokunun farklı yapıda olmasıdır. Diğer taraftan; bir yüzey düzensiz desenlere (irregular patterns) sahip görünmesine karşın, aynı tip profil kaydı sergileyebilir.

Yüzeyleri kaba ve düz yüzeyler olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Düz (smooth) ve kaba (rough) yüzeyler, çok basit metotlarla birbirinden ayrılabilir. Kaba ve düz yüzeylere elle dokunulduğunda farklı hissedilir ve farklı görünürler; biri ışığı ayna gibi yansıtırken, diğeri yansıtmaz. Biri doku deseninden yoksunken, diğeri bir doku desenine sahiptir. Bir yüzey benzer bir yüzey üzerinden kolaylıkla kayarken, diğeri yüzeyle arasında gözle görülebilir bir sürtünme sergiler. Burada bahsedilen farklılıklar, kaba ve düz yüzeyler arasındaki temel ayrımın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Örnek olarak, tornalama ve taşlama gibi iki farklı imalat işleminden elde edilen yüzeyler kıyaslandığında bahsedilen bu ayrım iyi bir şekilde ortaya çıkacaktır [24].

Yüzey dokusu (surface texture), bir yüzeyin düzlülüğünü (smoothness) ve kaba olma durumunu (roughness) niceliksel olarak ifade etmek amacıyla kullanılır. İmal edilmiş bir parçanın ilk hali düşünüldüğünde üç temel işlem akla gelir. Birincisi, parçayı imal etmek için uygulanan işlem, ikincisi parçanın kullanımı ve üçüncüsü ise ölçme sürecidir. Bu üç süreç birbirine bağlıdır ve en pratik olarak yüzey dokusunun incelenmesiyle anlamlı hale getirilebilir. Şekil 4.1, imal edilmiş bir parçaya ait ömür aşamalarını göstermektedir. Yüzey dokusu ölçüsel olarak geniş bir alanı kaplar ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesiyle tespit edilebilir. Yüzey dokusunu incelemenin en kolay ve pratik yolu yüzeyin elektron ve optik mikroskoplarla görüntülenmesidir. 150 mm uzunluğunda düz bir yüzeyin dokusu incelendiğinde, yüzeyin orta noktasında 0.015 mm derinliğinde bir çukurun var olduğu görülecektir. 150 mm uzunluğundaki düz bir yüzeyi belli ölçüm aralıklarına göre bölerek incelemek, yüzey hakkında daha doğru ve hassas bilginin elde edilmesini sağlayacaktır. Bu yüzey gerçekte düz bir yüzey değildir, çünkü orta noktasında 0.015 mm bir çukur yani eğrilik bulunmaktadır. Ölçüm aralığı daraldıkça yüzeyin eğriliği daha fazla artacaktır.

Eğrilik, yüzeylerde var olan bir form hatasıdır ve bir yüzeyin doku bileşeni değildir. Yüzey doku bileşenleri pürüzlülük ve dalgalılık olmasına rağmen; form, dalgalılık ve pürüzlülük aynı ölçüm cihazından elde edilir. Fakat bu bileşenlerin her biri yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde en önemli üç bileşendir [22-24].



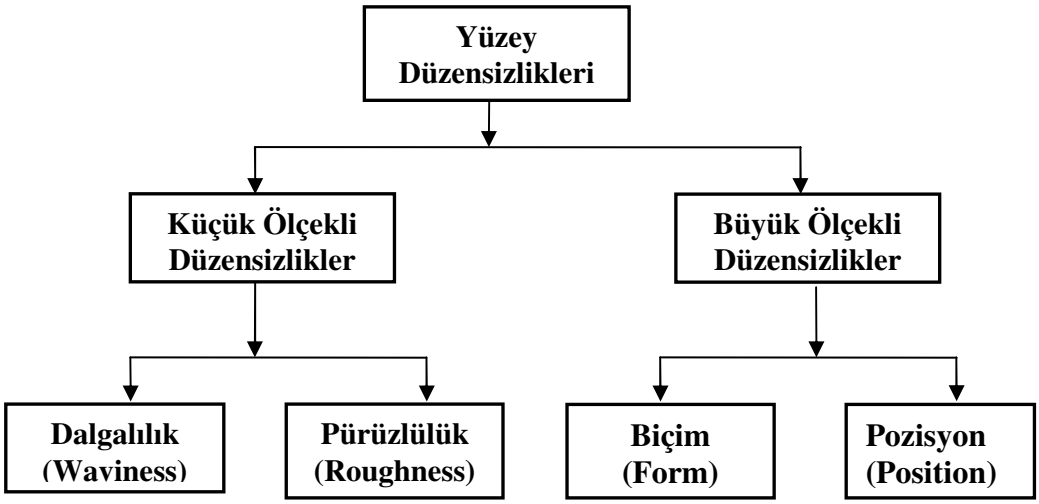
Şekil 4.1: Üretilen bir parçaya ait ömür aşamaları

4.3.1. Yüzeydeki düzensizlik tipleri

Yüzey düzensizlikleri, büyük ölçekli ve küçük ölçekli düzensizlikler olmak üzere ikiye ayrılır. Dalgalılık ve pürüzlülük küçük ölçekli düzensizlikler grubuna girerken, form ve pozisyon (konum) sapmaları büyük ölçekli düzensizlikler grubuna girmektedir. Tablo 4.1, DIN ve ISO standartlarına göre düzensizliklerin nasıl sınıflandırıldığını ve Şekil 4.2, yüzeydeki düzensizlik tiplerini göstermektedir.

Tablo 4.1: Düzensizliklerin sınıflandırılması [65]

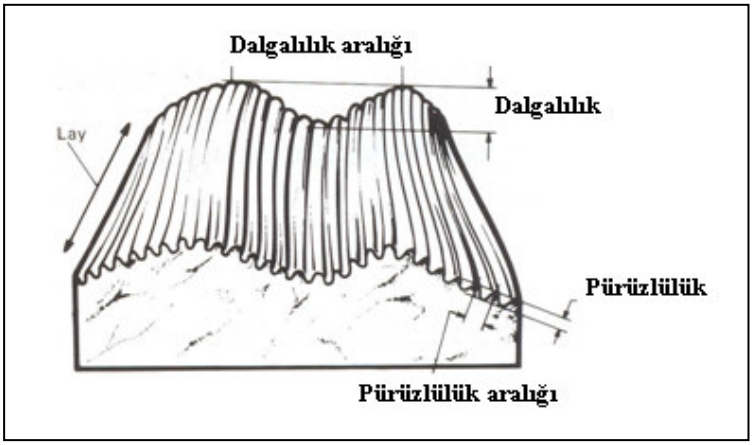
Sınıf 1	Form hatası	Doğruluk, düzlük, radyuslülük, silindiriklik
Sınıf 2	Dalgalılık	Dalgalılık DIN ISO EN 4287
Sınıf 3-4-5	Pürüzlülük	Pürüzlülük, oyuklar, yivler
Sınıf 6	Malzemenin kafes yapısı	DIN ISO 4288, 11562, 12085 ve 13565



Şekil 4.2: Yüzeydeki düzensizlikler [23]

4.3.2. Yüzey pürüzlülük şekli ve ilişkili ifadeler

Yüzeyi oluşturan bileşenler ve bu bileşenlerin birbiri arasındaki ilişki iyi anlaşılırsa, yüzey pürüzlülüğünü anlamak daha kolay olacaktır. Yüzey pürüzlülüğünün geometrik şekli ve pürüzlülük ile ilişkili ifadeler, Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Yüzey pürüzlülüğünün geometrik şekli [22]

- Pürüzlülük (Roughness): Başlangıç yüzey dokusudur ve yüzey dokusunun birincil bileşenidir. Diğer bir tanımla, çeşitli imalat işlemleri sonucunda malzeme yüzeylerinde kalan izlerdir.

• Dalgalılık (Waviness): Yüzey dokusunun orta kısmında yer alır ve yüzey dokusunun ikincil bileşenidir. Makine sapmaları, titreşimler, salınımlar, gürültüler ve malzemedeki çeşitli uzamalardan dolayı oluşur.

• Form: Yüzeyin en alt kısmını oluşturur ve yüzeyin bitiş dokusudur. Yüzeyin genel şeklidir ve pürüzlülük ile dalgalılıktan dolayı oluşan değişimler formu önemli ölçüde etkilemez. Form, bir yüzeye ait ölçüsel doğruluğun kontrol edilmesinde kullanılır.

• Cepler (Lay): Yüzey dokusunda yer alan desenlerin yönünü belirleyen akış çizgileridir. Ceplerin yönü oldukça önemlidir, çünkü pürüzlülük ölçümü ceplerin yönüne göre belirlenir.

• Pürüzlülük aralığı (Roughness spacing): Yüzey dokusu içindeki en yüksek tepeler arasındaki kabul edilebilir paralel boşluklardır.

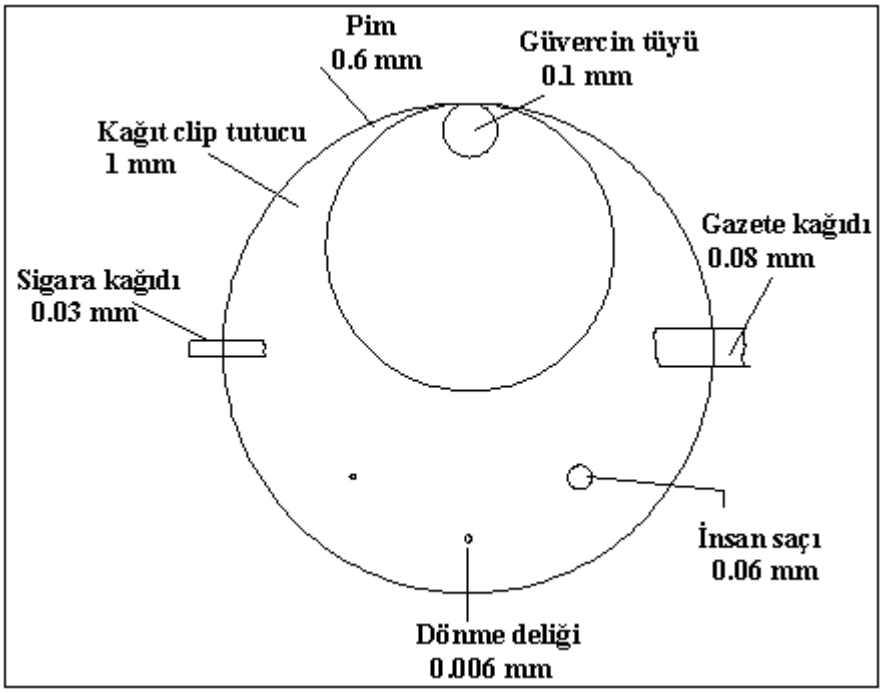
• Dalgalılık boşluğu (Waviness spacing): Ölçüm uzunluğu içindeki en yüksek tepeler arasındaki kabul edilebilir paralel boşluklardır [23].

4.3.3. Yüzey pürüzlülük birimi ve dereceleri

Yüzey pürüzlülüğünü birimsel hale getirmek için ölçülendirmek gerekir. Yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü, "µm" ya da "µinç" tir. Literatürde ve endüstride en yaygın olarak "µm" (mikron metre-mikron) sembolüyle kullanılır. 1 µm, 1 mm'nin binde biri veya 1m'nin milyonda biridir. 1 µm= 40 µinç veya 1 inç=0.025 µm olarak ta gösterilir. Doğada yer alan bazı nesnelere ait ölçüler Tablo 4.2'de verilmiştir ve bu nesnelerin birbiri arasındaki ölçüsel ilişki, Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

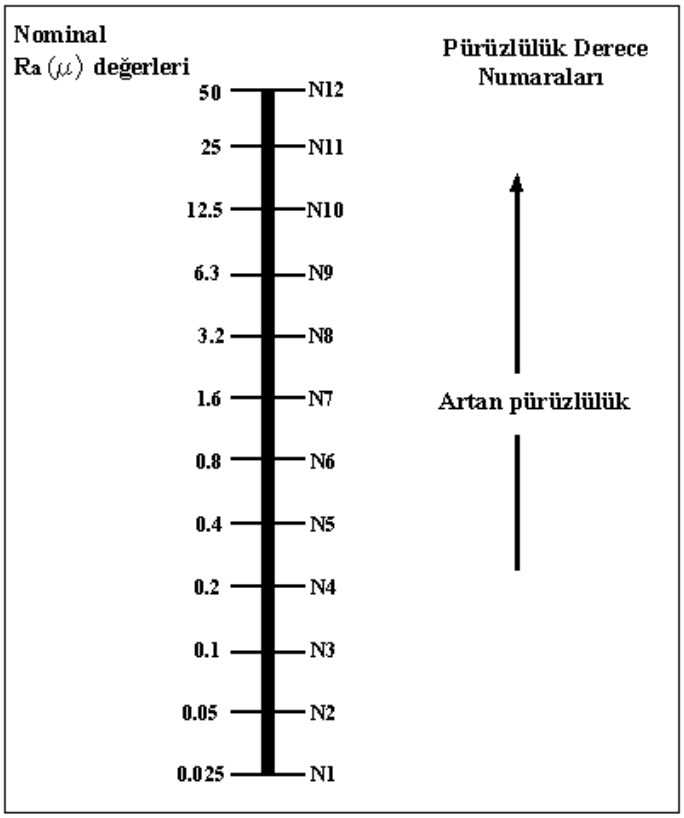
Tablo 4.2: Doğadaki eşyaların mikron cinsinden ölçüleri

Kağıt Tutucusu	1000 µ
Güvercin tüyü	100 µ
Gazete kağıdı	80 µ
Saç teli	60 µ
Sigara kağıdı	30 µ



Şekil 4.4: 1 µm' nin üstündeki ve altındaki ölçüleri gösteren çevrim

Bir yüzeye ait R_a (Ortalama Pürüzlülük-Average Roughness) değeri performansı önemli ölçüde etkilemeksizin değişebilir, bundan dolayı uygun olmayan bir tasarım dokusu üzerindeki çizimlerin adlandırılması için bilinen en iyi yöntem "yüzey pürüzlülük" derecelerinin oluşturulmasıdır. Bu bilgiye dayanarak, tolerans bantları ve "N" harfiyle Şekil 4.5'te gösterilen pürüzlülük dereceleri oluşturulmuştur. Pürüzlülük derecesi arttıkça yüzeyin kaba olma durumu artarken, pürüzlülük derecesi azaldıkça kaba olma durumu azalır. Her pürüzlülük derecesi R_a'nın iki katını göstermektedir ve bu değerler performansla uyum sağlayan geometrik işlemin sonucudur. Pürüzlülük derecelerinin her biri birçok uygulamada karşılaşılan işlemlerin performansını sergileyen en üst sınır değeridir. Örnek olarak, R_a değeri 0.6 µm olan bir yüzeyin pürüzlülük derecesi N5 ile N6 arasındadır ve bu değerin N5 pürüzlülük derecesine ait olduğu Şekil 4.5'ten görülebilir. Ayrıca, pürüzlülük derecelerinin kullanımı R_a'nın µm veya µinç birimleriyle ölçüsel hale getirilmesinde de önemlidir [21-23].



Şekil 4.5: Yüzey pürüzlülük dereceleri [23]

Şekil 4.5'te gösterilen pürüzlülük değerleri ve bu pürüzlülük değerlerine karşılık gelen pürüzlülük dereceleri, literatürde ve endüstriyel uygulamalardaki ihtiyaçlar sonucunda ortaya çıkmıştır. Özellikle, yüzey sonlama işlemleri sırasında elde edilen yüzeylere ait pürüzlülük değerleri oluşturulmuştur. Bu değerlerin birçoğu, pürüzlülük dereceleri aralığında yer alır ve bir yüzeye ait en uygun pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde bilgi verirler [21-24].

4.4. Yüzey Pürüzlülüğünde Profil Bilgisi

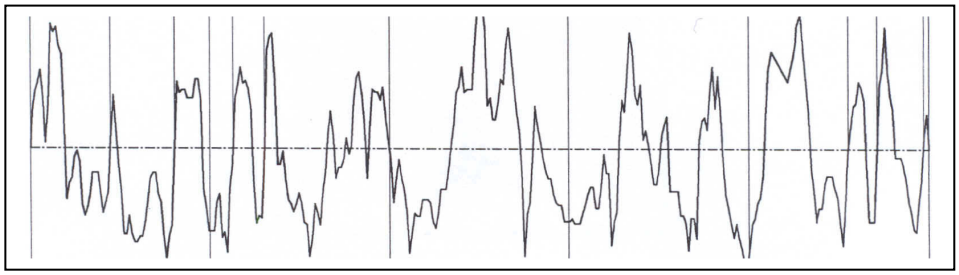
Profil, gerçek grafik kaydının yapılıp yapılmadığına bakılmaksızın tüm hedef yüzeylerin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Kaydetme olanaklarına sahip yüzey pürüzlülük cihazlarında bile, pürüzlülük parametreleri profilden elde edilmiş elektriksel bir dalgayla belirlenebilir. Endüstride kullanılan yüzey pürüzlülük cihazlarının hemen hepsi, Stylus (mekanik ölçme yapan) tipi cihazlardır ve profil bilgisinden elde edilen dalgaların yorumlanmasını gerektirir. Bir Stylus cihazı, kusursuz olarak ölçüm esnasında karşılaşmış olduğu her tepe ve

çukurun sınır çizgilerini doğru bir biçimde izler. Bundan dolayı, pürüzlülük bilgisinin tamamını profil sinyalinde toplanmış yüzeyin bir ucundan diğer ucunu takip eden bir çizgide bulmak mümkündür. Bir profilden matematiksel kurallara göre çıkarılmış parametrelerin hepsi elde edilebilir. Fakat Stylus cihazının şekli, büyüklüğü ve diğer faktörlerden dolayı bazen bir profilden bu parametrelerin hepsi çıkarılamaz [22].

4.4.1. Tepe ve çukur şekilleri

Profil bilgisinin daha iyi anlaşılabilmesi için tepe ve çukur kavramlarının bilinmesi gereklidir. Birçok bilimsel ve istatiksel grafikte çizilmiş ölçüm birimleri arasında herhangi bir ilişki yoktur. Örnek olarak, sıcaklığın zamana karşı grafiksel hale getirildiği bir şekilde bu durum söz konusudur. Gerçekte zaman ve sıcaklık birbirinden bağımsız iki farklı birimdir. Fakat birçok uygulamada bu iki birimin grafik şekli doğal olarak kabul edilir ve yorumlanır. Bir yüzeyin profil grafiği ise bu tip grafiklerden farklıdır. Profil grafiği, hem yatay hem de dikey eksende aynı birimi sergiler ve ölçek farkından dolayı başlangıçta profilden elde edilen grafiği anlamak zordur. Ancak, bir profilin gerçek görünüş şekli yatay ve dikey büyültmelerle bozulsa bile, grafikten çıkarılan ölçümler çoğu zaman doğrudur [22-24].

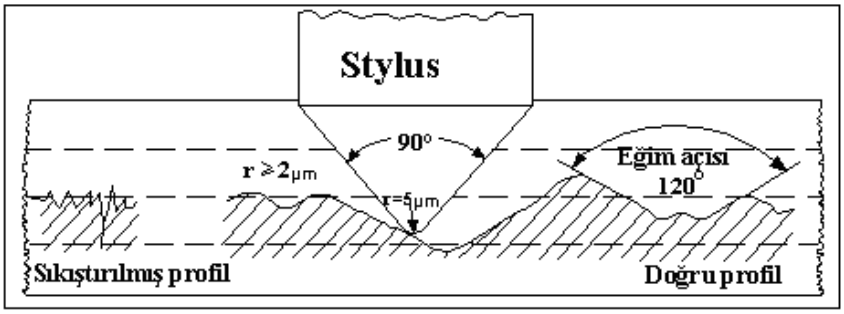
Bir profil grafiği (x5000, x2500) büyültme ile incelendiğinde, çok sayıda tepe (peak) ve çukurdan (valley) oluştuğu görülecektir. Tepe ve çukur, ölçümün yapıldığı yüzeyden elde edilen en üst ve en alt noktalardır. Tepe ve çukur, bir yüzey dokusunun eşit olmayan üst ve alt sınırları olup, merkezi çizgi ile iki alana ayrılır. Bir yüzeyden pürüzlülük ölçüm cihazıyla çıkarılmış olan tepe ve çukurların yer aldığı grafik, Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu grafikte yer alan tepelerin yüksekliği, Stylus cihazının karşılaşmış olduğu her tepenin en üst noktasını gösterir. Bazı tepe ve çukurlar, Stylusun izlediği yol miktarının sabit bir oranda değiştirilmesiyle ötelenir. Stylusun dikey yer değiştirmesi yatay yer değiştirmesinden daha az olmasına rağmen, izlenilen nesne için doğrudur ve grafik üzerindeki her tepede meydana gelen hatalar, yüzeydeki bir tepenin en üst noktasıdır [21-22].



Şekil 4.6: Tepe-çukur ilişkisi

4.4.2. Stylus biçimi ve büyüklüğü

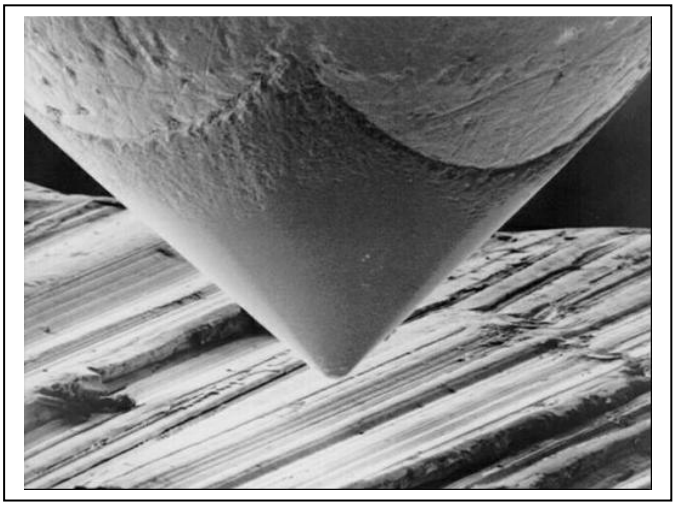
Profille ilgili diğer önemli ayrıntı Stylusun biçimi ve büyüklüğüdür. Stylusun diğer bir ismi temas iğnesidir ve mekanik yöntemle ölçüm sırasında yüzey pürüzlülük cihazının ucuna takılan, pürüzlülük verilerini ölçüm cihazına taşıyan bir kontak elemanıdır. Styluslar iki tiptir: a.) küresel tipli konik Styluslar, b.) düz tipli dört kenarlı piramit Styluslar. Konik Styluslar, 10 μm den daha küçük bir yarıçapla 60 º ve 90 º konik açısına sahiptirler. Piramit Styluslar, 2 μm'lik bir izleme yönündeki genişliğe sahiptirler. Pratikte, piramit Styluslar ölçümler esnasında aşınarak küreselleşmeye eğimli iken küresel Styluslar ise düzleşmeye eğimlidirler. Bu durum, her iki tip Stylus arasındaki farklılığın azalmasını sağlayacaktır. Fakat zarar görmüş bir Stylus çok ciddi hataların oluşmasına neden olabilir. Şekil 4.7, Stylusun bir yüzey üzerindeki geometrik konumunu göstermektedir.



Şekil 4.7: Stylusun bir yüzey profili üzerindeki geometrik konumu

Stylus uçlarının büyüklüğü ve tasarımı, izlenen profile göre bazı hataların meydana gelmesine neden olabilir. Bunlar; derin ve dar çukurlar içine giremeyen Stylusun daha büyük pürüzlülük değeri vermesi, küresel uçlu bir Stylusun keskin bir tepe

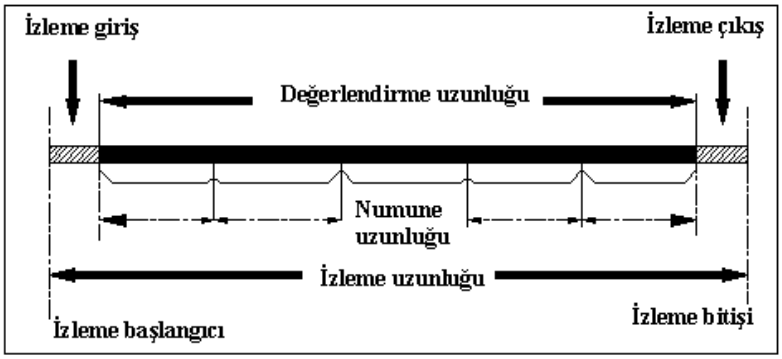
üzerinden geçerken bir tepeden daha fazla yuvarlatılmış bir yolu izlemesi ve dolayısıyla pürüzlülük değerinin daha küçük çıkması ve içe dönük oyukların bulunduğu profillerde izleme sırasında Stylusun profille olan temasını kaybetmesinden kaynaklanan yanlış pürüzlülük değeri okumasıdır. Şekil 4.8 ise (x200) büyültme sonucu SEM cihazından elde edilmiş Stylus ucu ile bir yüzeyin profili arasındaki ilişkiyi göstermektedir [26-27].



Şekil 4.8: Stylus ucunun bir yüzey üzerindeki 3 boyutlu SEM görüntüsü

4.4.3. Ölçme uzunlukları

Yüzey dokusunun sayısal olarak değerlendirilmesi için dört karakteristik ölçme uzunluğu vardır. Bunlar; numune uzunluğu, ölçüm aralığı, değerlendirme uzunluğu ve izleme uzunluğudur. Bu dört karakteristik ölçme uzunluğunun birbiriyle olan ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Numune, değerlendirme ve hareket uzunluklarının birbiriyle ilişkisi

- Numune uzunluğu (Sampling length): Pürüzlülüğün değerlendirilmesi için bir referanstır. Numune uzunluğu, ölçüm aralığı parametresinin dalga boyuna eşittir ve bir parametre için yapılan tek bir değerlendirme üzerindeki yüzey uzunluğudur.

- Ölçüm aralığı (Cut-off length): Numune uzunluğu ile ölçüm aralığı arasındaki ayrım çok önemlidir. Numune uzunluğu bir yüzeyin fiziksel uzunluğudur. Ölçüm aralığı ise numune uzunluğunun değerlendirilmesini kısıtlayan etkiyi göstermek için oluşturulmuş profilin dalga biçimidir. Diğer bir anlamda, dalgalılık ve pürüzlülük gibi en önemli iki parametreye ait dalga boylarını belirleyen bir profil filtresidir.

- Değerlendirme uzunluğu (Evaluation length): Bir ölçümün yapıldığı gerçek yüzey uzunluğudur ve çok sayıda numune uzunluğunun biraya gelmesinden oluşur. Standart pürüzlülük değerlendirme uzunluğu beş numune uzunluğundan oluşmaktadır.

- İzleme uzunluğu (Traverse length): Bir ölçümün yapılmasında Stylus tarafından izlenilen toplam yoldur. İzleme uzunluğu Stylusun ilk (başlangıç) ve son (bitiş) noktalarını kapsar. Kısa yüzeylerin ölçülmesi esnasında bir numune uzunluğunu sınırlamak için gereklidir [65].

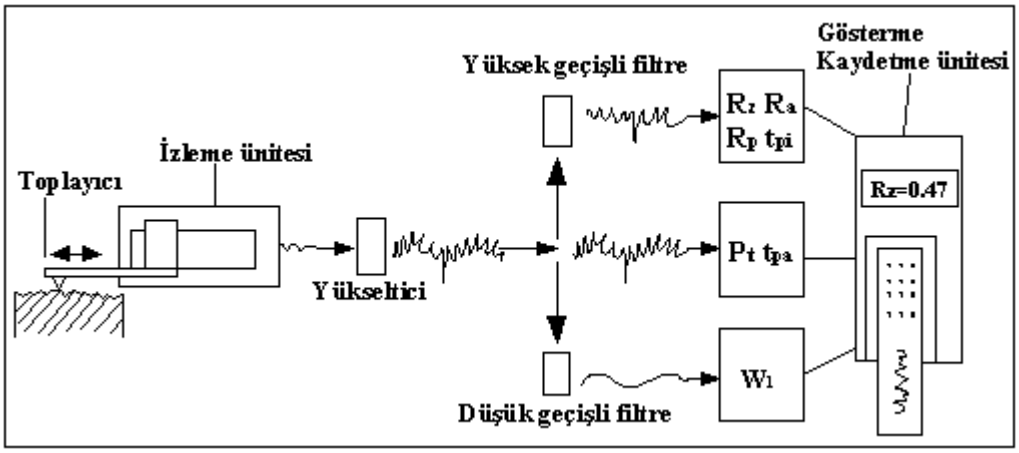
4.4.4. Yüzey profilinin filtrelenmesi

Stylus cihazlarının birçoğu, toplayıcı-yükseltici-kaydedici adı verilen elemanların birleşmesinden oluşur. Bir toplayıcı (pick-up), belli bir dalga formuna sahip elektriksel sinyali Stylusun mekanik yer değiştirmesine dönüştüren bir elemandır. Yüzeyler üzerindeki bitişik düzensizlikler daha yüksek frekanslı dalga formu oluştururlar ve bu frekanslar hareket hızıyla artar.

Bir profil grafiğinden elde edilen düzensizlik aralığı, izleme hızı ve frekans arasında önemli bir ilişki vardır. Çünkü bu ilişki sonucunda oluşan elektrik sinyali yüzeyin bütün profil bilgisini pürüzlülük cihazının bir ucundan diğer ucuna taşır.

Doğru bir profil grafiği elde edebilmek için üretilmiş frekansların hepsi, sisteme doğru bir biçimde taşınmak zorundadır. Büyük frekanslar, küçük frekanslardan daha küçültülürse profil grafiğinde bozulmalar olabilir [21,27].

Bir profilin filtrelenmesi için elektrik filtreleri kullanılır ve bu filtreler, pürüzlülükten dalgalılık ve form bileşenlerini ayırır. Toplayıcı, sabit bir hızla bir yüzey üzerinden geçtiğinde düşük frekanslara sahip uzun dalgalı düzensizlik (form) oluşturan elektrik sinyali üretir. Stylus cihazlarıyla kullanılan elektriksel filtreler iki tiptir: yüksek geçişli filtreler ve düşük geçişli filtreler (low-pass filter). Yüksek geçişli filtreler, dalgalılık ve form frekanslarını sıkıştırırken, düşük geçişli filtreler ise daha düşük frekanslardan kalan ya da ayrılan pürüzlülük frekanslarını ortadan kaldırırlar [27,65]. Bir yüzeyin profil bilgisinin doğru bir biçimde öğrenilmesi için bahsedilen elektriksel filtreler kullanılır. Şekil 4.10, bir pürüzlülük cihazının yapısında bulunan filtre tiplerini ve bu filtrelerin cihaz üzerindeki işlevini göstermektedir.



Şekil 4.10: Bir pürüzlülük ölçme sistemi ve filtre tipleri [22]

4.5. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Yüzey pürüzlülüğünün doğasını anlamak ve ölçmek için yüzey pürüzlülüğünü sayısal olarak ifade etmek gereklidir. Bu durum dikkate alınarak yüzey pürüzlülüğü sayısal olarak ifade edilirse, bir yüzeyden elde edilen profilin karakteristiğine ve fonksiyonelliğine göre üç temel kategoriye ayrılır:

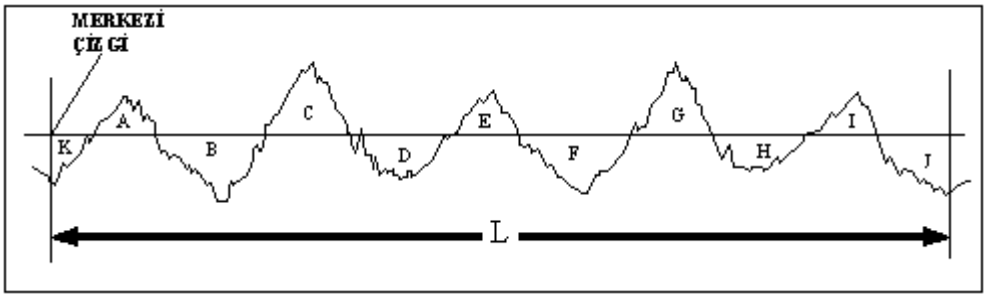
1.) Genlik parametreleri, 2.) Boşluk-aralık parametreleri ve 3.) Karma parametreler [23-24]. Bu üç temel kategori içinde yaklaşık 45 yüzey pürüzlülük parametresi bulunmaktadır. Bu bölümde, 45 parametre arasından en önemli ve pratik uygulamalar için kullanılan parametreler incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük parametrelerin belirlenebilmesi için bir referans düzlemine ve dolayısıyla bir referans çizgisine ihtiyaç vardır. Referans çizgisi olmaksızın herhangi bir yüzey pürüzlülük parametresini sayısal olarak ifade etmek imkânsızdır. Bundan dolayı, referans çizgisi bir pürüzlülük parametresi olarak genlik parametreleri altında incelenmiştir.

4.5.1. Genlik parametreleri

Genlik parametreleri, bir yüzey topografisini karakterize etmek için kullanılan en önemli parametrelerdir ve yüzey sapmalarının dikey karakteristiklerinin ölçülmesinde kullanılırlar.

4.5.1.1. Referans çizgisi

Referans çizgisi, yüzey pürüzlülük profilinin oluşturmuş olduğu tepe ve çukurları alanların toplamına eşit olarak bölen ortalama bir çizgidir. Yüzey pürüzlülüğünün niceliksel hale getirilmesi için ölçümlerin elde edildiği profil içindeki bazı düzlemlerin oluşturulması gereklidir. Yüzey metalürjisinde ağır metallerin ölçülmesi zordur, fakat gerçek şekilden elde edilen sapmalar ölçülebilir. Burada bahsedilen gerçek şekil bir referans çizgisi olarakta kullanılabilir. Pratik amaçlar için birçok parametreye adapte edilen referans çizgisi profilin merkez çizgisidir. Referans çizgisi, tepe ve çukurlar boyunca merkezi olarak uzayan düz bir çizgidir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, referans çizgisi matematiksel olarak bir "L" numune uzunluğu boyunca mevcut profilin ürettiği tepe-çukur alanlarının eşit olarak ikiye ayrılmasını sağlar.



Şekil 4.11: Referans çizgisinin çıkarılması

Eşit alanlar yardımıyla tanımlanan merkezi çizgi tek değildir, şekilde ifade edilen kriteri sağlayan başka çizgilerde vardır. Fakat yüzey dokusunun değerlendirilmesinde kullanılan çizgi (referans çizgisi) yüzeyin genel şekline paraleldir ve bu durum referans çizgisini diğer çizgilerden ayıran en önemli farktır [22].

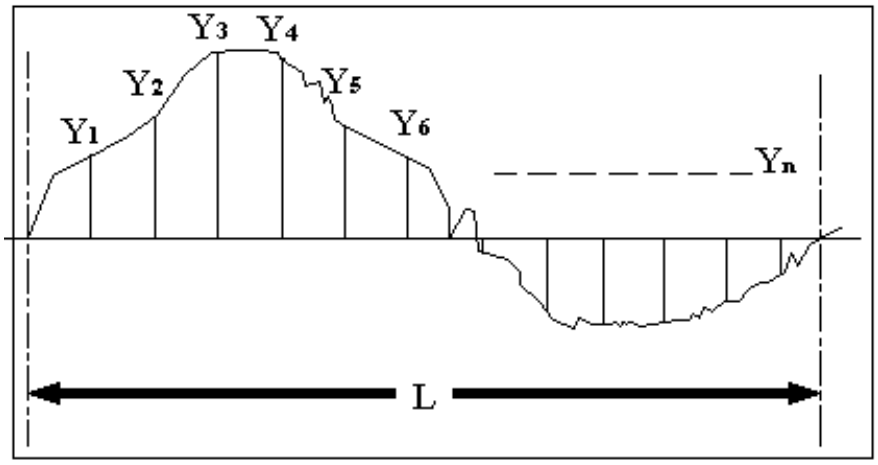
4.5.1.2. Ortalama pürüzlülük

Ortalama pürüzlülük (R_a)Yüzey pürüzlülüğünün en önemli ve en çok kullanılan parametresidir. DIN/ISO 4287 uluslararası ölçüm standartlarına göre R_a sembolüyle ve "µm" birimiyle birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. R_a parametresi aynı zamanda ortalama merkezi çizgi (center line average) adıyla da kullanılmaktadır. R_a parametresi, L numune uzunluğu boyunca profili referans çizgisinden ayıran pürüzlülük düzensizliklerinin ortalama mutlak değeridir [21-24].

R_a parametresi, ölçüm uzunluğuyla birlikte kullanılmadığı sürece kendi başına anlamsızdır. R_a parametresinin tespit edilmesinde, 0.25 µm-0.8 µm-2.5 µm'lik ölçüm aralıkları seçilebilir. R_a parametresi elde edilirken yapılan ölçüm, kesme yönüne daima dik olmalıdır. Şekil 4.12'deki grafikten yararlanılarak ortalama pürüzlülük (4.1) ve (4.2) nolu denklemlerle hesaplanabilir.

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l \left| y(x) \right| dx \tag{4.1}$$

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left| y_i \right| \tag{4.2}$$



Şekil 4.12: R_a parametresinin grafiksel olarak elde edilmesi

4.5.1.3. Ortalama karesel pürüzlülük

Ortalama karesel pürüzlülük, bilimsel ölçme ve istatistiklerde yaygın olarak kullanılan bir başka ortalama hesaplama yöntemidir. Birçok uygulama ve literatürde R_q sembolüyle gösterilir. Ortalama karekök pürüzlülüğü (Root Mean Square), bazen de RMS harfleriyle sembolize edilerek kullanılmaktadır. R_q parametresi, yüzey yüksekliklerinin dağılım sapmasını sergiler ve bundan dolayı istatiksel yöntemlerle yüzey pürüzlülüğünün hesaplanmasından kullanılan önemli bir parametredir. Şekil 4.12'deki grafikten yararlanılarak elde edilen R_q parametresi, (4.3) ve (4.4) nolu denklemlerle hesaplanabilir.

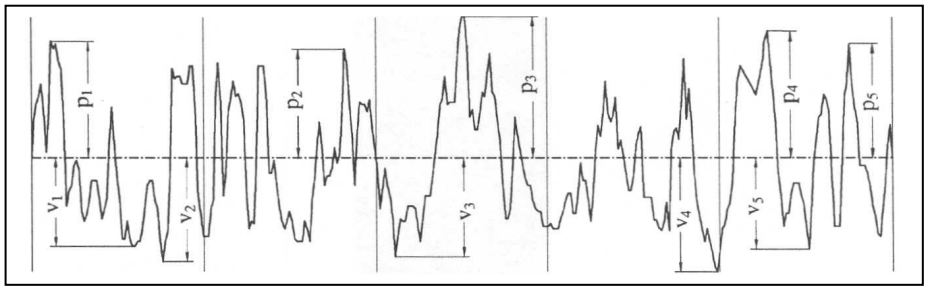
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \{y(x)\}^2 dx} \tag{4.3}$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2} \tag{4.4}$$

R_q parametresiyle referans çizgisinden elde edilen en büyük sapma, R_a parametresiyle elde edilen sapmadan daha hassastır. R_q parametresinin hesaplanmasında kullanılan referans çizgisi, sıfıra eşit olan profil yükseklik sapmalarının kareleri toplamını veren bölünmüş bir profil çizgisidir [23].

4.5.1.4. On-noktalı yükseklik

Bu parametre, R_z sembolüyle gösterilmektedir ve aşırı derin çukurlar veya aşırı yüksek tepelerin belirlenmesinde R_a parametresinden daha hassastır. R_z parametresi iki farklı tanımlama sistemine göre belirlenir. ISO standartlarına göre R_z, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca elde edilen en düşük beş çukur ile en yüksek beş tepenin ortalaması arasındaki fark olarak tanımlanır. DIN standartlarına göre R_z, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca elde edilen en düşük beş çukur ile en yüksek beş tepenin ortalaması olarak tanımlanır. R_z parametresi, Şekil 4.13'deki grafikten yararlanılarak, (4.5) ve (4.6) nolu denklemlerle ISO ve DIN standartlarına göre hesaplanabilir. Burada; "n" değerlendirme uzunluğu içindeki numunelerin sayısıdır [21-23].



Şekil 4.13: R_z parametresinin grafiksel olarak elde edilmesi

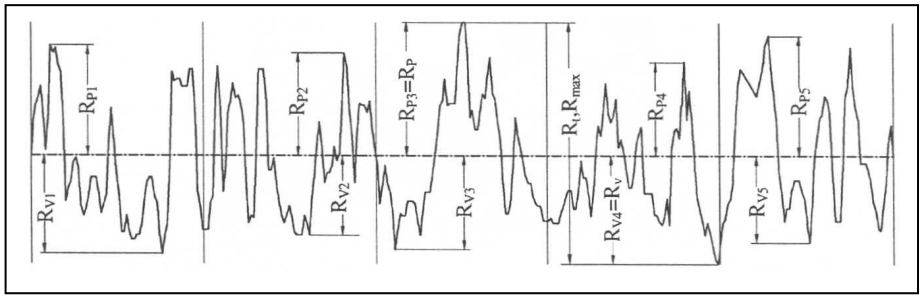
$$R_{z\,(\mathrm{ISO})} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i - \sum_{i=1}^{n} v_i\right) \tag{4.5}$$

$$R_{z\,(\mathrm{DIN})} = \frac{1}{2n}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i + \sum_{i=1}^{n} v_i\right) \tag{4.6}$$

4.5.1.5. Tepe-çukur yükseklik parametreleri

Tepe-çukur yükseklik parametreleri, yüzey pürüzlülük profili içinde yer alan ve genellikle birlikte gösterilen temel parametrelerdir. R_p, R_v, R_y, R_{3y}, R_t-R_{max}, R_{pm}, R_{tm}, ve bir yüzey profilinden elde edilen tepe-çukur yükseklik parametreleridir.

R_p parametresi, Şekil 4.14'teki numune uzunluğu içinde yer alan ortalama çizgi üzerindeki profilin maksimum yüksekliğidir. R_v parametresi; Şekil 4.14'teki değerlendirme uzunluğu içinde yer alan ortalama çizginin altındaki profilin maksimum derinliğidir. R_y parametresi, değerlendirme uzunluğu boyunca maksimum tepe-çukur yükseklik parametrelerinin en büyük değeridir. R_{3y} parametresinin hesaplanmasında; en yüksek üç tepe ile en düşük üç çukur arasındaki mesafe her numune uzunluğu için hesaplanır ve daha sonra en yüksek üç mesafe üç noktalı yükseklik olarak kabul edilir [21-23,65].



Şekil 4.14: Tepe-çukur yükseklik parametrelerinin gösterilmesi

R_t-R_{max} parametresi, profilin değerlendirme uzunluğu boyunca en yüksek tepe ile en düşük çukur arasındaki dikey mesafedir ve (4.7) nolu denklemle hesaplanabilir.

$$R_{max} = (R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4}) \tag{4.7}$$

R_{pm} parametresi, değerlendirme uzunluğu içinde yer alan her numune uzunluğu için elde edilen tepelerin maksimum yükseklik ortalamasıdır ve (4.8), (4.9) nolu denklemlerle hesaplanabilir.

$$R_{pm} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} R_{pi}\right) \tag{4.8}$$

$$R_{pm} = (R_{p1} + Rp_2 + Rp_3 + Rp_4 + Rp_5)/5 \tag{4.9}$$

R_{tm} parametresi, profilin değerlendirme uzunluğu içinde elde edilen maksimum tepe-çukur yüksekliklerinin ortalamasıdır. R_{tm} parametresi, (4.10) ve (4.11) nolu denklemlerle hesaplanabilir.

$$R_{tm} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} R_{ti}\right) \tag{4.10}$$

$$R_{tm} = (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5}) / 5 \tag{4.11}$$

4.5.1.6. Skewness ve kurtosis parametreleri

Skewness, referans çizgisi civarındaki profilin simetrisini ölçmek için kullanılır ve R_{sk} parametresiyle gösterilir. Bir simetrik yükseklik dağılım eğrisi, "0" skewness'i gösterir. Tepelerin olmadığı ya da derin çukurlara sahip profiller negatif skewness değerini alırken, yüksek tepelere sahip profiller ise pozitif skewness değerini alır. R_{sk} parametresi, farklı şekillerdeki aynı R_a ve R_q değerlerine sahip iki profil arasındaki farkı ortaya çıkarmak için kullanılır. Bir profile ait R_{sk} değeri (4.12) nolu denklemle hesaplanabilir. N; bir profildeki noktaların toplam sayıdır.

$$R_{sk} = \frac{1}{NRq^3}\left(\sum_{i=1}^{N} Y_i^3\right) \tag{4.12}$$

Kurtosis, bir profile ait olası keskinlik biçimini belirler ve R_{ku} parametresiyle gösterilir. $R_{ku}<3$ ise dağılım eğrisi birkaç tane yüksek tepe ile düşük çukura sahiptir. Buna karşılık; $R_{ku}>3$ ise dağılım eğrisi çok sayıda yüksek tepe ile düşük çukura sahiptir. R_{ku} parametresi (4.13) nolu denklemle hesaplanabilir [24-25].

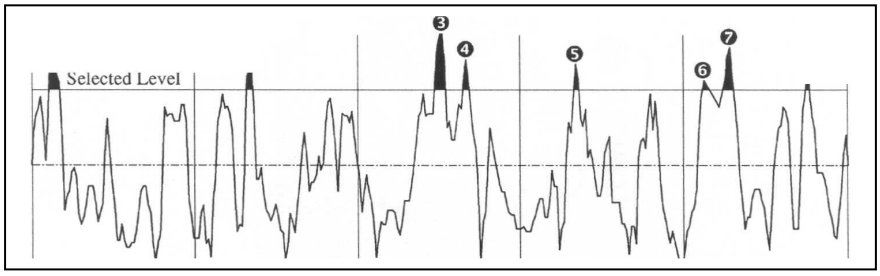
$$R_{ku} = \frac{1}{NRq^4}\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i^4\right) \tag{4.13}$$

4.5.2. Aralık-boşluk parametreleri

Aralık (spacing) parametreleri, yüzey sapmalarının yatay karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılır. Aralık parametreleri, saç metallerin pres altında şekillendirilmesi sırasında yağlama işleminin sürdürülebilmesi için gereklidir. Aralık parametrelerinden biri olan tepe boşluk parametresi (peak spacing), fren kampanalarındaki sürtünen yüzeylerin performansının ölçülmesinde kullanılır. Aralık parametreleri kontrol edilerek yüzeylerin birbirini daha iyi sarması, daha iyi kaplama ve boyama yüzeylerinin elde edilmesi sağlanır [21-23].

4.5.2.1. Yüksek uçlu sayma

Değerlendirme uzunluğu boyunca referans çizgisi üzerindeki profilin yüksek bölgelerinin sayısıdır. Bir profil 1'den başlayarak 100'e kadar YUS'a (High Spot Count-Yüksek Uçlu Sayma) sahip olabilir. Şekil 4.15, tepe sayma işleminin bir profil üzerinde nasıl yapıldığını göstermektedir.



Şekil 4.15: Tepelerin (8 tepe) en yüksek noktalarının sayılması

4.5.2.2. Tepe Sayma

Tepe sayma parametresinin önemi, boyama, kaplama ve saçların şekillendirilmesi gibi bazı imalat işlemlerinde ortaya çıkar. Özellikle, plastik parçaların kozmetik görünüşünü artırmak için kaplama işlemi yapıldığı durumlarda, tepe sayma parametresinin iyi bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. P_c sembolüyle gösterilir ve aynı ölçüm aralığındaki referans çizgisinin altına ve üstüne yerleşmiş bir bant üzerindeki lokal (yerel) tepelerin sayısıdır [23].

4.5.2.3. S ve r_p parametreleri

S parametresi, değerlendirme uzunluğu boyunca ölçülen profilin bitişik lokal tepelerinin ortalama aralığı olarak tanımlanır. Bir lokal tepe birbirine bitişik iki yüzey arasındaki profil parçasının en yüksek tepesidir. Bitişik tepeler arasındaki dikey aralık, R_t parametresinin % 10'una eşit ya da daha büyük olması koşulunda ölçülebilir. Bu parametre (4.14) nolu denklemle hesaplanabilir.

$$S = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{n} S_i \right) \tag{4.14}$$

r_p parametresi, değerlendirme uzunluğu içindeki tepelerin temel eğriliklerinin ortalaması olarak tanımlanır. Bu parametre bir profil boyunca her tepe için eğrilik yarıçapı hesaplanarak bulunabilir. r_p parametresi, (4.15) nolu denklemle hesaplanabilir. Burada; "ρ_{pi}" bir tepe için eğrilik yarıçapıdır [23-25].

$$r_p = \frac{1}{n-2}\left(\sum_{i=1}^{n-2} \frac{1}{\rho_{pi}} \right) \tag{4.15}$$

4.5.3. Karma parametreler

Karma (hybrid) parametreler, genlik ve aralık parametrelerinin birleşmesinden oluşmuştur. Bir profildeki elektrik sinyalinin genliği ve aralığındaki bir değişim karma parametrelere etki eder. Karma parametreler, sürtünme analizlerinde bulunan yüzey eğimi, yüzey eğriliği ve geliştirilmiş ara yüzeylerin incelenmesi için çok önemlidir. Bu bölümde incelenen parametreler birbirleriyle olan ilişkilerine göre ifade edilmiştir [23-25].

4.5.3.1. Profilin ortalama eğimleri

Bir profile ait eğimler, Δ_a ve Δ_q parametreleriyle gösterilir. Δ_a parametresi, değerlendirme uzunluğu üzerinde yer alan ortalama mutlak profilin eğimi olarak tanımlanır. Sürtünme, elastik temas, yansıma, yorulma ve hidrodinamik gibi birçok mekanik özellik bu parametreyle kontrol edilebilir. Δ_a parametresi, profilin ardışık noktaları arasındaki eğimlerin tamamı hesaplanarak bulunur. Δ_q parametresi ise profilin ortalama eğiminin karekökü̈dür. Optik uygulamalarda, Δ_q parametresi küçükse kullanılan yüzeyler iyi bir yansıtıcıdır. Bu iki parametre kullanılarak bir profilin eğim oranı hesaplanabilir [21-22].

4.5.3.2. Referans çizgisindeki profilin eğimi

Bu parametre, referans çizgisindeki profilin eğimini sergiler ve "γ" sembolüyle gösterilir. "γ" parametresi, referans çizgisiyle her kesit alanda yer alan profilin ardışık eğimleri hesaplanarak bulunabilir. Burada, profilin eğimi (γ), (4.16) nolu denklemle hesaplanabilir [21].

$$\gamma = \text{Oran} = 1 + \frac{1}{2}(\Delta_a)^2 \text{ veya } 1 + \frac{1}{2}(\Delta_q)^2 \qquad (4.16)$$

4.5.3.3. Dalga boyu parametreleri

Ortalama dalga boyu, frekans ve genliklerin dikkate alındığı lokal tepe ve çukurlar arasındaki aralığın bir ölçüm değeridir ve λ_a parametresiyle gösterilir. Bu parametre, (4.17) nolu denklemle hesaplanabilir [22].

$$\lambda_a = \frac{2\pi . R_a}{\Delta_a} \tag{4.17}$$

Ortalama karekök dalga boyu, frekans ve genliklerin dikkate alındığı lokal tepe ve çukurlar arasındaki aralığın ortalama karekökünün bir ölçüm değeridir ve λ_q parametresiyle gösterilir. Bu parametre, (4.18) nolu denklemle hesaplanabilir.

$$\lambda_q = \frac{2\pi . R_q}{\Delta_q} \tag{4.18}$$

4.5.3.4. Taşıma-kayma oranı

Kayma oranı, belli bir yükseklikte uzayan profilin katı malzemesinin oranıdır ve t_p sembolüyle gösterilir. Mühendislik yüzeylerinde aşınmayı en aza indirmek için iki parça arasında eş zamanlı hareket eden bir kayma yüzeyinin oluşturulması gereklidir. t_p parametresi, yüzeylerde aşınmanın etkisini gösterir ve (4.19) nolu denklemle hesaplanabilir. Burada; "L" profilin değerlendirme uzunluğu ve "l_i" profilin i. sayısındaki çizgi uzunluğudur [23].

$$t_p = \frac{1}{L}\left(\sum_{i=1}^{n} l_i \right) \tag{4.19}$$

4.5.3.5. Dalgalılık faktörü

Dalgalılık faktörü, ortalama pürüzlülük ile bir profilin toplam aralığı arasındaki oran olarak tanımlanır ve W_f sembolüyle gösterilir. Dalgalılık faktörü, (4.20) nolu denklemle hesaplanabilir [24].

$$W_f = \frac{1}{R_a}\left(\sum_{i=1}^{n-1} l_i\right) \tag{4.20}$$

4.6. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazları

Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazlarının yapısını incelemeden önce bu cihazların doğruluğu, ölçüm belirsizliği ve ölçümlerin sayısı hakkında bilgi verilmesi gereklidir. Çünkü ölçüm cihazlarının doğruluğu ve ölçüm sayısı doğrudan cihazın çalışma sistemiyle ilişkilidir.

4.6.1. Cihazların doğruluğu

Ölçme metrolojisinde, doğruluk ve çözünürlüğün genellikle % 0.1 ile % 0.001 aralığında olduğu düşünülür. Örnek olarak, maksimum uzunluğun % 0.02'sini sergileyen bir çözünürlükteki basit bir mikrometre 0.005 ile 25 mm arasında her türlü ölçümü yapabilir [21,26].

Yüzey pürüzlülük ölçümünde herhangi bir yüzeydeki parametrelerin hepsi bir noktadan diğer bir noktaya % 10'dan daha fazla değişebilir. Uçak motoru üreticileri tarafından tespit edilmiş bir durum oldukça dikkat çekicidir: Uçak motoru parçalarının sürekli imalatı sırasında parçaların yüzey dokusunun bir gün boyunca % 50 civarında değiştiği, fakat bu değişimlerin performans üzerinde % 30 civarında etkisi olduğu gözlenmiştir [22-23]

Ölçüm doğruluğuna etki eden diğer bir durum da, kontrol edilen ölçümlerin çok küçük olmasıdır. Örnek olarak, R_t değeri 0.25 μm olan bir profildeki % 1'lik hata atom boşluğunun 10 katı civarındaki bir tepe-çukur yüksekliğine karşı gelmektedir.

Cihaz doğruluğu, elde edilen gerçek okuma değerini göstermez, aksine ölçüm aralığının tam ölçekli değerinin bir yüzdesidir. Dijital göstergelere sahip cihazların kullanımında bahsedilen bu ayrım çok önemlidir. Pürüzlülük cihazları seçilen ölçüm aralığının tam ölçekli bir değerini anında sergilemezler. Örnek olarak, 1.8 μm'lik bir R_a değerine sahip bir yüzey 1.3 μm ölçülmüş ise pürüzlülük cihazı % 25'lik bir doğruluğa sahiptir ve muhtemelen hatalıdır. Çünkü üretici cihaz doğruluğunu % 3 olarak belirlemiştir. Buna rağmen; ölçüm aralığı 0-25 μm ise tanımlanan bu doğruluk yapılan her ölçümde 0.8 μm'nin en büyük izin verilebilir sapmasını gösterir [66].

4.6.2. Ölçüm belirsizliği

Bazı üreticiler cihazın doğruluğunu istatiksel standart sapma olarak bilinen Φ sembolüyle gösterirler. ISO'nun ölçmede belirsizlik kılavuzlarına göre % 95 güvenirlik seviyesindeki tipik ölçüm belirsizliği % 4 ile % 5 arasındadır. Bir cihaz için ölçüm belirsizliğine neden olan faktörler şunlardır: Oda sıcaklığı, nem, yüzeydeki tozlar, cihazın kalibrasyonu ve cihazın ölçme biçimdir [23,26].

4.6.3. Ölçümlerin sayısı

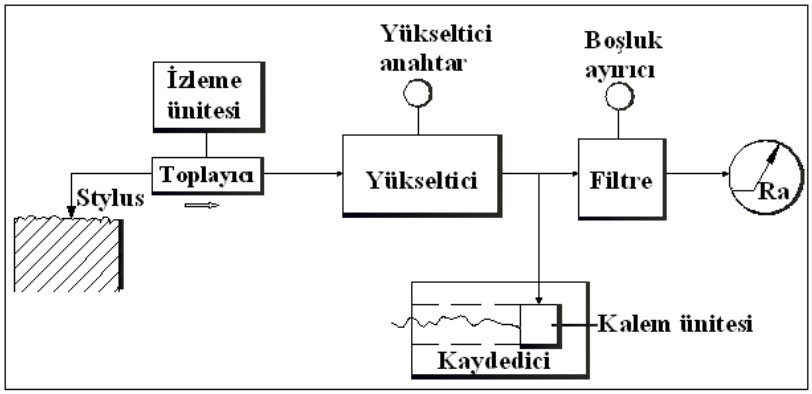
Çeşitli imalat işlemlerinden geçmiş yüzeylerin dokusu hiçbir zaman homojen değildir ve bu sebepten dolayı ölçümler değişkenlik gösterebilir. Tek bir ölçümden alınan değer düşük ya da yüksek olabilir ve parametrelere bağlı olarak % 100'e yakın değişimler meydana gelebilir. Bir yüzeyin tamamını mekanik ölçüm cihazlarıyla ölçme imkanı yoktur, fakat yüzeyin sınırlarını tarayan ve yüzeyin çeşitli bölgelerinden alınan 25 ölçüm değeri yeterlidir. Bu sayı, zaman kaybının önlenmesi amacıyla bazen 8-10 arasında olabilir. Her ölçümün en az üç kez tekrarlanması da ISO tarafından tavsiye edilen önemli bir ayrıntıdır [21-23,66].

4.6.4. Stylus cihazları

Stylus cihazları, yüzey pürüzlülük ölçümlerinin mekanik yöntemle yapıldığı ve elektriksel filtreleme mantığına dayalı taşınabilir veya sabit cihazlardır. Stylus cihazları tarihsel gelişim sürecine göre farklı isimler almıştır. Bunlar; Schmaltz kaydedici, Kontograph, Tomlinson yüzey kaydedici, Talysurf ve Profilometredir. Günümüzde, profilometre ve Talysurf yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Her iki cihazın çalışma sistemi, ölçme mantığı ve temel elemanları aynıdır [65].

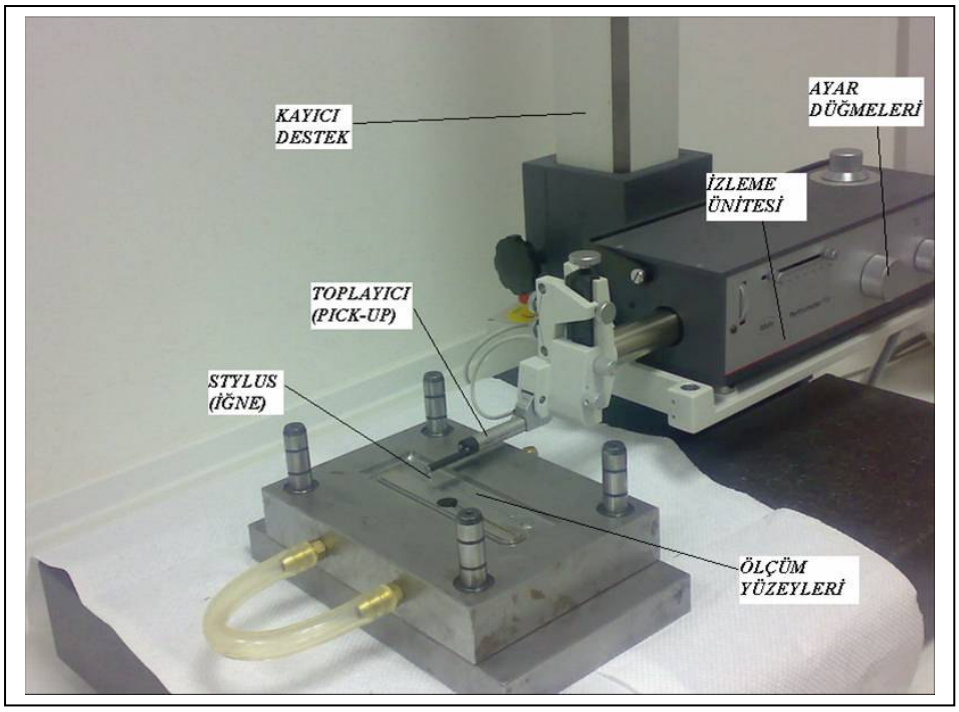
4.6.5. Stylus ölçümü

Stylus (temas iğnesi), cihazı ismini cihazın ucunda yer alan ve yüzeyle sürtünme esasına dayalı olarak çalışan farklı çaplardaki sert metal ya da malzemeden alır. Bir ölçümü yapabilmek için Stylus cihazının uyguladığı adımlar, Şekil 4.16'da şematik olarak gösterilmiştir. Başlangıçta, Stylus yüzeyin bir ucundan diğer bir ucuna doğru izleme yapar ve izleme ünitesinde yer alan toplayıcı, Stylusun dikey hareketlerini kaydediciyi çalıştırmak için gerekli olan elektrik sinyaline dönüştürür. Elektrik sinyali bir filtreden geçer ve bu sinyal filtredeki ölçme ayıracı vasıtasıyla R_a değerine dönüştürülür. Sonuçta, R_a değeri bir dijital metre veya ekranda gösterilen ilk çıkıştır. Ayrıca, kaydedici ünitesinde bulunan kalem ünitesi yüzeyden alınan pürüzlülük bilgisini profil grafiğine dönüştüren ikinci çıkıştır. Şekil 4.17 ise Stylus ölçüm cihazlarından olan bir profilometrenin temel bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 4.16: Stylus cihazının çalışma prensibi

Birçok cihazda olduğu gibi Stylus cihazlarının da kalibrasyona ihtiyacı vardır. Bir yüzey pürüzlülük cihazı, Stylus-ölçüm metresi ya da Stylus-kaydedici aralığında kontrol amacıyla kalibre edilmedir. Kalibrasyon standardı, bir çizginin doğru bilinen yüksekliği veya tek bir adıma sahip tipik bir yüzeyden oluşur. Yüzey pürüzlülük kalibrasyon standardı, bilinen bir R_a değerine sahip imalat işlemiyle şekillendirilmiş herhangi bir yüzeyin çok küçük mesafesidir.



Şekil 4.17: Stylus cihazının temel bileşenlerinin gösterilmesi

4.7. Diğer Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri

Buraya kadar incelenen ve bu tez çalışmasında da kullanılan pürüzlülük ölçüm yönteminin mekanik sisteme dayandığı daha önce belirtilmiştir. Ancak, bu yöntemin dışında Optik ölçüm yöntemleri, Tarama Problu mikroskobik ölçüm yöntemi, Atomik Kuvvetli mikroskobik ölçüm yöntemi, Elektron mikroskobik ölçüm yöntemi ve Yüksek Dağılım Analizi gibi ölçme yöntemleri bulunmaktadır.

Mekanik ölçüm yöntemi dışında en yaygın kullanılan yöntemler, optik ve mikroskobik ölçüm yöntemleridir. Avantajları, parçalar hareket esnasında kolaylıkla ölçülebilir ve ölçüm esnasında parça yüzeylerinde herhangi bir çizik veya iz oluşmaz.

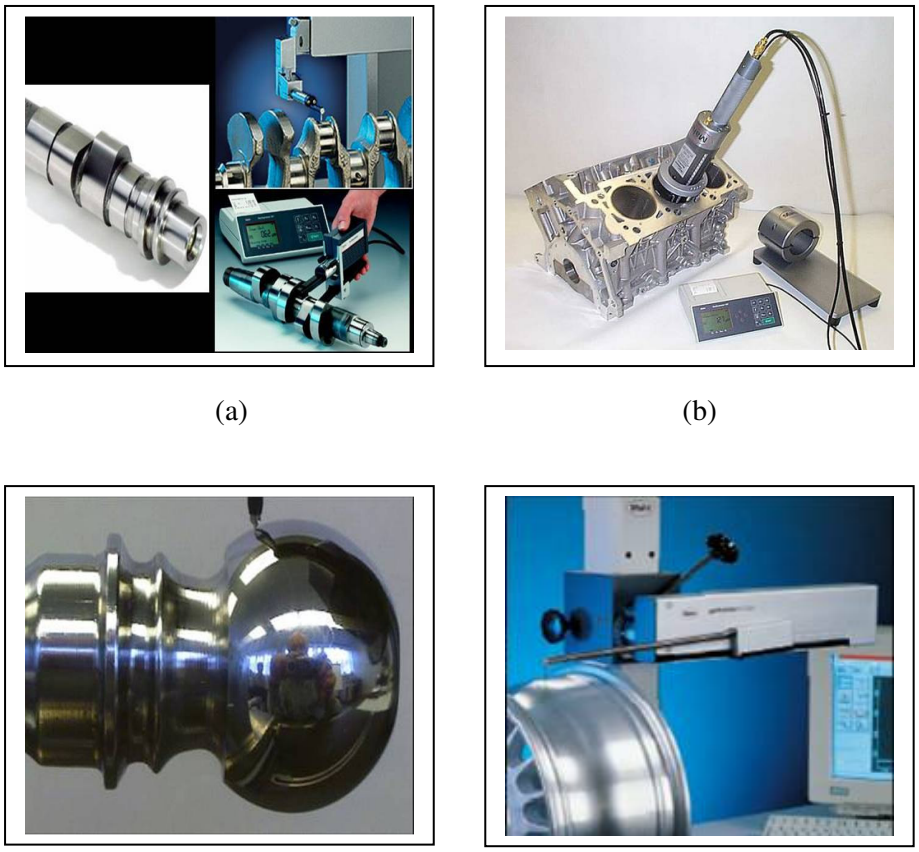
Bu yöntemlerin en belirgin dezavantajları, maliyetlerinin yüksek olması ve her yere kolayca taşınamamalarıdır. Sonuç olarak, optik ölçüm yöntemlerinin birçok bakımdan hala geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

4.8. Endüstriyel Parçalarda Pürüzlülük Ölçümleri

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin en çok uygulandığı alanlardan biri de otomotiv sanayisidir. Araçların dış kaportasını oluşturan saç metal yüzeylerin yüksek kalitede olması; kozmetik görünüş, yansıma ve boya tutma gibi özelliklerinin gelişmesini sağlar. Araçların saç metal gövdelerindeki yüzeylerin kalitesini kontrol etmenin en pratik yolu, yüzey pürüzlülüğünü ölçmektir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapıldığı diğer bir otomotiv parçası da motor bloklarıdır. Motor bloğunun her iki yarımının birleşme yüzeyleri ve silindir yataklarının iç kısımları da yüksek yüzey kalitesinin gerekli olduğu yerlerdir. Araçlarda yüksek yüzey kalitesinin önemli olduğu üçüncü parça grubu ise kamlar, krank milleri, pistonlar ve valflerdir. Bu tip parçalar hareket halinde olan parçalar olup, temasla sürtünmenin fazla olduğu yüzeylere sahiptirler. Aşınma ve çalışma verimini en üst seviyeye çıkarabilmek için yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesi gereklidir. Şekil 4.18, serbest formlu yüzeylere sahip bir otomobilin kaportasında yapılan pürüzlülük ölçümlerini göstermektedir.



Şekil 4.18: Serbest formlu yüzeye sahip kaportalarda pürüzlülük ölçümleri



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.19: Otomotiv parçalarında pürüzlülük ölçümleri [65]

Şekil 4.19 (a),(b), (c) ve (d) ise krank mili, motor bloğu, silindir yatakları, jantlar ve diğer hareket iletim elemanları üzerinde yüzey pürüzlülük ölçümlerinin farklı tipteki cihazlarla nasıl yapıldığını göstermektedir.

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin en yaygın olarak uygulandığı alanlardan biri de kalıp imalat endüstrisidir. Özellikle, kalıp yüzeylerindeki boşlukların yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesi oldukça önemlidir. Kalıplardan elde edilen ürünün kalitesi, imalat aşamasından başlayarak müşteriye kadar uzanan süreci önemli ölçüde etkilediğinden pürüzlülük ölçümü kritik bir performans değerlendirme aracıdır. Bu durum dikkate alınarak bu tez çalışmasının konusu seçilmiştir ve tez boyunca hassas döküm işlemi için mum ve plastik enjeksiyon kalıp malzemelerinin yüzeyleri üzerinde pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için gerekli olan deneysel verilerin CNC frezeleme işlemi boyunca elde edilmesi incelenmiştir. Deneylerin planı, deney parametreleri, malzeme, kesici takım, CNC tezgahı, bilgisayar destekli program, frezeleme işlemi, kalıplarla ürün basım işlemi, yüzey pürüzlük ölçümleri ve diğer ayrıntılar bu bölümde ifade edilmiştir.

5.1. Deneylerin Planı

Deneysel çalışmalarda verilerin bir plan ve düzen içinde elde edilmesi, uygulanan deneysel yöntemin verimliliğini önemli ölçüde artırır. Deneylerin etkili bir biçimde planlanması ve bir düzen içinde gerçekleştirilmesi, zamanı en aza indirerek deney maliyetinin düşmesini sağlar. Deneylerin bir plan ve düzen içinde yapılabilmesi için deneysel tasarım (Design of Experiments-DOE) adı verilen çok güçlü istatiksel teknikler kullanılmaktadır. Deneysel tasarım teknikleri parametrelere bağlı olarak deney sayısını belirler ve deney sonuçlarına ilişkin istatiksel değerlendirmelerin daha önceden yapılmasını sağlar [71,80].

Bu tez çalışmasında, yüzey pürüzlülük değerlerini elde etmek için üç seviyeli tam faktöriyel deneysel tasarım tekniği kullanılmıştır. Bu sayede çok sayıda frezeleme deneyi en kısa zaman ve en düşük imalat maliyetinde CNC tezgahlarında gerçekleştirilmiştir. Tam faktöriyel deneysel tasarım tekniğinin bu tezde seçilmesinin temel nedeni, ANN (Artificial Neural Network-Yapay Sinir Ağları) ve RSM (Response Surface Metot) gibi matematiksel modellerle yüzey pürüzlülük tahmini için yapılan analizlerde daha iyi sonuçların elde edilmesidir. Tam faktöriyel deneysel tasarım teknikleri aynı zamanda, en uygun deney dizilimini yaparak bilgisayar ortamında yapılacak sayısal analizlerin daha kısa sürede sonuçlanmasını sağlar.

5.2. Deney Parametreleri

Frezeleme işlemini oluşturan en önemli unsurlardan biri de frezeleme parametreleridir. Bu parametreler, kullanıcı tarafından kontrol edilebilen metal kesme operasyonu değişkenleridir. İmalat endüstrisi ve literatürde kullanılan frezeleme parametreleri genellikle aynı sembol ve birim altında toplanmıştır. Frezeleme parametrelerinin değer aralıkları çoğunlukla kesici takım imal eden firma kataloglarından seçilmektedir. Metal kesme endüstrisinde en çok kullanılan frezeleme parametreleri; diş başına ilerleme (f_t), kesme hızı (V_c), eksenel ve radyal kesme derinlikleri (a_e ve a_r), kesici çapı (D_c), kesme açısı (γ) ve kesme biçimleri (dik-paralel) olarak sıralanabilir. Bu parametreler frezeleme operasyonun bağımsız değişkenleridir ve birlikte kullanılarak yüzey pürüzlülüğü, aşınma, kesme kuvvetleri ve ölçüsel doğruluk gibi bağımlı değişkenlerin kontrol edilmesini sağlarlar. Frezeleme parametrelerinin doğru seçilmesi ve değer aralıklarının doğru ayarlanması, bağımlı değişkenlerin verimliliğinin artmasını sağlayacaktır [1-7].

Bu tez çalışmasında, üç seviyeli tam faktöriyel deneysel tasarıma dayalı CNC frezeleme deneyleri yüzey pürüzlülük değerlerinin toplanması için yapılmıştır. Frezeleme deneyleri, iki farklı malzeme için iki grup frezeleme parametresiyle sıvı kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. I. grup deneyler, 5 farklı frezeleme parametresiyle (f_t, V_c, a_e, a_r, ve m_t) 243 pürüzlülük değerini Alüminyum 7075-T6 malzeme yüzeyinden ölçmek için yapılmıştır. Frezeleme deneylerini yapmak için kullanılan parametreler, SANDVIK ve IS-CUR kesici takım katalogları ve literatürdeki çalışmalar incelenerek seçilmiştir [3,4,81]. I. grup deneylerde kullanılan 5 frezeleme parametresi ve bu parametrelerin üç seviyesi (alt, orta ve üst) Tablo 5.1'de verilmiştir. II. grup deneylerde kullanılan 4 frezeleme parametresi ve bu parametrelerin üç seviyesi Tablo 5.2'de verilmiştir.

I. grup deneylerde 5 frezeleme parametresi kullanılırken, II. grup deneylerde 4 frezeleme parametresi kullanılmasının üç önemli nedeni vardır. Birincisi, farklı sertlikte ve farklı mekanik özellikler taşıyan iki malzemede yüzey pürüzlülük değişiminin parametre sayısıyla nasıl değiştiğini, ikincisi RSM gibi matematiksel

modellerde güçlü bir tahmin yeteneği elde etmek için parametre sayısının artmasına bağlı olarak daha fazla veriye ihtiyaç duyulması, üçüncü ise Alüminyum 7075-T6 (DIN Alu 89) malzemenin AISI 1040 malzemeye göre daha yumuşak olması ve dolayısıyla daha fazla deneyin yapılabilmesidir. Ayrıca, I. grup deneylerdeki "işleme toleransı-m_t" frezeleme parametresi literatürdeki çalışmalarda metal kesme problemlerinden olan yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde yer almayan ve ilk kez bu tezde kullanılan çok önemli bir parametredir. Bu parametrenin değer aralıkları daha önce Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde frezeleme işlemi yapılarak belirlenmiştir. "m_t" parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ölçüm sonuçları ve tahmini modellerden görülmüştür. "m_t" parametresine ilişkin değerlendirmeler, Bölüm 8'de ifade edilmiştir.

Tablo 5.1: Alüminyum 7075-T6 malzemenin frezeleme parametreleri ve seviyeleri

Deney seviyesi	**f_t mm/diş**	**V_c m/dak**	**a_e mm**	**a_r mm**	**m_t mm**
1	0.08	100	0.3	1	0.001
2	0.105	200	0.5	1.5	0.055
3	0.13	300	0.7	2	0.01

Tablo 5.2: AISI 1040 çelik malzemenin frezeleme parametreleri ve seviyeleri

Deney seviyesi	**f_t mm/diş**	**V_c m/dak**	**a_e mm**	**a_r mm**
1	0.07	140	0.5	1
2	0.095	190	1	3
3	0.12	240	1.5	5

5.3. Malzeme ve Kesici Takım

Metal kesme operasyonlarında, kesici takım talaş kaldırma işlemini yapan, malzeme ise bu işlemden etkilenen ve yapılan işlemin sonucunun görüldüğü yerdir. Bundan dolayı, bir talaş kaldırma işleminde kesici takım ile malzeme arasında çok kritik bir ilişki vardır ve bu ilişki, CNC frezeleme işleminin performansını etkileyen en önemli faktörler arasında yer alır. Özellikle, deneysel çalışmalar için seçilen malzeme ve kesici takımın birbirini tamamlayıcı nitelikte olması gerekir. Deneysel çalışmalar için seçilen malzeme ve takımların endüstride yaygın bir kullanım alanın olması da hedeflenen çalışmanın daha güçlü olmasını sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, daha öncede bahsedildiği gibi Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzeme, bazı özelliklerinden dolayı frezeleme deneylerinin yapılarak yüzey pürüzlülük değerlerinin toplanması ve kalıp imalatında kullanılmıştır. Alüminyum 7075-T6 malzeme; yüksek dayanım, iyi ısıl direnç, yüksek tokluk, daha az talaş yapışması, hafiflik ve kolay işlenebilirlik gibi özelliklere sahiptir. Bunlara ilave olarak; hassas döküm işlemi için mum kalıplarda, şişirme kalıplarında, optik ve elektronik uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin sertliği INDENTEC marka bir sertlik ölçüm cihazıyla 90 HB olarak ölçülmüştür. Daha sonra, malzemenin mekanik testleri Wolpert Instron 5589 marka bir cihazla yapılarak elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir. BELEC VARIO Lab adı verilen marka bir cihaz kullanılarak bu malzemeye spektral analiz yapılmıştır ve elde edilen kimyasal bileşim Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.3: Alüminyum 7075-T6 malzemenin mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	**Akma Mukavemeti (MPa)**	**Kesme Mukavemeti (MPa)**	**Yorulma Sınırı (MPa)**	**Yüzde Uzama (%)**
570	505	330	160	11

Tablo 5.4: Alüminyum 7075-T6 malzemenin kimyasal bileşimi (%)

Bakır (Cu)	**Magnezyum (Mg)**	**Krom (Cr)**	**Mangan (Mn)**	**Silisyum (Si)**	**Çinko (Zn)**
1.2-2.0	2.1-2.9	5.1-6.1	0.3	0.5	0.4

AISI 1040 çelik malzeme; genel amaçlı olup yumuşak bir çeliktir. Düşük karbonlu ve ince tanecik yapısına sahip bir makine çeliğidir. Yüksek ısı iletimi, yüksek aşınma direnci, ucuz olma ve kolay elde edilebilme gibi özelliklerinden dolayı endüstride plastik enjeksiyon kalıp setlerinde, millerde, akslarda ve pinyonlarda kullanılmaktadır. AISI 1040 malzemenin sertliği INDENTEC marka bir cihazla 190 HB olarak ölçülmüştür. Daha sonra, malzemenin mekanik testleri Wolpert Instron 5589 marka bir cihazla yapılarak elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'te verilmiştir. BELEC VARIO Lab adı verilen marka bir cihaz kullanılarak bu malzemeye spektral analiz yapılmıştır ve elde edilen kimyasal bileşim Tablo 5.6'da verilmiştir.

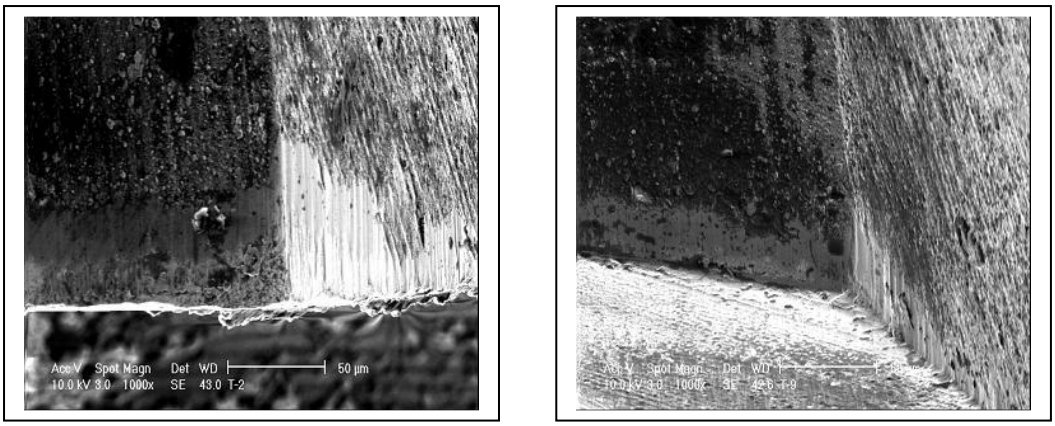
Tablo 5.5: AISI 1040 çelik malzemenin mekanik özellikleri

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Kesme mukavemeti (MPa)	Elastiklik modülü (MPa)	Yüzde Uzama (%)
600	361	410	190-210	25

Tablo 5.6: AISI 1040 çelik malzemenin kimyasal bileşimi (%)

Karbon (C)	Mangan (Mn)	Fosfor (P)	Kükürt (S)
0.37-0.40	0.60	0.04	0.05

Tez çalışması boyunca frezeleme deneylerinin yapılmasında toplam 22 adet PVD AlTiN kaplı kesici takım kullanılmıştır. Bu kesicilerin yarısı (11 adet) Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde yapılan I. grup deneyler için kullanılırken, kalan diğer yarısı da AISI 1040 çelik malzemede yapılan II. grup deneyler için kullanılmıştır. I. grup deneyler için her kesici başına yaklaşık 24 deney düşerken II. grup deneyler için her kesici başına yaklaşık 8 deney düşmüştür. İlave bir kesici de optimizasyon sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için doğrulama testinde kullanılmıştır. Tüm kesicilerin aşınma miktarı, bir PHILIPS taramalı elektron mikroskopla (SEM) x 1000 büyültme altında kontrol edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesicilerin aşınma miktarı, en küçük 0.032 mm ve en büyük 0.065 mm civarında ölçülmüştür. Bu aşınma değerleri, ISO 3685 standardına göre oldukça küçüktür ve kabul edilebilir sınırlar içindedir. Alüminyum 7075-T6 ile AISI 1040 çelik malzemeler üzerinde frezeleme deneyleri sonrasında kesicilerin yanal kenarlarında meydana gelen aşınmaların (flank wear) üç boyutlu SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



(a) Alüminyum 7075-T6: 0.030 mm (b) AISI 1040 çelik: 0.065 mm

Şekil 5.1: Kesicilerde meydana gelen yanal aşınmaların SEM görüntüleri

Frezeleme deneyleri için PVD TiAlN kaplı kesicilerin seçilmesinin nedeni, bu tip kesiciler çok iyi aşınma direnci, yüksek dayanım, yüksek kesme hızlarında iyi ısı iletimi, yüksek tokluk iyi yüzey kalitesi verme gibi üstün özellikleri yapısında bulundurmasıdır. Tez çalışmasında kullanılan PVD TiAlN kaplı kesicilerin çalışma sertliği 300-350 HB (32-37 RC) arasındadır. Bu kesicilere ait diğer mekanik ve kimyasal özellikler Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7: Kesici takımların mekanik ve kimyasal özellikleri

Özellikler	**Değerleri**
Kesici çapı	10 mm
Diş sayısı	4 diş
Bağlama oyu	72 mm
Helis açısı	30 ^{o}
Yan kenar açısı	0.25x 45 ^{o}
Sıkışma mukavemeti	1600 HV
Yoğunluk	14.45 gr/cm^{3}
Tanecik boyutu	0.8 µm
Kaplama tipi (tek kat)	PVD TiAlN

Frezeleme deneyleri Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzeme üzerinde PVD AlTiN kaplı kesicilerle iki farklı CNC tezgahı kullanılarak sıvı kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde 243 frezeleme deneyinin gerçekleştirildiği I. grup deneyler için 5 eksen DECKEL MAHO DMU 60 P marka, Mill Plus kontrollü bir CNC tezgahı kullanılmıştır. Bu tezgah, 20-12,000 dev^{-1} dönme hızı, 15 kW motor gücü, 20-10,000 mm/dak tabla ilerlemesi, 0.001 mm eksen hassasiyetine sahiptir. II. grup deneyler için 3 eksen MANFORD marka, Fanuc O-IMC kontrollü bir CNC tezgahı kullanılmıştır. Bu tezgah, 50-10,000 dev^{-1} dönme hızı, 15 kW motor gücü, 50-15,000 mm/dak tabla ilerlemesi, 0.001 mm eksen hassasiyetine sahiptir. Deneylerin iki farklı tip CNC tezgahında gerçekleştirilmesi, ilk bakışta sonuçlar üzerinde bozucu etkilerin oluşabileceği düşünebilir. Ancak, iki malzeme için seçilen kesiciler ve kesicilerin bağlama boyu, iş parçalarının ölçüleri (40 mm x 40 mm x 30 mm) aynıdır. Buna ilave olarak, her iki malzeme (Alüminyum 7075-T6 ve AISI 1040) 3 eksende frezelenmiştir. Diğer taraftan, iki farklı tip CNC tezgahı seçilmesindeki temel amaç ise tezgahların hassasiyeti, imalat gücü ve kesme kalitesini ölçerek metal kesme ekonomisi hakkında

genel bir sonuca varmaktır. Frezeleme deneyleri boyunca malzeme yüzeylerinin işlenmesinde Pro/Engineer Wildfire CAD/CAM programı eş zamanlı olarak kullanılmıştır. 243 ve 81 deney için oluşturulan CAM programları, bir dönüştürücü (Post-Processor) yardımıyla "G" kodlarına dönüştürülerek CNC tezgahlarına aktarılmıştır.

5.4. Frezeleme ve Ürün Basım İşlemleri

I. grup deneylerde 243 yüzey pürüzlülük değerinin ölçüldüğü Alüminyum 7075-T6 malzeme, hassas döküm işleminde kullanılan mum (paraffin-wax) modelin kalıp malzemesi olarak seçilmiştir. II. grup deneylerde 81 yüzey pürüzlülük değerinin ölçüldüğü AISI 1040 çelik malzeme plastik enjeksiyon işleminin kalıp malzemesi olarak seçilmiştir. Alüminyum 7075-T6 malzeme mum enjeksiyon yöntemiyle hassas döküm işlemi boyunca biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Ortez parçası imal edilirken, AISI 1040 çelik malzeme ile plastik enjeksiyon işlemi boyunca bilgisayarın CD-ROM ön kapağı imal edilmiştir. Böylelikle; I. ve II. grup deneyler için seçilen her iki malzemenin endüstrideki imalat işlemlerinde kullanılabileceği göstermiştir. Diğer taraftan; malzeme yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerlerinin belli aralıklarında mum ve plastik enjeksiyonla ürünler basılmıştır. Bu ürünlerin yüzey kaliteleri ve ölçüsel doğrulukları kontrol edilerek, pürüzlülük ile yüzey kalitesi arasındaki ilişki dolaylı bir biçimde incelenmiştir.

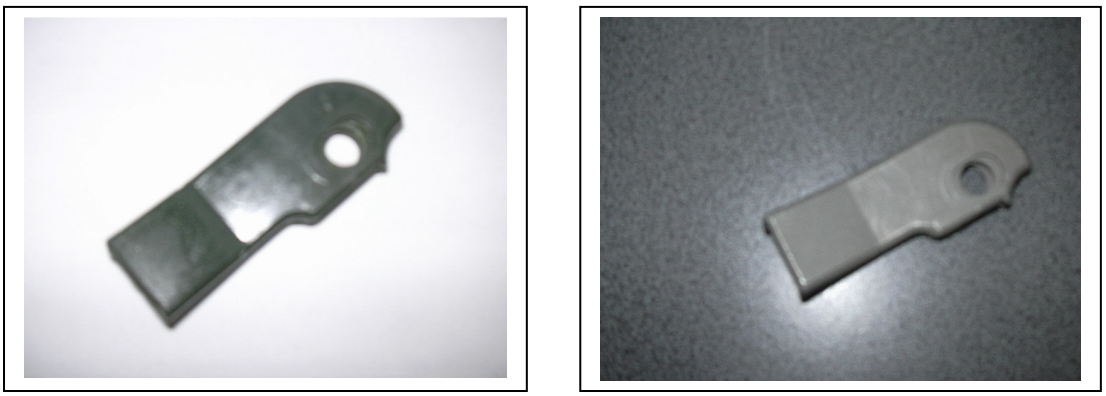
Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde I. grup deneylerin yapılması sırasında uygulanan CNC frezeleme işlemleri Şekil 5.2'de, mum enjeksiyon yöntemiyle Ortez parçasının el presinde basılan mum ürünü ve bu mum üründen elde edilen hassas döküm ürünü, Şekil 5.3'te sırasıyla gösterilmiştir.

AISI 1040 çelik malzeme üzerinde II. grup deneylerin yapılması sırasında uygulanan CNC frezeleme işlemleri Şekil 5.4'te, plastik enjeksiyon yöntemiyle CD-ROM kapağının hidrolik preste basılması ve elde edilen plastik ürün Şekil 5.5'te sırasıyla gösterilmiştir. Ayrıca, I. ve II. grup deneylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri EK-A ve EK-B'de verilmiştir.



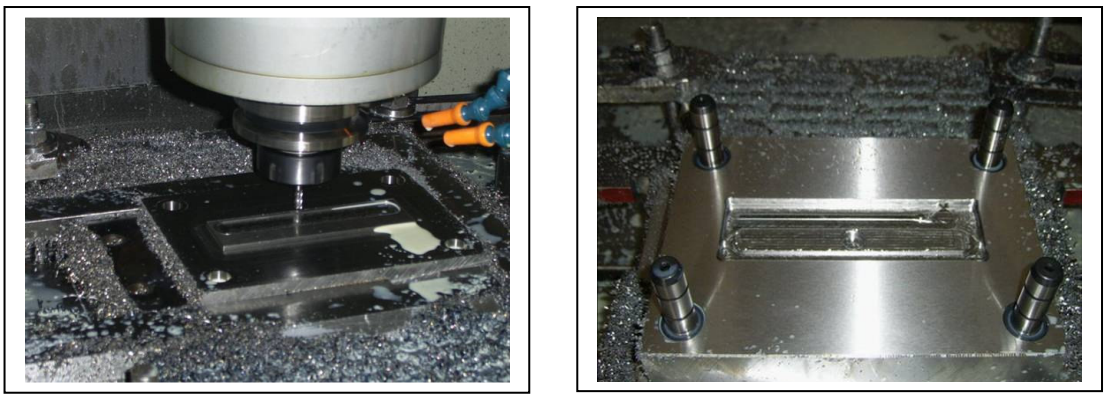
(a) (b)

Şekil 5.2: Alüminyum 7075-T6 malzeme üzerinde frezeleme işlemleri



(a) (b)

Şekil 5.3: Mum ve hassas döküm işlemlerinden elde edilen ürünler



(a) (b)

Şekil 5.4: AISI 1040 çelik malzeme üzerinde frezeleme işlemleri



(a) (b)

Şekil 5.5: CD-ROM kapağının basım işlemi ve elde edilen plastik ürün

5.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

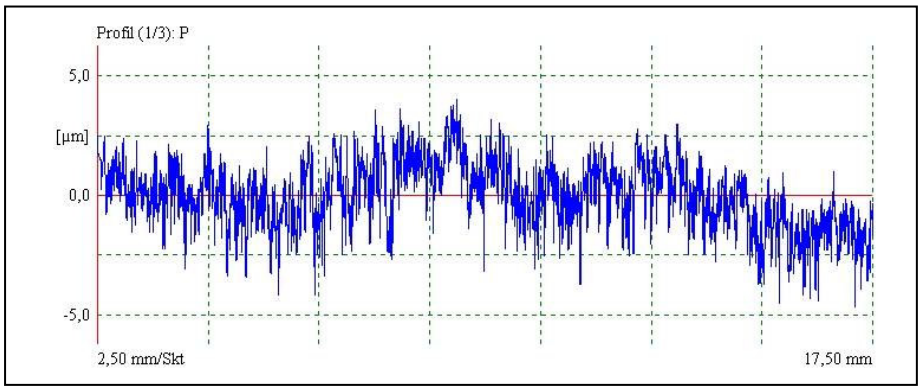
Bu tez çalışmasının deneysel verileri, matematiksel modele dayanan optimizasyon yöntemini uygulamak için Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzemenin frezelenen yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleridir. Bundan dolayı, yüzey pürüzlülük ölçümlerinin planlı, doğru ve hassas biçimde yapılması uygulanacak optimizasyon yönteminin tahmin başarısını önemli ölçüde artıracaktır.

Tez çalışmasında, Alüminyum 7075-T6 malzemenin yüzeylerinden toplam 243 pürüzlülük değeri, AISI 1040 çelik malzemeden 81 pürüzlülük değeri ölçülerek kaydedilmiştir. Alüminyum 7075-T6 malzemede her deney sonrasında oluşan pürüzlülük değerleri SURFTEST 301 marka bir pürüzlülük cihazıyla ölçülmüştür. AISI 1040 çelik malzemede her deney sonrasında oluşan yüzey pürüzlülük değeri, MAHR Perthometer S4P marka bir pürüzlülük cihazıyla ölçülmüştür.

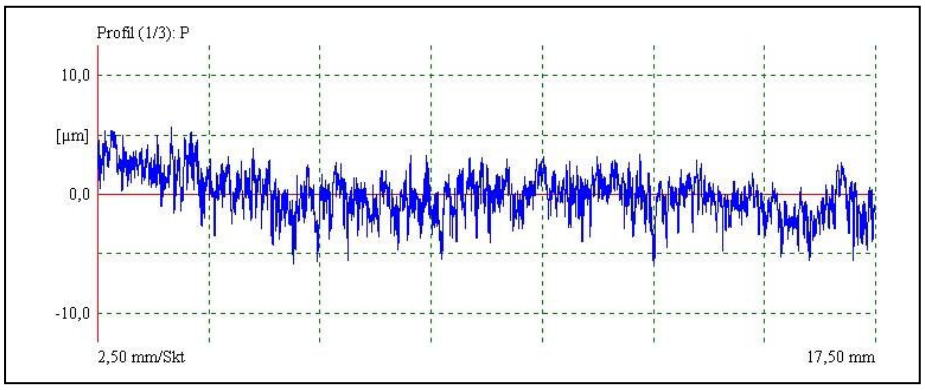
Alüminyum 7075-T6 ile AISI 1040 çelik malzemelerin yüzeylerinde pürüzlülük ölçümlerine başlamadan önce aşağıda sıralanan kabuller yapılmıştır:

- Her iki malzeme üzerinde 25 mm x 25 mm'lik alanda ölçümler gerçekleştirilmiştir. 25 mm x 25 mm'lik alan dört ayrı bölgeye bölünerek her bölgeden üç ölçüm alınmıştır.

- Her ölçüm en az üç kez tekrarlanmıştır ve ölçümlere başlamadan önce yüzeyler alkolle temizlenmiştir.
- Her iki pürüzlülük cihazında 2 μm'lik uç yarıçapına sahip elmas tipi Stylus (FRW- 750) kullanılmıştır.
- Her iki pürüzlülük cihazında 2.5 mm'lik ölçüm aralığı (cut-off) ve 17.5 mm'lik toplam izleme uzunluğu seçilmiştir.
- Elmas Stylus ucunun uyguladığı statik kuvvet 0.75 nN'dur.
- Cihazların ölçüm belirsizliği % 5 civarındadır.
- Ortam sıcaklığı (20±1) ° C ve nem oranı (15±1) % Rh.
- Derinlik standardı: 13179/97-izlenebilirlik=TUBITAK/UME
- Geometrik standart: 9205-izlenebilirlik=TUBITAK/UME



(a)



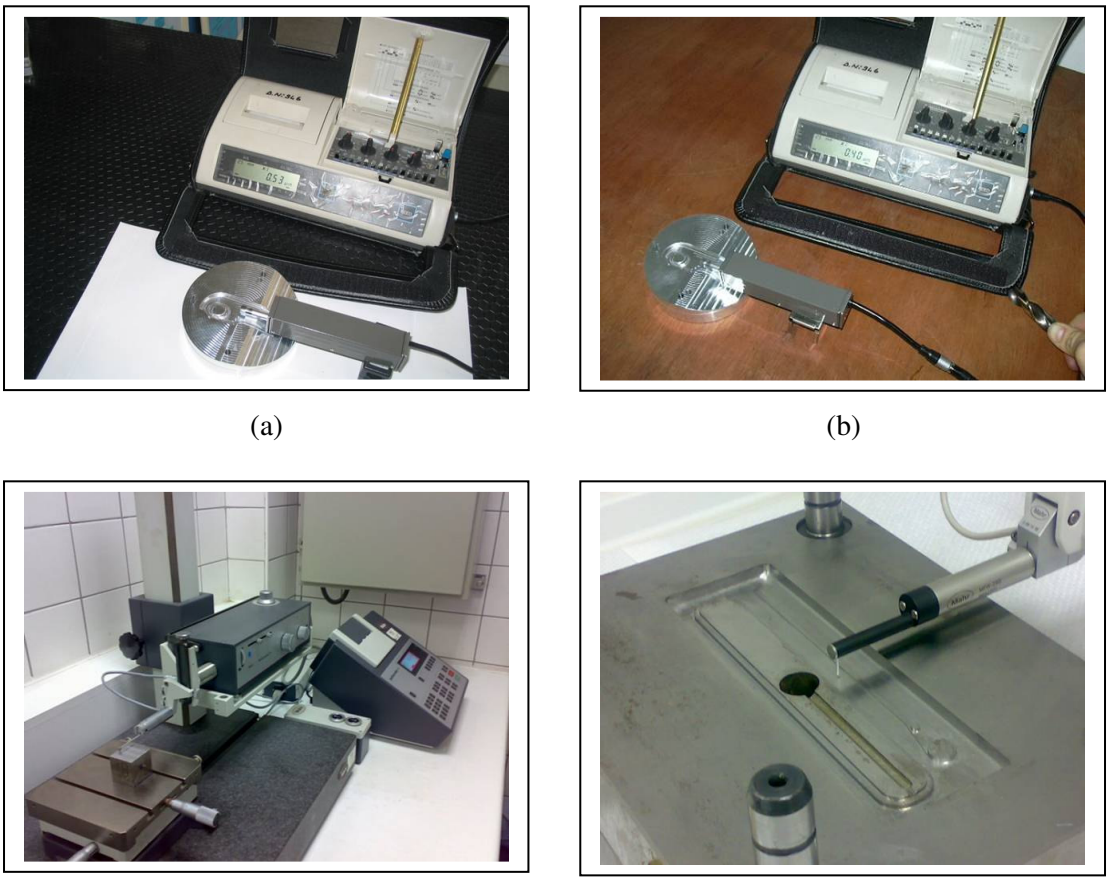
(b)

Şekil 5.6: 0.412 μm ve 0.670 μm'lik pürüzlülük profil grafikleri

Burada sıralanan kabullere dayalı olarak, Alüminyum 7075-T6 malzemenin yüzeylerinden ölçülen en küçük pürüzlülük değeri (0.412 μm) için elde edilen profil grafiği, AISI 1040 çelik malzemenin yüzeylerinden ölçülen en küçük pürüzlülük değeri (0.670 μm) için elde edilen profil grafiği Şekil 5.6 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.

Şekil 5.6'daki grafikler ayrıntılı olarak incelendiğinde, her iki grafiğin iki farklı malzemeye ait yüzey dokusunun karakteristiğini yansıttığı profil çizgisi üzerindeki tepe-çukurların sayısı ve yüksekliğinden kolaylıkla anlaşılabilir. Ayrıca, bu grafikler, 7 ayrı bölgeye ayrılmıştır ve başlangıç-bitiş bölgelerinin pürüzlülük değerleri üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzemenin yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük ölçümleri Şekil 5.7'de sırasıyla gösterilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 5.7: Alüminyum 7075-T6 ve AISI 1040 çelik malzemede pürüzlülük ölçümü

BÖLÜM 6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ için TAHMİNİ MODELLER GELİŞTİRME

Bu bölümde, matematiksel modelleme mantığına dayanan Artificial Neural Network (ANN) ve Response Surface Metot (RSM) yöntemlerinin teorisi ve yüzey pürüzlülük problemi için uygulanması incelenmiştir. ANN ve RSM, matematiksel modeller içinde yer alan denklem katsayılarının en uygun biçimde ayarlanmasına bağlı olarak oluşturulan tahmini yöntemlerdir. Her iki yöntemde de veriler belirli kurallara göre toplanarak matematiksel modeller geliştirilir. Geliştirilen modellerin problemleri çözme biçimine bağlı olarak sonuca varılır. Genellikle, ANN yöntemi, giriş değişkenleri ile istenen cevap arasında doğrusal olmayan ilişkiler kurarak çözüme giderken, RSM yöntemi ise doğrusal ilişkiler kurarak çözüme ulaşır.

ANN ve RSM ile oluşturulan modellerin hepsi birer istatiksel metottur, fakat günlük hayatta ve endüstride birçok problemin çözümünde oldukça efektif ve güçlüdürler. Oluşturulan modeller problemlerin çözümünde zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlarlar ve bu yönleriyle de birçok uygulamada kullanılırlar. ANN ve RSM'e dayalı olarak geliştirilen matematiksel modeller çeşitli algoritmalarla birleştirilerek optimizasyon problemlerin çözülmesinde de kullanılmaktadırlar [35-40, 46-52, 61].

Bu tez çalışmasında, kalıp parçalarının imalatında kullanılan malzeme yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleriyle (81 ve 243) ANN ile RSM yöntemlerine dayalı olan tahmini matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu tahmini modeller yardımıyla, en düşük pürüzlülüğü veren optimum frezeleme parametreleri Genetik Algoritma (GA) optimizasyon tekniğiyle MATLAB'ta analiz yapılarak bulunmuştur.

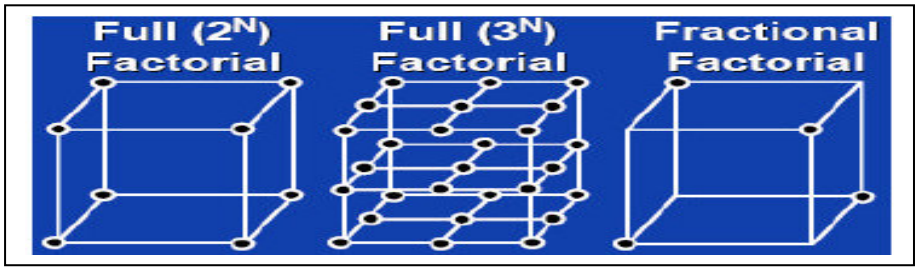
6.1. Tahmini Modeller için Deneysel Tasarım Teknikleri

Deneysel tasarım teknikleri (DOE), ANN ve RSM gibi tahmini modelleri geliştirebilmek için gerekli verinin bir plan ve düzen içinde toplanmasını sağlayan araçlardır. Deneysel tasarım teknikleri, çeşitli imalat operasyonlarına uygulanarak deney verilerinin kısa zamanda ve az maliyette elde edilmesini sağlarlar. Aynı zamanda, deneysel tasarıma uygun planlanmış bir deney setinden alınan sonuçlar ANN ve RSM yöntemlerinin tahmin başarısını artırır ve daha verimli bir optimizasyon sürecinin uygulanmasını sağlarlar. Bu tez çalışmasında, frezeleme parametrelerine (f_t, V_c, a_r, a_e ve m_t) karşılık ölçülen 243 ve 81 yüzey pürüzlülük değerinin efektif bir biçimde toplanması ve ANN ile RSM yöntemlerinde tahmini model oluşturulması için kullanılmıştır. Deneysel tasarım tekniklerinin ayrıntıları ve özellikleri bir sonraki ifade edilmiştir.

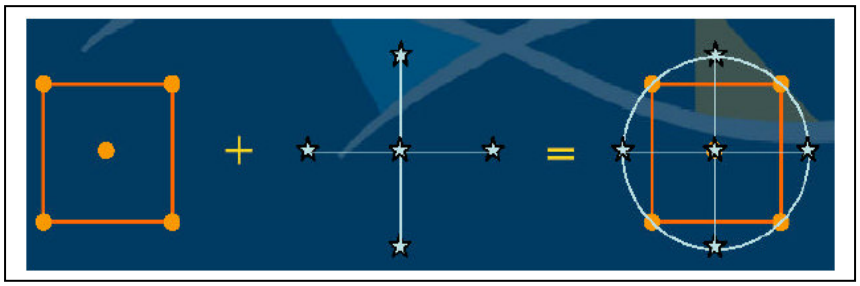
- Faktöriyel deneysel tasarımlar (Factorial design of experiments):

Noktalar değişken sınırları içinde düzenli bir biçimde dizilirler. Nokta sayısı, faktöriyel tasarımlar tarafından belirlenir ve deney tasarımı ortogonaldır. Faktöriyel tasarımlarda, çok sayıda parametrenin farklı seviyeleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilebilir. Bu seviyeler, en düşük seviye (lowest), düşük seviye (low), orta seviye (center), yüksek seviye (high) ve en yüksek seviye (highest) olarak adlandırılmıştır. Bu tez çalışmasının deney verilerinin toplanması sırasında, üç seviyeli tam faktöriyel ($3^n=3^4=81$ ve $3^n=3^5=243$ veri için) tasarım tekniği kullanılmıştır. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 faktöriyel tasarımların geometrik dizilişini göstermektedir.

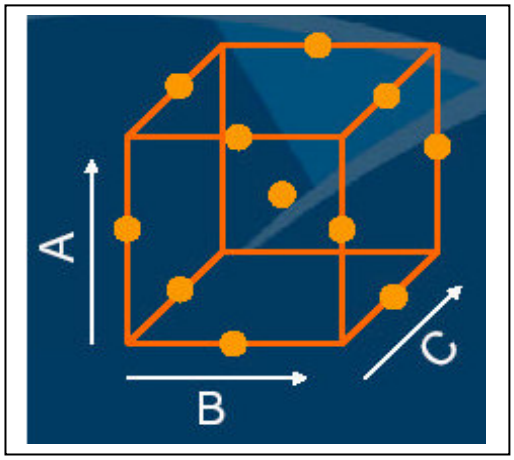
- Tam faktöriyel tasarımlar (2^n, 3^n ve orantısal), Merkezi bütünleşik tasarımlar (central composite design), Box-Behnken faktöriyel tasarımlar.



Şekil 6.1: Tam faktöriyel tasarımlar



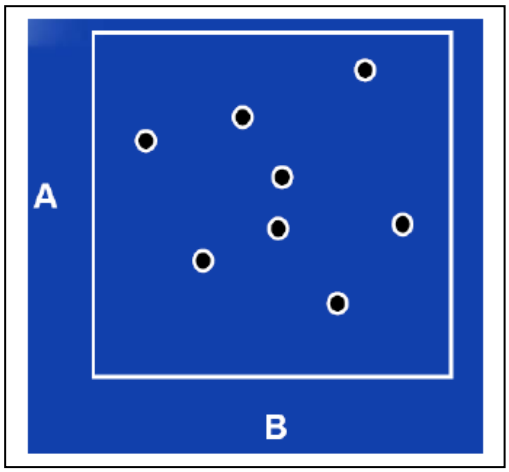
Şekil 6.2: Merkezi bütünleşik tasarımlar



Şekil 6.3: Box-Behnken faktöriyel tasarımlar

- Rasgele deneysel tasarımlar (Random design of experiments):

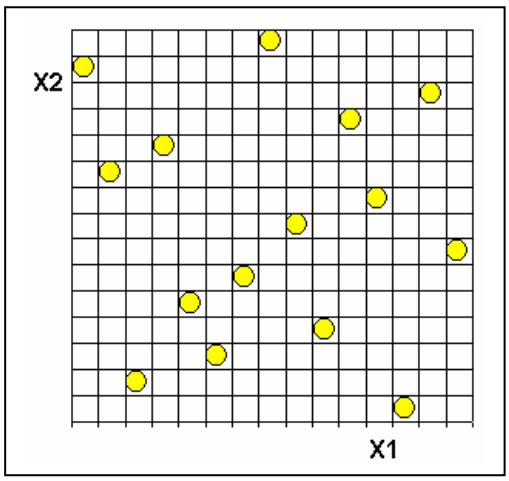
Noktalar değişken sınırları içinde rasgele dağılmıştır (değişmezliği sağlayacak biçimde). Nokta sayısını kullanıcı tespit eder ve deney tasarımı ortogonal değildir. Şekil 6.4, rasgele deneysel tasarımların geometrik dizilişini göstermektedir.



Şekil 6.4: Rasgele (random) tasarımlar

- Latin Hiperküp deneysel tasarımlar (Latin Hypercube design experiments):

Değişken bölgesi her bir değişken boyunca nokta sayısı kadar aralığa bölünür. Rasgele seçilen bölge içinde istenen sayıda nokta üretilebilir. Rasgele seçilen noktaların karelere eşit bir biçimde dağılması sağlanır. Şekil 6.5, Latin Hiperküp deneysel tasarımların geometrik dizilişini göstermektedir.



Şekil 6.5: Latin hiperkübik tasarım

6.2. Yapay Sinir Ağları

Bilgisayar ve bilgisayar yazımları günlük yaşamın en önemli parçaları olmaya başlamıştır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak bilgisayar ve bilgisayar donanımları karmaşık problemleri çözme ve bilgi taşımanın yanı sıra, mevcut bilgileri kullanarak daha sonraki olaylar hakkında sonuç çıkarma işlevini de yerine getirmeye başlamıştır. Bilgisayarlar ve yazılımları, matematiksel olarak çözülemeyen ya da çözümü çok zor olan problemleri tahmin yöntemlerini kullanarak çözmeye başlamıştır. Bu amaçlar için Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network-ANN) adı verilen akıllı öğrenme yöntemleri geliştirilmiştir. Yapay sinir ağları, olaylara ve problemlere çözüm üretirken var olan bilgiye bağlı olarak karar verirler ve öğrendikleri bilgileri sonraki olayları tahmin etmek için kullanırlar.

Yapay sinir ağları teknolojinin gelişmesine uyum sağlayarak mühendislik uygulamaları ve birçok ticari sistemde yaygın kullanım alanı bulmuştur. Yapay sinir

ağları bilgilerin toplanması, öğrenme, karar verme, problemleri çözme ve bilimsel buluşların modellenmesi gibi özelliklerinden dolayı sürekli ve hızlı gelişmeye açık bir bilim dalı olmuştur [34-35].

6.2.1. Yapay sinir ağlarının tanımı ve görevleri

Yapay sinir ağları, dış ortamdan alınan verileri kullanarak öğrenen, olaylar arasında ilişki kurabilen ve daha sonraki olaylar hakkında karar verme yeteneğine sahip olan insan beyni esas alınarak tasarlanmış bilgisayar programlarıdır.

Yapay sinir ağlarının görevleri;

- Mevcut örnekleri öğrenme,
- Örnekler arasında ilişki kurma,
- Örnekleri gruplandırma,
- Gruplandırılmış örnekleri genelleştirme,
- Nitelik belirleme,
- Optimizasyon (iyi öğrenilmiş örneklerden en uygun parametreleri seçme) [37].

6.2.2. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları

Yapay sinir ağları, endüstrideki birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün tasarımı ve makinelerin bakımı ile kalite kontrolü, kimyasal proseslerin dinamik modellenmesi, cep telefonlarının ses kontrolü, araba parçalarının imalat şartlarının belirlenmesi ve metal kesme işlemlerinde karşılaşılan problemlerin çözülmesi yapay sinir ağlarının birincil uygulama alanıdır.

İkinci olarak; ekonomik tahminler, kredi kart şifrelerinin sıralanması, döviz kuru tahminleri ve risk tahminleri gibi ticari alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Üçüncü olarak; askeri ve sağlık alanlarında önemli bir yer bulmuştur. Radar ve görüntü sinyal işleme, hedef saptama, mayın bulma, hastalık teşhis etme, kalp atışlarının izlenmesi ve tıbbi resim işleme gibi birçok örnek verilebilir [32,34-35].

6.2.3. Yapay sinir ağlarının avantaj ve dezavantajları

Yapay sinir ağlarının bilinen ve hala geliştirilmekte olan birçok avantajı vardır [36]:

Avantajları;

- Matematiksel olarak çözülemeyen problemleri modelleme mantığıyla çözme,
- Bilgisayarla çözmenin sağladığı zaman ve maliyet kazancı,
- Her türlü probleme adapte olabilme,
- Oldukça yüksek hassasiyette sonuçlar üretebilme,
- Optimizasyon süreçlerinin temelini oluşturma,

Dezavantajları;

- Kullanıcı deneyimi gerektirmesi,
- Ağın eğitim sürecinin uzun sürme ihtimali,
- Problemlerin çözümünde her zaman en uygun sonuçların olmaması,
- Uygun örneklerin (verilerin) bulunamaması.

6.2.4. Yapay sinir ağlarında kullanılan öğrenme modelleri

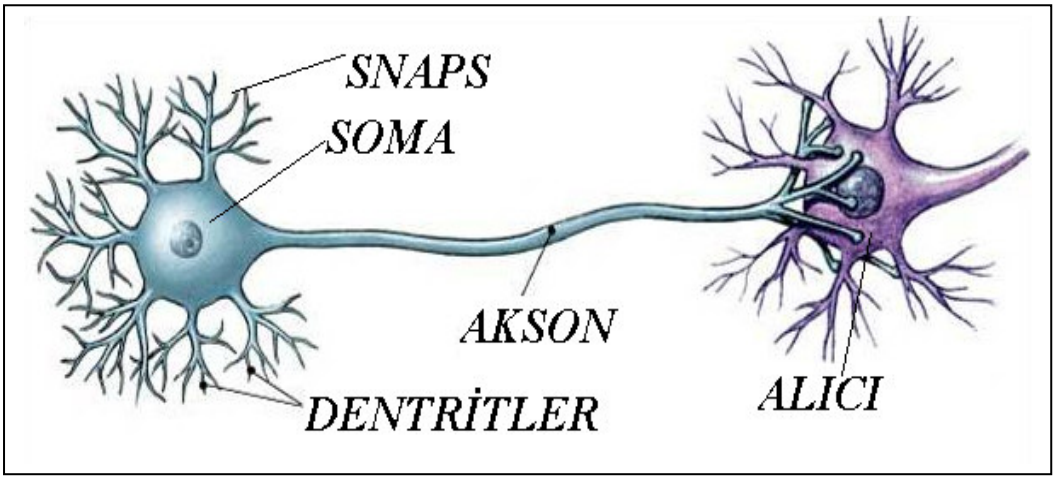
Yapay sinir ağlarındaki işleyişi ve çözümü sağlayan, öğrenme stratejisi ve kuralını saptayan sistemlere öğrenme modeli denir. Öğrenme modelleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Algılayıcılar,
- Çok katmanlı algılayıcılar (hatayı geriye doğru yayan modeller),
- Vektör kuantizasyon modelleri (LVQ),
- Adaptif rezonans Teorisi modelleri,
- Hopfield ağları,
- Sayıcı öğrenme ağları,
- Probabilistik ağlar (PNN),
- Radyal merkezli ağlar (RBNN).

Bu tez çalışmasında, hatayı geriye yayan ve değişkenlerin yapısına bağlı olarak en uygun görülen öğrenme modellerinden "Çok katmanlı algılayıcılar" yapay sinir ağının oluşturulmasında kullanılmıştır. Bundan dolayı, ilerleyen bölümlerde çok katmanlı algılayıcılar ve yapısı incelenmiştir [36-38].

6.2.5. Çok katmanlı bir yapay sinir ağının yapısı

Yapay sinir ağları insan beyninde yer alan biyolojik sinir hücreleri referans alınarak geliştirilmiştir. İnsan beynindeki biyolojik sinir hücresi sinapslar, soma, akson, dentrit ve alıcı adı verilen temel elemanlardan oluşmaktadır. Sinapslar, sinir hücreleri arasındaki bağlantılardır ve bir sinir hücresinden diğerine gelen elektrik sinyalinin iletilmesini sağlarlar. Soma, gelen sinyalleri işler ve akson yardımıyla denrit'e gönderir. Dentrit, oluşturulan bu sinyalleri tekrar diğer hücrelere göndererek bilgi alış-verişini gerçekleştirir. Alıcı, gelen-giden sinyallerin toplandığı ana hücredir [34,68]. Şekil 6.6, bahsedilen bu ilişkileri örnekleyen bir biyolojik sinir hücresini göstermektedir. Bir yapay sinir ağı da bu mantık izlenerek oluşturulabilir. Biyolojik sinir hücresinde olduğu gibi yapay sinir ağlarında da sinir hücreleri vardır ve bu sinir hücrelerine proses elemanı (nöron) denir. Proses elemanları bir yapay sinir ağının problem üzerindeki tahmin başarısını önemli ölçüde etkiler, bundan dolayı proses elemanlarının sayısı ve dizilişi daima doğru seçilmelidir.



Şekil 6.6: Biyolojik bir sinir hücresinin yapısı

6.2.5.1. Çok katmanlı algılayıcılarda proses elemanı bileşenleri

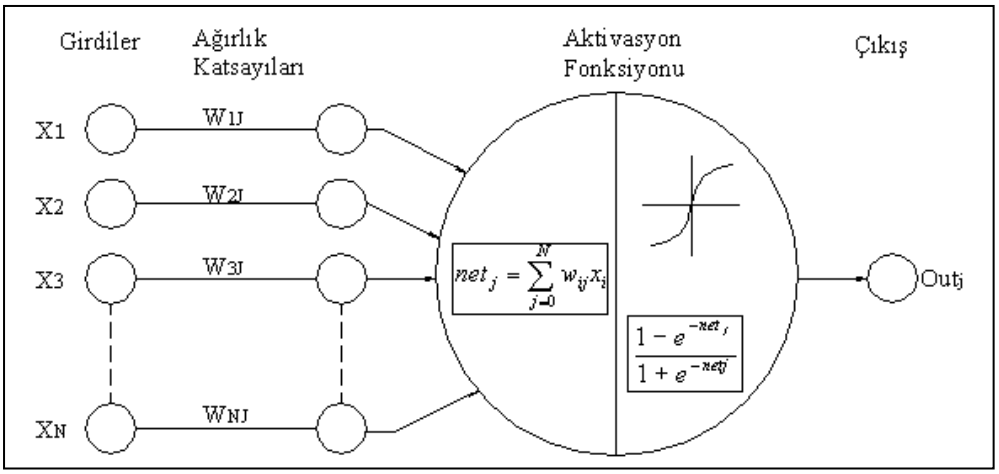
Çok katmanlı algılayıcılar, girdiler ile çıktılar arasında doğrusal olmayan ilişkilerin söz konusu olduğu durumlarda kullanırlar. Çok katmanlı yapay sinir ağlarında bir proses elemanın 5 temel bileşeni vardır. Bunlar; girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar.

- Girdiler: Yapay sinir ağındaki hücreye dış ortamdan aktarılan bilgilerdir. Girdiler, ağın öğrenilmesini zorunlu kıldığı örneklerden belirlenebilir. Girdiler (girdiler katmanında) kısmına, dış ortamdan aktarılan bilgiler üzerinde herhangi bir işlem yapılmaz. Her proses elemanın tek bir bilgisi vardır ve bu bilgi bir sonraki katmana gönderilir. Dış ortamdan aktarılan bilgiler, bu tez çalışmasında kullanılan frezeleme parametrelerinin (f_t, V_c, a_r, a_e ve m_t) her birindeki sayısal değerlerdir.

- Ağırlıklar: Yapay sinir ağına dış ortamdan aktarılan bilgilerin önemlilik derecesini ve problem çözme başarısını belirleyen katsayılardır. Ağırlık katsayıları 0 ile 1 arasında olup, başlangıçta rasgele seçilir. Ağırlık katsayıları, bir proses elemanından diğer proses elemanına geçen bağlantılar üzerindeki sayısal değerlerdir. MATLAB [62], programı ağırlık katsayılarını otomatik olarak hesaplar. Şekil 6.7, bir yapay sinir hücresinde kullanılan ağırlık katsayılarını göstermektedir.

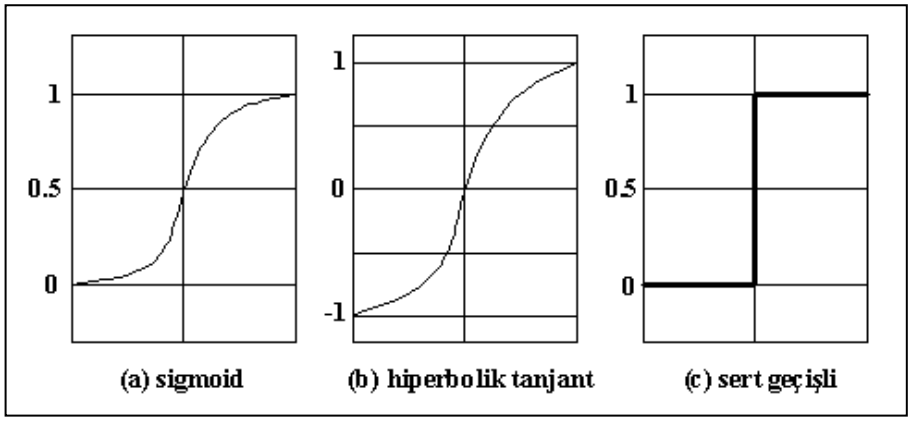
- Toplama fonksiyonu: Proses elemanlarından gelen net girdiyi hesaplar. Değişkenlerden elde edilen pürüzlülük değerleri kendi ağırlığıyla çarpılarak toplanır. Bu şekilde, ağa gelen net girdi değeri hesaplanır. Bu ilişki (6.1) nolu denklemle hesaplanabilir. N; ara katmandaki j. proses elemanının girdi sayısı, W_{ij}; ağırlık katsayısı, X_i; girdiler.

$$net_j = \sum_{j=0}^{N} w_{ij} x_i \tag{6.1}$$



Şekil 6.7: Herhangi bir yapay sinir ağında yer alan proses elemanının yapısı

- Aktivasyon fonksiyonu: Hücreye gelen net girdiyi işleyerek bu girdi değerine karşılık üretilen çıktı değerini belirler. Aktivasyon fonksiyonu için farklı tipte matematiksel formüller geliştirilmiştir. Aktivasyon fonksiyonun tipleri, eğitim ve test süresince elde edilen sayısal sonuçlara göre kullanıcı tarafından seçilebilir. Yapay sinir ağlarında, üç tip aktivasyon fonksiyonu (hiperbolik tanjant, sigmoid ve sert geçişli) kullanılmaktadır ve bu fonksiyonların sergilediği davranışlar, Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Aktivasyon fonksiyonları kullanılarak herhangi bir yapay sinir hücresine ait Out_j değeri, (6.2), (6.3) ve (6.4) nolu denklemlerle hesaplanabilir.



Şekil 6.8: Aktivasyon fonksiyonu tipleri

$$Out_j = f(net_j) = \frac{1}{1 + e^{-net_j}} \tag{6.2}$$

$$Out_j = f(net_j) = \frac{1 - e^{-net_j}}{1 + e^{-net_j}} \tag{6.3}$$

$$Out_j = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & f(net_j) \le 0 \\ 1 & f(net_j) \le 1 \end{array} \right\} \tag{6.4}$$

- Çıktılar: Aktivasyon fonksiyonundan elde edilen net çıktı değeridir. Elde edilen çıktı değeri başka bir yapay sinir hücresine gidebilir. Bir proses elemanının birden fazla girdisi olmasına rağmen, tek bir çıktısı vardır. Net çıktı değeri, yapay sinir ağında eğitim süresince bir sonraki adımda yer alan değerlerin hesaplanması amacıyla da kullanılır. Bu tez çalışmasında, net çıktı değeri Out_j için seçilen değişken R_a'dır.

Çok katmanlı algılayıcılardan üretilmiş yapay sinir ağları, bir öğreticiye ihtiyaç duyarak çözüme giderler. Dış ortamdan alınan her girdiye karşılık ağ bir çıktı üretmek zorundadır. Çok katmanlı algılayıcılarla üretilen çıktı değeri, beklenen çıktı değeri ile karşılaştırılır ve aradaki fark hata olarak belirlenir. Elde edilen hata, ağırlık katsayılarına yayılarak bir sonraki adımda hatanın daha da azaltılması sağlanır. Tek bir proses elemanın ürettiği hata ve toplam hata, (6.5) ve (6.6) nolu denklemlerle hesaplanabilir [47,53,68].

$$E = d - net_j \tag{6.5}$$

$$E = \frac{1}{2}(d - \sum_{j=0}^{N} w_{ij} x_i)^2 \tag{6.6}$$

Çok katmanlı algılayıcıya sahip bir yapay sinir ağında, başlangıçtan itibaren tek bir çıkış değerinin elde edilmesi için yapılan hesaplama biçimine "ileriye doğru hesaplama" ve çıkış değeri ile başlangıç değerlerinin karşılaştırıldıktan sonra oluşan hatanın azaltılması için yapılan hesaplama biçimine ise "geriye doğru hesaplama" adı verilir. Ağda ileriye doğru ve geriye doğru hesaplamanın dayandığı matematiksel temel, En Küçük Kareler yöntemini (Least Square Method) referans alan "Genelleştirilmiş Delta Kuralı" dır. Hatanın geriye yayılması ve dolayısıyla ara katman ile çıktı katmanı ve katmanlar arası ağırlık katsayılarının değiştirilmesi için (6.7) ve (6.8) nolu denklemler kullanılabilir [35,54,68].

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \text{Out}_{ij} \tag{6.7}$$

$$W_{ij}^{\text{yeni}} = W_{ij}^{\text{eski}} + \Delta w_{ij} \tag{6.8}$$

6.2.6. Çok katmanlı algılayıcılarda eğitim, test ve öğrenme süreci

Yapay sinir ağlarında kullanılan çok katmanlı algılayıcılar, daima bir eğitim ve test sürecine tabi tutularak matematiksel sayısal sonuçlar üretirler. Ağa dış ortamdan girilen verilerin (değerlerin) gösterilen örneklere yakın değerler üretmesi istenir. Bir ağ, kendisine gösterilen örneklere yakın değerleri yapısında bulunan ağırlık katsayılarıyla elde eder. Ağırlık katsayıları başlangıçta -1 ile 0.1 arasında rasgele seçilir ve ağ işleme başladıktan sonra bir çıkış üretir. Çıkış değeri ile başlangıçta atanan ağırlık katsayısı karşılaştırılarak "hata değeri" elde edilir. Daha sonra oluşan hata değeri (6.7) ve (6.8) nolu denklemde yer alan formüller kullanılarak "Genelleştirilmiş Delta Kuralı" ile hatayı geriye yayma yöntemiyle hesaplanarak yeni ağırlık katsayıları elde edilir. Net çıkış değerinin elde edilerek ve hatanın geriye yayıldığı yeni ağırlık katsayılarının bulunması için geçen süreye "bir adım veya iterasyon" adı verilir. Yapay sinir ağına dışarıdan girilen veri sayısı kadar yukarıda

bahsedilen işlemlerin uygulanması sürecine de "ağın eğitilmesi" denir. Yapay sinir ağına dış ortamdan aktarılan ve ağın eğitilmesi için kullanılan veriler arasında yer almayan verilerle eğitilen ağın doğruluğunu tespit etmek için uygulanan sürece "ağın test edilmesi" denir. Bir ağın eğitilmesi sırasında üretmiş olduğu veriler ile beklenen verilerle aynı olabilir, fakat bu durum ağın yüksek doğrulukta sonuç ürettiğini göstermez. Bundan dolayı, tasarlanan bir ağın performansı "eğitim seti" içinde yer almayan verilerle karşılaştırılarak belirlenebilir. Test verilerinin oluşturduğu sete ise "test seti" adı verilir [39,47].

Çok katmanlı algılayıcılarda ağın, eğitim setindeki verilere % 90-100 arasında bir eğitim hatası üretmesine karşın, test setindeki verilere % 30-40 arasında test hatası üretmesi tasarlanan ağın "öğrenme" yerine "ezberleme" sürecine girmiş olduğunu gösterir. Bir yapay sinir ağının ezberlemesi demek, tasarlanan ağın performansının çok düşük olduğu anlamına gelir. Fakat bir ağın ezberleme yerine, yavaş öğrenen ve performansı daha düşük olan bir ağ olması daima tercih edilir [35, 47, 63].

Çok katmanlı algılayıcılarda uygun bir ağ yapısı oluşturmak için bir örnek uzayı seçilmeli, ağ topolojisinde değişikler yapılmalı (katmanlardaki proses eleman sayısı), öğrenme parametreleri değiştirilmeli (momentum katsayısı ve aktivasyon fonksiyonu), test seti için seçilen veriler değiştirilmeli ve iterasyon sayısı artırılmalı ya da azaltılmalı, veriler nümerik olarak gösterilmeli, ağırlık katsayılarına başlangıçta uygun değerler atanmalı, verilerin ağa girilmesi sırasında deneysel tasarım teknikleri kullanılmalı, veri sayısı eğitim ve test setinde artırılmalı ve uygun öğrenme kuralı seçilmelidir [53].

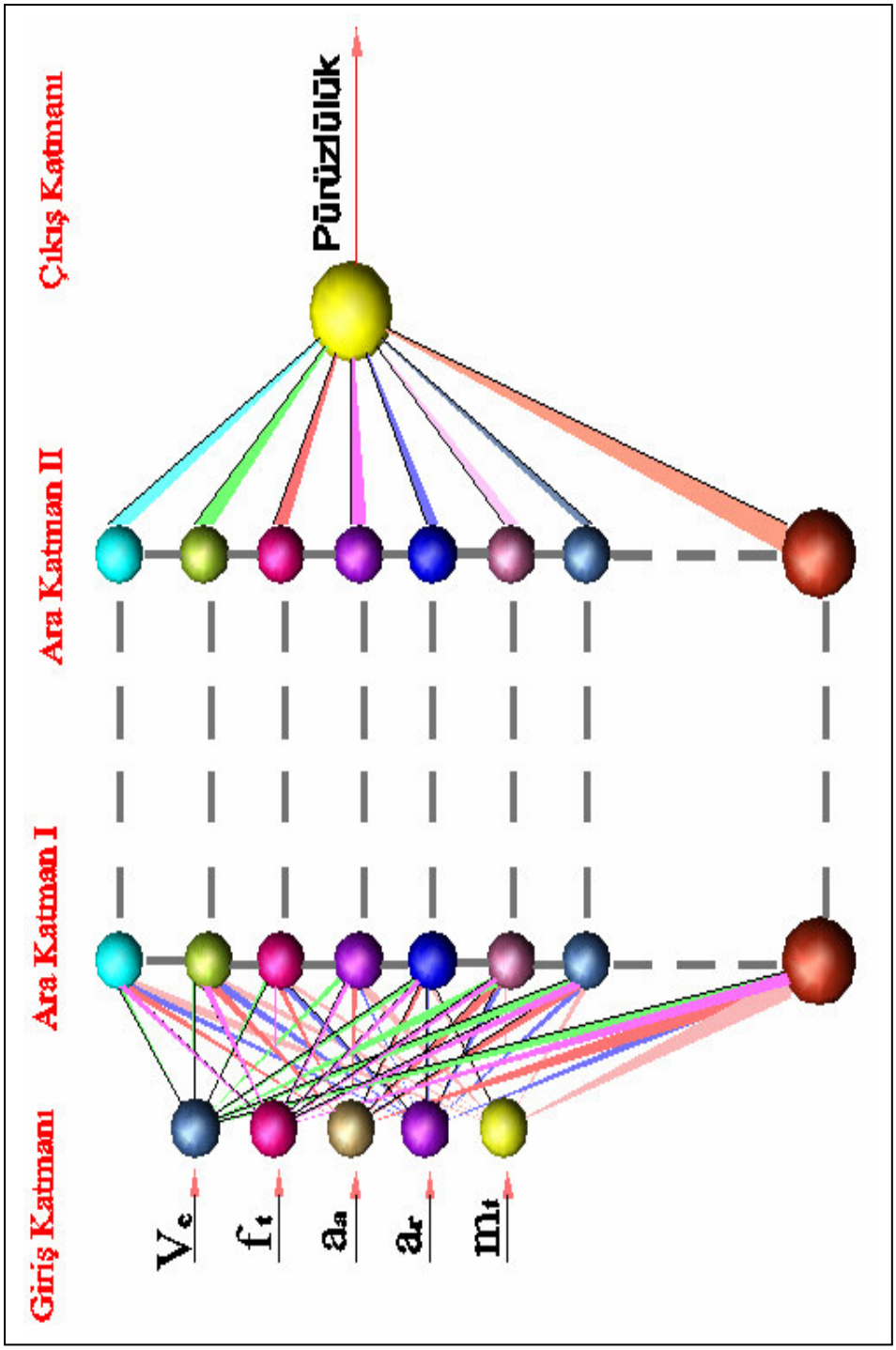
6.2.7. İterasyon durdurma süreci

İterasyonun, net bir çıkış değerinin elde edilerek hata değerini karşılaştırılması ile yeni ağırlık katsayılarının bulunması için geçen süre olduğu daha önceki bölümde bahsedilmiştir. Fakat bir iterasyonun durdurulma zamanı ve ağ üzerindeki etkisinden bahsedilmemiştir. İterasyon sayısı, ağın ürettiği ağırlık katsayına ve hata eğrisine yaklaşma biçimine göre belirlenmelidir. Bir ağın iterasyon sayısının fazla olması

eğitim hatasını azaltırken, test hatasını artırabilir. Bir ağ çok fazla veriye sahipse iterasyon sayısı da fazla olacaktır. Ancak, bir ağın eğitilmesi uzun sürüyorsa tasarlanan ağın ezberleme ihtimali yüksektir ve bu durumda bazı verilerin eğitim setinden çıkarılması gerekebilir. Çok iyi ezberleyen ağ yerine yavaş öğrenen ve kabul edilebilir bir hatayı veren hata ile öğrenmeyi sağlayan düşük performanslı ağlar tercih edilir [36-39].

Yapay sinir ağlarında kullanılan çok katmanlı algılayıcılarda eğitim ve test hatalarının % 10'un altında olması tercih edilir. Buna karşın, bazı uygulamalar için test hatasının % 5'in altında olması istenirken, bazen de % 10-15 arasında olduğu literatürdeki birçok çalışmadan görülebilir [32-40]. Diğer taraftan, yapay sinir ağlarından elde edilen eğitim ve test hatalarının yüksek olması, optimizasyon modeli oluşturmak için engel değildir ve optimizasyon modelinin hatalı sonuç vereceği anlamına gelmemelidir. Bir optimizasyon modelinin sonuç üzerinde kabul edilebilir düzeyde geliştirme sağlaması ve doğrulama testinde düşük hata vermesi yeterlidir.

Bu tez çalışmasında; kalıp yüzeylerinden elde edilen pürüzlülük değerleri kullanılarak ileri sürümlü geri beslemeli (Back-Propagation-Feed Forward Neural Network) çok katmanlı yapay sinir ağı tasarlanmıştır. Yapay sinir ağları için eğitim ve test setleri oluşturularak, tüm modelin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için MATLAB'ta [62] tasarlanan yapay sinir ağı modeli, Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Tez çalışmasında, tasarlanan yapay sinir ağına (ANN modeline) dayalı olarak yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için yazılmış (hazır) MATLAB programı kullanılmıştır [79].



Şekil 6.9: Yüzey pürüzlülüğü için tasarlanan yapay sinir ağı modeli

6.3. Response Surface Metodu

Response Surface Metodu (RSM) orijinal olarak Box ve Drapper [46] tarafından kendi yapmış oldukları fiziksel deneylere matematiksel model uydurmak amacıyla geliştirilmiş ve daha sonra diğer alanlara adapte edilmiştir. RSM, bağımsız değişkenlerden (giriş parametrelerinden) etkilenen bir bağımlı değişken ya da istenen cevap üzerindeki problemlerin modellenmesi, analiz edilmesi, geliştirilmesi ve optimizasyonu için yararlanılan istatiksel ve matematiksel tekniklerden oluşturulmuş bir yöntemdir. Diğer bir deyimle, RSM bağımsız değişkenlerin hedeflenen bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla analitik formüllere dayalı olarak geliştirilmiş bir eğri (model) uydurma işlemidir. Bu yöntem, yaklaşık cevapları kullanarak optimizasyonlar ile cevapların en düşük varyanslarını elde etmek için regresyonla yüzeye eğri uydurma işlemi ve deneysel tasarım tekniklerini birleştirir. RSM yöntemi boyunca regresyonla yüzeye model uydurma işlemi yaklaşık (tahmini) fonksiyonlar elde etmek için, deneysel tasarım teknikleri ise deneylerin planlanması, toplanması ve sonuçların değerlendirilmesi için kullanılır. RSM yöntemiyle problemlerin çözülmesinde, düşük mertebeli (1. ve 2.) polinom tipi çoklu doğrusal regresyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır [46,71,80].

RSM yöntemi, deney sayısına bağımlı olma ve problemler üzerinde doğrusal ilişkiler kurabilme gibi özelliklerinden dolayı günlük hayatta ve endüstride karşılaşılan birçok problemin çözümünde ciddi rol oynamaktadır. Metal kesme işlemleri (pürüzlülük, aşınma, kesme kuvveti ve kaplama), kalıpçılık işlemleri (çekme ve çarpılma) ve tasarım optimizasyonu (parça kalınlığı, mukavemetleri ve yük) RSM uygulamalarına örnek verilebilir.

Bu tez çalışmasında, 4. mertebeden polinom tipi çoklu regresyon modelleri yüzey pürüzlülüğünün tahmini ve optimizasyonunda kullanılmıştır. RSM yöntemiyle oluşturulan doğrusal regresyon modelleri (RS modeller) ve eğri uydurma işlemi ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

6.3.1. Response surface model oluşturma

RSM yöntemine dayalı Response Surface (RS) model oluşturmak için doğrusal regresyon modelleri ve bu modelleri oluşturan denklemlerde yer alan katsayıların tahmin edilmesinde kullanılan eğri uydurma işleminin bilinmesi gereklidir. Bundan dolayı, öncelikle doğrusal regresyon modelleri ve eğri uydurma işlemi gibi RSM için çok önemli matematiksel kavramlar ifade edilmelidir.

6.3.1.1. Doğrusal regresyon modelleri

Bir bağımlı değişken ya da istenen cevap (y) çok sayıda bağımsız değişkenden (x_1, x_2,….,x_k) etkilenir. Bu değişkenler arasındaki ilişki "regresyon modeli" olarak adlandırılan bir matematiksel model ile karakterize edilir. Regresyon modeli, deneysel verinin bir setine uygunluk sağlamaktır. Bazı durumlarda, (y) ile (x_1, x_2,…..,x_k) arasındaki doğru bir fonksiyonel ilişki y=f (x_1, x_2,…..,x_k) olarak bilinir. Buna rağmen, bazen de bu doğru fonksiyonel ilişki bilinmez ve " f " değerini tahmin etmek için uygun bir fonksiyon seçilir. Düşük mertebeli polinomlar yaygın bir biçimde tahmin oluşturma fonksiyonları olarak kullanılırlar [71,80].

Bir doğrusal regresyon modeli aşağıdaki matematiksel biçimde yazılabilir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \tag{6.9}$$

(6.9) nolu denklem, bir bağımlı değişken ve iki bağımsız değişkenden oluşmuş çoklu bir doğrusal regresyon modelidir. Bu denklemde; (y) bağımsız değişken ya da istenen cevabı, x_1, x_2 bağımsız değişkenleri ya da tahmin değişkenlerini, β_0, β_1, β_2, doğrusal fonksiyonun bilinmeyen parametrelerini ve "ε" ise modelin hatasını simgeler. Bu model, iki boyutlu x_1,x_2 boşluğundaki bir düzlemi tanımlar. β_0, bu düzlemin kesişmesini ifade eder. Bazen, β_1, β_2 kısmi bilinmeyen parametreler olarak adlandırılır. Genellikle, (y) istenen cevap değişkeni regresör değişkenleri (k) ile ilişkilendirilebilir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (6.10)$$

(6.10) nolu denklemde yazılan model, k regresör değişkenleriyle çoklu bir doğrusal regresyon modelini ifade ettiği için β_j , j=0,1,…....,k "regresyon katsayıları" olarak ta adlandırılır. Bu model, x_j değişkenlerinin k boyutlu boşluğundaki en üst düzlemini (hyperplane) ifade eder.

Modeller, (6.10) nolu denklemden görüldüğünden daha karmaşık olmasına rağmen, çoklu doğrusal regresyonlarla analiz edilebilir. Örneğin; 1. mertebe bir modele ara terimler (interaction term) ilave edilerek (6.11) nolu denklem elde edilebilir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 ..... + \varepsilon \qquad (6.11)$$

$x_3=x_1x_2$ ve $\beta_3=\beta_{12}$ eşitlikleri yazılarak (6.12) nolu denklemdeki standart çoklu regresyon modeli elde edilir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \qquad (6.12)$$

Benzer şekilde, (6.13) nolu denklemdeki 2. mertebe bir modele ara terimler ilave edilerek ve aşağıdaki eşitlikler yazılarak (6.14) nolu denklem elde edilebilir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^{\,2} + \beta_{22} x_2^{\,2} + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \qquad (6.13)$$

$x_3=x_{12}$, $x_4=x_{22}$, $x_5=x_1x_2$, $\beta_3=\beta_{11}$, $\beta_4=\beta_{11}$, $\beta_5=\beta_{12}$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \qquad (6.14)$$

Her regresyon modeli, genellikle üretilen cevap yüzeyine bakılmaksızın içinde doğrusal parametrelerin (β) bulunmasından dolayı, doğrusal bir regresyon modelidir. (6.12) ve (6.13) nolu denklemlerdeki matematiksel mantık izlenerek daha yüksek mertebe polinom tipi regresyon modelleri oluşturulabilir. Yani, 1. ve 2. mertebeden daha yüksek RS modeller üretilebilir [71,80].

6.3.1.2. Eğri uydurma işlemi

Çoklu doğrusal regresyon modellerini oluşturan regresyon katsayılarını ya da bilinmeyen parametreleri tahmin etmek için eğri uydurma işlemi (Curve Fitting) kullanılır. Literatürdeki bazı çalışmalarda, eğri uydurma işlemi model uydurma işlemi olarak ta ifade edilmektedir [46,71,80]. Eğri uydurma işlemi, en küçük kareler yöntemini (The Least Square Method) kullanarak çoklu doğrusal regresyon modellerindeki (RS modeller) regresyon katsayılarının tahmin edilmesini sağlar.

Eğri uydurma işleminde, deneylerden elde edilen aşağıdaki veri seti ve (6.10) nolu denklemden yararlanarak (6.16) nolu denklemdeki en küçük kareler fonksiyonu yazılabilir.

y	x_1	x_2	.....	x_k
y_1	x_{11}	x_{12}	.....	x_{1k}
y_2	x_{12}	x_{22}	.....	x_{2k}
.	.	.		
.	.	.		
y_n	x_{n1}	x_{n2}	.....	x_{nk}

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + ... + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \tag{6.15}$$

$$L = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ij})^2 \tag{6.16}$$

(6.16) nolu denklemde; (y_i) gözlemlenen (ölçülen) cevabı, x_{ij} i. gözlem (ölçüm) veya x_j değişkenin seviyesini, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ hataların kareleri toplamı ve L en küçük kareler fonksiyonu simgeler. L fonksiyonu, (6.15) nolu denklemdeki β katsayılarını, $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ en küçük değerini alıncaya kadar seçer. RSM yöntemiyle RS model oluşturma süresince, en küçük kareler metoduyla eğri uydurma işleminin en önemli amacı budur.

(6.15) nolu denklemi daha kolay çözebilmek için aşağıdaki matris notasyonu kullanılabilir:

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{6.17}$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \qquad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{2k} \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & x_{n1} & x_{n2} & x_{nk} \end{bmatrix}, \qquad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

(6.17) denklemde; y (n x 1) boyutunda istenen cevap vektörünü, X (n x p) boyutunda bağımsız değişkenlerin seviye matrisini, β (p x 1) boyutunda rasgele hataların vektörünü gösterir.

En küçük karelerin tahmin vektörü $(\hat{\beta})$, (6.18- 6.22) nolu denklemler yardımıyla elde edilebilir.

$$L=\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \tag{6.18}$$

$$L=(y^T y - \beta^T X^T y - y^T X\beta + \beta^T X^T X\beta) \tag{6.19}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta}\Big| = (2X^T y + 2X^T X^T \hat{\beta}) = 0 \tag{6.20}$$

$$X^T X \hat{\beta} = X^T y \tag{6.21}$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \tag{6.22}$$

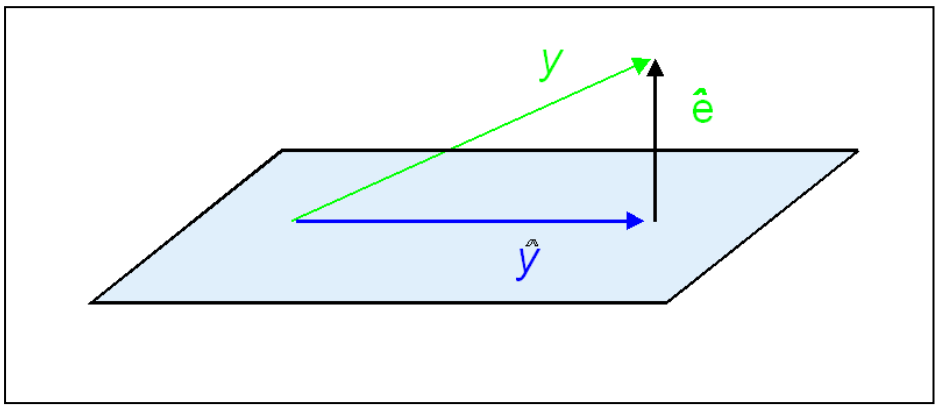
Eğri uydurulmuş regresyon modeli için ve skaler notasyondaki eğri uydurulmuş model, sırasıyla (6.23) ve (6.24) nolu denklemlerdeki gibi yazılabilir:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \tag{6.23}$$

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^{k} \hat{\beta}_j x_{ij} \qquad (i=1,2,.....,n) \tag{6.24}$$

İstenen gerçek cevap (y) ile eğri uydurulmuş ($\hat{y}$) cevap arasındaki fark, artık (residual) olarak adlandırılır ve (6.25) nolu denklemle ifade edilir. Şekil 6.10, artıkların (hataların) üç boyutlu düzlemdeki vektörel ilişkisini göstermektedir.

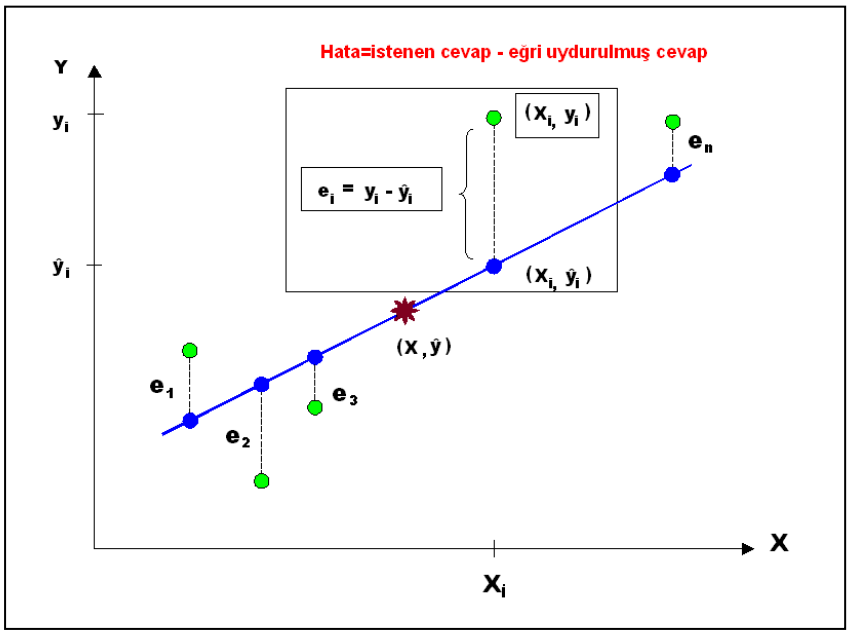
$$\varepsilon = e = y - \hat{y} \tag{6.25}$$



Şekil 6.10: Hataların üç boyutlu düzlemdeki vektörel ilişkisi

Şekil 6.11 ise istenen cevap (y_i) ile eğri uydurulmuş cevabın ($\hat{y}_i$) XY düzleminde regresyon çizgisi boyunca meydana getirmiş olduğu hataların değişimini göstermektedir. Bu hatalar, regresyon çizgisi boyunca (6.26) nolu denklemde ifade edildiği biçimde hesaplanabilir.

$$\hat{\varepsilon} = e_i = y_i - \hat{y}_i \tag{6.26}$$



Şekil 6.11: Regresyon çizgisi boyunca hataların hesaplanması

En küçük kareler yöntemiyle eğri uydurma işlemi boyunca oluşturulan RS modellerin doğruluğu ve güvenirliği (6.27-6.34) nolu denklemler kullanılarak kontrol edilebilir.

$$SS_E = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 = y^T y - \hat{\beta} X^T y \tag{6.27}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{\hat{y}}_i)^2 = y^T y - \frac{(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}{n} \tag{6.28}$$

$$F = \frac{(SS_T - SS_E)/k}{SS_E/(n-k-1)} \tag{6.29}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \tag{6.30}$$

$$R_{adj}{}^2 = 1 - \frac{SS_E/(n-k-1)}{SS_T/(n-1)} \tag{6.31}$$

$$MSE = \frac{SS_E}{(n-k-1)} \tag{6.32}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-k-1)}} \tag{6.33}$$

$$APE(\%) = \left\{ \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\left| y_i - \hat{y}_i \right)^2 \right| / \hat{y}i \right] / p \right\} * 100 \tag{6.34}$$

(6.27-6.34) nolu denklemlerde; SS_E hataların kareleri toplamını, SS_T regresyonun tüm hatalarının kareleri toplamını, F regresyon modelinin uygun olup olmadığının değerlendirilmesini, R^2 regresyonun çoklu tahmin katsayısını, R^2_{adj} regresyonun çoklu tahminin ayarlanmış katsayısını, MSE hataların kareleri toplamının ortalamasını, RMSE hataların kareleri toplamının karekökünü ve APE (%) ise ölçülen değerler ile eğri uydurulmuş değerlerin (tahmin edilmiş) ortalama mutlak yüzde hatasını gösterir. Burada; R^2 oluşturulan regresyon modelinin uygun olup olmadığına karar vermek için kullanılır ve "0" ile "1" arasında değişir. Eğer, R^2 1'e yakın bir değer ise regresyon iyi bir modeldir. RSM teorisine göre; R^2 ve R^2_{adj}'nin daha büyük değerleri, RMSE ise daha küçük değerlerinin elde edilmesi oluşturulan RS modelin iyi bir tahmin yeteneğine sahip olduğunun bir göstergesidir [71,80].

6.3.2. Yüzey pürüzlülüğü için RS model geliştirme

Bu tez çalışmasında; yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi ve optimizasyonu için RSM'e dayalı olan RS modeller, en küçük kareler yöntemiyle eğri uydurma işlemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu amaç için 1. mertebeden 10. mertebeye kadar artan RS modelleri oluşturabilme kabiliyetine sahip eğri uydurma programı MATLAB'ta [62] yazılmıştır. Eğri uydurma programı yardımıyla frezeleme deneylerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri kullanılarak 4. mertebe polinom tipi RS modeller oluşturulmuştur. Buna karşılık, literatürde yer alan çalışmaların çoğunda frezeleme deneyleri için en fazla 3. mertebe polinom tipi RS modeller oluşturulmuştur [41-43, 71,80].

Çoklu bir doğrusal regresyon denkleminden yüzey pürüzlülüğü için oluşturulmuş RS modeller polinom tipi olup herhangi bir " f " fonksiyonuyla ifade edilebilir. Bu fonksiyonda, bağımsız değişkenler ile istenen cevap arasındaki ilişkinin niceliksel biçimi (6.35) nolu denklemde yazılmıştır:

$$R_a = f(f_t, V_c, a_e, a_r, m_t) + \varepsilon \tag{6.35}$$

(6.35) nolu denklemde R_a frezeleme işleminin cevabını (yüzey pürüzlülüğünü), " f " cevap fonksiyonunu, (f_t, V_c, a_r, a_e ve m_t) bağımsız değişkenleri ya da frezeleme parametrelerini ve ε eğri uydurma işleminin hatasını gösterir. R_a için (6.35) nolu denklemde yazılan " f ", 4. mertebe (quartic) polinom tipi doğrusal regresyon modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$R_a = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j\geq 1}^{n} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n}\sum_{i\geq j}^{n}\sum_{k\geq j}^{n} \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^{n}\sum_{i\geq j}^{n}\sum_{k\geq j}^{n}\sum_{l\geq k}^{n} \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \varepsilon \tag{6.36}$$

$\hat{R}_a = E(R_a - \varepsilon)$ eşitliği yazılarak yüzey pürüzlülüğü için 4. mertebe polinom tipi RS model (6.37) nolu denklemle tahmin edilebilir:

$$\hat{R}_a = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{n} \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j\geq 1}^{n} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i\geq j}^{n} \sum_{k\geq j}^{n} \hat{\beta}_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^{n} \sum_{i\geq j}^{n} \sum_{k\geq j}^{n} \sum_{l\geq k}^{n} \hat{\beta}_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \varepsilon \quad (6.37)$$

(6.37) nolu denklemde; $\hat{R}_a$ yüzey pürüzlülüğü için eğri uydurma denklemini, β_0, β_i, β_j, β_k, β_l, 4. mertebe polinom tipi RS modelin regresyon katsayılarını, x_i, x_j, x_k, x_l, frezeleme parametreleri ya da bağımsız değişkenleri ve "n" frezeleme parametrelerinin sayısını gösterir.

Bu tez çalışmasında, üç seviyeli deneysel tasarıma bağlı frezeleme parametrelerine (f_t, V_c, a_r, a_e ve m_t) karşılık gelen pürüzlülük değerleri kullanılarak (6.37) nolu denkleme dayalı 4. mertebe RS modeller oluşturulmuştur. 243 ve 81 pürüzlülük değerlerinden geliştirilen Ra_{243} ve Ra_{81} tahmini (polinom tipi) 4. mertebe RS modeller (6.38) ve (6.39) nolu denklemlerde ifade edilmiştir.

$$R_{a243}=(3.231986+ 55.570378x_1 - 0.103467x_2+ 9.285834x_3 -11.449745x_4 -0.026646x_5+.....+523.498249\ x_1^2-0.824571x_1x_2-22.961031x_1x_3 +378.812380x_1x_4-0.001257x_1x_5+.....+0.000348x_2^2+0.000069x_2x_3 +0.055x_2x_4+ 0.00040x_2x_4 -1.967\ x_3^2- 2.672x_3x_4 - 0.001134x_3x_5 + 6.43x_4^2 +.....+2705.5\ x_1^3+2.874x_1^2x_2+289.44x_1^2x_3-785.97x_1^2x_4- 0.327x_1^2x_5 +.....+(-0.000076x_2^2x_3)+0.00085x_2^2x_4 +0.01x_2x_3^2-0.01065\ x_2x_4 +.....+(-0.855x_3^3)-1.133x_3^2x_4\ 0.001x_3^2x_5+10.59\ x_3x_4^2+ 0.00048x_3x_4x_5+ 0.000015x_3x_5^2+12.36x_4^3+.....+2153\ x_1^4-10x_1^3x_2 -1454.5x_1^3x_4+ 0.874x_1^3x_5 + 0.0023x_1^2x_2^2 - 0.242x_1^2x_2x_3 + 0.085x_1^2x_2x_4 - 0.00029x_1^2x_2x_5 +.....+ 0.000005x_1x_2^3+0.000003x_1x_2^2x_3 -0.00025x_1x_2^2x_4 + 0.0012x_1x_2x_3^2 +.....+(-0.00166\ x_2x_3^3) + 0.0012\ x_2x_3^2x_4 + 0.000001x_2x_3^2x_5 + 0.00098x_2\ x_3x_4^2+.....+0.257x_3^4+ 0.27x_3^3x_4+0.00024x_3^3x_5-0.421x_3^2x_4^2 +0.00016x_3^2x_4x_5 - 0.000001x_3^2x_5^2 - 4.94x_3x_4^3 + 0.00017x_3x_4^2x_5 + 7.37x_4^4 +0.00456x_4^3x_5 + 0.000008x_4x_5^2+0x_5^4) \quad (6.38)$$

$$R_{a81}=(3.1035+0.0832x_1-142.35x_2+4.89x_3-3.449x_4+.....+0.000505x_1^2 +2.503760x_1x_2-0.167478\ x_1x_3-0.022742x_1x_4+.....+(-0.000006x_1^3) +0.000584\ x_1^2x_2-0.000086x_1^2x_3-0.000010x_1^2x_3+.....+40170x_2^3 +2157.15x_2^2x_3-874x_2x_4+.....+2.357x_3^2x_4\ -0.751x_3^3x_4^2-0.1358x_4^3+ 0x_1^4+0.0187x_1^2x_2^2+0.0003x_1^2x_2x_3+.....+(-185224.3x_2^4)-7353.46x_2^3x_4 +3287.95\ x_2^3x_3-64.620782x_2^2x_3^2+.....+ 0.902x_3^3-0.934x_3^3x_4+0.157x_3^2x_4^2 +0.0349\ x_3x_4^3+0.00836x_4^4) \quad (6.39)$$

(6.38) ve (6.39) nolu denklemlerde ifade edilen Ra_{243} ve Ra_{81}, RS modellerinde tüm ara terimler (frezeleme parametresi arasındaki etkileşimler) dikkate alınmıştır. Ra_{243} ve Ra_{81} tahmini RS modelleri, frezeleme parametrelerinin tersi biçiminde oluşturulmuştur. Frezeleme parametrelerinin tersini, tahmini RS modellerde (Ra_{243} ve Ra_{81}) ifade etmek için "reciprocal" adı verilen bir matris kodlama sistemi kullanılmıştır. Bu kodlama sistemi "0" ile "1" rakamlarından oluşmaktadır ve RS modelin doğrusal regresyon denkleminde yer alan tahmin matrisinde kullanılır. "1" rakamı kodlamada var iken regresyon denkleminde parametrenin tersi, $(1/x_i)$ biçiminde; "0" rakamı var iken (x_i) biçiminde yazılır. 243 pürüzlülük değeri ve beş frezeleme parametresi (f_t, V_c, a_r, a_e ve m_t) için oluşturulan (Ra_{243}) RS modelinde [0 0 1 1 1] kodlaması kullanılırken, 81 pürüzlülük değeri ve dört frezeleme parametresi (f_t, V_c, a_r, ve a_e) için (Ra_{81}) RS modelinde [0 0 1 0] kodlaması kullanılmıştır. Ra_{243} ve Ra_{81}, RS modellerinin her biri için oluşturulan kodlamalar, MATLAB'ta RSM analizlerinden elde edilen hatalara göre seçilmiştir.

Beş frezeleme parametresinden ölçülen 243 pürüzlülük değerinin 233'ü 4. mertebe Ra_{243} modelinin eğri uydurma işleminde (eğitilmesinde), geriye kalan 10'u Ra_{243} modelinin doğruluğunu ve performansını kontrol etmek için kullanılmıştır. Ra_{243} modelinin MATLAB analizlerinden % 13.64 eğitim ve % 7.76 civarında test hatası elde edilmiştir. Dört frezeleme parametresinden ölçülen 81 pürüzlülük değerinin 75'i Ra_{81} modelinin eğri uydurma işleminde, geriye kalan 6'sı Ra_{81} modelinin doğruluğunu ve performansını kontrol etmek için kullanılmıştır. Ra_{81} modelinin MATLAB analizleri sonucunda, % 4.41 eğitim ve % 6.28 civarında test hatası elde edilmiştir.

Ayrıca, RS modellerin üretmiş olduğu sonuçlar, Bölüm 8'de ayrıntılı olarak ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin RSM yöntemine dayalı olarak oluşturulan tahmini RS modellerini geliştirmek için MATLAB'ta yazılmış eğri uydurma programı kullanılmıştır [77,82].

6.4. ANN ve RSM Yöntemlerinin Karşılaştırılması

ANN ve RSM yöntemlerinin her ikisi de % 100 doğruluk taşımayan, analiz edilecek verinin iyi oluşturulmasına bağlı matematiksel ve istatiksel tekniklerdir. Bu yöntemler, zaman ve maliyet bakımından günlük hayatta insanların karşılaştığı problemlerin çözülmesi için oldukça güçlü ve efektiflerdir. Temelde aynı mantığa dayanmalarına rağmen, her iki yöntem arasında gözle görülebilir farklılıklar bulunmaktadır. Her iki yöntem karşılaştırılarak bu farklılıklar daha iyi bir şekilde ortaya çıkarılabilir:

- ANN yöntemi, giriş değişkenleri ile istenen cevap arasında transfer fonksiyonundan dolayı, karmaşık-doğrusal olmayan (non-lineer) ilişkiler kurarken, RSM çoğunlukla doğrusal ilişkiler kurarak çözüme ulaşır.

- ANN yönteminde problem çözme başarısı, seçilen transfer fonksiyonu, ara katman sayısı ve analiz süresiyle; RSM'de ise oluşturulan RS modelin mertebesi ve eğri uydurma fonksiyonuyla (polinom ve logaritmik) geliştirilebilir.

- ANN yönteminde oluşturulan matematiksel modelin denklemini görmek mümkün değildir, buna karşılık RSM'de oluşturulan modelin denklemi kolaylıkla görülebilir.

- ANN yöntemi, deneme-yanılmaya oldukça elverişlidir, RSM yöntemi ise bu kadar seçeneğe sahip değildir.

- ANN yönteminde eğitim ve test süreci uzun sürerken, RSM'de eğitim ve test süreçleri çok kısa sürer.

- ANN yönteminde parametre (giriş değişkeni) sayısının az olması matematiksel modelin oluşturulması için sorun yaratmazken, RSM yönteminde ise parametre sayısının az olması daha yüksek mertebeli matematiksel modellerin kurulmasını engeller.

- ANN yönteminin her problem için farklı yapısı bulunurken, RSM'nin standart yapısı vardır.

- ANN yöntemi, tahmini matematiksel modeldeki ağırlık katsayılarını geri beslemeli öğrenme algoritması (Back-Propagation learning algorithm) içinde en küçük karelerle hesaplarken; RSM regresyon katsayılarını doğrusal regresyon denklemleri içinde en küçük karelerle hesaplar.

- ANN yöntemiyle oluşturulan tahmini modellerin, RSM yöntemiyle oluşturulan tahmini modellere göre daha iyi optimizasyon sonuçları vermesi beklenir.

- Sonuç olarak, her iki yönteminde birbirine göre farklılıkların bulunması, bu yöntemlerin ileriye dönük daha fazla geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu göstermiştir.

BÖLÜM 7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN OPTİMİZASYONU

Optimizasyon yöntemleri ilk olarak Endüstri mühendisliği alanı olan Operasyon Araştırma alanında ortaya çıkmış ve daha sonra diğer alanlara (mühendislik, sosyal ve ekonomi) uygulanmıştır. Örnek olarak, II. Dünya savaşı sırasında İngiliz askeri yetkililer, bilim adamları ve mühendislerden radar açılımları, konvoy, bombalama, mayın ve denizaltı savunmalarının kontrolüne ilişkin birçok problemin çözümünü analiz etmelerini istemişlerdir. Günümüze gelen zaman sürecinde optimizasyon yöntemi uygulandığı alanlara önemli ekonomik katkılar sağlamıştır. Bu ekonomik katkılara, Amerikan havayolları optimum mürettebat programıyla 20 milyon $, Yellow Freight optimum taşıma güzergahıyla 17.3 milyon $, dijital ekipmanlarda destek/dağıtım zincirinin optimizasyonuyla 300 milyon $, Brezilya'da Sadia şirketinin geliştirmiş olduğu üretim planlamasıyla üç yılda 50 milyon $ ve Japonya'da Hanshin otoyolunun trafik kontrolü optimizasyonuyla 17 milyon $'lık kazançların elde edilmesi örnek verilebilir.

Optimizasyon yöntemleri, bahsedilen bu ekonomik katkılar göz önüne alınarak metal kesme işlemlerinde karşılaşılan birçok problemin (yüzey pürüzlülüğü, aşınma, kesme kuvvetleri ve kaplama kalınlığı) çözümünde kullanılmıştır [50-52]. Optimizasyon yöntemine dayalı olarak metal kesme problemlerinin çözülmesinde, ANN ve RSM gibi tahmini matematiksel modeller kullanılarak ekonomik açıdan en uygun sonuçlar elde edilmiştir. Optimizasyon yönteminin ANN ve RSM gibi matematiksel modellerle birleştirilmesi, metal kesme problemlerinin çözümünün daha gerçekçi, daha doğru ve efektif olmasını sağlamıştır [53-56].

Bu tez çalışmasında, global optimizasyon yöntemlerinden olan GA tekniği, yüzey pürüzlülük probleminin çözülmesi için kullanılmıştır. GA optimizasyon tekniği, ANN ve RSM gibi matematiksel modellerle birleştirilerek en düşük pürüzlülüğü veren optimum frezeleme parametrelerinin bulunmasını sağlamıştır. En düşük yüzey

pürüzlülük değerlerini veren optimum frezeleme parametreleri, GA tekniğine dayalı optimizasyon yöntemiyle elde etmek için MATLAB'ta yazılmış 7 farklı alt program kullanılmıştır [77-79,82].

7.1. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Optimizasyon kavramı, oldukça geniş ve karmaşık bir matematiksel sürecin sonucu olup birçok alana uygulanabilmektedir. Bundan dolayı, optimizasyonun tek başlık altında sınıflandırılması hem yanlış hem de problemlerin doğru ve efektif bir biçimde çözülmemesine neden olur. Optimizasyonu, problem tipine, çözüm boyunca kullanılan bilgiye ve çözüm mantığına göre sınıflandırmak mümkündür [72].

a.) Problem tipine göre;

- Değişken sayısına (Tek değişkenli, çok değişkenli)
- Kısıtlara (Kısıtsız, kısıtlı)
- Amaç fonksiyonuna (Tek amaçlı, çok amaçlı)
- Fonksiyon derecesine (Doğrusal, doğrusal olmayan)

b.) Çözüm boyunca kullanılan bilgiye göre;

- 0 mertebe (Altın bölümlü, polinom, simpleks, genetik algoritma)
- 1. mertebe (En dikişli inişli metot, eşlenik gradyant, uygulanabilir yönlü)
- 2. mertebe (Newton metotları)

c.) Çözüm mantığına göre;

- Doğrudan çözüm (En dik inişli metot, eşlenik gradyant, gradyant düşümlü, uygulanabilir yönlü, newton, penaltı, simpleks)
- Sezgisel çözüm (Rasgele metot, simulated annealing, genetik algoritma)
- Yaklaşık çözüm (Sıralı doğrusal programlama, sıralı quadratik programlama, response surface metot)

Yukarıda ifade edilen optimizasyon sınıflandırmaları incelendiğinde, şu önemli sonuca varılabilir: Birinci olarak, optimizasyon yöntemi çok sayıda matematiksel

biçimde yazılabilir, ikinci olarak bir optimizasyon yöntemi aynı isimle farklı bir alt grupta yer alabilir. Bu duruma en iyi örnek bu tez çalışmasında da kullanılan GA tekniği, çözüm boyunca kullanılan bilgiye göre sınıflandırılan "0. mertebe" yöntem içinde yer alırken; aynı zamanda çözüm mantığına göre sınıflandırılan "sezgisel" yöntem de yer almaktadır. Üçüncü olarak, GA tekniğiyle optimizasyon kısıtlamalara ve amaç fonksiyonlarına göre de bir sınıflandırılabilir. Buna ilave olarak, GA tekniği "global optimizasyon" yöntemleri içinde yer almaktadır.

7.2. Optimizasyon Yönteminin Teorisi

7.2.1. Optimizasyon probleminin formülasyonu

Optimizasyon, karar verme problemlerini hızlı ve etkin bir biçimde sayısal metotlar kullanarak çözen ve daima bir algoritmaya dayalı olarak geliştirilen bir yöntemdir. Diğer bir tanımla, amaç fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyonun maksimum ya da minimum değerini bulma işlemdir [47,73].

Doğrusal olmayan bir optimizasyon problemini herhangi bir kısıtlama altında ya da herhangi kısıtlama olmaksızın çözebilmek için gerekli olan matematiksel format (7.1) nolu denklemdeki gibi yazılabilir:

Minimize:

$$f(x), \qquad x=\{x_1,x_2,x_3,.....x_n\}$$

Kısıtlama: (7.1)

$$G_i(x)=0, \qquad i=1,.....,m_e$$

$$G_i(x)\le 0 \qquad i=m_{e+1},.....,m$$

veya

$$x_l \le x \le x_u$$

Burada; $x=\{x_1,x_2,x_3,.....x_n\}$ tasarım parametrelerinin (değişkenlerinin) bir setini, "x" n tane tasarım parametresinin uzunluk vektörünü, $f(x)$ maksimize ya da minimize edilmiş olan amaç fonksiyonu, $G_i(x)=0$ eşitlik kısıtlamasını, $G_i(x)\le 0$ eşitsizlik kısıtlamasını ve m ise x'de değerlendirilen eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarının değerini gösterir.

Optimizasyon problemlerinin tanımlanmasında (7.1) nolu denkleme dayalı olarak aşağıdaki terimler kullanılır:

- Optimizasyon değişkenleri: Hedeflenen amacı gerçekleştirmek için karar verme sırasındaki değerleri değiştirilen parametrelerdir.

(Örnek: x ve y)

- Kısıtlar: Problemin çözümü sırasında göz önüne alınması gereken mutlak sınırlamalardır.

(Örnek: $7x+3y\le 39$, $x\ge 0$, $y\ge 0$)

- Amaç fonksiyonu: Hedefin sayısal değerini ifade eden bir analitik fonksiyondur. Minimize veya maksimize edilir.

(Örnek: 5x+6y)

- Geçerli çözüm: Tüm kısıtlamaları sağlayan en iyi çözümdür.

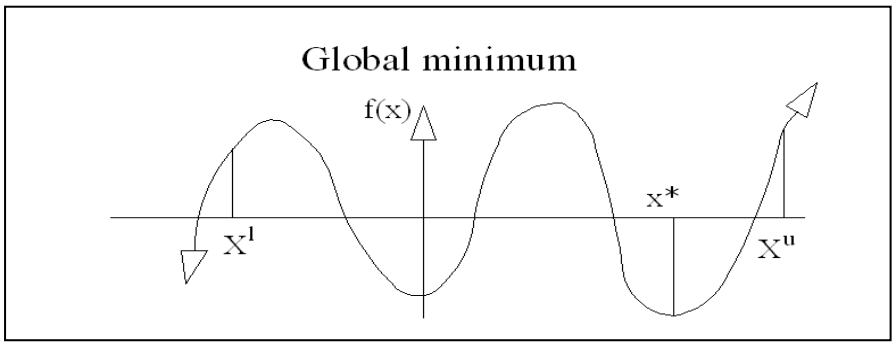
(Örnek: x=4, y=3, $7x+3y\le 39$)

- Aktif kısıt: Tüm kısıtlamaları en son sınırında sağlayan en iyi çözümdür.

(Örnek: x=4, y=3, $7x+3y\le 37$)

7.2.2. Optimallik şartları

Bir optimizasyon işleminin amacı, araştırma aralığındaki her bir noktada fonksiyon değeri daha küçük ya da daha büyük olan bir noktanın global minimum ya da maksimumunu bulmaktır. Buna rağmen; optimizasyon algoritmaları bazen araştırma aralığındaki uzak bir noktadan daha büyük, yakın noktadan daha küçük olan bir fonksiyon değerine sahip bir noktanın lokal minimumunu bulur. Global minimum, çözüm bölgesi içindeki iki lokal (yerel) minimumdan en küçük olanıdır. Bir $f(x)$ fonksiyonuna ait bir noktanın global (bağıl) minimum ve lokal minimum olma şartları, Şekil 7.1'deki grafikler ve denklemler yardımıyla açıklanmıştır.

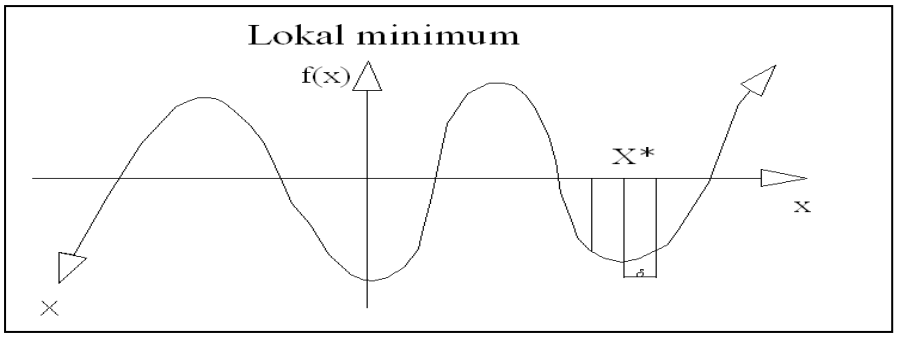


(a)

$f^*=f(x) \le f(x)$

$x_l<x<x_u$ En uç global minimum:

$f^*=f(x)<f(x)$



(b)

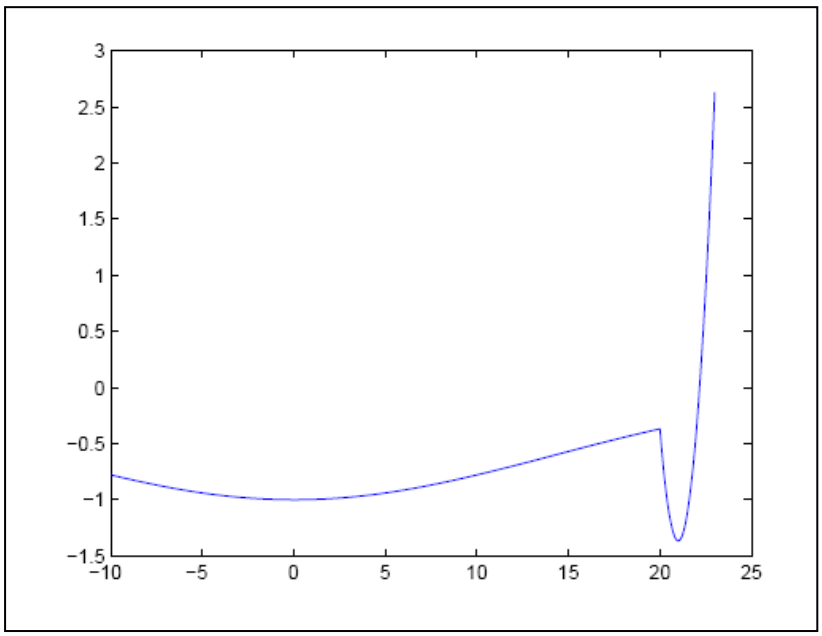
$f^*=f(x) \le f(x)$

$\|x-x^*\|<\delta$ için

Şekil 7.1: Bir f (x) fonksiyonun global ve lokal minimumları

Bir $f(x)$ fonksiyonun global ve lokal minimum değeri, (7.2) nolu denkleme dayalı olarak Şekil 7.2'de çizilen grafikle bulunabilir.

$$f(x) = \begin{cases} -\exp(-(\frac{x}{20})^2 & x \le 20 \\ -\exp(-1) + (x-20)(x-22) & x > 20 \end{cases} \quad (7.2)$$



Şekil 7.2: Bir f(x) fonksiyonun global ve lokal minimumlarının gösterilmesi

Şekil 7.2'deki grafik incelendiğinde, $f(x)$ fonksiyonun x=0 ve x=21 olan iki lokal minimum değeri vardır:

$x=0$'da ==> $x \le 0$ şartına uyduğu için,

$f(x) = -\exp(-(\frac{x}{20})^2 = -1$

$x=21$'de ==> $x \ge 21$ şartına uyduğu için,

$f(x) = -\exp(-1) + (x-20)(x-22) = (-1 - \frac{1}{e}) = -1.368$

$f(x)$ fonksiyonun x=0 ve x=21'deki değerleri incelendiğinde, x=21'deki değeri daha küçük olduğu için global minimum x=21'de elde edilir. Global minimum, $f(x)$ fonksiyonun tasarım aralığı içinde optimizasyonun ulaşabileceği optimum nokta ya da çözümdür.

a.) Kısıtsız ve tek değişkenli bir problemin optimallik şartı:

- Bir noktanın lokal optimum olma şartları,

* Gerekli şart: $f'(x) = 0$

* Yeterli şart: $f''(x) > 0$

- Global optimum için matematiksel bir kriter yoktur.
- Eğer fonksiyon konveks ise lokal optimum aynı zamanda global optimumdur.

b.) Kısıtsız ve çok değişkenli bir problemin optimallik şartı:

* Gerekli şart: $\frac{\partial^2 E}{\partial \alpha_j} = 0 \qquad j = 1,.....q, \quad H > 0$ (7.3)

* Yeterli şart: $H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2_1} & \cdots\cdots \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2_1 \partial \alpha^2 n} \\ & \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2_2} & \vdots \\ & & \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2_n} \end{bmatrix}$ (7.4)

c.) Kısıtlı bir problemin optimallik şartı:

- Kısıtlı problemlerde bir noktanın optimum olması için Lagrangian fonksiyonun Kuhn-Tucker şartlarını sağlaması gerekir.

Lagrangian fonksiyonu: $L = (x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^{m_e} \lambda_i g_i(x)$ (7.5)

Kuhn-Tucker fonksiyonu: $\frac{\partial L(x,\lambda)}{\partial x_i} = \frac{f(x)}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^{m_e} \lambda_i \frac{\lambda g_i(x)}{\partial x_i}$ (7.6)

7.3. Genetik Algoritma Tekniğiyle Optimizasyon Yöntemi

Genetik Algoritma (GA), birçok problemin çözümünde yaygın olarak kullanılan ve oldukça efektif sonuçlar üreten bir "Global Optimizasyon" yöntemidir. GA tekniği, global optimizasyon yöntemlerinin "Sezgisel-Herustic" yaklaşımlarından biridir ve literatürde yer alan uygulamalarda bu başlık altında incelenir. Çünkü, GA gibi optimizasyon teknikleri güçlü bir matematiksel temelden daha çok sezgisel (tahminsel) temele dayanırlar [72-73]. Sezgisel yöntemler, kesin çözüme çok yakın çözümler veren ve hızla sonuca oluşan optimizasyon yöntemleridir. Bundan dolayı, GA tekniği birçok mühendislik probleminin optimizasyonla çözümünde tercih edilir. Sezgisel yöntemler, literatürde kullanılan Gauss-Newton, Doğrudan arama, Hooke-Jeeves, Gradyant ve Değişken ölçüm yöntemi [72] gibi yaklaşımlara karşı önemli bir alternatiftir. Bu yaklaşımlar, genellikle belirli bir problem için uygundur ve süreklilik, türevlerin varlığı, tek modluluk ve diğer konulara ilişkin bazı kısıtlayıcı özelliklere sahiptir [74]. Oysa, GA tekniğiyle optimizasyon yöntemi boyunca bu eksiklikler ortadan kaldırılmıştır. Sezgisel optimizasyon yaklaşımlarından GA'ların temel özellikleri ve avantajları bir sonraki bölümde incelenmiştir.

7.3.1. GA'ların temel özellikleri ve avantajları

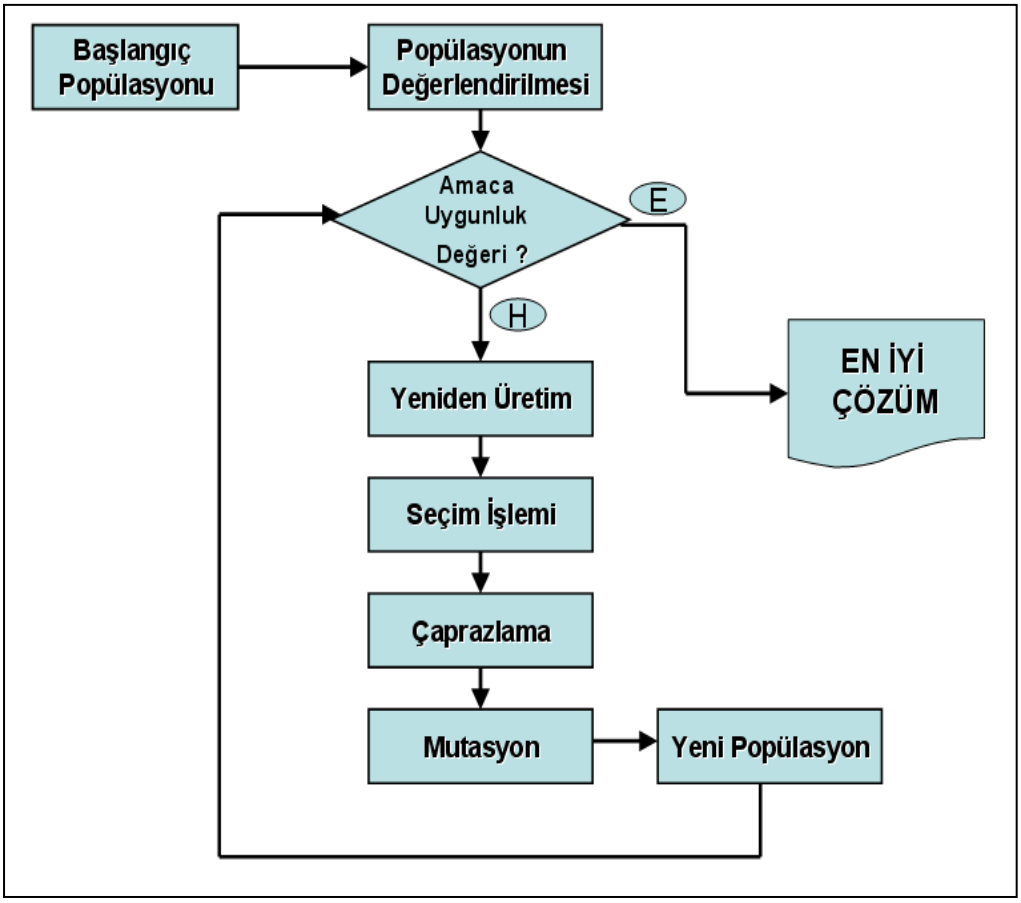
- GA'lar belirli bir amaç için uygulanabilen basit bir algoritmaya sahiptirler.
- GA'lar kısıtlamasız ve kısıtlamalı optimizasyon problemleri, doğrusal olmayan problemler, sezgisel problemler ve birleşik optimizasyon problemlerin çözümünde oldukça efektiflerdir.
- GA tekniği, çok sayıda lokal minimum ya da süreksiz bir amaç fonksiyonun olduğu bir problem için global optimizasyon yöntemiyle çözüm verir.
- GA'lar türev bilgisini kullanmazlar, sadece fonksiyon değerini kullanırlar.
- GA'ların ticari kodları mevcut olduğu için programlanması kolaydır.
- GA tekniğiyle; ANN ve RSM gibi tahmini matematiksel modellerle birleştirilerek optimizasyon yapılabilir.
- GA'lardan elde edilen optimum çözümler, endüstrideki her türlü probleme güvenli bir biçimde uygulanabilir.

- GA'lar zaman ve maliyet açısından analiz edildiği bilgisayara herhangi bir yük getirmezler.
- GA'ların en önemli dezavantajı, kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümünde "penaltı" fonksiyonu yaklaşımına ihtiyaç duymalarıdır. Penaltı fonksiyonu yaklaşımı, kısıtlı optimizasyon problemlerini kısıtsız hale dönüştürerek çözüme ulaşır. Ancak, penaltı fonksiyonu içindeki "penaltı katsayılarının" seçimi için genel bir kriter olmadığından uygun değeri belirlemek zordur, bu uygun değer deneme-yanılma yoluyla belirlenebilir.

7.3.2. GA'ların çalışma prensibi

GA hakkındaki ilk çalışmalar J.E. Holland [76] tarafından 1975 yılında yapılmış ve daha sonra hızlı bir şekilde diğer alanlara yayılmıştır. GA, Darwin'in biyolojik dönüşüm süreci (evrim teorisi) içinde "en iyi olanın hayatta kalma ilkesine" ve "doğal seçim" mekanizması dayanan bir yöntemdir. Bu mantık dikkate alınarak bir GA'nın çalışma prosedürü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

GA tekniği, potansiyel çözümlerin bir setiyle işleme başlayarak ve iterasyonlar (generations) boyunca bu çözüm setini değiştirerek en uygun çözüme ulaşmaya çalışır. Potansiyel çözümlerin bir seti (kromozomlar) rasgele seçilir ya da üretilir. Bu kromozomların tam bir seti bir popülasyonu oluşturur. Kromozomlar (chromosomes), iterasyonlar (yeni üretimler) boyunca değişime uğrarlar. Yeni bir iterasyon, çaprazlama ve mutasyon işlemleri kullanılarak oluşturulur. Çaprazlama işlemi, iki kromozomu bölerek ve daha sonra her kromozomun yarısını diğer bir çiftle birleştirir. Mutasyon işlemi, çaprazlama işlemi sonunda elde edilen yeni kromozomun eskilere benzeme ihtimalini ortadan kaldırmak için tek bir parçayı (geni) değiştirir. Daha sonra, kromozomlar bir amaca uygunluk değeri kullanarak değerlendirilir ve en iyi olan kromozomlar saklanırken, diğerleri atılır. Bu işlem, bir kromozomun en iyi amaca uygunluk değerini yakalamasına kadar devam eder. En uygun değer elde edildiğinde, bu değer hedeflenen problemin optimum çözümü olarak kabul edilir [74-78].



Şekil 7.3: GA'nın herhangi bir problem için çözüm algoritması [76]

GA'nın bir optimizasyon problemini çözmek için uyguladığı akış algoritması Şekil 7.3'te gösterilmiştir ve bu akış algoritmasına dayalı olarak ayrıntılar sırasıyla beş aşamada anlatılmıştır.

1.) Gösterim biçimi:

GA'da değişkenlerin ikilik sistemde kodlanması gereklidir. GA, bir değişkeni gösterebilmek için 16 bit kullanılır.

$$x = -2 + x' 4/(2^{16} - 1)$$

$$y = -2 + y' 4/(2^{16} - 1)$$

32 bitlik bir kromozom için bu dönüşüm işlemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\underbrace{1110011011001100}_{x'=59076} \qquad \underbrace{0110101110000010}_{y'=27522}$$

$$x = -2 + 59076 * 4/(2^{16} - 1) = 1.606256$$

$$y = -2 + 27522 * 4/(2^{16} - 1) = -0.320165$$

2.) Başlangıç popülasyonu:

Başlangıç popülasyonu, GA'nın işleme başlamadan önce bir kez olmak üzere rasgele seçilir. Popülasyon büyüklüğü 20'ye sabitlenir.

K_1=[11100110110011000110101110000010]=[1.606256, -0.320165]
K_2=[11000000001100011011110001010101]=[1.003037, -0.942733]
K_3=[.....]=[....., ...]
. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .
K_{20}=[01110100100111000110101010011001]=[2.31905, -0.827440]

Her popülasyon "*K*" harfiyle gösterilir ve 20 popülasyonun x ve y değişken değerleri yukarıdaki gibi hesaplanır [78].

3.) Popülasyonun değerlendirilmesi:

Birinci iterasyondan yapılması gereken ilk adım, popülasyondaki her kromozom ya da birey için amaca uygunluk değerinin (fitness value) hesaplanmasıdır. Bir popülasyon için en iyi amaca uygunluk değeri (the best Fitness), en küçük uygunluk değeridir. Bir kromozomun amaca uygunluk değerini ölçmek için aşağıdaki üç adım uygulanır:

- İkilik sistemdeki sayıların onluk sisteme dönüştürülmesi,
- Amaç fonksiyonun değerlendirilmesi,
- Amaç fonksiyonun değerinin uygunluk değerine dönüştürülmesi. Burada, uygunluk değerlerini pozitif yapmak için popülasyondaki en büyük uygunluk değerine sahip kromozom değeri maksimum sayılarak işlem gerçekleştirilir [47, 75,78].

Başlangıç popülasyonun amaç fonksiyonu değerleri (U) ve bunların uygunluk değerleri (D) aşağıda verilmiştir. Burada, başlangıç popülasyonun en büyük amaca uygunluk değeri, U_{maks}=703150.3254 olarak hesaplanmıştır.

$U(K_1)=U(1.606256,-0.320165)=2907.700814 \rightarrow D(K_1)=U_{maks}-U(K_1)=700242.428$
$U(K_2)=U(1.003037,-0.942733)=1470.604014 \rightarrow D(K_2)=U_{maks}-U(K_2)=701679.525$
. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .
. . . . . .
$U(K_{16})=U(0.322145,-1.412345)=810.354342 \rightarrow D(K_{16})=U_{maks}-U(K_{16})=702339.77$
. . . . . .
. . . . . .
$U(K_{20})=U(1.457633,-0.948836)=26032.54345 \rightarrow D(K_{20})=U_{maks}-U(K_{20})=677117.586$

Burada, birinci iterasyon sonunda en iyi amaca uygunluk değeri, K_{16} nolu kromozomda elde edilirken, en kötü amaca uygunluk değeri K_{12} nolu kromozomda elde edilmiştir.

4.) Yeni popülasyon oluşturma:

İlk Popülasyonun değerlendirilmesinden sonra, mevcut adımdan yeni bir popülasyon oluşturmak gerekir. Bu amaç için yeniden üretim, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sırasıyla kullanılır.

a.) Yeniden üretim (reproduction):

En iyi amaca uygunluk değeriyle iki kromozom ve ikinci en iyi uygunluk değerinin, bir sonraki iterasyonda hayatta kalmasına ve yeni bir popülasyon oluşturmasına izin verilir. Burada, K_{16} ile K_{17} nolu kromozomların bir sonraki popülasyonu üretmesine izin verilmiştir.

b.) Seçim işlemi (selection) ve çaprazlama (crossover):

Seçim işlemi, popülasyondaki kromozomların amaca uygunluk değerine bağlı olarak geçekleştirilir. Amaca uygunluk değerine göre birkaç tane seçim stratejisi mevcuttur. Şans çemberi, sıralı seçim ve turnuva seçimi önemli seçim stratejileri arasında sayılabilir [47, 75-78]. Burada, şans çemberi (uygunluk oranı) seçim stratejisi çok yaygın olarak kullanılmasından dolayı tercih edilmiştir.

Popülasyon için toplam uygunluk:

$$U_{top} = \sum_{i=1}^{n} D(K_i) \tag{7.7}$$

Her kromozom için seçim olasılığı:

$$SO_i = D(K_i) / U_{top} \tag{7.8}$$

Her kromozom için kümülatif olasılık (cumulative probability):

$$KO_i = \sum_{k=0}^{n} SO_k \tag{7.9}$$

(7.7)-(7.8) nolu denklemlerde yer alan seçim işlemi formülleri kullanılarak, popülasyondaki her kromozomun toplam uygunluk (U_{top}) ve kümülatif olasılık (KO_i) değerleri hesaplanabilir [78]:

SO_1=0.064 → KO_1=0.064

SO_2=0.065 → KO_2=0.185

. . . .

. . . .

. . . .

. . . .

SO_{20}=0.063 → KO_{20}=0.989

Çaprazlama işlemini gerçekleştirmek için SO_i ve KO_i değerlerine bağlı olarak aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

Adım 1: [0,1] aralığında rasgele bir "r" sayısı oluşturulmalı,

Adım 2: $KO_{i-1} < r \leq KO_i$ şartına göre, bir aile (parent) oluşturmak için i. kromozom (K_i) seçilmeli,

Adım 3: İki yeni aile üretmek için 1. ve 2. adımlar tekrar edilmeli,

Adım 4: [0,1] aralığında rasgele bir "r" sayısı oluşturulmalı. Eğer "r" nin değeri çaprazlama olasılığından daha küçük ise, çaprazlama işlemi tek noktadan kesilerek yapılmalı [r*(32-1)],

Adım 5: [1-4] adımlar tüm bir çaprazlama işlemini tamamlamak için 9 kez tekrar edilmeli.

Seçim işlemi ve yukarıda bahsedilen adımlar takip edilerek, bir çaprazlama işlemi (K_4) ve (K_{18}) nolu kromozomlar için aşağıdaki gibi örneklendirilebilir.

Çaprazlama oranı (crossover rate)=9;

(K_4) kromozomu =01001000111100011001110110001100

(K_{18}) kromozomu=11011001111111110101110001000111

Yeni popülasyon 1=010010001 / 11111110101110001000111

Yeni popülasyon 2=110110011 / 11100011001110110001100

20 yeni popülasyon üretmek için çaprazlama işlemi tek bir noktadan kesme işlemi yardımıyla ve çaprazlama oranına göre tekrar hesaplanır [77-78].

c.) Mutasyon (Mutation):

Çaprazlama işleminden sonra mutasyon gerçekleştirilir. Mutasyon işlemi, 0.01 olan bir mutasyon oranına (mutation rate) eşit olan bir olasılık ya da daha fazla geni (0 veya 1) değiştirir.

Adım 1: "r_k" ile gösterilen rasgele sayıların bir dizisi oluşturulmalı,

(k=1,.....,640 ve tüm popülasyon için 20*32 (bit)=640)

Adım 2: r_i=1 ise 0-1'e ve 1-0'a tüm popülasyondaki i. bit değiştirilmeli,

Adım 3: Yeniden üretilen kromozomlar mutasyon işlemine tabi tutulmazlar. Bu kromozomlar, sadece yenilenirler. Daha iyi bir aile kurmak ve bir önceki kromozomlara benzeme ihtimalini ortadan kaldırmak için mutasyon işlemi uygulanır [78].

Bir önceki örnekte, çaprazlama işlemi sonucunda oluşan iki yeni popülasyon kullanılarak mutasyon işlemi gösterilebilir.

Yeni popülasyon 1=010010001 **/** 11111110101110001000111
Yeni popülasyon 2=110110011 **/** 11100011001110110001100

Mutasyon işlemi sonucunda; yeni popülasyon 3'te, "**1**" geni "**0**" a dönüşmüştür.
Yeni popülasyon 3**=**0100100011 **0** 11111010111000100011 1

5.) Yeni popülasyon:

GA'nın bir iterasyonun tamamlanması sonucunda, yeni bir popülasyon oluşturulur ve bu prosedür, istenildiği kadar tekrar edilebilir. Fakat, her iterasyon sonucunda elde edilen en küçük amaca uygunluk değeri hedeflenen optimizasyon probleminin

şartlarını memnun ediyorsa, iterasyon durdurulabilir. Burada, başlangıç popülasyonunda yer alan kromozomların tipine göre 40 iterasyonluk bir GA optimizasyon süreci uygulanmıştır.

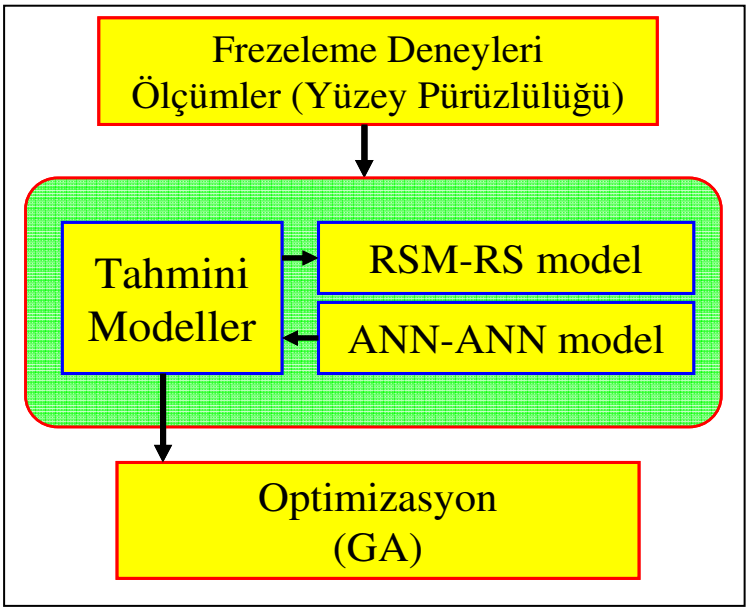
1. iterasyon= U(0.322145, -1.412345)=810.3543
2. iterasyon= U(0.425166, -0.681124)=200.2254
. . . .
. . . .
40. iterasyon= U(-0.005741, -0.98714)=2.97181

7.4. Yüzey Pürüzlülük Probleminin Optimizasyonu

Bu bölümde; ANN ve RSM gibi tahmini yöntemlerin GA tekniğiyle birleştirilmesi, yüzey pürüzlülük probleminin tanımlanması, optimum frezeleme parametreleri için sınır şartlarının yazılması ve yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için MATLAB'ta kullanılmış GA programının yapısının incelenmesi yer almıştır [77,78,82].

7.4.1. Yüzey pürüzlülük probleminin tanımlanması

Bu tez çalışmasında, Alüminyum 7075-T6 malzeme ile AISI 1040 çelik malzeme yüzeylerinden ölçülen pürüzlülük değerleri, ANN ve RSM'de matematiksel model haline getirilerek optimizasyon için GA tekniğiyle birleştirilmiştir. Şekil 7.4, yüzeylerden ölçülen pürüzlülük değerleri, ANN ve RSM yardımıyla tahmin edilen matematiksel modeller ve GA tekniği arasındaki ilişkiyi göstermektedir. ANN ve RSM, doğrusal ya da doğrusal olmayan bir $f(x)$ fonksiyonunda tanımlı pürüzlülük modellerini oluşturur. GA ise kısıtlı ya da kısıtsız durumda, pürüzlülük modellerinin en düşük $f(x)$ fonksiyon değerini veren optimum frezeleme parametrelerinin bulunmasını sağlar. ANN ve RSM modellerinin tahmin hatalarının düşük olması, GA tekniğiyle uygulanacak optimizasyon sürecinin daha güçlü ve güvenilir olmasını sağlar. Bu tez çalışmasında, ANN ve RSM'e dayalı oluşturulan modeller arasından en düşük tahmin hatasına sahip olanlar, GA'nın yüzey pürüzlülük problemini daha efektif ve güvenilir bir biçimde çözmek için seçilmiştir.



Şekil 7.4: Ölçümler, ANN-RSM ve GA'nın birleştirilmesi

En düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimum frezeleme parametrelerinin bulunması, sadece metal kesme ekonomisine fayda sağlamamalıdır; aynı zamanda optimum frezeleme parametreleriyle pürüzlülüğün azaltılması ürün kalitesini de geliştirmelidir. Alüminyum 7075-T6 ile AISI 1040 çelik malzemelerin yüzeylerini işlemek için optimum frezeleme parametreleri, GA tekniğiyle efektif bir biçimde belirlenebilir. Bundan dolayı, yüzey pürüzlülüğü sayısal bir optimizasyon algoritmasıyla çözülebilen standart optimizasyon formatında tanımlanmalıdır. Standart optimizasyon problemini tanımlamak için minimize ya da maksimize edilmiş bir amaç fonksiyonu gereklidir. Bu tez çalışmasında, minimize edilmiş bir amaç fonksiyonu olan yüzey pürüzlülüğü (7.10) nolu denklemdeki gibi doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi biçiminde yazılabilir:

$$\boxed{Kısıtlama = R_a \le R_{a\,\min}}$$

$$=> g(x) \le 0 => g(x) = R_a - R_{a\min} \le 0 => g(x) = \frac{g(x)}{R_{a\min}} => g(x) = \frac{R_a - R_{a\min}}{R_{a\min}}$$

$$=> \boxed{g(x) = \frac{R_a}{R_{a\min}} - 1 \le 0} \qquad (7.10)$$

Bu tez çalışmasında; Alüminyum 7075-T6 malzeme yüzeylerinden beş frezeleme parametresiyle 243 R_a değeri için; AISI 1040 çelik malzeme yüzeylerinden dört frezeleme parametresiyle 81 R_a değeri için (7.10) nolu denklemde yazılan optimizasyon problemleri (7.11) ve (7.12) nolu denklemlerdeki gibi yazılabilir:

Aranan: f_t, V_c, a_e, a_r, m_t

Minimize: Ra_{243} (f_t, V_c, a_e, a_r, m_t)

Kısıtlama: $Ra_{243} \leq 0.412\mu m$

Beş frezeleme parametresinin aralıkları içinde: (243 pürüzlülük değeri)

$$\begin{array}{c} 0.08\ mm/diş \leq \boldsymbol{f_t} \leq 0.13\ mm/diş \\ 100\ m/dak \leq \boldsymbol{V_c} \leq 300\ m/dak \\ 0.3\ mm \leq \boldsymbol{a_e} \leq 0.7\ mm \\ 1\ mm \leq \boldsymbol{a_r} \leq 2\ mm \\ 0.001\ mm \leq \boldsymbol{m_t} \leq 0.01\ mm \end{array} \qquad (7.11)$$

ANN ===> GA= 0.3485 μm
RSM ===> GA= 0.3750 μm

Aranan: f_t, V_c, a_e, a_r

Minimize: Ra_{81} (f_t, V_c, a_e, a_r)

Kısıtlama: $Ra_{81} \leq 0.670\ \mu m$

Dört frezeleme parametresinin aralıkları içinde: (81 pürüzlülük değeri)

$$\begin{array}{c} 0.07\ mm/diş \leq \boldsymbol{f_t} \leq 0.12\ mm/diş \\ 140\ m/dak \leq \boldsymbol{V_c} \leq 240\ m/dak \\ 0.5\ mm \leq \boldsymbol{a_e} \leq 1.5\ mm \\ 1\ mm \leq \boldsymbol{a_r} \leq 5\ mm \end{array} \qquad (7.12)$$

ANN ===> GA= 0.5613 μm
RSM ===> GA= 0.3575 μm

(7.11) ve (7.12) nolu denklemlerdeki doğrusal olmayan optimizasyon problemleri, en düşük R_a değerleri ve bu R_a değerlerini optimum frezeleme parametrelerini elde etmek için tanımlanmıştır. Bu denklemlerde; R_a, optimizasyon probleminin amaç fonksiyonunu, $R_a \leq 0.412$ ile $R_a \leq 0.670$ ise pürüzlülük problemi için seçilen kısıtlamalardır. Denklemlerde yer alan kısıtlamalar en düşük pürüzlülük değerini araştırır ve aynı zamanda daha iyi bir çözüm kısıtlama ifadeleriyle güçlenir. Kısıtlamalarda kullanılan her iki pürüzlülük değeri, 243 ve 81 pürüzlülük değerleri arasındaki en küçük iki değerdir. Her iki kısıtlama değeri dikkate alınarak, tez çalışmasında uygulanan GA tekniğinin pürüzlülük optimizasyonuna katkısı tespit edilmiştir. (7.11) ve (7.12) nolu denklemlerde yazılan doğrusal olmayan optimizasyon problemleri için GA gibi sezgisel optimizasyon yöntemleri, kısıtlamalı problemleri kısıtlamasız problemlere dönüştürerek çözüme ulaşırlar. Bundan dolayı, bu tez çalışmasında incelenen yüzey pürüzlülük problemi kısıtlamasız bir optimizasyon problemi olarak ta ele alınabilir. Ayrıca, GA tekniğine dayalı olarak elde edilen tüm sonuçlar, Bölüm 8'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

7.4.2. Yüzey pürüzlülük probleminin GA ile çözülmesi

Tez çalışmasında, hedeflenen yüzey pürüzlülük problemini çözmek için MATLAB'ta yazılan ve bahsedilen optimizasyon teorisine dayalı olarak yazılmış GA programları, bu bölümde öncelik sırasına göre açıklanmıştır. GA programları yerine getirdiği temel işlevlere göre adlandırılmıştır. GA programlarının yapısı ve çalışma mantığı sırasıyla incelenmiş ve bazı önemli komut satırları aşağıda açıklanmıştır [76-79,82].

"GENETICCON_ANN_RSM" programı, hedeflenen yüzey pürüzlülük probleminin GA tekniğine dayalı olarak çözülmesini sağlayan ana programdır. Bu program, GA ile yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu boyunca 6 alt programı da eş zamanlı olarak çalıştırır. Alt programlar, ana program içinde yazılan temel komut satırlarıyla işlevlerini yerine getirirler. Burada, ana program içinde yazılan komut satırlarının sırası işlemlerin doğru yapılması yönünden oldukça önemlidir. "GENETICCON_ANN_RSM" programı, ANN ve RSM gibi tahmini modellerin daha önceden çalıştırılmasına ihtiyaç duyar. Çünkü, tahmini modeller yüzey

pürüzlülüğü için gerekli olan yaklaşık fonksiyonun oluşturulmasını sağlarlar. "GENETICCON_ANN_RSM" programı, oluşturulan yaklaşık yüzey pürüzlülük fonksiyonun hangi noktalarda optimum değerlerine ulaştığını gösterir. Bu program, hem ANN hem de RSM ile oluşturulan pürüzlülük modellerinin optimizasyonu için bu tezde kullanılmıştır.

"1.) GENETICCON_ANN_RSM" programı, iki temel bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde; kullanıcı tanımlı komut satırları yer alırken, ikinci bölümde; kullanıcı tanımlı olmayan komut satırları yer almıştır. Birinci bölümde, "RS_OBJ" ve "RS_CON" alt programlarını çalıştıran 'obj_fcn' ve 'con_fcn' fonksiyonları, giriş parametrelerinin aralıklarını ayarlayan 'range' komutu, iterasyon sayısını ayarlayan 'generation_n' ve popülasyon sayını belirten 'popu_Size' komutları kullanılmıştır. İkinci bölümde, GA'nın temel parametreleri (% Genetic algorithm Basis parameters), yakınsama kriterinin kullanılması (% if convergence citeria), kullanılan değişkenlerin hafızaya alınması (% Memory allocation), başlangıç popülasyonunun rasgele seçilmesi (% Initial random population), GA'nın ana döngüsü (% Main loop of GA), amaca uygunluk değerlendirilmesi (% Evaluate fitnesses), optimum değerlerin yazdırılması (% Print optimum values), optimum değerlerin uygunluğunun kontrolü (% Check the feasibility of the optimum), iterasyonlar boyunca en iyi amaç değerlerinin grafiğinin çizilmesi (% Plot the best obj value versus iterations), yeniden üretim, seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerle bir sonraki iterasyonun oluşturulması (% Generate next population via selection, crossover and mutation) ve GA'nın tüm sonuçlarının bir dosya içine kaydedilmesi (% Print Genetic Algorithm optimization results to file) gibi işlemler yer almıştır. "GENETICCON_ANN_RSM" programı, Şekil 7.3'teki GA çözüm algoritmasına dayalı olarak optimizasyon sürecini uygulamıştır. Bundan dolayı, alt programlar ve komut satırları bu mantık dikkate alınarak sırasıyla incelenmiştir.

"2.) RS_OBJ" programı, ANN ve RSM ile oluşturulan tahmini modellerin amaç fonksiyonunun (yüzey pürüzlülüğünü) minimize edilmesinde kullanılmıştır. "RS_OBJ.m" programı, herhangi bir kısıtlama olmaksızın en küçük pürüzlülük değerini bulmaya çalışır. "RS_OBJ" programını, "GENETICCON_ANN_RSM"

programı içinde çalıştırmak için ‘obj_fcn’ fonksiyonu kullanılır. ‘f_value’ fonksiyon değerini ve ‘BETA’ ise oluşturulan modelin denklem katsayılarını hesaplar. “RS_OBJ” programı içinde, 1. mertebeden 10. mertebeye kadar her noktadaki tahmin hatalarının hesaplanması (% Calculate Accuracy Error at Check Set Points), Logaritmik veya Polinom tipi modelin seçilmesi (% if ModelType= =1) gibi işlemler de yer almıştır.

“3.) RS_CON” programı, ANN ve RSM ile oluşturulan tahmini modellerin amaç fonksiyonuna belli bir sınır ya da kısıtlama getirmek için kullanılmış bir alt programdır. “RS_CON.m” programını, “GENETICCON_ANN_RSM” programı içinde çalıştırmak için ‘con_fcn’ fonksiyonu kullanılır. “RS_CON” programı içinde yer alan kısıtlaması ifadesi (7.10) nolu denkleme dayalı olarak yazılmıştır. Burada, ‘gvalue’ (7.10) nolu denklemdeki $G_i\ (x)$ fonksiyonunu göstermektedir. (7.11-7.12) nolu denklemlerdeki kısıtlama ifadeleri, “RS_CON” programında ‘gvalue=((gvalue-0.67)/0.67)’ komut satırıyla hesaplanmıştır. Ayrıca, bu program ve diğer alt programların başlangıç satırlarında yer alan ‘global’ komutu, GA tekniğinin bir global optimizasyon yönteminde dayalı olarak global optimum değerini aradığını gösterir.

“4.) BIT2NUM” programı, ikilik sistemdeki sayıları onluk sisteme çevirme işlemini gerçekleştirmiştir. “BIT2NUM” programında, ‘bit’ komutu [0-1] den oluşan ikilik sistemdeki sayıları, onluk sistemdeki sayılara dönüştürür. ‘Range’ komutu ise onluk sisteme dönüştürülmüş sayıların aralığını belirleyen iki boyutlu vektörü belirtir.

“5.) EVALEACH” programı, popülasyondaki her kromozomun (bireyin) amaca uygunluk değerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. ‘string’ komutu, her kromozomun ikilik sistemdeki uzunluğunun belirlenmesini sağlar. ‘bit_n’ komutu, her değişken için bitlerin sayısını verir. Bu program içinde kullanılan komut satırları az olmasına rağmen, her kromozomun amaca uygunluk değerini hesapladığı için oldukça önemli bir alt programdır.

“6.) EVALFITNESS” programı, popülasyonun amaca uygunluk değerlerinin kontrol edilmesinde kullanılmıştır. “EVALFITNESS” programı, ‘obj_fcn’ fonksiyonuyla en düşük pürüzlülük değerini araştırırken, ‘obj_fcn’ fonksiyonuyla minimize edilmiş yüzey pürüzlülük değerinin bir kısıtlamaya maruz kalmasını sağlar. “EVALFITNESS” programı içindeki ‘pop_n’ komutu, n sayıda kromozomdan oluşan popülasyonu ve ‘bit_n’ giriş parametrelerini sergilemek için kullanılan bitlerin sayısını gösterir. “EVALFITNESS.m” programı yapısında, amaç değerlerinin hesaplanması (% Calculate objective values), kısıtlamalar ve bu kısıtlamaların yetersizliğinin hesaplanması (% Calculate constraints and their feasibility), en iyi amaç değeri dizininin belirlenmesi (% Best objective value index) ve amaca uygunluk değerlerinin hesaplanması (% Calculate fitnesses) gibi işlemleri yürütür.

“7.) NEXTPOPU” programı, ilk popülasyonun değerlendirilmesinden sonra daha iyi olan yeni bir popülasyonun oluşturulmasını sağlar. “NEXTPOPU” programı, yeniden üretim, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemlerini kontrol ederek yeni popülasyonu oluşturur. Bu dört genetik operatör, “NEXTPOPU” programı içindeki komut satırlarıyla aşağıdaki gibi çalıştırılır.

Yeniden üretim işlemi (% Elitism: find the best two and keep them), birinci ve ikinci en iyi amaca uygunluk değerine sahip iki kromozomun korunmasıyla gerçekleştirilir. Birinci en iyi amaca uygunluk değeri (% find the best) ve ikinci en iyi amaca uygunluk değeri (% find the second best) bulunmuştur.

Seçim işleminden önce, amaca uygunluk değerinin yeniden ölçeklendirilmesi (% rescaling fitness) gerekir. Ölçeklendirilmiş amaca uygunluk değerlerine göre iki kromozom (aile) seçilir. Seçim işlemi (% Selection) şans çemberi stratejisine dayalı olarak yapılmıştır. “NEXTPOPU” programı içinde, şans çemberine dayalı seçim stratejisinde (7.7), (7.8) ve (7.9) nolu denklemlere dayalı olan olasılık formülleri, ‘total=sum (fitness)’,‘fitness=fitness/sum (fitness)’ ve cum_prob=cumsum (fitness)’ komutlarıyla sırasıyla hesaplanmıştır. Seçilen en iyi iki kromozom, kendi arasında çaprazlama işlemine (% Do crossover) tabi tutulur. İkilik sistemdeki iki kromozomun belli bir noktasından bölünerek birleştirilmesiyle çaprazlama işlemi gerçekleştirilir.

Böylelikle, daha iyi amaca uygunluk değerine sahip iki yeni popülasyon oluşturulmuştur. Her iki kromozomun bölünme noktaları, 'cum_prob' komutuyla bulunmuştur.

İki yeni popülasyonun oluşturulmasından sonra, bu yeni popülasyonun üyelerinin eskilerine benzeme ihtimalini ortadan kaldırmak için mutasyon işlemi (% Mutation) uygulanmıştır. Mutasyon oranına göre, yeni iki popülasyondaki iki kromozomdan bir tanesindeki genler (0 veya 1) düzeltilir. Bu düzeltme işlemi, 'new_popu ([1,2]),:)=popu ([index1 index2],:);' komut satırıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu programların sırasıyla ve eş zamanlı çalıştırılması sonucunda; GA tekniğiyle optimizasyon işleminin 1. iterasyonu tamamlanmıştır. 1. iterasyon sonunda, istenilen amaç değeri (en düşük yüzey pürüzlülük değeri) elde edilememişse, buraya kadar uygulanan tüm işlemler yeniden tekrar edilir. En iyi amaç değeri elde edildiğinde (en düşük yüzey pürüzlülüğü) ise iterasyon sayısının (1500) yeterli olduğu sonucuna varılır ve GA optimizasyon süreci bitirilir. Böylelikle; en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağlayan optimum frezeleme parametreleri, GA optimizasyon tekniğiyle elde edilmiştir [77,82] .

BÖLÜM 8. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, bu tez çalışması boyunca belirli kesme şartları altında gerçekleştirilen deneysel ve istatiksel sonuçlar, analizler ve bunların yorumlanması incelenmiştir. Tez çalışmasına ait temel bulgular, hassas döküm için mum ve plastik enjeksiyon kalıpçılık işlemlerinden elde edilerek tablolar ve grafiklerle incelenmiştir.

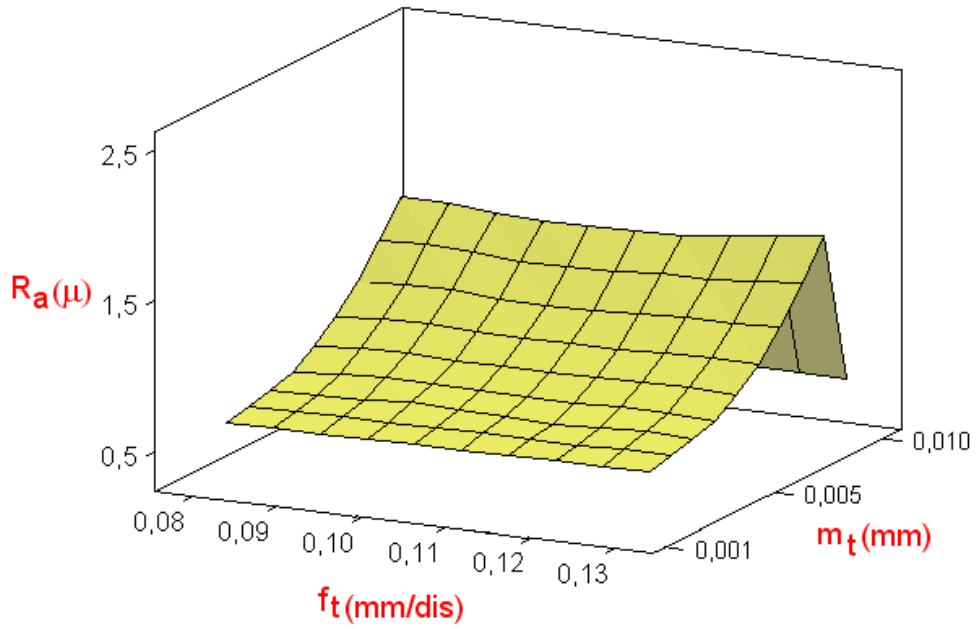
Hassas döküm işleminde kullanılan mum model için Alüminyum 7075-T6 malzemeden imal edilmiş kalıp boşluklarındaki yüzeylerden 243 pürüzlülük (R_a) değeri, 5 frezeleme parametresiyle (f_t, V_c, a_e, a_r, ve m_t) elde edilmiştir. Frezeleme parametrelerinin aralıkları ve elde edilen 243 R_a değeri (I. grup frezeleme deneyleri) EK-A'da verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne karşı değişimi, Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'teki üç boyutlu grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 8.1, f_t ve m_t parametrelerinin R_a'ya karşı gösterdiği değişimi sergilemektedir. Bu grafik incelendiğinde, m_t parametresinin R_a ile belli bir noktaya kadar doğru orantılı olarak arttığı, bu noktadan itibaren hızlı bir şekilde azalmış olduğu ve f_t parametresinin ise R_a üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülebilir. R_a'daki bu hızlı azalma, m_t parametresinin 0.005-0.01 mm aralığında gerçekleşmiştir.

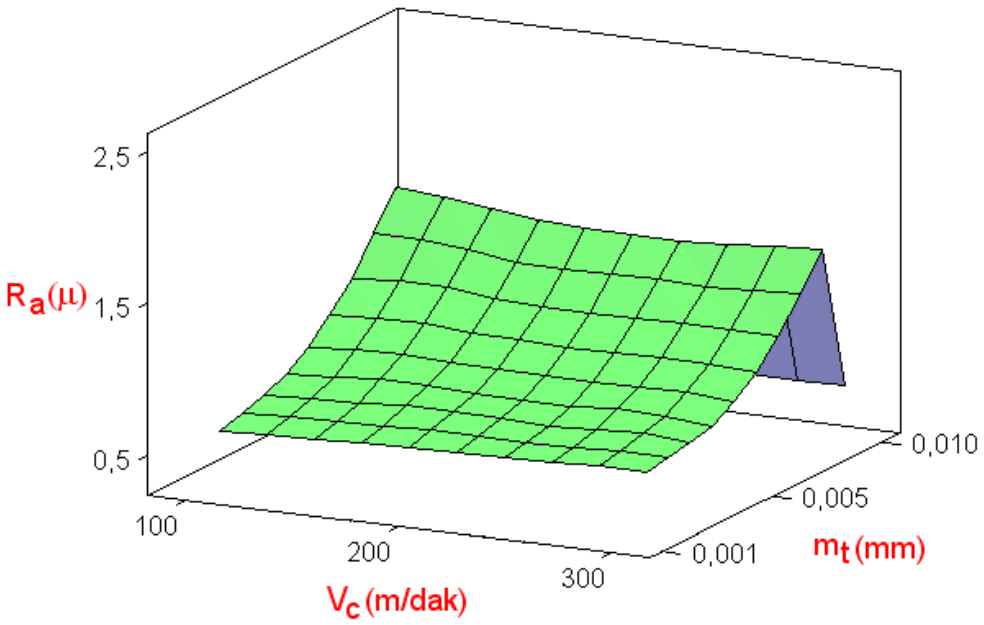
Şekil 8.2, V_c ve m_t parametrelerinin R_a'ya karşı gösterdiği değişimi sergilemektedir. Bu grafik incelendiğinde, m_t parametresinin R_a ile belli bir noktaya kadar doğru orantılı olarak arttığı, bu noktadan itibaren hızlı bir şekilde azalmış olduğu ve V_c parametresinin ise artışın R_a üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülebilir. R_a'daki bu hızlı azalma, m_t parametresinin 0.005-0.01 mm aralığında gerçekleşmiştir.

Şekil 8.3, a_r ve m_t parametrelerinin R_a'ya karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde diğer iki grafikten farklı olarak, a_r parametresindeki artışın, R_a'yı artırdığı görülebilir. Sonuç olarak, bu üç grafikten R_a üzerinde en etkili

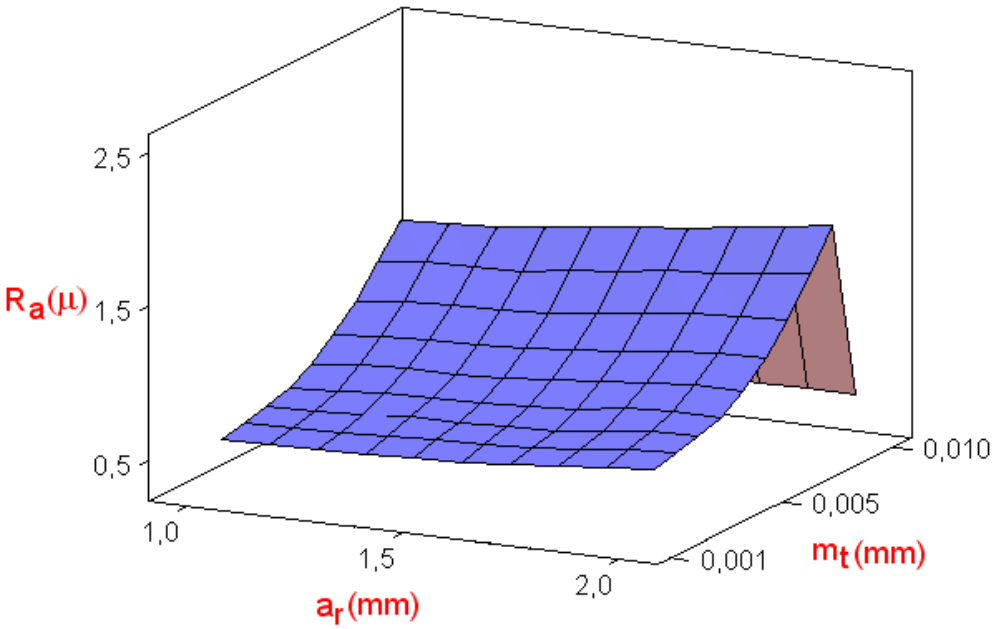
parametrenin m_t olduğu ve a_r, V_c ve f_t parametrelerinin ise R_a üzerinde çok az etkisinin olduğu sonucuna varılabilir. "m_t" parametresi, şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalarda kullanılmamış olup, ilk kez bu tezde kullanılan önemli bir parametredir.



Şekil 8.1:Yüzey pürüzlülüğünün f_t ve m_t parametreleriyle değişimi



Şekil 8.2: Yüzey pürüzlülüğünün V_c ve m_t parametreleriyle değişimi



Şekil 8.3: Yüzey pürüzlülüğünün a_r ve m_t parametreleriyle değişimi

Tablo 8.1: 243 R_a değeri için Varyans Analizi

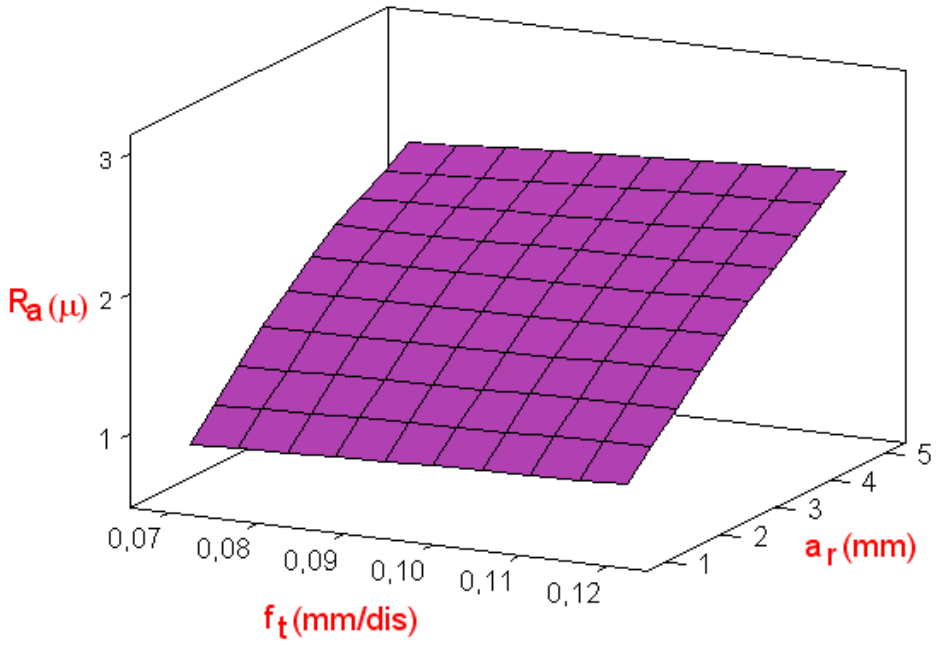
$R_a = 1.52 -13.7\ f_t -0.00162\ V_c - 0.290\ a_e - 0.234\ a_r - 75.1\ m_t + 58.5\ f_t^2 +0.000004 V_c + 0.194\ a_e^2 + 0.101\ a_r^2 + 14340\ m_t^2 + 0.00238\ f_t*V_c + 1.71\ f_t*a_e + 0.111\ f_t*a_r + 183\ f_t*m_t +0.000264\ V_c*a_e +0.000150\ V_c*a_r -0.0809\ V_c*m_t + 22.4\ m_t*a_r +16.3\ m_t*a_e$				
Tahmin	**Katsayılar**	**Katsayıların Hata Toplamı**	**T değeri**	**P değeri**
Sabit	1.5233	0.4436	3.43	0.001
f_t	-13.702	6.318	-2.17	0.031
V_c	-0.001623	0.001014	-1.60	0.111
a_e	-0.2902	0.5311	-0.55	0.585
a_r	-0.2338	0.2427	-0.96	0.336
m_t	-75.10	19.33	-3.89	0.000
f_t^2	58.53	28.04	2.09	0.038
V_c^2	0.00000367	0.00000175	2.09	0.037
a_e^2	0.1943	0.4377	0.44	0.657
a_r^2	0.10124	0.07002	1.45	0.150
m_t^2	14340.1	867.5	16.53	0.000
f_t*V_c	0.002381	0.004950	0.48	0.631
f_t*a_e	1.706	2.475	0.69	0.491
f_t*a_r	0.1111	0.9900	0.11	0.911
f_t*m_t	183.0	110.0	1.66	0.098
V_c*a_e	0.0002639	0.0006188	0.43	0.670
V_c*a_r	0.0001500	0.0002475	0.61	0.545
V_c*m_t	-0.08095	0.02750	-2.94	0.004
m_t*a_r	22.392	5.483	4.08	0.000
m_t*a_e	16.29	13.71	1.19	0.236
S = 0.1286		**R^2 = % 94.3**	**R^2 (adj) = % 93.8**	
PRESS = 4.20093		***R^2 (tahmin) = % 93.54***		

Alüminyum 7075-T6 malzemenin yüzeylerini işlemek için kullanılan 5 frezeleme parametresinin (f_t, V_c, a_e, a_r, ve m_t), yüzey pürüzlülüğü üzerindeki sayısal etkisini kontrol etmek ve çoklu regresyon denklemini oluşturmak için Varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi, 243 yüzey pürüzlülük değerleriyle oluşturulacak matematiksel modellerin (ANN ve RS) tahmin yeterliliğini ölçmek için de bu tezde kullanılmıştır. Tablo 8.1 incelendiğinde, 243 R_a değeriyle oluşturulan (α=0.05 veya % 95 güvenirlik seviyesinde) çoklu regresyon denkleminin % 93.54'lük regresyon yüzdesine veya R^2(tahmin)=0.9354 regresyon katsayısına sahip olduğu görülebilir. R_a üzerinde en etkili parametrenin "m_t" olduğu ve en etkili eşlenik parametrelerinin ise (m_t^2), (V_c*m_t), (m_t*a_r) olduğu Tablo 8.1'deki "P" değerlerinden anlaşılabilir. Tablo 8.1'deki, "P" değerlerinin α=0.05'e eşit ya da küçük olması, parametrelerin sonuç (R_a) üzerinde etkisinin olduğunu gösterir. Ayrıca, Tablo 8.1'de yer alan "S=0.1286" değeri, çoklu regresyon denkleminin standart sapmasını ve "PRESS=4.20093" değeri ise tahmin edilmiş kareler toplamının hatasını gösterir.

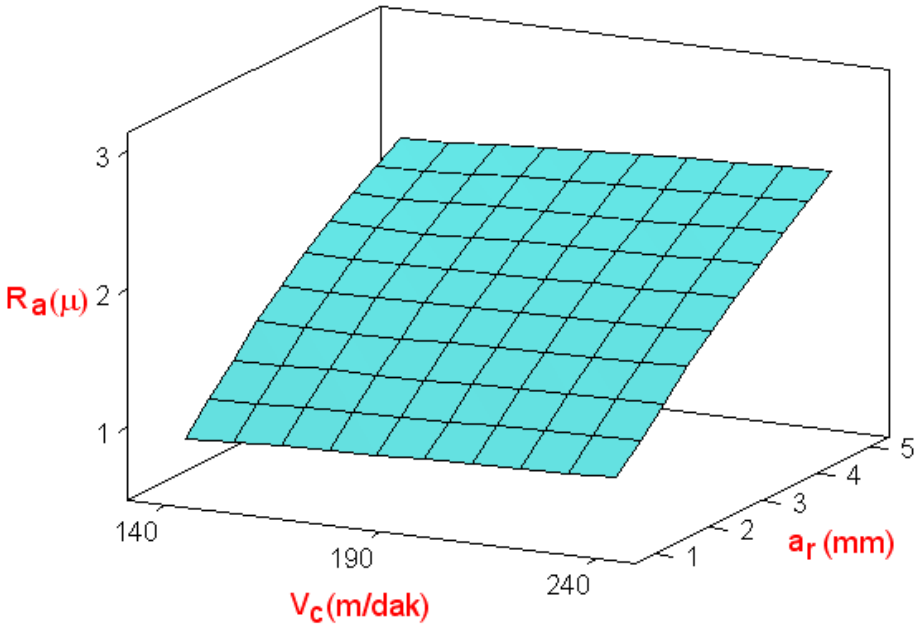
Plastik enjeksiyon kalıpçılık işleminde kullanılan AISI 1040 çelik malzemeden imal edilmiş kalıp boşluklarındaki yüzeylerden 81 pürüzlülük (R_a) değeri 4 frezeleme parametresiyle (f_t, V_c, a_e, a_r) kullanılarak elde edilmiştir. Frezeleme parametrelerinin aralıkları ve elde edilen 81 R_a değeri (II. grup frezeleme deneyleri) EK-B'de verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne karşı gösterdiği değişimi, Şekil 8.4 ve Şekil 8.5'teki üç boyutlu grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 8.4, f_t ve a_r parametrelerinin R_a'ya karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, a_r parametresindeki artış R_a ile doğru orantılı olarak artarken, f_t parametresindeki artışın R_a üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülebilir.

Şekil 8.5, V_c ve a_r parametrelerinin R_a'ya karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik, Şekil 8.4'teki grafiğe benzer bir eğilim sergilemektedir. a_r parametresindeki artış R_a ile doğru orantılı artarken, f_t parametresindeki artışın R_a üzerinde çok az bir etkisinin olduğu görülebilir. Her iki grafikten çıkarılabilecek en önemli sonuç; a_r parametresi f_t ve V_c parametrelerine kıyasla, R_a üzerinde daha fazla etkilidir.



Şekil 8.4: Yüzey pürüzlülüğünün f_t ve a_r parametreleriyle değişimi



Şekil 8.5: Yüzey pürüzlülüğünün V_c ve a_r parametreleriyle değişimi

Tablo 8.2: 81 R_a değeri için Varyans Analizi

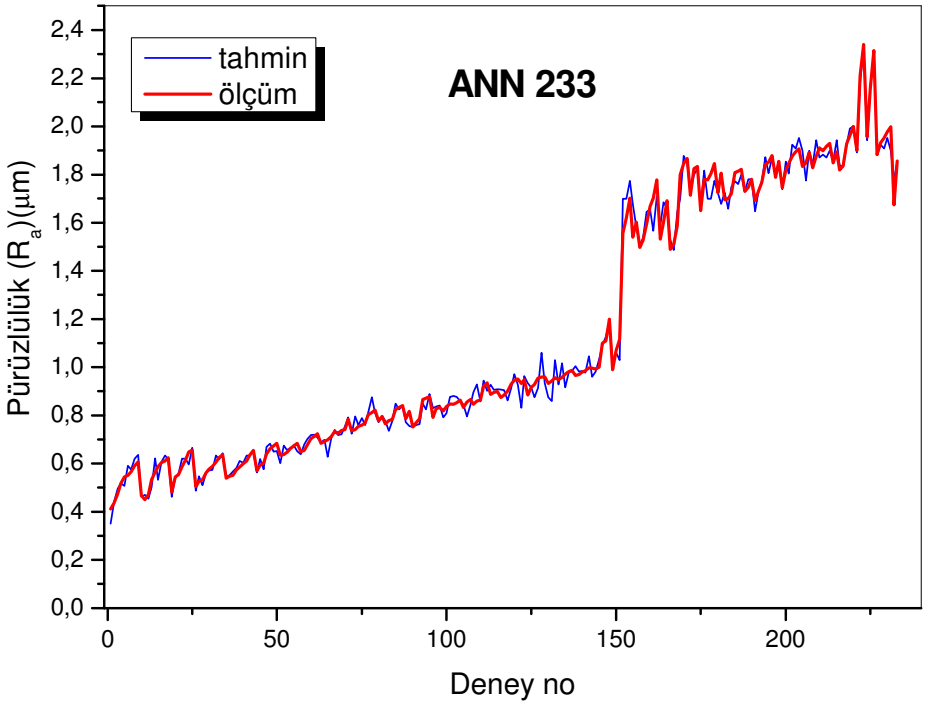
$R_a = -0.0545 + 2.17\, f_t + 0.001\, V_c + 0.245\, a_e + 0.353\, a_r$				
Tahmin	**Katsayılar**	**Katsayıların Hata Toplamı**	**T değeri**	**P değeri**
Sabit	-0.05454	0.08368	-0.65	0.517
f_t	2.1731	0.5864	3.71	0.000
V_c	0.0010014	0.0002932	3.42	0.001
a_e	0.24510	0.01923	12.74	0.000
a_r	0.353368	0.007330	48.21	0.000
S = 0.1087		**R^2 = % 96.69**		**R^2 (adj) = % 96.9**
PRESS = 1.02508		***R^2 (tahmin)= % 97.1***		

AISI 1040 malzemenin yüzeylerini işlemek için kullanılan 4 frezeleme parametresinin (f_t, V_c, a_e, ve a_r), yüzey pürüzlülüğü üzerindeki sayısal etkisini kontrol etmek ve çoklu regresyon denklemini oluşturmak için Varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi, 81 yüzey pürüzlülük değerleriyle oluşturulacak matematiksel modellerin (ANN ve RS) tahmin yeterliliğini ölçmek için de bu tezde kullanılmıştır. Tablo 8.2 incelendiğinde, 81 R_a değeriyle oluşturulan (α=0.05 veya % 95 güvenirlik seviyesinde) çoklu regresyon denkleminin % 97.10'luk regresyon yüzdesine veya R^2(tahmin)=0.9710 regresyon katsayısına sahip olduğu görülebilir. R_a üzerinde f_t, a_r, a_r parametrelerinin daha fazla etkisinin olduğu ve V_c parametresinin ise diğer parametrelere göre daha az etkisinin olduğu, Tablo 8.2'deki "P" değerlerinden anlaşılabilir. Ayrıca, Tablo 8.2'de yer alan "S=0.1087" değeri, çoklu regresyon denkleminin standart sapmasını ve "PRESS=1.02508" değeri ise tahmin edilmiş kareler toplamının hatasını gösterir.

Tablo 8.1 ve Tablo 8.2 birbiriyle kıyaslandığında, 81 R_a değeriyle oluşturulan regresyon denkleminin regresyon katsayısının (0.9710), 243 R_a değeriyle oluşturulan regresyon denkleminin regresyon katsayısından (0.9354) daha yüksek olduğu görülebilir. Bu sonuç, 81 R_a değeriyle oluşturulacak matematiksel modellerin (ANN ve RS), 243 R_a değeriyle oluşturulacak matematiksel modellere göre daha iyi bir tahmin yeteneği sergileyeceğini gösterir.

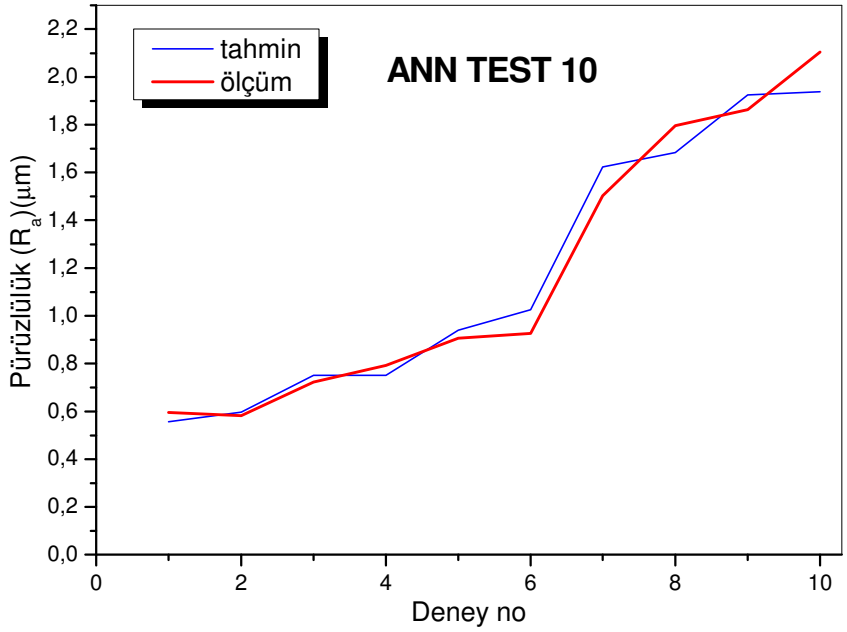
I. grup frezeleme deneylerinden elde edilen 243 R_a değeri, ANN ve RSM yöntemleriyle tahmini pürüzlülük modelleri oluşturmak için MATLAB programında analiz edilmiştir. ANN ve RSM yöntemlerinde, 243 R_a değerinin 233'ü tahmini pürüzlülük modelinin oluşturulmasında, geriye kalan 10 R_a değeri ise modelin test edilmesinde kullanılmıştır.

Şekil 8.6, ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değerler ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle çok iyi korelasyon sağladığı görülmektedir. Bu grafikten; deney sayısı arttıkça R_a'nın iniş-çıkışlara rağmen sürekli bir artış eğilimi içinde olduğu gözlenebilir.



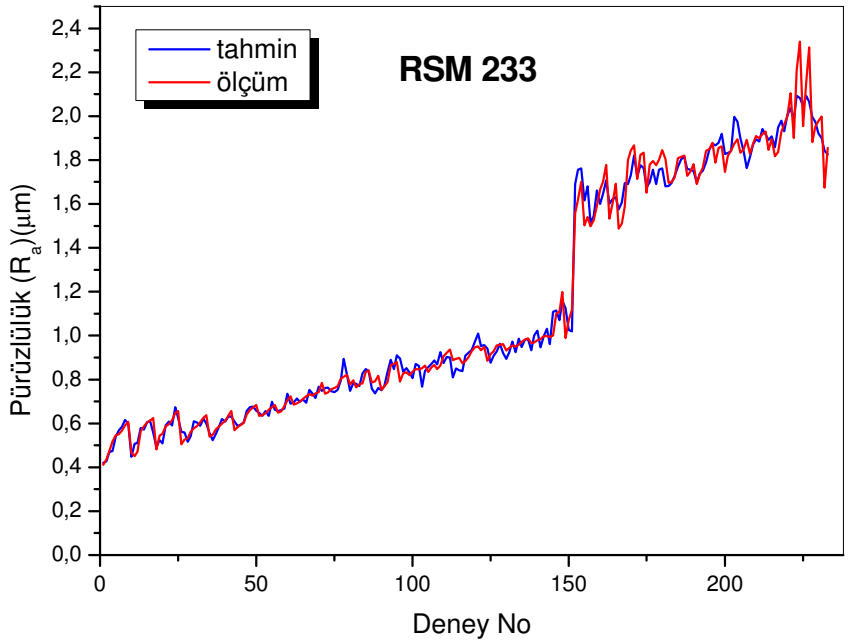
Şekil 8.6: 243 R_a değeri için ANN modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.7, ANN modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen değerlerin birbirine karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değer ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle doğrusal bir ilişki sergilediği görülmektedir.



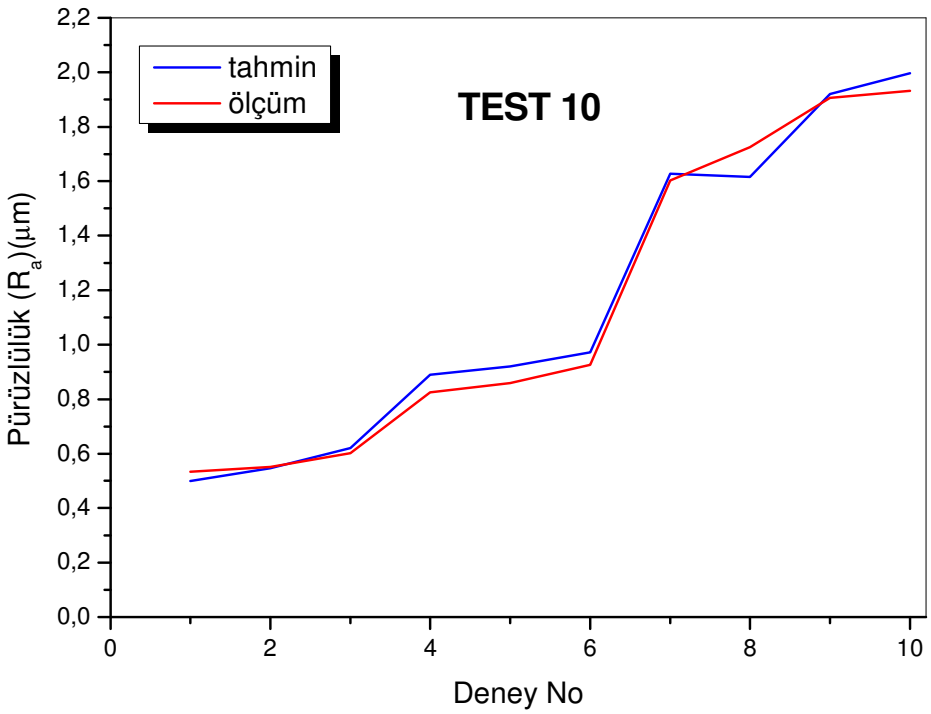
Şekil 8.7: ANN modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi

Şekil 8.8, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değerler ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle çok iyi korelasyon sağladığı görülmektedir. Bu grafikten; deney sayısı arttıkça R_a'nın iniş-çıkışlara rağmen sürekli bir artış eğilimi içinde olduğu gözlenebilir.



Şekil 8.8: 243 R_a değeri için RS modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.9, RS modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen değerlerin birbirine karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değer ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle doğrusal bir ilişki sergilediği görülmektedir.

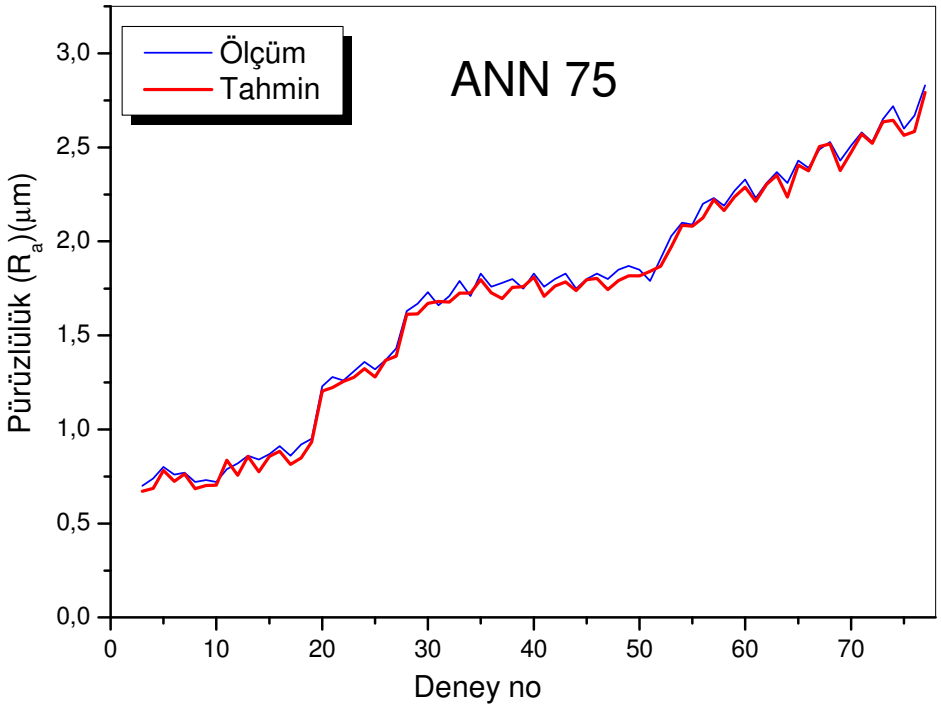


Şekil 8.9: RS modelin 10 R_a değeriyle test edilmesi

I. grup deneyler için ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak tahmin edilen ve deneylerden ölçülen R_a değerleriyle oluşturulmuş Şekil 8.6 ve Şekil 8.8'deki iki grafik kıyaslandığında, yüzey pürüzlülüğü bakımından çok küçük bir farkın olduğu söylenebilir. Şekil 8.6'da ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği R_a değeri en uç noktada 2.330 µm iken, Şekil 8.8'de RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği R_a değeri en uç noktada 2.287 µm'dir.

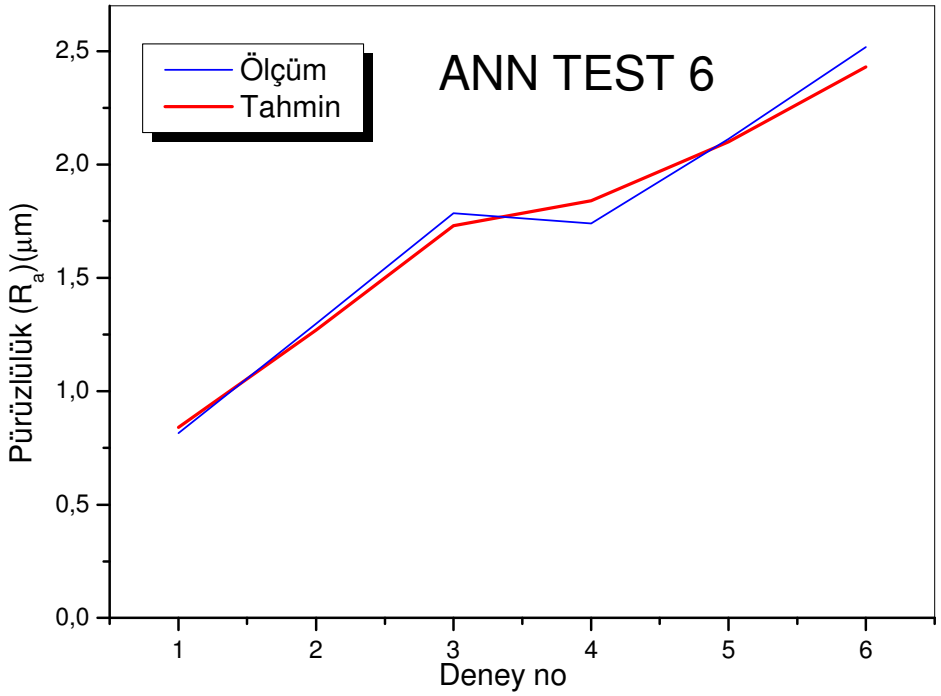
II. grup frezeleme deneylerinden elde edilen 81 R_a değeri, ANN ve RSM yöntemleriyle tahmini pürüzlülük modelleri oluşturmak için MATLAB programında analiz edilmiştir. ANN ve RSM yöntemlerinde, 81 R_a değerinin 75'i tahmini pürüzlülük modelinin oluşturulmasında, geriye kalan 6 R_a değeri ise modelin test edilmesinde kullanılmıştır.

Şekil 8.10, ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değerler ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle çok iyi korelasyon sağladığı görülmektedir. Bu grafikten R_a'nın deney sayısı ile doğru orantılı olarak sürekli arttığı sonucuna varılabilir.



Şekil 8.10: 81 R_a değeri için ANN modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

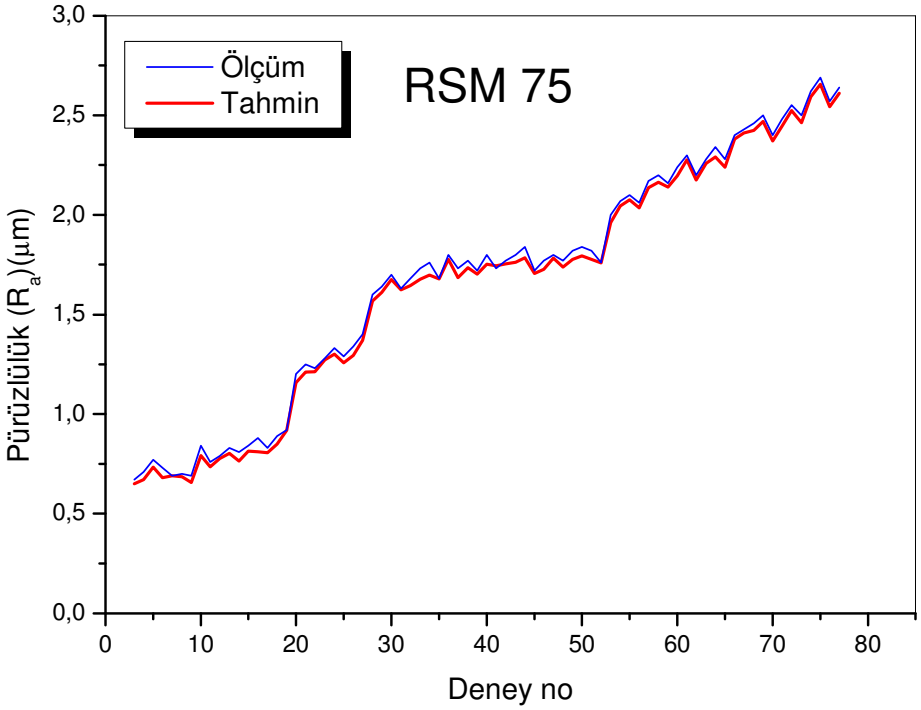
Şekil 8.11, ANN modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen değerlerin birbirine karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değer ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle doğrusal bir ilişki sergilediği görülmektedir.



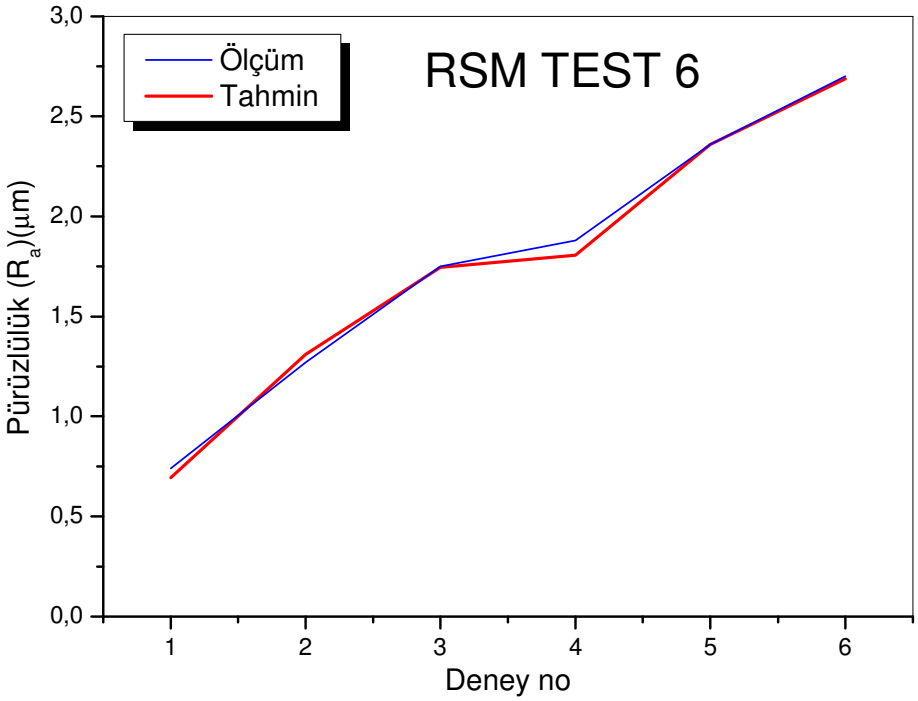
Şekil 8.11: RS modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi

Şekil 8.12, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değerler ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle çok iyi korelasyon sağladığı görülmektedir. Bu grafikten; deney sayısı arttıkça R_a'nın iniş-çıkışlara rağmen sürekli bir artış eğilimi içinde olduğu gözlenebilir.

Şekil 8.13, RS modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi sonucunda tahmin edilen ve ölçülen değerlerin birbirine karşı sergilediği değişimi göstermektedir. Bu grafik incelendiğinde, ölçülen değer ile tahmin edilen değerlerin birbiriyle doğrusal bir ilişki sergilediği görülmektedir.



Şekil 8.12: 81 R_a değeri için RS modelin tahmin ve ölçüm değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 8.13: RS modelin 6 R_a değeriyle test edilmesi

II. grup deneyler için ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak tahmin edilen ve deneylerden ölçülen R_a değerleriyle oluşturulmuş Şekil 8.10 ve Şekil 8.12'deki iki grafik kıyaslandığında, yüzey pürüzlülüğü bakımından çok küçük bir farkın olduğu söylenebilir. Şekil 8.10'da ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği R_a değeri en uç noktada 2.774 µm iken, Şekil 8.12'de RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği R_a değeri en uç noktada 2.784 µm'dir.

ANN yönteminde deneylerden ölçülen 243 ve 81 R_a değeriyle tahmini ANN model oluşturmak için kullanılan yapay sinir ağının parametreleri Tablo 8.3 ve Tablo 8.4'te verilmiştir. Bu tablolardaki model parametrelerinin değerleri, deneme-yanılma yöntemine dayalı olarak yapılan bir dizi MATLAB analizinden elde edilmiştir.

243 R_a değeri için ANN yöntemiyle ANN model oluşturmak için kullanılan işlem parametreleri Tablo 8.3'te verilmiştir Tablo 8.3 incelendiğinde, 243 R_a değeri için analiz süresinin yaklaşık 8 saat sürdüğü ve 3 ara katmandaki toplam proses elemanı sayısının da 30-30-30 olduğu görülebilir. Proses elemanı sayısının fazla olması analiz süresini arttırırken, daha iyi bir yakınsama kriterinin elde edilmesini sağlamıştır.

Tablo 8.3: 243 R_a değeri için ANN model parametreleri

Parametreler	**Değerleri**
Ara katman sayısı	3
Proses eleman sayısı	**30-30-30**
Aktivasyon fonksiyonu	**Hiperbolik tanjant**
Öğrenme katsayısı	0.0001
İterasyon sayısı	$2x10^6$
İterasyon süresi	**8 saat**

81 R_a değeri için ANN yöntemiyle ANN model oluşturmak için kullanılan işlem parametreleri Tablo 8.4'te verilmiştir. Tablo 8.4 incelendiğinde, 81 R_a değeri için toplam proses elemanı sayısının yarıya inmiş ve analiz süresinin 5 saat civarında azalmış olduğu görülebilir. Burada; ara katman, proses elemanı sayısı ve analiz süresinin azalmasının temel nedeni, kullanılan frezeleme parametreleri sayısının 5'ten 4'e ve R_a değerlerinin 243'ten 81'e düşmesidir.

Tablo 8.4: 81 R_a değeri için ANN model parametreleri

Parametreler	**Değerleri**
Ara katman sayısı	2
Proses eleman sayısı	**22-22**
Aktivasyon fonksiyonu	**Logaritmik**
Öğrenme katsayısı	0.0001
İterasyon sayısı	$1.485x10^6$
İterasyon süresi	**3 saat**

RSM yönteminde, 243 ve 81 R_a değeriyle tahmini model oluşturmak için kullanılan RS modellerin denklem mertebeleri ile test hataları Tablo 8.5 ve Tablo 8.6'da verilmiştir. 243 R_a değeri ve 5 frezeleme parametresi kullanılarak oluşturulan "Ra_{243}" RS modellerinin kodlama sistemine göre 1. mertebeden 4. mertebeye kadar ürettiği test hataları Tablo 8.5'te verilmiştir. Tablo 8.5 incelendiğinde, RS modellerin denklem mertebesi arttıkça, üretilen test hatalarının çoğunlukla azaldığı görülebilir. "Ra_{243}" RS modelleri arasında en düşük test hatasını veren [0 0 1 1 1] kodlamasıdır ve bu kodlama en düşük test hatasını (% 7.768) verdiği için tez çalışmasındaki tahmini pürüzlülük modelinin oluşturulması için kullanılmıştır.

Tablo 8.5: 243 R_a değeri için RS modellerin mertebe ve test hataları

Kodlama	**(Lineer) 1.mertebe**	**(Parabolik) 2. mertebe**	**(Kübik) 3. mertebe**	**(Quartik) 4. mertebe**
[0 0 0 0 0]	25.786	13.557	9.032	10.256
[0 0 1 0 0]	26.704	12.610	8.795	9.288
[0 0 0 0 1]	55.101	14.414	8.991	7.864
[0 0 1 1 1]	**56.091**	**15.395**	**9.192**	***7.768***
[0 1 1 0 0]	26.316	13.263	7.0201	11.724

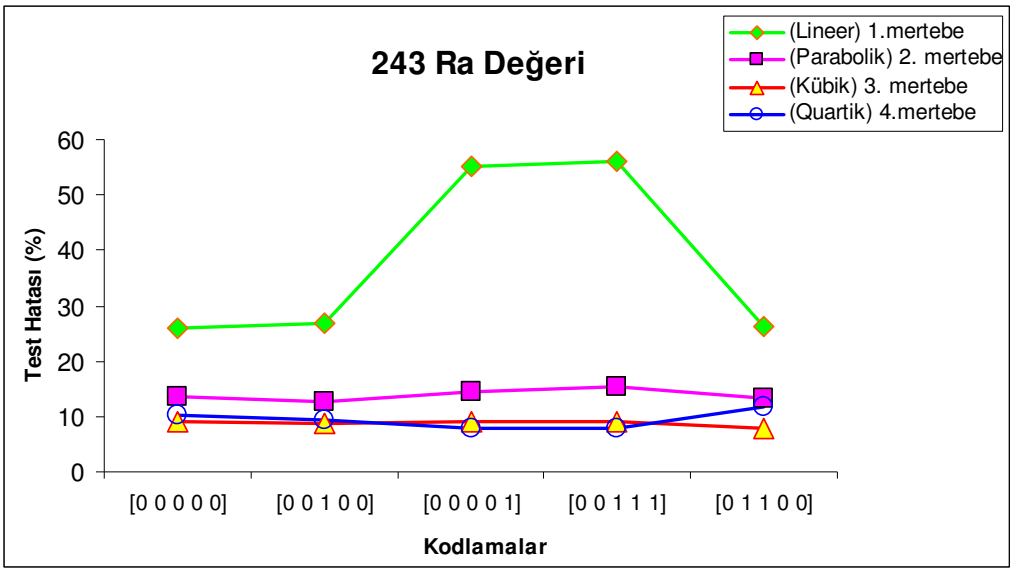
81 R_a değeri ve 4 frezeleme parametresi kullanılarak oluşturulan "R_{a81}" RS modellerinin kodlama sistemine göre 1. mertebeden 4. mertebeye kadar ürettiği test hataları, Tablo 8.6'da verilmiştir. Tablo 8.6 incelendiğinde, RS modellerin denklem mertebesi arttıkça, üretilen test hatalarının çoğunlukla azaldığı görülebilir. "R_{a81}" RS modelleri arasında en düşük test hatasını veren [0 1 0 0] kodlamasıdır ve bu kodlama en düşük test hatasını (% 6.28) verdiği için tez çalışmasındaki tahmini pürüzlülük modelinin oluşturulması için kullanılmıştır.

Tablo 8.6: 81 R_a değeri için RS modellerin mertebe ve test hataları

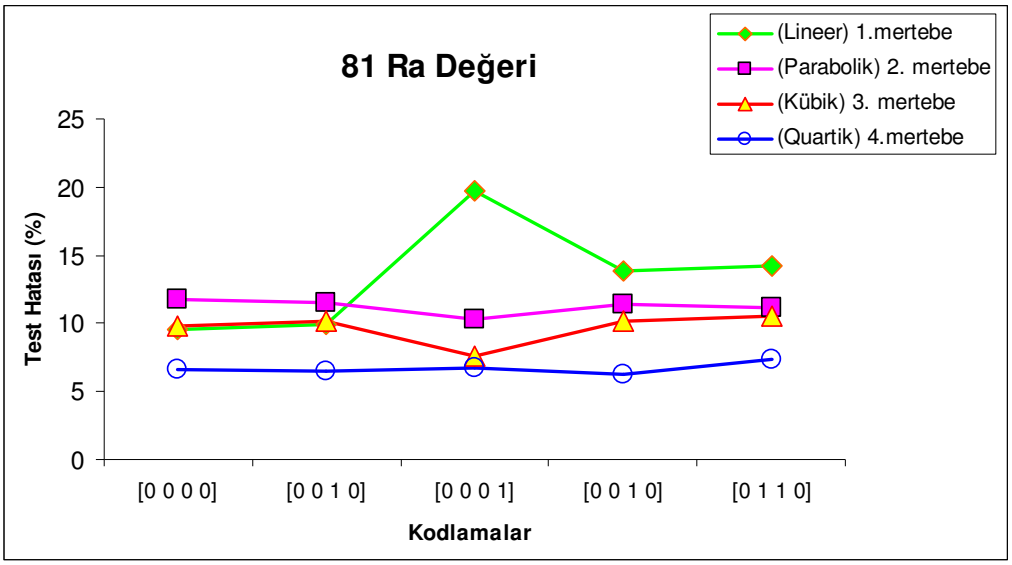
Kodlama	(Lineer) 1.mertebe	(Parabolik) 2. mertebe	(Kübik) 3. mertebe	(Quartik) 4.mertebe
[0 0 0 0]	9.535	11.711	9.829	6.595
[0 1 0 0]	9.916	11.501	10.139	6.454
[0 0 0 1]	19.767	10.296	7.602	6.742
[0 0 1 0]	**13.822**	**11.402**	**10.115**	***6.280***
[0 1 1 0]	14.196	11.210	10.593	7.303

Tablo 8.5 ve Tablo 8.6 incelendiğinde, 243 R_a değeri için oluşturulan RS modellerin denklem mertebesi arttıkça üretilen test hatalarının çoğunlukla azalmasının, 81 R_a değeri için oluşturulan RS modellerin denklem mertebesi arttıkça test hatalarının çoğunlukla azalmasının temel nedeni, kullanılan frezeleme parametrelerinin sayısının 5'ten 4'e ve R_a değerlerinin 243'ten 81'e düşmesidir.

Şekil 8.14 ve Şekil 8.15, RS modellerin (R_{a243} ve R_{a81}) denklem mertebeleri ve kodlama biçimlerine göre üretilen test hatalarının değişimini göstermektedir. Şekil 8.14 incelendiğinde, 243 R_a değeri için kodlama biçimlerine göre en düşük test hatasını 4. mertebe RS modelin verdiği görülebilir. Şekil 8.15 incelendiğinde de, 81 R_a değeri için kodlama biçimlerine göre en düşük test hatasını 4. mertebe RS modelin verdiği görülebilir.



Şekil 8.14: 243 R_a değeri için RS modellerin mertebe hataları



Şekil 8.15: 81 R_a değeri için RS modellerin mertebe hataları

ANN ve RSM yöntemlerinde, 243 R_a değeriyle tahmini pürüzlülük modelleri oluşturmak için elde edilen model oluşturma hataları (eğitim hataları) ve test setleri, Tablo 8.7 ve Tablo 8.8'de verilmiştir. Bu tablolardaki eğitim hataları, pürüzlülük modellerinin oluşturulması sırasında 233 R_a değerinden elde edilmiş ve test hatasıyla karşılaştırılmak için bu tablolara eklenmiştir. Test seti, 5 frezeleme parametresi ve 243 R_a değeri içinden belirli aralıklarda seçilmiş 10 R_a (ölçüm ve tahmin) değerinden oluşmuştur. Test hataları, oluşturulan yüzey pürüzlülük modellerinin doğruluğunu ve performansını kontrol etmek için kullanılmıştır.

Tablo 8.7, 243 R_a değeri için ANN yöntemiyle oluşturulan tahmini pürüzlülük modelinin eğitim hatasını ve test setini göstermektedir. Tablo 8.7 incelendiğinde, ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilir. ANN modelin % 10.91 eğitim ve % 10.6 civarında test hatası üretmesi, oluşturulan yüzey pürüzlülük modelinin çok iyi olmamakla beraber kabul edilebilir bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu gösterir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde [32-34], 243 R_a değeri için oluşturulan ANN modelin ürettiğine benzer eğitim ve test hatalarının olduğu görülebilir. Buna ilave olarak, bu hata miktarları optimizasyon sürecinin uygulanması yönünden engel değildir ve GA ile optimizasyon süreci uygulanabilir.

Tablo 8.7: 243 R_a değeri için ANN modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri

Deney no	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**m_t mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(μm)***		**Eğitim Hatası (%)**	**Test Hatası (%)**
						Ölçüm	**Tahmin**		
23	200	0.105	0.7	1	0.001	0.596	0.556	***10.91***	***10.6***
46	100	0.08	0.7	1.5	0.001	0.583	0.597		
69	200	0.13	0.5	2	0.001	0.723	0.750		
92	100	0.105	0.5	1	0.0055	0.792	0.750		
115	300	0.08	0.3	1.5	0.0055	0.906	0.940		
138	100	0.13	0.3	2	0.0055	0.927	1.025		
161	300	0.105	0.7	1	0.01	1.503	1.623		
184	200	0.08	0.7	1	0.01	1.796	1.683		
207	300	0.13	0.5	1.5	0.01	1.863	1.925		
230	200	0.105	0.5	2	0.01	2.105	1.939		

Tablo 8.8, 243 R_a değeri için RSM yöntemiyle oluşturulan tahmini pürüzlülük modelinin eğitim hatasını ve test setini göstermektedir. Tablo 8.8 incelendiğinde, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilir. RS modelin % 13.64 eğitim ve % 7.768 civarında test hatası üretmesi, oluşturulan yüzey pürüzlülük modelinin iyi bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu gösterir.

Tablo 8.8: 243 R_a değeri için RS modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri

Deney no	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**m_t mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(μm)***		**Eğitim Hatası (%)**	**Test Hatası (%)**
						Ölçüm	**Tahmin**		
13	200	0.08	0.5	1	0.001	0.534	0.499	***13.64***	***7.768***
38	100	0.105	0.5	1.5	0.001	0.552	0.546		
48	300	0.13	0.3	2	0.001	0.602	0.622		
88	300	0.08	0.5	1	0.0055	0.825	0.889		
113	200	0.105	0.3	1.5	0.0055	0.859	0.919		
138	100	0.13	0.3	2	0.0055	0.927	0.972		
163	100	0.08	0.3	1	0.01	1.603	1.628		
188	300	0.105	0.7	1	0.01	1.725	1.617		
213	200	0.13	0.7	1	0.01	1.906	1.920		
238	200	0.08	0.7	2	0.01	1.932	1.996		

243 R_a değeri için ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak oluşturulan tahmini pürüzlülük modelleri birbiriyle kıyaslandığında, ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin eğitim hatasının RSM yöntemiyle oluşturulan RS modele göre daha düşük, test hatasının ise RS modele göre daha yüksek olduğu görülebilir. Burada; RS modelin test hatasının ANN modele göre daha düşük olması, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin performansının daha iyi olduğunu gösterir.

ANN ve RSM yöntemlerinde, 81 R_a değeriyle tahmini pürüzlülük modelleri oluşturmak için elde edilen eğitim hataları ve test setleri, Tablo 8.9 ve Tablo 8.10'da verilmiştir. Bu tablolardaki eğitim hataları, pürüzlülük modellerinin oluşturulması sırasında 75 R_a değerinden elde edilmiş ve test hatasıyla karşılaştırılmak için bu tablolara eklenmiştir. Test seti, 4 frezeleme parametresi ve 81 R_a değeri içinden belirli aralıklarda seçilmiş 6 R_a değerinden (ölçüm ve tahmin) oluşmuştur.

Tablo 8.9, 81 R_a değeri için ANN yöntemiyle tahmini pürüzlülük modeli oluşturma sırasında elde edilen eğitim hatasını ve test setini göstermektedir. Tablo 8.9 incelendiğinde, ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilir. ANN modelin % 7.51 eğitim ve % 8.96 civarında test hatası üretmesi, oluşturulan yüzey pürüzlülük modelinin iyi bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu gösterir.

Tablo 8.9: 81 R_a değeri için ANN modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri

Deney no	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(µm)***		**Eğitim Hatası (%)**	**Test Hatası (%)**
					Ölçüm	**Tahmin**		
9	240	0.12	0.5	1	0.840	0.774	***7.51***	***8.96***
21	240	0.07	1.5	1	1.270	1.360		
33	240	0.095	0.5	3	1.730	1.885		
45	240	0.12	1	3	1.840	1.963		
57	240	0.07	0.5	5	2.10	2.018		
69	240	0.095	1	5	2.430	2.541		

Tablo 8.10, 81 R_a değeri için RSM yöntemiyle tahmini pürüzlülük modeli oluşturma sırasında elde edilen eğitim hatasını ve test setini göstermektedir. Tablo 8.10 incelendiğinde, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin tahmin ettiği ve deneylerden ölçülen R_a değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilir. RS modelin % 4.41 eğitim ve % 6.28 test hatası üretmesi, oluşturulan yüzey pürüzlülük modelinin güçlü bir tahmin yeteneğine sahip olduğunu gösterir.

Tablo 8.10: 81 R_a değeri için RS modelin ürettiği test seti ve hata yüzdeleri

Deney no	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(μm)***		**Eğitim Hatası (%)**	**Test Hatası (%)**
					Ölçüm	**Tahmin**		
11	140	0.07	1	1	0.74	0.693	***4.41***	***6.28***
24	190	0.095	1.5	1	1.27	1.310		
37	240	0.12	0.5	3	1.75	1.744		
50	140	0.095	1.5	3	1.88	1.807		
63	190	0.12	0.5	5	2.36	2.359		
76	240	0.07	1.5	5	2.80	2.688		

81 R_a değeri için ANN ve RSM yöntemleriyle oluşturulan tahmini pürüzlülük modelleri birbiriyle kıyaslandığında, RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelin eğitim ve test hatasının ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modele göre daha düşük olduğu görülebilir. Burada; RS modelin test hatasının ANN modele göre daha düşük olması, RSM yöntemiyle oluşturulan ANN modelin performansının daha iyi olduğunu gösterir.

ANN ve RSM yöntemleri 243 ve 81 R_a değeri için kıyaslandığında, en düşük test hatası 81 R_a değeri için RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelden elde edilirken, en yüksek test hatası 243 R_a değeri için ANN yöntemiyle oluşturulan ANN modelden elde edilmiştir. Diğer taraftan; en düşük eğitim hatası 81 R_a değeri için RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelden elde edilirken, en yüksek eğitim hatası 243 R_a değeri için RSM yöntemiyle oluşturulan RS modelden elde edilmiştir. Sonuç olarak, 243 ve 81 R_a değeri için ANN ve RSM yöntemlerinde oluşturulan yüzey pürüzlülük modellerinin birbirine göre, tahmin başarısı ve performans yönünden bazı avantaj ve dezavantajları olduğu söylenebilir.

ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak, 243 ve 81 R_a değeri için oluşturulan dört tahmini pürüzlülük modelinin (ANN-243, RS-243, ANN-81 ve RS-81) üretmiş olduğu tüm sonuçlar Tablo 8.11'de verilmiştir. Tablo 8.11 incelendiğinde, eğitim setinde en düşük RMSE (Ortalama Karesel Hataların Karekökü) değerinin RS-81 pürüzlülük modelinden, en yüksek RMSE değerinin ANN-243 pürüzlülük modelinden elde edildiği görülebilir. Test setinde ise en düşük RMSE değerinin RS-81 pürüzlülük modelinden, en yüksek RMSE değerinin RS-243 pürüzlülük modelinden elde edildiği görülebilir. Ayrıca, eğitim ve test setlerinde maksimum sapma değeri en düşük RS-243 pürüzlülük modelinden, en yüksek ANN-243 pürüzlülük modelinden elde edilmiştir.

Tablo 8.11: RMSE değerleri, maksimum sapmalar ve eğitim-test hataları

Tahmini Pürüzlülük Modelleri	**Eğitim Seti**		**Test Seti**		**Eğitim hatası (%)**	**Test hatası (%)**
	RMSE değerleri	Maksimum Sapmalar	RMSE değerleri	Maksimum Sapmalar		
ANN-243	0.03990	0.14200	0.11100	0.22060	***10.91***	***10.6***
RS-243	0.05423	0.05250	0.25662	0.10858	***13.64***	***7.76***
ANN-81	0.04642	0.12620	0.10877	0.15509	***7.51***	***8.96***
RS-81	0.01486	0.06007	0.04406	0.11190	***4.41***	***6.28***

ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak, 243 ve 81 R_a değeri için oluşturulan dört pürüzlülük modeli GA optimizasyon tekniğiyle ANN-GA ve RS-GA biçiminde birleştirilerek optimizasyon yapılmıştır. Efektif bir GA tekniği, optimum frezeleme parametreleri ve en düşük yüzey pürüzlülüğün bulunması için kullanılmıştır. Efektif bir GA tekniğiyle optimizasyon süreci uygulanarak, yüzey pürüzlülük probleminin çözülmesinde kullanılan temel GA parametreleri, Tablo 8.12'de verilmiştir.

Tablo 8.12: GA'nın temel parametreleri

Parametreler	**Değerleri**
Popülasyon sayısı	50
Çaprazlama oranı	1.0
Mutasyon oranı	0.1
Bit sayısı	16
İterasyon (generation)	1500

ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak, 243 ve 81 R_a değeri için oluşturulan dört pürüzlülük modeli (ANN-243, RS-243, ANN-81 ve RS-81) GA tekniğiyle birleştirilerek MATLAB'ta optimizasyon analizi yapılmıştır. Çok sayıda optimizasyon analizi sonucunda, en düşük pürüzlülüğü veren optimum frezeleme parametreleri elde edilmiştir.

243 R_a değeri için ANN ve RSM yöntemlerine oluşturulan tahmini pürüzlülük modellerinin GA tekniğiyle optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler, Tablo 8.13'te verilmiştir. Tablo 8.13 incelendiğinde, başlangıç frezeleme şartlarına kıyasla ANN-GA modeli yüzey pürüzlülüğünü 0.412 μm'den 0.3485'e düşürerek % 15.5 civarında bir geliştirme sağlarken, RS-GA modeli ise yüzey pürüzlülüğünü 0.412 μm'den 0.3211'ye düşürerek % 22.1 civarında bir geliştirme sağlamıştır.

Tablo 8.13: 243 R_a değeri için optimum parametreler ve en düşük pürüzlülük değerleri

Optimizasyon Modelleri	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**m_t mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(μm)***	**Geliştirme *(%)***
Başlangıç Kesme Şartı	100	0.08	0.30	1	0.001	**0.4120**	**-**
ANN-GA	130.74	0.095	0.35	1.22	0.001	**0.3485**	***15.5***
RS-GA	137.5	0.1035	0.30	1	0.008	**0.3211**	***22.1***

81 R_a değeri için ANN ve RSM yöntemlerine oluşturulan tahmini pürüzlülük modellerinin GA tekniğiyle optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler Tablo 8.14'te verilmiştir. Tablo 8.14 incelendiğinde, başlangıç frezeleme şartlarına kıyasla ANN-GA modeli yüzey pürüzlülüğünü 0.670 μm'den 0.5613'e düşürerek % 16.3 civarında bir geliştirme sağlarken, RS-GA modeli ise yüzey pürüzlülüğünü 0.670 μm'den 0.3575'e düşürerek % 47 civarında bir geliştirme sağlamıştır. Burada; RS-GA modeli, dört tahmini pürüzlülük modeli arasında başlangıç frezeleme şartlarına kıyasla en fazla geliştirmeyi sağlayan modeldir.

Tablo 8.14: 81 R_a değeri için optimum parametreler ve en düşük pürüzlülük değerleri

Optimizasyon Modelleri	**V_c m/dak**	**f_t mm/diş**	**a_e mm**	**a_r mm**	**Pürüzlülük Değerleri *(μm)***	**Geliştirme (%)**
Başlangıç Kesme Şartı	140	0.07	0.50	1	0.670	**-**
ANN-GA	189.23	0.1093	0.5	1.1407	0.5613	***16.3***
RS-GA	224.65	0.120	0.8320	1.7655	0.3575	***47***

Tablo 8.15, GA tekniğiyle optimizasyon sonucunda elde edilen en düşük pürüzlülük değerlerini ve bu değerlerin doğruluğunu kontrol etmek için yapılan ilave deneylerin ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Tablo 8.15 incelendiğinde, doğrulama deneylerinden ölçülen ortalama değerler ile GA tekniğinin tahmin ettiği değerler arasındaki mutlak hataların en fazla % 8.5 civarında olduğu görülebilir. Buna ilave olarak, en düşük doğrulama hatasının RS-GA-81 modeli ile elde edildiği görülebilir.

Tablo 8.15: GA'dan elde edilen optimizasyon sonuçlarının doğruluğunun kontrol edilmesi

Optimizasyon Modelleri	**Pürüzlülük değerleri *(μm)***					
	(I.)	**(II.)**	**(III.)**	**Ortalama**	**GA**	**Doğrulama Hataları (%)**
ANN-GA-243	0.390	0.381	0.363	0.378	**0.3485**	***8.50***
RS-GA-243	0.350	0.330	0.360	0.346	**0.3211**	***7.75***
ANN-GA-81	0.592	0.587	0.610	0.596	**0.5613**	***6.18***
RS-GA-81	0.356	0.399	0.368	0.3745	**0.3575**	***4.76***

Burada, ANN yöntemiyle oluşturulan pürüzlülük modellerinin başlangıç kesme şartına göre daha az geliştirmeler sağlaması, ANN modellerinin daha düşük performanslı ya da kötü olduğu anlamına gelmemelidir. Aksine, ANN modellerinin RS modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği literatürdeki çalışmalarda ifade edilmiştir [32-38]. Burada, GA tekniğinin ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak oluşturulmuş pürüzlülük modelleriyle birleştirilmesi sonucunda elde edilen tüm değerler incelendiğinde, bu tezde kullanılan GA optimizasyon tekniğinin endüstride karşılaşılan diğer metal kesme problemlerinin çözülmesinde de güvenilir bir biçimde kolaylıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu bölümde elde edilen tüm sayısal ve istatistiki sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Varyans analizi sonucunda, 81 pürüzlülük değeri için çoklu regresyon denkleminden % 97.10'luk regresyon doğruluğu elde edilirken, 243 pürüzlülük değeri için çoklu regresyon denkleminden % 94.53'lük regresyon doğruluğu elde edilmiştir.

- ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak oluşturulan ANN ve RS modeller, en düşük % 4.41 ile en yüksek % 13.64 arasında eğitim hataları üretirken; en düşük % 6.28 ile en yüksek % 10.6 arasında değişen test hataları üretmişlerdir.

- 243 ve 81 pürüzlülük değeri için ANN ve RSM yöntemlerine dayalı olarak oluşturulmuş pürüzlülük modellerinin GA tekniğiyle optimizasyonu sonucunda pürüzlülüğe bağlı yüzey kalitesinde % 15.5 ile % 47 arasında geliştirmeler (katkılar) sağlanmıştır.

- GA tekniğiyle optimizasyon sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için ilave doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden ölçülen ortalama pürüzlülük değerlerine göre, % 4.76 ile % 8.5 arasında doğrulama hataları hesaplanmıştır.

- Pürüzlülüğü bağlı yüzey kalitesinde en düşük geliştirme, ANN-GA-243 optimizasyon modeliyle % 15.5 olarak elde edilmiştir. Bu geliştirme değeri çok yüksek değildir, fakat kabul edilebilir düzeydedir.

- RS-GA-81 optimizasyon modeli, pürüzlülüğüne bağlı yüzey kalitesinde en fazla geliştirmeyi sağlarken; en düşük doğruluk hatası yine bu modelden elde edilmiştir.

- AISI P20+Ni (DIN 1.2738-IMPAKS) malzeme yerine, AISI 1040 çelik malzeme kullanılarak CD-ROM kapağının plastik kalıp imal edilmiştir. Optimum frezeleme parametreleri sayesinde AISI 1040 malzemenin kavite yüzeylerinde, AISI P20+Ni malzemeye yakın yüzey kalitesi elde edilmiştir. Böylelikle, DIN 1.2738 malzemenin kalıp maliyetinden yaklaşık % 300 daha fazla kazanç sağlanmıştır.

BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve bu sonuçlara dayalı olarak hem tez konusuyla hem de tez konusu dışındaki alanlarda gelecekte yapılabilecek çalışmalara ilişkin öneriler bu bölümde yer almıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Endüstride yaygın olarak kullanılan mum (hassas döküm işlemi için) ve plastik enjeksiyon kalıpçılık işlemleri için gerekli olan kalıpların yüzey kalitesi, CNC frezeleme parametreleriyle (f_t, V_c, a_e, a_r, ve m_t) kontrol edilmiştir.

- Literatürdeki çalışmalarda metal kesme problemlerinden olan yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde yer almayan ve ilk kez bu tezde yer alan "işleme toleransı-m_t" frezeleme parametresi kullanılmıştır. Ayrıca, "m_t" frezeleme parametresinin yüzey kalitesinin pürüzlülükle belirlenmesinde çok kritik bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

- Hassas döküm işlemi için mum modelin kalıp imalinde kullanılan Alüminyum 7075-T6 malzemeden, plastik enjeksiyon işlemi için kullanılan AISI 1040 çelik malzemeye göre daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

- Ölçülen pürüzlülük değerlerinin, sayısal etkisini kontrol etmek, oluşturulacak matematiksel modellerin (ANN ve RS) tahmin yeterliliğini ölçmek ve çoklu regresyon denklemini oluşturmak için Varyans Analizi yapılmıştır.

- Regresyon sonuçlarına dayalı olarak, ölçülen 243 ve 81 pürüzlülük değerleriyle ANN ve RSM yöntemlerinde tahmini pürüzlülük modelleri (ANN ve RS) oluşturulmuştur.

- RSM yöntemine dayalı ve literatürdeki modellerden daha üstün 10. mertebe bir polinom fonksiyonunu çözebilen RS modeller, pürüzlülük tahmini için oluşturulmuştur. Bu tezde, 4. mertebe polinom tipi bir RS model yüzey pürüzlülük tahmini için kullanılmıştır.

- 4. mertebe polinom tipi RS modeller (R_{a243} ve R_{a81}) yardımıyla tahmini yüzey pürüzlülük formülleri elde edilmiştir.

- Literatürdeki optimizasyon yöntemlerinden daha iyi ve işlem ara-yüzü daha basit olan efektif bir GA optimizasyon tekniği en düşük pürüzlülüğü bulmak için kullanılmıştır.

- En düşük yüzey pürüzlülüğü, optimum frezeleme parametreleriyle MATLAB'ta yapılan GA optimizasyon analizleriyle elde edilmiştir.

- Pürüzlülüğe bağlı yüzey kalitesinde en fazla geliştirme, RS-GA-81 optimizasyon modeliyle elde edilirken; en düşük doğrulama hatası yine bu modelle elde edilmiştir.

- ANN-GA optimizasyon modellerinden elde edilen geliştirmenin daha az olmasının en temel sebebi, girdiler (parametreler) ile çıktı (pürüzlülük) arasındaki matematiksel ilişkinin doğrusal olmaması (non-lineer) dır.

- Kalıp imal süreçlerinin % 20'sini kapsayan ve en son basamak olan ince yüzey temizleme işlemleri, yüzey pürüzlülük modelleriyle birleştirilmiş GA optimizasyon tekniğiyle en aza indirilebilir.

- Toplam kalıp imal maliyetinin % 15'ini kapsayan imalat zamanı ve işçilik, bu tezde kullanılan GA optimizasyon tekniğiyle elde edilen optimum frezeleme parametreleri sayesinde en alt seviyeye çekilebilir.

Bu tez konusu dışındaki alanlarda gelecekte yapılabilecek akademik ve endüstriyel çalışmalara ilişkin öneriler aşağıda verilmiştir.

- Otomobil sanayisindeki parçaların imalatında kullanılan dövme ve döküm kalıplarının yüzey kalitesi, tez çalışmasında elde edilen optimum frezeleme parametreleriyle kolaylıkla geliştirilebilir.

- Bu tezde elde edilen metal kesme verileri, kalıp imal endüstrisindeki kesici takımların katalog değerleri olarak verilebilir ve akademik çalışmalar için başlangıç kesme değerleri olarak kullanılabilir.

- Çok sayıda frezeleme deneyi, kısa zaman süresinde ve planlı olarak ANN ve RSM yöntemleriyle yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesinde kullanıldığı gibi diğer metal kesme problemlerinin tahmin edilmesinde de kullanılabilir.

- Oluşturulan ANN ve RS modeller, yüzey pürüzlülüğü dışında; aşınma, kesme kuvvetleri, ölçüsel doğruluk, kaplama ve imalat zamanının tespit edilmesinde de efektif ve güvenilir olarak kullanılabilir.

- Hareketli ve birbiriyle eş zamanlı çalışan makine elemanlarının sürtünen yüzeyleri için yüzey pürüzlülük standartları oluşturulabilir.

- Bu tezde, GA optimizasyon yöntemiyle elde edilen pürüzlülüğü bağlı yüzey kalitesindeki en düşük geliştirme değerinden daha fazla veya daha iyi geliştirme değerleri farklı optimizasyon yöntemleriyle de elde edilebilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması boyunca endüstride ve akademik çalışmalarda karşılaşılan metal kesme problemlerinin, zaman, maliyet, güvenirlik, verimlilik, kalite ve sürdürülebilirlik açısından kolaylık sağlayan tahmine dayalı bir optimizasyon yöntemiyle çözülmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Zeren, M., "İleri Kesici Takım Malzemeleri", ***Kocaeli Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü,*** II. Basım, İzmit, (2006).

[2] Boothroyd, G., and Knight, W.A., "Fundamentals of machining and Machine Tools", Second Edition, ***Marcel Dekker Inc.***, New York, (1989).

[3] Coromant, S., "Die and Mould Making with Sandvik Coromant", ***Tool and Method***, First Edition, Sweden, (2002).

[4] Ataşimşek, S., "Plastik ve Metal Kalıpçılık Teknikleri", ***Birsen Yayınevi***, İstanbul, (2002).

[5] Yelbey, İ., Yelbey, B., "Kalıp Konstrüksiyonu ve Kalıp Yapımı", Bursa, (2002).

[6] Beaumont, J.P., Nagel, R., Sherman., R., "Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation", First Edition, ***Hanser Publishers***, Munich, 17-21, (2002).

[7] Hatch, J.E., "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", First Edition, ***American Society for Metals***, Ohio, (1999).

[8] Balkarisna, R., Yung, C.S., "Analysis on High-Speed Face Milling of 7075-T6 Aluminum Using Carbide and Diamond Cutters", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 41, 1763-781, (2001).

[9] Alberti, M., Ciurana, J., Rodriguez, C.A., "Experimental Analysis of Dimensional Error vs. Cycle Time in High-Speed Milling of Aluminium Alloy", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 47, 236-246, (2007).

[10] Toh, C.K., "Design, Evaluation, and Optimisation of Cutter Path Strategies when High Speed Machining Hardened Mould and Die Materials", ***Materials & Design***, 26, 517-533, (2005).

[11] Shützer, K., Helleno, A.H., Pereira, S.C., "The Influence of the Manufacturing Strategy on the Production of Molds and Dies", ***Journal of Materials Processing Technology***, 179, 172-177, (2006).

[12] Lee, H.S., Park, M.S., Kim, M.T., Chu, C.N., "Systematic Finishing of Dies and Moulds", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 46, 1027-1034, (2006).

[13] Urbanski, J.P., Koshy, P., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., "High Speed Machining of Moulds and Dies for Net Shape Manufacture", ***Materials & Design***, 21, 395-402, (2000).

[14] Viera, J.M., Machado, A.R., Ezugwu, E.O., "Performance of Cutting Fluids during Face Milling of Steels", ***Journal of Materials Processing Technology***, 116, 244-251, (2001).

[15] Toh, C.K., "Comparison of Chip Surface Temperature between Up and Down Milling Orientations in High Speed Rough Milling of Hardened Steel", ***Journal of Materials Processing Technology***, 167, 110-118, (2005).

[16] Rech, J., Calvez, C.L., Dessoly, M., "A New Approach for the Characterization of Machinability-Application to Steels for Plastic Injection Molds", ***Journal of Materials Processing Technology***, 167, 110-118, (2005).

[17] Krajnik, P., and Kopac, J., "Modern Machining of Die and Mold Tools", ***Journal of Materials Processing Technology***, 157-158, 543-552, (2004).

[18] Kim, Y.H., and Ko, S.L., "Development of Design and Manufacturing Technology for End Mills in Machining Hardened Steel", ***Journal of Materials Processing Technology***, 130-131, 653-661, (2002).

[19] Kuzman, K., and Nardin, B., "Determination of Manufacturing Technologies in Mould Manufacturing", ***Journal of Materials Processing Technology***, 157-158, 573-577, (2004).

[20] Bouaziz, Z., Younes, J.B., Zghal, A., "Methodology of Machining Costs Evaluation for Die and Mould Manufacturing", ***Journal of Materials Processing Technology***, 152, 237-245, (2004).

[21] Sander, M., "A Pratical Guide to the Assesment of Surface Texture", First Edition, Gottingeti, Germany, (1991).

[22] Dagnal, H., "Exploring Surface Texture", Second Edition, ***Rank Taylor Habson Limited***, England, (1986).

[23] Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A, Elewa, I.M., Soliman, H.H., "Roughness Parameters", ***Journal of Materials Processing Technology***, 123, 133-145, (2002).

[24] Bhushan, B., "Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques", The Ohio State University, ***CRC Press LCL***, (2001).

[25] Ryu, S.H., Choi, D.K., Chu, N.C., "Roughness and Texture Generation End Milled Surfaces", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 46, 404-412, (2006).

[26] Baker, A.J., and Giardini, W.J, "Developments in Australia's Surface Roughness Measurement System", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 41, 2087-2093, (2001).

[27] Brinkman, S., Bodschwinna, H., Lemke, H.W., "Accessing Roughness in Three-Dimensions Using Gaussian Regression Filtering", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 41, 2153-2161, (2001).

[28] Kopac, J., and Bahor, M., "Interaction of the Workpiece Material's Technological Past and Machining Parameters on the Desired Quality of the Product Surface Roughness", ***Journal of Materials Processing Technology***, 109, 105-111, (2001).

[29] Korkut, I., and Donertas, M.A., "The Influence of Feedrate and Cutting Speed on the Cutting Forces, Surface Roughness and Tool-chip Contact Length during Face Milling", ***Materials & Design***, 28, 308-312, (2007).

[30] Choudhury, S.K., and Bajpai, J.B., "Investigation in Orthogonal Turn-Milling towards Better Surface Finish", ***Journal of Materials Processing Technology***, 170, 487-493, (2005).

[31] Lacalle, L.N.L., Lamikiz, A., Sanchez, J.A., Arana, J.L., "Improving the Surface Finish in High Speed Milling of Stamping Dies", ***Journal of Materials Processing Technology***, 123, 292-302, (2002).

[32] Benardos, P.G., and Vosniakos, G.C., "Predicting Surface Roughness in Machining: a review", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 43, 833-844, (2003).

[33] Sai, K., and Bouzid, W., "Roughness Modelling in Up-Face Milling", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, Article in Press , (2007).

[34] Öztemel, E., "Yapay Sinir Ağları", 1.Basım, ***Papatya Yayıncılık***, İstanbul, (2003).

[35] Efe, M.Ö., Kaynak, O., "Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları", 1.Basım, ***Boğaziçi Üniversitesi Basımevi***, İstanbul, (2000).

[36] Tsai, Y.H., Chen, J.C., Lou, S.J., "An in-Process Surface Recognization System Based on Neural Networks in End Milling Cutting Operations", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 39, 583-605, (1999).

[37] Briceno, J.F., Mounayri, H., Mukhopadhyay, S., "Selecting an Artificial Neural Network for Efficient Modelling and Accurate Simulation of the Milling Process", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 42, 663-674, (2002).

[38] Ezugwu, E.O., Fadare, D.A., Bonney, J., Da Silva, R.B., Sales, W.F., "Modelling the Correlation between Cutting and Process Parameters in High-Speed Machining of Inconel 718 Alloy Using an Artificial Neural Network", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 45, 1375-1385, (2005).

[39] Zhong, Z.W., Khoo, L.P., Han, S.T., "Prediction of Surface Roughness of Turned Surfaces Using Neural Networks", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 28, 688-693, (2006).

[40] Kohli, A., and Dixit, U.S., "A Neural-Network-Based Methodology for the Prediction of Surface Roughness in a Turning Process", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 25, 118-129, (2005).

[41] Wang, M.Y., and Chang, H.Y., "Experimental Study of Surface Roughness in Slot End Milling", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 44, 51-57, (2005).

[42] Sahin, Y., and Motorcu, A.R., "Surface Roughness Model for Machining Mild Steel with Coated Carbide Tool", ***Materials & Design***, 26, 321-326, (2005).

[43] Mansour, A., and Abdalla, H., "Surface Roughness Model for End Milling: a Semi-Free Cutting Carbon Case Hardening Steel (EN32) in Dry Condition", ***Journal of Materials Processing Technology***, 124, 183-191, (2002).

[44] Noordin, M.Y., Venkatesh, V.C., Sharif, S., Elting, S., Abdullah, A., "Application of Response Surface Methodology in Describing the Performance of Coataed Carbide Tools when Turning AISI 1045 Steel", ***Journal of Materials Processing Technology***, 145, 46-58, (2004).

[45] Singh, D., and Rao, P.V., "A Surface Roughness Prediction Model for Hard Turning Process, ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, Article in Press, (2007).

[46] Box, G.E.P., and Drapper, N.R., "Emprical Model-Building and Response Surface", ***John Wiley and Sons Inc.***, New York, USA, (1989).

[47] David, G., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", ***Addison-Wesley Publishing Company Inc.***, (1989).

[48] Brezocnik, M., Kovacic, M., Ficko, M., "Prediction of Surface Roughness with Genetic Programming", ***Journal of Materials Processing Technology***, 157-158, 28-36, (2004).

[49] Çolak, O., "Kurbanoğlu, C., Kayacan, M.C., "Milling Surface Roughness Prediction Using Evolutionary", ***Materials & Design***, 28, 657-666, (2007).

[50] Baskar, N., Asokan, P., Saravanan, R., Prabhaharan, G., "Optimization of Machining Parameters for Milling Operations Using Non-Conventional Methods", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 25, 1078-1088, (2005).

[51] Shunmugam, M.S., Bhaskara Reddy, S.V., Narendran, T.T., "Selection of Optimal Conditions in Multi-Pass Face-Milling Using a Genetic Algorithm", ***Int. Journal of Machine Tools & Manufacture***, 40, 401-414, (2004).

[52] Vivancos, J., Luis, C.J., Costa, L., Ortiz, J.A., "Optimal Machining Parameters Selection in High Speed Milling of Hardened Steels for Injection Moulds", ***Journal of Materials Processing Technology***, 155-156, 1502-1512, (2004).

[53] Park, Y.W., and Rhee, S.,"Process Modelling and Parameter Optimization Using Neural Network and Genetic Algortihms for Aluminum Laser Welding Automation", ***Int. J. Advanced Manufacturing Technology***, 37, 1014-1021, (2008).

[54] Zuperl, U., and Cus, F., "Optimization of Cutting Conditions during Cutting by Using Neural Networks", ***Robotics and Computer Integrated Manufacturing***, 19, 189-199, (2003).

[55] Zuperl, U., Cus, F., Mursec, B., Ploj, T., "A Hybrid Analytical-Neural Network Approach to the Determination of Optimal Cutting Conditions", ***Journal of Materials Processing Technology***, 157-158, 82-90, (2004).

[56] Chiang, K.T., "Modelling and Optimization of Designing Parameters for a Parallel-Plain Fin Heat Sink with Confined Impinging Jet Using the Response Surface Methodology", ***Applied Thermal Engineering***, 27, 2473-2482, (2007).

[57] Reddy, N.S.K., and Rao, P.V., "Selection of Optimum Tool Geometry and Cutting Conditions Using a Surface Roughness Prediction Model for End Milling", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 26, 1202-1210, (2005).

[58] Reddy, N.S.K., and Rao, P.V., "Selection an Optimal Parametric Combination for achieving a Better Surface Finish in Dry Milling Using Genetic Algorithms", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 28, 463-473, (2006).

[59] Liu, Y., "Optimum Design of Straight Thin-walled Box Section Beams for Crashworthiness Analysis", ***Finite Element in Analysis and Design***, 44, 139-147, (2008).

[60] Dabnun, M.A., Hashmi, M.S.J., El-Baradie, M.A., "Surface Roughness Prediction Model by Design of Experiments for Turning Machinable Glass-Ceramic (Macor), ***Journal of Materials Processing Technology***, 164-165, 1289-1293, (2005).

[61] Quiza, R., Figueira, L., Davim, J.P., "Comparing Statistical Models and Artificial Neural Network on Predicting the Tool Wear in Hard Machining D2 AISI Steel", ***Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology,*** 37, 641-648, (2008).

[62] Matlab User Manual, Version 7.1, Release 15, ***The Math Works Inc.***, (2005).

[63] Jiang, M., Gielen, G., Zhang, B., Luo, Z., "Fast Learning Algorithms for Feedforward Neural Network", ***Applied Intelligence***, 18, 37-54, (2003).

[64] Guo, Y., Li, F., Jiang, H., Wang, X., "Study on the Development Method of Panel Parts with Free Form Surfaces", ***Journal of Materials Processing Technology***, 182, 632-636, (2007).

[65] Mahr Product Management Sales, "Surface Metrology", ***3. Asian Conference***, Asia, 17 September, (2003).

[66] Öktem, H., "CNC Tezgahlarında 3 ve 5 Eksende İşlenen Yüzeylerin Pürüzlüğünün Yapay Sinir Ağlarıyla Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ***Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü***, Gebze, Kocaeli, (2004).

[67] Koçak, H., "Takım Çelikleri El Kitabı", VII. Basım, ***Sağlam Metal A.Ş***., Eylül, (2006).

[68] Jesuthanam, C.P., Kumanan, S., Asokan, P., "Surface Roughness Prediction Using Hybrid Neural Networks", ***Machining Science and Technology***, 11, 271-286, (2007).

[69] Parent, L., Songmene, V., Kenne, J.P., "A Generalised Model for Optimising an End Milling Operation", ***Production Planning and Control***, 18, 4, 319-337, (2007).

[70] Basak, Z., Dixit, U.S., Davim, J.P., "Application of Radial Basis Function Neural Networks in Optimization of Hard Turning of AISI D2 Cold-worked Tool Steel with a Ceramic Tool", ***Journal of Engineering Manufacture***, 221, 987-998, (2007).

[71] Myers, R.H., Montogometry, D.C., "Response Surface Methodology", ***John Wiley&Sons Inc.***, New York, (1995).

[72] Dixon, L., Szegö, G., "The Global Optimization Problem: An Introduction", Second Edition, New York, (1978).

[73] Donald, R.J., Matthias, S., William, J.W., "Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Function", ***J. of Global Optimization***, 13, 455-492, (1998).

[74] Altınkaynak, B., and Esin, A., "The Genetic Algorithm Method for Parameter Estimation in Non-Linear Regression", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi***, 17, 43-51, (2004).

[75] Lawrance, D., "A Handbook of Genetic Algortihms", ***Int. Thompson Computer Press***, Boston, USA, (1996).

[76] Holland, J., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", ***University of Michigan Press***, Ann Arbor, USA, (1975).

[77] Oktem, H., Erzurumlu, T., Kurtaran, H., "Application of Response Surface Methodology in the Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness", ***Journal of Materials Processing Technology***, 170, 11-16, (2005).

[78] Zheng, Y., "Genetic Algorithm Applications", ***Quantative Analysis***, Reasoning and Optimization Methods in CAD/CAM and Concurrent Engineering, Sumio Kiyooka, (1999).

[79] Oktem, H., Erzurumlu, T., Erzincanlı, F., "Prediction of minimum surface roughness in end milling molded parts using neural network and genetic algorithm", ***Materials and Design***, 27, 735-740, (2006).

[80] Montogometry, D.C., "Design and Analysis of Experiments", Sixth Edition, ***Arizona State University***, ***Wiley&Sons Inc.***, (2005).

[81] IS-CUR, Cutting Tool Material and Catalogue, ***Is-cut***, ISRAEL, (2006).

[82] Kurtaran, H., Eskandarian, A., Marzougui, D., Bedewi, N.E., "Crashworthiness Design Optimization Using Successive Response Surface Approximations", ***Computational Mechanics***, 29, 409-421, (2002).

EKLER

EK-A: ALÜMİNYUM 7075-T6 MALZEMENİN FREZELENMESİ SONUCUNDA ÖLÇÜLEN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ

Deney No	İlerleme f_t (mm/diş)	Kesme hızı V_c (m/dak.)	Eksenel kesme derinliği a_e (mm)	Radyal kesme derinliği a_r (mm)	İşleme toleransı m_t (mm)	Pürüzlülük R_a (µm)
1	0.08	100	0.3	1	0.001	0.412
5	0.105	200	0.3	1	0.001	0.545
10	0.08	100	0.5	1	0.001	0.467
15	0.13	200	0.5	1	0.001	0.587
20	0.105	100	0.7	1	0.001	0.544
25	0.105	300	0.7	1	0.001	0.648
30	0.08	200	0.3	1.5	0.001	0.562
35	0.13	300	0.3	1.5	0.001	0.637
40	0.105	200	0.5	1.5	0.001	0.585
45	0.08	100	0.7	1.5	0.001	0.569
50	0.08	300	0.7	1.5	0.001	0.661
55	0.13	100	0.3	2	0.001	0.646
60	0.105	300	0.3	2	0.001	0.655
65	0.08	200	0.5	2	0.001	0.685
70	0.13	300	0.5	2	0.001	0.733
75	0.105	200	0.7	2	0.001	0.735
80	0.08	100	0.3	1	0.0055	0.804
85	0.08	300	0.3	1	0.0055	0.765
90	0.13	100	0.5	1	0.0055	0.841
95	0.105	300	0.5	1	0.0055	0.769
100	0.08	200	0.7	1	0.0055	0.79
105	0.13	300	0.7	1	0.0055	0.840
110	0.105	200	0.3	1.5	0.0055	0.855
115	0.08	100	0.5	1.5	0.0055	0.906
120	0.13	200	0.5	1.5	0.0055	0.899
125	0.105	100	0.7	1.5	0.0055	0.946
130	0.105	300	0.7	1.5	0.0055	0.916
135	0.08	200	0.3	2	0.0055	0.932
140	0.13	300	0.3	2	0.0055	0.958
145	0.105	200	0.5	2	0.0055	0.969
150	0.105	100	0.7	2	0.0055	0.993
155	0.08	300	0.7	2	0.0055	0.989
160	0.13	100	0.3	1	0.01	1.701
165	0.105	300	0.3	1	0.01	1.526
170	0.08	200	0.5	1	0.01	1.533
175	0.13	300	0.5	1	0.01	1.588

180	0.105	200	0.7	1	0.01	1.824
185	0.08	100	0.3	1.5	0.01	1.777
190	0.08	300	0.3	1.5	0.01	1.696
195	0.13	100	0.5	1.5	0.01	1.821
200	0.105	300	0.5	1.5	0.01	1.733
205	0.08	200	0.7	1.5	0.01	1.788
210	0.13	300	0.7	1.5	0.01	1.844
215	0.105	200	0.3	2	0.01	1.848
220	0.08	100	0.5	2	0.01	1.899
225	0.08	300	0.5	2	0.01	1.818
230	0.13	100	0.7	2	0.01	2.105
235	0.105	300	0.7	2	0.01	2.158
240	0.08	200	0.7	1.5	0.0055	1.978
241	0.08	100	0.3	0.5	0.0055	1.998
242	0.105	200	0.5	1.5	0.01	1.674
243	0.13	300	0.7	2	0.01	1.856

EK-B: AISI 1040 ÇELİK MALZEMENİN FREZELENMESİ SONUCUNDA ÖLÇÜLEN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİ

Deney no	İlerleme f_t (mm/diş)	Kesme hızı V_c (m/dak)	Eksenel kesme derinliği a_e (mm)	Radyal kesme derinliği a_r (mm)	Pürüzlülük R_a (µm)
1	0.07	140	0.5	1	0.670
4	0.095	140	0.5	1	0.730
7	0.12	140	0.5	1	0.700
10	0.07	140	1	1	0.760
13	0.095	140	1	1	0.810
16	0.12	140	1	1	0.830
19	0.07	140	1.5	1	1.200
22	0.095	140	1.5	1	1.230
25	0.12	140	1.5	1	1.290
28	0.07	140	0.5	3	1.600
31	0.095	140	0.5	3	1.630
34	0.12	140	0.5	3	1.760
37	0.07	140	1	3	1.730
40	0.095	140	1	3	1.720
43	0.12	140	1	3	1.770
46	0.07	140	1.5	3	1.720
49	0.095	140	1.5	3	1.770
52	0.12	140	1.5	3	1.820
55	0.07	140	0.5	5	2.000
58	0.095	140	0.5	5	2.060
61	0.12	140	0.5	5	2.160
64	0.07	140	1	5	2.200
67	0.095	140	1	5	2.280
70	0.12	140	1	5	2.360
73	0.07	140	1.5	5	2.400
76	0.095	140	1.5	5	2.500
79	0.12	140	1.5	5	2.570
80	0.12	190	1.5	5	2.640
81	0.12	240	1.5	5	2.800

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Oktem, H., Erzurumlu, T., Uzman, I., "Application of Taguchi Optimization Technique in Determining Plastic Injection Molding Process Parameters for a Thin-Shell Part", ***Materials and Design***, 28, 1271-1278, (2007).

[2] Erzurumlu, T., and Oktem, H., "Comparison of RS Model with Artificial Neural Network in Determining the Surface Quality of Mold Parts", ***Materials and Design***, 28, 459-465, (2007).

[3] Oktem, H., Erzurumlu, T., Erzincanlı, F., "Prediction of Minimum Surface Roughness in End Milling Molded Parts Using Neural Network and Genetic Algorithm", ***Materials and Design***, 27, 735-740, (2006).

[4] Öktem, H., Erzurumlu, T., Çöl, M., "A Study of Taguchi Optimization Method for Surface Roughness in Finish Milling of Mold Surfaces", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 28, 694-700, (2006).

[5] Oktem, H., Erzurumlu, T., Kurtaran, H., "Application of Response Surface Methodology in the Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness", ***Journal of Materials Processing Technology***, 170, 11-16, (2005).

[6] Ozcelik, B., Oktem, H., Kurtaran, H., "Optimum Surface Roughness in End Milling Inconel 718 by Coupling Neural Network Model and Genetic Algorithm", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 27, 234-241, (2005).

[7] Oktem, H., and Erzincanli, F., "Evaluation of Three and Five-axis Machining of Sculptured Surfaces", ***3rd International Conference on Machining and Measurement of sculptured Surfaces,*** 45-54, Poland, 24-26 September, (2003).

[8] Öktem, H., Uzman, İ., Erzincanlı, F., "Yüzey Pürüzlülüğü için Kesme Şartlarının Optimizasyonunda Response Surface Metodunun Uygulanması", ***13. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu***, Cumhuriyet Üniversitesi, 631-638, Sivas, 7-9 Haziran, (2007).

[9] Öktem, H., Özçelik, B., Kurtaran, H., "Inconel 718'in Frezelenmesi Sonucunda Oluşan Yüzey Pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmin Edilmesi", ***Makine Tasarım ve İmalat Dergisi***, 7, 2, Ankara, 19-27 Mayıs (2005).

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Gümüşhane'de doğdu. İlköğrenimi Gümüşhane'de, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1996 yılında girmiş olduğu üniversite sınavında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Bölümünü kazandı. 2000 yılında mezun oldu. 2001-2004 yılları arasında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2004 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Gebze Meslek Yüksekokulu Endüstriyel Kalıpçılık Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.