T. C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL SIVILARDAN ELEKTROMANYETİK FİLTRASYON YÖNTEMİYLE DEMİR UZAKLAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

ZEHRA YILDIZ

DOKTORA TEZİ

KİMYA ANABİLİM DALI
MALATYA

2011

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Endüstriyel Sıvılardan Elektromanyetik Filtrasyon Yöntemiyle Demir Uzaklaştırılmasi ve Proses Parametrelerinin Optimizasyonu’’ başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynaklar bölümünde yönetime uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla sunarım.

Zehra Yıldız

Tez Başlığı : Endüstriyel Sıvılardan Elektromanyetik Filtrasyon Yöntemiyle Demir Uzaklaştırılması ve Proses Parametrelerinin Optimizasyonu

Tezi Hazırlayan : Zehra YILDIZ

Sınav Tarihi : 28 Şubat 2011

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Kimya Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet BAYSAR (Jüri Başkanı)	İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. Ergun EKİNCİ (Üye)	İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. M. Engin ŞENER (Danışman)	İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. Saadettin HERDEM (Üye)	Selçuk Üniversitesi
Doç. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ (Üye)	İnönü Üniversitesi
Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV (2. Danışman)	İnönü Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER…….. i
ÖZET……..…… v
ABSTRACT……..... vi
TEŞEKKÜR……. vii
ÇİZELGELER DİZİNİ…… viii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….. ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ……... xi
1. GİRİŞ…… 1
1.1. Amaç…….... 4
1.2. Kapsam…… 5
1.3. Kaynak Özetleri……. 6
2. KURAMSAL TEMELLER…… 23
2.1. Elektromanyetik Alanın Temel Kavramları…… 23
2.1.1. Manyetizasyon…….. 23
2.1.2. Manyetik Alınganlık ve Manyetik Geçirgenlik…… 24
2.2. Elektromıknatıs..…….. 24
2.3. Maddelerin Manyetik Özellikleri……. 25
2.3.1. Diyamanyetik Madde……..... 26
2.3.2. Paramanyetik Madde……. 26
2.3.3. Ferromanyetik Madde …….. 28
2.3.4. Ferrimanyetik Madde…… 29
2.3.5. Antiferromanyetik Madde……. 29
2.3.6. Zorlanmış Ferromanyetik Madde…….. 30
2.4. Manyetik Alanda Parçacık Üzerine Etki Eden Kuvvetler…… 30
2.4.1. Manyetik Kuvvet…….. 31
2.4.2. Manyetik Ayırımdaki Non-Manyetik Kuvvetler…….. 31
2.5. Elektromanyetik Filtrasyon…….. 32
2.5.1. Mıknatıslanmış Dolgulu Yataklar…… 33
2.5.2. Elektromanyetik Filtrasyon Verimini Etkileyen Faktörler…… 35
2.5.3. Elektromanyetik Filtrasyon Teorisi……... 36
2.5.4. Elektromanyetik Filtrasyonun Avantajları…… 37
2.5.5. Elektromanyetik Filtrasyon Kullanım Alanları……. 38
2.6. Elektromanyetik Filtrasyonun Optimizasyonu……. 39
2.6.1. Optimizasyon…… 39
2.6.2. Optimizasyon Algoritmaları……. 41
2.6.3. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması…… 42
2.6.4. İstatistiksel Yöntemler……... 43
2.6.4.1. Her Defasında Tek Düzey Etken Yöntemi……. 43
2.6.4.2. Faktöriyel Tasarımlar……. 45
2.6.4.3. En-Dik Çıkış Metodu…… 46
2.6.4.4. Simpleks Yöntemi……. 46
2.6.4.4.1. Simpleksin Yönetim İlkeleri…….. 51
2.6.4.4.2. Amaç Fonksiyonunun Seçimi …… 51
2.6.4.4.3. Optimize Edilecek Değişkenlerin Seçimi ……..…… 51
2.6.4.4.4. Etken Düzeyleri Üzerine Kısıtlayıcılar ……..... 52
2.6.4.4.5. Etken Düzeylerinin Normalizasyonu ……. 53
2.6.4.4.6. İlk Adım Büyüklüğünün Seçimi …… 53
2.6.4.4.7. İlk Simpleksin Oluşturulması …… 54
2.6.4.4.8. Yansıtma Noktası Koordinatlarının Hesaplanması …… 55
2.6.4.4.9. Simpleksin İlerletilmesi……... 56

2.6.4.4.10. Simpleks Algoritmasının Kuralları……... 58
2.6.4.4.11. Optimizasyonun Sonlandırılması ……..... 60
2.6.4.4.12. Simpleks Yönteminin Sağladığı Yararlar……. 60
2.6.4.4.13. Simpleks Yönteminin Dezavantajları…… 61
2.6.5. Sezgisel Yöntemler……... 61
2.6.5.1. Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetiminin Arama Tekniklerindeki Yeri…… 62
2.6.6. Genetik Algoritma……..... 63
2.6.6.1. Genetik Algoritma Temel Kavramları……... 66
2.6.6.2. Seçim Mekanizmaları …… 67
2.6.6.3. Genetik Operatörler…… 68
2.6.6.3.1. Tekrar Üreme İşlemcisi……. 68
2.6.6.3.2. Çaprazlama İşlemcisi…….. 69
2.6.6.3.3. Değişim (Mutasyon) İşlemcisi…… 69
2.6.6.3.4. Elitizm (En İyinin Saklanması) Yöntemi…… 70
2.6.6.4. Kontrol Parametreleri……. 71
2.6.6.4.1. Topluluk büyüklüğü…… 71
2.6.6.4.2. Çaprazlama oranı……. 71
2.6.6.4.3. Mutasyon oranı……..... 71
2.6.6.4.4. Kontrol Parametreleri ile İlgili Çalışmalar……..... 72
2.6.6.5. Genetik Algoritma İşlem Adımları…… 73
2.6.6.6. Genetik Algoritmaların Avantajları……... 74
2.6.7. Tavlama Benzetimi Algoritması……... 75
2.6.7.1. Standart Tavlama Benzetimi Algoritması……. 76
2.6.7.2. Tavlama Benzetimi İşlem Adımları…….. 77
2.6.7.3. Başlangıç Sıcaklık Değeri…….. 78
2.6.7.4. Sıcaklık Azaltma Oranı…….. 79
2.7. Belirsizlik Analizi…… 79
3. MATERYAL VE YÖNTEM……. 83
3.1. Materyal…….. 83
3.1.1. Beslemenin Hazırlanışı…… 83
3.1.2. Kullanılan Alet ve Düzenekler……..... 83
3.2. Yöntem……. 85
3.2.1. Yapay Pas Süspansiyonlarının Demir Analizi…….. 85
3.2.2. Pas Numunesinin SEM Analizi……. 85
3.2.3. Numunede Manyetik Özellikli Kısmın Belirlenmesi…… 86
3.2.4. Pas numunesinin XRD Analizi……. 86
3.3. Mıknatıslanmış Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Manyetik Özellikleri…..……. 86
3.3.1. Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri…….. 87
3.3.2. Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri…… 87
3.3.3. Mıknatıslanmış Dolgulu Yatakların Gözeneklerindeki Manyetik Alan Gradiyentine Bağımlılığının Belirlenmesi…… 87
3.4. Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri……. 88
3.4.1. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi…….. 88
3.4.2. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi…….. 89
3.4.3. Kalite Faktörü Üzerine Filtreleme Hızının Etkisi…..... 89
3.4.4. Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi…… 90
3.4.5. Kalite Faktörü Üzerine Çevrim Sayısının Etkisi…..... 90
3.4.6. Kalite Faktörü Üzerine Viskozitenin Etkisi……. 91
3.4.7. Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyonun pH'sının Etkisi…….. 92
3.5. Deterjanlı Suların Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri…….. 92

3.5.1. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi……. 93
3.5.2. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi…… 94
3.5.3. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi… 94
3.5.4. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi……. 94
3.5.5. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Deterjan Derişiminin Etkisi…….. 95
3.6. Kalite Faktörü Optimizasyon Deneyleri…….. 96
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME…… 97
4.1. Numune Seçimi…… 97
4.1.1. Parçacık Boyut Analizi …… 98
4.1.2. Numunenin Manyetik Özellikli Kısmının Belirlenmesi……... 99
4.1.3. Bileşen Analizi ……. 100
4.2. Mıknatıslanmış Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Manyetik Özellikleri…..……... 101
4.2.1. Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri…… 102
4.2.1.1. Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri…… 103
4.2.1.2. Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri……. 105
4.3. Mıknatıslanmış Dolgulu Yatakların Gözeneklerindeki Manyetik Alan Gradiyentine Bağımlılığının Belirlenmesi……. 113
4.4. Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri……. 116
4.4.1. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi……... 116
4.4.2. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi…… 117
4.4.3. Kalite Faktörü Üzerine Filtreleme Hızının Etkisi……. 118
4.4.4. Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi……. 119
4.4.5. Kalite Faktörü Üzerine Çevrim Sayısının Etkisi……... 120
4.4.6. Kalite Faktörü Üzerine Viskozitenin Etkisi…….. 122
4.4.7. Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyonun pH'sının Etkisi……... 123
4.5. Deterjanlı Suların Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri…… 124
4.5.1. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddeti Etkisi…… 125
4.5.2. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi……. 126
4.5.3. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi…. 126
4.5.4. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi…… 127
4.5.5. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Deterjan Derişiminin Etkisi…….. 128
4.6. Elektromanyetik Filtrasyon İçin Matematiksel Modelin Oluşturulması……. 130
4.7. Simpleks Optimizasyonu İçin Etkenlerin ve Çalışma Aralıklarının Seçimi…… 132
4.7.1. Dış Manyetik Alan Şiddeti……..... 133
4.7.2. Filtre Uzunluğu……. 133
4.7.3. Filtre Matris Eleman Çapı……. 133
4.7.4. Filtreleme Hızı…….. 134
4.7.5. Kalite Faktörünün Optimizasyonunda İhmal Edilecek Etkenler…….. 134
4.8. Simpleksin İlerleyişi …… 135
4.8.1. Kalite Faktörünün Nelder-Mead Simpleks Optimizasyon Sonuçları…… 138
4.9. Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetimi İçin Kullanılan Parametreler…… 143
4.9.1. Genetik Algoritma Yöntemi İle Kalite Faktörünün Optimizasyonu……. 144
4.9.2. Genetik Algoritma Yöntemi Optimizasyon Sonuçları…….. 145
4.9.3. Tavlama Benzetimi Yöntemi İle Kalite Faktörünün Optimizasyonu…… 145
4.9.4. Tavlama Benzetimi Algoritma Yöntemi Sonuçları……... 145
4.10. Optimizasyon Çalışmalarının Ortak Sonuçları ve Tartışması…… 146
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 147
5.1. Sonuçlar…… 147
5.1.1. Mıknatıslanmış Dolgulu Yataklar …… 147
5.1.2. Kalite Faktörü Üzerine Proses Parametrelerinin Etkisi…… 147

5.1.3. Deterjanlı Suların Kalite Faktörü Üzerine Proses Parametrelerinin Etkisi 148
5.1.4. Elektromanyetik Filtrasyonun Optimizasyon Sonuçları……... 148
5.2. Öneriler…… 150
KAYNAKLAR……. 151
Ek 1. Başlangıç Simpleksi İçin Katsayılar Çizelgesi……. 158
Ek 2. Simpleks Optimizasyon Programı……. 159
ÖZGEÇMİŞ……... 165

ÖZET

Doktora Tezi

ENDÜSTRİYEL SIVILARDAN ELEKTROMANYETİK FİLTRASYON YÖNTEMİYLE DEMİR UZAKLAŞTIRILMASI VE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Zehra Yıldız

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalı

165+xi sayfa
2011

Danışman: Prof. Dr. M. Engin Şener
Yardımcı danışman: Prof. Dr. Teymuraz Abbasov

Bu tez çalışması, mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin, yapay süspansiyonlar ve deterjan içeren süspansiyonlarda elektromanyetik filtrasyon temizleme verimi üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkisinin incelemesi ve elektromanyetik filtrasyon veriminin optimizasyonu konularını kapsamaktadır. Uygulanan farklı manyetik alan şiddeti etkisinde mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özellikleri belirlenmiştir.

Elektromanyetik filtrasyon verimi üzerine proses parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Bu proses parametreleri; manyetik alan şiddeti, filtre matris elemanının boyutu, filtre uzunluğu, filtreleme hızı, süspansiyonun viskozitesi, süspansiyonun pH'sı, ve çevrim sayısıdır. Filtreleme hızının, filtre matris elemanının boyutu ve süspansiyonun viskozitesinin artmasıyla verimin azaldığı gözlenmiştir. Diğer taraftan verim, filtre doyum değerine kadar filtre uzunluğu, manyetik alan şiddeti ve doğal olarak çevrim sayısı ile artmıştır. Kalite faktörünün ortam pH'sına bağımlılığında ise düzenlilik görülmemiştir. Ayrıca elektromanyetik filtrasyon veriminin, non-manyetik filtrasyon veriminden yaklaşık iki kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Yapay süspansiyonlara katılan deterjan ilavesi ile viskozitenin artmasına rağmen yapay süspansiyonlarda yüksek manyetik ayırma verimi sağlandığı görülmüştür.

Elektromanyetik filtrasyonun verimi için matematiksel model kurulmuştur. Genetik algoritma ve tavlama benzetimi yöntemlerinde bu model kullanılmıştır, ayrıca matematiksel bir model kullanmadan Nelder-Mead modifiye simpleks optimizasyon yöntemi kullanılarak deneysel optimizasyon yapılmıştır. Bu üç farklı optimizasyon yöntemi ile elde edilen maksimum kalite faktörü ve optimum değişken düzeylerinin iyi uyuştuğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik filtrasyon, mıknatıslanmış dolgulu yataklar, Nelder-Mead modifiye simpleks metodu, genetik algoritma, tavlama benzetimi.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE SEPARATION OF THE FERROUS IMPURITIES FROM INDUSTRIAL LIQUIDS USING ELECTROMAGNETIC FILTRATION AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS

Zehra Yıldız

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemistry

165+xi pages

2011

Supervisor: Prof. Dr. M. Engin Şener
Co-Supervisor: Prof. Dr. Teymuraz Abbasov

This thesis work comprises the investigation of the magnetic properties of packed beds, the effect of surfactant and various process variables on the electromagnetic filtration efficiency and a thorough comprehensive optimization of this filtration efficiency. Magnetic behaviour of different packed beds magnetized under various applied external magnetic field strength was determined.

Effects of process variables on the electromagnetic filtration efficiency were investigated. These variables are the magnetic field strength, size of the filter matrix elements, filter length, filtration rate, viscosity of the suspension, the pH value of the suspension and the number of the cycles applied. It was found that filtration efficiency decreased on increasing the filtration rate, size of the filter matrix elements and viscosity of the suspension. Efficiency, on the other hand increased with the filter length, external magnetic field strength and naturally with the number of the cycles. pH displayed a fluctuating effect on the filtration efficiency. Futhermore electromagnetic filtration efficiency was found nearly twice as large as non-magnetic filtration efficiency.

Addition of detergent into these suspensions assisted in obtaining higher filtration efficiencies, especially in high viscosity suspensions.

Aiming at the determination of optimum process parameters for maximum electromagnetic filtration efficiency, three different optimization techniques were used. The predicting the cleaning efficiency of the electromagnetic filtration process is mathematically modelled. Genetic algorithm and simulated annealing techniques were employed adopting the mathematical model and an experimental optimization was performed using Nelder-Mead simplex method. It was found that the optimum levels of the variables and the maximum quality factor obtained by three different optimization methods agreed well.

Keywords: Electromagnetic filtration, magnetized packed bed, modified Nelder-Mead simpleks method, genetic algorithm, simulated annealing.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmasının hem planlanmasında hem de yürütülmesinde yardım, öneri ve desteklerini esirgemeyen saygı değer tez danışman hocalarım Prof. Dr. Engin ŞENER ve Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV'a teşekkür ederim.

Optimizasyon ve Matlab ile program yazımı konusunda önemli yardımlarını gördüğüm Proses Kontrol ve Reaktör Tasarımı Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. A. Mehmet YÜCEER'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, bana destek olan Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Doç. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim-öğretim hayatım boyunca benden maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM'e teşekkür ederim.

2007/47 No'lu proje kapsamında desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Elektromanyetik filtrasyonun kullanıldığı endüstri alanları…….. 39
Çizelge 2.2. Biyolojik evrimdeki bazı terimlerin, problemlerin…… 65
GA'daki karşılıkları……..
Çizelge 2.3. Genetik algoritma için önerilen kontrol parametre değerleri…… 72
Çizelge 3.1. Kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi…… 89
Çizelge 3.2. Kalite faktörü üzerine filtre matris çapının etkisi……..... 89
Çizelge 3.3. Kalite faktörü üzerine filtreleme hızının etkisi……..... 90
Çizelge 3.4. Kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisi……..... 90
Çizelge 3.5. Kalite faktörü üzerine çevrim sayısının etkisi……... 90
Çizelge 3.6. Kalite faktörü üzerine viskozitenin etkisi……..... 91
Çizelge 3.7. Kalite faktörü üzerine süspansiyonun pH'sının etkisi…….. 92
Çizelge 3.8. Deterjanlı süspansiyonlarda kalite faktörü üzerine……... 93
manyetik alan şiddetinin etkisi…….
Çizelge 3.9. Deterjanlı süspansiyonlarda kalite faktörü üzerine 94
filtre uzunluğunun etkisi……...
Çizelge 3.10. Deterjanlı sularda kalite faktörü üzerine filtre 94
matris elemanının çapının etkisi……..
Çizelge 3.11. Deterjanlı sularda kalite faktörü üzerine süspansiyon 95
pH'sının etkisi……
Çizelge 3.12. Deterjanlı sularda kalite faktörü üzerine deterjan 95
derişiminin etkisi……
Çizelge 4.1. Yapay pas süspansiyonların AAS analizleri…….. 97
Çizelge 4.2. Pas numunesinin XRD analizinde bulunan bileşikler ve manyetik…... 100
özellikleri……
Çizelge 4.3. Dolgusuz yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri…… 103
Çizelge 4.4. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri……... 106
(d=4,75 mm)……..
Çizelge 4.5. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri…….. 108
(d=6,28 mm)……..
Çizelge 4.6. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri…….. 110
(d=11,9 mm)…….
Çizelge 4.7. Elektromanyetik filtrasyon modelinde yer alan sabitler…… 131
Çizelge 4. 8. GA opsiyon değerleri 132
Çizelge 4.9. Kalite faktörü parametrelerinin alt ve üst sınırları……. 134
Çizelge 4.10. İlk simpleks için hesaplanan etken düzeyleri…….. 136
Çizelge 4.11. İlk simpleks için hesaplanan etken düzeylerinde alınan yanıtlar…… 136
Çizelge 4.12. İlk simpleks adımı…… 137
Çizelge 4.13. İlk simpleks adımında alınan yanıtlar……..... 138
Çizelge 4.14. Nelder-Mead Simpleks yönteminin sonuçları……... 138
Çizelge 4.15. GA opsiyon değerleri ……. 144
Çizelge 4.16. GA optimum değerleri ve maksimum yanıt..……..... 145
Çizelge 4.17. TBA opsiyon değerleri……..... 145
Çizelge 4.18. TBA optimum değerleri ve maksimum yanıt..……..... 146
Çizelge 4.19. Optimizasyon yöntemlerinin ortak sonuçları……... 146

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Elektromıknatıs çalışma ilkesi…… 25
Şekil 2.2. Paramanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi…… 27
Şekil 2.3. Ferromanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi…… 28
Şekil 2.4. Ferrimanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi……. 29
Şekil 2.5. Antiferromanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi 30
Şekil 2.6. Elektromanyetik filtrasyon çalışma ilkesi ……..... 33
Şekil 2.7. Mıknatıslanmış dolgulu yatak elemanları……..... 34
Şekil 2.8. Optimizasyon problemlerinin sınır şartları …… 40
Şekil 2.9. Optimizasyon algoritmalarının kategorileri…….. 41
Şekil 2.10. Üç etkenli bir sistemde her defasında tek etken yöntemi……. 44
Şekil 2.11. Her defasında tek etken yönteminin yetersizlikleri……..... 45
Şekil 2.12. Üç boyutlu uzayda ve hareket bölgesinde değişken boyutlu simpleksler…… 47
Şekil 2.13. İki boyutlu bir modifiye simpleksin olası hareketleri……... 48
Şekil 2.14. İki boyutlu bir modifiye simpleksin yansıması ve genişlemesi…… 49
Şekil 2.15. İki boyutlu bir modifiye simpleksin negatif ve pozitif daralması…… 49
Şekil 2.16. Nelder-Mead Modifiye simpleks yöntemi akış şeması……. 50
Şekil 2.17. Adım büyüklüğünün optimuma yaklaşabilme yeteneğine etkisi…….. 54
Şekil 2.18. İlk simpleks için boyut küçültme ve konum değiştirme……..... 55
Şekil 2.19. Simplekslerin optimuma doğru hareket ettirilmesi…….. 57
Şekil 2.20. Simplekslerin hareket ettirilmesi……..... 57
Şekil 2.21. Simplekslerin optimuma doğru hareket ettirilmesi……..... 58
Şekil 2.22. Arama teknikleri……... 63
Şekil 2.23. Popülasyon yapısı……. 66
Şekil 2.24. Rulet tekerleği…….. 67
Şekil 2.25. Genetik algoritmada çaprazlama…….. 69
Şekil 2.26. Genetik algoritmada mutasyon……. 69
Şekil 2.27. Genetik algoritma akış şeması…….. 74
Şekil 2.28. Tavlama benzetimi algoritması……. 78
Şekil 3.1. Non-manyetik filtre gövdesi ve filtre matris elemanı 83
Şekil 3.2. Elektromıknatıs ve kontrol ünitesi…….. 84
Şekil 3.3. Hirst GM 05 gaussmetresi ……. 84
Şekil 3.4. Elektromıknatıs hava aralığı 88
Şekil 4.1. Pas örneklerin SEM görüntüleri……..... 98
Şekil 4.2. Pas örneğinin XRD analizi……. 100
Şekil 4.3. Dolgusuz yatakta manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi……... 104
Şekil 4.4. Dolgusuz yatağın mıknatıslanma eğrisi…….. 105
Şekil 4.5. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=4,75 mm) 107
Şekil 4.6. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=4,75 mm)…. 107
Şekil 4.7. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=6,28 mm) 109
Şekil 4.8. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=6,28 mm)…. 110
Şekil 4.9. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=11,9 mm) 111
Şekil 4.10. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=11,9 mm)... 112
Şekil 4.11. Gözeneklerdeki manyetik alanın boyutsuz r_a'ya bağımlılığı…..... 114
Şekil 4.12. Gözeneklerdeki manyetik alan gradyanının boyutsuz r_a'ya bağımlılığı……..... 115

Şekil 4.13. Gözeneklerdeki kuvvet faktörünün boyutsuz r_a'ya bağımlılığı…… 115
Şekil 4.14. Kalite faktörünün filtre uzunluğuna göre değişimi……. 117
Şekil 4.15. Kalite faktörünün filtre matris eleman çapına göre değişimi……... 118
Şekil 4.16. Kalite faktörünün filtreleme hızına göre değişimi……..... 119
Şekil 4.17. Kalite faktörünün manyetik alan şiddetine göre değişimi……..... 120
Şekil 4.18. Çevrimli elektromanyetik filtrasyon ile yapay süspansiyonunun temizlenmesi……..... 120
Şekil 4.19. Kalite faktörünün çevrim sayısına göre değişimi…… 121
Şekil 4.20. Kalite faktörünün viskoziteye göre değişimi……... 122
Şekil 4.21. Kalite faktörünün süspansiyonun pH'sına göre değişimi……..... 123
Şekil 4.22. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddeti etkisi…….. 125
Şekil 4.23. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi……. 126
Şekil 4.24. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine filtre elemanı çapının etkisi……. 127
Şekil 4.25. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine pH etkisi……... 127
Şekil 4.26. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine deterjan derişiminin etkisi……. 128
Şekil 4.27. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine viskozitenin etkisi… 129
Şekil 4.28. EMF'nin prensip şeması……... 130
Şekil 4.29. Kalite faktörünün simpleks optimizasyonu boyunca değişimi……. 139
Şekil 4.30. Simpleks optimizasyonu boyunca standart sapmanın değişimi…… 140
Şekil 4.31. Filtre matris eleman çapının simpleks optimizasyonu boyunca değişimi……..... 140
Şekil 4.32. Filtreleme hızının simpleks optimizasyonu boyunca değişimi……. 141
Şekil 4.33. Filtre uzunluğunun simpleks optimizasyonu boyunca değişimi……... 142
Şekil 4.34. Dış manyetik alan şiddetinin simpleks optimizasyonu boyunca değişimi……..... 142

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	Manyetik alan yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
κ	Manyetik alınganlık
χ	Kütlesel manyetik alınganlık
ε	Yatak gözeneklilik oranı
γ	Yatak doluluk oranı
ϕ	Gözeneklerde biriken parçacıkların hacimsel yoğunluğu
β	Absorpsiyon katsayısı
r	Filtre matris çapı
a	Küre yarıçapı
r_a	Boyutsuz radyal koordinat
F_m	Manyetik kuvvet
F_d	Hidrodinamik sürüklenme kuvveti
F_g	Yer çekim kuvveti
ψ	Kalite faktörü
ξ	Logaritmik etkinlik katsayısı
C_i	Giriş numunesindeki toplam demir içeriği
C_o	Çıkış numunesindeki toplam demir içeriği
λ	Manyetik özellikli kısmı
d	Filtre matris eleman çapı
V_f	Filtre edilecek akışkanın hızı
V_p	Parçacığın hızı
L	Filtre uzunluğu
η	Akışkanın dinamik viskozitesi
δ	Parçacık çapı
TB	Tavlama benzetimi algoritması
GA	Genetik algoritma
MSM	Modifiye simpleks metodu
k	Orijinal etken düzeyi
k_{max}	Etken düzeyinin üst sınırı
k_{min}	Etken düzeyinin alt sınırı
İAB	İlk adım büyüklüğü
EK	Konum değiştirme
Nk	Normalize edilmiş etken düzeyi
	Köşelerin orta noktası
Y_b	En iyi yanıta sahip köşe
Y_W	En kötü yanıta sahip köşe
Y_n	En kötü 2. yanıta sahip köşe
Yr	En kötü köşenin yansıtımı
Ye	En kötü köşenin genişletimi
Ycr	Pozitif daralma
Ycw	Negatif daralma

1. GİRİŞ

Endüstriyel akışkanlar içersinde sanayinin gelişmesine paralel olarak suyun kullanım alanları yaygınlaşmış, suya duyulan gereksinim artmıştır. Başta kazan besleme suyu ve soğutma suyu olmak üzere, endüstrinin her dalında suya ihtiyaç vardır. Bu nedenle daha kuruluşta su kaynakları ön planda tutulmuş ve su endüstrinin temel girdileri arasında yer almıştır. Önceleri su sadece kullanma, soğutma ve işletme suyu gibi sınırlı alanlarda kullanılırken bugün yardımcı ham madde hatta ana ham madde olarak birçok alanda doğrudan veya dolaylı olarak yararlanılmaktadır. Bu proses sularından beklenen sonuca ulaşmak için suyun yerine ve amacına göre bazı nitelikleri taşıması gerekir. Endüstriyel prosesin gerçekleşmesinde kullanılacak su ve diğer endüstriyel akışkanların kalitesi her zaman mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. Endüstriyel akışkanların kalitesi ise saflık derecesine göre belirlenir. Safsızlığı oluşturan katıların sıvı veya gaz ortamdan ayrılması ile ilgili genel problem, katıların karakterine ve karışımda bulunan katı-sıvı oranına bağlı olmak üzere farklı operasyonlarla çözülebilir. Bu katı safsızlıkları, ayırmak için kullanılan prosesler fiziksel ve kimyasal arıtma işlemleri olmak üzere iki sınıfta toplanır. Fiziksel arıtma işlemleri bu katıların cinsi ve boyutuna göre değişir. Su içinde yüzen 5 mm'den daha büyük parçacıklar bir ızgara veya elekten geçirilerek mekanik olarak tutulabilir. Çapı 50 μm'den daha büyük olan tanecikler sedimantasyon havuzlarında bir süre bekletilerek çökeltilebilir. 10 μm çaplı katı partiküller su içinde uzun süre askıda kalabilir. Bu parçacıklar koagülasyon, flotasyon ve filtrasyon gibi fiziksel ayırma yöntemi veya kimyasal arıtma işlemi olarak kullanılan kimyasal çöktürme ve iyon değiştiricilerle yapılan arıtma işlemleri ile ayrılabilir [1].

Katının partikül çapı 1 μm'nin altında olsa bile paramanyetik/ferromanyetik özellikli parçacıklar, sıvı ortamından elektromanyetik filtrasyon işlemi ile ayrılabilir. Su ve endüstriyel sıvıların içeriğinde genelde istenmeyen dispers parçacıklar; Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Al, Zn, Ti, Zr ve Mn gibi elementlerle birlikte bunların alaşımlarıdır. Bu karışımın büyük bir kısmını demir içerikli bileşenlerin oluşturduğu bilinmektedir. Sıvı veya gaz halindeki endüstriyel akışkanlarda bulunan demir bileşenli parçacıklar, çözeltinin kendi doğal bileşiminde mevcut olabilir, örneğin toprak veya kayalar içinde bulunan demir, su ve toprak arasındaki bir dizi kompleks reaksiyon sonucu suya özellikle de yer altı sularına

geçmektedir. Endüstriyel akışkanların demir bileşenli karışımlar içermesinin diğer bir nedeni olarak da temas halinde olduğu bağlantı elemanlarının aşınması sayılabilir [1-3].

Gerek çözeltinin doğal bileşimi ile gerekse işletim sırasındaki sorunlardan dolayı suya karışmış olan demirin zararlı etkileri şöyle sıralanabilir:

1. İçme sularında bulunan demir, insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple içme sularında demir belli sınırlarda tutulması gerekmektedir. Avrupa Birliği, demir için izin verilebilir en üst sınırın 0,2 mg/L, ideal limiti ise 0,05 mg/L olarak belirlemiştir. Dünya Sağlık Teşkilatı ise, demirin üst sınırını 0,3 mg/L olarak vermektedir. Ülkemiz içme ve kullanma suyu standartlarına daha yüksek değerler verilmekte, ideal değer 0,2 mg/L, izin verilebilen üst değer ise 1,0 mg/L olarak verilmiş bulunmaktadır. Toplam demir miktarı 1,0 mg/L üstünde ise, demir suya madeni bir tat verir. Bu gibi sularla yapılan çay ve kahvenin rengi siyahlaşır, tadı bozulur [1,4].

2. Demir, beyaz çamaşırlar ve porselen eşyalar üzerinde, çıkması zor sarımsı-kırmızımsı lekeler bırakır.

3. Klorlama sonucu demir dip cidarlarında birikip, zaman zaman da buralardan koparak pompa, vana ve orifis gibi unsurları tıkar.

4. Endüstriyel akışkanlar içersindeki demir bileşenli karışımlar temas halinde olduğu bağlantı elemanlarının aşınmasına neden olur.

5. Demir bakterileri suda çok az demir iyonu olsa bile çoğalabilir. Bu bakteriler boru hatlarında, depolarda ve kuyularda gelişerek, birbirine yapışan yumrular oluşturur ve zamanla çürüyerek suyun tadını bozucu etki yapar.

6. Demirin suda bulunması daha çok endüstri yönünden önemlidir:

Demir iyonları kağıt, tekstil, plastik, deri, gıda gibi endüstri kollarında elde edilecek olan ürünün rengini, tadını ve görünüşünü bozucu etki yapar. Örneğin, proses sularında demirin belirli bir sınırın üzerinde olmasıyla kağıdın sarımsı renk almasına ve mukavemetinin düşmesine, tekstil sanayisinde kumaşta leke oluşumuna hatta delinmesine yol açmaktadır.

7. Kazanda kullanılan sular buharlaşma sonucu kazan cidarlarında tortu (kazan taşı) bırakır. Çoğunlukla bu kazan taşları kimyasal olarak çözünmeyen kalsiyum ve magnezyum tuzlarından meydana gelir ve çok sert tabakalar halinde bulunurlar. Bazı kazan taşları ise bakır, demir ve silikatlardan oluşur. Boru yüzeyinde bu sert kazan taşların bulunması

akışkana olan ısı transferini azaltır, kazanda buharlaştırıcı yüzeyler ile kızdırıcılar arasındaki ısıl dengeyi de bozar ve boruların kavrulmasına yol açabilir [1,2].

Yukarıdan bahsedilen sebeplerden dolayı endüstriyel akışkanların içerdikleri dispers demir bileşenli karışımların temizlenmesi gerekmektedir. Bu demir bileşenli karışımların içeriğine bakıldığında çoğunun demir oksit karışımlarından oluştuğu görülmüştür. Besleme veya kazan suyunda bulunan demir, korozyona sebep olmaktadır. Kazan, ekonomizör ve boru hatları genellikle demirli malzemelerden yapılmıştır. Bu nedenle malzemenin, korozyona karşı korunmaları gerekmektedir.

Demirin korozyonu, düşük pH'da çözünmüş oksijen, karbondioksit ile diğer gazların bulunması halinde meydana gelir. Demir ile su arasındaki reaksiyon şöyledir:

$$Fe + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + H_2$$
$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3$$

Oksijen bulunması halinde denge bozulduktan sonra demir iyonları tekrar suya geçer. Normal olarak demir yüzeyleri Fe_3O_4 ile kaplanır. Konsantre kostik ile Fe_3O_4 aşağıdaki şekilde reaksiyona girer:

$$Fe_3O_4 + 6NaOH \longrightarrow 3Na_2FeO_2 + 3H_2O + ½\ O_2$$
$$Na_2FeO_2 + 4H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 6NaOH + H_2$$

Yukarıdaki tepkimede görüldüğü üzere hidrojen gazının varlığı, ortamda magnetit gibi korozyon ürünlerinin olduğunu gösterir ve hidrojen gazı, demir içinde difüzlenerek dekarbirizasyon denilen aşağıdaki reaksiyonu meydana getirir:

$$FeC + 2H_2 \longrightarrow CH_4 + Fe$$

Açığa çıkan metan gazı da magnetitle kaplanmış demir borularda patlamalara neden olur. Bu gibi tehlikeli sorunlara yol açabilen demir karışımlarının sudan temizlenmesi gerekmektedir. Özellikle magnetit korozyon yapıcı ana madde olduğundan karışımdan öncelikle uzaklaştırılması gereken bileşiklerin başında yer alır. Magnetit

($FeO.Fe_2O_3=Fe_3O_4$) ve maghemit (γ-Fe_2O_3) manyetik alanda çekildiklerinden dolayı elektromanyetik filtrasyon yöntemi ile endüstriyel sıvı ve gazlardan bu manyetik parçacıkları ayırmanın daha uygun olduğu gösterilmiştir [2-6].

Elektromanyetik filtrasyon yüksek ayırma verimi sağlaması, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi ağır koşullar gerektirmediğinden enerji tasarrufu sağlaması, hiçbir yardımcı kimyasal ve biyolojik materyal içermediğinden de çevre dostu bir teknoloji olması bu prosesin etkin bir ayırma prosesi olmasını sağlamıştır. Bu özelliklerinden ötürü yıllardır manyetik filtrasyon, özellikle madencilik, metalurjik, gıda, petrol, nükleer, termik ve hidroelektrik santrallerinde, nanoteknolji ve biyoteknoloji gibi endüstrilerde iki amaçla kullanılmıştır. Birinci olarak, manyetik bileşenleri içeren beslemenin saflaştırılmasında, bu durumda istenen ürün non-manyetiktir. Örneğin, ağır metal iyonları, yağlar ve diğer istenmeyen maddelerle büyük bir kısmının kirlendiği suyun temizlenmesinde kullanılır. İkinci olarak manyetik özelliğe sahip bileşenin deriştirilmesinde elektromanyetik filtre kullanılmıştır. Bu durumda ise istenen ürün manyetiktir. Örneğin değerli minerallerin geri kazanılması ve zenginleştirilmesinde uygulanmıştır [2,7-9]. Kullanım alanı bu kadar geniş olan elektromanyetik filtrasyon işleminin son yıllarda hızla gelişmesine rağmen işlemin kuramı ve pratiği üzerindeki çalışmalar yetersiz kalmıştır.

1.1. Amaç

Süspansiyonlarda veya kolloidal sistemlerdeki dispers demir içerikli safsızlıklar, temas ettiği malzemenin yüzeyinde oksitleyici bölgeler oluştururlar. Bu durum, taşıyıcı ortamın kalitesinin düşmesine, kullanılan ekipmanların aşınmasına, bağlantı elemanlarının zamanla tıkanmasına, kazanlarda ısı iletim hızının azalmasına bağlı olarak kazan sıcaklığının ve basıncının büyük ölçüde düşmesi gibi sorunlara yol açar. Tüm bu sorunlar, verimliliğin düşmesine ve endüstriyel işlemlerin aksamasına neden olur. Endüstride karşılaşılan en önemli problemlerden biri, düşük derişimde ve mikron boyutlu manyetik safsızlıkların sıvı/gaz ortamından temizlenmesidir. Tez çalışmasında, belirli derişimde korozyon ürünleri (pas) ve su ile oluşturulan deterjanla işlenmiş/işlenmemiş yapay korozyon ürünleri süspansiyonlarından demir içerikli karışımların olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için sistemden uzaklaştırılmasına çalışılmıştır. Bu amaca yönelik olarak çalışmada,

elektromanyetik filtrasyon ayırma yöntemi kullanılmıştır. Elektromanyetik filtrasyon işleminde, düşük derişimde ve mikron boyutlu para/ferro-manyetik safsızlıklar, mıknatıslanmış dolgulu yatakların gözeneklerinde birikerek ayrılmaktadır. Bu amaçla hem mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özellikleri incelenmiş hem de elektromanyetik filtrasyon işlem parametrelerin temizlenme verimine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Elektromanyetik filtrelerin esas çalışma bölgesi olan çeşitli çaplardaki çelik bilyelerden oluşturulan mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler sayesinde dolgulu yatakların manyetik doyuma ulaştığı uzunluk, filtre matris eleman çapı ve manyetik alan şiddet değerleri belirlenmiştir. Bu verilerden yararlanarak elektromanyetik filtrasyon işlemi için en uygun manyetik alan şiddeti, filtre uzunluğu ve filtre matris eleman boyutu değerlerinin bir öngörüsü amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, deterjanla işlenmiş ve işlenmemiş su örneklerinin parçacık boyutu ortalama 1 µm olan manyetik demir oksit karışımlarından elektromanyetik filtrasyon ile ayırma verimi üzerine dış manyetik alan şiddeti, filtre uzunluğu, filtre matris eleman çapı, filtreleme hızı, viskozite, pH ve çevrim sayısının etkisi belirlenmiştir.

Ayrıca yapay korozyon ürünleri süspansiyonundan elektromanyetik filtrasyon ile toplam demir ayırma verimi için en uygun çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Nelder-Mead modifiye simpleks metodu, genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemleri kullanılmış, maksimum elektromanyetik filtrasyon verimi için en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir.

1.2. Kapsam

Bu tez başlıca üç konuyu kapsamaktadır.

İlk bölüm mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin incelenmesinden oluşmaktadır. Bu bölümde;

- Mıknatıslanmış dolgulu ve dolgusuz yatakların manyetik özelliklerini temsil eden B(H) ve B(L) eğrileri incelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde ise, elektromanyetik filtrasyon işlemi deneysel olarak incelenmiştir. Bu bölümde;

- Elektromanyetik filtrasyon işleminin temizleme verimi üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkilerini tespit etmek için gerekli çalışmalar yapılmıştır.

- Elektromanyetik filtrasyon işleminin temizleme verimi üzerine surfaktan etkisi incelenmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise, elektromanyetik filtrasyon işleminin proses parametrelerinin optimizasyonu ve matematiksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde;

- 2. bölümde elde edilen deneysel veriler ile elektromanyetik filtrasyon kalite faktörünü işletme parametrelerine bağlayan ifade genetik algoritma yöntemi ile belirlenmiştir.

- Nelder-Mead modifiye simpleks metodu, MATLAB ile programlanmış ve Ek-2'de sunulmuştur.

- Nelder-Mead modifiye simpleks optimizasyon yöntemi ile maksimum elektro-manyetik filtrasyon veriminin elde edildiği en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir.

- Genetik algoritma optimizasyon yöntemi ile maksimum elektromanyetik filtrasyon veriminin elde edildiği en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir.

- Tavlama benzetimi optimizasyon yöntemi ile maksimum elektromanyetik filtrasyon veriminin elde edildiği en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir.

1.3. Kaynak Özetleri

Manyetik safsızlıkların taşıyıcı ortamlardan manyetik ayırma yöntemi ile temizlenmesi işleminin geçmişi 18. yüzyıla kadar uzanmaktadır [2, 5, 10]. Manyetik ayırma işlemi Avrupada 18. asırdaki sanayileşme devrimi ve 19. asırda Kuzey Amerikada başlayan sanayi gelişimi ile birlikte bir sistem halinde gelişmeye başlamıştır. Başlangıçta manyetik ayırma işlemleri, madencilik sanayinde demir ve demir bileşenleri içeren minerallerin ayrılması için kullanılmıştır. Manyetik ayırmaya ait olan ilk patent, W. Fillarton tarafından 1792 yılında demir madeni minerallerin ayrılmasıyla ilgilidir. Kuzey Amerika'daki ilk patent ise R. Cook tarafından 1849 yılında yine aynı konu üzerine alınmıştır. Manyetik ayırma yöntemi, 1840'lı yıllardan beri manyetik cevherin zenginleştirilmesi ve çamurlardan manyetik parçacıkların ayrılmasında madencilik endüstrisi tarafından kullanılmıştır [2, 3, 8,10-12].

Sıvı ve gazların, manyetik safsızlıklardan yüksek gradiyentli manyetik filtrelerle temizlenmesi işleminin teorisi ve pratiği üzerine yapılan çalışmalar 1960'lı yıllardan itibaren düzenli şekilde devam etmiştir. Bu endüstriyel işlemlerde, sıvı veya gazların taşıdıkları manyetik parçacıkların %10-30 (w/w) ve boyutları ise 100 μm veya daha büyük olabilmektedir. Sonraki yıllarda manyetik filtrasyon kuramı ve pratiği, ortamları daha küçük boyutlu ve daha düşük derişimdeki parçacıklardan temizleyecek şekilde geliştirilmiştir. Teknolojik gelişmelerin sonucu olarak çok zayıf manyetik özellikli parçacıkların bile ayırımını sağlayan süperiletken manyetik separatörlerin çeşitli sanayi dallarında kullanımı artmıştır. Bütün bu incelemelerde, manyetik filtre matris elemanı olarak plakalar, çubuklar, çelik yünler ve teller gibi ferromanyetik malzemeler kullanılmıştır. 1960'lı yılların sonundan itibaren Almanya'da ''Kraftwerk Union'' firması tarafından elektrik santrallerindeki proses sularını demir bileşenli parçacıklardan temizlemek için ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş olan solenoit tipli manyetik filtreler ile laboratuvar ve sanayi ölçekli deneyler yapılmaya başlanmıştır. İlk manyetik ayırma uygulamalarından olan 1960 yıllarında kaolin kilinin arıtımı, yüksek alan süperiletken magnetler kullanılarak sağlanmıştır [2,13].

Mikron boyutlu parçacıkların taşıyıcı ortamlardan temizlenmesinin ilk kuramsal ilkeleri ve uygulamalarından biri 1973 yılında Watson tarafından sunulmuştur. Demir oksit karışımlarının, manyetik ayırma yöntemiyle temizlenmesinin ilk sonuçları ise Latour ve Kolm tarafından [11], 1975 yılında sunulmuştur. Yaptıkları bu çalışmada, su arıtımında manyetik ayırmanın etkinliği araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamındaki manyetik ayırma yöntemiyle, sudan istenmeyen safsızlıkların ayrılmasında, Fe (III) ve Al (III) koagulantları, katalizör gibi kullanılmıştır. Manyetik ayırma işlemi, manyetik süspanse maddelerin tümünü ayırmak için kullanılabilecek etkin bir proses olduğu gösterilmiştir.

Çeşitli sanayi alanlarında manyetik filtrasyon işleminin yapı özelliklerinin ve kuramsal temellerin kapsamlı şekilde incelenmesi ise 1978 yılında Sandulyak tarafından yapılmıştır. Manyetik filtrasyon işleminin birçok endüstri alanında uygulanması son 35 yılda yaygınlaşmıştır.

Manyetik ayırma işlemiyle ilgili 1974 yılından günümüze kadar yapılan önemli kuramsal çalışmaların bir kısmı aşağıda verilmiştir:

Oberteuffer [8], 1974 yılında yaptığı çalışmada, manyetik ayırma ilkeleri, cihazları ve uygulamaları üzerine kapsamlı bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, ızgara, drum ve manyetik parçacıkların tutunma bölgesi; laboratuvar ölçekli manyetik ayırıcılar ve çeşitli yüksek gradiyentli manyetik ayırma cihazları; çoğu ticari açıdan önemli olan cihazların ve manyetik ayırıcıların fiziksel ilkeleri ortaya konulmuştur. Ayrıca, manyetik ayırma işleminin avantajları, kullanım alanları, manyetik ayırma işleminin fiziği ve kalite kontrolü gibi konuları da bu çalışmanın kapsamında incelenmiştir.

Khalatalla [12], 1976 yılında yaptığı çalışmasında ikinci tür manyetik ayırma olarak değerlendirdiği manyetogravimetrik, manyetohidrostatik ve manyetohidrodinamik ayırma yöntemlerinin ilkelerini açıklamıştır. Bu manyetik ayırma yöntemleri, parçacığın manyetik alınganlığına dayanan birinci tür manyetik ayırma yönteminin dışında, ikinci tür manyetik ayırma yöntemi olarak değerlendirilmiştir. Bu ikinci tür bir manyetik ayırma yöntemleri, ayırma ortamının manyetize olduğu gravite ayırma yöntemlerinin yeni bir türü olarak ortaya konulmuştur. Manyetogravimetrik ayırma yönteminde, ferromanyetik ve ferrimanyetik maddelerin koloidal çözeltisi (manyetik akışkan) ayırma ortamıdır. Manyetohidrostatik ayırma yönteminde, ayırma ortamı paramanyetik bir tuz çözeltisidir. Manyetohidrodinamik ayırma yönteminde ise elektrolitik bir çözelti, ayırma ortamı olarak kullanılmıştır.

Sandulyak [10], 1988 yılında manyetik filtrasyon yöntemiyle sıvıların temizlenmesi hakkında bir kitap yayınlamıştır. Bu kitapta, mıknatıslanmış dolgulu yataklara sahip filtrelerde, manyetik ayırma işlem mekanizmalarının ortak modelleri sunulmuştur.

Alizade ve arkadaşlarının [14], 1997 yılında yaptıkları çalışmada, içinde manyetik tanecikler bulunan ortamların elektromanyetik filtrelerle temizlenmesi işlemi için en uygun işletme parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, manyetik parçacıkların giriş derişimi, manyetik alan şiddeti, filtre uzunluğu, süspansiyonun non-newtonian özelliği ve akış hızının artmasıyla manyetik parçacık tutunma oranının azaldığı belirlenmiştir. Endüstriyel sıvı ve gazlardan hem manyetik taneciklerin hem de elektrik yüklü türlerin uzaklaştırılması için manyetik ve elektrik alanların birlikte kullanılmasının daha yararlı olduğu görülmüştür.

Watson ve Younas [5], 1998 yılında yaptıkları çalışmada manyetik ayırma işleminde kalıcı magnet olarak kullanılan süperiletken disklerin, geleneksel kalıcı magnetlerden daha güçlü manyetik alan üretilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada,

manyetik ayırma verimi üzerine süper iletken disklerin konfigürasyon sayısının etkisi gösterilmiştir. Süperiletken kalıcı magnetin kullanıldığı seperatörlerde, manyetize disk sayısının önemli olduğu belirlenmiştir.

Abbasov ve Ceylan [15], 1999 yılında manyetik filtre performansı üzerine hız dağılımının etkisi üzerine kuramsal bir çalışma sunmuştur. Bu çalışmada sunulan modelde, Newtonian veya zayıf non-newtonian sıvıların manyetik filtrasyon performansının hız dağılımı ile değişimi incelenmiştir. Ayrıca filtre performansı üzerine viskozitenin önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Akım davranış indeksi (n) 0,7-1,2 arasındaki değerlerde, manyetik filtrasyon verimi için önerilen model ile deneysel verilerin iyi uyuştuğu görülmüştür.

Abbasov ve arkadaşlarının [16], 1999 yılında yaptıkları çalışmada spiral ferromanyetik granüller içeren yüksek gradiyentli manyetik filtrelerin performans karakteristikleri boyutsuz parametreler cinsinden belirlenmiştir. Reynolds sayısındaki artışın doyma yarıçapının azalmasına neden olduğu görülmüştür.

Abbasov ve arkadaşları [17], 1999 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik filtreler için deneysel verilerle iyi uyuşan genelleştirilmiş bir model sunmuştur. Bu çalışmada türetilen modelde yer alan sıvı, gaz ve buhar ortamların kalite faktörünün, süspansiyon yoğunluğu, parçacık boyutu, granül çapı ve filtreleme hızı ile ilişkisi verilmiştir.

Herdem ve arkadaşlarının [18], 1999 yılında yaptıkları çalışmada laminer akım koşullarında eksenel yönde manyetik filtrelerdeki filtre empedansı ve filtrasyon etkinliği tanımlanmıştır. Bu çalışmada, filtre matris elemanı olarak kullanılan tellerden akan süspansiyonun akış profili Kuwabara-Happel hücre modeli ile belirlenmiştir. Bu model, yüksek gradiyentli manyetik filtre kuramında ve uygulamasında önemli bir başka parametre olan spesifik filtre empedansı için doğru bir analitik ifade vermiştir. Eksenel manyetik filtrelerin etkinliğini veren laminer akım modelinin, parçacık tutunma oranının sıvı özellikleriyle ilgili olduğunu göstermiştir.

Abbasov [19], 2001 yılında yaptığı çalışmada mıknatıslanmış dolgulu yatakların filtrasyon prosesini kuramsal olarak incelemiştir. Bu çalışmada, manyetik filtrasyonun kuramsal modeli ile birikim ve ayrılma katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca, manyetik filtrasyonda temizleme veriminin zamanla değişiminin, filtrasyon prosesinin başlangıç

periyotları için sabit olduğu, ancak filtrasyon işleminin sonlarında zamanla azaldığı görülmüştür.

Ebner ve Ritter [20], 2001 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik filtrede, etkin tutunma kesiti için yeni bir korelasyon önermişlerdir. Yüksek gradiyentli manyetik ayırma sisteminin tasarımı, optimizasyonu ve modellenmesinde, bu yeni korelasyonun literatürdeki modellerden ve korelasyonlardan daha kullanışlı olduğu gösterilmiştir. Bu korelasyon ile hem boyutu hem de manyetik alınganlığı fazla olan parçacıklardan oluşan süspansiyonun yüksek gradiyentli manyetik ayırma işlemi modellenmiştir. Bu korelasyonun, heterojen sistemlerin modellenmesini kolaylaştırdığı görülmüştür.

Abbasov ve Sarımeşeli [6], 2002 yılında yaptıkları çalışmada gözeneklerdeki hız dağılım profili ile manyetik filtrasyondaki parçacık tutunma yarıçapı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, modifiye Kuwabara-Happel hücre modeli kullanarak küre ve silindirik tellerden oluşan dolgulu yatak gözeneklerindeki akış hız profili belirlenmiştir. Dolgulu yatak gözenekliliği ve gözenek geometrisi ile akış hız değişimi ortaya konmuştur. Gözeneklerdeki parçacıkları etkileyen sürükleme kuvveti ve manyetik filtrede tutunan parçacıkların yarıçapı için bağıntılar elde edilmiştir. Ferromanyetik granüllerden oluşan dolgulu yataklara sahip manyetik filtrede gerçekleşen filtrasyon mekanizmasının, akış hız profil değişimine ve manyetik alan karakterine bağlı olduğu gösterilmiştir.

Abbasov [2], 2002 yılında yayınladığı kitapta endüstriyel sıvı ve gazların manyetik karışımlardan mıknatıslanmış dolgulu yataklar ile temizlenmesi işleminin yeni ve etkin yöntemlerine ait güncel problemleri değerlendirmiştir. Mıknatıslanmış gözeneklerde süspansiyonların filtrasyonu işleminin kuramsal ilkeleri, uygulamaları ve modellenmesi incelenmiştir. Ayrıca bu kitapta, elektromanyetik filtrasyon işleminin, laboratuvar ve çeşitli endüstri alanlarındaki uygulamaların sonuçları sunulmuştur.

Abbasov ve Rüzgar [21], 2005 yılında yaptıkları çalışmada manyetik oksit parçacıkları, ferrokarbon parçacıkları, manyetik polimer parçacıkları gibi manyetik özellikli mikroparçacıkların hedef bölgesindeki yüksek gradiyentli manyetik alanda tutularak ayrılması için yeni bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmada, mikron boyutlu manyetik parçacıkların hedef taşıyıcı olarak etkinliğinin arttığı ve ayrıca yüksek gradiyentli manyetik alanların, küre veya ince teller kullanılarak oluşturulabileceği gösterilmiştir. Bu yöntem,

parçacıkların, kan damarlarının hedef bölgelerine taşınması gibi tıbbi ve biyolojik nesnelerin manyetik hedeflendirilmesinde kullanılması açısından değerlendirilmiştir.

Sarıtaş ve arkadaşlarının [22], 2007 yılındaki yaptıkları çalışmasında endüstriyel sıvılarda bulunan mikron boyutlu ferromanyetik parçacıkların temizlenmesi için bir manyetik filtre tasarlanmıştır. Tasarlanan manyetik filtre için 7 mm çapında manyetik özellikli kürelerle bir filtre matrisi oluşturulmuştur. Hem endüstriyel sıvının temizlenmesi hem de filtre matrisinin temizlenmesi için bulanık mantık yöntemiyle kontrol tasarlanmıştır. Bu kontrol ile sıvı hızı veya sıvının içersindeki manyetik özellikli parçacık miktarı artarken filtrede bobinine uygulanan akımın arttığı buna bağlı olarak da manyetik akının arttığı görülmüştür. Optimum manyetik akı kontrolü ile filtre performansı maksimize edilmiştir. Yapılan bu kontrol tasarımı, filtre matrisinin çok uzun süre tekrar tekrar kullanılması sağlamaktadır. Endüstriyel sıvıların akış hızı ve içerisindeki parçacık miktarına göre manyetik akı kontrol edildiğinden enerji tasarrufu sağlanmıştır. Yapılan sabit kontrole göre, daha kararlı ve güvenli bir temizlik sağlandığı ortaya konmuştur.

Özkan ve arkadaşlarının [23], 2007 yılında yaptıkları çalışmada deneysel ve kuramsal olarak ifade edilebilen manyetik filtre performansı-zaman ilişkisi yapay zeka tekniklerinden ANFİS kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Bu model, kullanılarak manyetik filtrasyon işlemi tanımlanmış ve filtre performansı tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, manyetik filtrasyon işleminin optimizasyonu, kontrolü ve yeni filtre tasarımı için kullanılabilecek çözümler sunmaktadır.

Abbasov [24], 2007 yılında mıknatıslanmış granüler yataklı manyetik filtrasyonun temel ilkeleri ve filtre performansı üzerine bir çalışma yapmıştır. Ferromanyetik küreler, metal talaşlarından oluşan dolgulu yatakların manyetik özellikleri ve manyetik parçacıklar üzerine gözeneklerdeki manyetik alanın etkisi değerlendirilmiştir. Birikim profili ve parçacıkların tutunma bölgeleri, bu bölgedeki akım hızının varyasyonu ve tutunan parçacıkların yarıçapının analitik ifadeleri sunulmuştur. Manyetik filtrasyon verimi üzerine proses parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Manyetik filtrasyon sisteminin manyetik, geometrik ve hidrodinamik parametrelere dayandığı gösterilmiştir. Filtre gözeneğinde biriken parçacık hacmi çok düşük olduğundan, yatak gözenekliliğinin değişimi üzerine parçacık etkisinin ihmal edilebileceği gösterilmiştir.

Yıldız ve arkadaşları [25], 2010 yılında yaptıkları çalışmada elektromanyetik filtre ile manyetik alanda manyetize olan mikron boyutlu parçacıkların ayırım etkinliği üzerine proses parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Elektromanyetik filtrede manyetik özellikli demir bilşenlerinin uzaklaştırılmasının, filtreleme hızının ve yapay pas süspansiyonun viskozitesinin artması ile azaldığı görülmüştür. Ayrıca filtre matris elemanları olarak kullanılan çelik bilyelerin çapı, ortam pH'ı, çevrim sayısı ile elektromanyetik filtrasyon verimini değiştirmiştir. Elektromanyetik filtrasyon işleminin geri döngülü olarak gerçekleştirilmesi ile işlemin daha ekonomik olması nedeniyle elektromanyetik filtreleme yönteminin, dispers fazdaki mikron boyutlu ve düşük derişimdeki korozyon ürünlerinin su ortamından uzaklaştırılmasında kullanılmasının büyük avantaj sağlayacağı vurgulanmıştır.

Karadağ ve arkadaşlarının [26], 2010 yılında yaptıkları çalışmada çapları aynı olan ferromanyetik bilyelerden ve çapları farklı olan ferromanyetik bilye karışımlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Farklı çaplara sahip olan bilyelerin karışımı kullanılarak dolgulu yatağın dolgu faktörünün değişim aralığı genişletilerek hacimsel dolgu faktörünün dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrisi üzerine etkisi belirlenmiştir. Ferromanyetik tel ve talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların da mıknatıslanma özellikleri değerlendirilmiş, dolgulu yatağın porozitesinin değişiminin yatağın mıknatıslanma özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla ferromanyetik bilyelerin ve plastik kürelerin karışımından oluşturulmuş dolgulu yataklar kullanılmıştır. Dış homojen manyetik alanın büyük değerinde ($H \geq 150$ kA/m) ferromanyetik dolgulu yatakların ortalama mıknatıslanma eğrisi belirlenmiştir.

Manyetik ayırmanın uygulamaları ile ilgili 1976 yılından günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalar ise aşağıda kronolojik sıra ile verilmiştir:

Kolm [27], 1976 yılında yaptığı çalışmada kömürün manyetik desülfürizasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada kömürün yanma sürecinde ortaya çıkan kirliliğin giderilmesinde manyetik filtrenin kullanılabileceği gösterilmiştir. Manyetik filtrelerle, kömürden, ferromanyetik özellik gösteren bazı sülfatların ve organik sülfürler gibi kükürtlü bileşenlerin uzaklaştırılmasında fayda sağlanacağı ortaya konulmuştur.

Gooding ve arkadaşları [28], 1978 yılında yaptıkları çalışmada bir partikül gaz sisteminde yüksek gradiyentli manyetik filtrenin modellemesi ve uygulaması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalar, yüksek gradiyentli manyetik filtre kullanımı ile baca

gazlarından manyetik partiküllerin ayrılması üzerine yapılmıştır. Endüstriyel yüksek gradiyentli manyetik ayırmada, filtre matrisinde biriken parçacık miktarını arttırmak ve partikül emisyonunu azaltmak için manyetik kuvvetlerin yararlı olduğu gösterilmiştir. Yüksek gradiyentli manyetik ayırmanın, nispeten yüksek alınganlıklı parçacık emisyon kontrolünde ekonomik ve etkin bir yol olduğu görülmüştür.

Collan ve arkadaşları [29], 1982 yılında yaptıkları çalışmada manyetik filtrasyon kuramından yararlanarak, manyetik filtre tasarımı için optimum koşullar belirlenmiştir. Bu çalışmada, deneysel sonuçlarla modelin iyi uyuştuğu görülmüştür. Çelik endüstrisi atık suyunun manyetik filtrasyonunda, filtre boyutlarının bir fonksiyonu olarak filtrasyon giderleri hesaplanmıştır. Bu hesaplar, atık suyun manyetik filtrasyon işleminin ekonomik bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Takayasu ve arkadaşları [30], 1984 yılında yaptıkları çalışmada mikronaltı boyutta manyetik parçacıklardan oluşan koloidal bir sistemin manyetik ayırımını tarif etmişlerdir. Dış manyetik alan gradiyenti etkisinde, manyetik akışkanın manyetik duyarlığının, manyetik alan gradiyentiyle değiştiği görülmüştür. Paramanyetik tuzlar ve manyetik mikronaltı boyutlu parçacıklardan oluşan koloidal sistem, manyetik alan gradiyentinin düşük olduğu manyetohidrostatik ve manyetogravimetrik yöntemi ile manyetik parçacıkların ayırımı sağlanmıştır. Bu çalışmada, parçacığın yoğunluğu, şekli ve boyutundan bağımsız olan manyetik alınganlığa göre ayırma sağlanmıştır. Yüksek gradiyentli manyetik ayırma verimini arttırmak için paramanyetik tuz çözeltisi kullanılmıştır. Manyetik ayırma veriminin, manyetik akışkanın hızıyla azaldığı görülmüştür.

Grady ve arkadaşları [31], 1986 yılında yaptıkları çalışmada ferromanyetik akışkanların manyetik filtrasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada, homojen manyetik alanın akışkanlarda biriken parçacık derişimini değiştirdiği görülmüştür. Ferromanyetik akışkanların alan gradiyentinin kararlılığını arttırmak için yüksek gradiyentli manyetik ayırma tekniğinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Haque ve arkadaşlarının [32], 1988 yılında yaptıkları çalışmada sabit filtreleme hızında çelik tozlardan oluşturulan filtreye beslenen sudan mikron boyutlu hematit parçacıkların ayırma verimi, değişik pH çalışma koşulları altında incelenmiştir. Bu çalışmada filtrasyon veriminin, filtrenin doyma değerine kadar manyetik alan şiddeti ile

arttığı ve çözelti pH'ı ile önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Manyetik ayırma veriminin, filtre matris boyutunun artışı ve manyetik alan şiddetinin azalmasıyla düştüğü gösterilmiştir.

Emary [33], 1989 yılında nükleer güç reaktörü radyoaktif atık suyunun manyetik filtrasyonu üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, Co^{60}, Mn^{54}, Fe^{59} ve Ru^{103} gibi önemli radyonükleitlerin (füzyon ürünleri) % 95'den daha yüksek verimle ayrılabileceğini göstermiştir. Ön kaplamalı veya kartuş tip filtreler gibi alternatif ayırma sistemlerine kıyasla manyetik filtrelerin ayırma veriminin birkaç kat fazla olması, kurulum maliyetinin ve işletme giderlerinin düşük olması sebebiyle ekonomik yönden daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Geber ve Bohem [34], 1991 yılında yaptıkları çalışmada vakumda açık gradiyentli manyetik ayırma işlemi üzerine basınç ve parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. Atmosferik basınç altında, parçacık boyutunun artması ile parçacık kararlılığının azaldığı ve 14 Torr'dan daha düşük hava basıncında parçacığın tamamen absorbe edildiği ortaya konmuştur. İndirgenmiş hava basıncında ise açık gradiyentli manyetik ayırma prosesinin kalitesinin ve parçacık geri kazanımının önemli derecede arttığı görülmüştür.

Collan ve Valo [35], 1993 yılında yaptıkları çalışmada suda süspanse olmuş submikron boyutlu radyoaktif Austenitic çelik parçacıkların manyetik filtrasyonunun, manyetik hıza bağlı olduğu gösterilmiştir. Manyetik filtrasyon etkinliği üzerine akım hızı (v_o) ve manyetik hız (v_m) etkisi karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda, manyetik filtrasyonun $v_m > v_o$ olduğunda etkin, $v_m < v_o$ olduğunda etkin olmadığı görülmüştür.

Li ve Watson [36], 1994 yılında yaptıkları çalışmada döngüsel manyetik ayırma yönteminin temel ilkelerini sunmuştur. Döngüsel manyetik ayırma yöntemi üzerine uygulanan manyetik alan, filtrasyon hızı ve filtre matris dizayn parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Yüksek filtrasyon hızında, döngüsel manyetik ayırma yönteminin yüksek gradiyentli manyetik ayırma yönteminden daha etkin olması ve daha kaliteli manyetik ürün vermesi nedeniyle manyetik ayırma işleminin ticari uygulama alanını genişletebileceği ifade edilmiştir.

Franzreb ve arkadaşları [37], 1998 yılında yaptıkları çalışmada yeni karousel manyetik ayırıcının kurulumunu ve kullanımını tarif etmiştir. Bu çalışmada incelenen karousel manyetik separatör, sudan manyetik parçacıkların sürekli ayırımı için

kullanılmıştır. Bu karousel manyetik separatörün ilk protitipi, demir fosfat ve demir hidroksit içeren magnetitin ayırımında sınanmıştır. Manyetik ayırma veriminin, filtrasyon hızı ve magnetit/fosfat oranıyla değiştiği ortaya konmuştur. Döngüsel yapı ve kalıcı mıknatısın kullanımının, enerji giderlerini azalttığı gösterilmiştir.

Xi ve arkadaşları [38], 1998 yılında yaptıkları çalışmada suda oluşturulan süspansiyonda magnetitin yüzey özelliğini sistematik olarak araştırmıştır. Yüksek değerli katyonların olmadığı ortamda, magnetitin zeta potansiyelinin asidik çözeltide pozitif olduğu gösterilmiştir.

Franz ve Franzreb [39], 1998 yılında yaptıkları çalışmada bir floküsyon tankında oluşturulan magnetit ve flok karışımından, magnetitin ayrılması için manyetik filtrasyon yönteminin uygulanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, bakır hidroksit flok yataklarında, magnetitin tutunma yarıçapı, tek bir manyetize tel kuramıyla hesaplanarak filtre performansı belirlenmiştir.

Gillet ve Diot [40], 1998 yılında yaptıkları çalışmada ağır metal hidroksitleri içeren manyetik flokların çöktürülmesi incelenmiştir. İşlenen çözelti, flokların olduğu çelik tel matrisinden oluşan süperiletken separatörden geçirilmiştir. Filtre matrisi doyduğunda, tuzaklanan floklarda birikerek saflaştırılan çözelti separatörden ayrılmıştır. Bu ayırma yöntemi ile ağır metal iyonlarının % 85 üzerinde ayrıldığı gösterilmiştir.

Prakash ve arkadaşlarının [41], 1999 yılında yaptıkları çalışmada seçici sodyum oleat ile sentetik magnetitten oluşan koloidal bir magnetit kaplama kullanarak kalsitin manyetik ayırımı araştırılmıştır. Manyetik ayırma verimi üzerine magnetit kaplama pH'sı, magnetit derişimi, manyetik alan yoğunluğu ve parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. Manyetik ayırma işleminde sodyum oleat ile işlenmiş mikron boyutlu magnetitin, doğal magnetitten daha iyi bir kaplama ajanı olduğu bulunmuştur. Düşük manyetik alan yoğunluğunda, düşük derişimli oleat ile işlenmiş magnetit kullanılarak kalsitten gangın etkin bir şekilde ayrılabileceği gösterilmiştir.

Takayasu ve arkadaşları [42], 2000 yılında yaptıkları çalışmada kandan beyaz kan hücreleri ve plazmanın, azot gazı ortamında, membran ve yüksek gradiyentli manyetik ayırma yöntemi kullanılarak ayrılabileceği gösterilmiştir. Tel argümanların çeşitli şekillerde düzenlenmesi ile ayırma veriminin arttırılabileceği öngörülmüştür.

Franzreb ve Holl [43], 2000 yılında yaptıkları çalışmada kalıcı mıknatıslar kullanarak yüksek gradiyentli manyetik filtre ile fosfat ayırımını araştırmıştır. Manyetik ayırma veriminin, filtreleme hızındaki azalışla önemli derecede arttığı görülmüştür. Maliyet hesaplamaları, manyetik ayırma yönteminin, fosfat ayırımı için kullanılan katı-sıvı ayırma metotları, kum filtreleri veya mikro elekler gibi ayırma sistemlerine alternatif olduğunu göstermiştir. Ayrıca manyetik filtrasyonun işlem süresinin kısa olması ve ekipmanın az yer kaplaması gibi avantajlarından dolayı gelecekte hem belediye hem de endüstriyel atık su işletimi için daha geniş çapta uygulanabilecek bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Kumakura ve arkadaşları [44] , 2001 yılında yaptıkları çalışmada manyetik ayırma yöntemi ile ince hematit parçacıklar içeren çamurun temizlenmesine çalışılmıştır. Manyetik filtre matris elemanı olarak ferromanyetik çelik fiberler kullanılmıştır. Manyetik filtrasyon işlemi, 20-40 K'de işletilebilen Bi-2223 magnetle yapılmış ve bu magnetin kullanımı ile hematit parçacıkların hemen hemen %100'ünün çamurdan ayrıldığı gösterilmiştir.

Cotten ve arkadaşları [45], 2002 yılında yaptıkları çalışmada basitleştirilmiş varsayımlar ve akım limitlerinin dikkate alındığı, nano düzeyde manyetik ayırma modelini önermiştir. Uygulanan manyetik alan gerilimi, akım hızı, matris materyalinin boyutu ve bileşimi gibi giriş parametreleri, Peclet sayısı ve çeşitli kirleticiler için parçacık tutunma boyutları gibi çıkış parametreleri arasındaki ilişkiler sunulmuştur. Submikron boyutlu parçacıkların uygun akım sisteminde manyetiksel olarak etkin bir şekilde ayrılabileceği gösterilmiştir.

Karapınar [46], 2003 yılında yaptığı çalışmada manyetik tohumlama ve yüksek gradiyentli manyetik ayırma yöntemi ile atık sudan ferrihidritin ayırımını incelemiştir. Bu çalışmada, magnetit minerali ile ferrihidritin tohumlanması ve yüksek gradiyentli manyetik ayırma verimi üzerine işletme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Manyetik tohumlama tekniği ile birlikte yüksek gradiyentli manyetik ayırma yöntemi, yüksek performans, yüksek kapasite ve düşük yatak boşluğu avantajları sayesinde, adsorpsiyon temelli işlem teknikleriyle ayırmadaki zorlukların üstesinden gelebileceği gösterilmiştir. Yüksek demir magnetit oranlarında, çökeltinin manyetizasyonu nedeniyle manyetik ayırma performansında azalma gözlenmiştir. Maksimum tohumlamanın ferrihidritin zeta potansiyelinin sıfır olduğu pH aralığında gerçekleştiği görülmüştür.

Yokoyoma ve arkadaşları [47], 2003 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik ayırmada kullanılan süperiletken bulk magnetler incelenmiştir. Ferromanyetik tellerden oluşturulan manyetik filtreye α-hematit (Fe_2O_3) ince tozla karıştırılan çamur beslenmiştir. Bu çalışma sonucunda, Fe_2O_3' un hacimsel debi artışı ile manyetik ayırma veriminin % 99'a kadar arttığı görülmüştür.

Karapınar [48], 2003 yılında yaptığı çalışmada atık sulardan fosfat uzaklaştırılmasında manyetik aşılama tekniğinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Manyetit minerali içeren çözeltilerde kalsiyum fosfat çökeleğinin oluşumu geniş bir pH aralığında incelenmiştir. Çözelti pH'ının, çökelek oluşumu ve manyetik ayırma verimini etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada, manyetik ayırma yöntemi ile fosfatın yaklaşık % 70'i uzaklaştırılmıştır.

Künkül ve Abbasov [49], 2004 yılında yaptığı çalışmada mikron boyutlu korozyon ürünlerinin manyetik filtrasyon ile ayırımı incelenmiştir. Manyetik filtrasyon performansı üzerine, süspansiyonların reolojik özelliklerinin etkisi belirlenmiştir. Manyetik filtrasyon veriminin, süspansiyon viskozitesi ile azalırken, giriş derişimi ve manyetik alan yoğunluğu ile arttığı gözlenmiştir.

Song ve arkadaşlarının [3], 2004 yılında yaptıkları çalışmada nükleer santrallerden radyoaktif korozyon ürünlerini ayırmak için mıknatısla oluşturulan bir manyetik filtre sistemi geliştirilmiştir. Bu manyetik filtrenin veriminin, manyetik duyarlık ve parçacık derişimi ile artarken, filtreleme hızı ile azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca magnet dönme hızının, işletim ve ayırma verimini iyileştirdiği ortaya konmuştur. Manyetik filtrasyonun, mikro-nanofiltrasyon ve membran-iyon değiştiriciler için ön filtrelerle birlikte nükleer güç santrallerinde buhar jeneratör sistemlerine ve kimyasal hacim kontrol sistemine uygulanabileceği gösterilmiştir.

Sato ve arkadaşlarının [50], 2004 yılında yaptıkları çalışmada manyetik filtrasyon verimi üzerine çözeltideki dispers parçacıkların zeta potensiyelinin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, zeta potensiyeli ile süspansiyon geri kazanımının azaldığı gösterilmiştir. Zeta potansiyeli farkının en fazla olduğu pH değerinde, en yüksek Eu_2O_3 ve NiO ayırma verimi elde edilmiştir.

Ebner ve Ritter [51], 2004 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik ayırma işleminde kullanılan iki farklı matris elemanının tuzaklama etkinliğini

karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, %80 magnetit-silica bileşimine sahip matris elemanı ile çelik yün matris elemanı kullanılmıştır. Sulu bir çamurun demir oksitlerden ayrılması üzerine derişim, akım hızı ve manyetik alan yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. %80 magnetit-silica bileşimli matris elemanının, çelik yün matris elemanından daha ucuz ve manyetik doygunluğunun beş kat daha az olduğu belirlenmiştir. Böylece, %80 magnetit-silica bileşimli matris elemanı kullanımının daha avantajlı olduğu ileri sürülmüştür.

Künkül ve arkadaşlarının [52], 2004 yılında yaptıkları çalışmada manyetik filtre performansı üzerine süspansiyon pH'ı, filtreleme hızı, manyetik alan şiddeti ve filtre matris eleman çapının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Manyetik filtre performansının, süspansiyon pH ile etkilenmediği, filtre matris eleman çapı ve filtreleme hızıyla azaldığı, diğer taraftan manyetik filtre performansının, filtrenin doyum değerine kadar dış manyetik alan şiddeti ile arttığı görülmüştür.

Svoboda [53], 2004 yılında yayınladığı kitapta cevher hazırlamada yaygın olarak kullanılan manyetik separatörlerin kuramsal ilkeleri ve uygulamaları açıklanmıştır. Bu kitap, manyetik separatorlerin kuramı, tasarımı ile mineral endüstrisi, geri dönüşüm, çevre ve biyomedikal gibi alanlardaki uygulamalarını içermektedir.

Hartikainen ve arkadaşları [13], 2005 yılında yaptıkları çalışmada çelik değirmen atık suyu ve yapay atık suyunun manyetik ayırma yöntemiyle saflaştırılmasını incelemiştir. İzodinamik açık gradiyentli manyetik ayırıcılar kullanılarak yapay atık sudan % 82 Cr ve %55 Mo ayrılmıştır. Ayrıca ayırma veriminin manyetik alan yoğunluğu ile lineer olarak azaldığı belirlenmiştir.

Okada ve arkadaşlarının [54], 2005 yılında yaptıkları çalışmada sıvı akımındaki parçacıkların yüksek gradiyentli manyetik ayırma işlemi için CFD modeli geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak, yüksek gradiyentli manyetik ayırma verimi üzerine akım, manyetik kuvvet ve parçacık difüzyon etkisi simüle edilmiştir. İşlenmiş akışkanın yüksek yoğunluklu manyetik alan ve düşük filtreleme süresi ile çok daha kompakt sistemlere uygulanabildiği gösterilmiştir. Model ile akışkan akımı, manyetik alan ve parçacık derişim dağılımları gösterilmiştir. Bu simülasyonun yüksek gradiyentli manyetik ayırma sistemlerini geliştirmek için kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Nishijima ve Takeda [55], 2006 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik ayırma yöntemiyle kâğıt fabrikası atık suyunun saflaştırılması incelenmiştir.

Yüksek manyetik alan yoğunluğunda, atık suyun saflaştırılması için NbTi tipi solenoit magnetle COD derişimi 40 ppm altına düşürülmüştür. Manyetik ayırma işleminin kurulum maliyeti, geleneksel filtrasyon işleminin başlangıç fiyatının 1/6'sı ve işletme giderlerinin yaklaşık yarısı kadar olduğu görülmüştür.

Tsouris ve arkadaşlarının [56], 2006 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik filtre ile paramanyetik koloidal parçacıkların ayırma verimi üzerine proses parametreleri ve surfaktan etkisi araştırılmıştır. Paramanyetik demir oksit (Fe_2O_3) parçacıkların süspansiyonu, surfaktan olarak kullanılan SDS ile işlenmiştir. Surfaktanla işlenmiş süspansiyon, elektromagnetin kutupları arasına yerleştirilmiş çelik yün filtre matrisi içeren bir kolondan geçirilmiştir. Manyetik ayırma verimi üzerine, manyetik alan yoğunluğu, akış hızı ve çelik tel çapının etkisi incelenmiş, hem surfaktan ile işlenmiş hem de işlenmemiş parçacıkların manyetik ayırma verimi karşılaştırılmıştır. Manyetik ayırma veriminin, uygulanan manyetik alan yoğunluğu ile arttığı buna karşın akım hızı ve kullanılan telin çapı ile azaldığı görülmüştür.

Okada ve arkadaşları [57], 2006 yılında yaptıkları çalışmada süperiletken magnet kullanarak 50 nm çaplı ferromanyetik nano parçacıkların yüksek gradiyentli manyetik ayırımını araştırmıştır. Bu çalışmada, tutunma oranı üzerine manyetik akı yoğunluğu, akım hızı ve mesh yapısının etkisi araştırılmıştır. Nano parçacıkların yüksek gradiyentli manyetik ayırma ile saflaştırılması işleminin, nanoteknoloji için yararlı olacağı gösterilmiştir. Yüksek manyetizasyon ve güçlü manyetik alanda, nano parçacıkların ayırma veriminin mesh sayısı ile arttığı buna karşın akım hızıyla azaldığı gösterilmiştir.

Stolarki ve arkadaşları [9], 2006 yılında laboratuvar ölçekli bir filtre pressinde ferromanyetik demir oksit parçacıkların (Fe_3O_4) press filtrasyon üzerine manyetik alan etkisini araştırmıştır. Deneysel ve kuramsal incelemelerde manyetik alan artışıyla, yoğun bir kek oluşumu sağlandığı görülmüştür. Filtrasyon prosesinin başlangıcında, 0,5-1,6 bar basıncında, filtrat akımında önemli bir artış gözlenmiştir. Filtrasyonun başlangıcında kek oluşumu, filtrasyon odasının non-manyetik tarafında azalırken, manyetik tarafta arttığı gözlenmiştir.

Ebner ve arkadaşlarının [58], 2007 yılında yaptıkları çalışmada yüksek gradiyentli manyetik ayırma yöntemi ile paramanyetik mikron boyutlu parçacıkların uzaklaştırılması, filtre çalışma kapasitesi ile ilgili deneysel ve kuramsal yöntemler sunulmuştur. Bu

çalışmada, dokuz farklı filtre matrisi ve iki tip mikron boyutlu manyetik parçacıkların çeşitli kombinasyonları kullanılmıştır. Filtre mesh alanı başına ayrılan parçacık kütlesinden yararlanarak filtre çalışma kapasitesi ve tel çapının etkisi incelenmiştir.

Mishimo ve arkadaşları [59], 2007 yılında yaptıkları çalışmada viskoz bir akışkandan ferromanyetik parçacıkların süperiletken manyetik ayırma yöntemiyle uzaklaştırılması üzerine çalışmışlardır. Ayırma verimi üzerine akım hızı ve manyetik alan etkisi incelenmiştir. Ayırma veriminin, parçacığın manyetik momenti ve manyetik filtrenin doyduğu dış manyetik alan değerine kadar arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, 1000 cp viskoz bir akışkan için bile % 90'a kadar ayırma etkinliği sağlandığı gösterilmiştir.

Alvaro ve arkadaşları [60], 2007 yılında yaptıkları çalışmada düşük derişimlerde ve mikron boyutlu demir oksit karışımının gaz fazından manyetik ızgaralarla filtrasyonu incelemiştir. Parçacık çapı, ızgara sayısı ve uygulanan manyetik alan ile filtrasyon veriminin attığı gözlenmiştir.

Mayer ve arkadaşlarının [61], 2007 yılında yaptıkları çalışmada biyoürün geri kazanımı, manyetik mikro-iyon değiştirici ve yüksek gradiyentli manyetik ayırma tekniğinin kullanıldığı bir model araştırılmıştır. Manyetik ayırma işleminin, yüksek proses hızlarında ve besleme akımında ön işlem gerektirmemesinden dolayı ham beslemeden proteinlerin izolasyonu için alternatif bir ayırma yöntemi olduğu gösterilmiştir.

Trinh ve arkadaşlarının [62], 2007 yılında yaptıkları çalışmada akışkanlar- dan 1µm altındaki boyutlarda olan paramanyetik parçacıkların, kalıcı magnet aktive edilmiş dört farklı manyetik hücre kullanarak manyetik ayırımı araştırılmıştır. Bu çalışmada, ayırma veriminin işlem süresi, çevrim sayısı ve uygulanan manyetik kuvvet ile artırılabileceği görülmüştür.

Trinh ve arkadaşlarının [63], 2007 yılında yaptıkları çalışmada filtre matris elemanı olarak mikro organizmalar manyetik boncuklara bağlanmış ve manyetik kuvvet etkisiyle bu boncuklar süspansiyondan manyetik parçacıkların ayrımı incelenmiştir. Bu çalışmada, manyetik hücre ayırımı üzerine ortalama kuvvet alan yoğunluğu, boncuk sayısı, boncuk boyutu ve çevrim sayısının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, magnet aktive edilmiş mikro organizmalar gibi fonksiyonlu yüzeyler kullanılarak ultra ince paramanyetik parçacıkların ayırımı için bir alternatif olduğu görülmüştür.

Murthy ve arkadaşlarının [64], 2007 yılında yaptıkları çalışmada elektro-koagülasyon yöntemiyle restoran atık suyunun kirleticilerden ayrılması sağlanmıştır. Bu çalışmada, Hindistan da bir restoran atık suyunun Al ve Fe olmak üzere iki farklı elektrotla elektrokoagülasyonu incelenmiştir. İletkenlik, COD, TDS ve bulanıklılık gibi çeşitli parametreler üzerine uygulanan voltaj ve elektroliz süresinin etkisi araştırılmıştır. 15-30 dk arasında, COD ayırımında %50-72 verim sağlanmıştır. Al elektrotun kullanılması durumunda daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Norrgran [65], 2008 yılında yaptığı çalışmada, seramik ve metalurjik bileşenlerin üretiminde kullanılan kimyasalların manyetik parçacıklardan temizlenmesinde manyetik filtre kullanımını araştırmıştır. Yeni magnet materyalleri ve devre tasarımları ile yüksek alan gerilimlerinde manyetik separatörler kullanılarak 50-75 μm parçacık boyutlu demir içerikli kirleticilerin yüksek oranda ayrılabileceği gösterilmiştir.

Yıldız ve Sarımeşeli [66], 2008 yılında yaptıkları çalışmada elektromanyetik filtrasyon ile dispers manyetik demir bileşiklerinin ayırımı incelenmiştir. Elektromanyetik filtrasyon verimi üzerine viskozite, manyetik alan yoğunluğu ve çevrim sayısının etkisi incelenmiştir. Elektromanyetik filtrasyon temizleme veriminin, dış manyetik alan yoğunluğu ve çevrim sayısı ile arttığı buna karşın viskozite ile azaldığı görülmüştür.

Mishima ve arkadaşları [67], 2009 yılında yaptıkları çalışmada HTS bulk magnet kullanıldığı, manyetik tohumlama ve manyetik filtreden oluşturulmuş yüksek hızlı manyetik filtrasyonu ile atık yıkama sularının saflaştırılmasına çalışılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen manyetik sistem sayesinde COD derişimi 250-500 ppm'den 100 ppm'e düşürülmüştür.

Eskandarpour ve arkadaşları [68], 2009 yılında yaptıkları çalışmada süperiletken magnetlerin kullanıldığı manyetik filtrelerin çalışma performansı ve tasarımı hakkında bilgi verilmiştir. Bu çalışmada, günümüze kadar üzerinde çalışılmış en önemli manyetik filtrasyon teorileri ve pratik uygulamaları sunulmuştur.

Yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarından görüldüğü gibi manyetik filtrasyonun optimizasyonu ile ilgili çalışmalar çok yönlü olmasına karşın filtrasyon verimi üzerine proses parametrelerinin etkileri farklıdır. Özellikle dış mıknatıslayıcı sistem, pH, filtre matris elemanın geometrisi, filtre matris eleman boyutu, deterjanlı suların elektromanyetik filtrasyonla temizlenmesi ve mıknatıslanmış dolgulu yatak özelliklerinin filtrasyon

verimine etkisi literatürde yeterince açıklanmamıştır. Bu konudaki literatür çalışmalarına katkıda bulunmak için özel olarak dış mıknatıslayıcı sistem ile filtre tasarlanarak, mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özelliğindeki ve parametre seviyelerindeki değişimin filtrasyon verimine etkisi incelenmiştir.

Elektromanyetik filtrasyonun geniş spektrumda sanayi uygulamaları için hem kontrolünün hem de optimizasyonunun geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, yapılan bu tez çalışmasında elektromanyetik filtrasyon veriminin maksimizasyonunu sağlayacak proses parametrelerinin optimum düzeyleri belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde elektromanyetik filtrasyonun deneysel optimizasyonuna yönelik bir çalışma bulunmadığından Nelder-Mead modifiye simpleks optimizasyon yöntemiyle deneysel optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan matematiksel modellerde filtrasyon verimi daha çok dört etken düzeyine bağlı olduğundan, Nelder-Mead modifiye simpleks yöntemi, beş etken düzeyine kadar yüksek performans sağlaması, deneysel hataların çok önemli olmaması ve bilgisayar ortamında kolayca yazılabilir olması gibi avantajları sebebiyle seçilmiştir. Diğer taraftan oluşturduğumuz non-lineer matematiksel model kullanılarak genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması yöntemiyle optimizasyon yapılmıştır. Elde ettiğimiz matematiksel model gibi üstel fonksiyonların global optimizasyonu için ideal olduğu için genetik algoritmanın kullanılması düşünülmüştür. Böylece, gerek matematiksel model üzerinden yapılan optimizasyon sonuçları gerekse deneysel optimizasyon ile elde edilen sonuçlar sınanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Elektromanyetik Alanın Temel Kavramları

2.1.1. Manyetizasyon

Elektrik alan, kütlesel çekim alanı nasıl kuvvet çizgileri ile tanınıyorsa, manyetik alanda çizgileri ile tanımlanır. Manyetik alan yoğunluğu veya manyetik indüksiyon B ile gösterilen vektörel bir niceliktir. Elektrik yüklü bir cismin çevresinde oluşturduğu elektrik alan gibi, bir mıknatıs veya içinden akım geçen bir telde çevresinde bir manyetik alan oluşturur. Bir manyetik alan bir elektrik alan gibi, doğrultuları her noktada B'nin doğrultusu olan manyetik alan çizgileri ile gösterilir ve bu çizgilerin sık olduğu yerde B'nin şiddeti büyük, seyrek olduğu yerlerde küçüktür.

Bir maddenin toplam manyetik alanı, maddenin mıknatıslanmasına ve ona uygulanan dış alana bağlıdır. Boşluğun manyetik alan yoğunluğu B_o ile gösterilir. Eğer ortama manyetik bir çekirdek madde konursa ve bu çekirdek maddenin oluşturduğu manyetik alan da B_m ise, bu kez oluşturulan toplam manyetik alan değeri $B=B_o+B_m$ olur. Mıknatıslanma vektörü M birim hacim başına manyetik momenti göstermek üzere $B_m=\mu_o M$ olarak ifade edilir. Buna göre maddedeki toplam alan,

$$B=B_o+B_m=B_o+\mu_o M \qquad 2.1.1$$

dir. B'yi veren tüm bağıntılarda boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı μ_o, I akım şiddeti ve akımın şekline bağlı geometrik çarpanlar bulunmaktadır. B'nin μ_o'a oranı manyetik alan şiddetini verir ve bu alan H sembolüyle gösterilir. Buna göre manyetik maddelerin bulunduğu bir ortam için,

$$H= \frac{\quad}{\quad} \qquad 2.1.2$$

olur. H manyetik alan şiddetinin SI deki birimi A/m'dir. μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği olup, 4 10^{-7} H/m değerine eşittir. Manyetik indüksiyon, manyetik materyaldeki manyetizasyona (M) bağlı olarak aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir. Manyetizasyon, birim hacim başına (V) dipollerin toplam manyetik momenti olarak tanımlanmıştır [53,69-70].

$$B = \mu_0 (H + M) \qquad 2.1.3$$

2.1.2. Manyetik Alınganlık ve Manyetik Geçirgenlik

Bir materyalin manyetizasyonu, üzerine etki eden manyetik alana bağlıdır. Manyetizasyon, çoğu materyal için çok yüksek değerleri hariç H ile orantılıdır ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$M = \kappa H \qquad 2.1.46$$

κ, manyetik alınganlık, maddenin manyetik özelliklerinden biridir. M ve H aynı boyutlara sahip olduğundan, κ boyutsuzdur. 2.1.3 ve 2.1.46 eşitlikleri birleştirilmesiyle aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir.

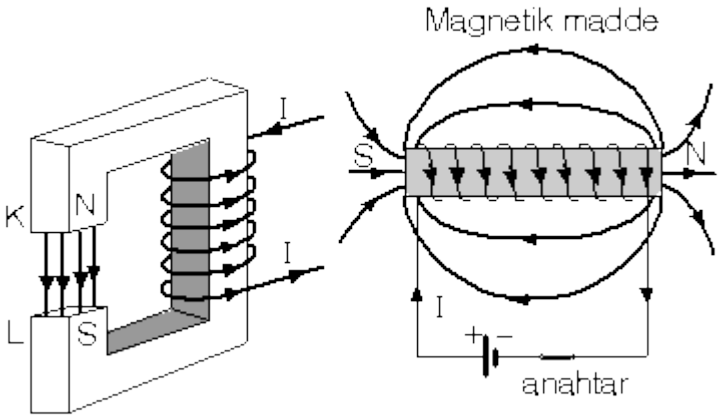
$$B = \mu_0 (1+\kappa) H = \mu_0 \mu_r H = \mu H \qquad 2.1.57$$

$$\mu_r = 1+\kappa \quad \text{ve} \quad \mu = \mu_0 (1+\kappa) \qquad 2.1.68$$

μ_r bağıl manyetik geçirgenlik olarak adlandırılır ve boyutsuzdur. Buna karşın μ manyetik geçirgenliktir ve H/m'nin birimine sahiptir. μ_r veya κ bir materyali karakterize etmek için kullanılır [2, 53, 69-70].

2.2. Elektromıknatıs

Manyetizma ile elektrik arasındaki ilişki, elektromıknatısları ortaya çıkarmıştır. Elektromıknatıslar, bir bobin ve iki parçadan oluşmuş demir çekirdek içerir. Bobinle birlikte çekirdeğe selonoid denir. Çekirdeklerden birisi sabittir, armatür denilen diğer parçası ise hareketlidir ve iki parça arasında bir hava aralığı vardır. Çoğunlukla hava aralığı, çekici kuvvet aralığı ile önceden belirlenen bir biçimde değişecek şekilde tasarlanır. Manyetik kuvvet çekicidir. Elektrik akımı geçirildiğinde, demir ya da çelik çubuk, mıknatıs özelliği kazanır.



Şekil 2.1. Elektromıknatıs çalışma ilkesi

Basit bir elektromıknatıs Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Elektromıknatısta, çekirdek olarak sert çelikten bir çubuk kullanılırsa, elektrik akımı kesildikten sonrada, çubuk mıknatıslığını korur. Ama yumuşak demirden yapılmış çekirdekler, akım kesilir kesilmez bu özelliğini yitirir. Bu nedenle, elektromıknatıs olmayan kalıcı mıknatıslar, ya sert çelikten ya da kalıcı mıknatıslanma özellikli başka alaşımlardan yapılır. Bu alaşımlardan biri, kobalt, nikel, alüminyum ve bakırdan oluşan "alniko" dur. Bu mıknatısın gücü, tel bobindeki sarım sayısına ve bobinden geçen elektrik akımı miktarına bağlıdır [69-70].

2.3. Maddelerin Manyetik Özellikleri

Genelde herhangi bir akım ilmeği, manyetik alana ve buna karşılık gelen manyetik momente sahiptir. Bir maddedeki manyetik momentler, atomik iç akımlardan kaynaklanır. Bu akımların, elektronların çekirdek etrafında ve çekirdekteki protonların birbirileri

etrafında hareketlerinden ileri geldiği söylenir. Elektronlardan kaynaklanan manyetik momentler, daha açık olarak elektronun net manyetik momenti elektronun yörüngesel hareketiyle spin denilen iç özelliğinin birleşiminden meydana gelir. Bu manyetik dipol momentlerinin aralarındaki karşılıklı etkileşim kuvvetleri ve dış manyetik alan etkileşimleri, manyetik maddeyi anlayabilmek bakımından önemlidir. Bu amaçla, manyetik alandaki mıknatıslanmalarına göre madde diyamanyetik, paramanyetik, ferrimanyetik, ferromanyetik ve antiferromanyetik olmak üzere beş grupta tanımlanır. Son üç grup diğerlerinden daha yüksek manyetik duyarlığa sahiptir ve çoğunlukla ferromanyetikler olarak adlandırılır. Ayrıca diyamanyetiklerin manyetik momentleri sıfırken diğerlerinin sıfırdan farklıdır. Bu sebeple diyamanyetik maddeler, manyetik alanda hafifçe itilir buna karşın diğer manyetik özellikli maddeler çekilir [53,69-71].

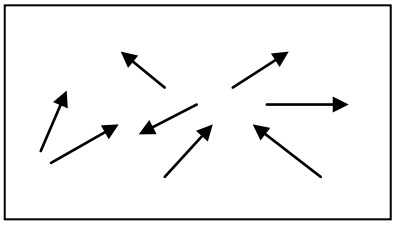
2.3.1. Diyamanyetik Madde

Bir diyamanyetik maddenin yörüngesinde elektron yüklü bir parçacığın hareketi sonucunda, akım taşıyan küçük bir tel halkada olduğu gibi bir manyetik alan oluşur. Dışarıdan uygulanan bir manyetik alan yoksa bu elektron ve ona komşu elektronlar, sonuçta birbirini yok edecek olan rastgele yönde manyetik alanlar oluştururlar; böylece, maddenin yarattığı toplam manyetik alan sıfır olur. Bu maddeye dışarıdan bir manyetik alan uygulanırsa (örneğin, kalıcı bir mıknatıs yaklaştırılırsa) bu elektronlar, kendi yörüngelerinde dönmesinden kaynaklanan manyetik alanın değişmesini engellemek için hızlanır veya yavaşlar. Sonuçta itici bir kuvvete neden olan ve uygulanan alana karşı koyan bir mıknatıslanma yaratılır. Ayrıca diyamanyetizma sıcaklıktan bağımsız bir özelliktir.

İnorganik moleküllerin çoğu, hemen hemen tüm organik moleküller ve tüm yarı metaller diyamanyetik özellik gösterir. Su, plastikler ve camların birçoğu, birçok seramik, Br, Cu, Zn, Au, Pb gibi elementlerle azot gazı, $BaSO_4$, etil alkol, kalsit, kuartz ve galen gibi bileşikler diyamanyetik maddeler arasında sayılabilir [53,69-71].

2.3.2. Paramanyetik Madde

Paramanyetizma, eşleşmemiş elektrona sahip atomların manyetik dipol momentlerin özelliğidir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi dışarıdan uygulanan bir manyetik alan yok iken ve sıcaklığa bağlı olarak, maddenin atomlarının öz manyetik dipol momentleri gelişi güzel şekil almıştır. Belirli sıcaklıklarda ve dışarıdan etki eden bir manyetik alan sayesinde bu maddeler manyetik özellikler kazanır. Bunlara en iyi örnek sıvı oksijen, alüminyum ve bakır oksittir. Bir U mıknatısın uçları arasına sıvı oksijen döküldüğünde, mıknatısın uçları arasında oksijenin toplandığı gözlenir. Aynı olay sodyum ve bakır klorür içinde belirli sıcaklıklarda geçerlidir. Fe, Gd, Mg, kuartz, kalsit, borit, ZnS, PbS, ZrO_2, $MgCO_3$, apatit, florit, tuz ve hematit (α-Fe_2O_3) paramanyetik özellikli maddeler arasında yer alır.



Şekil 2.2. Paramanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi

Bazı koşullar altında paramanyetik maddelerin mıknatıslanmasının alanla doğru, mutlak sıcaklıkla ters orantılı olduğu Pierre Cruie tarafından bulunmuştur. Bu bağıntı,

$$M = C \; - \qquad 2.3.1$$

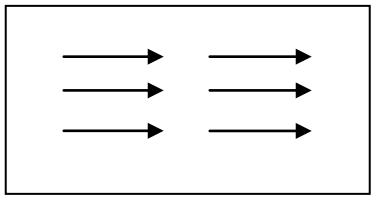
yukarıdaki eşitliği ile verilmiş olup, mıknatıslanmanın manyetik alan yoğunluğu ile arttığı ve sıcaklıkla azaldığını göstermektedir. B=0'da mıknatıslanma sıfırdır ve bu durumda dipol momentler rastgele yönelmişlerdir. Çok yüksek dış manyetik alan ve düşük sıcaklıklarda mıknatıslanma maksimum olur ve doyum değerine ulaşır. Bu durumda, bütün manyetik dipoller dış alan yönünde dizilmiş olur. Ferromanyetik bir maddenin sıcaklığı Curie sıcaklığı (T_c) olarak simgelenen bir sıcaklığa ulaşınca bu maddenin kendiliğinden mıknatıslığı kaybolur ve madde paramanyetik duruma geçer. Curie sıcaklığının altında manyetik momentler paralel dizildiklerinden madde ferromanyetiktir. Curie sıcaklığının üstünde ise dipoller gelişigüzel yönelmekte ve madde paramanyetik olmaktadır.

Dış manyetik alan kalktığında manyetizma yok olur. Eşleşmemiş elektron sayısı arttıkça paramanyetik özellik artar [53,69-71].

2.3.3. Ferromanyetik Madde

Ferromanyetik maddeler sürekli mıknatısların yapımında kullanılırlar. Bunlar zayıf bir manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik dipollere sahiptirler. Bu manyetik dipoller bir kere paralel hale getirildikten sonra dış alan ortamdan kaldırılırsa bile madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelme komşu manyetik momentler arasındaki kuvvetli etkileşimden kaynaklanır. Bu etkileşimin anlaşılabilmesi kuantum mekaniksel ifadelerle mümkün olmaktadır. Demir gibi ferromanyetikler sıklıkla kalıcı mıknatıslanabilir.

Bu tür maddeler bir manyetik alan içinde alan yönünde ve çok şiddetli olarak mıknatıslanırlar. Öyle ki ferromanyetizma paramanyetizmanın 1000 katı büyüklüktedir. Şekil 2.3'de spin düzenlerinin görüldüğü ferromanyetik maddeler bir mıknatısla kuvvetli olarak çekilir ve çubuk şeklinde iseler asıldıklarında, çubuğun ekseni alan doğrultusuna paralel oluncaya kadar bir manyetik moment etkisinde kalır. Bu maddelerin manyetik momentleri, termal etkilere rağmen dış manyetik alanla üst üste gelir. Eğer maddenin sıcaklığı Curie sıcaklığı adı verilen değerden daha yukarıya çıkarılırsa bu üst üste gelme bozulur ve madde ferromanyetik halden diyamanyetik hale geçer. Demir için Curie sıcaklığı T_c=1043K=770ºC'dir. Ferromanyetizma atom ve iyonların kendine özgü bir özelliği değil, komşu atom ve iyonların yapısal kurgu içinde etkileşiminden kaynaklanır.



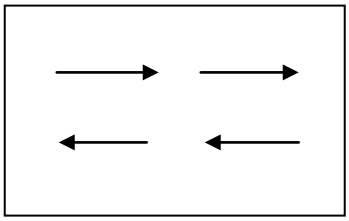
Şekil 2.3. Ferromanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi

Ferromanyetizma dokuz elementte görülmektedir. Bu elementler arasında üç geçiş metali; Fe, Co, Ni ve altı lantanit grubu metali (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm) vardır. Üç geçiş metalinin yaygın alaşımları ve manyetik olmayan elementlerle alaşımlarının birçoğu da ferromanyetiktir. Ferromanyetik maddelerin üç tipi vardır [53,69-71]:

- Ferrimanyetik madde
- Antiferromanyetik madde
- Zorlanmış ferromanyetik madde

2.3.4. Ferrimanyetik Madde

Ferrimanyetiklerin ve ferromanyetiklerin manyetik özellikleri benzerdir. Bu tür maddelerde diğerlerine göre daha güçlü manyetikleşme vardır. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi ferromanyetizmada görülenin aksine bu özellikte olan maddelerin iyonlarında dönme momenti antiparaleldir (kutupları zıt yönde olacak şekilde paralel). Ferrimanyetik maddelerde antiparalel dönme momentleri eşit değildir ve bu maddelerde kalıcı manyetik alanlar vardır. Demirin iki oksiti olan Magnetit ($FeO.Fe_2O_3=Fe_3O_4$) ve maghemit (γ-Fe_2O_3) ferrimanyetik özellikli maddelerdendir [53,69-71].

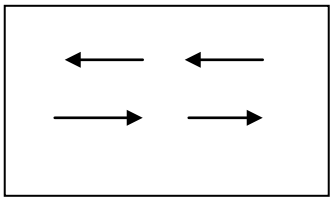


Şekil 2.4. Ferrimanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi

2.3.5. Antiferromanyetik Madde

Şekil 2.5'de gösterildiği gibi spinlerin yönelmeleri sonucu atom veya iyonların manyetik momentleri birbirlerini yok eder ve net manyetik moment sıfır olur. Bunlar, ısıtıldıklarında manyetik özelliklerini kaybederek Neel sıcaklığı (T_N) üzerinde

paramanyetik maddelere dönüşürler. Geçiş metal oksitlerinden MnO, CoO, NiO ve sülfür bileşikleri antiferromanyetik özellikli maddelerdendir [53,69-71].



Şekil 2.5. Antiferromanyetik maddelerdeki spin düzenlerinin şematik gösterimi

2.3.6. Zorlanmış Ferromanyetik Madde

Zorlanmış ferromanyetik madde spinleri dışarıdan bir kuvvet uygulanarak paralel hale getirilmiş antiferromanyetik maddelerdir [53].

2.4. Manyetik Alanda Parçacık Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Manyetik ayırma yöntemi, önceleri metalürji ve madencilik sektöründe katı manyetik parçacıklar kazanılmak için zenginleştirme prosesi olarak kullanılırken, bugün daha çok istenmeyen katı manyetik parçacıklardan akışkanın saflaştırılmasında kullanılmaktadır. Ayırma işlemi, dış manyetik alanın uygulandığı süspansiyonun manyetik separatörden geçirilmesi ile sağlanır. Bu ayırma prosesi, seçici ayırma ve parçacığın manyetik alanda yön değiştirmesi ile parçacığın tutunmasını sağlar. Manyetik parçacıkların taşıyıcı ortamdan uzaklaştırılması veya bir karışımdan bir bileşenin ayrılması manyetik kuvvete ile atalet, yer çekimi, kaldırma, sürüklenme, van der Waals ve merkez kaç kuvveti gibi non-manyetik kuvvetlere de bağlıdır.

$$F = F_i + F_g + F_A + F_m + F_D + F_w + F_e + \ldots \quad (2.4.1)$$

Manyetik filtrelerde, filtreleme mekanizması göz önüne alırsak parçacığın tutulmasına etki eden biri manyetik kuvvet diğeri sürükleme kuvveti olmak üzere iki

kuvvetten söz etmek mümkündür. Bu kuvvetlerin dışındaki diğer kuvvetlerin etkisi ihmal edilebilir. Çünkü δ=0,01-10 μm aralığında atalet, yer çekimi ve kaldırma kuvvetleri sürükleme kuvvetinden çok küçüktür ve hesaplamalarda dikkate alınmayabilir. Elektromanyetik filtrede temizlenen sıvıların taşıdıkları parçacıkların boyutları δ<10 μm olduğundan manyetik kuvvet ve sürükleme kuvvetleri dışında diğer kuvvetlerin etkisi ihmal edilebilir [2, 8, 9, 24, 53].

2.4.1. Manyetik Kuvvet

Manyetik ayırma, manyetize olan parçacıklar üzerinde bir kuvvet oluşturan manyetik alan ve alan gradiyentin bileşkesi olan manyetik kuvvet (F_m) ile başarılır. Bu kuvvetin etkisiyle paramanyetik ve ferromanyetik parçacıklar yüksek manyetik alan bölgelerine doğru hareket eder ve diyamanyetik parçacıklar daha düşük alan bölgelerine doğru taşınır. Homojen olmayan manyetik alanda parçacık kümesine etki eden manyetik kuvvet aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$F_m = \mu_0 \kappa w_p (1-\phi) \quad - \qquad 2.4.2$$

Parçacık hacmi w_p= /6; burada δ parçacık çapı;κ efektif manyetik alınganlık; ϕ gözeneklerde biriken parçacıkların hacimsel yoğunluğudur. Genelde, eğer parçacık manyetik özellikli bir ortamda ise o zaman $\kappa = \kappa_p - \kappa_f$ olur. Burada κ_p parçacığın manyetik alınganlığı, κ_f ise ortamın manyetik alınganlığıdır. Manyetik filtreleme işlemlerinde temizlenen sıvıların esasen non-manyetik, tutulan parçacıkların ise ferro (ferri) manyetik olmaları nedeniyle $\kappa_p >> \kappa_f$ olur. Burada κ_f ihmal edilebilir olduğundan $\kappa \cong \kappa_p$ olur ve 2.4.2 eşitliğinde κ yerine κ_p alınabilir. Ayrıca bu eşitlikten görüldüğü gibi küresel parçacıklar için manyetik kuvvet parçacık çapının küpü ile doğru orantılıdır, yani F_m δ^3 dir.

Manyetik kuvvetin diğer non-manyetik kuvvetler toplamından daha fazla olması durumunda zayıf manyetik özellikli parçacıklardan güçlü manyetik özellikli parçacıklara kadar etkin bir ayırma yapılabilir [2, 8, 24, 53].

2.4.2. Manyetik Ayırmadaki Non-Manyetik Kuvvetler

Manyetik separatörler ve manyetik filtrelerde, ayırma ortamında hareket eden parçacıklar üzerine etkiyen en önemli non-manyetik kuvvetler; yerçekimi kuvveti, kaldırma kuvveti, hidrodinamik sürüklenme, merkez kaç kuvveti, sürtünme ve atalet kuvvetleridir. Manyetik ayırma yöntemine göre bu kuvvetler az veya çok öneme sahip olabilir. Birçok manyetik ayırma işlemine etki eden en önemli non-manyetik kuvvetler, yer çekimi kuvveti ve hidrodinamik sürükleme kuvvetidir. Sürtünme ve atalet kuvvetleri bazı geleneksel separatörlerde önemlidir [8, 9, 24, 53].

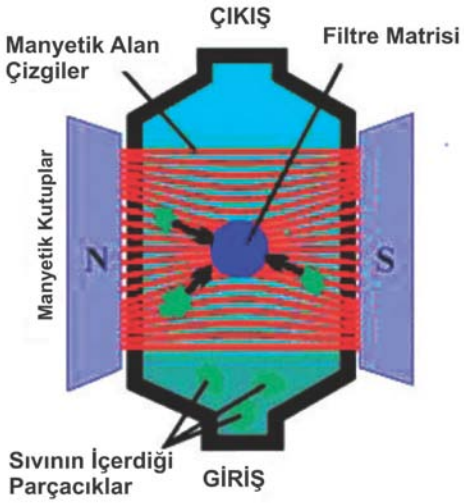
2.5. Elektromanyetik Filtrasyon

Katının miktarı sıvıya oranla oldukça az ise, katıyı sıvıdan ayırma işlemi filtrasyon, süspansiyon durumunda olan katının oranı yükseldikçe işlem ya pressleme ya da santrifüjleme ile gerçekleştirilir. Mikrondan submikrona kadar değişen 0,1-10 µm boyutlu 10^{-3}-10^{-5} g/kg kadar düşük derişimdeki dispers parçacıkların oluşturduğu kolloidal sistemlerde, katı parçacığı ayırma işlemi manyetik filtrasyon ile gerçekleştirilebilir.

1840 yılından beri madencilik endüstrisinde hem manyetik taneciklerin hem de yüklü parçacıkların üzerine etkiyen elektrik akımı ve manyetik alanın bir bileşimi olan elektromanyetik alanın süperpozisyonunda yatan sinerjik etkiden yararlanarak manyetik cevherin zenginleştirilmesi ve çamurlardan manyetik parçacıkların ayrılmasında kullanılmıştır. Manyetik özellikli dispers katının sadece seramik, cam, kimya, ilaç ve metalurji endüstrilerinde kullanılan hammaddelerin temizliğindeki gibi sadece katı-katı heterojen karışımdan ayrılmasında değil parçacığın sıvı veya gaz ortamında bulunmasında da manyetik ayırma yöntemlerinden yararlanarak katı-sıvı ve katı-gaz heterojen sistemlerden manyetik alınganlığa göre fiziksel olarak ayırımına çalışılmıştır.

Taşıyıcı ortamların, ferromanyetik elementler ve bileşiklerin (Fe, Ni ve Co gibi) dar bir sınıfından zayıf paramanyetik bileşiklerin çok daha geniş bir sınıfına kadar yer alan mikron/submikron boyutlu manyetik parçacıklardan temizlenmesi için manyetik filtrasyon yöntemi kullanılabilir. Manyetik ayırma yöntemi ile birinci olarak, manyetik bileşenleri

içeren karışımlarının (sıvının/gazın) saflaştırılması ve ikinci olarak manyetik özelliğe sahip parçacıkların deriştirilmesi (katının saflaştırılması) mümkün olmaktadır.



Şekil 2.6. Elektromanyetik filtrasyon çalışma ilkesi

Şekil 2.6'da temel çalışma ilkesi görülen elektromanyetik filtrasyon yöntemi, özellikle petrol, elektrik, tekstil, termik ve nükleer santraller gibi çeşitli endüstrilerde de ağır metal iyonları, yağlar ve diğer istenmeyen maddelerle büyük bir kısmı kirlenmiş olan proses suyu veya endüstriyel akışkanların temizlenmesinde, değerli minerallerin geri kazanılması ve zenginleştirilmesinde kullanılabilir [2, 6, 8, 24].

2.5.1. Mıknatıslanmış Dolgulu Yataklar

Elektromanyetik filtreler, manyetik özellikli katı parçacığın tutularak ayrıldığı 0,4-0,6 oranında yatak gözenekliliğe sahip, manyetik alan yoğunluğu B=0,05-0,5 T olan bir dış homojen alanın etkisiyle kolayca mıknatıslanan manyetik granüllerden (küreler, talaşlar, teller vb.) oluşan sabit yataklardır. Elektromanyetik filtrelerin asıl çalışma bölgesi olan bu sabit yatak, kullanılan dolgu malzemesinin manyetik özellik taşımasından dolayı "mıknatıslanmış dolgulu yataklar" olarak adlandırılmıştır. Mıknatıslanmış dolgulu yataklar (MDY) elektromanyetik filtrelerin esas çalışma bölgesi olup, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi manyetik özellikli küreler, çubuklar, plakalar, çelik teller, metal talaşları gibi süzgeç

elemanlarından (filtre matrisi elemanı) oluşturulmuştur ve çeşitli sanayi alanlarında kullanılmaktadır [10,19,20,24,26].

Elektromanyetik filtreyi klasik filtrelerden prensip olarak daha üstün ve farklı kılan özellik, MDY'nin manyetik özellikli bu filtre matris elemanlarıdır. Filtre matris elemanları, dış homojen manyetik alanın etkisiyle kolayca mıknatıslanan manyetik malzemelerden oluşmaktadır. Bu elemanlarının özellikleri, elektromanyetik filtrelerin endüstriyel çalışma rejimlerini belirleyen en önemli faktörlerdendir. Bu tip filtre matrislerinin özellikleri genel olarak üç grupta incelenebilir. Elektromanyetik açıdan filtre matrisleri, manyetik özellikli ve dış homojen manyetik alanda kolayca mıknatıslanabilir türde olmalıdır. Fizikokimyasal açıdan, bu filtre matris elemanları aşındırıcı, radyoaktif ve yüksek sıcaklık gibi etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Mekanik açıdan filtre matris elemanları, yapı şekilleri, darbe ve diğer yan etkilere karşı dayanıklıdır.



(a) (b) (c)

Şekil 2.7. Mıknatıslanmış dolgulu yatak elemanları
a) Ferromanyetik bilyeler b) Metal talaşları c) Tel kırıntıları

Mıknatıslanmış dolgulu yataklarda, geleneksel filtrelerdeki hidrodinamik ve mekanik kuvvetler yerine manyetik kuvvet etkindir. Uygulanan manyetik kuvvet ile kürelerin teğet bölgelerinin çevresinde yüksek gradiyente sahip olan multi-alanlar oluşur. Bu alanların oluştuğu bölgelere aktif bölge veya tutma bölgesi denir. Bu alanların manyetik alan şiddetleri, uygulanan dış manyetik alan şiddetinden çok daha yüksek olur. Mıknatıslanmış ve teğetlenen manyetik elemanlar arasında oluşan yüksek gradiyentli manyetik alan esasen elemanların teğet noktaları etrafında yoğunlaşmakta ve yüksek gradiyentli manyetik alan şiddeti, bu teğet noktalardan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Bu

sebeple, mıknatıslanmış hücrelerden oluşturulmuş gözeneklerde tutulan parçacıklar daha çok kürelerin teğet noktaları etrafında toplanmaktadır. Gözeneklerin teğet noktaları etrafında tuzaklanan bu parçacıklar, teğet noktaları etrafında belli bir doygunluk tabakası oluşturur. Bu tabaka üst üste birbirini sırayla izleyen üç bölgeden oluşmaktadır:

1. Bölge: Bu bölgede Fm>>Fd olduğundan tutunan parçacıklar sağlam bir tabaka oluşturmaktadır. Bu nedenle tutulan parçacıklar bu bölgede kararlı bir tabaka oluşturarak tüm filtreleme işlemi süresince sabit kalırlar.

2. Bölge: Bu bölge 1. bölge üzerinde olup, doyma bölgesidir. Bu bölgede Fm≥Fd olur. Bu nedenle doyma katının yüzeyinde tutulan parçacıklar kararsız bir durumdadır. Bu bölge parçacıklar hem tutulur hem de koparak yeniden sıvıyla hareket ederler.

3. Bölge: Bu bölge doyma bölgesi üzerinde oluşur. Bu bölge de Fm<<Fd olur. Parçacıklar, tabaka yüzeyine tutulma olasılığı çok zayıf olduğundan tekrar sıvıya geçebilirler.

2.5.2. Elektromanyetik Filtrasyon Verimini Etkileyen Faktörler

Elektromanyetik filtrasyon verimi ile proses parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir.

$$\psi = \lambda [\ 1\text{-}\exp(-\xi)] \qquad 2.5.1$$

ψ elektromanyetik filtrasyon verimi, diğer adıyla kalite faktörü; λ süspansiyondaki tüm parçacıkların içindeki ferromanyetik kısmın oranı ve ξ logaritmik etkinlik katsayısıdır.

$$\xi = \beta L \qquad 2.5.2$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan değişkenlerden L filtre uzunluğu ve β absorpsiyon katsayısıdır. Bu katsayı filtre sisteminin geometrik, hidrodinamik ve manyetik parametrelerine bağlıdır. Bu yüzden manyetik filtrasyon performansını belirleyen temel parametre olarak ξ aşağıda gösterildiği gibi çok değişkenli bir fonksiyondur.

$$\xi = f(\chi, H, d, L, V_f, \mu, \rho, \eta, \delta, \phi, \gamma, \lambda) \qquad 2.5.3$$

Manyetik filtrasyonu etkileyen parametreler, manyetik, hidrodinamik ve geometrik açıdan incelenebilir. Elektromanyetik filtrasyon sistemini etkileyen manyetik özellikler; dış manyetik alan şiddeti (H), manyetik geçirgenlik (μ), manyetik alınganlık (κ) ve manyetik özellikli parçacık yüzdesi (λ) dir. Elektromanyetik filtrasyon sistemini etkileyen geometrik özellikler arasında filtrenin uzunluğu (L), filtre matrisinin çapı (d) ve yatak gözenekliliği (γ) sayılabilir. Elektromanyetik filtrasyon sistemini etkileyen hidrodinamik özellikler içersinde parçacık yoğunluğu (ρ), filtreleme hızı (V_f), parçacık çapı (δ) ve akışkanın viskozitesi (η) bulunmaktadır [2, 24].

2.5.3. Elektromanyetik Filtrasyon Teorisi

Bazı filtrasyon hızlarında manyetik filtre, parçacıkların tutunma bölgesi genişlediğinden yeni tabakaların oluşumu için daha fazla birikim olmadığı zaman doyuma ulaşır. Böyle kritik filtrasyon hızında, dış tabaka üzerindeki parçacıklar kararsızlaşır ve kendi kendilerine koparak ayrılırlar. Tutunma bölgesinin doyma yarıçapı ve absorpsiyon katsayısı arasındaki basit bir ilişki, tutunma alanı kesitinin geometrisi ve tutunan parçacıkların teorisinden aşağıdaki eşitlikteki gibi türetilmiştir.

$$\beta = - \quad — \quad - \qquad 2.5.4$$

r_s doyma yarıçapı, a filtre elemanı kürelerin yarıçapı ve d ise çapıdır. Tutunmuş parçacıkların birikimiyle oluşan bölgenin boyutsuz yarıçapı (r_{as}) ve boyutsuz doyma yarıçapı (r_s) olmak üzere $r_{as}=r_s/a$'dır. r_{as}, doyma tabakasının yüzeyinde kararsız parçacıklar üzerine etkiyen kuvvetlerin momentum denkliğinden eşitliğinden bulunabilir (ε= 0,4).

$$r_{as}^3 = 9.10^{-6} \quad \text{————————} \qquad 2.5.5$$

Yukarıdaki eşitlik 2.5.5 kullanılarak, eşitlik 2.5.1 ve 2.5.2'den aşağıdaki eşitlikler yazılırsa manyetik filtrasyonun logaritmik etkinlik katsayısı ve kalite faktörü bulunabilinir.

– ——————— – 2.5.6

$\xi = 0{,}31.10^{-5}$ ——————— 2.5.7

L_d boyutsuz filtre uzunluğu olup, $L_d = L/d$ olarak verilir.

Elektromanyetik filtrasyon proses parametrelerini, filtre kalite faktörüne bağlayan başlıca bağıntılar yukarıda verilmiştir. 2.5.6 eşitliğe göre elektromanyetik filtrasyon işleminin verimini gösteren kalite faktörü, sistemin manyetik parametreleri (κ, μ, H) ve parçacıkların boyutu (δ), filtrenin uzunluğu (L) ile doğru, hidromekanik parametreleri (ρ,V_f), filtre matrisini oluşturan ferromanyetik kürelerin çapı (d) ve mıknatıslanmış dolgulu yatağın porozitesine (ε) ile ters orantılı olarak değişmektedir. Filtre porozitesi üzerine tutunan parçacıkların etkisi (ϕ) ise ihmal edilebilir [2, 24].

2.5.4. Elektromanyetik Filtrasyon Avantajları

Elektromanyetik filtrasyonun, diğer geleneksel filtrasyon işlemlerine göre kullanımdaki üstünlükleri şunlardır:

1. Manyetik alınganlığa sahip zayıf paramanyetik maddelerden ferromanyetik maddelere kadar mikron boyutlu ve düşük derişimlerdeki dispers manyetik safsızlıkların bile %100'e yaklaşan verimle ayırımının sağlandığı basit bir fiziksel ayırma işlemidir.

2. Hiçbir yardımcı kimyasal ve biyolojik materyal içermediğinden çevre dostu bir ayırma prosesidir.

3. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi ağır koşullar gerektirmediğinden ekonomiktir. İşletim masrafı, sadece manyetik alan oluşturmak için kullanılan elektromıknatısın sarf ettiği elektrik ile orantılı olarak değişmektedir.

4. Elektromanyetik filtrenin boyutları küçük olduğundan az yer kaplar. Bu özellik, kurulumda avantaj sağlar.

5. Elektromanyetik filtrenin termal ve mekanik dayanımı yüksektir. Bu özelliğinden dolayı elektromanyetik filtre ile yüksek sıcaklıkta, zehirli ve radyoaktif sıvılardan istenmeyen manyetik özellikli katıların ayrılması sağlanabilir.

6. Elektromanyetik filtrenin temizliği ve bakımı çok kolaydır. Elektromıknatıs kapatıldığında ortadan kalkan manyetik alanla filtre matrisinde tutunan parçacıklar basınçlı su ile dışarı atılabilir, filtre gövdesi ve filtre matris elemanları su ile temizlenerek tekrar kullanıma hazır hale getirilebilir.

7. Diğer fiziksel filtrelerde basınç düşüşü ile filtre tıkanmaları yüzünden sürekli olarak işletilmemesine karşın elektromanyetik filtre sürekli kullanıma uygundur.

8. Elektromanyetik filtreden geçirilen sıvı/gazların fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmemektedir. Böylece filtrelenen sıvı/gazlar tekrar tekrar kullanılabilir.

9. Elektromanyetik filtre gözeneklerinde tutulan parçacıkların da fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmemektedir.

10. Elektromanyetik filtre, yüksek filtre hızlarında diğer filtreleme işlemlerindeki filtreleme hızının 3-10 katı daha yüksek hızlarda bile etkin bir ayırma sağlamaktadır.

11. Elektromanyetik filtrasyonla manyetik özellikli mikroorganizmalar da ayrıldığından taşıyıcı ortamın temizlenme işlemi hem fiziksel hem de biyolojik olarak gerçekleşmektedir.

2.5.5. Elektromanyetik Filtrasyon Kullanım Alanları

Klasik filtreleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı endüstriyel akışkanlardan mikron boyutlu ve düşük derişimli manyetik safsızlıkların temizlenmesinde manyetik filtrelerden aşağıdaki çizelgede görüldüğü üzere çeşitli endüstri alanlarında yararlanılmaktadır [2,3,5,7-8,10-11,27,55,57,59].

Çizelge 2. 1. Elektromanyetik Filtrasyonun Kullanıldığı Endüstri Alanları

Endüstri Dalı	Kullanım Amacı
Kimya	Ham veya yardımcı maddelerin Manyetik Temizliği
Cam	
Seramik	
Mineral	
Kömür	
Metalurji	
Madencilik	
Nükleer	Proses Sularından Atık Sulardan Manyetik Safsızlıkların Uzaklaştırılması
Petrol	
Su	
Kimya	
Metalurji	
Madencilik	
Gıda	
Tekstil	
Çelik	
İlaç	
Metalurji	Değerli Metallerin Geri Kazanımı
Madencilik	
Mineral	

2.6. Elektromanyetik Filtrasyonun Optimizasyonu

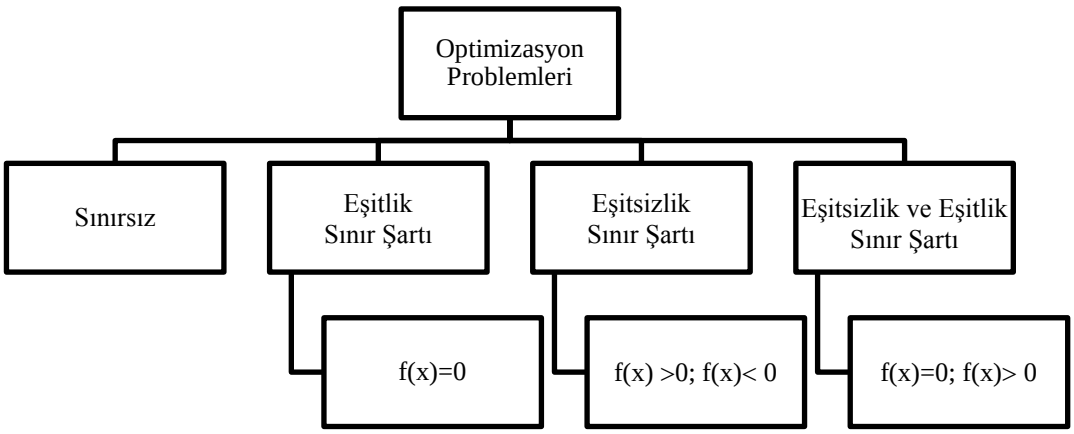
2.6.1. Optimizasyon

Optimizasyon, mevcut alternatiflerin arasından istenilen kriterleri sağlayan en uygun alternatifin bulunmasıdır. Geçmişten günümüze kadar karşılaşılan bir çok problemin çözülmesi amacıyla değişik optimizasyon teknikleri geliştirilip uygulanmıştır. Bilgisayarların gelişimi ile birlikte optimum tasarımın kısa zamanda yapılması mümkün hale gelmiştir. Optimum yapısal tasarım sürecinin kısaltılmaya çalışılması, bilgisayar yardımıyla optimum tasarımın cazibeli hale getirilmesi, tasarım sürecinin ekonomik ve kısa zamanda optimuma ulaşması gibi birçok nedenlerden dolayı, optimizasyon çalışmaları son kırk yıl içersinde büyük bir ivme kazanarak etkin bir biçimde sürdürülmektedir.

Optimizasyon süreci, belirlenen amaç fonksiyonu maksimum veya minumum yapacak tasarım (proses) parametrelerinin ve kısıtlayıcıların (sınırlayıcılar) tanımlanması ile başlar. Daha sonra uygun optimizasyon yöntemi seçilir. Sistemimizin fiziksel

davranışına uygun bir modelin mevcut olması ya da kolaylıkla oluşturulabilmesi halinde model üzerinden gerçekleştirilebilecek bir yöntem seçilebilir. Fiziksel sistemin davranışı ile değişkenler arasındaki ilişkinin yeterince iyi bilinmemesi durumunda güvenilir bir model oluşturulamayacağından bir deneysel optimizasyon yöntemi tercih edilir.

Sınırlayıcılar, parametrelerin hangi aralıklarda değer alabileceğini tanımlar ve tasarım parametrelerine bağlı olarak ifade edilirler. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bazı sınırlayıcılar eşitsizlikler, bazıları ise eşitlikler biçiminde olabilir. f(x) amaç fonksiyonunun minimizasyonu veya maksimizasyonunda x ile ilgili herhangi bir sınırlama olmadığı optimizasyon problemine ''sınırsız optimizasyon problemi'' x ile ilgili sınırlamaların bulunduğu optimizasyon problemine ise ''sınırlı optimizasyon problemi'' denir [72-74].



Şekil 2.8. Optimizasyon problemlerinin sınır şartları

f(x) amaç fonksiyonu ve sınırlayıcılar matematiksel biçimde aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Bazı problemlerde birden fazla amaç fonksiyonu bulunabilir. Yani, problem birden fazla en küçük yapılacak fonksiyon içerebilir. Bu tür problem, çok amaçlı optimizasyon problemi olarak sınıflandırılır. Bu durumda amaç fonksiyonlarının her biri önem derecelerine göre ağırlıklandırılarak bir bileşke amaç fonksiyonu oluşturulur.

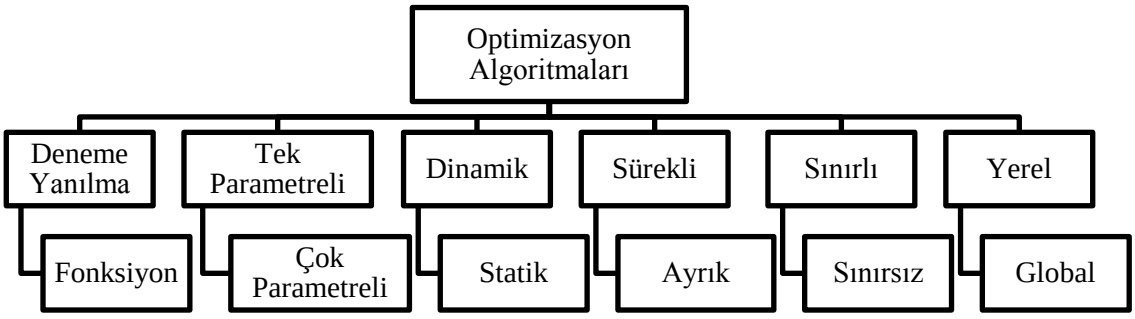
Genel olarak optimizasyon problemleri, amaç fonksiyonunun doğasına ve sınırlayıcılara (lineer, nonlineer, konveks), değişkenlerin sayısına (büyük/küçük) ve fonksiyonun düzgünlüğüne göre (türevlenebilirliği) bir çok şekilde sınıflandırılabilir. Bir optimizasyon problemi, lineer amaç ve sınırlama fonksiyonlarına sahip ise bu problem

lineer programlama problemi, bu fonksiyonlardan herhangi biri non-lineer ise non-lineer programlama problemi olarak adlandırılır. Özellikle non-lineer bir fonksiyonun minimumunu/maksimumunu bulmak oldukça zordur. Bu tip problemler ya lineer bir yaklaşımla ya da optimizasyon bölgesini daraltmakla çözülür.

Non-lineer optimizasyon problemlerinde fonksiyonların bir kısmı veya bütünü non-lineerdir. Bu tür problemler için sayısal metotlara ihtiyaç duyulmasının temel sebebi, bazı problemlere analitik metotların uygulanmasının zor hatta bazen imkânsız olmasıdır. Analitik metotlarda, gerekli şartlar yazılır ve bunlar aday bölgesel minimum/maksimum noktalar için çözülür. Bu yüzden mühendislik sistemlerinin optimum tasarımı için sistematik sayısal yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu tür yaklaşımlarda bir başlangıç çözümü alınır ve bu çözüm iteratif olarak optimallik şartını sağlanıncaya kadar geliştirilir [72].

2.6.2. Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon algoritmaları Şekil 2.9'da gösterildiği gibi altı grupta ele alınabilir. Özellikle son yıllarda PC'lerin hızlarındaki artış çeşitli algoritmaların uygulama sahasına girmesine neden olmuştur. Bu algoritmanın kullanımı büyük bir dikkat ister çünkü algoritma için başlangıç noktası iyi seçilmezse yerel optimumlara takılabilir, araştırmanın yönünü değiştirebilir ve optimal sonucun bulunmasını geciktirebilir.



Şekil 2.9. Optimizasyon algoritmalarının kategorileri

1. Deneme yanılma optimizasyonu: işlem hakkında çok fazla bilgi olmaksızın çıkışı etkileyen parametrelerin ayarlanmasıdır. Örneğin TV'de en iyi görüntü ve ses deneme

yanılma yoluyla ayarlanır. Deneysel çalışma yapanlar ve çoğu büyük kâşifler bu yolu kullanmışlardır. Bunun aksine, matematiksel fonksiyonun optimizasyonun da, matematiksel model üzerinden yapılır.

2. Optimizasyon, tek parametreli veya çok parametreli olarak tanımlanabilir. Sadece bir parametre varsa, optimizasyon tek boyutludur. Birden fazla parametreye sahip fonksiyon için çok boyutlu optimizasyon gereklidir. Boyut sayısı arttıkça optimizasyonun zorluk derecesi de artar.

3. Optimizasyon zamana bağımlılığına göre statik veya dinamik olmak üzere iki şekilde tanımlanabilir. Statik optimizasyon, zamandan bağımsızdır. Dinamik optimizasyon ise zamana bağlıdır.

4. Optimizasyon; sürekli veya ayrık parametreli olarak iki şekilde tanımlanabilir. Sürekli parametreler sonsuz değer alırken ayrık parametreler sınırlı değerler alır. Ayrık optimizasyon, dar bir setteki amaç fonksiyonlarını gerçekleştirecek problemleri çözmekte kullanılır.

5. Optimizasyon problemlerindeki en önemli ölçüt, değişkenler üzerine sınırlayıcılara sahip olup olmamasıdır. Sınırlı optimizasyon da, parametreleri bir tanım aralığında değerlendirken sınırsız optimizasyonda ise parametreler her hangi bir değerde olabilir.

6. En hızlı optimizasyon algoritmaları sadece yerel bir çözüm arar yani, amaç fonksiyonunu gerçekleştirecek noktalar dolayında optimum olduğu bir nokta arar. Global çözüm, optimum noktaların en iyisini her zaman bulamaz. Bazı uygulamalarda global çözümleri genelde tanımlamak ve gerçekleştirmek zordur [72,74-75].

2.6.3. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Optimizasyon yöntemlerini deterministik yöntemler ve istatistiksel yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayırabiliriz.

Deterministik optimizasyon yöntemleri: Yerel minimuma veya maksimuma yakınsayan algoritmalardır. Deterministik yöntemlerle modelleme yapmak çok fazla matematiksel altyapı gerektirmekte ve problem boyutları arttığı zaman yetersiz kalmaktadır. Eğer kullanılan yöntem, belirli bir probleme her uygulanışında aynı sonucu veriyorsa, bu tür durumlarda deterministik yöntemler kullanılır. Deterministik yöntemler genellikle en iyi

tek bir çözümü bulmak için kullanılırlar. Deterministik yöntemler bazı problemlerin çözümünde yetersiz kalabilmekte veya daha fazla zaman ve maliyet gerektirebilmektedir. Bu tür problemlerde deterministik olmayan yöntemlerin kullanımı başarılı olabilir. Deterministik olmayan yaklaşımlar, aynı başlangıç durumu için farklı sonuçlar verebilmekte, ancak en iyi olmasa da kabul edilebilir bir sonuca belirli bir süre sonunda ulaşabilmektedir.

Optimizasyonda amaçlanan proses, az sayıda değişken ile uygun bir fonksiyon halinde temsil edilebiliyorsa, bu fonksiyonun sırasıyla her değişkene göre kısmi türevlerinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilen denklem sisteminin ortak çözümü ile değişkenlerin optimum düzeyleri analitik yöntemlerden biri ile belirlenebilir. Fakat değişken sayısının artması ve fonksiyonların karmaşıklaşmasıyla türev alma ve denklem sistemlerinin çözümü güçleşir, hatta bazen imkânsız hale gelir. Bundan daha önemlisi, sistem yanıtı ile değişkenler arasında matematiksel bir ilişki kurulamadığı zaman analitik yöntemlerden yararlanmak mümkün değildir. Matematik programlama ve gradiyent yöntemleri bu nedenle deneysel optimizasyon ihtiyaçlarına cevap vermemektedir.

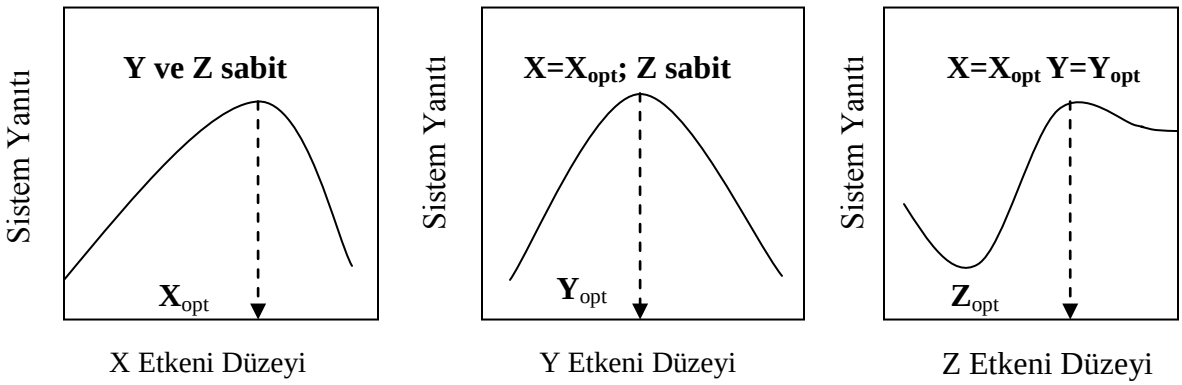
İstatistiksel yöntemler: Değişkenleri ile sistem yanıtı arasındaki ilişki hakkında yeterli bilginin bulunmaması veya bu ilişkinin doğru bir model oluşturulamayacak kadar karmaşık olması halinde, deneysel tasarıma dayalı istatistikî yöntemlere başvurulur. Bu yöntemlerde sistem bir kara kutu olarak düşünülür, sistemin davranış mekanizması hiç göz önüne alınmaz. Her defasında tek etken, faktöriyel tasarım, en dik çıkış yöntemi ve simpleks metodu yaygın olarak kullanılan istatistiksel yöntemler arasında yer alır [72, 74-77].

2.6.4. İstatistiksel Yöntemler

2.6.4.1. Her Defasında Tek Etken Yöntemi

İstatistik yöntemlerin en eskisi, kimyacılar tarafından hala sıkça başvurulan ‘’her defasında tek etken’’ yöntemidir. Bu yöntemde her defasında diğer etken düzeyleri sabit tutulurken, yalnızca bir etkenin düzeyi belirli bir aralık boyunca değiştirilerek sistem yanıtı gözlenir. En iyi yanıtı sağlayan etken düzeyi, o etkenin optimum düzeyini araştırmak

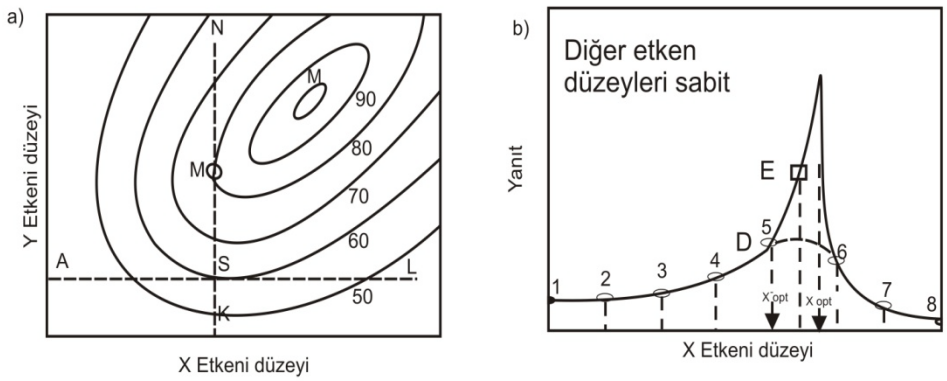
için yapılacak olan deneylerde sabit tutulur. Bu işlem sırayla bütün değişkenler için tekrarlanır. Bu yöntemin işleyişi aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 2.10. Üç etkenli bir sistemde her defasında tek etken yöntemi

Optimum koşulların duyarlıkla belirlenmesi için çok sayıda deney gerektirmesinin yanı sıra bu yöntemin başlıca zayıflığı, iki veya daha fazla etken arasında etkileşim bulunması halinde optimumu belirleyememesidir. Böyle bir durum Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekil 2.11.a'daki eğriler, iki etkenli bir sistemde eşyanıt çizgileridir. İlk olarak Y etkeni rastgele bir A düzeyinde sabit tutulurken X etkeni AL boyunca değiştirildiğinde en iyi yanıta S noktasında rastlanır (%60). İkinci aşamada X etkeni, S düzeyinde (X_{opt}) sabit tutularak Y etkeni KN boyunca değiştirildiğinde en iyi yanıtın sahte M noktasında elde edildiği görülür (%80). Oysa eş yanıt çizgilerinden anlaşıldığı üzere gerçek optimum (%100) M noktasında, oldukça farklı X ve Y düzeylerinde bulunmaktadır.

Etkenler arasında etkileşim olmaması halinde bile bu yöntemin başarısı, her etken için kaç farklı düzeyde ölçüm yapıldığına bağlıdır. Şekil 2.11.b'de X etkeninin eşit aralıklar ile 8 farklı düzeyinde ölçüm yapılmasıyla maksimum yanıtın ancak üçte biri büyüklüğünde bir yanıt (5. ölçümde) elde edilmiştir. X etkenini değiştirme aralıklarını küçülterek gerçek optimuma daha fazla yaklaşma olanağı varsa da, bunun için gerekli deney sayısının çok fazla olabileceği, şekilde deney sayısının iki katına çıkarılmasıyla sağlanan gelişme miktarından (D'den E'ye) anlaşılmaktadır.



Şekil 2.11. ‘’ Her defasında tek etken’’ yönteminin yetersizlikleri

4 etkenli bir sistemde, etkenlerin her biri için 16 farklı düzeyde ölçüm yapılması, toplam olarak 64 deney gerektirirken, optimum etken düzeylerindeki belirsizliğinde % 6’dan fazla olacağı anlamına gelir [76].

2.6.4.2. Faktöriyel Tasarımlar

Faktöriyel tasarımlar, deney sayısı açısından önemli bir üstünlük sağlamamasına rağmen yanıt yüzeyinin bir bölümü yerine tamamını dikkate aldığından hem sistem hakkında daha fazla bilgi sağlar hem de optimizasyon açısından çok daha güvenlidir. Faktöriyel tasarımlarda iki seviyeli deneysel tasarım tekniğinde m tane değişken (faktör) söz konusu olup, bu faktörler iki farklı seviyede (maksimum ve minimum) kontrol edilmekte ve her bir değişken için merkez nokta belirlenmektedir. Bu yaklaşımda, boyutsuz koordinat sisteminde maksimum seviye +1, minimum seviye –1 ve orta nokta 0 olarak seçilmektedir. Bu yöntemde, katsayı değerlerinin hesabı basitleştirilebilir ve x değerlerindeki deneysel hata da hesaba katılırsa daha doğru bir hesap yapılmış olur. Böylelikle model lineerleştirilir, $y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2$ formuna getirildikten sonra X_1 ve X_2 değerleri -1,0,1 değerleri arasından seçilir.

Faktöriyel tasarımda k tane etkenin her biri için d adet farklı düzeyde deneme yapılması halinde toplam deney sayısı $n=d^k$ olmaktadır. Buna göre değişkenlerin iki farklı düzeydeki değere sahip olması durumunda, 3 değişkenli faktöriyel tasarım için yapılması

gereken deney sayısı 2^3=8'dir. Ancak amaç, etkenlerin optimum düzeylerini bulmak olunca faktöriyel tasarımlar, çok sayıda deneye ihtiyaç göstermeleri nedeniyle elverişli olmaktan çıkarlar. Gerçekte aralarında etkileşim olmadığı belirlenen etkenleri dxd yerine 1xd değişik düzeyde kullanarak ve ikiden daha yüksek dereceli etkileşimleri ihmal ederek gerekli deney sayısında önemli ölçüde azaltma sağlanabilirse de deney sayısı pek çok durumda makul sayıya indirilememektedir [75-76,78].

2.6.4.3. En Dik Çıkış Metodu

Yaygın olarak kullanılan yokuş tırmanma yöntemlerinden en eski ve en basit olanı en dik çıkış metodudur. En dik çıkış yönteminin ilkesi, yoğun sis altındaki bir dağda, zirveye en kısa yoldan ulaşmak isteyen bir dağcının gayretine benzetilebilir. Zirveden aşağıda daha küçük bir başka tepenin yamacında bulunmamak şartıyla dağcının zirveye ulaşacağı en kısa yol, bulunduğu yerden en dik eğimli yöne doğru ilerleyerek bulabilecektir. Yanıt yüzeyi üzerinde ise en dik çıkış yönü, bulunulan konum dolayında her etken için ikişer deney yapılarak saptanır. En dik çıkış vektörü doğrultusunda elde edilen yeni bölgede benzer işlemler yapılarak optimuma doğru hızla yaklaşılır.

Her adımda, etken sayısının en az iki katı kadar deneme gerektirmesi, artan etken sayısı ile gerekli hesapların karmaşıklaşması ve en dik çıkış yönünün etken birimlerine bağlı olarak farklılık göstermesi bu yöntemin dezavantajlarıdır [76,79].

2.6.4.4. Simpleks Yöntemi

Sistem yanıtı ile değişkenler arasındaki ilişkinin önceden yeterince bilinmediği durumlarda başvurulan iteratif bir yöntemdir. Birçok klasik deneysel tasarım yönteminde, optimuma ulaşılıncaya kadar bir kısım faktörlerin düzeyleri sabit tutulurken, simplekste her deneyde tüm değişkenlerin düzeyi değiştirildiği için daha az sayıda deneyle optimuma ulaşılabilmektedir.

Bilinmeyen parametreler uzayı, bir simpleksin hareketiyle etkili bir şekilde araştırılabilir. İlk kez Spendley tarafından önerilen optimizasyon metodu, temel simpleks metodu (BSM) olarak da bilinir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi k optimizasyonda bir faktörü

simgelemek üzere bir simpleks k+1 nokta (köşe) ile oluşturulan k boyutlu düzgün bir geometrik şekildir. Böylece iki boyutlu bir simpleks, bir eşkenar üçgen, üç boyutlu bir simpleks düzgün dörtyüzlüdür.



Şekil 2.12. Üç boyutlu uzayda ve hareket bölgesinde değişken boyutlu simpleksler

Simpleks metodu, belirlenen geometrik formun araştırma uzayında hareket ettiği bir ilerleme prosedürünü içerir. Prosedür, faktör uzayının büyüklüğüne göre uygun büyüklükte bir simpleks oluşturmak üzere k+1 tane noktanın seçimiyle başlar. Sonra, oluşturulan simpleksin köşelerine karşılık gelen deney koşullarında yanıtlar belirlenir. Bunun ardından elde edilen yanıtların büyüklük sırasını kullanan bir algoritma yardımıyla simpleks, optimum arayış için harekete geçirilir. Simpleksin hareketleri bir optimuma yeterince yaklaşıncaya kadar devam ettirilir [76, 78-106].

Sabit boyutlu simplekslerden sabit adım büyüklükleri meydana gelmesinden dolayı BSM yönteminin optimuma ilerleme hızı ve optimuma hassaslıkla yaklaşabilme yeteneği sınırlıdır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için temel simpleks metodu olarak bilinen BSM, Nelder ve Mead tarafından 1965 yılında, genişleme ve daralma özelliklerini içeren değişken adım büyüklüğünü kullanarak modifiye edilmiştir. Nelder-Mead modifiye simpleks algoritması MSM olarak da gösterilmektedir.

Simpleks köşeleri, Y_W (Worst) en kötü yanıtı, Y_B (Best) en iyi yanıtı ve Y_N (Next) ikinci en kötü yanıttır. Temel simpleks yönteminde olduğu gibi en kötü yanıtı veren köşenin bulunması ve yerine yeni bir köşenin hesabı üzerine dayanır. Bu yeni köşe merkez nokta (üzerindeki en kötü köşenin yansıtılması (Y_R) ile elde edilebilir. Temel simpleks

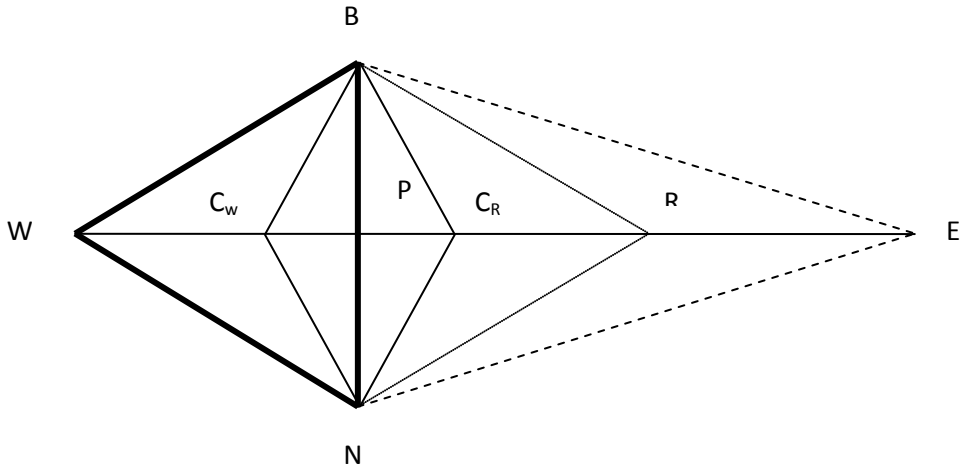
yönteminden farklı olarak yansıtma hareketine ilaveten üç farklı hareket vardır. En iyi köşenin genişletilmesi (Y_E), merkezi nokta üzerinde pozitif daralma (Y_{cR}) ve negatif daralma (Y_{cw}) ile elde edilebilir. Yani, başlangıç simpleksi yansıtma, genişleme ya da daralma ile araştırma uzayında hareket eder. Simpleks yöntemi, simpleksin köşelerinde alınan yanıtların değerlerini kullanır. Her bir simpleks adımında, en kötü köşe atılır ve algoritma gereğince atanan yeni bir değer alır. Aşağıdaki şekilde iki boyutlu bir örnekte verilen bir üçgende elementer geometrik dönüşüm serisinden yansıma, daralma ve genişleme hareketleri gösterilmiştir. MSM de yer alan dört olası hareket aşağıdaki eşitliklerle verilmiştir [76, 78-82].

$Y_R =$ $+$ $\alpha = 1,0$ 2.7.4

$Y_{CR} =$ $+ \beta$ $\beta = 0,5$ 2.7.5

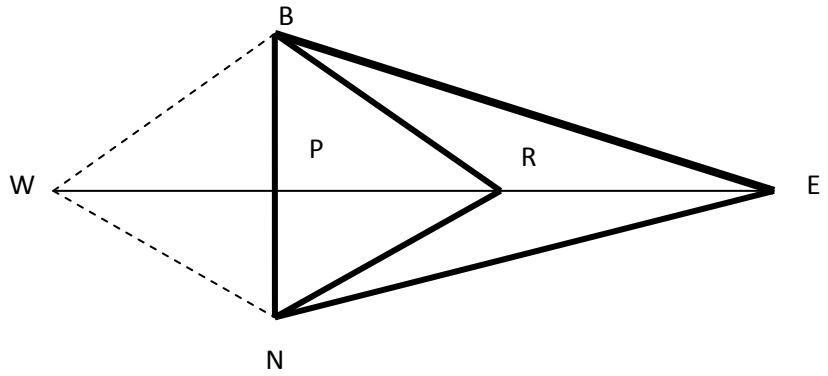
$Y_{CW} =$ $- \beta$ $\beta = 0,5$ 2.7.6

$Y_E =$ $+ \gamma$ $\gamma = 1,0$ 2.7.7



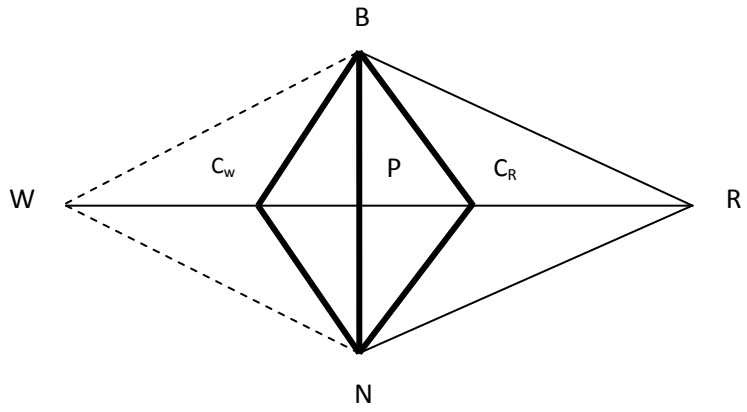
Şekil 2.13. İki boyutlu bir modifiye simpleksin olası hareketleri

Daralma ya pozitif ya da negatif olabilir. Pozitif daralma $0 \leq \alpha \leq 1$ yansıtma noktası olur iken negatif daralma $-1 \leq \alpha \leq 0$ aralığındadır. Genelde daralmalar $\alpha =$ ile yapılır. Temel simpleks yönteminde olduğu gibi en kötü yanıta (Y_W) sahip köşe, diğer köşelerin orta noktası ( ) üzerinden Y_R noktasına yansıtılır. Ancak bu durumda yeni simpleks BNR olarak seçilmeden önce bazı testler uygulanır.



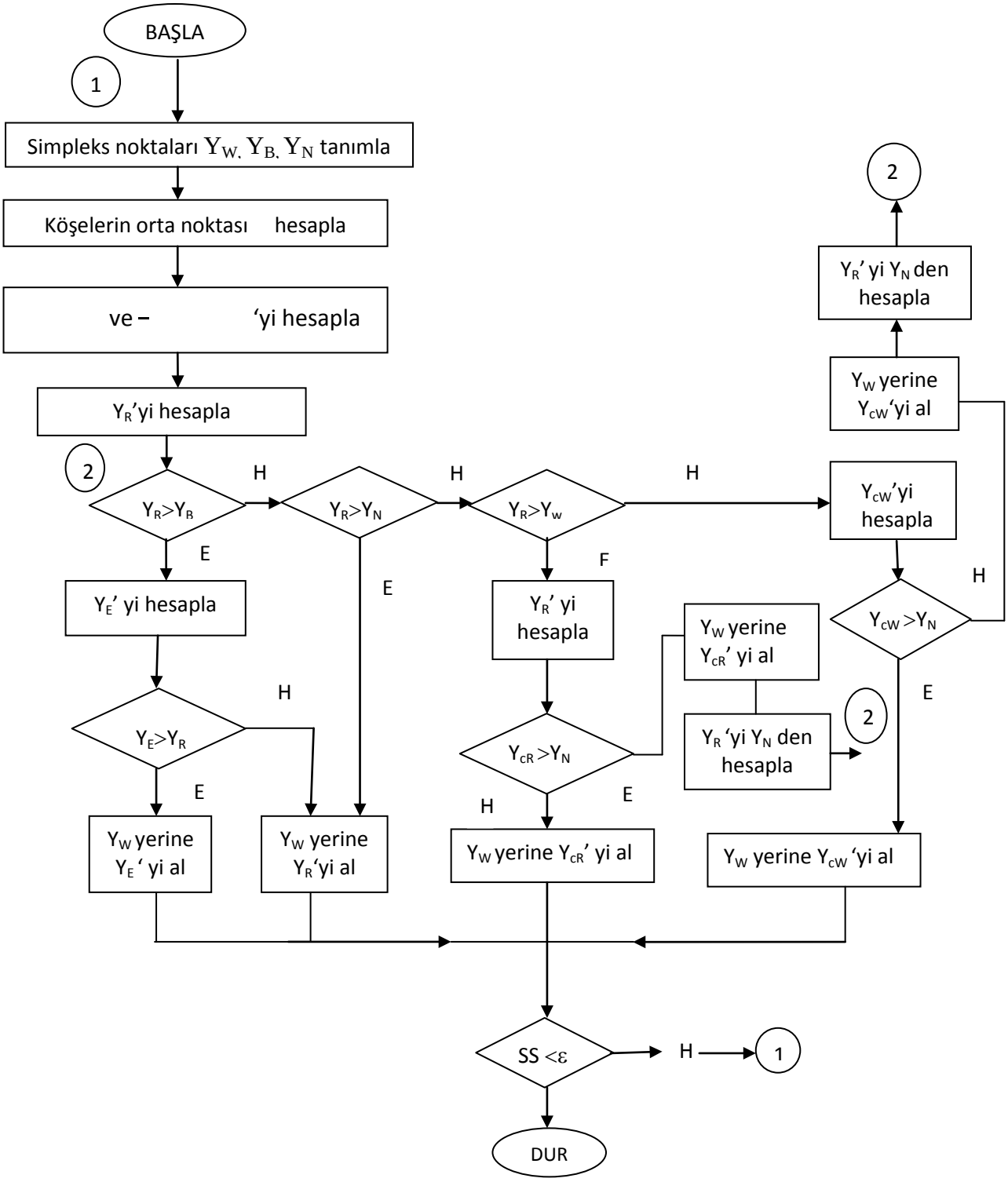
Şekil 2.14. İki boyutlu bir modifiye simpleksin yansıması ve genişlemesi

R'deki yanıt (Y_R), B'deki yanıttan (Y_B) daha iyi ise, önceki yansıtmadaki adım büyüklüğü olan ( )'nin iki katı büyüklüğünde bir adım ile işlem tekrarlanır ve Y_E noktası elde edilir. Yeni simpleksin BNE olarak seçilmesi için $Y_E>Y_R$ koşulunun sağlanması gereklidir. Aksi halde yeni simpleks BNR olarak seçilir. Öte yandan $Y_R<Y_B$ olması halinde Y_R önce Y_N ile karşılaştırılır. $Y_R>Y_N$ ise yeni simpleks yine BNR olarak seçilir; aksi halde Y_R, Y_W ile karşılaştırılır [76, 78, 80-82]. Şekil 2.15'de görüldüğü gibi $Y_R>Y_W$ halinde yeni simpleks BNC_R (pozitif daralma) ve $Y_R<Y_W$ olduğunda da yeni simpleks BNC_W (negatif daralma) olur. Simplekslerin bu hareketleri belirlenen standart sapmaya (SS) ulaşıncaya kadar devam eder.



Şekil 2.15. İki boyutlu bir modifiye simpleksin negatif ve pozitif daralması

Bu algoritmanın akış şeması Şekil 2.16'da görülmektedir.



Şekil 2.16. Nelder-Mead Modifiye Simpleks Yöntemi akış şeması

2.6.4.4.1. Simpleks Yönteminin İlkeleri

Optimizasyon, her bir değişkenin verilen bir araştırma uzayında ilerleme prosedürü; amaç fonksiyonunun seçimi, başlangıç simpleksinin oluşturulması, simpleksin ilerletilmesi ve sonlandırılması adımlarından oluşur [76, 78].

2.6.4.4.2. Amaç fonksiyonunun seçimi

Simpleks yöntemiyle maksimize ya da minimize edilecek nicelik endüstriyel sistemlerde amaca göre verim, ürün kararlılığı, duyarlık, uyum, maliyet veya benzeri değişkenlerden biri veya bunlardan en az ikisinin bileşik bir fonksiyonu olabilir.

Elektromanyetik filtrasyon işleminde bu niceliğin ayırma verimi, enerji tüketimi, elektromanyetik filtre boyutları veya çeşitli ekonomi ölçütlerinden biri olması mümkündür. Amaç fonksiyonu olarak seçilsin veya seçilmesin bütün bu nicelikler her deneme sonunda birer yanıt verirler. Optimizasyon sonunda, amaç fonksiyonunun optimum koşullarında bu ikincil yanıtların bazıları çok elverişsiz düzeylerde bulunabilir. Örneğin, en yüksek verimi elde etmek amacıyla yapılan bir optimizasyon sonucunda çok yüksek bir verime karşılık kararlılığı çok düşük bir ürün elde edilebilir. Böyle bir durumda yeterli kararlılığı sağlayabilmek için verimin bir ölçüde feda edilmesi istenebilir. Bu nedenle, yeterli kararlılığın sağlandığı koşullardan hangisinde verimin en yüksek oranda gerçekleştiğinin de bilinmesi yararlı olur. Bu durumda, her denemede amaç fonksiyonundan başka, önemi olabilecek diğer yanıtların da gözlenmesinin uygun olacağını göstermektedir. Optimizasyon amacı dışında bırakılamayan birden fazla niceliğin bulunması halinde, bunların öngörülen önemlerine göre ağırlıklı bir bileşik fonksiyon, yanıt fonksiyonu da olarak kabul edilebilir.

2.6.4.4.3. Optimize edilecek değişkenlerin seçimi

Maksimizasyonu ya da minimizasyonu istenen niceliğe etki eden etkenler amaç fonksiyonunun değişkenleri olarak alınabilirler. Çoğu zaman, yanıtı belirleyen bu etkenlerin sayısı hayli fazladır. Ancak her etkenin yanıt üzerindeki etki derecesi az ya da çok farklı olduğundan, etkileri ihmal edilebilir düzeyde olan etkenlerin optimizasyon

değişkenleri arasına alınmaması düşünülebilir. Amaç fonksiyonu üzerinde etkili olduğu düşünülen ve denetlenebilir olan değişkenlerin sayısı çok ise, önem testleri uygulayarak bunların sayısı azaltılabilir. İki ya da üç düzeyli faktöriyel tasarımlar bu amaç için uygundur. Bir başka yaklaşımda optimizasyon değişkenleri olarak, önem testleri uygulamaksızın, en önemli olduğu tahmin edilen birkaç etken seçilir ve bu etkenlerle yapılan optimizasyonun, optimum bölgeyi kabaca belirlenmesinden sonra diğer etkenler de dahil edilerek bu bölgeden yeni bir optimizasyon başlatılır. Bu suretle optimuma daha az sayıda deneme ile ulaşılabilir. Dikkate değer bir husus da, simpleks yönteminde optimuma ulaşmak için gerekli olan deney sayısının, artan etken sayısı ile çok fazla artmamasıdır. Örneğin, gerek her defasında tek etken yönteminde gerekse faktöriyel tasarımında etken sayısının bir artırılması, gerekli deney sayısının iki katına çıkarırken simpleks yönteminde bu artış %20 dolayındadır. Bu nedenle çoğu zaman önem testlerine başvurmaksızın, önemli olabilecek bütün etkenler optimizasyona dahil edilir veya yukarıda sözü edilen iki basamaklı optimizasyon yaklaşımı uygulanır [76].

2.6.4.4.4. Etken düzeyleri üzerine kısıtlayıcılar

Deneysel bir optimizasyonda, seçilen etkenlerin uygulanabilir düzeyleri çoğu zaman bazı fiziksel sınırlara tabidir. Örnek olarak bir çözeltideki bir bileşenin çözünürlüğünün sınırlı olması; karıştırma hızı, sıcaklık ve basınç gibi etkenler için uygulanabilir alt ve üst sınırların, kullanılan düzenekle sınırlanması gösterilebilir.

Simpleks yönteminin herhangi bir adımda öngördüğü deney koşulları bu sınırlar dışında kaldığı zaman deney yapılamayacağına göre, kısıtlayıcıların önceden belirlenmesi ve algoritmanın buna uygun olarak işlem yapması beklenir. Sabit adımlı simpleks yönteminde böyle bir durumda en kötü yanıtın alındığı varsayılmakta, böylece bir sonraki adımın sınırlar içine çekilmesi sağlanmaktadır. Modifiye simpleks yönteminde bu konuda iki değişik yaklaşım kullanılmaktadır. Şekil 2.16'da akış şeması basitleştirilerek verilmiş olan yöntemde sınırlar içine çekilme, negatif daralma ile sağlanmaktadır. Diğer yaklaşımda ise, sınırlar dışında kalan etken düzeyi, sınır değerine getirilerek deneyler yapılmakta ve bir sonraki adım için yapılan hesaplarda bu sınır değeri kullanılmaktadır.

2.6.4.4.5. Etken düzeylerinin normalizasyonu

Simpleks aritmetiğini kolaylaştırmak için birimleri ve aralıkları değişik olan etken düzeyleri, bütün etkenler için 0 ile 1 arasında olacak şekilde normalize edilir. Normalizasyon her etken için aşağıdaki bağıntıdan yararlanarak yapılır.

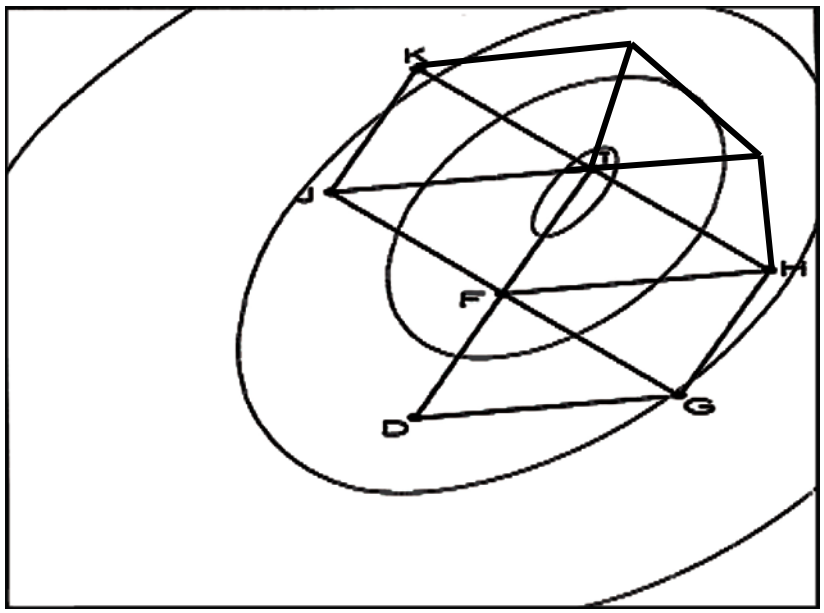
2.7.8

Burada N_k, normalize edilmiş etken düzeyi; k, orijinal etken düzeyi; k_{min}, etken düzeyinin alt sınırı ve k_{max}, etken düzeyinin üst sınırıdır [76].

2.6.4.4.6. İlk adım büyüklüğünün seçimi

Sabit adımlı yöntemde büyük adımların optimuma yaklaşma hızını arttırmasına karşılık optimuma yaklaşma duyarlığını azaltır. Bunun sonucu olarak yüksek duyarlık gerektiğinde bu yöntemde önce büyük adımlarla optimuma yaklaşınca küçük adımlara optimizasyona başvurulabilir. Ancak, çok büyük adımların seçilmesi halinde optimuma yeterince yaklaşmak mümkün olamayacağı gibi Şekil 2.17'de gösterildiği üzere çok küçük adımlar halinde de yanıttaki değişimler, belirsiz hata sınırları içinde örtülü kalabilir. Öte yandan mevcut yanıtta önemli düşüşlerin göze alınamayacağı sistemlerde küçük adım büyüklüğü tek seçenektir. Bu duruma örnek olarak bir fabrikadaki üretimin optimizasyonu verilebilir. Çünkü optimizasyon sırasında geçici olarak da olsa üretimde önemli düşmeler göze alınamayabilir.

Modifiye simpleks yönteminde ilk adım büyüklüğü fazla önemli değildir. Çünkü simpleksin boyutları, genişleme veya daralma sonucunda zaten değişmektedir. Buna rağmen, yanıt yüzeyi için haritalama veya regresyon analizi yapılması düşünülen çalışmalarda, yanıt yüzeyinin daha geniş bir bölgesinde ölçümler alabilmek üzere maksimum adım büyüklüğü seçilebilir. Küçük adım büyüklüğü ise yine optimum bölge dolayında, duyarlığı daha fazla artırma amacıyla tercih edilir [76, 81].



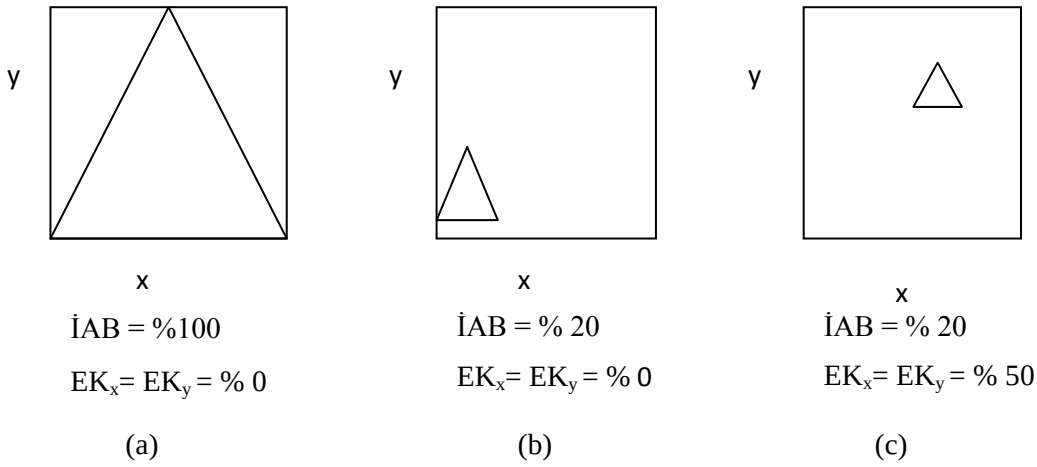
Şekil 2.17. Adım büyüklüğünün optimuma yaklaşabilme yeteneğine etkisi

2.6.4.4.7. İlk simpleksin oluşturulması

Daha önce değinildiği gibi ilk simpleksin k+1 sayıda köşeden oluşan düzgün bir şekil olması arzu edilir. Düzgün bir simpleks elde etmek için izlenebilecek yollardan birisi, birbirinden eşit uzaklıktaki noktaların koordinatlarını katsayılar halinde temsil eden bir matristen yararlanmaktadır. Böyle bir matrise ait katsayılar **Ek 1**'de verilmiştir. Sıfır olan katsayılar, etken uzayındaki en büyük simpleks için söz konusu etken düzeyinin minimum, yani önceden belirlenmiş alt sınırında olması gerektiğini göstermektedir. Benzer şekilde ''1'' katsayısı maksimum etken düzeyine karşılık gelmektedir. Diğer bir deyişle katsayılar, etkenlerin normalize edilmiş düzeylerine karşılık gelmektedirler. Buna göre i deneme numarası olmak üzere sağlanması gereken etken düzeyleri, N_k 2.7.8 eşitlik ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

2.6.9

Ek 1'de verilmiş olan katsayılar en büyük başlangıç simpleksini oluşturduğundan, optimizasyona daha küçük bir adım büyüklüğü ile başlanmak istendiğinde normalize edilmiş etken düzeylerinin, ilk adım büyüklüğü kesri ile çarpılarak küçültülmesi gerekir. Ancak bu durumda ilk simpleks, bir köşesi koordinat sisteminin başlangıcında olmak üzere küçültülmüş olur. İlk simpleksin konumunu istenilen yere getirmek üzere, küçültülmüş olan normalize etken düzeylerine gerekli olan eklemeler yapılır (konum değiştirme terimleri). Başlangıç simpleksi üzerinde yapılan bu değişiklikler Şekil 2.18'de görüldüğü gibi iki değişkenli bir simpleks üzerinde örneklendirilmiştir [76].



Şekil 2.18. İlk simpleks için boyut küçültme ve konum değiştirme

Bu durumda, etken düzeylerini hesaplamada kullanılan bağıntı aşağıda verilmiştir:

2.6.10

2.6.4.4.8. Yansıtma noktası koordinatlarının hesaplanması

Yeni bir denemenin, etkenlerin hangi düzeylerinde yapılacağını belirleyen koordinatlar, yanıtların orta noktası (P) ve en kötü yanıtı veren nokta (W) koordinatları yardımıyla hesaplanır. P'nin koordinatları ise en kötü yanıta sahip olan nokta dışında kalan köşelerin koordinat ortalamaları olarak bulunur:

– 2.6.11

Burada P_j, yansıtmanın yapılacağı orta noktanın j no'lu etkenine karşılık gelen koordinatı; k, simpleksteki etken sayısı; i, simpleks köşe numarası ve , en kötü yanıtlı köşe hariç olmak üzere bir i no'lu köşenin j etkenine karşılık gelen koordinatıdır. Yeni denemenin yapılacağı noktanın koordinatları ise aşağıda verilen bağıntıdan hesaplanır:

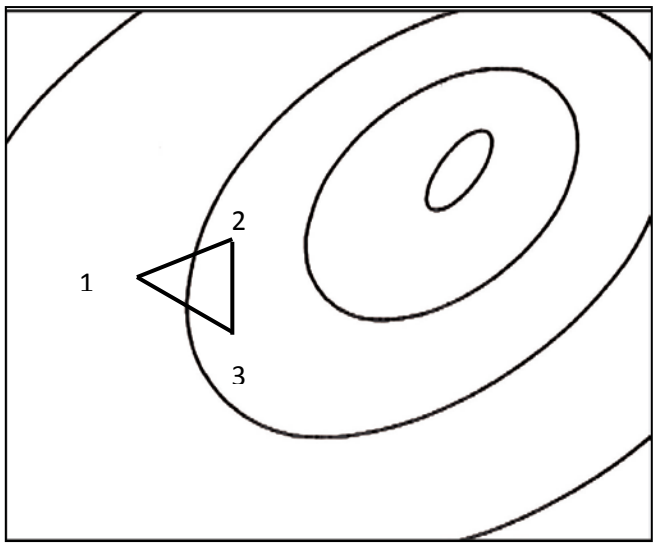
+ f 2.6.12

Burada , en kötü yanıtlı köşesinin j no'lu etkenine karşılıklı gelen koordinatı, f ise, koordinatları hesaplanacak noktanın R, E, C_R ve C_W olmasına göre sırasıyla 1; 2; 0,5 ve -0,5 değerlerinden birini alan bir katsayıdır [76, 78, 80, 83-111].

2.6.4.4.9. Simplekslerin ilerletilmesi

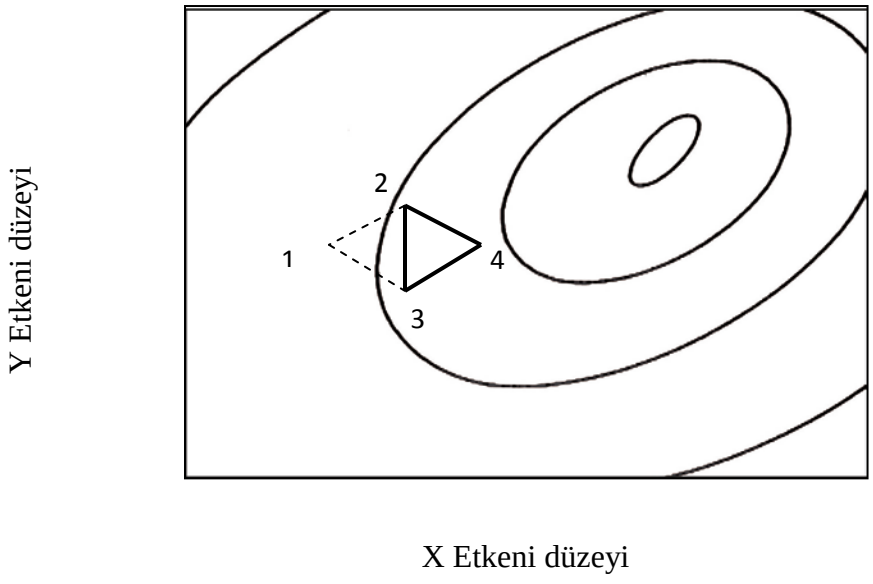
Simpleks optimizasyon yöntemi, algoritmaya göre oluşturulan başlangıç simpleksinin etkenler uzayı içinde belirli kurallara göre optimumun bulunduğu noktaya doğru adımsal olarak hareket ettirilmesine dayanır. Simpleksin, optimum noktaya yönelen beklenen hareketlerinin nasıl gerçekleştiği aşağıdaki şekiller yardımıyla gösterilmiştir.

Basitleştirme amacıyla iki etkenli bir sistem ele alınmıştır. Başlangıç simpleksinin yerleşimi ve yanıtların büyüklük sırasına göre faktör uzayında simpleks adımlarının ne şekilde oluştuğu gösterilmiştir. Şekil 2.19'da, simpleks algoritmasına göre oluşturulan ilk simpleksin yanıt yüzeyi üzerindeki konumu ve simpleks köşelerindeki yanıtların büyüklük sırası (1<2<3) görülmektedir. Bu noktalardaki etken düzeylerini (X_1;Y_1), (X_2;Y_2) ve (X_3;Y_3) koordinatları temsil etmektedir. Eş yanıt çizgileri göz önüne alındığında, en iyi yanıtın 2 noktasında, en kötü yanıtın ise 1 noktasında elde edileceği görülür [76].



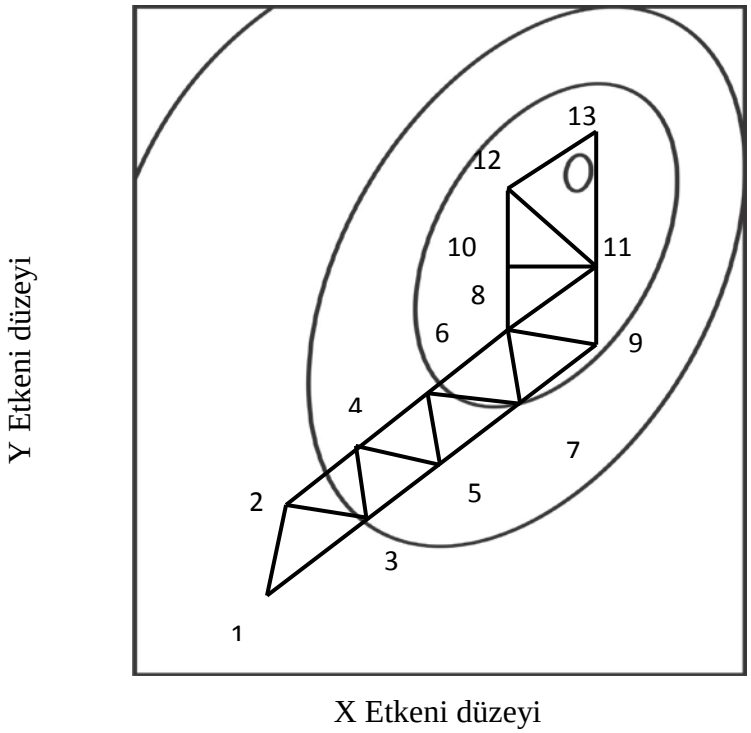
Şekil 2.19. Simplekslerin optimuma doğru hareket ettirilmesi

Simplekste en kötü yanıtı veren 1 no'lu nokta dışlanır ve onun yerine, dışlanan köşenin karşı tarafında yeni bir nokta (4) oluşturulur. Böylece 1,2,3 noktalarının oluşturduğu simpleks geride bırakılmış; 2,3 ve 4 noktalarından oluşan ve optimuma daha yakın olan bir köşeye sahip yeni bir simpleks elde edilmiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Simplekslerin hareket ettirilmesi

Diğer bir anlatımla yöntem, en kötü yanıtı veren köşenin aksi yönünde mevcut köşelerdekinden daha iyi bir yanıt bulunma olasılığının yüksek oluşuna dayanmaktadır. İşleme benzer şekilde devam edildiğinde simpleksler Şekil 2.21'de görüldüğü gibi optimuma doğru ilerleyecektir [76].



Şekil 2.21. Simplekslerin optimuma doğru hareket ettirilmesi

2.6.4.4.10. Simpleks Algoritmasının Kuralları

İlk simpleks için başlangıçta k+1 sayıda deneme gerekmekte, ancak bundan sonraki simpleks adımlarının her biri için yalnızca bir deneme yeterli olmaktadır. Simpleks yönteminin etkinliği, büyük ölçüde bu özelliğine dayanmaktadır. Adımların düzgün olmasını sağlamak amacıyla başlangıç simpleksi, şart olmamakla birlikte, genellikle düzgün bir geometrik şekil oluşturacak biçimde seçilir (önceki örnekte eşkenar üçgen). Bu durumda her adım, ilk simpleksin boyutlarında ve sabit büyüklükte olacağından, yönteme "sabit adımlı simpleks yöntemi" veya basit simpleks yöntemi (BSM) adı verilir. Basit simpleks yönteminin genel kuralları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Kural 1: Belirlenmiş olan faktör uzayı içinde düzgün şekilli, uygun büyüklükte ve istenilen konumda olan ilk simpleks 2.6.10 eşitliği yardımıyla oluşturulur.

Kural 2: Oluşturulan ilk simpleksin her bir köşesine gelen etken düzeylerinde deney yapılarak yanıtlar alınır.

Kural 3: Simpleksin k+1 adet köşesindeki yanıtlar büyüklük sırasına konur.

Kural 4: Simpleksteki ilk hareket, en kötü istenen yanıta karşılık gelen simpleks noktasının atılması ve yerine, kalan diğer noktaların merkezinden karşı tarafa doğru yansıtılması sonucunda elde edilen noktanın alınmasıyla yeni bir simpleks elde edilir.

Kural 5: Eğer yansıtılan nokta yeni simplekste yine en kötü yanıta sahip ise kural 4 tekrar uygulanmaz ancak yerine yeni simplekste ikinci en kötü yanıtın atılması ve yansıtılması ile oluşturulur.

Kural 6: Eğer k+1 adım boyunca simpleksleri oluşturan herhangi bir nokta atılmadan kalırsa, kural 4'ü tekrar uygulamadan önce sürekli kalan köşede yanıt tekrar ölçülür.

Kural 7: Eğer yeni bir köşe bağımsız değişkenlerin sınırları dışında olursa, deneme yapmaksızın bu noktanın yanıtının en kötü olduğu kabul edilir.

Bu kurallar, iki boyutlu simpleksin faktör uzayından geçerken izlediği yolu göstermektedir. Kural 4'ün uygulanması, daha uygun bir yanıtın elde edilmesini sağlar. Kural 5 ile söz konusu bir durumda simpleksin iki konum arasında salınıma girmesini önler. Kural 6, yeni yanıtın işleme girmesiyle simplekslerin sahte bir optimuma yakalanması engellenmiş olur. Kural 7 ise simpleksin, güvenirliği önceden tanımlanmış sınırlar içinde hareket etmesini sağlar.

Sabit adımlı simpleks yönteminin başlıca noksanları, optimuma yaklaşma hızının sabit oluşu (yavaşlığı) ve optimumu saptama duyarlığının seçilen adım büyüklüğüne bağlı oluşudur. Birinci sakıncayı gidermek için büyük adımlarla, ikincisini gidermek için ise küçük adımlarla çalışılması gerekir. Temel simpleks yöntemin bu zayıflığını gidermek amacıyla Nelder ve Mead tarafından 1965 yılında "Modifiye Simpleks Yöntemi" (MSM) geliştirilmiştir. Bu yöntemin en önemli özelliği, yanıtın iyileştiği yönlerde genişleme, kötüleştiği yönlerde ise daralma yaparak simplekslerin optimuma ilerleyişlerini hızlandırmasıdır [76, 78, 81].

2.6.4.4.11. Optimizasyonun Sonlandırılması

Genellikle, birbirini izleyen adımlarda yanıtlar veya etken düzeyleri arasındaki farkın küçülerek belirsiz hata düzeyine düşmesi ölçüt olarak alınmaktadır. Bu amaçla, her simpleksi oluşturan köşelerde alınan yanıtların standart sapmaları izlenir. Standart sapmanın, önceden belirlenen bir değerin altına düşmesi halinde optimizasyon deneylerine son verilir. Sonlandırma ayrıca, ilerleyen simplekslerde etken düzeylerinin birbirine çok yaklaşmasına bakılarak da yapılabilir [76, 78, 81].

2.6.4.4.12. Simpleks yönteminin sağladığı yararlar

Simpleks optimizasyon yönteminin kullanıcıya sağladığı yararlar aşağıda sıralanmıştır [76]:

1. Simpleks yöntemi, sistem yanıtı ile sistem değişkenleri arasındaki ilişkinin yeterince bilinmediği, dolayısıyla modelleme yapılmadığı hallerde başvurulabilecek optimizasyon yöntemlerinden biridir.

2. Optimizasyona değişken olarak alınan etken sayısının arttırılmasıyla, gerekli deneme sayısındaki artış az olduğundan, çok etkenli sistemler için oldukça elverişli bir yöntemdir. Simpleks optimizasyonunda ilave edilecek bir etken, deney sayısını %20 artmasına karşın faktöriyel tasarımda deney sayısı yaklaşık iki kat artabilmektedir.

3. Her simpleks adımı için yalnızca bir deneme yapılması yeterli olduğundan optimuma ilerleyiş oldukça hızlıdır. Böylelikle yöntem, oldukça az sayıda deney ile optimumun saptanmasına olanak sağlar.

4. Simpleks adımlarının doğru yönde atılması için en iyi, en kötü ve ikinci kötü yanıtlarının simpleksin hangi köşelerinde elde edildiğinin bilinmesi yeterlidir. Bu sebeple, söz konusu sıralamayı doğru yapabilecek kadar bir doğruluk, deneyler için yeterli olmaktadır. Ancak yanıtlar arasındaki farkların küçülmesi halinde, örneğin optimum koşullara yaklaştığında doğru bir sıralama için daha hassas ölçümler gereklidir.

5. Yöntem, optimizasyonun herhangi bir aşamasında yeni bir değişken ekleyerek optimizasyona devam edilebilmesine olanak sağlar.

6. Deneysel optimizasyondan başka, fonksiyon ekstramumlarına ve eğri bağdaştırma problemlerine de kolayca uygulanabilen esnek bir yöntemdir.
7. Simpleksin algoritması, bilgisayar ortamında kolaylıkla programlanabilir, hatta zaman alıcı olmasına rağmen hesap makinesiyle bile uygulanabilir.

2.6.4.4.13. Simpleks yönteminin dezavantajları

Yöntemin, bir yanıt yüzeyi üzerindeki yerel bir optimumu bazen bütünsel optimumdan doğrudan ayıramaması bir dezavantajıdır. Ancak bu zayıflık bütün adımsal yöntemlerin ortak bir özelliğidir. Kuşkusuz, bu sakınca farklı etken düzeyleri ile başlayan yeni bir optimizasyon ile deney sayısının artması pahasına giderilebilir.

Yöntemin kullanımındaki diğer bir olumsuz özelliği ise değişken sayısının 6'dan fazla olması halinde simpleks yönteminin etkinliğinin azalmasıdır. Ancak, daha fazla değişkenli bir sistemde daha etkin olan yöntemler, deneysel optimizasyona uygulanabilen yöntemler olmayıp, matematiksel fonksiyonlar için kullanılabilmektedir. Bu nedenle, söz konusu durum, simpleks yönteminin deneysel optimizasyon alanındaki önemini etkilememektedir [76].

2.6.5. Sezgisel Yöntemler

Sezgisel optimizasyon algoritmaları, herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için çeşitli alternatif hareketlerden etkili olanlara karar vermek amacıyla tanımlanan bilgisayar temelli metotlardır. Bu tür algoritmalar yakınsama özelliğine sahip olmakla birlikte kesin çözümü garanti edemez ise de kesin çözüme oldukça yakın sonuçlar elde edilebilir. Sezgisel yöntemlerin sonuçları aynı zamanda kesin çözüm yöntemleri için bir alt veya üst sınır oluşturmaları nedeni ile de önemlidir.

Çoğu sezgisel algoritmaların başarısı mevcut probleme bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bundan dolayı çok daha genel olarak uygulanabilen algoritmaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Son 30-40 yıl içinde bu özelliğe sahip çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar; sosyal bilimler, biyoloji, zooloji, fizik ve bilgisayar gibi bilimlerdeki sistemlerden esinlenerek türetilmiştir.

Bundan dolayı bu tür yaklaşımlara "modern sezgisel yaklaşımlar" veya "yapay zekâ yaklaşımları" adı verilmektedir. Bu algoritmaların en popüler olanları tavlama benzetimi, tabu araştırma algoritması, genetik algoritma, karınca koloni algoritması, yapay bağışıklık algoritması ve diferansiyel gelişim algoritmasıdır. Yapay sinir ağlarının bazı modelleri ve bulanık programlama da optimizasyon amaçlı kullanılmaktadır.

Tavlama benzetimi ve tabu araştırma algoritmaları, temel adımları yukarıda verilen bölgesel-sezgisel komşuluk araştırmalarının çok daha güçlü versiyonlarıdır. Birinci algoritma fizik biliminden (istatistik-mekanik), ikincisi ise zeki problemleri çözmenin genel kurallarından esinlenerek türetilmiştir. Genetik algoritma ve yapay bağışıklık algoritması ise biyoloji biliminin bazı prensiplerini temel alır. Örneğin karınca koloni algoritması, gerçek karınca kolonilerinin davranışları örnek alınarak geliştirilmiştir [72-74].

2.6.5.1. Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetiminin Arama Tekniklerindeki Yeri

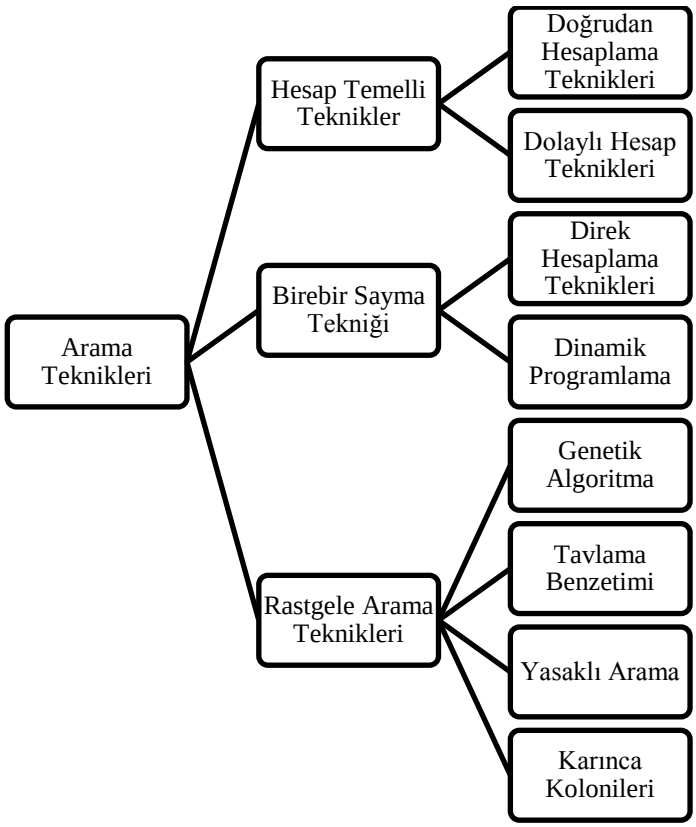
Bir optimizasyon probleminin çözümünde belirli matematiksel ifadelere veya kurallara dayanan algoritmalar kullanılabilir. Bazı algoritmalar gerçek çözümü bulmayı garanti edemez. Optimuma yakın çözümü sağlayan algoritmalar, arama teknikleri olarak adlandırılır. Bir problemin çözümü için farklı araştırma teknikleri kullanılabilir. Şekil 2.22'de arama tekniklerinin sınıflandırılması verilmiştir.

Hesap Temelli Teknikler: Bu araştırma tekniği doğrudan ve dolaylı hesaplama tekniği olarak iki gruba ayrılabilir. Dolaylı hesaplamada amaç fonksiyonunun eşit olduğu ağırlık grubundan sıfıra kadar, doğrusal olamayan denklem kümeleri için yerel çözüm araştırılır. Doğrudan hesaplamada, Newton ve Fibonancci yöntemlerinde olduğu gibi yeni noktaların ağırlığını kullanarak veya araştırma uzayı çevresinde sıçramalar yaparak çözüm aranabilir. En uygun ağırlık adımı ile en iyi yerel nokta bulunur.

Birebir Sayma Tekniği: Çözüm için aynı anda bir noktadan başlayarak ilgili olan her bir nokta araştırılır. Bu tekniği geliştirmek çok basit ama önemli hesaplama teknikleri gerektirebilir. Sayma tekniğine en iyi örnek dinamik programlamadır.

Rastgele Arama Teknikleri: Temelde sayma teknikleri gibidir. Fakat araştırmaya rehberlik etmesi için ek bilgi kullanılır. Bu araştırma tekniği ile çok karmaşık sistemler

çözümlenebilir. Rastgele araştırma teknikleri, genetik algoritma, tavlama benzetimi, yasaklı arama ve karınca kolonileri olarak gruplara ayrılabilir [72].



Şekil 2.22. Arama Teknikleri

2.6.6. Genetik Algoritma

Tabiatta olup biten tüm olaylarda doğal seçimin geçerli olduğu göze çarpar. Evrim, hayat şartlarına uyum gösterebilenlerin yaşamasını sağlayan mükemmel bir algoritmadır. Biyolojik süreci modelleyerek fonksiyonları optimize edilebilmesi için, doğanın sonsuz esin kaynağı olabileceğini J. Holland'ın çalışmaları da kanıtlamıştır. Makine öğrenmesi konusunda çalışmalar yapan J. Holland, evrim kuramından etkilenerek genetik süreci bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşünmüştür. Genetik Algoritma ilk sözcüğü biyoloji, ikinci sözcüğü ise bilgisayar biliminden almaktadır. Sadece bir tane mekanik yapının öğrenme yeteneğinin geliştirilmesi yerine, böyle yapılardan oluşan bir topluluğun

çoğalma ve değişim gibi genetik süreçlerden geçirilerek, başarılı yeni bireylerin oluştuğu görülmüştür. J. Holland'ın çalışmalarının sonuçlarını açıkladığı kitabının 1975'de yayınlanmasından sonra geliştirdiği yöntemin adı "Genetik Algoritma" ya da kısaca GA olarak benimsenmiştir. Ancak 1985 yılında J. Holland'ın doktora öğrencisi D. E. Goldberg adlı bir inşaat mühendisi, 1989'da konusunda bir klasik sayılan kitabını yayınlayıncaya kadar, GA'ların pek pratik olmayan bir araştırma konusu olduğu düşünülmekteydi. Hâlbuki D. E. Goldberg'in gaz borusu hatlarının denetimi üzerine yaptığı çalışma, ona hem 1985 National Science Foundation Genç Araştırmacı ödülünü kazandırmış hem de GA'nın uygulanabilirliğini bilim dünyasına kanıtlamıştır.

GA, popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Özellikle çözümü zor non-lineer problemlerde etkin olarak kullanılmaktadır. GA, genetik operatörler yardımıyla "doğal seçim" sürecinin bilgisayar ortamında benzeştirilmesini esas almaktadır. Genetik bilimindeki birçok terim benzer anlamlarla optimizasyon tekniğinde kullanılmaktadır. Bu terimlerin genetik biliminde ve algoritmadaki karşılıkları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Biyolojide bir topluluğu oluşturan bireylerin genetik algoritmadaki karşılığı problemin çözümü olarak önerilen herhangi bir modeldir. Model parametrelerinin alabileceği sayısal değerlerin alt ve üst sınırları, algoritmaya önceden verilerek olası çözüm uzayı tanımlanır. Her parametre için farklı çözüm aralıkları tanımlanabilir. Parametreler için çözüm aralıkları ve topluluktaki birey sayısı tanımlandıktan sonra, algoritmanın ilk adımında başlangıç topluluğu oluşturulur. Başlangıç topluluğu genellikle rastgele oluşturulur. Başlangıç topluluğundaki bireyler kodlandıktan sonra genetik evrim sürecine sokularak, çevre koşullarına uygun bireylerin toplulukta çoğalmaları sağlanır. Topluluk sürekli daha iyi çözümler oluşturmaya çalıştığı için, zaman içinde değişir. GA'nın genel yapısında, topluluk içinde her çözüme, diğer çözümler ile karşılaştırıldığında ne kadar iyi bir çözüm olduğunu gösteren bir uyum değeri atanır. Uyum değeri ne kadar büyükse bireyin veya organizmanın, sonraki nesilde yaşama ve özelliklerini sonraki nesillere taşıma şansı o kadar fazla olur. GA, topluluğu geliştirerek en uygun bireyin oluşturulmasını hedefler ve en iyi çözümü elde edebilmek için, zayıf çözümleri evrimsel bir işleyişe göre eleme yoluna gider. En iyi çözüm, yapılan çevrimler sonucunda hala hayatta kalabilmeyi başaran çözümdür. Bunu sağlamak için uyum değeri yüksek bireylere, topluluktaki diğer bireylerle eşleşerek üreme fırsatı verilir. Böylece bir önceki neslin bazı özelliklerini taşıyan yeni bireyler meydana

getirilir. Mevcut neslin en iyi bireylerini seçip, yeni bireyler elde edilerek yeni bir topluluk oluşturulur. Yeni nesil önceki neslin iyi bireylerinin sahip olduğu özelliklerin büyük bir kısmını taşır. Böylece nesiller boyu iyi özellikler topluluğa taşınır ve topluluk optimal çözüme yakınsar.

Çizelge 2.2. Biyolojik evrimdeki bazı terimlerin, problemlerin GA'daki karşılıkları

Biyolojik Evrim	**Genetik Algoritma**
Birey	Model
Kromozom	Kodlanmış parametre kümesi
Gen	Parametreyi tanımlayan koddaki bir hane (ikili kodlamada 1 yada 0 değeri alabilir)
Doğal seçim	Daha uyumlu veriyi üreten çözüm kabul edilir.
Adaptasyon	İlerleyen nesillerde, yanıtları daha iyi olan sürece dahil edilir.
Mutasyon	Erken yakınsamayı ve yerel minimumlara takılmayı engeller.

Temel ilkelerinin ortaya atılmasından sonra, GA'lar hakkında birçok bilimsel çalışma yayınlanmıştır. Ayrıca, genetik algoritmaların kuramsal temeller ve uygulamaları hakkında birçok uluslararası konferans da düzenlenmektedir. Önceleri sadece doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine uygulanan GA, daha sonra karesel atama, çizelgeleme, gezgin satıcı, tesis yerleşimi, montaj hattı dengeleme ve şebeke tasarımı gibi kombinasyonel optimizasyon problemlerine de başarıyla uygulanmıştır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik algoritmalar, parametre kümesini değil kodlanmış biçimlerini kullanır. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tararlar. Böylece, etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar. Diğer bir önemli üstünlüğü ise çözümlerden oluşan topluluku eş zamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel optimuma takılmamalarıdır. Bu özellikler de, genetik algoritmaların, özellikle klasik arama yöntemlerinin yetersiz kaldığı karmaşık çözüm uzayları ile karakterize edilen, optimizasyon problemlerine uygulanmasını elverişli kılmaktadır. GA'lar, bu tip problemlerde global optimum çözüme genellikle daha yüksek bir olasılıkla ulaşabilmektedir [72-74,77,107-109].

2.6.6.1. Genetik Algoritma Temel Kavramları

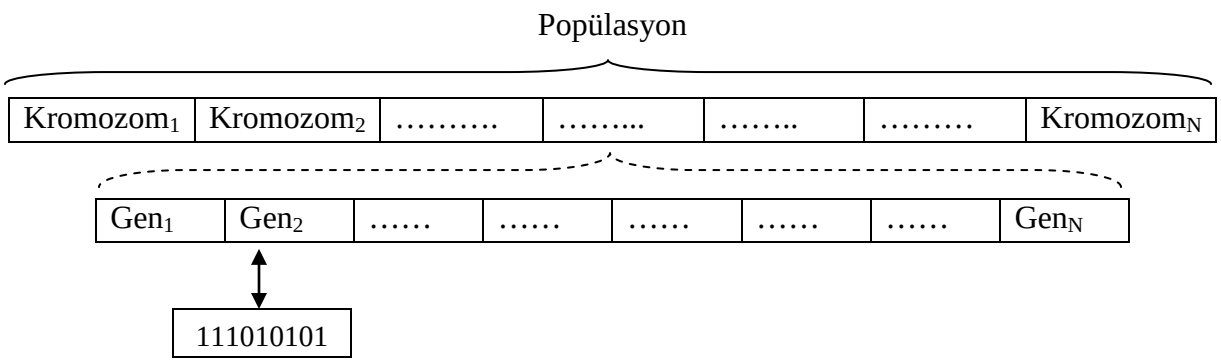
Genetik algoritmanın çalışmasında ve başarılı çözüm değerlerine ulaşmasında algoritma yapısında kullanılan kavramların ve bu kavram değerlerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Aşağıda bu kavramlar açıklanmıştır [72-73].

Gen: Kromozom yapısında kendi başına birer genetik bilgi taşıyan en ufak yapı birimine gen denir. GA'nın kullanıldığı programlama yapısında bu gen yapıları, programcının tanımlamasına bağlıdır. Bir genin içerdiği bilgi sadece ikili tabandaki sayıları içerebileceği gibi onluk taban ve onaltılık tabandaki sayı değerlerini de içerebilir.

Kromozom: Bir ya da birden fazla gen yapısının bir araya gelerek problemin çözümüne ait tüm bilgiyi içeren dizilere kromozom denir. Kromozomların bir araya gelmesiyle popülasyon (topluluk) oluşturulur. Kromozomlar, üzerinde durulan problemin olası çözüm bilgilerini içermektedir. Kromozomun hangi kısmının ne anlam taşıyacağı, ne tür bilgi içereceği kullanıcının olaya bakışına bağlı olarak değiştirmektedir.

Popülasyon (Topluluk): Popülasyon, çözüm bilgilerini içeren kromozomların bir araya gelmesiyle oluşan olası çözüm topluluğuna denir. Topluluktaki kromozom sayısı sabit olup problemin özelliğine göre programlayıcı tarafından belirlenir. GA'nın işleyişi esnasında bu topluluk kümesinden bir takım kromozomlar yok olmakta ve yerlerine yeni kromozom yapıları eklenerek popülasyon büyüklüğü sabitlenmektedir.

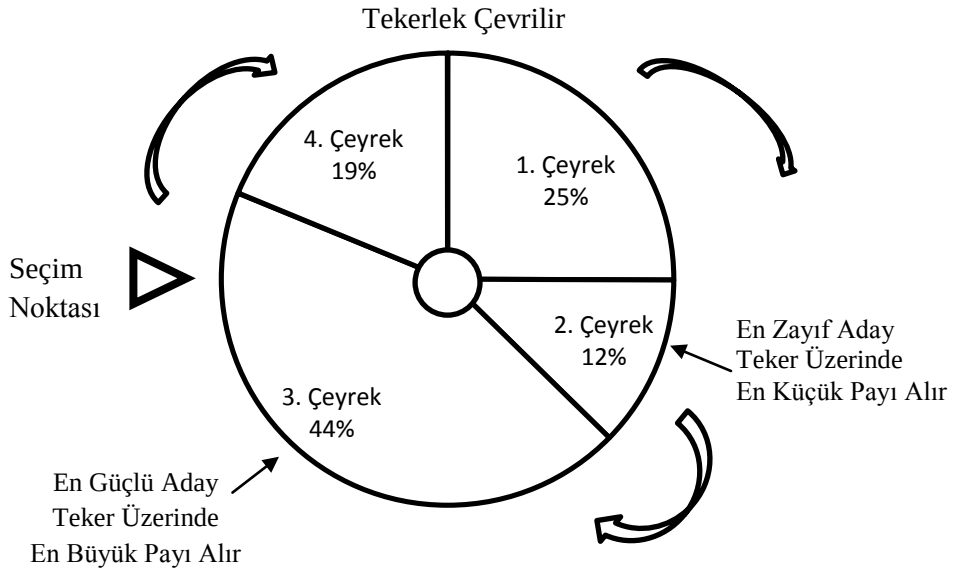
Uygunluk Değeri: Kromozomların, çözümünde gösterdikleri başarı derecesini belirleyen bir değerlendirme işlevidir. Hangi kromozomların (dizi) bir sonraki nesle taşınacağı ve hangi kromozomların yok olacağına, uygunluk değerlerinin büyüklüğüne göre karar verilir.



Şekil 2.23. Popülasyon Yapısı

2.6.6.2. Seçim Mekanizmaları

GA'da bir topluluktan gelecek ve yeni topluluğu oluşturacak bireyler bir seçim mekanizması ile seçilirler. Mevcut topluluktan sonraki topluluğa geçecek olan bireyler mevcut toplulukta en uygun değere sahip olan bireylerdir. GA'da bu işleme "yeniden üretim işlemi" denir. Goldberg, Turnuva, Rulet Çemberi gibi çok sayıda seçim mekanizması bulunmaktadır.



Şekil 2.24. Rulet tekerleği

Genetik algoritmanın uygulaması için kullanılan en basit metot, bayaslanmış rulet tekerleği tekniğidir. Bu teknikte her bir çözüm, kalite değerinin popülasyonun ortalama kalite değerine oranına göre tekerlek üzerine yerleştirilir. Bu durum dört tane bireyden oluşan bir popülasyon için Şekil 2.24'de gösterilmektedir. Daha sonra tekerlek, tekrar üremeye tabii tutulacak bireylerin seçimi için yeterli sayıda döndürülür. Her dönüşte top, hangi bireye ait boşluğa girerse dönüş için o birey başarılı olmuş demektir. Başarılı adaylar eşleştirme havuzda toplanarak diğer genetik operatörlerin uygulaması için hazırlanırlar [72, 74].

2.6.6.3. Genetik Operatörler

GA, topluluk olarak adlandırılan, mümkün çözümlerin kodlandığı dizilerle biyolojik sistemlerin özelliğini benzeten operatörlerden oluşur. Başlangıç topluluğu problemin tüm mümkün çözümlerinin bir alt kümesinden oluşmaktadır. Topluluk genişliğinin seçiminde problemin karmaşıklığı ve aramanın derinliği önemlidir. Bir toplulukta bulunan bireylerin ne kadar iyi olduğu "uygunluk fonksiyonu" yardımıyla değerlendirilir. Bu nedenle öncelikle dizilerin uygunluk değerleri hesaplanır. Basit bir GA'da uygunluk fonksiyonu probleme göre değişmektedir. Uygunluk fonksiyonu, dizileri problemin parametreleri haline getirerek onların bir bakıma şifresini çözer ve bu parametreleri kullanarak dizilerin uygunluğunu bulur. Çoğu zaman GA'nın başarısı bu fonksiyonun verimli ve hassas olmasına bağlıdır. İyi bir dizi, maksimizasyon problemi için yüksek, minimizasyon problemi için düşük uygunluk değerine sahip olmalıdır. Başlangıç topluluğu oluşturulduktan sonra bu topluluktaki bireyler çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak değişime uğratılır. Bu operatörlerin uygun kombinasyonlarının kullanımı genetik algoritmaların performansı için oldukça önemlidir. Karmaşık problemleri çözmek için genetik algoritmanın gelişmiş ve probleme has özel genetik operatörlere ihtiyaç gösterdiği söylenebilir [72-74, 77].

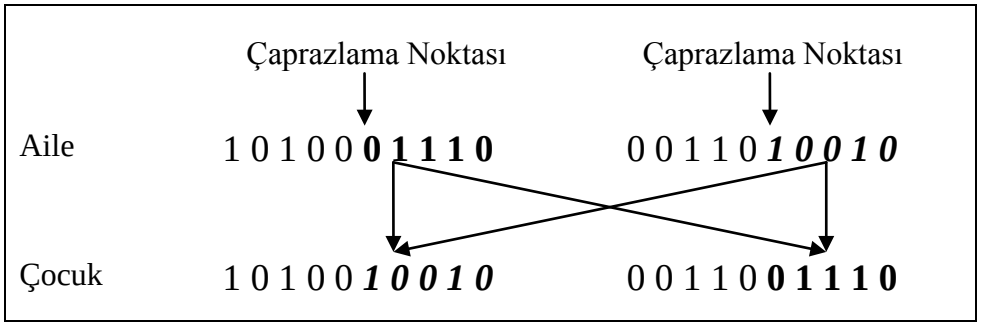
2.6.6.3.1. Tekrar Üreme İşlemcisi

Tekrar üreme işlemcisi, kalitesi yüksek bireylerin hayatta kalmaları ve sayılarının artması, kalitesi düşük bireylerin ise sayılarının azalarak kaybolması prensibine göre çalışan bir genetik algoritma elemanıdır. Bu seçme işlemi tabiatta çevre, yapay sistemlerde ise amaç fonksiyonu ve diğer kalite değerlendirme işlemleri tarafından kontrol edilir. Bireysel yapılar bir nesilden diğerine geçerken kalite değerlerine göre daha fazla kopya edilme şansları vardır. Bu yüzden daha kaliteli çözümlerin toplulukta baskın olmaları, kalitesiz olanların ise yavaş yavaş kaybolmaları sağlanır [72].

2.6.6.3.2. Çaprazlama İşlemcisi

Çaprazlama işlemcisi farklı iki birey arasında bilgi değişimini, mutasyon işlemcisi ise bir bireyde rassal değişimi sağlayarak yeni bireylerin oluşmasına olanak verir. Bu işlem sonunda edilen dizilerin uygunluk değerleri tekrar hesaplanır. Önceden belirlenmiş olan durdurma koşulu sağlandığında topluluktaki en iyi uygunluk değerine sahip dizi, problemin çözümü olarak alınır. Şekil 2.25'deki gibi çaprazlama işlemcisi topluluktaki farklı bireyler arasında gen değişiminin yapılarak, aynı topluluk içinde farklı noktalara doğru aramanın gerçekleşmesini sağlar. Eğer çaprazlama meydana gelmez ise ebeveynler hiçbir değişime uğramadan bir sonraki topluluğa aktarılmaktadır. Bir topluluğa çaprazlama işlemcisi, çaprazlama oranı ile uygulanır. Çaprazlama oranı, çaprazlama işlemcisinin kullanım sıklığını kontrol eder. Yüksek çaprazlama oranı, topluluk değişkenliğini hızlı bir şekilde gerçekleştirir. Düşük çaprazlama oranı, aramanın çok yavaş gerçekleşmesine sebep olur.

Tek noktalı çaprazlama, iki noktalı çaprazlama, pozisyona dayalı çaprazlama, sıraya dayalı çaprazlama ve kısmi planlı çaprazlama işlemcileridir. GA'nın son iterasyonlarında iyi çözümlere yakınsadığından dolayı, topluluktaki bireyler birbirine çok benzemektedir. Bu aşamada sadece çaprazlama işlemcisinin kullanılması topluluktaki değişkenliği sağlayamamaktadır [72-74,114].

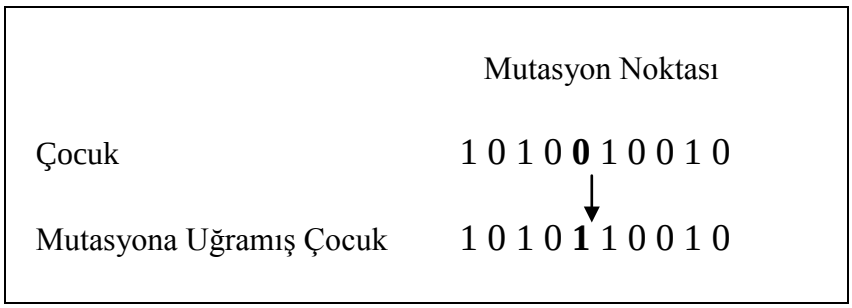


Şekil 2.25. Genetik Algoritmada Çaprazlama

2.6.6.3.3. Değişim (Mutasyon) İşlemcisi

Mutasyon işlemcisi ise dizi içinden seçilen bir veya birkaç geni değiştirerek toplulukta değişkenliğin meydana gelmesine yardımcı olmaktadır. İkili düzende

kodlamanın yapıldığı bir dizide rassal olarak seçilen bir veya birden fazla elemanın değeri 0 ise 1, 1 ise 0 yapılarak mutasyona uğratılır. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi mutasyon işlemi sonucunda yeni bir birey elde edilmiş olur.



Şekil 2.26. Genetik Algoritmada Mutasyon

Mutasyonun etkinliği özellikle algoritmanın son adımlarında kendini göstermektedir. Her topluluğa mutasyon işlemcisi, mutasyon oranı ile uygulanır. Sadece seçim ve çaprazlama operatörlerinden meydana gelselerdi, GA yerel bir optimuma çok hızlı bir şekilde ulaşabilirdi. Toplulukta çeşitlilik yaratabilmek, çaprazlama sonucunda kaybolabilen iyi özellikleri geri kazanabilmek ve global optimuma ulaşabilmek için bireylerdeki kodlar, belirli bir olasılık ile mutasyona uğratılmaktadır. GA'nın bu işleyişi önceden belirlenen bir durdurma koşulu sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Mutasyon işlemcisinin uygulama biçimi GA'nın kullanıldığı probleme göre değişebilir [72-74, 114].

2.6.6.3.4. Elitizm (En İyinin Saklanması) Yöntemi

Elitizm ya da optimumun saklanması olayında topluluk içindeki en iyi bireylerin ya da belirli bir genişlikteki yüzdeliğe sahip bireyler o topluluktan alınarak hiçbir değişikliğe uğratılmadan bir sonraki nesil topluluğuna aktarılır. Genetik operatörlerin kullanımı sonrası en iyi bireyin yok olması söz konusu olduğundan topluluk içindeki çözümü en iyi temsil eden dizi bir sonraki nesle kopyalanır [73, 74].

2.6.6.4. Kontrol Parametreleri

Genetik algoritmanın kontrol parametreleri değerlerinin seçimi, algoritma performansı üzerine önemli etkilere sahiptir. Basit bir genetik algoritmanın temel kontrol parametreleri şunlardır: topluluk büyüklüğü, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı [73].

2.6.6.4.1. Topluluk büyüklüğü

Topluluk büyüklüğü, algoritmanın performansını iki şekilde etkilemektedir. Birincisi, topluluk büyüklüğünün aşırı küçülmesi arama uzayının yetersiz örneklenmesine sebep olması nedeniyle kontrollü ıraksama zorlaştırır ve çözümü bir alt optimal noktaya doğru sürükler. İkincisi, topluluk için aşırı yüksek değer seçildiğinde bir nesillik gelişim oldukça uzun süreye ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden topluluk büyüklüğü için uygun bir değer belirlenmelidir. Topluluk büyüklüğü yığın olarak 20 ile 100 adet arası kromozom içerecek şekilde düzenlenmektedir. Topluluk büyüklüğü problemin tipine göre ve programı yazan kişiye göre daha az ya da daha fazla olabilir [72,73].

2.6.6.4.2. Çaprazlama oranı

Çaprazlama oranı, yeni topluluk bireylerine uygulanacak çaprazlama işlemcisinin frekansını belirlemek amacıyla kullanılan parametredir. Düşük çaprazlama oranı yeni kuşağa çok az sayıda yeni yapının girmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla tekrar üreme işlemcisi algoritmada aşırı etkili bir operatör haline gelmekte ve aramanın yakınsama hızı düşmektedir. Yüksek çaprazlama oranı benzer veya daha iyi yapıları üretmeden, en iyi çözümü veren yapılar çok hızlı olarak bozulduğundan algoritmanın performansını düşürmektedir. Bu sebeple çaprazlama oranı, %50-%95 oranında uygulanmaktadır [72,73].

2.6.6.4.3. Mutasyon oranı

Mutasyon işlemcisinin frekansı, etkili bir genetik algoritma tasarlamak için çok iyi kontrol edilmelidir. Mutasyon operasyonu, araştırma sahasına yeni bölgelerin girmesini

sağlar. Yüksek mutasyon oranı, araştırmaya daha fazla rastgelelilik kazandıracak ve araştırmayı hızla ıraksatacaktır. Başka bir deyişle, topluluğun gelişmesine değil tahribatına sebep olacaktır. Çok düşük mutasyon oranının kullanılması ise ıraksamayı aşırı düşürecek ve arama uzayının bütünüyle araştırılmasını engelleyecektir ve algoritmanın alt optimal çözüm bulmasına neden olacaktır. Bunun sonucu olarak mutasyon oranı %0,50 -%15 arasında değişmektedir [72,73].

2.6.6.4.4. Kontrol Parametreleri ile İlgili Çalışmalar

De Jong (1975), genetik algoritmanın performansı üzerinde kontrol parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla çeşitli test problemleri kullanarak çalışmalar yapmış ve bu çalışmalar sonucunda iyi bir gerçek zaman (on-line) ve gerçek olmayan zaman (off-line) performansı elde etmek için kontrol parametrelerine uygun değerler önermiştir. Bu değerler Çizelge 2.3'de verilmektedir. Benzer olarak, Schaffer ve arkadaşları (1989) GA'nın performansı üzerinde kontrol parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla ayrıntılı bir çalışma yapmış ve iyi bir gerçek zaman performansının elde edilmesi için Çizelge 2.5'de verilen değerlerin kullanılması gerektiğini önermişlerdir.

Grefenstette (1986), GA'nın kontrol parametrelerinin optimize edilmesi için ikinci bir GA'nın kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu metodun yukarıda belirtilen deneysel yaklaşımların her ikisinden de daha kararlı olduğu aşikârdır. Çünkü bu metot, kontrol parametreleri uzayını daha iyi araştırmaktadır. Grefenstette tarafından önerilen kontrol parametre değerleri Çizelge 2.3'de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Genetik algoritma için önerilen kontrol parametre değerleri

Kontrol Parametreleri	De Jong	Schaffer	Grefenstette
Topluluk büyüklüğü	50-100	20-30	30
Çaprazlama oranı	0,60	0,75-0,95	0,95
Mutasyon oranı	0,001	0,005-0,01	0,01

Herhangi bir uygulamada algoritmadan iyi performans elde edebilmek için kontrol parametreleri için yeni optimal değerlerin çözülecek problem için elde edilmesi gerekmektedir. Bu da oldukça zaman alıcı bir ön çalışmadır [72,73].

2.6.6.5. Genetik Algoritma İşlem Adımları

GA, sürekli iyileşen çözümler üretir. Öncelikle belirlenen sayıda (topluluk büyüklüğü) rastgele çözümle süreç başlatılır (başlangıç topluluğu). İterasyonlar boyunca mevcut çözümler üzerinde yapılan birtakım değişikliklerle (seçim, çaprazlama ve mutasyon) daha iyi sonuçlara ulaşmak amaçlanmaktadır. Şekil 2.27'deki gibi bir problemin GA ile çözümünde takip edilecek işlem basamakları şöyledir:

1. Problemin çözümleri uygun bir biçimde kodlanır. Kodlamanın çeşitli yolları olmasına karşın (Gray kodlama, kayan nokta vb.) ikili kodlama yaygın olarak kullanılmaktadır.

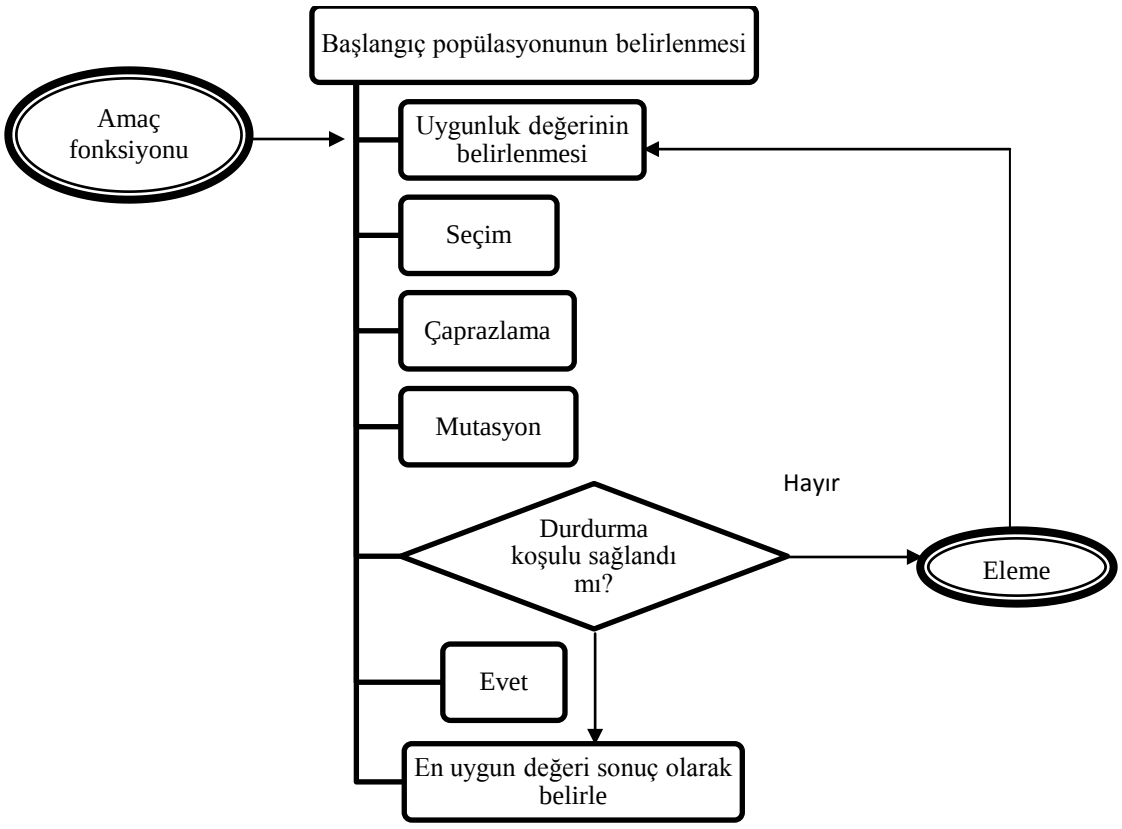
2. Problemin büyüklüğüne bağlı olarak N tane kodlanmış çözüm grubu oluşturulur.

3. Topluluktaki her bir dizinin uyum değeri hesaplanır. Hesaplanan uyum değeri, dizinin (çözüm) ne kadar iyi olduğunun bir göstergesidir. Bu hesaplamada kullanılan fonksiyona uyum fonksiyonu adı verilir. Uyum fonksiyonu, diziyi problemin parametreleri haline dönüştürerek onların bir bakıma şifresini çözer. Sonra, bu parametrelere göre hesaplamayı yaparak dizilerin uygunluğunu bulur.

4. Topluluğa yeni diziler kazandırabilmek, diğer bir ifadeyle arama uzayındaki farklı çözümlere ulaşabilmek için seçme, çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılır.

5. Yeni topluluktaki dizilerin uyum değerleri yeniden hesaplanır. 4. ve 5. adımlar belirli bir durdurma kriteri sağlanana kadar tekrarlanır. Örneğin, belirli bir uyum değerinin bulunması, algoritmanın belirlenen iterasyon sayısına ulaşması ya da topluluktaki dizilerin benzer yapıya yakınsaması GA'da durdurma kriteri olarak kullanılabilir.

Seçim işlemcisi ile seçilmiş olan bireyler çaprazlama havuzuna girmeye hak kazanırken seçilemeyen bireyler yok olmaktadır. Seçim operatörleri ile tıpkı gerçek doğada olduğu gibi güçlü olanların hayatta kalması sağlanılmaktadır. Seçim işlemcisi sonrasında hayatta kalan her birey çaprazlama topluluğundaki diğer bir birey ile rastgele bir şekilde eşleştirilmektedir.



Şekil 2.27. Genetik Algoritma Akış Şeması

Amaç, yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerde bulunduğu kabul edilen yapı taşlarının (iyi özelliklerin) çaprazlama ve mutasyon sonucunda ebeveynlerden sonraki nesillere daha fazla sayıda geçirilmesi yoluyla daha yüksek uygunluk değerlerine sahip bireylerin oluşturulmasını sağlamaktır [73, 107, 109-112].

2.6.6.6. Genetik Algoritmaların Avantajları

Her problemin çözümü için GA kullanmak iyi bir yol değildir. Birkaç parametreli bazı analitik fonksiyonların çözümünde klasik metotlar daha hızlıdır. Böyle durumlarda nümerik metotlar tercih edilmelidir. Bununla beraber bazı problemler bu kategoriye girmezler. Aşağıda ifade edildiği gibi GA kullanıcıya sağladığı birçok avantaj vardır [72-74]. GA'nın kullanımdaki avantajları şu şekilde sıralanabilir:

1. Sürekli ve ayrık parametreleri optimize eder.
2. Diferansiyel işlemler gerekmez.

3. Amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırır, böylece global optimuma ulaşma şansı yüksektir.
4. Çok sayıda parametrelerle çalışma imkânı vardır.
5. Karmaşık amaç fonksiyonunun parametrelerini, yerel minimuma veya maksimuma takılmadan optimize edebilir.
6. Model üzerinden algoritmanın istenen sonuca ulaşması çok kısa süre içinde gerçekleşmektedir.

2.6.7. Tavlama Benzetimi Algoritması

Tavlama benzetimi algoritması (TBA), katıların belirli bir başlangıç sıcaklığından başlayarak yavaş yavaş soğutulduğu tavlanma sürecinin benzetimi olan büyük ölçekli optimizasyon problemlerine global minimuma ya da ona yakın çözümleri bulmak için istatistik mekanikten türetilmiş bir olasılıklı karar verme tekniğidir. Amaç ya da enerji fonksiyonu, TBA ile minimuma indirgenecek fonksiyona karşılık gelir. Kontrol parametresi sıcaklıktır ve minimizasyon problemleri için daha iyi bir çözüme ulaşılmasının olasılığını değerlendirir. "Tavlama Benzetimi" terimi, katıların fiziksel tavlanma süreci ile olan benzerlikten ileri gelmektedir.

TBA, katıların ısıtılması ve sonra kristalleşmeye kadar yavaş yavaş soğutulması esasına dayalı bir yaklaşımla çözüm alanını tarar. Bu benzetime göre, sıcaklık değeri, elde edilen en iyi çözümden daha kötü çözümlerin kabul edilme olasılığını belirlemede kullanılır. Yüksek bir sıcaklık değeri ile başlatılır ve her bir adımda sıcaklık değeri düşürülmeden önce belli sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler, belirlenen kriterlere göre kabul edilir veya reddedilir. Düşen her sıcaklık, eldeki çözümün bırakılıp yeni bir çözüme geçme ihtimalinin azalmasına etki eder. Sıcaklık minimum değere ulaştığında veya algoritma istenen iterasyon kadar çalıştığında algoritma sonlandırılır.

Algoritma, metallerin tavlama ile bir optimizasyon problemine çözüm araştırma olayları arasındaki benzerlikten ilham alınarak ortaya konulmuştur. Tavlama işleminde, katının durumları optimizasyon probleminin muhtemel çözümlerini temsil eder ve bu durumların enerjileri çözümler için hesaplanan amaç fonksiyon değerlerine karşılık gelir. Minimum enerji durumu problem için optimal çözümü temsil eder. TBA iteratif bir

algoritma olup, çözüm uzayında sayıların vektörü formunda ifade edilen bir çözümü sürekli olarak geliştirmeye çalışır.

Tavlama benzetimi optimizasyon tekniği olarak günümüze kadar bilgisayar tasarımı, görüntü işleme, moleküler fizik ve kimya, çizelgeleme gibi farklı alanlardaki bir çok optimizasyon problemine uygulanmıştır. Son yıllarda birçok araştırmacı TBA'yı kombinasyonel optimizasyon problemlerinde kullanmaktadır. Tavlama benzetimi, genetik algoritmaya göre daha basit bir yöntem olması, bilgisayar programının kolaylıkla kullanılabilmesi ve az sayıda kontrol parametresine ihtiyaç duyması gibi avantajları nedeni ile birçok çalışmada tercih edilmektedir [72, 110-112].

2.6.7.1. Standart Tavlama Benzetimi Algoritması

TBA, problemden bağımsız rastgele araştırma yapan sezgisel ve iteratif bir algoritmadır. TBA uyguladığı çeşitli stratejiler ile yerel minimumlardan kurtularak global optimumu bulma yeteneğine sahiptir. Fiziksel tavlama işlemi, Monte Carlo tekniğine dayalı olarak Metropolis ve arkadaşları tarafından modellenmiştir. E sistem enerjisi, k ise Boltzmann sabiti olmak üzere T sıcaklığında, enerjide δE genlikli bir artışın olma olasılığı aşağıdaki eşitlikle ile ifade edilir:

2.6.12

Metropolis ve arkadaşları, sabit bir T sıcaklık değeri için bir kristalin termal dengeye erişiminin benzetimini yapmak amacıyla Monte-Carlo metodunu geliştirmişlerdir. Bu benzetim, mevcut durumda bir bozulma oluşturmakta ve bu değişimden dolayı ortaya çıkan enerji değişimi hesaplanmaktadır. Enerji azalmışsa sistem bu yeni duruma doğru kaymakta, artmışsa yeni durum, yukarıda verilen olasılığa göre değerlendirilmektedir.

Kısaca metot, bir dizi kristal durum üretmektedir. Kristalin mevcut durumu (S, moleküllerin pozisyonlarıyla karakterize edilmektedir) verildikten sonra rastgele seçilmiş bir molekülün yer değiştirmesiyle kristalin durumunda küçük bir bozulma sağlanır. Mevcut durum (S) ile yeni üretilmiş durumun enerji seviyeleri arasındaki fark (δE) negatif ise yeni durum daha düşük enerji seviyesinde demektir ve yeni durum olarak kabul edilir.

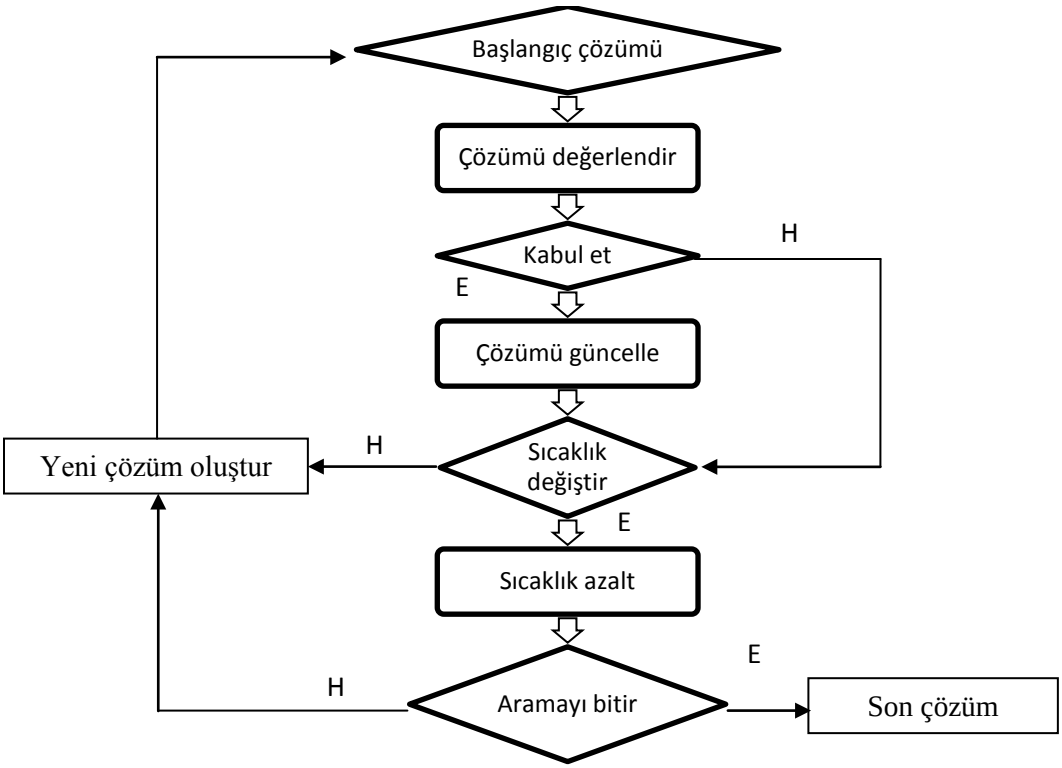
kabul edildikten sonra işleme bu durumdan devam edilir. $\delta E \geq 0$ olduğunda uniform dağılımdan rastgele bir sayı $\theta \in [0,1]$ üretilir ve bu sayı Eşitlik 2.7.12 ile tanımlanmış olan olasılık değerinden küçük ($\theta \leq$) ise o zaman yeni durum olarak kabul edilir. Aksi halde mevcut durum (S) yeni çözüm olarak muhafaza edilir. Bu kabul etme kuralı, Metropolis (veya benzetim) kriteri olarak adlandırılır.

Eşitlik 2.7.12'e göre, yüksek sıcaklıklarda tüm enerji durumları için , 1'e yakınsar. Düşük sıcaklıklarda bile sistemin yüksek bir enerji seviyesine sahip olması küçük bir olasılıkla da olsa mümkün olabilir. Bu nedenle enerjilerin istatistik dağılımı, sistemin bir yerel enerji minimumundan çıkmasına izin verir.

2.6.7.2. Tavlama Benzetimi İşlem Adımları

TBA'nın optimizasyonunun işlem basamakları Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi TBA bir probleme uygulanması aşamasında sırasıyla sıcaklık parametresi T için uygun bir başlangıç değeri tayin edilmeli, soğutma oranı ve sıcaklık değiştirme kuralı tanımlanmalı, her sıcaklıkta gerçekleştirilecek iterasyon sayısına karar verilmeli ve aramanın sonlandırılması için durdurma kriteri belirlenmelidir.

Katının durumları optimizasyon probleminin olası çözümlerine ve durumların enerjileri de çözümlere ait amaç fonksiyonu değerlerine karşılık gelmektedir. TBA da minimum enerji bir optimal çözüme, yani düzenli bir kafes yapısına karşılık gelmektedir. Hızlı soğutma işlemi, en-dik iniş prensibi vasıtasıyla yapılan yerel optimizasyon işlemine benzer olarak değerlendirilebilir. Dış sıcaklık sıfır olduğunda daha yüksek enerjili bir duruma geçiş mümkün olmaz. Böylece yerel optimizasyondaki gibi yukarı doğru olan hareketler yasaklanır ve araştırma bir yerel optimuma takılı kalır. Pratikte kristaller büyürken kötü yerel optimumlar dikkatli bir ısıl işlem ile önlenir. Bu işlemde sıcaklık (T), çeşitli seviyeler boyunca yavaşça düşürülür. Her sıcaklık seviyesi erimiş olan kristalin bu sıcaklıkta dengeye erişmesi için belirli bir süre sabit tutulur [74, 112].



Şekil 2.28. Tavlama Benzetimi Algoritması

2.6.7.3. Başlangıç Sıcaklık Değeri

TBA, yüksek bir sıcaklık değeri ile başlar. Her bir hesaplama adımında mevcut çözümün komşuları arasından çok sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler belirlenen kriterlere göre kabul edilir veya reddedilir. Her bir hesaplama adımından sonra sıcaklık belirlenen bir fonksiyona göre azaltılır. Algoritma istenen iterasyona ulaşıldığında ya da sıcaklık minimum değerine ulaştığında veya istenen çözüme ulaşıldığında sonlandırılır. Örneğin Kirkpatrick ve çalışma arkadaşları başlangıç sıcaklığının (T_k) değerini seçmek için basit bir kural kullanmışlardır. Başlangıçta T_k için büyük bir değer alınmakta ve sonra T_k'nin bu değerinde, kabul edilen hareketlerin sayısının teşebbüs edilen hareketlerin sayısına oranını bulmak için birkaç yüz hareket gerçekleştirilmektedir. Eğer bu oran daha önceden verilmiş bir kabul oranından (örneğin 0,80) daha düşükse başlangıç sıcaklık değeri iki katına çıkarılmaktadır. Gözlenmiş olan oran, eşik oran seviyesini aşıncaya kadar işleme devam edilmektedir [74, 112,113].

2.6.7.4. Sıcaklık Azaltma Oranı

Sıcaklık azaltma oranını (soğutma) olarak aşağıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi aritmetik, geometrik, ters fonksiyon ve logaritmik sıcaklık azaltma fonksiyonları kullanılmaktadır. Genellikle soğutma için geometrik sıcaklık azaltma fonksiyonu seçilmektedir.

$T_k = T_{k-1} - c$ (Aritmetik) (k=1,2,….) 2.6.15

$T_k = T_{k-1} * c$ (Geometrik) 2.6.16

$T_k = c / (1+k)$ (Ters fonksiyon) 2.6.17

$T_k = c / (Log(1+k))$ (Logaritmik) 2.6.18

Burada c sıcaklık faktörüdür. c, birden küçük ama bire yakın ve genellikle 0,50-0,99 arasında değer alan bir parametredir. Kirkpatrick ve arkadaşları bu kuralı c=0,90 ve sıcaklık süresi L=n olarak kullanılmıştır (n problemdeki değişkenlerin sayısına eşittir). Bu kural, Johson ve arkadaşları, tarafından da kullanılmıştır. Johson ve arkadaşları, olarak almıştır ve burada m bir sabit, ise komşuluğun beklenilen büyüklüğüdür. Bu kuralı avantajı, sıcaklık süresinin problemin büyüklüğünden bağımsız kalarak komşuların sayısıyla doğru orantılı olarak kalmasıdır. Bonomi ve arkadaşları, sabit sayılı sıcaklık düşürme ve sıcaklık değiştirme için aynı kuralı kullanmıştır [112,113].

2.7. Belirsizlik Analizi

Deneyleri yapan ve sonuçlarını kullanan araştırmacılar elde ettiği sonuçların güvenirliğini bilmek isterler. Deney yapılırken, deneyi yapan ne kadar tecrübeli olursa olsun ve dikkat ederse etsin, yine de deney sonuçlarında bazı hatalar görülebilir. Bu hataların bazıları rastgele olurken, bazıları da deneyi yapan elemanın dikkatsizliği nedeni ile ortaya çıkan ve çoğunlukla normal dağılımdan farklılıklar gösteren karakterde olabilir. Genel olarak deneysel hataları üç grupta toplamak mümkündür. Bunlardan birinci gruptakiler, dikkatsizlik ve tecrübesizlikten doğabilen hatalardır. Ölçme cihazlarının yanlış seçiminden veya ölçme sistemlerinin yanlış tasarımından ortaya çıkan hatalar gibi. Bu

hatalar genellikle ölçülen diğer bulgulardan farklı karakterde olduğundan, tecrübeli biri tarafından bunlar kolaylıkla tespit edilerek, değerlendirme dışı bırakılabilir. İkinci grup hatalar, sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar da genel olarak tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinemeyen hatalardır. Üçüncü grup hatalar ise rastgele hatalardır. Bunlar ise deneyi yapan elemanların değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin zamanla azalmasından, elektrik geriliminin değismesinden, cihazların ısınmasından ortaya çıkan elektronik ölçme aletlerindeki salınımlardan veya ölçme aletlerindeki histerezis olaylarından kaynaklanabilir. Pratikte özellikle sistematik (veya sabit) hataların tespiti için bazı teorik modeler geliştirilmiştir. Örnek olarak, bir kanal içinden akan gazın sıcaklığını ölçmek için kullanılan termometrede okunan değerlerdeki sistematik hatalar, akan gazın, termometrenin ve kanalın ısıl özeliklerinden yararlanılarak teorik olarak hesaplanabilir [114].

Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneye ait hata oranlarının tespiti için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılan bir tanesi "akılcı yaklaşım", diğeri ise "belirsizlik analizi" yöntemleridir. Akılcı yaklaşım hata analizinde ölçme sisteminde bulunan bütün aletlerin azami hataları yaptığı kabul edilir. Son yıllarda, hata oranlarının tespitinde, araştırmacılar tarafından belirsizlik analizi daha çok tercih edilmektedir.

Belirsizlik analizi (uncertainty analysis) bize sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunar. Bu yaklaşım ile olası hatalar için bir aralık belirlenmektedir. Bir sonucun belirsizliği tüm hata kaynaklarını göz önüne alarak ölçülen miktarın içerisinde bulunmasının beklendiği aralığı tanımlayan bir parametredir.

ANSI/ASME International’s PTC 19.1 Test Uncertainty ve ISO GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) olmak üzere iki çeşit belirsizlik analizi yöntemi kullanılmaktadır [114-115].

ASME (American Society of Mechanical Engineers) PTC 19.1 standart serilerinin ilki 1985 de yayımlandı, sonra, iki kez düzeltildi ve güncelleştirildi. Son iki düzeltilmiş baskı ASME PTC 19.1-1998 ve ASME PTC 19.1- 2005’dir. ASME serilerinin (1985, 1998 ve 2005) belirsizliklerinin iki bileşeni, ASME 1998 de “meyilli belirsizlik” ve “hassasiyet ölçüsü” iken ASME PTC 19.1-2005 de “sistematik hata” ve “rasgele hata” olarak yer almıştır.

Belirsizliği ifade etmek için başak iki sembol daha kullanılmaktadır. Standart belirsizlik (u), ilgili kavramı standart sapma olarak ifade eder. ASME PTC 19.1 2005 de yer alan genişletilmiş belirsizlik (U), ölçülen miktarın içersinde bulunacağı değerlerinin büyük bir kısmını kapsayan bir aralığı tanımlar ve *u* değerinin, aralık için gerek duyulan güven derecesinde seçilen bir kapsama faktörü *k* ile çarpılmasıyla hesaplanır (U=u*k). Burada *u* değeri standart sapmaya karşılık geldiğinden, eğer k değeri 2 ise (ASME PTC 19.1-2005 genişletilmiş belirsizlik güven aralığı % 95 olması gerekmektedir), *U* değeri yaklaşık %95 güven aralığının yarısına karşılık gelir [114,117].

ISO GUM belirsizlik analizi yöntemi daha basit olup, Giacomo (1981) ve ISO (1995) tarafından tanımlanmıştır. GUM'a göre ölçüm hataları sabit ve rasgele hatalardan farklıdır. ISO GUM belirsizlik analizi yönteminde ölçüm belirsizliği tip A ve tip B olarak sınıflandırılır. Tip A ve tip B belirsizlikleri, tekrarlanan bir seri ölçümün sonuçlarının varyansı ölçülerek belirlenir. Bilinen sistematik bir etki için bir düzeltme, bazı durumlarda tip A ile bazı durumlarda tip B belirsizliği ile elde edilebilir. Sistematik hatalar ise A türü belirsizlik katkıları olarak adlandırılır. Tip B belirsizliğinde standart belirsizliğe yapılan katkı, hatanın $\bar{}$ değerine bölünmesiyle elde edilir. Bu tür belirsizlik katkıları düzenli dağılımlardan (veya bölme faktörü $\bar{}$ üçgensel dağılımlardan) elde edilirler. Tip B standart belirsizlik referans veriler, kalibrasyon veya tecrübelere göre belirlenir. Rasgele hatalar ise A türü belirsizlik katkıları olarak adlandırılır. Tip A standart belirsizliği aşağıdaki ifade ile kolayca belirlenir [114-117].

$$\frac{\sqrt{\qquad}}{\qquad} \qquad (2.7.1)$$

$$= \qquad (2.7.2)$$

= Tekrarlanan ölçümlerin ortalaması

n= Tekrarlanan ölçümlerin sayısı

σ= Standart sapma

u= Belirsizlik

Moffat (1982) ise ASME belirsizlik analizi yöntemindeki gibi deney sonunda değil deneysel tasarım esnasında kullanılan bir belirsizlik analiz yöntemi tarif etmiştir [118]. Bu yönteme göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_n$ olsun. Bu durumda

$$R = R (x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_n)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları , , , ….., ve R büyüklüğünün hata oranı ise,

şeklinde verilmektedir. Bu belirsizlik analizinin en büyük üstünlüğü, burada en büyük hataya neden olan değişkenin hemen tespit edilebilmesidir [114-118].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Beslemenin Hazırlanışı

Elektromanyetik filtreye beslenecek yapay süspansiyonunun hazırlanmasında kullanılacak korozyon ürünlerinin (pas) numunesi seçimi için su ortamında demir çivi ve metal talaşları paslandırılmıştır. Çeşme suyu ve bu iki pas örneği ile hazırlanan yapay süspansiyonun demir, nikel ve kobalt gibi manyetik özellikli metal içeriğinin tayini için Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS) kullanılmıştır. Ayrıca, bu analizler sonucunda seçilen pas numunesinin XRD ve SEM analizleri yapılmıştır. XRD analizinde pas örneğinin içindeki olası manyetik bileşenler tespit edilmiş, SEM analizi sonucunda ise pas taneciklerin boyut aralığı belirlenmiştir.

3.1.2. Kullanılan Alet ve Düzenekler

Filtrasyon deneyleri, non-manyetik filtre gövdesi, filtre matris elemanları, gaussmetre, elektromıknatıs ve kontrol ünitesinden oluşan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler de kullanılan filtre, çapı 3 cm ve uzunluğu 10 cm olan non-manyetik paslanmaz malzemeden yapılmış silindirik bir gövde ve filtre matris elemanı olarak 4-14 mm çapları arasında değişen paslanmaz çelik bilyeler seçilmiştir.



Şekil 3.1. Non-manyetik filtre gövdesi ve filtre matris elemanı

Çalışmada kullanılan dış mıknatıslayıcı sistem Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu sistem, dış manyetik alan yoğunluğunun 0-0,5 T aralığında ayarlanmasını sağlayan özel tasarlanmış çok amaçlı elektromıknatıs ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Cihazda AC ve DC akımları dönüştürebilecek bakırdan yapılmış konvertörlü koruyucu kontrol paneli bulunmaktadır. Cihazda yer alan elektromıknatısın sarım sayısı yaklaşık 4000 olup, sarımda bakır tel kullanılmıştır. Cihazın çekirdeği saçtan üretilmiş olup, üzerinde koruyucu kaplama bulunmaktadır. Cihazda hava aralığının çapı 48 mm'dir. Cihaz, AC/DC gerilimi ve akımlarında 0-220 V gerilim, 0-10 A akım aralıklarında ayarlarının yapılmasına imkân vermektedir.



Şekil 3.2. Elektromıknatıs ve kontrol ünitesi

Manyetik alan yoğunluk ölçümleri Şekil 3.3'de görüldüğü üzere Hirst GM 05 gaussmetresi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Hirst GM 05 gaussmetresi

XRD analizinde Rigaku Geigerflex D/MaxB marka difraktometre ve SEM analizlerinde LEO EVO marka 40 XVP model cihaz kullanılmıştır. Toplam demir derişimi ölçümlerinde Perkin Elmer Analyst 800 AAS Alevli Atomik Spektroskopisi kullanılmıştır. Numune miktarı ölçümünde Shinko marka analitik terazi ve pH ölçümlerinde PMX marka 2000 model pH metre kullanılmıştır. Viskozite ölçümünde Haake marka VT01/02 model döner viskozimetre kullanılmıştır. Yapay süspansiyonda kullanılan korozyon ürünlerinin kurutulmasında Nüve marka FN 550 model etüv kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Yapay Süspansiyonlarının Demir Analizi

Elektromanyetik filtrasyon işlemi sonucunda alınan çıkış numuneleri nitrik asitle işlenip, bir gece bekletildikten sonra AAS analizi ile toplam demir içeriği ppm (mg/L) cinsinden belirlenmiştir [3,56].

Elektromanyetik filtrasyonun verimi, filtreleme işlemi öncesi ve sonrası alınan numunelerin AAS analizi sonucunda belirlenen toplam demir içeriğinden yararlanarak belirlenmiştir. Elektromanyetik filtrasyon veriminin boyutsuz bir ifadesi olan kalite faktörü (ψ), aşağıdaki eşitlik ile bulunmaktadır [2].

$$= \frac{\qquad}{\qquad} \qquad 3.2.1$$

Burada C_i, giriş derişimindeki toplam demir miktarı (mg/L), C_o, çıkış derişimindeki toplam demir miktarı (mg/L) ve λ, karışımın içerdiği ferromanyetik kısmının oranıdır.

3.2.2. Pas Numunesinin SEM Analizi

Kolloidal tanecikler ancak elektron mikroskopları ile görülebilir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) örneği taşıyan grid ışın demetinin yoluna dik olarak yerleştirilirse numunesinin gölgesi büyütülmüş olarak floresan ekrana yansır ve böylece kolloidal taneciklerin şekilleri (iğne, çubuk, amorf) belirlenebilir. Ekrandaki görüntünün fotoğrafı

çekilip, büyütülerek kolloidal taneciklerin ortalama boyutları belirlenebilmektedir. Bu amaçla tanecik büyüklüğü analizörü adı verilen ve mikroskopla kombine halde çalışan bir cihaz da kullanılabilmektedir. Bu cihaz örnek içindeki taneciklerin boyut dağılımını da vermektedir. Seçilen kurutulmuş pas örneğindeki parçacıkların ortalama boyutunu belirlemek için SEM analizi yapılmıştır. Analiz edilen numunenin on bir farklı noktasından alınan ölçümler sonucunda parçacık boyutunun μm cinsinden boyut aralığı belirlenmiştir.

3.2.3. Numunede Manyetik Özellikli Kısmın Belirlenmesi

Elektromanyetik filtrasyon işlemlerinde kullanılan pas numunesinin manyetik özellikli kısmının (λ) belirlenmesi, kullanılacak matematiksel modelden kalite faktörünün hesabı için gereklidir. Korozyon ürünleri (pas) numunesinin manyetik özellikli kısmı (λ), bir gramlık pas numunesinin üzerinden bir mıknatıs geçirilerek mıknatısa tutunmadan kalan kısmın (λ_0) tartılması sonucunda bulunmuştur [2].

3.2.4. Pas numunesinin XRD Analizi

X-ışını Difraksiyon spektroskopisi (XRD), ultraviyole ışından daha kuvvetli fakat gamma ışınından daha zayıf enerjili X-ışınlarını kullanır. X-ışını Diffraktometre sistemi ile yapılan karakterizasyonda örnek türüne göre değişik uygulamalar görülmektedir. Çalışma prensibi olarak X-ışını göndererek kırılma ve dağılma verileri toplaması temel alınmaktadır. XRD analiziyle kuru pas örneğindeki olası manyetik bileşenler belirlenmiştir.

3.3. Mıknatıslanmış Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Manyetik Özellikleri

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özellikleri, filtre performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Uygulanan dış manyetik alanda, dolgusuz ve çeşitli çaplarda çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Seçilen dört farklı akım şiddetinde (0,5A; 5,0A; 7,5A; 10A) dış manyetik alan yoğunluğu 0-0,35 T aralığında ayarlanmıştır. Deneylerde, çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yataklarda enine ve boyuna yönlerde yaklaşık 2 mm hava boşlukları

oluşturularak yerel noktaların manyetik alan yoğunlukları ölçülmüştür. Ölçümler Lake Shope 400 gaussmetresi ile yapılmıştır. Dolgulu ve dolgusuz yatağın farklı noktalarında ölçülen manyetik alan yoğunlukları değerlendirilmiştir. Her bir manyetik alan yoğunluğunun değeri, ölçülen 3 değerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

3.3.1. Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri

10 cm uzunluğundaki filtrenin çalışma bölgesinde dolgu elemanları (çelik bilyeler) bulunmadığı durumda birer cm aralıklarla aralığında on farklı noktada manyetik alan yoğunluğu ölçülmüştür. Dolgusuz yatakların mıknatıslanma özellikleri farklı filtre uzunluklarında manyetik alan yoğunlukları ölçülerek belirlenmiş ve elde edilen verilerle yatağın mıknatıslanma özelliklerinin ifadesi olan B(L) ve B(H) eğrileri çizilmiştir.

3.3.2. Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri

Filtre matris eleman çapları 4,75 mm, 6,28 mm ve 11,9 mm olan farklı boyutlarda paslanmaz çelik bilyelerden oluşturulmuş üç ayrı dolgulu yatak incelenmiştir. Manyetik alan yoğunluğunun, yatağın tabanından 1-10 cm arasındaki yüksekliklerinde bulunan değerleri ölçülmüştür. Üç farklı filtre matris eleman çapı için farklı filtre uzunluğunda manyetik alan yoğunluğu ölçülerek mıknatıslanma özellikleri belirlenmiş ve elde edilen verilerle yatağın mıknatıslanma özelliklerinin ifadesi olan B(L) ve B(H) eğrileri çizilmiştir.

3.3.3. Mıknatıslanmış Dolgulu Yatakların Gözeneklerindeki Manyetik Alanın Manyetik Alan Gradiyentine Bağımlılığının Belirlenmesi

Mıknatıslanmış dolgulu yatak gözeneklerindeki manyetik alan değişiminin analitik ifadesi aşağıda verilen eşitlik ile verilmiştir [2].

— 3.3.1

Bu eşitlikle verilen bağıntıda, h gözeneklerde oluşan non-homojen manyetik alanın şiddeti, H dış homojen manyetik alan şiddeti, μ manyetik geçirgenlik, r kürelerin teğet noktalarından hesaplanan uzaklık (radyal koordinat) ve a kürelerin yarıçapıdır. Bu çalışmada, gözeneklerdeki manyetik alanın, manyetik alan gradiyentinin ve kuvvet faktörünün boyutsuz radyal koordinata (r_a) bağımlılığı ortaya konmuştur.

3.4. Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri

Korozyon ürünleri ve sudan hazırlanan sabit derişimdeki süspansiyon Şekil 3.4'de görüldüğü gibi elektromıknatısın hava aralığına yerleştirilerek, manyetik alan şiddeti 175-279 kA/m, filtreleme hızı 0,1-0,95 m/s, çevrim sayısı 1-7, filtre matris eleman çapı 4-14 mm, filtre uzunluğu 1-10 cm, süspansiyon pH'ı 4-12 ve süspansiyon viskozitesi 0,8-1,1 cp aralığında değiştirilerek filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda alınan numunenin toplam demir miktarı AAS ile belirlendikten sonra kalite faktörü bulunmuştur.



Şekil 3.4. Elektromıknatıs hava aralığı

3.4.1. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi

Kalite faktörünün filtre uzunluğu ile değişimini belirlemek için manyetik alan şiddeti 223 kA/m ve 279 kA/m olduğu koşullar altında filtre uzunluğu 1-10 cm aralığında değiştirilerek yapılan deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	175	0,01	1	0,00628	0,15	8	0,0008
2	175	0,03	1	0,00628	0,15	8	0,0008
3	175	0,05	1	0,00628	0,15	8	0,0008
4	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
5	255	0,01	1	0,00628	0,15	8	0,0008
6	255	0,03	1	0,00628	0,15	8	0,0008
7	255	0,05	1	0,00628	0,15	8	0,0008
8	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008

3.4.2. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi

Filtre matris eleman çapı 4-14 mm aralığında değiştirilen elektromanyetik filtreye beslenen yapay süspansiyondan manyetik demir parçacıklarının ayırma verimi üzerine filtre matris eleman çapının etkisi incelenmiştir. Deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kalite faktörü üzerine filtre matris eleman çapının etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	175	0,10	1	0,00475	0,15	8	0,0008
2	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
3	175	0,10	1	0,00900	0,15	8	0,0008
4	175	0,10	1	0,01050	0,15	8	0,0008
5	175	0,10	1	0,01400	0,15	8	0,0008
6	255	0,10	1	0,00475	0,15	8	0,0008
7	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
8	255	0,10	1	0,00900	0,15	8	0,0008
9	255	0,10	1	0,01050	0,15	8	0,0008
10	255	0,10	1	0,01400	0,15	8	0,0008

3.4.3. Kalite Faktörü Üzerine Filtreleme Hızının Etkisi

0,10-0,95 m/s aralığındaki filtreleme hızlarının kalite faktörü üzerine etkisini belirlemek için yapılan deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Kalite faktörü üzerine filtreleme hızının etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	175	0,10	1	0,00628	0,13	8	0,0008
2	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
3	175	0,10	1	0,00628	0,49	8	0,0008
4	175	0,10	1	0,00628	0,60	8	0,0008
5	255	0,10	1	0,00628	0,10	8	0,0008
6	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
7	255	0,10	1	0,00628	0,19	8	0,0008
8	255	0,10	1	0,00628	0,47	8	0,0008
9	255	0,10	1	0,00628	0,95	8	0,0008

3.4.4. Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi

Kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisini incelemek için yapılan filtrasyon deneylerine ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
2	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
3	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
4	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
5	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008

3.4.5. Kalite Faktörü Üzerine Çevrim Sayısının Etkisi

Manyetik alan şiddeti 175 ve 255 kA/m koşulları altında çevrim sayısı 1-7 aralığında değiştirilerek kalite faktörü üzerine çevrim sayısının etkisini incelemek için yapılan deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kalite faktörü üzerine çevrim sayısının etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	175	0,01	1	0,00628	0,15	8	0,0008
2	175	0,01	3	0,00628	0,15	8	0,0008
3	175	0,01	5	0,00628	0,15	8	0,0008
4	175	0,01	7	0,00628	0,15	8	0,0008
5	175	0,03	1	0,00628	0,15	8	0,0008

6	175	0,03	3	0,00628	0,15	8	0,0008
7	175	0,03	5	0,00628	0,15	8	0,0008
8	175	0,03	7	0,00628	0,15	8	0,0008
9	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
10	175	0,10	3	0,00628	0,15	8	0,0008
11	175	0,10	5	0,00628	0,15	8	0,0008
12	175	0,10	7	0,00628	0,15	8	0,0008
13	255	0,01	1	0,00628	0,15	8	0,0008
14	255	0,01	3	0,00628	0,15	8	0,0008
15	255	0,01	5	0,00628	0,15	8	0,0008
16	255	0,01	7	0,00628	0,15	8	0,0008
17	255	0,03	1	0,00628	0,15	8	0,0008
18	255	0,03	3	0,00628	0,15	8	0,0008
19	255	0,03	5	0,00628	0,15	8	0,0008
20	255	0,03	7	0,00628	0,15	8	0,0008
21	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
22	255	0,10	3	0,00628	0,15	8	0,0008
23	255	0,10	5	0,00628	0,15	8	0,0008
24	255	0,10	7	0,00628	0,15	8	0,0008

3.4.6. Kalite Faktörü Üzerine Viskozite Etkisi

Kalite faktörü üzerine süspansiyon viskozitesinin etkisini incelemek için sıcaklık değiştirilerek viskozite 0,8-1,1 cp aralıklarında ayarlanmıştır. Manyetik alan şiddeti 175-279 kA/m aralığında yapılan filtrasyon deney koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kalite faktörü üzerine viskozite etkisi

Deney Sayısı	**H (kA/m)**	**L (m)**	**Çevrim Sayısı**	**d (m)**	**V_f (m/s)**	**pH**	**η (cp)**
1	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,34
2	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,80
3	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,90
4	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,10
5	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,34
6	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,80
7	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,90
8	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,10
9	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,34
10	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,80
11	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,90
12	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,10
13	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,34
14	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,80
15	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,90
16	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,10

3.4.7. Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi

pH'ı 4-12 aralığında hazırlanan yapay süspansiyonunun elektromanyetik filtrasyonu ile manyetik ayırma işlemi üzerine süspansiyon pH'ının etkisi incelenmiştir. Manyetik alan şiddeti 0,00-279 kA/m aralığında değiştirilerek yapılan filtrasyon deneylerine ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyonun pH Etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	η (kg/m.s)
1	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	4	0,0008
2	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	6	0,0008
3	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
4	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	10	0,0008
5	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	12	0,0008
6	175	0,10	1	0,00628	0,15	4	0,0008
7	175	0,10	1	0,00628	0,15	6	0,0008
8	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
9	175	0,10	1	0,00628	0,15	10	0,0008
10	175	0,10	1	0,00628	0,15	12	0,0008
11	223	0,10	1	0,00628	0,15	4	0,0008
12	223	0,10	1	0,00628	0,15	6	0,0008
13	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
14	223	0,10	1	0,00628	0,15	10	0,0008
15	223	0,10	1	0,00628	0,15	12	0,0008
16	255	0,10	1	0,00628	0,15	4	0,0008
17	255	0,10	1	0,00628	0,15	6	0,0008
18	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
19	255	0,10	1	0,00628	0,15	10	0,0008
20	255	0,10	1	0,00628	0,15	12	0,0008
21	279	0,10	1	0,00628	0,15	4	0,0008
22	279	0,10	1	0,00628	0,15	6	0,0008
23	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,0008
24	279	0,10	1	0,00628	0,15	10	0,0008
25	279	0,10	1	0,00628	0,15	12	0,0008

3.5. Deterjanlı Suların Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri

Korozyon ürünleri, deterjan ve su ile hazırlanan yapay süspansiyondan manyetik özellikli demir içerikli parçacıkların ayrılması üzerine çeşitli proses parametrelerinin etkisini incelemek için yapılan deneylerde, filtreleme hızı 0,15 m/s ve süspansiyon

viskozitesi 0,8 cp olarak sabit alınmıştır. Dış manyetik alan şiddeti 0,00-279 kA/m, filtre matris eleman çapı 6-10,5 mm, filtre uzunluğu 1-10 cm, süspansiyon pH'sı 4-12 ve deterjan derişimi % 0,5-5 (w/v) aralığında değiştirilmiştir. Bu deneylerde, deterjan olarak <%5 aniyonik aktif madde içeren ABC marka sıvı bulaşık deterjanı kullanılmıştır.

3.5.1. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddeti Etkisi

Hazırlanan deterjanlı yapay süspansiyonunun kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisini incelemek için manyetik alan şiddeti 0,00-279 kA/m ve deterjan derişimi %0,5-5 aralığında değiştirilerek yapılan filtrasyon deneylerine ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.8. Deterjanlı süspansiyonlarda kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddeti etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	%Deterjan Oranı
1	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
2	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
3	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
4	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
5	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
6	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
7	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
8	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
9	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
10	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
11	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
12	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
13	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
14	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
15	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
16	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
17	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
18	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
19	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
20	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0

3.5.2. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi

Deterjanlı yapay süspansiyonunun kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi incelemiştir. Manyetik alan şiddeti 0,00-279 kA/m, filtreleme hızı 0,15 m/s ve filtre uzunluğu 1-10 cm aralığında değiştirilerek yapılan filtrasyon deneylerine ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.9. Deterjanlı süspansiyonlarda kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	%Deterjan Oranı
1	223	0,01	1	0,00628	0,15	8	1
2	223	0,03	1	0,00628	0,15	8	1
3	223	0,05	1	0,00628	0,15	8	1
4	223	0,09	1	0,00628	0,15	8	1
5	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1

3.5.3. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi

Filtre matris eleman çapı 4-11 mm aralığında değiştirilerek oluşturulan elektromanyetik filtreye beslenen deterjanlı yapay süspansiyondan manyetik özellikli demir bileşenli parçacıkların ayrılması üzerine filtre matris eleman çapının etkisi incelenmiştir. Filtrasyon deneylerine ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.10. Deterjanlı sularda kalite faktörü üzerine filtre matris elemanının çapının etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	%Deterjan Oranı
1	223	0,10	1	0,00475	0,15	8	1
2	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1
3	223	0,10	1	0,00750	0,15	8	1
4	223	0,10	1	0,01050	0,15	8	1

3.5.4. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi

pH'sı 2-12 aralığında değiştirilerek hazırlanan deterjanlı yapay süspansiyonun kalite faktörü üzerine süspansiyon pH etkisini incelemek için yapılan deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.11. Deterjanlı sularda kalite faktörü Üzerine Süspansiyon pH Etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	%Deterjan Oranı
1	223	0,10	1	0,00628	0,15	2	1
2	223	0,10	1	0,00628	0,15	6	1
3	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1
4	223	0,10	1	0,00628	0,15	12	1

3.5.5. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Deterjan Derişiminin Etkisi

Deterjan derişimi %0,5-5 (w/v) aralıklarında değiştirilerek hazırlanan deterjanlı yapay süspansiyonun elektromanyetik filtrasyon verimi üzerine, ilave edilen deterjan derişiminin etkisi incelenmiştir. Bunun için yapılan deneylere ait çalışma koşulları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.12. Deterjanlı sularda kalite faktörü üzerine deterjan derişiminin etkisi

Deney Sayısı	H (kA/m)	L (m)	Çevrim Sayısı	d (m)	V_f (m/s)	pH	%Deterjan Oranı
1	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
2	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
3	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
4	0,00	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
5	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
6	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
7	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
8	175	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
9	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
10	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
11	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
12	223	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
13	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
14	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
15	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
16	255	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0
17	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	0,5
18	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	1,0
19	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	2,0
20	279	0,10	1	0,00628	0,15	8	5,0

3.6. Kalite Faktörü Optimizasyon Deneyleri

Maksimum kalite faktörüne ulaşmamızı sağlayacak etken düzeylerinin optimizasyonu için kullanılan modifiye simpleks optimizasyonu 32 bitlik ve 1 GB RAM hafızaya sahip bir bilgisayarda MATLAB'da yazılmış ve listesi **Ek 2**'de verilen program kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemleri ise MATLAB'da yer alan araç kutusunda bulunan hazır paket programlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. Numune Seçimi

Demir çivi ve metal talaşları örnekleri ile hazırlanan yapay süspansiyonda AAS analizi ile yapılan demir, nikel ve kobalt analizleri sonucunda pas örneği olarak demir çivi seçilmiştir. Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi demir çivinin paslandırılması ile elde edilen 50 ppm sabit derişimdeki yapay süspansiyonda toplam demir içeriği metal talaşından elde edilene göre daha fazla bulunmuştur. Yapılan SEM analizleri sonucunda yapay süspansiyon numunesi için kullanılan pas örneğini oluşturan parçacıkların boyutlarının 0,2-2 µm arasında değiştiği belirlenmiştir. XRD analizi sonucunda ise pası oluşturan bileşenler arasında demir oksitler, kobalt mangan oksit, kobalt krom oksit ve krom oksit gibi metal oksit karışımları olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. Yapay Pas Süspansiyonların AAS Analizleri

Yapay Pas Süspansiyonu Çeşidi	Toplam Demir (ppm)	Toplam Nikel (ppm)	Toplam Kobalt (ppm)
Demir Çivi Pası İle Hazırlanan Süspansiyon	11,420	0,000	0,040
Metal Talaş Pası İle Hazırlanan Süspansiyon	6,000	0,000	0,120

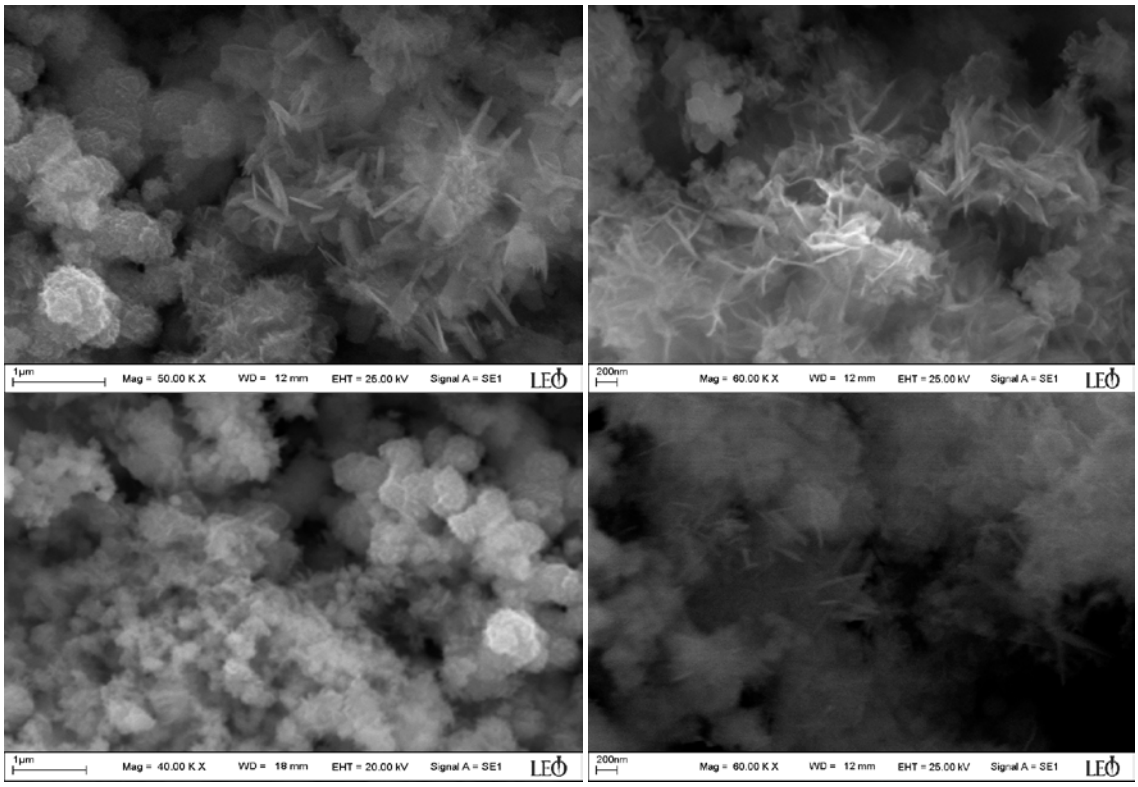
Çeşitli endüstriyel akışkanlardaki dispers safsızlıkların büyük bir kısmını demir içerikli bileşenlerin oluşturduğu bilinmektedir. Endüstriyel akışkanlarda bulunan demir miktarının belirli sınırlarda tutulması gerektiğinden taşıyıcı ortamdan demirin uzaklaştırılması önemli bir problemdir. Bu sebeple endüstriyel akışkanların içerdiği dispers demir bileşenli karışımlarından temizlenmesi gerekmektedir. Karışımda dağılan demir, suda çözünmüş oksijen ile reaksiyona girer ve yükseltgenerek demir oksit karışımlarını oluşturur. Özellikle magnetit, korozyon yapıcı ana madde olduğundan karışımdan öncelikle uzaklaştırılması gereken bileşiklerin başında yer alır.

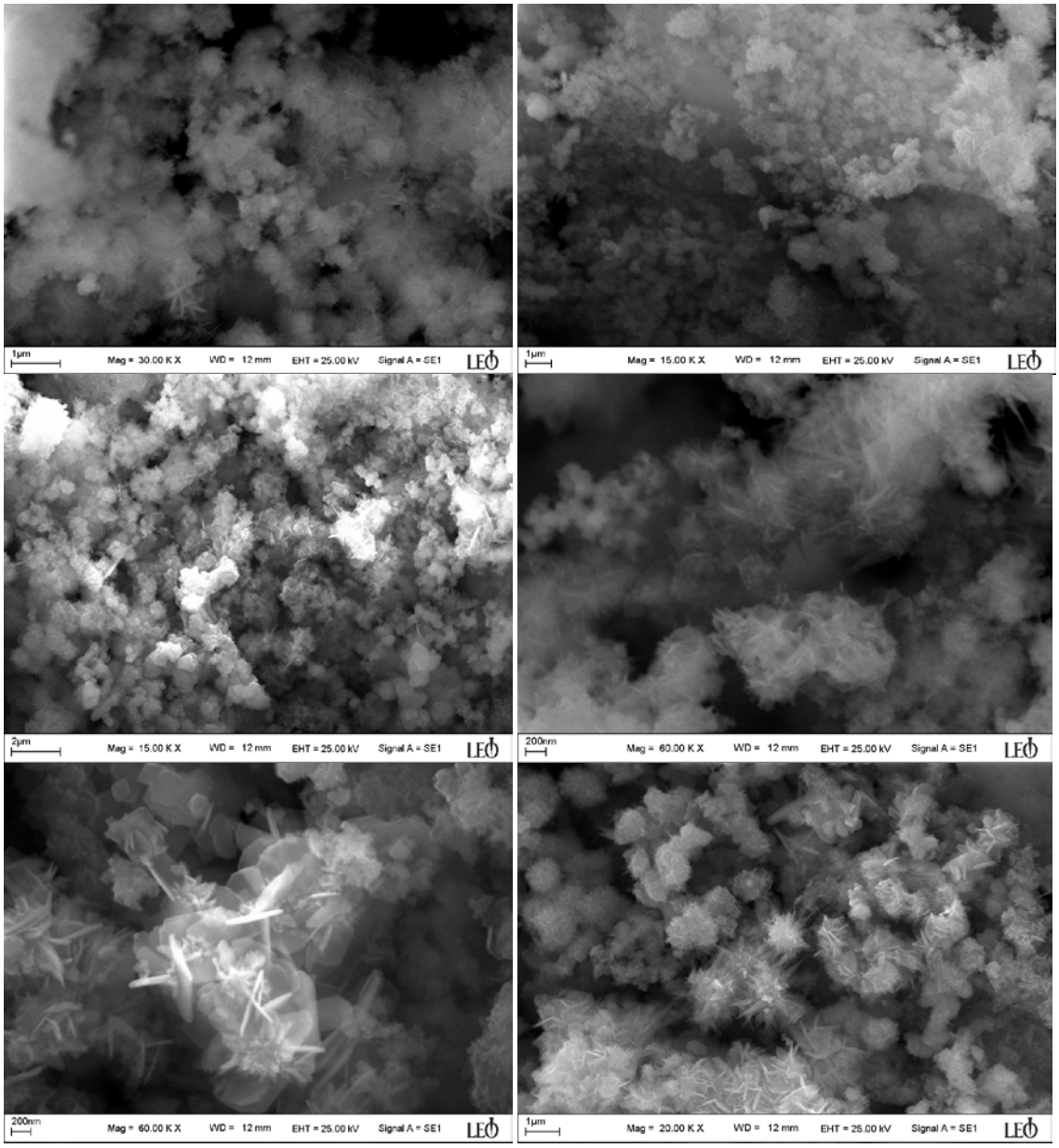
Elektromanyetik filtrasyon deneyleri için hazırlanan pas numunesinin XRD ve AAS analizleri, korozyon ürünlerinin demir oksit karışımlarını içerdiğini göstermektedir.

Deneylerde kullanılacak pas numunesi içinde bulunduğu belirlenen magnetit ($FeO.Fe_2O_3=Fe_3O_4$), maghemit (γ-Fe_2O_3) ve hematit (α-Fe_2O_3) bileşiklerinin manyetik alanda çekilme özelliğinden faydalanarak elektromanyetik filtrasyon işlemi ile bu demir bileşenli karışımların kolayca ayrılması mümkün olmaktadır [2, 3].

4.1.1. Parçacık Boyut Analizi

Seçilen kurutulmuş pas örneğindeki parçacıkların boyut dağılımını belirlemek için yapılan SEM analiz sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Numunenin on farklı noktasından alınan SEM ölçümleri sonucunda parçacık boyutunun 0,2-2 μm aralığında değiştiği görülmüştür. Bu yüzden 11,42 mg/L gibi düşük bir derişimde ve 0,2-2 μm aralığında değişen parçacık boyutuna sahip demir içerikli karışımın su ortamından uzaklaştırılmasında elektromanyetik filtrasyon yöntemin kullanılması uygun olacağı düşünülmüştür.





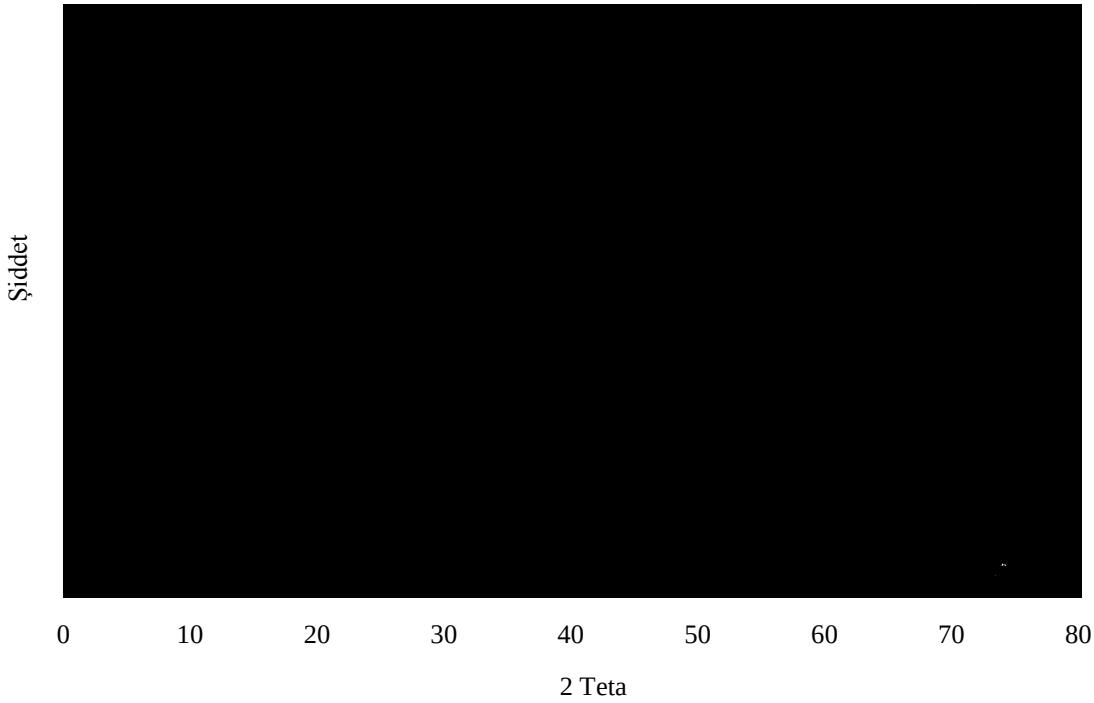
Şekil 4.1. Pas örneklerin SEM görüntüleri

4.1.2. Numunenin Manyetik Özellikli Kısmının Belirlenmesi

Elektromanyetik filtrasyon işleminin kalite faktörünün hesabı için korozyon ürünlerinin manyetik özellikli kısmı belirlenmiştir. Bir gram pas numunesinde manyetik özellikli olmayan kısmın değeri 0,15 g bulunmuştur. Dolayısıyla numunenin manyetik özellikli kısmının değeri (λ) 0,85 olduğu belirlenmiştir.

4.1.3. Bileşen Analizi

XRD analizi ile kurutulmuş korozyon ürünleri örneğinde bulunan manyetik bileşenler tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda korozyon ürünleri örneğinin Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere demir, mangan, kobalt ve krom oksitlerden oluştuğu görülmüştür. Bütün bu oksit çeşitlerinin manyetik özellikli olduğu literatür de belirtilmiştir [3,53,71]. Ayrıca pas numunesinin seçiminde yapılan AAS analizleri de kullanılan pas örneğinin ağırlıkça demir ve kobalt içerikli bir karışım olduğunu doğrulamıştır.



Şekil 4.2. Pas örneğinin XRD Analizi

Çizelge 4.2. Pas Numunesinin XRD Analizinde Bulunan Bileşikler ve Manyetik Özellikleri

FERROMANYETİK BİLEŞİKLER		**FERRİMANYETİK BİLEŞİKLER**		**PARAMANYETİK BİLEŞİKLER**	
Bileşik Adı	**Kimyasal Formülü**	**Bileşik Adı**	**Kimyasal Formülü**	**Bileşik Adı**	**Kimyasal Formülü**
Kobalt Mangan Oksit[1]	$CoMn_2O_4$	Magnetit[4]	Fe_3O_4	Hematit[6]	α-Fe_2O_3
Kobalt Mangan Oksit[2]	$Co_2Mn_3O_8$	Maghemit[5]	γ-Fe_2O_3	Demir Oksit[7]	FeO
Kobalt Krom Oksit[3]	$CoCrO_4$			Krom Oksit[8]	Cr_2O_5

4.2. Mıknatıslanmış Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Manyetik Özellikleri

Manyetik özellikli granüllerin mıknatıslanarak yerel gradiyentli manyetik alanlar oluşturmalarından dolayı yatak gözeneklerinde biriken mikro parçacıklar, manyetik kuvvet uygulanarak bulundukları ortamdan etkin bir şekilde ayrılabilir. Yüksek yerel manyetik kuvvet etkisinin yanısıra bu yataklar dış mekaniksel, kimyasal, çevresel ve diğer etkilere karşı da dayanıklıdırlar. Manyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların bu avantajları onların birçok sanayi alanlarında etkin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Manyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların en önemli özellikleri bu yatakların manyetik özellikleri, özellikle mıknatıslanma karakteridir (B(H) eğrisi). Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma özellikleri, dolgu elemanlarının manyetik özelliklerine, geometrisine (küre, plaka, silindir vb.), yatağın hacimsel dolgu faktörüne ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır.

Mıknatıslanmış ve birbiriyle teğetlenmiş manyetik kürelerde manyetik alan şiddetinin belirlenmesinde; çeşitli literatürler de alan gradiyentinin teğet noktalarına göre değişimi, manyetik parçacıkların bu bölgelerde birikerek tutunduğu ve bu ortamdaki mıknatıslanma modelinin teğet noktaları etrafında kümeleşen silindirik kanallar şeklinde olduğu belirtilmiştir. Lichtenecker modelinde bu durum kürelerin teğet noktaları etrafında oluşan silindirik kanalların, değişken manyetik geçirgenliğe sahip bir ortam olduğu varsayılmıştır. Lichtenecker yaklaşımında mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğinin (μ), doluluk oranı (γ) ile değişimi ile ifade edilmektedir. Bu ifadeden de görüleceği üzere manyetik geçirgenlik yatağın doluluk oranı ile üstel olarak artmaktadır [2, 20, 24-26].

Diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar, esasen dış manyetik alanın düşük değerlerinde ($H \leq 50$ kA/m) yapıldığı görülmektedir. Özellikle mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özellikleri, dış manyetik alanın büyük değerlerinde ($H \geq 100$ kA/m) yatak porozitesinin değişimine bağlı olarak yeterince incelenmemiştir. Bu durum ise bu türlü yatakların uygulandığı prosesin ve işlemlerin tasarımı ve optimal kontrolünü olumsuz yönde etkilemektedir [10,24-26]. Manyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin incelenmesi üzerine birçok çalışma bulunmasına rağmen sonuçlar oldukça çelişkilidir. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliklerini bütün

taraflarıyla açıklayabilecek genel bir teori ve deney sonuçlarının bulunduğunu söylemek zordur [2, 10,24-26].

Bu nedenle, tez çalışmasında manyetik granüller olarak kullanılan çeşitli çaplarda paslanmaz çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların dış homojen manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Dış manyetik alan şiddeti ve yatak gözenekliliğinin filtre performansını üzerine etkisini incelemek için mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama mıknatıslanma B(H) eğrileri çizilmiştir.

4.2.1. Dolgulu ve Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri

Manyetik granüllerden oluşturulmuş dolgulu yatakların esas karakteristiği, bu ortamların dış homojen manyetik alanda mıknatıslanmasıdır. Bu özellik, dolgulu yatağın ortalama mıknatıslanma B(H) eğrisi ile belirlenir. Dolgulu yatakların ortalama B-H ilişkisini etkiyen diğer bir parametre dolgu elemanlarının dış manyetik alanın (H) etkisiyle mıknatıslanması özelliğidir. Başka bir deyişle dolgu elemanlarının manyetik geçirgenliği (μ) dış manyetik alan şiddetine bağlıdır, yani μ (H) fonksiyonudur.

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların dış mıknatıslayıcı sistemlerinde ise dış manyetik alan şiddeti H≥150-200 kA/m civarlarında olabilmektedir. Bazı yaklaşımlarda ise dış manyetik alanın yüksek değerleri (H≥100 kA/m) dikkate alınmasına karşın, dolgulu yatağın gözeneklilik değişiminin B(H) eğrisine etkisi ancak bazı özel durumlar için belirlendiği gözlenmiştir. Dolgulu yatağın boşluk kesri mıknatıslanma eğrisini ciddi şekilde etkiler. Mıknatıslanan dolgulu yatakların farklı boşluk kesri değerleri, dolgu elemanlarının geometrisinin veya filtre matris elemanlarının boyutlarının değiştirilmesi ile elde edilebilir. Bu nedenle öncelikle mıknatıslanan dolgulu yatakların B(H) eğrisini etkileyen temel parametreleri değerlendirmek gerekir. Bu çalışmada, düzgün geometriye sahip olan manyetik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların B(H) ilişkisi incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde mıknatıslanmış dolgusuz ve dolgulu yatakların özelliklerinin belirlenmesi için belirsizlik analizinin sonuçları sunulmuştur. Belirsizlik analizi, sonuçlardaki hata büyüklüğünün belirlenmesi amacıyla uygulanmıştır.

Manyetik alan yoğunluk değerleri Gaussmetre ile prob üzerinde yer alan her 0,5 cm de bir ölçülmüştür. Cihaz, manyetik alan yoğunluğu değerleri dijital ekranda virgülden

sonra üç basamak olarak vermektedir. Mıknatıslanmış dolgusuz ve dolgulu yatakların manyetik alan yoğunluğunun belirlenmesi sadece cihazın ölçümüne bağlıdır. Bu yapılan ölçümler az ya da çok hataya sahip olabilir. Buradaki ölçülen değer ile doğru değer arasındaki fark, cihazın vibrasyonundan, dış manyetik alanın uygulanması ile bilyelerin probun hareket ettiği plakaların ezmesi veya prob üzerindeki filtre uzunluğuna karşı gelen çizgilerin okunmasından kaynaklanabilir.

Bir deneysel ölçümde bir hatanın boyutu belirsiz olduğu için, deneysel hata, ölçüm belirsizliği olarak isimlendirilebilir. Belirsizlik analizi, bir deneyde hatanın büyüklüğünün belirlenmesinde kabul edilen yöntemdir. Belirsizlik analizi birçok şekilde yapılabilir. Manyetik alan yoğunluklarındaki ölçüm belirsizlikleri ASME PTC 19.1 2005 belirsizlik analizi yöntemine göre belirlenmiş ve ölçülen manyetik alan yoğunluğu değerleri) eşitliğine göre düzeltilmiştir.

4.2.1.1. Dolgusuz Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri

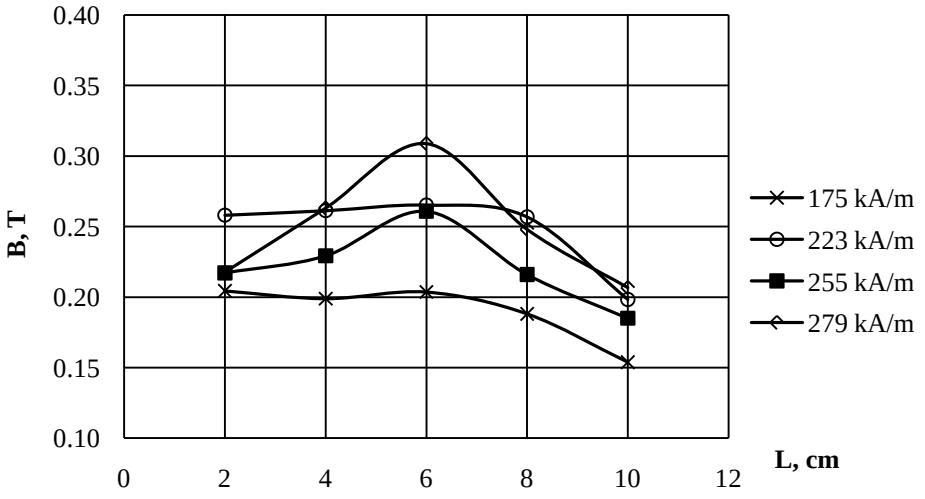
10 cm uzunluğundaki filtrede mıknatıslanmış dolgu elemanlarının olmadığı durumda on farklı noktada manyetik alan yoğunluğu ölçülmüştür. Bu çalışmada, dolgusuz yatakların dış homojen manyetik alanın etkisiyle mıknatıslanma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçların belirsizliği hesaplanarak manyetik alan yoğunluğu değerleri düzeltilmiş ve Çizelge 4.3 ile verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dolgusuz yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri

Ölçüm Sayısı	Filtre Uzunluğu (cm)	Dış Manyetik Alan Şiddeti (kA/m)	Ölçüm Sonuçları Manyetik Alan Yoğunluğu (T)			Genişletilmiş Belirsizlik
			1	2	3	
1	2	175	0,229	0,213	0,205	0,0246
2	2	223	0,274	0,258	0,264	0,0159
3	2	255	0,291	0,358	0,298	0,0738
4	2	279	0,278	0,333	0,327	0,0603
5	4	175	0,211	0,217	0,205	0,0121
6	4	223	0,289	0,264	0,266	0,0277
7	4	255	0,292	0,340	0,281	0,0627

8	4	279	0,330	0,381	0,318	0,0669
9	6	175	0,224	0,221	0,205	0,0204
10	6	223	0,275	0,266	0,267	0,0097
11	6	255	0,292	0,311	0,280	0,0312
12	6	279	0,333	0,335	0,313	0,0242
13	8	175	0,204	0,212	0,196	0,0159
14	8	223	0,259	0,257	0,259	0,0021
15	8	255	0,278	0,334	0,283	0,0620
16	8	279	0,283	0,318	0,299	0,0350
17	10	175	0,169	0,154	0,164	0,0152
18	10	223	0,226	0,212	0,197	0,0277
19	10	255	0,220	0,247	0,214	0,0350
20	10	279	0,240	0,260	0,227	0,0333

Şekil 4.3'de mıknatıslanmış dolgusuz yatağın farklı uzunluklardaki B(H) mıknatıslanma eğrileri verilmiştir. Dış manyetik alan yoğunluğunun manyetik alan şiddeti ile doğrusal olarak arttığı görülmektedir.

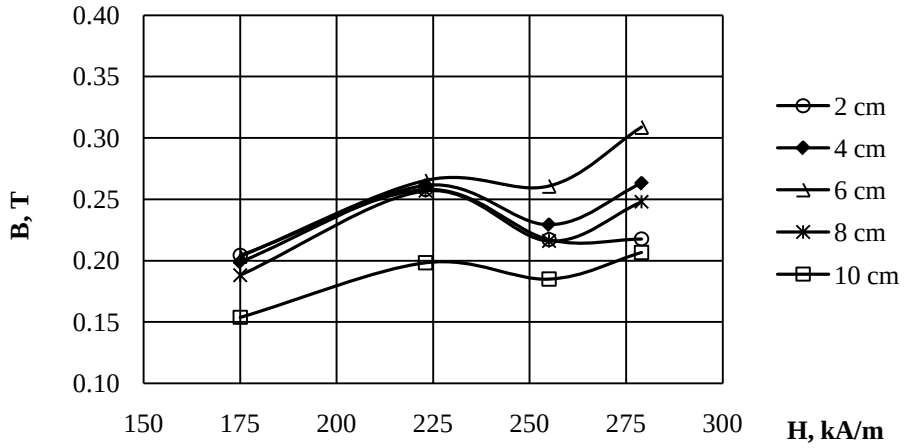


Şekil 4.3. Dolgusuz yatakta manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi

Şekil 4.4'de dolgusuz yatağın manyetik alan yoğunluğunun farklı manyetik alan şiddetlerinde filtre uzunluğu ile değişimleri gösterilmiştir. Farklı filtre uzunluklarındaki dört farklı dış manyetik alan şiddeti değerinde manyetik alan yoğunluğu değerleri filtrenin orta bölmesine karşılık gelen 4-6 cm filtre bölgesinde maksimum olduğu görülmüştür.

Diğer taraftan filtre giriş ve çıkış bölgelerinde daha az teğetlenmiş eleman olduğu için dış manyetik alan yoğunluğu değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu

nedenle yatağın merkezinde yapılacak ölçümlerin daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Öte yandan dolgusuz yatağın manyetik özelliğinin, manyetik alan şiddeti ile arttığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Dolgusuz Yatağın Mıknatıslanma Eğrisi

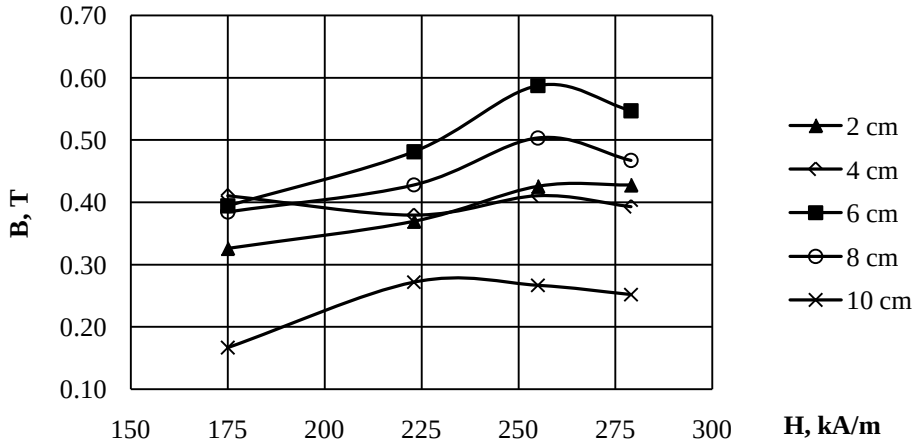
4.2.1.2. Dolgulu Yatakların Mıknatıslanma Özellikleri

Mıknatıslanmış dolgulu yatakların, mıknatıslanma özellikleri birçok faktöre bağlıdır. Dolgu elemanlarının manyetik özelliklerini etkileyen özelliklerden biri olan yatak gözenekliliği, filtre matris elemanı olarak kullanılan çelik bilyelerin çapı ile değişmektedir. Bu sebeple 4,75 mm, 6,28 mm ve 11,9 mm çaplarında çelik bilyelerden oluşturulmuş üç ayrı yatağın mıknatıslanma özellikleri incelenmiştir. Ölçülen manyetik alan yoğunluğu değerleri belirsizlik hesaplandıktan sonra düzeltilmiş ve bu veriler kullanılarak grafikler çizilmiştir. Üç farklı filtre matris eleman çapı için farklı manyetik alan şiddetlerinde manyetik alan yoğunluğunun filtre uzunluğu ile değişim eğrileri B(L), Şekil 4.6, 4.8 ve 4.10'da verilmiştir. Mıknatıslanma eğrileri B(H) ise Şekil 4.5, 4.7 ve 4.9 ile verilmiştir.

Çizelge 4.4. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri (d=4,75 mm)

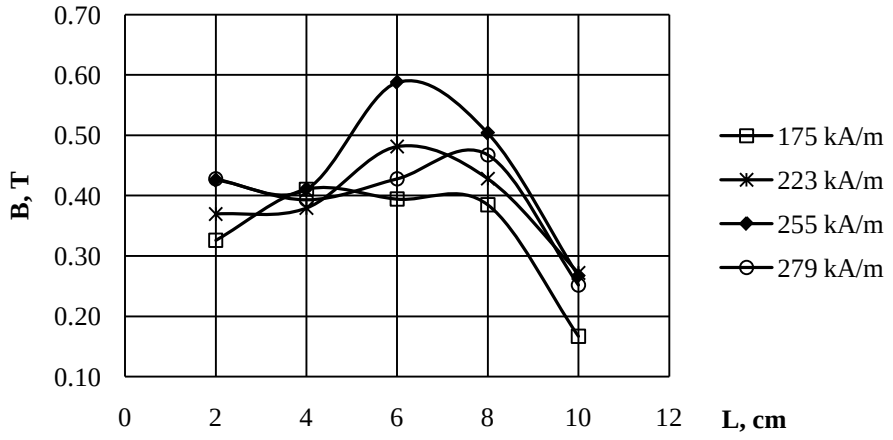
Ölçüm Sayısı	Filtre Uzunluğu (cm)	Dış Manyetik Alan Şiddeti (kA/m)	Ölçüm Sonuçları Manyetik Alan Yoğunluğu (T)			Genişletilmiş Belirsizlik
			1	2	3	
1	2	175	0,335	0,330	0,339	0,0090
2	2	223	0,384	0,380	0,394	0,0145
3	2	255	0,437	0,445	0,448	0,0114
4	2	279	0,445	0,456	0,462	0,0173
5	4	175	0,420	0,413	0,422	0,0094
6	4	223	0,395	0,384	0,399	0,0156
7	4	255	0,428	0,439	0,445	0,0173
8	4	279	0,402	0,407	0,411	0,0090
9	6	175	0,456	0,501	0,442	0,0617
10	6	223	0,499	0,486	0,482	0,0177
11	6	255	0,633	0,590	0,598	0,0457
12	6	279	0,565	0,551	0,568	0,0180
13	8	175	0,391	0,385	0,389	0,0062
14	8	223	0,437	0,446	0,440	0,0090
15	8	255	0,519	0,523	0,534	0,0156
16	8	279	0,477	0,469	0,478	0,0097
17	10	175	0,181	0,195	0,190	0,0142
18	10	223	0,285	0,298	0,291	0,0132
19	10	255	0,283	0,294	0,278	0,0163
20	10	279	0,264	0,258	0,270	0,0121

Bu sebeple 4,75 mm, 6,28 mm ve 11,9 mm çaplarında çelik bilyelerden oluşturulmuş üç ayrı yatağın mıknatıslanma özellikleri incelenmiştir. Ölçülen manyetik alan yoğunluğu değerleri belirsizlik hesaplandıktan sonra düzeltilmiş ve bu veriler kullanılarak grafiğe çizilmiştir. Üç farklı filtre matris eleman çapı için farklı manyetik alan şiddetlerinde manyetik alan yoğunluğunun filtre uzunluğu ile değişim eğrileri B(L), Şekil 4.6, 4.8 ve 4.10'da verilmiştir. Mıknatıslanma eğrileri B(H) ise Şekil 4.5, 4.7 ve 4.9 ile verilmiştir.



Şekil 4.5. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=4,75 mm)

Filtre matris elemanı olarak 4,75 mm çaplı bilyelerden oluşturulan dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrisi Şekil 4.5'de verilmiştir. B(H) eğrisinden de anlaşılacağı üzere dolgulu yatakta manyetik doyuma 255 kA/m'de ulaşılmaktadır.



Şekil 4.6. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=4,75 mm)

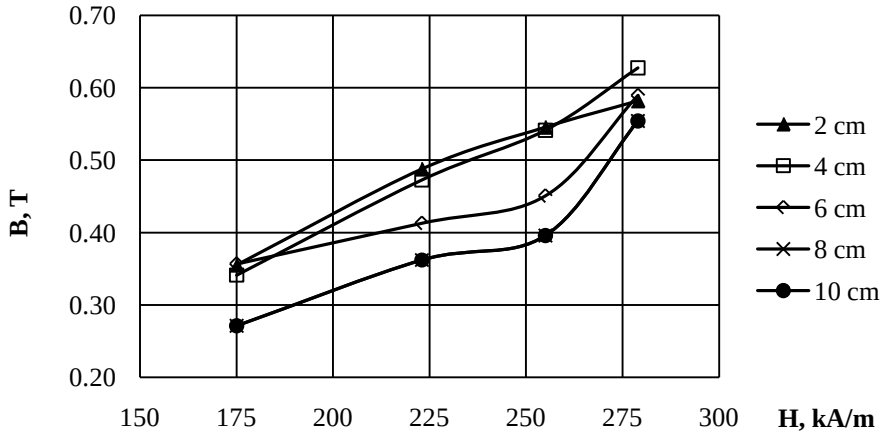
Şekil 4.6'daki B(L) eğrisinden görüldüğü gibi dış manyetik alan yoğunluğu, filtre çıkışına kadar filtre uzunluğu ile artmıştır. Filtre matris eleman çapı çok küçük olduğundan (d=4,75 mm) bilyelerin teğetlendiği noktaların sayısı yüksektir. Manyetik alan yoğunluğu bu teğet noktalar etrafında daha fazladır.

Dolgusuz yataktaki dış manyetik alan yoğunluğu ortalama en fazla 0,343 T olabilirken 4,75 mm çaplı bilyelerle oluşturulan yatakta dış manyetik alan yoğunluğu 0,607 T'a kadar ulaşmıştır. Diğer bir deyişle, filtrede dolgu maddesi bulunması halinde, dış manyetik alan yoğunluğunu iki kattan fazla arttırmak mümkün olmaktadır. Böylece filtre matris eleman çapı ve filtre uzunluğu ayarlanarak elektrik sarfiyatından tasarruf sağlanabilir. Örneğin ortalama 0,343 T dış manyetik alan yoğunluğu elde etmek için dolgusuz yatakta akım şiddeti 10 A olması gerekirken, aynı filtre uzunluğunda 4,75 mm çaplı bilyelerle oluşturulan yatakta 0,418 T manyetik alan yoğunluğu değerine 0,5 A akım şiddetinde ulaşılmaktadır. Çizelge 4.5'deki belirsizlik değerleri, filtre matris elemanı çapı olarak 6,28 mm çaplı çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğunun doğru değerlerini elde etmek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri (d=6,28 mm)

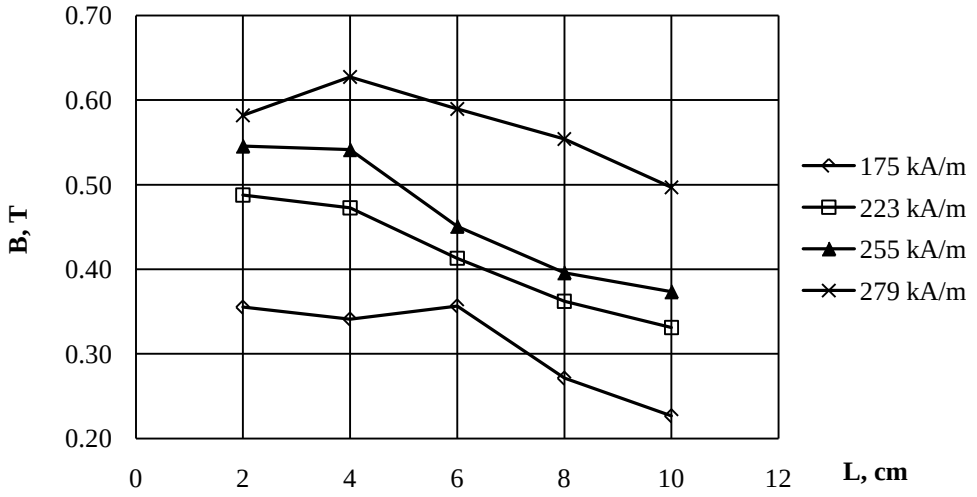
Ölçüm Sayısı	Filtre Uzunluğu (cm)	Dış Manyetik Alan Şiddeti (kA/m)	Ölçüm Sonuçları Manyetik Alan Yoğunluğu (T)				Genişletilmiş Belirsizlik
			1	2	3	4	
1	2	175	0,375	0,389	0,374	0,365	0,0197
2	2	223	0,502	0,508	0,501	0,491	0,0142
3	2	255	0,586	0,629	0,592	0,588	0,0405
4	2	279	0,601	0,615	0,622	0,605	0,0191
5	4	175	0,407	0,414	0,473	0,460	0,0658
6	4	223	0,555	0,497	0,580	0,588	0,0824
7	4	255	0,621	0,529	0,553	0,585	0,0797
8	4	279	0,637	0,626	0,630	0,628	0,0097
9	6	175	0,400	0,421	0,411	0,371	0,0433
10	6	223	0,483	0,427	0,496	0,505	0,0700
11	6	255	0,528	0,460	0,479	0,541	0,0772
12	6	279	0,610	0,613	0,625	0,632	0,0204
13	8	175	0,325	0,302	0,297	0,356	0,0537
14	8	223	0,377	0,360	0,367	0,373	0,0149
15	8	255	0,434	0,390	0,419	0,425	0,0381
16	8	279	0,572	0,561	0,556	0,551	0,0180
17	10	175	0,262	0,283	0,294	0,303	0,0353
18	10	223	0,399	0,423	0,344	0,374	0,0679
19	10	255	0,387	0,379	0,371	0,375	0,0135
20	10	279	0,512	0,517	0,522	0,530	0,0152

6,28 mm'lik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın B(H) mıknatıslanma eğrisi Şekil 4.7 de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere dış manyetik alan yoğunluğu, dış manyetik alan şiddetinin 279 kA/m değerine kadar artmıştır.



Şekil 4.7. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=6,28 mm)

Şekil 4.8'deki B(L) eğrisinden görüldüğü gibi dış manyetik alan yoğunluğu 2-6 cm'lik filtre bölgesinde daha yüksektir. Boyutunun daha fazla olması sebebiyle bilyelerin teğetlendiği noktaların sayısı 4,75 mm çaplı bilyelerden oluşturulan yataktakinden daha azdır. 6,28 mm çaplı bilyelerle oluşturulan yataktaki dış manyetik alan yoğunluğu ortalama en fazla 0,631 T olmaktadır. Filtre matris eleman çapı arttıkça yatak gözenekliliği arttığından manyetik alan yoğunluğu azalmaktadır. Çünkü teğetlenen bilye sayısı dolayısıyla teğetlenmiş bilyeler etrafında oluşan yüksek gradiyentli manyetik alan azalmaktadır.



Şekil 4.8. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=6,28 mm)

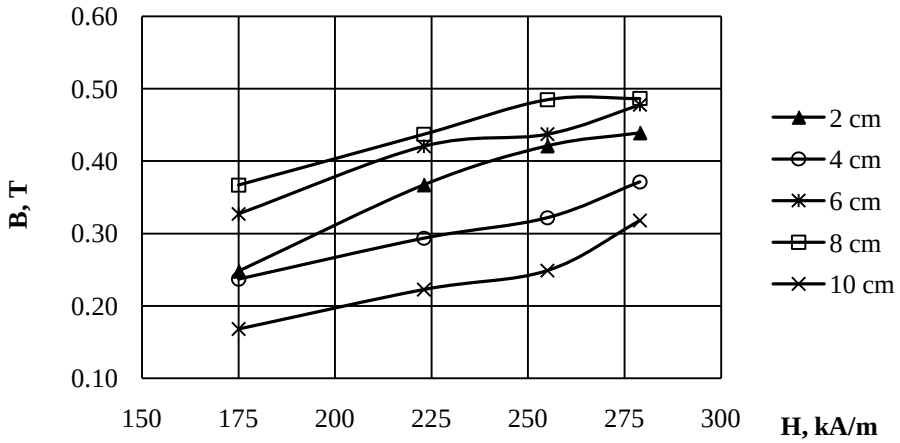
Çizelge 4.6'daki belirsizlik değerleri, 11,9 mm çaplı çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğunun doğru değerlerini elde etmek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. Dolgulu yatağın manyetik alan yoğunluğu belirsizlik ölçümleri (d=11,9 mm)

Ölçüm Sayısı	Filtre Uzunluğu (cm)	Dış Manyetik Alan Şiddeti (kA/m)	Ölçüm Sonuçları Manyetik Alan Yoğunluğu (T)			Genişletilmiş Belirsizlik
			1	2	3	
1	2	175	0,275	0,290	0,302	0,0270
2	2	223	0,382	0,393	0,396	0,0149
3	2	255	0,432	0,438	0,427	0,0111
4	2	279	0,450	0,455	0,461	0,0111
5	4	175	0,246	0,255	0,249	0,0090
6	4	223	0,326	0,347	0,358	0,0326
7	4	255	0,338	0,348	0,354	0,0163
8	4	279	0,383	0,394	0,392	0,0118
9	6	175	0,335	0,339	0,343	0,0080
10	6	223	0,434	0,431	0,421	0,0135
11	6	255	0,443	0,437	0,440	0,0059
12	6	279	0,487	0,489	0,496	0,0094
13	8	175	0,382	0,394	0,380	0,0152
14	8	223	0,507	0,516	0,529	0,0222

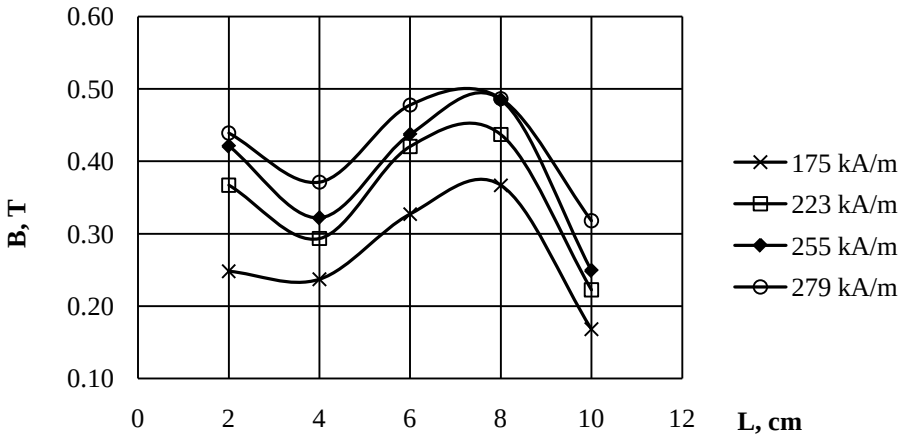
15	8	255	0,499	0,508	0,511	0,0125
16	8	279	0,454	0,462	0,471	0,0170
17	10	175	0,176	0,168	0,172	0,0080
18	10	223	0,243	0,259	0,240	0,0204
19	10	255	0,255	0,251	0,249	0,0062
20	10	279	0,326	0,330	0,322	0,0080

Şekil 4.9'da 11,9 mm olan çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrisi B(H) verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi manyetik alan yoğunluğu, yatağın manyetik doyuma ulaştığı manyetik alan şiddeti 223 kA/m'den sonra önemli bir değişim göstermemiştir.



Şekil 4.9. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların mıknatıslanma eğrisi (d=11,9 mm)

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi manyetik alan yoğunluğu, filtre çıkış noktasına yakın bölgelerde (9-10 cm) azalmaktadır. 11,9 mm çaplı çelik bilyelerden oluşturulmuş dolgulu yatakta en fazla manyetik alan yoğunluğu 0,517 T'a kadar artmıştır.



Şekil 4.10. Manyetik alan yoğunluğunun eksenel yönde değişimi (d=11,9 mm)

Dolgulu yatakların mıknatıslanma özelliğinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar sonucunda filtre matris eleman çapının artmasıyla manyetik alan yoğunluğunun azaldığı gözlenmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi dolgulu yataklarda B(H) ilişkisi yaklaşık lineerdir. Mıknatıslanmış dolgulu yatakların dış manyetik alan şiddeti manyetik alan yoğunluğunda önemli derecede artış gözlenmiştir. Filtre matris elemanı olan çelik bilyeler alan manyetik kuvvette artışa neden olduğu için manyetik alan yoğunluğunu arttırır. Bu durum, bütün mıknatıslanmış granül dolgulu yataklarda yer almaktadır ve yatağın gözenekliliği ile orantılı olarak değişmektedir. Ölçümler, mıknatıslanmış dolgulu yatakların ortalama manyetik geçirgenliğinin, doluluk oranı ile üstel olarak değiştiğini ifade eden Lichtenecker modeli ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Yapılan bu deney sonuçları elektromanyetik filtrasyon verimini arttırmak için fitre matrisi, daha düşük gözenekliliğe sahip olan (ε=0,4-0,6) yani, daha küçük çaplarda çelik bilyelerden oluşan dolgulu yataklardan oluşturulması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca filtrenin orta bölmesinde manyetik alan yoğunluğu daha fazla olduğundan manyetik parçacıklar bu bölgede daha fazla tutunmaktadır.

Şekil 4.5, 4.7 ve 4.9'da görüldüğü gibi dolgulu yatağın kullanılması Şekil 4.4'de verilen dolgusuz yatağa göre manyetik alan yoğunluğu değerlerini iki katına çıkarmaktadır. Dolgulu yatakların mıknatıslanma limitinin yaklaşık 250 kA/m'ye kadar dolmadığı çalışmalardan görülmektedir.

Belirsizlik analizine göre en fazla belirsizlik dolgulu yatakların 4,75 ve 6,28 mm

çaplı bilyelerden oluşturulan yatakların orta bölmesine denk gelen uzunluklara karşı elde edilen manyetik alan yoğunluk değerlerinin ölçümünde bulunmaktadır. Bunun sebebi de Gaussmetrenin probunun hareket etmesi için gereken hava aralığının sağlanmasında kullanılan plakaların uygulanan dış manyetik alan etkisiyle bilyelerin mıknatıslanıp, plakayı sıkıştırmasıyla probun büzülen plakadaki hareketinin zorlanması olabilir.

4.3. Mıknatıslanmış Dolgulu Yatak Gözeneklerindeki Manyetik Alanın Manyetik Alan Gradiyentine Bağımlılığının Belirlenmesi

Elektromanyetik filtrenin çalışma bölgesini oluşturan mıknatıslanmış dolgulu yatakların gözeneklerinde oluşan manyetik alan, yüksek gradiyentli alandır. Alan şiddeti, filtre elemanlarının manyetik geçirgenliği ile artar, bilyelerin teğet noktalarından uzaklaştıkça azalır. Gözeneklerdeki manyetik alan değişiminin —, gözeneklerdeki manyetik alan gradiyentinin — – ve gözeneklerdeki kuvvet faktörünün – — – boyutsuz r_a ile ilişkisi aşağıdaki eşitliklerle verilmiştir [2, 24].

– 4.1

— 4.2

— – 4.3

– — – 4.4

Burada h gözeneklerde oluşan non-homojen alan, H dış homojen manyetik alan şiddeti, k efektif manyetik alınganlık, r_a=r/a boyutsuz radyal koordinat, r radyal koordinat, a ve d sırasıyla matris elemanlarının yarıçapı ve çapıdır [2, 24].

2.5.2'de verilen eşitlik 4.1 eşitliğinde düzenlenirse parçacığa etkiyen manyetik kuvvetin (ϕ=0) ifadesi aşağıdaki gibi bulunur:

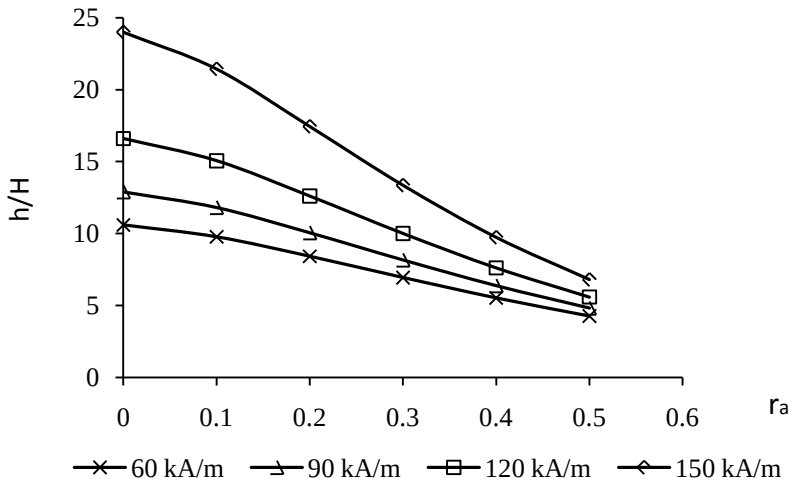
F_m = ——————— 4.5

Elektromanyetik filtre mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerden biri de manyetik alanın ve bu alanın oluşturduğu manyetik kuvvetin gözeneklerin geometrisine bağlı olarak değişmesidir. Bu değişim, Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'de gösterilmiştir. Bu bağıntılardan çıkarılan önemli sonuçlar ise şunlardır:

1. Manyetik filtrenin gözeneklerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu gradiyentinin ve bu alanda parçacığa etkiyen kuvvetin maksimum oldukları bölgeler mevcuttur.

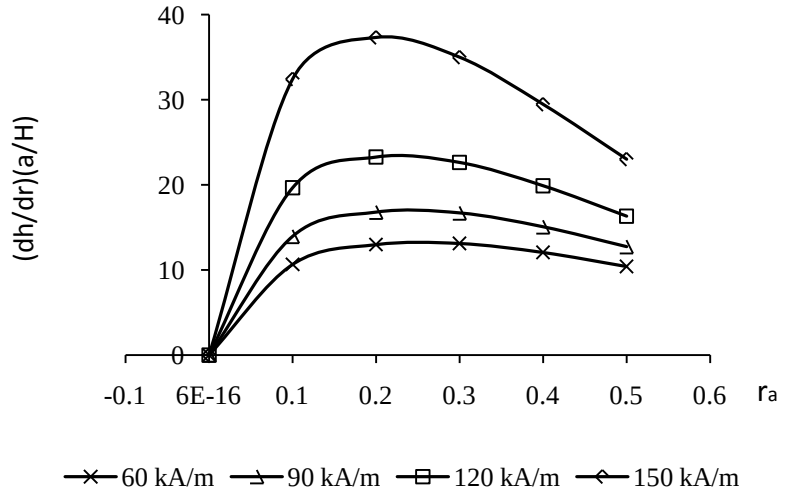
2. Manyetik filtre matrisini oluşturan ferromanyetik elemanların manyetik özelliklerinin (μ) farklı olmasına rağmen tutunma bölgesi $r_a \leq 0{,}5$ civarlarında kümelenmiştir.

3. Alan gradiyentinin ve manyetik kuvvetin maksimum değerleri, gözeneklerin manyetik özelliklerine bağlı olarak değişir. Manyetik alan gradiyenti ve manyetik kuvveti $r_a > 0{,}5$ bölgesinde μ ve H'nin değişimlerinden fazla etkilenmez.



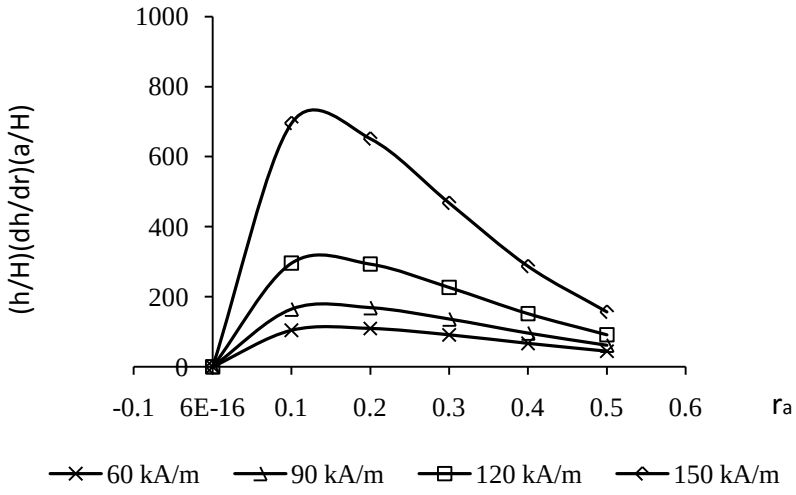
Şekil 4.11. Gözeneklerdeki manyetik alanın boyutsuz r_a'ya bağımlılığı

Gözeneklerdeki manyetik alan boyutsuz radyal koordinat ile doğrusal olarak azalmaktadır. Yüksek manyetik alan şiddeti değerlerinde mıknatıslanmış dolgulu yatak gözeneklerindeki alan değişiminin daha fazla olduğu Şekil 4.11'den görülmektedir.



Şekil 4.12. Gözeneklerdeki manyetik alan gradiyentinin boyutsuz r_a'ya bağımlılığı

Yukarıdaki şekilden görüldüğü üzere mıknatıslanmış dolgulu yatak gözeneklerindeki manyetik alan gradiyenti, boyutsuz radyal koordinatın 0,2 değerine kadar artmakta, daha sonra önemli bir değişim göstermemektedir. Yüksek manyetik alan şiddeti değerlerinde gözeneklerindeki manyetik alan gradiyenti daha büyük olmaktadır.



Şekil 4.13. Gözeneklerdeki kuvvet faktörünün boyutsuz r_a'ya bağımlılığı

Mıknatıslanmış dolgulu yatak gözeneklerdeki kuvvet faktörü, Şekil 4.13'de görüldüğü gibi boyutsuz radyal koordinatın 0,1 değerinden sonra azalmaktadır. Yüksek manyetik alan şiddeti değerlerinde gözeneklerdeki kuvvet faktörü daha büyük olmaktadır.

Filtre matris elemanı ferromanyetik bilyelerden oluşturulmuş elektromanyetik filtrenin gözeneklerinde parçacıkların tutularak toplanması, bu bilyelerin teğet noktaları etrafında meydana gelen aktif tutma bölgelerinde meydana gelir. Bu bölgelerin boyutları ise teğet noktaları etrafında $r_a<0,5$ civarlarındadır. Deneysel sonuçlar, bu bölgenin $r_a=0,2$-$0,3$ arasında olduğunu göstermiştir.

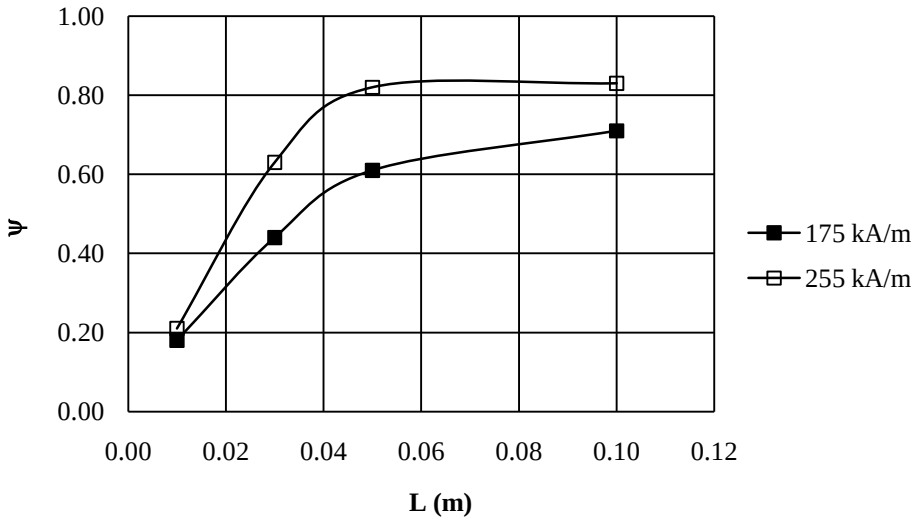
4.4. Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri

Hazırlanan yapay süspansiyondan manyetik özellikli demir içerikli parçacıkların elektromanyetik filtrasyon ile ayırma işlemi çeşitli deney koşullarında yapılmıştır. Parçacıklar arası kuvvetler, filtreleme öncesinde parçacıkların kararsızlığından dolayı yığışma meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu yığışma filtreleme öncesi sürekli karıştırma ile dağıtılmıştır.

Filtrasyon deneyleri sonunda alınan çıkış numunesindeki toplam demir miktarı AAS analizi ile belirlendikten sonra 3.2.1 eşitliği yardımıyla kalite faktörü toplam demir içeriği üzerinden hesaplanmıştır. Filtrasyon öncesi alınan giriş numunesindeki toplam demir içeriğinin (C_i) 11,42 ppm olduğu belirlenmiştir. Dispers karışımın içerdiği manyetik kısmın oranı (λ) 0,85 olarak belirlenmiştir ve eşitlik 3.2.1 de yerine konularak 0-1 arasında değişen kalite faktörü hesaplanmıştır [2].

4.4.1. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi

175 kA/m ve 255 kA/m olmak üzere iki farklı dış manyetik alan şiddeti değerlerinde kalite faktörünün filtre uzunluğu ile değişimi aşağıdaki şekilde verilmiştir. 175 kA/m'de elde edilen deney sonuçlarına göre filtre uzunluğunun 1 cm'den 10 cm'ye artması ile kalite faktörü 0,18'den 0,71'e yükselmiştir. 255 kA/m'de ise 0,21'den 0,83'e artmıştır.



Şekil 4.14. Kalite faktörünün filtre uzunluğuna göre değişimi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, C_i=50 ppm

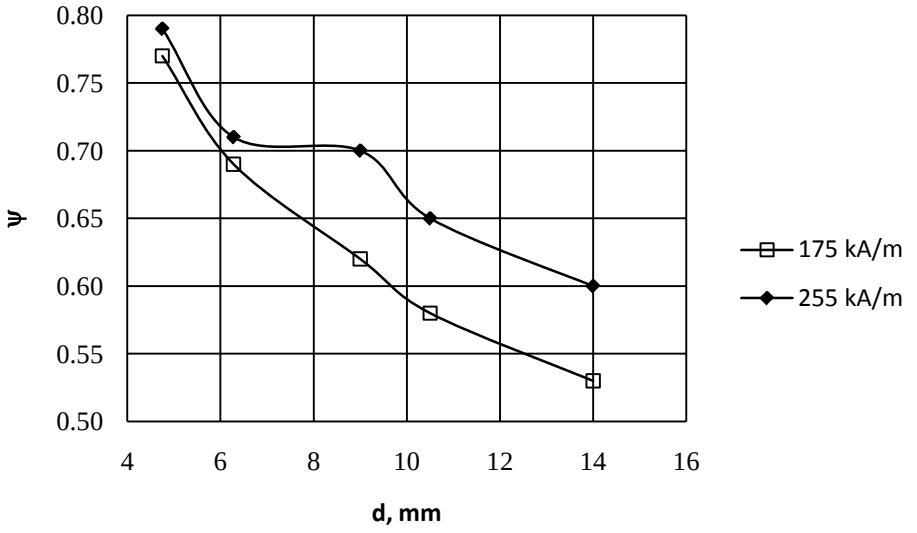
Şekil 4.14'den görüldüğü üzere her iki manyetik alan şiddetinde kalite faktörü, filtre uzunluğu ile artmıştır. 5 cm'den sonra ve özellikle yüksek manyetik alan şiddeti uygulandığında filtre gözeneklerinin parçacıklara doyması nedeniyle kalite faktöründe önemli bir değişim gözlenmemektedir. Gerek düşük gerekse yüksek manyetik alan şiddetlerinde filtre uzunluğu 5 cm altında olan filtrelerin kullanım performansının düşük olacağı anlaşılmaktadır.

4.4.2. Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi

Filtre matrisi elemanı olarak kullanılan çelik bilyelerin çapları 4-14 mm aralığında değiştirilerek farklı filtreler oluşturulmuş ve bu filtrelerin kullanım performansının bir ölçüsü olan kalite faktörü incelenmiştir.

Kalite faktörü üzerine filtre matris eleman çapının etkisi Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Filtre matrisi elemanı çelik bilyelerin çapının 4,75 mm'den 14 mm'e artması, ile kalite faktörünün azaldığı görülmüştür. Tez çalışmasının mıknatıslanmış dolgulu yatakların manyetik özelliklerinin belirlenmesi kısmında, daha küçük filtre matris eleman çapına sahip bilyelerden oluşturulan yatağın mıknatıslanma özelliğinin daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, filtrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlarla uyuşmaktadır.

Kalite faktörü, dolgulu yatak gözenekliliğinin azalmasına sebep olduğu için azalmıştır. Yatak gözenekliliği, meydana gelen teğet noktaların sayısı ile ilgilidir. Yatak dolgu maddesi olan bu çelik bilyelerin teğetlendiği noktalarda manyetik parçacıklar tutunmaktadır.



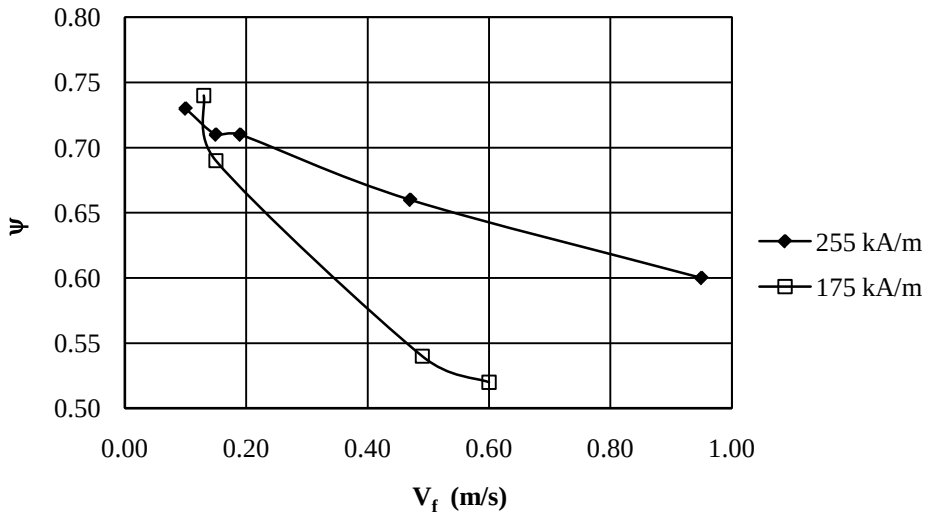
Şekil 4.15. Kalite faktörünün filtre matrisi eleman çapına göre değişimi
V_f =0,15 m/s, L=0,1m, C_i=50 ppm

Filtre matris eleman çapı ile verimin azaldığını ortaya koyan bir diğer çalışma da Haque ve arkadaşları [32] tarafından yapılmıştır. Farklı çaplı çelik tozlarla oluşturulan manyetik filtreler için ayırma veriminin çap ile azaldığı gözlenmiştir. Okada ve arkadaşları [57] filtre matris elemanı olarak çelik tel kullanmış ve tel çapı azaldıkça tutunma oranının artığını göstermişlerdir.

4.4.3. Kalite Faktörü Üzerine Filtreleme Hızının Etkisi

0,10-0,95 m/s aralığında elektromanyetik filtreye yapay süspansiyon beslenmiştir. Kalite faktörü ile filtreleme hızının (süperficial hız) değişimi aşağıdaki Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, uygulanan farklı manyetik alan şiddetlerinde kalite faktörü filtreleme hızı ile azalmıştır.

Benzer sonuçlar, Oberteuffer ve arkadaşlarının [8] yaptıkları çalışmada da ortaya konmuştur. Bu çalışmaya göre filtreleme hızı ile bakır oksitin manyetik alan etkisiyle geri kazanımının azaldığı gözlenmiştir.



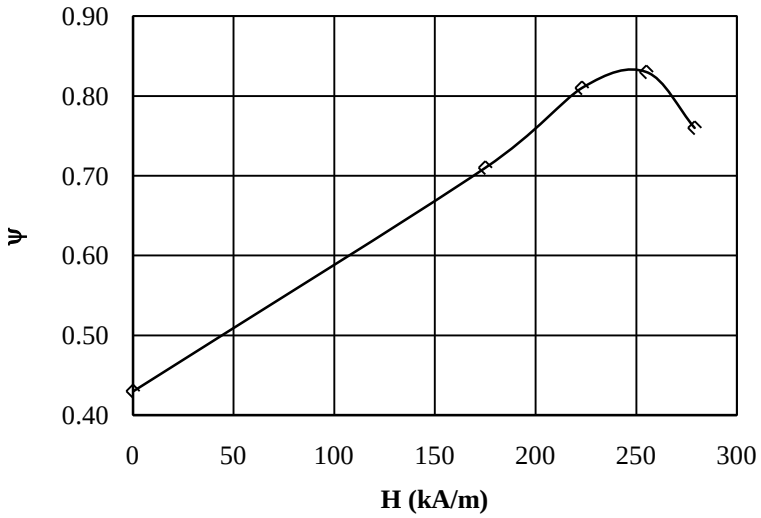
Şekil 4.16. Kalite faktörünün filtreleme hızına göre değişimi
L=0,1 m, d=6,28 mm, C_i=50 ppm

Yokoyama ve arkadaşları [47] hacimsel debi artışı ile filtre matrisinin hematit parçacıklara doymasından dolayı verimin azaldığını gözlemlemişlerdir. Franzreb ve arkadaşları [43] fosfat ayırımında kalıcı mıknatıs kullanarak yüksek gradiyentli manyetik filtre ile yüksek filtreleme hızında bile yüksek verim elde etmişlerdir.

4.4.4. Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi

Kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisi Şekil 4.17'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi manyetik alan şiddeti 255 kA/m'e yükseltildiğinde parçacığın manyetizasyonunun ve alan değerinin artmasıyla kalite faktörü 0,43'den 0,83'e artmıştır. Bu sonuçlara göre manyetik filtrasyon verimi, non-manyetik filtrasyon veriminin yaklaşık iki katıdır. 223 kA/m manyetik alan şiddetine kadar kalite faktöründe önemli bir artış olduğu, daha sonra alan şiddetindeki artışla filtre doyuma ulaştığı için kalite faktörünün önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Benzer deneysel sonuçlar, Oberteuffer ve arkadaşlarının [8] yaptığı bir çalışmada verilmiştir. Bu çalışmada bakır oksit geri

kazanımının uygulanan manyetik alan etkisi ile arttığını belirlemişlerdir. Prakasha ve arkadaşları [41] kalsit geri kazanımının manyetik alan yoğunluğu ile doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir.



Şekil 4.17. Kalite faktörünün manyetik alan şiddetine göre değişimi
L=0,1 m, d=6,28 mm, C_i=50 ppm, V_f=0,15 m/s

4.4.5. Kalite Faktörü Üzerine Çevrim Sayısının Etkisi

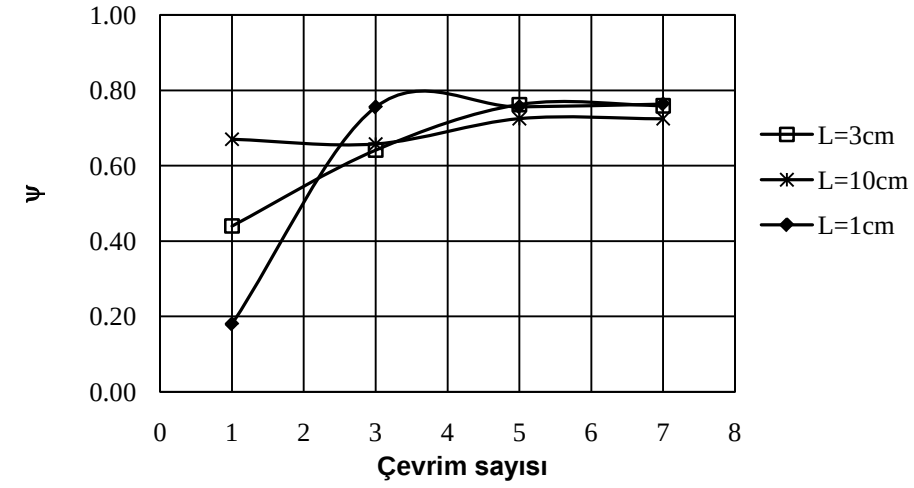
Yapay pas süspansiyonu sırasıyla pas süspansiyonu (1), bir kez filtreden geçirilmiş çıkış numunesi (2) ve üç kez filtreden geçirilmiş çıkış numunesi (3) Şekil 4.18'de görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere çevrim sayısı ile sudaki pas miktarında azalma olduğu açıktır.



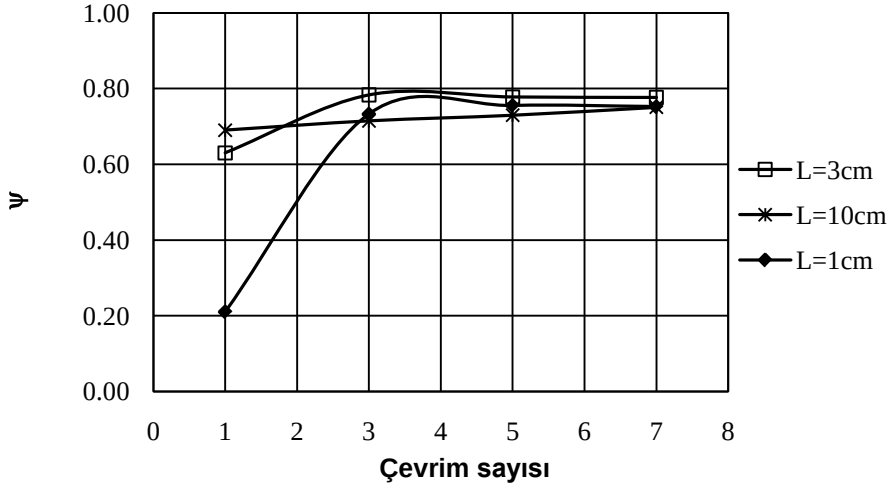
(1) (2) (3)

Şekil 4.18. Çevrimli elektromanyetik filtrasyon ile yapay süspansiyonunun temizlenmesi

Farklı manyetik alan şiddeti değerlerinde elektromanyetik filtrasyon işleminin çevrimli ve çevrimsiz yapılmasının kalite faktörü üzerine etkisi aşağıdaki Şekil 4.19'da verilmiştir. Hem düşük hem de ortalama manyetik alan etkisinde kalite faktörü, 1 ve 3 cm filtre uzunluğu için çevrim sayısı ile artmıştır. Buna karşın 10 cm filtre uzunluğunda çevrim sayısı ile kalite faktöründe önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.



(a)



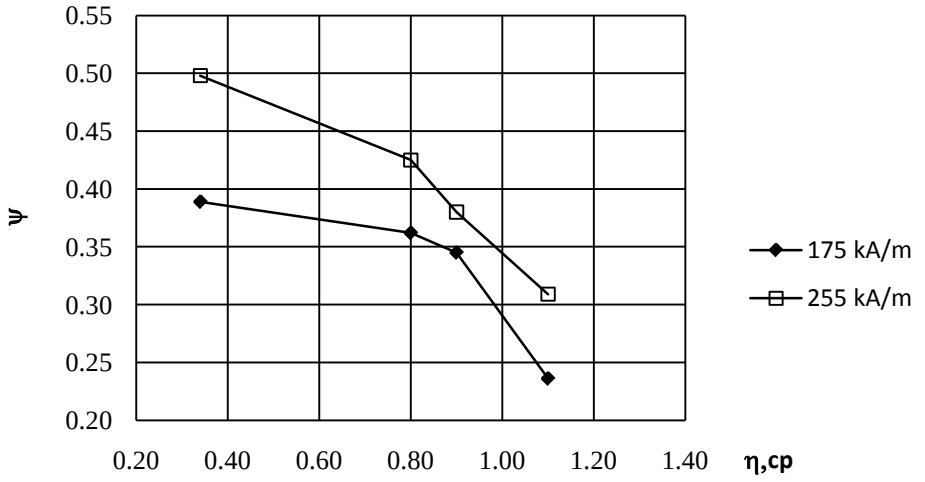
(b)

Şekil 4.19. Kalite faktörünün çevrim sayısına göre değişimi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, C_i=50 ppm
(a) H=175 kA/m (b) H=255 kA/m

Hem düşük hem de ortalama manyetik alan etkisinde kalite faktörü, 1 ve 3 cm filtre uzunluğu için çevrim sayısı ile artmıştır. Buna karşın 10 cm filtre uzunluğunda çevrim sayısı ile kalite faktöründe önemli bir değişim olmadığı Şekil 4.18 ve 4.19'da görülmektedir. 1 ve 3 cm'lik filtrede üç çevrimden sonra filtrenin doyuma ulaşmasından dolayı kalite faktöründe önemli bir değişim görülmemiştir. Künkül ve Abbasov [49], yaptıkları çalışmada manyetik filtre temizlenme veriminin beş çevrime kadar arttığını göstermişlerdir. Trinh ve arkadaşları [63] manyetik ayırma ile mikroorganizmaları ayrılma veriminin beş çevrime kadar arttığını göstermişlerdir. Gerek bu tez çalışmasında gerekse yukarıda bahsedilen çalışmalarda elde edilen bulgular elektromanyetik filtrasyon işleminin çevrimli olarak gerçekleştirilmesiyle filtre uzunluğu ve filtre matris elemanlarından tasarruf edilebileceğini göstermektedir.

4.4.6. Kalite Faktörü Üzerine Viskozite Etkisi

Yapay süspansiyonun sıcaklığı değiştirilerek viskozitesi 0,8-1,1 cp aralıklarında değişen süspansiyon çözeltileri hazırlanmış ve kalite faktörü üzerine süspansiyon viskozitesinin etkisi Şekil 4.20'de verilmiştir.

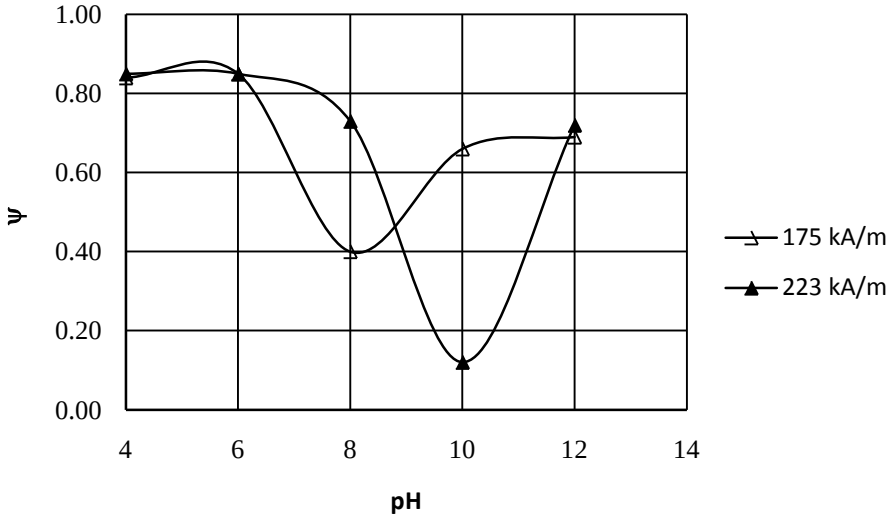


Şekil 4.20. Kalite faktörünün viskoziteye göre değişimi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, L=0,1 m, C_i=50 ppm

Filtre edilen süspansiyon viskozitesinin artışı ile kalite faktörünün azaldığı görülmektedir. Kalite faktöründeki bu azalmanın nedeni yatak gözeneklerinden besleme akışının zorlanması ve sürtünme nedeniyle gözeneklerde tutunan parçacıkların koparak tekrar sıvıya karışmasıyla açıklanabilir. Künkül ve Abbasov [49], yaptıkları çalışmada viskozitesi 1-9 cp aralığında değişen beslemenin manyetik filtrasyon veriminin viskozite ile azaldığını göstermişlerdir. Mishimo ve arkadaşları [59], viskoz bir akışkanın bile ince ferromanyetik parçacıkların süperiletken manyetik separatörle yüksek manyetik alan etkisinde etkin bir şekilde ayrılabileceğini göstermişlerdir.

4.4.7. Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi

Endüstride farklı pH'lardaki sular kullanılmak ile beraber manyetik özellikli korozyon ürünleriyle sular kirlenmektedir. Bu sebeple pH'sı 4-12 aralığında olan su örnekleri hazırlanmış ve pas ile karıştırılarak süspansiyon hazırlanmıştır. Kalite faktörünün süspansiyon pH'sı ile değişimi Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Kalite faktörünün süspansiyon pH'sına göre değişimi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, L=0,1 m, C_i=50 ppm

Farklı manyetik alan şiddeti değerlerinde kalite faktörü ortamın pH'sından etkilenmektedir. Kalite faktörünün kuvvetli asidik ve kuvvetli bazik ortamda arttığı söylenebilir. Dolayısıyla elektromanyetik filtrelerin kuvvetli asidik veya bazik

çözeltilerinde manyetik temizliğinde kullanılabileceği görülmektedir. Latour ve arkadaşları [11], Fe^{+3} ayırma veriminin pH ile değiştiğini ortaya koymuşlardır. Fe^{+3}'ün çökelmesi zeta potensiyelin sıfır olduğu (ZPC) pH da fazla olmaktadır. Özellikle ZPC yakınında Fe^{+3} hızla çökeldiği ve pH'nın ZPC'yi artırdığını ortaya koymuşlardır. Sato ve arkadaşları [50], zeta potansiyeli sıfıra yaklaşırken, tutunma oranının maksimuma ulaştığını göstermiştir. Zeta potansiyeli etkisi ile yığışan parçacıkların manyetik kuvvetle güçlüce çekilip, filtrede tutunduğunu belirtmişlerdir. Verimin zeta potansiyeli ile azaldığı ve zeta potansiyelin sıfır olduğu izoelektrik noktanın pH 6-8 arasında verimin yüksek olduğu görülmüştür. Hartikernen ve arkadaşlarının [13] sentetik atık sudan kromun manyetik ayırımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Krom ayırma veriminin pH ile arttığı belirtilmiştir. pH ile protonların metal iyonlarıyla adsorpsiyon sitelerine yerleşerek ve alkali koşullarda metal hidroksitin çökmesi ile ayrıma veriminin arttığı gösterilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalardan da görüldüğü üzere çözelti pH'sı manyetik filtrasyon verimini etkilemektedir. Ortam pH'sının özellikle zeta potansiyelini etkilemesi nedeniyle manyetik filtrasyon verimini etkilemiştir.

4.5. Deterjanlı Suların Elektromanyetik Filtrasyon Deneyleri

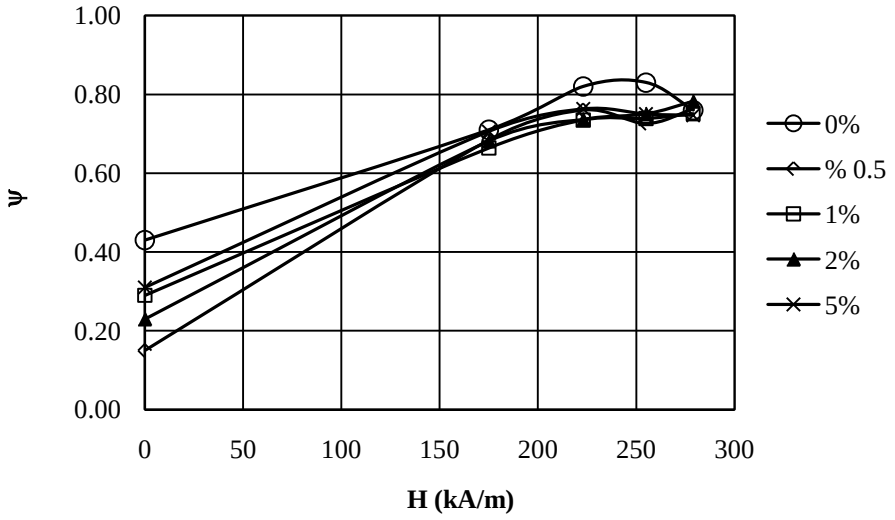
Tez çalışmasının bu kısmında filtre edilecek besleme katı manyetik partiküllerin yanında ayrıca deterjan içermektedir. Özellikle restoran, otomotiv, tekstil gibi küçük veya büyük ölçekteki işletmelerde yıkama suları deterjan içermekte ve bu atık su çevreye deşarj edilmektedir. Bu atık yıkama sularındaki korozif partiküller gibi istenmeyen manyetik safsızlıklar manyetik filtrasyon ile temizlenebilir ve manyetik olmayan diğer safsızlıklar da farklı ayırma işlemleriyle uzaklaştırıldıktan sonra temizlenen su tekrar işletmede kullanılabilir. Deterjan içeren veya içermeyen taşıyıcı ortamların istenmeyen manyetik safsızlıklardan temizlenmesi konusunda pek az çalışma yapılmıştır. Bu konu ile ilgili sunulan bir çalışmada deterjanlı restoran atık sularının elektrokoagülasyon yöntemi ile ayırma etkinliği incelenmiştir [64]. Yapılan diğer bir çalışma da manyetik filtrede parçacıkların tutunma mekanizması üzerine surfaktanın etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada deterjanla işlenmiş taşıyıcı ortamdan manyetik parçacıkların ayrımında manyetik filtre matris elemanı olarak çelik teller ile oluşturulan filtre matrisi kullanılmıştır. Yüksek gradiyentli manyetik filtrasyonla surfaktanlı ve surfaktansız demir oksit parçacıkların

ayırma etkinliği üzerine manyetik alan yoğunluğu, tel kolektör yarıçapı ve akışkan hızının etkisi incelenmiştir [56].

Tez çalışmasının bu bölümünde bulaşık deterjanıyla işlenmiş manyetik özellikli korozyon ürünlerinden hazırlanan yapay süspansiyonların manyetik ayrımında ilk kez kullanılan paslanmaz çelik bilyelerden oluşturulmuş elektromanyetik filtre kullanılmış ve manyetik ayırma verimi üzerine deterjan derişimi, manyetik alan şiddeti, filtre matris eleman çapı, filtre uzunluğu, süspansiyon pH'sı ve viskozitesinin etkisi incelenmiştir.

4.5.1. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Manyetik Alan Şiddetinin Etkisi

Sabit derişimde (w/v) hazırlanan deterjan çözeltisine belirlenen miktarda pas numunesi ilave edilerek hazırlanan deterjanlı yapay süspansiyonunun kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddetinin etkisi Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

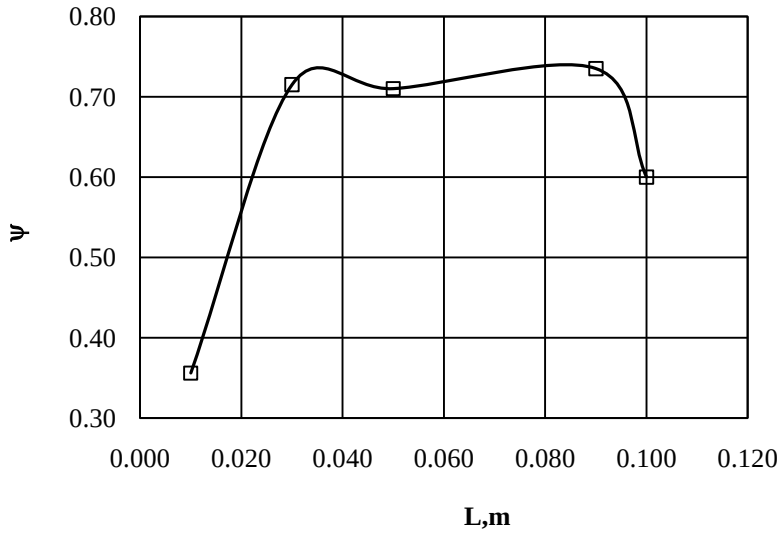


Şekil 4.22. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine manyetik alan şiddeti etkisi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, L=0,1 m, C_i=50 ppm

Deterjanlı yapay süspansiyonda kalite faktörünün, manyetik alan şiddeti ile arttığı görülmektedir. Bu artış 223 kA/m dış manyetik alan şiddetine kadar önemli iken daha büyük alan şiddeti değerlerinde filtrenin manyetik doyuma ulaşması sebebiyle kalite faktörünün önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür.

4.5.2. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Uzunluğunun Etkisi

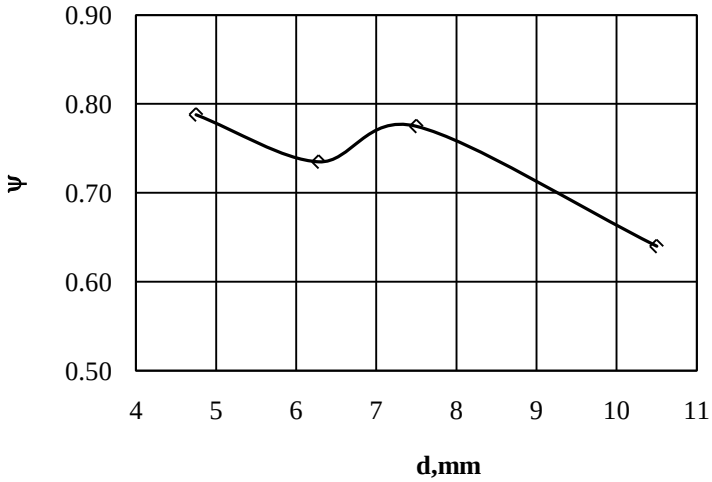
Deterjanlı yapay süspansiyonun kalite faktörünün filtre uzunluğu ile değişimi Şekil 4.23'de verilmiştir. Filtre uzunluğunun 1 cm'den 9 cm'e artması ile 0,36'dan 0,74'e arttığı görülmektedir. Ancak filtre uzunluğunun 10 cm olması ile kalite faktörü, elektromanyetik filtrenin doymasından dolayı 0,54'e düşmüştür. Bu sonuçlar, deterjansız ortamdaki sonuçlarla benzerlik göstermektedir [56].



Şekil 4.23. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun etkisi H=223 kA/m, d=6,28 mm, V_f =0,15 m/s, % Deterjan=1(w/v)

4.5.3. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Filtre Matris Eleman Çapının Etkisi

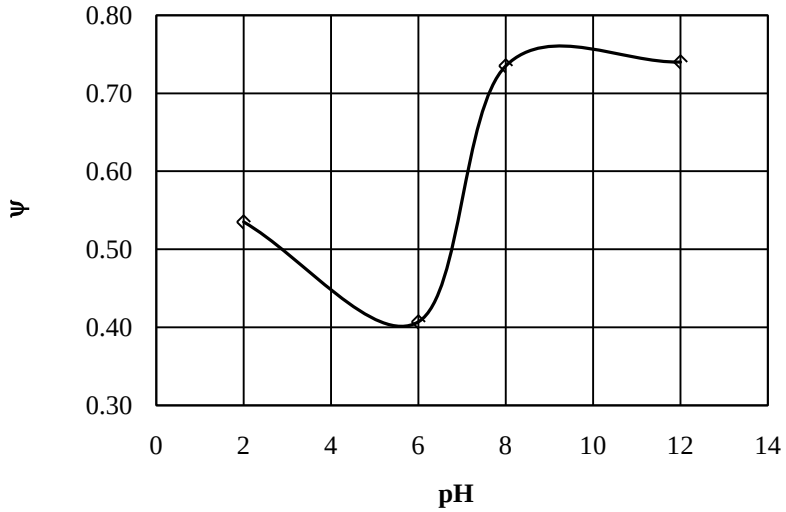
Filtre matris elemanı olarak 4-11 mm çaplı çelik bilyeler kullanılmıştır. Kalite faktörü üzerine filtre matris eleman çapının etkisi Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere çelik bilye çapının 4,75 mm'den 10,5 mm'e artması dolgulu yatağın gözeneklerindeki tutma bölgelerinin azalmasına sebep olduğundan kalite faktörü 0,79'dan 0,64'e düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 4.24. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine filtre elemanı çapının etkisi
H=223 kA/m, V_f =0,15 m/s, L=0,1 m, % Deterjan=1(w/v)

4.5.4. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Süspansiyon pH'sının Etkisi

pH'sı 2-12 aralığında deterjanlı yapay süspansiyonlar hazırlanmış ve kalite faktörü üzerine süspansiyon pH etkisi Şekil 4.25'de verilmiştir.



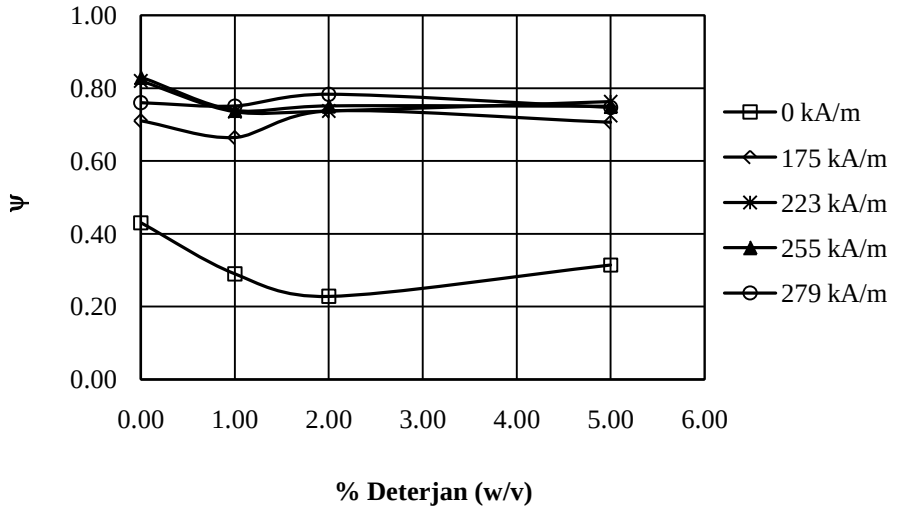
Şekil 4.25. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine pH etkisi
H= 223 kA/m, L= 0,1 m, d= 6,28 mm, % Deterjan=1(w/v)

Kalite faktörünün kuvvetli bazik ortamlar için daha yüksek olduğu görülmektedir. Çünkü oksit parçacıklar daha düşük pH'lı ortamlarda süspansiyon oluşturduğunda parçacık yüzeyi, proton adsorplayarak pozitif yüklenmektedir. Yüksek pH'lı ortamda oksit

parçacıkları ise proton desorbe ederek negatif yüklenir. Yani taneciklerin yüzeyi elektriksel yüklü olup, bu yükten dolayı çevrelerinde zıt yüklü iyonlar birikir ve bir iyon atmosferi oluşur. Bu tabakayı kaplayan yüzey ile çözeltideki herhangi bir uzak nokta arasındaki potansiyel farkına zeta potansiyeli denir. Belirli bir pH aralığında bulunan izoelektrik noktada zeta potensiyeli sıfır olur. Ortam pH'sı ve derişim zeta potensiyelini etkiler. Zeta potensiyeli genelde yığışma tepkimesini değerlendirmek için kullanılır. Yığışma ya da topaklaşma denilen olay düşük zeta potensiyelinde meydana gelir. Yığışan parçacıklar manyetik kuvvetle güçlü bir şekilde çekilir ve filtrede tutulur. Buna göre, filtrasyon verimi zeta potansiyeliyle azalır. Çözelti pH'sı ve deterjanda bulunan surfaktanın (yüzey aktif madde) yığışmayı arttırarak kalite faktörünün artmasına sebep olabilir [56, 64].

4.5.5. Deterjanlı Sularda Kalite Faktörü Üzerine Deterjan Derişiminin Etkisi

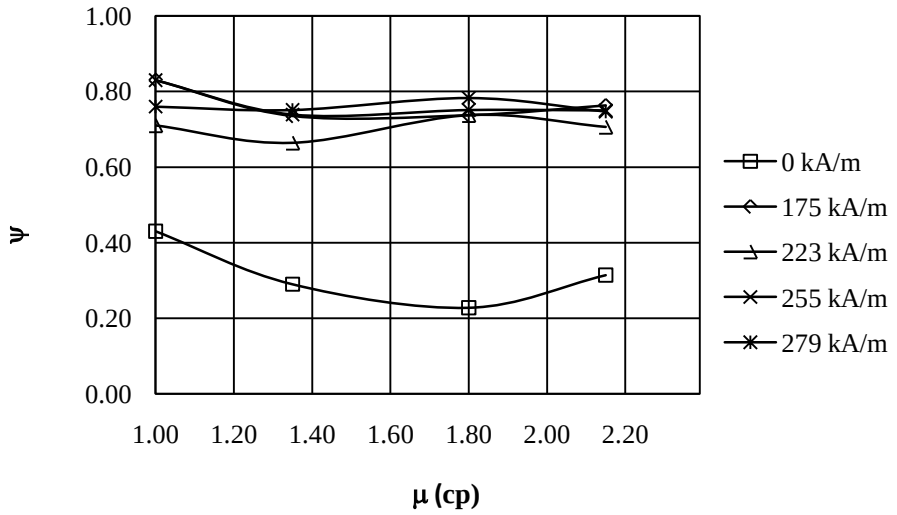
Deterjan derişimi % 0-5 (w/v) aralığında yapay süspansiyonlar hazırlanmıştır. Kalite faktörü üzerine deterjan derişiminin etkisi Şekil 4.26'da ve viskozitenin etkisi ise Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.26. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine deterjan derişiminin etkisi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, L=0,1 m, C_i=50 ppm

Deterjanlı yapay süspansiyon için kalite faktörünün tüm manyetik alan şiddetlerinde deterjan derişimi ile önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür. Manyetik alanın olmadığı

durumda, deterjanlı ve deterjansız yapay pas süspansiyonlarda kalite faktörünün oldukça düşük olduğu görülmüştür. Deterjan derişimi (w/v) %0-5 aralığında değiştirildiğinde deterjanla işlenmiş süspansiyon viskozitesinin değiştiği görülmüştür. Yapay süspansiyona ilave edilen deterjan oranının %0'dan %5'e artışı ile ortamın viskozitesi 1 cp'den 2,15 cp'e artmıştır. Taşıyıcı ortama deterjanla ilave edilen yüzey aktif madde olan surfaktanın artışı ortamın viskozitesini artırmasına rağmen hem parçacıklar arası etkileşimi hem de parçacık ile filtre matris elemanı arasındaki etkileşimi azaltıp, süspansiyonun yatak gözeneklerine daha kolay difüzlenmesini sağlayarak, gözeneklerde biriken katı miktarını artırır.

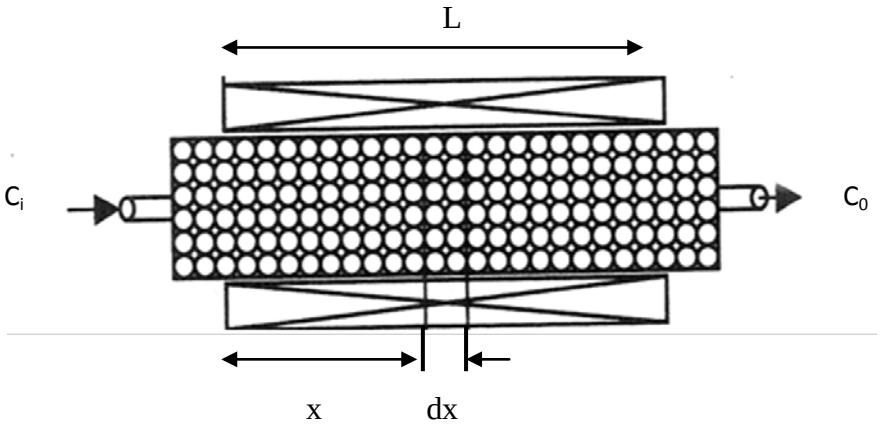


Şekil 4.27. Deterjanlı süspansiyonun kalite faktörü üzerine viskozitenin etkisi
V_f =0,15 m/s, d=6,28 mm, L=0,1m, C_i=50 ppm, % Deterjan=1(w/v)

Filtrede deterjansız yapay süspansiyonda viskozite artışı ile kalite faktöründe anlamlı bir değişimin olmadığı görülmüştür. Temizlenen ortamda surfaktan bulunması süspansiyon viskozitesini artırmasına rağmen yüzey olaylarından dolayı filtre performansı kısmen artabilir. Deterjansız süspansiyonlarda filtre performansı dispers karışımın derişiminden bağımsız olduğu gibi surfaktanın derişimi ile de çok fazla değişmemektedir. Deterjansız yapay pas süspansiyonlarında kalite faktörü tüm manyetik alan şiddetlerinde deterjanlı süspansiyonlara göre daha yüksektir [56, 64, 119].

4.6. Elektromanyetik Filtrasyon İçin Matematiksel Modelin Oluşturulması

Manyetik filtrelerde kalite faktörü, filtrelenecek karışımdaki manyetik özellikli parçacıkların derişimine bağlı olarak belirlenir. C_i ve C_0 karışımın manyetik özellikli demir bileşiklerinin filtre giriş ve çıkış derişimi olmak üzere manyetik filtre sistemini temsil eden diferansiyel eleman üzerinde kurulan kütle dengesi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.28. EMF'nin prensip şeması

— ; ; 4.6

Bu ifadeden aşağıdaki eşitlik elde edilir.

— 4.7

EMF'nin kalite faktörü ve logaritmik kalite faktörü ise

– 4.8

4.9

olur. Burada absorpsiyon katsayısı, L manyetik filtrenin uzunluğu ve logaritmik kalite faktörüdür. Logaritmik kalite faktörünün ifadesini aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

4.10

Genelde filtreleme denkleminin birkaç yazılış şekli vardır. Manyetik filtre teorisinde kalite faktörünün eksponensiyel değişimi daha çok kullanılır. Bazı durumlarda filtreleme denklemi ekponensiyel değişimden farklıdır. Bunun nedeni temizlenen sıvının taşıdığı parçacıkların polidispers ve nonizotrop olmasıdır.

Deneysel sonuçlar kalite faktörünün birçok parametreye bağlı olduğunu göstermiştir. Bu parametrelerden en önemlileri, manyetik filtrenin uzunluğu L, matris eleman çapı d, temizlenen sıvının akış hızı V_f ve dış manyetik alan şiddeti H'dır. Bu parametreler göz önüne alınarak, filtreleme denkleminin belirlenmesi için deneysel verilerimden yararlanarak bir matemetiksel model oluşturulmuştur. Bu model, genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması yöntemlerinde kullanılmak üzere oluşturulmuştur.

$\xi =$

logaritmik kalite faktörü, eşitlikte verilen değişkenlere bağlı olarak bulunmuş ve eşitlikteki sabitlerin değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Elektromanyetik filtrasyon modelinde yer alan sabitler

Manyetik alınganlık (κ)	Manyetik özellikli parçacık yüzdesi (λ)	Ortam yoğunluğu (ρ)	Tutunan parçacıkların oranı (ϕ)	Parçacıkların boyutu (δ)	Manyetik geçirgenlik (μ)
0,4	0,85	1000 kg/m^3	0,10	2.10^{-6} μm	———

4.13

için a, b, c ve d katsayılarının değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için genetik algoritma yönteminden faydalanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak deneysel sonuç ile model arasındaki fark seçilmiş ve bu değerin minimizasyonuna çalışılmıştır. a, b, c ve d için alt/üst sınırlar sırasıyla [0,01;2,0], [0,01;2,0], [0,01;1,5] ve [0,01;2,0] olarak belirlenmiştir. Seçim mekanizması ve genetik operatörlerin değerleri için yapılan ön çalışma sonucunda en uygun değerler, Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4. 8. GA opsiyon değerleri

Opsiyon **GA optimumset**	Topluluk Büyüklüğü	Nesil Sayısı	Seçim Fonksiyonu	Çaprazlama Fonksiyonu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon İşlemcisi
Değer	20	100	Rulet Tekerleği	Rastgele	0,80	Default

Bu elektromanyetik filtrasyon modelinde Çizelge 4.8'de yer alan değerler kullanılarak matematiksel model düzenlenmiştir. Genetik algoritma ile a, b, c ve d katsayılarının değerleri için optimum düzeyler belirlenmiş ve düzenlenen model aşağıdaki eşitlikteki gibi elde edilmiştir:

4.14

4.7. Simpleks Optimizasyonu İçin Etkenlerin ve Çalışma Aralıklarının Seçimi

Çalışmanın bu bölümünde elektromanyetik filtrasyon işleminin modifiye simpleks metodu ile optimizasyonunda dikkate alınması gereken etkenler belirlenmiş ve çalışma koşulları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.7.1. Dış Manyetik Alan Şiddeti

Uygulanan dış manyetik alan şiddeti hem elektromanyetik filtrasyon işleminin verimini hem de işletim maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri olması nedeniyle optimizasyona dahil edilen bir değişkendir.

Elektromanyetik filtrasyon deneylerinde uygulanan dış manyetik alan şiddeti H=30-150 kA/m arasında değiştirilmiştir. 30 kA/m altındaki dış manyetik alan şiddetinde filtrede manyetik parçacığın tutunması zayıf olacağından dış manyetik alan şiddeti çalışma alt sınırı 30 kA/m olarak seçilmiştir. Bu değişkenin üst sınırı olarak tez çalışmasında uygulanan diğer iki optimizasyon tekniğinde kullanılan modelin geçerli olduğu üst sınır olan 150 kA/m değeri seçilmiştir.

4.7.2. Filtre Uzunluğu

Bu çalışmada kullanılacak filtrenin uzunluğu modifiye simpleks metodu ile optimize edilecek diğer bir faktördür. Manyetik filtrenin uzunluğu elektromanyetik filtrasyon verimini ve elektromanyetik filtrasyon kurulum maliyetini etkilemektedir. Simpleks optimizasyon deneylerinde filtre uzunluğu 1 cm'nin altında temizleme veriminin çok düşük olması nedeniyle çalışma alt sınırı 1 cm olarak seçilmiştir. Manyetik filtre uzunluğunun 10 cm üzerinde olmasıyla filtrenin yerleştirildiği hava aralığının dışına çıkılmış olmakla beraber manyetik alan çizgileri filtreden dışarı çıkmaktadır. Bu sebeple filtre uzunluğunun çalışma üst sınırı olarak 10 cm seçilmiştir.

4.7.3. Filtre Matris Eleman Çapı

Elektromanyetik filtrasyon verimini ve kurulum maliyetini etkileyen fiziksel değişkenlerden biri de elektromanyetik filtrede dolgu malzemesi olarak kullanılacak olan paslanmaz çelik bilyelerin çapıdır. Filtre matris elamanı olarak seçilen kürelerin çapının alt sınırı, filtrenin basınç düşüşünden etkilenmemesi için 3 mm ve üzerindeki boyutlarda çalışılması gerektiğinden çalışma alt sınırı bulabildiğimiz en küçük çelik bilye çapı olan

4,75 mm seçilmiştir. Çalışma üst sınırı ise filtre matris çapı dikkate alınarak 14 mm olarak seçilmiştir.

4.7.4. Filtreleme Hızı

Elektromanyetik filtrasyonu etkileyen parametrelerden optimize edilmesi düşünülen son değişken yapay pas süspansiyonun filtrelenme hızıdır. Bu çalışmada teknik kısıtlamalar nedeniyle filtreleme hızının alt sınırı 0,05 m/s ve üst sınırı 0,2 m/s olarak seçilmiştir.

4.7.5. Kalite Faktörünün Optimizasyonunda İhmal Edilecek Etkenler

Bu optimizasyon çalışmasında amaçlanan kalite faktörü üzerinde etkisi olduğu bilinen ya da tahmin edilen etken sayısı fazladır. Hemen hemen tüm optimizasyon çalışmalarında olduğu gibi bu işlemlerde olası tüm etkenleri ele alarak bir optimizasyon denemesi yapmak hem zor hem de gereksizdir. En azından elektromanyetik filtrasyon modelinde yer almayan pH ve viskozite gibi etkenlerin elenmesi uygun olur. Bunun yanı sıra parçacık boyutu, kontrol edilebilirliği mümkün olmadığından dikkate alınmamıştır.

Elektromanyetik filtrasyon kalite faktörü üzerinde etkisinin önemli olduğu bilinen parametrelerin Çizelge 4.9'da yer alan alt ve üst sınırları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Diğer taraftan Nelder-Mead modifiye simpleks yönteminin optimizasyon sonuçlarını sınamak için kullanılan genetik algoritma ve tavlama benzetiminde alınan matematiksel model Çizelge 4.3'de yer alan dört etkene bağlıdır. Ancak bu model dış manyetik alanın düşük değerlerinde (H>200 kA/m) geçerli olduğundan dış manyetik alan şiddeti için alt ve üst sınır değerleri 30-150 kA/m olarak seçilmiştir. Diğer etkenlerin düzeyi ile ilgili kısıtlayıcıları deneysel sistem belirlemiştir.

Çizelge 4.9. Kalite faktörü parametrelerinin alt ve üst sınırları

Kalite Faktörü Parametreleri	Filtre Matris Eleman Çapı (m)	Filtre Uzunluğu (m)	Manyetik Alan Şiddeti (kA/m)	Filtreleme Hızı (m/s)
Alt Limit	$4{,}75 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}	30	5×10^{-2}
Üst Limit	14×10^{-3}	1×10^{-1}	150	2×10^{-1}

4.8. Simpleksin İlerleyişi

Simpleks yönteminin açıklanmasında belirtildiği üzere her simpleks k+1 köşeden oluşacaktır. Her köşenin konumunu belirleyen koordinatlarda, her deney için sağlanması gereken etken düzeylerine karşılık gelmektedir. Böylece ilk simpleksi oluşturmak için, seçilen etken sayısının bir fazlası kadar, yani beş deney yapılacaktır. Bu elektromanyetik filtrasyondaki etken düzeyleri, **Ek 1**'de verilen katsayılar yardımıyla, %20 adım büyüklüğü ve %50 konum değiştirme terimi kullanarak eşitlik 4.7.1 ile belirlenmiştir. Seçilen adım büyüklüğü, optimuma yeteri kadar hızlı ilerlemeyi sağlayabilecek ölçüde büyük, fakat aynı zamanda kabul edilebilir duyarlıkla yaklaşmaya olanak verecek kadar küçük bir adım büyüklüğü olarak görülmüştür. %50 konum değiştirme terimleri, ilk deneylerin etkenlerinin sınır değerlerinde yapılmasının doğurabileceği sakıncaları ortadan kaldırmak için kullanılmıştır [76, 83].

Çizelge 4.10'daki değerlerin ve ilk beş elektromanyetik filtrasyonu izleyen deneylerdeki etken düzeylerinin hesaplanmasında, **Ek 2**'de verilen bilgisayar programından yararlanılmıştır. Bilgisayar programı özetle, elektromanyetik filtrasyon deneylerinde elde edilen verimlerin büyüklük sırasını takip etmekte, yeni deney koşullarının hesaplanması için simpleks algoritmasının öngördüğü kararları vermekte ve hesaplamaları yapmaktadır.

Elektromanyetik filtrasyon değişkenleri filtre matris eleman çapı, filtre uzunluğu, dış manyetik alan şiddeti ve filtreleme hızı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla k= 4'tür.

k_1: Filtre Matris Eleman Çapı (m)

k_2: Filtre Uzunluğu (m)

k_3: Filtreleme Hızı (m/s)

k_4: Dış Manyetik Alan Şiddeti (A/m)

k+1 tane köşeden oluşan düzgün beş yüzlü hareket edeceği arama uzayına konumlandırılmıştır. Başlangıç simpleksini oluşturmak için algoritmanın belirlediği koşullarda beş elektromanyetik filtrasyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen çıkış numunelerinde analizle belirlenen toplam demir içeriğinden, algoritmaya yanıt olarak atanan kalite faktörleri eşitlik 3.2.1 ile hesaplanmıştır. Etken düzeyleri ise eşitlik 2.7.10'de verilen bağıntıdan hesaplanmıştır. Simpleks aritmetiğini kolaylaştırmak için birimleri ve aralıkları değişik olan bütün etken düzeyleri 0 ile 1 arasında olacak şekilde

normalize edilmiştir. Normalizasyon, her etken için 2.7.8 eşitliğinde verilen bağıntıdan yararlanarak yapılmıştır. Böylece ilk simpleksi oluşturacak etken düzeyleri Çizelge 4.10'deki gibi olmaktadır.

Çizelge 4.10. İlk simpleks için hesaplanan etken düzeyleri

Köşe No		k_1	k_2	k_3	k_4
Normalize edilmemiş değerler	1	0,009	0,055	90.000	0,125
	2	0,011	0,055	90.000	0,125
	3	0,010	0,071	90.000	0,125
	4	0,010	0,060	110.000	0,125
	5	0,010	0,060	95.000	0,150
Normalize edilmiş değerler	1	0,460	0,500	0,500	0,500
	2	0,680	0,500	0,500	0,500
	3	0,570	0,680	0,500	0,500
	4	0,570	0,560	0,660	0,500
	5	0,570	0,560	0,540	0,660

İlk simpleksi oluşturan etken düzeylerinin belirlenmesinden sonra sırasıyla k+1 sayıdaki köşeye karşılık gelen koşullarda deneyler yapılarak yanıtlar belirlenmiş ve Çizelge 4.11'de verilmiştir. Simpleks algoritması, alınan yanıtları büyüklük sırasına koyarak en iyi yanıt (B), ikinci en kötü yanıt (N) ve en kötü yanıt (W)'yi belirledikten sonra en kötü yanıtın karşı tarafına yansıtılacak yeni simpleks köşesinin (R) koordinatlarını hesaplar. Bu koordinatlara karşılık gelen koşullarda yeni bir deney yapılarak yanıtın alınmasıyla simpleksin ilk adımı gerçekleştirilir.

Çizelge 4.11. İlk simpleks için hesaplanan etken düzeylerinde alınan yanıtlar

Köşe No	k_1	k_2	k_3	k_4	Yanıt	Ölçek
1	0,009	0,055	90.000	0,125	0,5868	
2	0,011	0,055	90.000	0,125	0,4947	N
3	0,010	0,071	90.000	0,125	0,6051	
4	0,010	0,060	110.000	0,125	0,6273	B
5	0,010	0,060	95.000	0,150	0,4520	W

İlk simpleks adımının atılmasından sonra algoritmanın gerektirdiği sınamalar yapılarak yeni deney koşullarının saptanmasına ve yanıtların ölçülmesine devam edilmiştir.

Çizelge 4.12. İlk Simpleks adımı

	Köşe No	k_1	k_2	k_3	k_4	Yanıt	Ölçek
Simpleks köşelerinin koordinatları	1	0,460	0,500	0,500	0,500	0,5868	
	2	0,680	0,500	0,500	0,500	0,4947	N
	3	0,570	0,680	0,500	0,500	0,6051	
	4	0,570	0,56	0,660	0,500	0,6273	B
	5	0,570	0,560	0,540	0,660	0,4520	W
ΣP		2,85	2,80	2,70	2,66		
= ΣP/n		0,57	0,56	0,54	0,53		
		-0,11	0,06	0,04	0,03		
)		-0,055	0,03	0,02	0,016		
R= + (-W)		0,46	0,62	0,58	0,564		
R′		0,010	0,060	95,000	0,110	0,6455	
C_R= +)		0,52	0,59	0,56	0,548		
C_w= -)		0,63	0,53	0,52	0,516		
E=R+(-W)		0,35	0,68	0,62	0,596		
E'		0,010	0,061	95,000	0,090	0,6640	
C_R′		0,010	0,063	97200	0,13		
C_W′		0,011	0,058	92400	0,13		
Yeni köşe	6	0,010	0,061	95,000	0,090	0,6640	
Y′	6	0,010	0,061	95,000	0,090	0,6640	

Başlangıç simpleksin ilerleyişinde olası tüm adımlara ilişkin algoritma tarafından yapılan hesaplamalar yukarıdaki Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

R′ , E′, C_R′ , C_W′ ve Y′ normalize edilmemiş değerler olup, Çizelge 4.9'deki normalize değerlerden normalize edilmemiş değerlere geçmek için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

4.7.4

Çizelge 4.13'de görüldüğü gibi R noktasındaki filtre matris elemanı çapı 10 mm, filtre uzunluğu 6 cm, dış manyetik alan şiddeti 95 kA/m ve filtreleme hızı 0,11 m/s olarak alındığı bu simpleks köşelerinin koordinatlarında elektromanyetik filtrasyon deneyi yapılmış ve bu deney koşullardaki kalite faktörü olan Y_R, yeni simpleks köşesi bulmak için kullanılmıştır. Y_R=64,55 ve Y_B=62,73 olup, Y_R>Y_B'dir. Bu koşulu sağladığı için E noktasındaki yanıt Y_E=66,40 olarak belirlenmiştir. Y_E>Y_R koşulu sağlanmasından dolayı yeni simpleks BNE olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.13. İlk Simpleks adımında alınan yanıtlar

Köşe No	k_1	k_2	k_3	k_4	Yanıt	Ölçek
1	0,009	0,055	90,000	0,125	0,5868	
2	0,011	0,055	90,000	0,125	0,4520	Y_W
3	0,010	0,071	90,000	0,125	0,4947	Y_N
4	0,010	0,060	109,608	0,125	0,6273	Y_B
5	0,010	0,060	94,896	0,149	0,6051	
R	0,010	0,060	95,000	0,110	0,6455	Y_R
E	0,010	0,061	95,000	0,090	0,6640	Y_E

Aksi halde yeni $Y_R<Y_E$ olduğunda yeni simpleks için Y_R, Y_N ile karşılaştırılır. $Y_R>Y_N$ halinde yeni simpleks BNR olur. $Y_R<Y_N$ ise Y_R , Y_W ile karşılaştırılır, $Y_R>Y_W$ halinde C_R (pozitif daralma); $Y_R<Y_W$ halinde ise yeni simpleks BNC_W (negatif daralma) olur [76, 78, 80].

4.8.1. Kalite Faktörünün Nelder-Mead Simpleks Optimizasyon Sonuçları

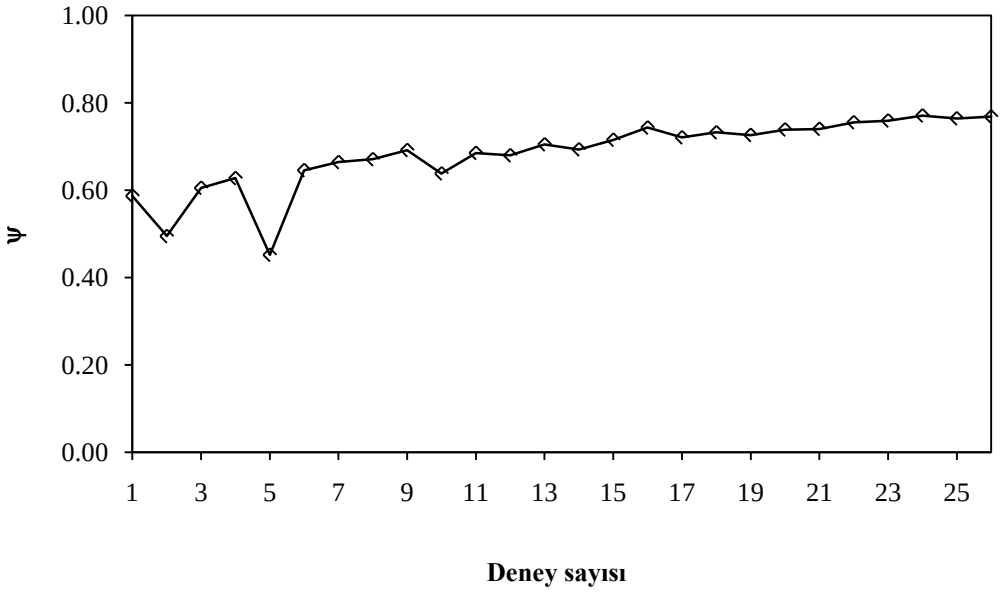
Koşulları simpleks algoritmasına göre belirlenen ve her biri bir simpleks adımı oluşturan elektromanyetik filtrasyon deneylerine optimizasyon sonlandırma koşulu sağlanıncaya kadar devam edilmiştir. Optimizasyon boyunca deney koşullarında elde edilen kalite faktörleri Şekil 4.30'de gösterilmektedir. İlk beş elektromanyetik filtrasyon deney koşulları, açıklanan yönteme göre keyfi olarak belirlendiğinden ve bu deneyler sonunda henüz bir simpleks adımı gerçekleşmediğinden, kalite faktörü değerlerinde belirgin bir artış görülmemektedir. Buna karşılık ilk simpleks adımından durdurma koşuluna kadar yanıtta yani kalite faktörü değerlerinde %70'in üzerinde bir artış gözlenmiştir. 24. deneyde kalite faktörü 0,77'ye ulaşmış, 24. deneyden itibaren kayda değer bir değişiklik gözlenmemesi ve standart sapmanın 2.10^{-3} düzeyine düşmesi nedeniyle daha fazla deney ile kayda değer bir artış sağlanamayacağı için deneyler sonlandırılmıştır.

Çizelge 4.14. Nelder-Mead Simpleks Yönteminin Sonuçları

Deney sayısı	Filtre uzunluğu (m)	Filtre matris eleman çapı (m)	Dış manyetik alan şiddeti (A/m)	Filtreleme hızı (m/s)	Kalite faktörü

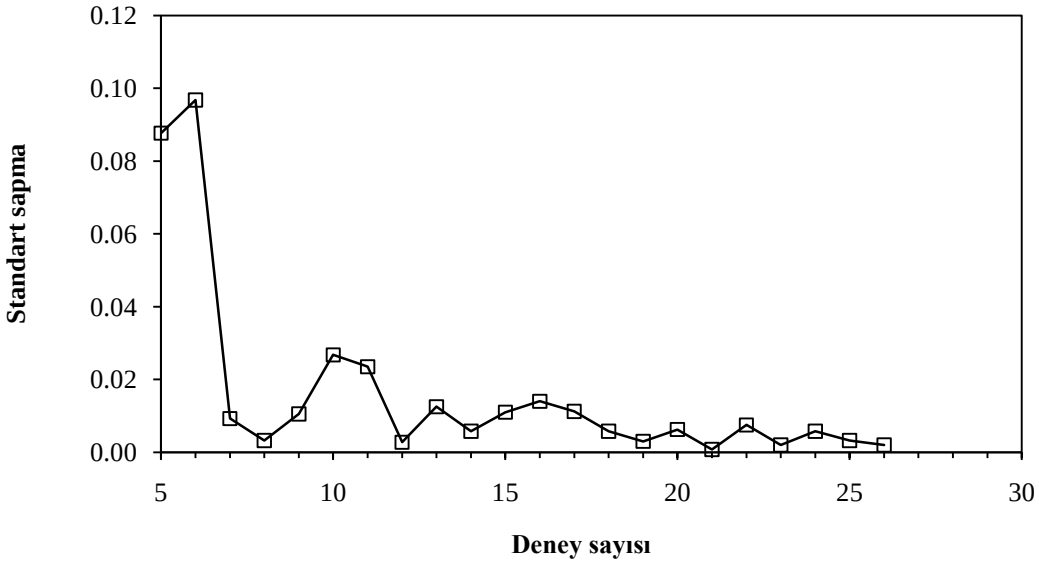
26	$8{,}9.10^{-2}$	5.10^{-3}	111.341	8.10^{-2}	0,7705

Maksimize edilmeye çalışılan kalite faktörünün optimizasyon boyunca artış gösterdiği Şekil 4.29'de görülmektedir. Keskin düşüşler de deneysel hataların payı olabileceği gibi bunlar bütün arama tekniklerinde karşılaşılan geçici değişimlerdir. En yüksek 0,7705 olan kalite faktörü değerine 24. deneyde ulaşılmıştır. Optimum etken düzeyleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.



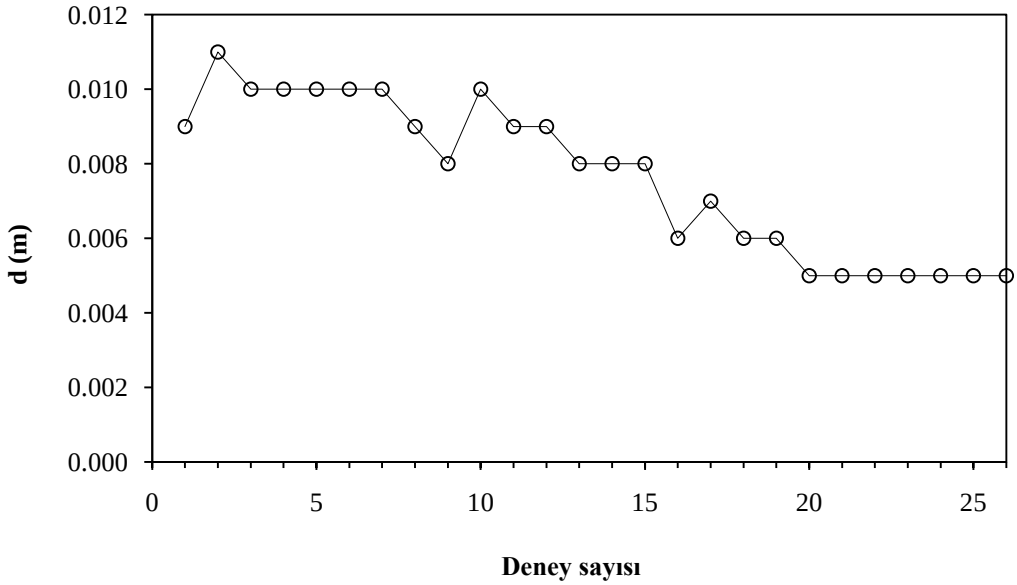
Şekil 4.29. Kalite faktörünün simpleks optimizasyonu boyunca değişimi

Simpleks optimizasyonu boyunca standart sapmaların bir minimum düzeye indiği ve değişimlerinin de pratikçe sona erdiği Şekil 4.30'dan da görülmektedir. Burada, standart sapmada 19. deneyden sonra önemli bir değişlik olmadığı görülmektedir.



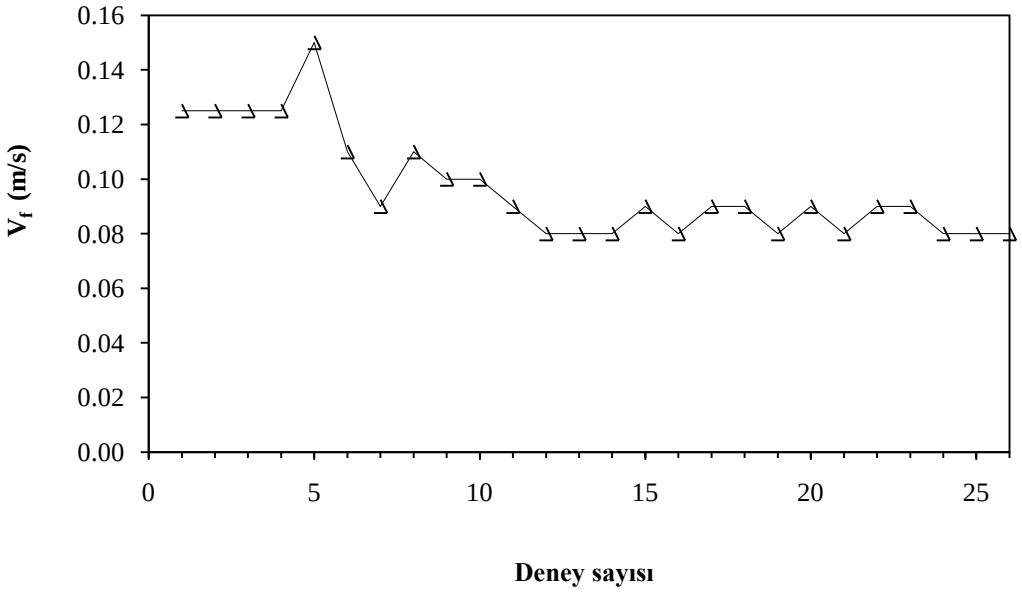
Şekil 4.30. Simpleks optimizasyonu boyunca standart sapmanın değişimi

Diğer taraftan optimizasyon boyunca değişken düzeylerinde meydana gelen değişikliklerin gösterildiği aşağıdaki grafiklerde, optimuma doğru ilerlemede kalite faktörünün proses parametrelerince nasıl etkilendiği hakkında da bir fikir vermektedir.



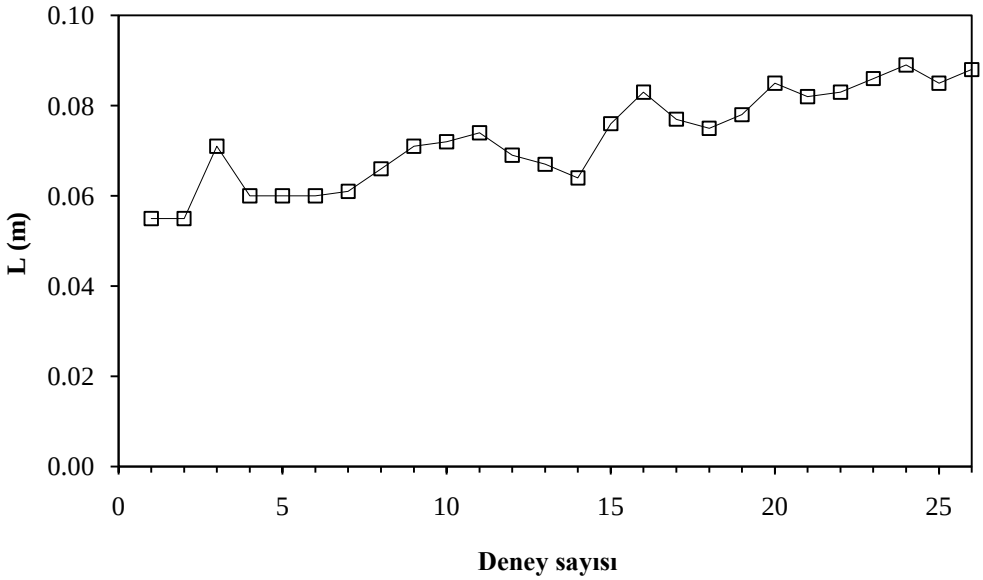
Şekil 4.31. Filtre matris eleman çapının simpleks optimizasyonu boyunca değişimi

Filtre matris eleman çapında optimizasyon deneyleri boyunca belirgin bir azalma olduğu Şekil 4.31'de görülmektedir. Buna göre elektromanyetik filtrasyon işleminde filtre matris eleman çapı kalite faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Optimizasyonda maksimum kalite faktörüne ulaşmak için filtre matris eleman çapı alt sınıra yaklaşmıştır.



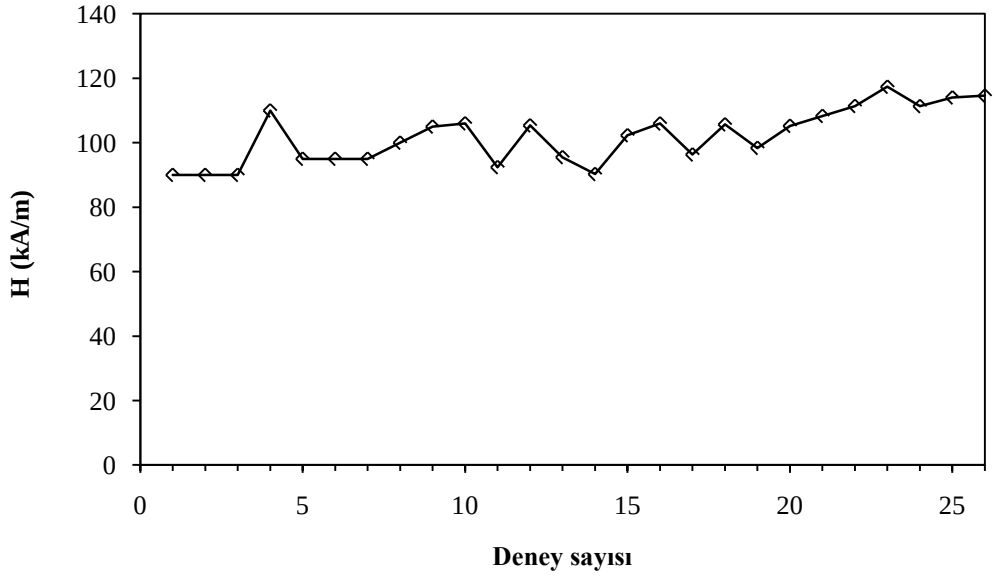
Şekil 4.32. Filtreleme hızının simpleks optimizasyonu boyunca değişimi

Optimizasyon boyunca aynı yönde önemli bir değişim gösteren etkenlerden biri de filtreleme hızıdır. Şekil 4.32'den görüldüğü üzere simpleks optimizasyon deneyleri boyunca maksimum kalite faktörüne ulaşmak için filtre matris eleman çapı gibi filtreleme hızının değeri de alt sınıra yaklaşmaktadır.



Şekil 4.33. Filtre uzunluğunun simpleks optimizasyonu boyunca değişimi

Kalite faktörü üzerine filtre uzunluğunun da etkisi olduğu Şekil 4.33'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi optimizasyon deneyleri boyunca filtre uzunluğu değeri üst sınıra yaklaşmaktadır. Diğer bir deyişle kalite faktörü filtre uzunluğu ile artmaktadır.



Şekil 4.34. Dış manyetik alan şiddetinin simpleks optimizasyonu boyunca değişimi

Şekil 4.34 dikkate alındığında uygulanan dış manyetik alan şiddetinin de kalite faktörünü aynı yönde etkilediği söylenebilir. Maksimum kalite faktörü için dış manyetik alan şiddeti özellikle optimizasyonun sonlarına doğru üst sınırına yaklaşmıştır.

Optimizasyon boyunca elektromanyetik filtrasyon kalite faktörü, filtre matris eleman çapı ve filtreleme hızının aralıkları için seçilen değerlerin alt sınırına ulaştığı, dış manyetik alan şiddeti ve filtre uzunluğunun seçilen değerlerin üst sınırına doğru yaklaştığı dikkate alınınca, bu sınırların dışında daha yüksek kalite faktörünün elde edilme olasılığının bulunabileceği söylenebilir. Ancak simpleks deney sonuçları, daha yüksek kalite faktörü sağlaması muhtemel olan koşulların yönünü açık olarak gösterildiğinden, optimizasyona simpleks yöntemiyle (çalışma aralıklarını genişleterek) devam etme gereği duyulmamıştır.

4.9. Genetik Algoritma ve Tavlama Benzetimi İçin Kullanılan Parametreler

Çalışmanın bu bölümünde kalite faktörünü proses parametrelerine bağlayan matematiksel modelin optimizasyonu için genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritma teknikleri kullanılmıştır. Bu optimizasyon teknikleri ile kalite faktörünü maksimize eden etken düzeylerinin optimum değerleri bulunmuştur. Bu optimizasyon çalışmasında TOSHİBA (Genuine IntelR (CPU) 1.67 GHz işlemci, 1GB RAM) bilgisayarda, Windows Vista işletim sistemi altında çalışan MATLAB® yazılımının optimizasyon paketi içinde yer alan genetik algoritma ve tavlama benzetimi araçları kullanılarak yapılmıştır.

Bu optimizasyon tekniklerinin etkinliği kullanılan parametreler ve bunların sınır şartlarına bağlı olarak değişir. Genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemleri için kullanılacak parametreler ve sınır şartları Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Bu tekniklerle eşitlik 2.6.8 ile verilen matematiksel model üzerinde uygulanarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.16 ve 4.18'de gösterilmiş olup, tez çalışmasında temel optimizasyon metodu olarak modifiye simpleks yöntemi ile ulaşılan optimum sonuçlar kıyaslanmıştır.

4.9.1. Genetik Algoritma Yöntemi İle Kalite Faktörünün Optimizasyonu

Genetik algoritma ile kalite faktörü üzerine etki eden proses parametrelerinin optimizasyonunun işlem basamakları aşağıda verilmiş ve genetik algoritma opsiyon değerleri Çizelge 4.15'de gösterilmiştir:

1. Başlangıç Topluluğu: Problemlerin test edilmesinde, literatürdeki çalışmalara benzer olarak, başlangıç popülasyon büyüklüğü problem büyüklüğüne bağlı olarak "20" seçilmiştir.

2. Üreme Yöntemi: Üreme yöntemi olarak Rulet çemberi, amaç fonksiyonu olarak kalite faktörü kullanılmıştır. Maksimizasyon problemlerinde, kalite faktörü değeri büyük olanların bir sonraki topluluğa geçmelerine öncelik tanınır. Topluluktaki her bireyin seçim olasılığı aşağıdaki prosedüre göre hesaplanmıştır:

a) Çalışmadaki her birey için kalite faktörü hesaplanır.

b) Topluluktaki toplam kalite faktörü bulunur.

c) Her deneyin topluluktaki oranı (%) belirlenir.

d) Hesaplanan bu oran ile kalite faktörünü maksimize eden her bir kromozomun bir sonraki nesilde yer alma olasılığı hesaplanır.

e) Gauss dağılımına göre üretilen rassal sayılar yardımı ile bir sonraki nesilde yer alacak kromozomlar seçilir.

3. Çaprazlama Yöntemi: Kalite faktörüne uygun çaprazlama yöntemi olarak rastgele çaprazlama yöntemi seçilmiştir.

4. Çaprazlama Oranı: Çaprazlama oranı literatürdeki çalışmalara benzer olarak "0,80" seçilmiştir.

5. Mutasyon İşlemcisi: Literatürde kullanılan Gauss mutasyon işlemcisi kullanılmıştır.

Çizelge 4. 15. GA opsiyon değerleri

Opsiyon **GA optimumset**	Topluluk Büyüklüğü	Nesil Sayısı	Seçim Fonksiyonu	Çaprazlama Fonksiyonu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon İşlemcisi
Değer	20	100	Rulet Tekerleği	Rastgele	0,80	Gauss

4.9.2. Genetik Algoritma Yöntemi Optimizasyon Sonuçları

Maksimum kalite faktörüne ulaşmak için filtre uzunluğu, filtre matris eleman çapı, uygulanan dış manyetik alan şiddeti ve filtreleme hızı gibi etkenlerin düzeyleri optimize edilmiş ve sonuçlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.16. GA optimum değerleri ve maksimum yanıt

Filtre matris eleman çapı (m)	**Filtre Uzunluğu** (m)	**Manyetik Alan Şiddeti** (kA/m)	**Filtreleme Hızı** (m/s)	**Kalite Faktörü**
$4{,}80x10^{-3}$	0,100	130,23	0,054	0,84

4.9.3. Tavlama Benzetimi Yöntemi İle Kalite Faktörünün Optimizasyonu

Çalışmanın tavlama benzetimi ile optimizasyonunda başlangıç sıcaklığı, tavlama türü, sıcaklık fonksiyonu, durdurma koşulu literatürde verilen değerler ışığında seçilmiş ve Çizelge 4.17'de verilmiştir. Bu planın seçimi algoritmanın etkinliği açısından önemlidir. Başlangıç sıcaklığı için 100 olarak seçilmiş ve sıcaklık üstel olarak azaltılarak 3000 iterasyon sonunda $0{,}75.10^{-3'}$e kadar düşürülmüştür.

Çizelge 4.17. TBA opsiyon değerleri

Opsiyon TBA optimumset	Tavlama fonksiyonu	Başlangıç sıcaklığı	Maksimum iterasyon	Sıcaklık fonksiyonu
Değer	Boltz tipi tavlama	100	3000	Eksponensiyel (temperatureexp)

4.9.4. Tavlama Benzetimi Yöntemi Sonuçları

Kalite faktörünün maksimize edilmesi için kullanılan tavlama benzetiminin sonuçları Çizelge 4.18'de gösterilmiştir. Kalite faktörünü etkileyen işletme parametrelerinden filtre matris elemanının çapı, filtre uzunluğu, dış manyetik alan şiddeti ve filtreleme hızı gibi etkenlerin optimum düzeyleri bulunmuştur.

Çizelge 4.18. TBA optimum değerleri

Filtre matris eleman çapı (m)	**Filtre Uzunluğu** (m)	**Manyetik Alan Şiddeti** (kA/m)	**Filtreleme Hızı** (m/s)	**Kalite Faktörü**
$4{,}80x10^{-3}$	0,100	120,12	0,0501	0,838

4.10. Optimizasyon Çalışmalarının Ortak Sonuçları ve Tartışması

Maksimum kalite faktörüne ulaşmak için filtre uzunluğu, filtre matris eleman çapı, filtreleme hızı ve dış manyetik alan şiddetinin optimum düzeylerini belirlemek için modifiye simpleks optimizasyon metodu, genetik algoritma ve tavlama benzetimi olmak üzere üç farklı optimizayon yöntemi kullanılmıştır. Çizelge 4.19'da görüldüğü gibi genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemleri sonucunda dış manyetik alan şiddetinde çok az bir fark oluşurken, diğer parametre değerleri aynı kalmaktadır. Modifiye simpleks metodu sonucunda elde edilen optimum değerler ile genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemlerinde bulunan optimum parametre değerleri birbirine çok yakındır. Üç farklı optimizasyon yöntemiyle filtre uzunluğu 8-10 cm, filtre matris elemanı çapı 4,75-5 mm, filtreleme hızı 0,05-0,08 m/s ve dış manyetik alan şiddeti 110-130 kA/m aralıklarında bulunmuştur. Genetik algoritma ve tavlama benzetiminde kullanılan modelin optimum bulunduğu bölgede deneysel sonuçlarla iyi uyuştuğu görülmüştür. Optimum koşullarda yapılan deney sonucunda elde edilebilen en yüksek kalite faktörü 0,77 olarak bulunmuştur. Genetik algoritma, tavlama benzetimi ve modifiye simpleks optimizasyon yöntemleri belirlenen alt ve üst sınır aralığında değerleri optimum sonuç aramaktadır.

Çizelge 4.19. Optimizasyon yöntemlerinin sonuçları

Optimizasyon Yöntemi	**Filtre matris eleman çapı** (m)	**Filtre uzunluğu** (m)	**Manyetik alan şiddeti** (kA/m)	**Filtreleme hızı** (m/s)	**Kalite Faktörü**
Nelder-Mead Simpleks	$5{,}00x10^{-3}$	0,089	111, 341	0,080	0,7705
Genetik Algoritma	$4{,}80x10^{-3}$	0,100	130,230	0,054	0,840
Tavlama Benzetimi	$4{,}80x10^{-3}$	0,100	120,120	0,050	0,838

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında öncelikle elektromanyetik filtrasyonda manyetik safsızlıkların tutularak ayırımın yapıldığı mıknatıslanmış dolgulu yatağın manyetik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra 11,42 ppm derişimli ve parçacık boyutu 0,2-2 mikron boyut aralığında değişen demir oksitleri karışımı ağırlıklı manyetik safsızlıkların deterjanlı ve deterjansız ortamda kalite faktörü üzerine proses parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Ayrıca maksimum kalite faktörünü gerçekleştirecek proses parametrelerinin optimum düzeyleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

5.1.1. Mıknatıslanmış Dolgulu Yataklar (MDY)

Mıknatıslanmış dolgulu/dolgusuz yatakların manyetik özellikleri ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonucunda dolgulu yataklı elektromanyetik filtredeki dış manyetik alan yoğunluğunun dolgusuz yataktakine göre yaklaşık iki kat yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum, elektromanyetik filtrasyon veriminin artmasını ve manyetik alanın sağlanması amacıyla kullanılan elektromıknatısın elektrik sarfiyatını düşürecektir. En düşük çapa sahip filtre matris elemanında manyetik alan yoğunluğu daha fazla olduğundan bu boyuttaki bilyelerle yatak oluşturulması daha uygun olacaktır. Ayrıca manyetik alan yoğunluğunun en fazla olduğu filtrenin orta bölgesinde parçacıkların daha çok tutulacağı öngörülmüştür.

5.1.2. Kalite Faktörü Üzerine Proses Parametrelerinin Etkisi

Elektromanyetik filtrasyon sistemini etkileyen manyetik özelliklerden dış manyetik alan şiddeti, geometrik özellikler arasında filtrenin uzunluğu ve filtre matris eleman çapı, hidrodinamik özelliklerden de filtreleme hızı ve süspansiyon viskozitesinin kalite faktörü üzerine etkileri belirlenmiştir. Ayrıca süspansiyon pH'ı ve çevrim sayısı gibi çeşitli parametrelerin kalite faktörü üzerine etkisi de incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda

kalite faktörünün bu parametrelerden önemli ölçüde etkilendiği görülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1) Manyetik filtrasyon kalite faktörünün, manyetik alanın olmadığı durumdan yani non-manyetik filtre ile elde edilen kalite faktöründen yaklaşık iki kat daha yüksek ayrım yapılabileceği gösterilmiştir.

2) Elektromanyetik filtre uzunluğu, dış manyetik alan şiddeti ve çevrim sayısı ile kalite faktörünün doyma değerine kadar arttığı görülmüştür.

3) Filtrede kullanılan çelik bilyelerin çapı, süspansiyon viskozitesi ve filtreleme hızının artmasıyla kalite faktörünün azaldığı görülmüştür.

4) Kalite faktörünün, süspansiyon pH'sından da farklı şekillerde etkilendiği görülmüştür.

5.1.3. Deterjanlı Suların Kalite Faktörü Üzerine Proses Parametrelerinin Etkisi

Deterjan içeren ortamların kalite faktörünün dış manyetik alan şiddeti, filtre uzunluğu ve deterjan derişimi ile filtrenin doyumuna kadar artığı buna karşın süspansiyon viskozitesi ve filtre matris eleman boyutu ile azaldığı görülmüştür. Ayrıca kuvvetli bazik ortamlarda deterjanlı suların kalite faktörünün daha yüksek olduğu görülmüştür. Temizlenen ortamda deterjan bulunması süspansiyon viskozitesini artırmasına rağmen yüzey olaylarından dolayı filtre performansı kısmen arttırabileceği söylenebilir. Deterjanlı sular gibi atık yıkama sularının da düşük derişimli, mikron boyutlu manyetik safsızlıklardan temizlenmesinde elektromanyetik filtrelerin etkin olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

5.1.4. Elektromanyetik Filtrasyonun Optimizasyon Sonuçları

Kullandığımız optimizasyon yöntemleri sonucunda maksimum kalite faktörünün elde edilebileceği dış manyetik alan şiddeti, filtrenin uzunluğu, filtre matris eleman çapı ve filtreleme hızına ait etkenlerin optimum düzeyleri aşağıda belirtilmiştir:

1) Maksimum kalite faktörüne ulaşmak için kullanılan genetik algoritma optimizasyon metodu sonucunda 0,84 kalite faktörüne ulaşmak için filtre uzunluğu 10 cm,

filtre matris elemanı çapı 4,75 mm, filtreleme hızı 0,054 m/s ve dış manyetik alan şiddeti 130,23 kA/m koşullarında çalışılması gerektiği görülmüştür.

2) Tavlama benzetimi optimizasyon metodunun sonuçları göstermiştir ki filtre uzunluğu 10 cm, filtre matris elemanı çapı 4,80 mm, filtreleme hızı 0,05 m/s ve dış manyetik alan şiddeti 120,12 kA/m değerlerinde kalite faktörü maksimum 0,838 olabilmektedir.

3) Nelder-Mead Simpleks yöntemine göre filtre uzunluğu 8,9 cm, filtre matris elemanı çapı 5 mm, filtreleme hızı 0,08 m/s ve dış manyetik alan şiddeti 111,341 kA/m değerlerinde kalite faktörü 0,7705 de maksimum seviyede gözlenmiştir.

4) Bu üç optimizasyon yöntemi sonucunda elektromanyetik filtrasyon veriminin filtre matris eleman çapı ve filtreleme hızının aralıkları için seçilen değerlerin alt sınırına ulaştığı, dış manyetik alan şiddeti ve filtre uzunluğunun seçilen değerlerin üst sınırına doğru yaklaştığı görülmüştür.

Modifiye simpleks metodu, genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemleri ile belirlediğimiz alt ve üst sınırlarda optimum sonuç aranmıştır. Maksimum kalite faktörü için hangi etkenin alt sınıra hangisinin üst sınıra doğru hareket ettiği optimizasyon yöntemlerince belirlenmiştir. Aynı sınırlar içinde modifiye simpleks yöntemi ile belirlenen en yüksek kalite faktörü 0,7705'dir. Ancak bu sonuca 26 deneyden sonra ulaşılmıştır. Halbuki genetik algoritma ve tavlama benzetimi optimizasyon yöntemlerinden elde edilen 0,84'lük maksimum kalite faktörüne çok kısa sürede ve deney yapmaksızın ulaşılmıştır. Genetik algoritma ve modifiye simpleks yöntemi ile yerel optimizasyon bulunurken, tavlama benzetimi algoritması ise global optimizasyonu yakınsadığından en yüksek kalite faktörü bu yöntemde belirlenmiştir.

Günümüzde rağbet gören diğer bir deneysel optimizasyon yöntemi olan yanıt yüzeyi yöntemi (RSM) dört etkenli bir sistem için optimuma 30 deney ile ulaşılabilmektedir. 30 deneyin sonucunda RSM de dört bilinmeyenli non-lineer bir denklem elde edilmekte ve optimum etken düzeyleri için bu denklemin her bir değişkene göre türevinin alınması gerekmektedir. Böylece, elde edilen dört bilinmeyenli dört denklemin çözümüyle sonuca ulaşılmaktadır. Deney sayısının daha az olması ve model çözümlemesi gerektirmemesi sebebiyle Nelder-Mead modifiye simpleks yönteminin RSM'den daha avantajlı olduğu ileri sürülebilir.

5. 2. Öneriler

Bu çalışma sonucunda elde edilen verilere dayanarak sonraki çalışmalarda dikkate alınabilecek bazı öneriler aşağıda verilmektedir.

Dolgu faktörünün artması ile bu ortamların mıknatıslanma özellikleri de iyileşmektedir. Düşük derişimli ve mikron boyutlu manyetik karışımlar içeren süspansiyonların etkin temizlenmesi için fitre matrisi daha düşük gözenekliliğe sahip olan (ε=0,4-0,6) dolgulu yataklardan oluşturulmalıdır. Bunun için filtre matris eleman türü ve boyutu değiştirilerek dolgulu yatak gözenekliliği ayarlanabilir.

Nispeten düşük mıknatıslanma özelliklerine sahip olmalarına rağmen pratik uygulamalarda ferromanyetik tel veya talaşlardan oluşturulmuş dış manyetik alanda kolaylıkla mıknatıslanabilen dolgulu yatak elemanlarının kullanılması daha ekonomik olabilir ve böylece atık olarak talaşların değerlendirilmesi sağlanabilir.

Manyetik dolgu elemanlarının paslanması veya aşınmasını önlemek için bu elemanların yüzeyleri non-manyetik ince kaplama katıyla kaplanabilir. Ancak bu durumda dolgulu yatağın mıknatıslanma özelliği azalır ve kuruluş maliyeti artar.

Elektromanyetik filtrelerde, elektrik sarfiyatını azaltmak için matris elemanları sabit mıknatıslardan yapılabilir. Ancak, bu durumda filtre rejenerasyonu zorlaşmaktadır. Bu nedenle filtre matris elemanları olarak dış manyetik alanda kolaylıkla mıknatıslanabilen ferromanyetik granüllerin kullanılması öngörülmektedir.

Çevrimli elektromanyetik filtrasyon işlemi ile daha kısa filtre ve daha az sayıda filtre matris elemanı ile çevrimsiz koşullarda yapılan elektromanyetik filtrasyon işlemi kadar yüksek kalite faktörü elde edilebilir. Bu şekilde çevrimli elektromanyetik filtrasyon ile manyetik ayırma işlemi daha ekonomik yapılabilir.

Genel geçerliği olan bir matematiksel modelin bulunması durumda modifiye simpleks yönteminde, yanıt için deney yapılması yerine modelden yanıt hesaplanarak program uygulanırsa genetik algoritma ve tavlama benzetimindeki gibi deneye gerek kalmadan ve çok kısa sürede optimuma ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

[1] H. Yalçın, M. Gürü, *Su teknolojisi*, Palme Yayıncılık, Ankara, 2002

[2] T. Abbasov, *Elektromanyetik Filtreleme İşlemleri*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2002.

[3] M. Song, S. Kim, K. Lee, *Development of a Magnetic Filter System Using Permanent Magnets for Separating Radioactive Corrosion Products from Nuclear Power Plants*, **Separation Science and Technology,** 39 (2005) 5, 1037 – 1057.

[4] İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi (İBTAM), İçme Suyu Analiz Raporu, Malatya, 2009

[5] J. H. P. Watson, I. Younas, *Superconductivity Discs As Permanent Magnet for Magnetic Seperation,* **Materials Science and Engineering**, Vol. 53 (1998) 220-224.

[6] T. Abbasov, A. S. Altunbaş, *Determination of the Particle Capture Radıus in Magnetic Fılters with Velocity Distribution Profile in Pores,* **Separation Science and Technology,** 37 (2002) 9, 2037-2053.

[7] İ. Sarıtaş, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2009.

[8] J. A. Oberteuffer, *Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications*, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. MAG-10, No. 2 (1974) 223-238.

[9] M. Stolarki, B. Fuchs, S. B. Kassa, C. Eichholz, H. Nirsch, *Magnetic Field Enhaced Press-Filtration*, **Chemical Engineering Science**, Vol. 61, 2006.

[10] A. V. Sandulyak, *Magnetic filtration of liquids and gases*, Ximiya: Moscow,1988.

[11] C. Latour, H. Kolm, *Magnetic Separation in Water Pollution Control–II*, **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol.01. Mag-11, No. 5, 1975.

[12] S. E. Khalatalla, *Magnetic Separation of the Second Kind: Magnetogravimetric, Magnetohydrostatic and Magnetohydrodynamic Separations*, **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. Mag-12, No.5 (1976) *455-46.*

[13] T. Hartikainen, J. P. Nikkanen, R. Mikkonen, *Magnetic Separation of Industrial Waste Waters as an Environmental Application of Superconductivity*, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol. 15, No. 2 (2005) 2336-2339.

[14] P. Alizade, T. Abbasov, A. Nayır. *Akışkan Ortamların Elektromanyetik Filtrelerle Temizlenmesi*, **Çev Kor Dergisi,** 7 (1997) 25, 17-18.

[15] T. Abbasov, K. Ceylan, *Filter Performance and Velocity Distribution Relation in Magnetic Filtration of Non-Newtonian Liquids,* **Separation Science and Technology,** 34:11, (1999) 2177-2189,.

[16] T. Abbasov, S. Herdem, M. Köksal, *Performance of High Gradient Magnetic Filters with Granular Matrix*, **Separation Science and Technology**, 34:2 (1999) 263-276.

[17] T. Abbasov, M. Koksal, S. Herdem, *Theory of High-Gradient Magnetic Filter Performance*, **IEEE Transactions on Magnetics,** 35:4 (1999) 2128-2132.

[18] S. Herdem, T. Abbasov, M. Köksal, *Filtration model of high gradient magnetic filters with granular matrix*, **Powder Technology**, 106:3 (1999) 176–182.

[19] T. Abbasov, *Theoretical interpretation of the filtration process in magnetized packed beds*, **Powder Technology**, 115 (2001) 215–220.

[20] A. D. Ebner, J. A. Ritter, *New correlation for the capture cross section in high gradient magnetic separation*, **AIChE J.,** *47*:2 (2001) 1303–313.

[21] T. Abbasov, B. Rüzgar, *Yüksek Gradyanlı Alanlarda Manyetik Taşıyıcıların Hedeflendirilmesi Yöntemi,* Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, 2005.
[22] İ. Sarıtaş, İ. A. Özkan, S. Herdem, Manyetik Filtrenin Bulanık Mantık Yöntemiyle Kontrolü, 12. Elektrik Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı, Eskişehir (2007) 609-612.
[23] İ. A. Özkan, İ. Sarıtaş, S. Herdem, Manyetik Filtreleme İşleminin ANFIS ile Modellenmesi, 12. Elektrik Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı, Eskişehir (2007), 415-418.
[24] T. Abbasov, *Magnetic Filtration with Magnetized Granular Beds Basic Principles and Filter Performance,* **China Particuology**, 5 (2007) 71–83.
[25] Z. Yıldız, T. Abbasov, E. Şener, *Mıknatıslanmış Dolgulu Yatakların Manyetik ve Hidrodinamik Özelliklerinin İncelenmesi,* 8. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Malatya, 2008.
[26] T. Karadağ, Z. Yıldız, T. Abbasov, *A.* Sarımeşeli, *Estimation of Magnetization Properties of the* Ferromagnetic Polly Granular Beds, **J Dispersion Science Technology**, 31:6 (2010) 826-830.
[27] H. H. Kolm, *Research Needs in Magnetic Seperation*, **IEEE Transactıons on Magnetics,** Vol. MAG-12, No.5 (1976) 450-454.
[28] C. H. Gooding, T. W. Sigmon, L. K. Monteith, D. C. Drehmel, *Application and Modeling of High Gradient Magnetic Filtration in a Particulate/Gas System,* **IEEE Transactıons on Magnetics**, Vol. MAG-14, No. 5 (1978) 407-409.
[29] H. K. Collan, M.A. Kokkala, O.E. Toikka, *Applicatıon of the Theory of Magnetic Filtration in Determining the Optimum Filter Configuration,* **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. MAG-18, No.3 (1982) 827-837.
[30] M. Takayasu, J. Hwang, F. J. Friedlaender, L. Petrakis, R. Geber, *Magnetic Separation Utilizing a Magnetic Susceptibility Gradient,* **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. MAG-20, No. 1(1984) *155-159.*
[31] K. O. Grady et al. *Magnetic Filtration of Ferrofluids,* **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 27. No. 6 (1986) 1134-1136.
[32] M. F. Haque, S. Arajs, and C. Moyer, *Experimental Studies in Magnetic Separation of Ultrafine Hematite,* **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. 24, No. 6 (1988) 2413-2415.
[33] B. B. Emary, *Magnetic Filtration of Power Reactor Radioactive Waste Water,* **Magnetics Conference, Digests of INTERMAG '89,** (1989) , GD1 - GD1.
[34] R. Geber, J. Bohem, *Open Gradient Magnetic Separation in Vacuum,* **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. 27, No. 6 (1991) 5378-5380.
[35] H. K. Collan, M. Valo, *Magnetic Filtration of Sub-μm Size Radioactive Austenitic Steel Particles Suspended in Water*, **Magnetics Conference, Digests of INTERMAG '93.,** (1993) FP03-FP03.
[36] Z. Li, J. H. P. Watson, *Vortex Magnetic Separation (VMS),* **IEEE Transactions on Magnetics,** Vol. 30. No. 6 (1994) 4662-4664.
[37] M. Franzreb, P. Kampers, M. Franz, S. H. Eberle, *Use of Magnet Technology for Phosphate Elimination from Municipal Sewage,* **Acta hydrokhim. hydrobiol.,** 26 (1998) 4, 213-217.

[38] Z. Xi, F. Su, W. Forsling, *Surface Characteristics of Magnetite in Aqueous Suspension,* **Journal of Kolloid and Interface Science**, Vol. 197, No.1, (1998) 151-159.
[39] M. Franz, M. Franzreb, *Determination of the capture radii of magnetite bearing hydroxide flocs in magnetic filtration,* **IEEE Transactions on Magnetics,** 34 (1998) 3902–3909
[40] G. Gıllet, F. Dıot, M. Lenoır, *Removal of Heavy Metal Ions by Superconducting Magnetic Separation,* **Separation Science And Technology,** 34:10 (1999) 2023–2037.
[41] S. Prakasha, B. Dasa, R. Venugopal, *Magnetic Separation of Calcite Using Selective Magnetite Coating,* **Magnetic and Electrical Separation,** 10 (1999) 1-19
[42] M. Takayasu, D. R. Kolland, J. V. Minervini, *Continuous Magnetic Separation of Blood Components from Whole Blood,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 10:1(2000).
[43] M. Franzreb, W. H. Holl, *Phosphate Removal by High-Gradient Magnetic Filtration Using Permanent Magnets*, **IEEE Transactions on Magnetics,** 10:1(2000).
[44] H. Kumakura, T. Ohara, H. Kitaguchi, K. Togano, H. Wada, H. Mukai, K. Ohmatsu, H. Takei and H. Okada, *Development of Bi-2223 Magnetic Separation System,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 11:1 (2001) 2519-2522.
[45] G. B. Cotten, H. B. Eldredge, *Nanolevel Magnetic Separation Model Considering Flow Limitations,* **Separation Science and Technology,** 37 (2002), 3755-3779.
[46] N. Karapınar, *Magnetic separation of ferrihydrite from wastewater by magnetic seeding and high-gradient magnetic separation*, **Int. J. Miner. Process.** 71 (2003) 45.
[47] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujine, A. Chiba, K. Noto, *Solid-Liquid Magnetic Separation Using Bulk Superconducting Magnets,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 13:2 (2003) 1592-1595.
[48] N. Karapinar, *Atık Su Arıtımında Manyetik Aşılama Tekniği Kullanılarak Fosfatın Atık Sulardan Uzaklaştırılması,* **Madencilik,** 42:2 (2003)19-26
[49] A. Künkül, T. Abbasov, *Removal of Corrosion Products From Viscous Aqueous Suspensions By Magnetic Filtration,* **Powder Technology,** 149 (2004) 23-28.
[50] S. Sato, K. Mitsuhashi, T. Ohara, *Effect of Zeta Potential of Particles Dispersed in an Aqueous Solution on Magnetic Filtration Efficiency.* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 14 (2004) 2.
[51] A. D. Ebner, J. A. Ritter, *Retention of Iron Oxide Particles by Stainless Steel and Magnetite Magnetic Matrix Elements in High-Gradient Magnetic Separation,* **Separation Science and Technology**, Vol. 39, 12 (2004), 2863 – 2890.
[52] A. Künkül, A. Ekmekyapar, C. Akmil, T. Abbasov, *Effect of Operating Parameters on Magnetic Filtration Processes,* **Ind. Eng. Chem. Res.** 43(2004) 161-165.
[53] J. Svoboda, *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials,* Kluwer Acdemic Publishers, USA, 2004.
[54] H. Okada, K. Mitsuhashi, T. Ohara, E. R. Whitby, H. Wada, *Computational Fluid Dynamics Simulation of High Gradient Magnetic Separation,* **Separation Science and Technology**, 40 (2005), 1567–1584.
[55] S. Nishijima, S. Takeda, *Superconducting High Gradient Magnetic Separation for Purification of Wastewater From Paper Factory,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 16:2 (2006) 1142-1145.

[56] C. Tsouris, J. Noonan, T. Ying, S. Yiacoumi, *Surfactant effects on the mechanism of particle capture in high-gradient magnetic filtration*, **Separation and Purification Technology**, 51 (2006) 201–209.
[57] H. Okada, H. Okuyama, M. Uda, N. Hirota, *Removal of Aerosol by Magnetic Separation,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 16:2, (2006)
[58] N. A. Ebner, C. S. G. Gomes, T. J. Hobley, O. R. T. Thomas, M. Franzreb, *Filter Capacity Predictions for the Capture of Magnetic Microparticles by High-Gradient Magnetic Separation,* **IEEE Transactıons on Magnetics,** 43:5(2007) 1941-1949.
[59] F. Mishimo, S. Takeda, M. Fukushima, S. Nishijima, *A superconducting magnetic separation system of ferromagnetic fine particles from a viscous fluid,* **Physica C,** 463:465(2007) 1302-1305.
[60] A. Alvaro, J. M. Rodr´ıguez, P. A. Augusto, A. M. Est´evez, *Magnetic filtration of an iron oxide aerosol by means of magnetizable grates,* **China Particuology**, 5 (2007) 140–144.
[61] A. Mayer, S. Berensmeier, M. Franzreb, *Direct capture of lactoferrin from whey using magnetic micro-ion exchangers in combination with high-gradient magnetic separation,* **Reactive & Functional Polimers,** 67 (2007) 1577-1588.
[62] T. H. H. Trinh, B. Wessely, F. Babick, S. Ripperger, *Test on the magnetic separation of finest particles from fluids, Part I: The separation of paramagnetic particles for magnet-activated cell separation,* **F&S Internatinal Editon,** 7(2007)
[63] T. H. H. Trinh, B. Wessely, F. Babick, S. Ripperger, *Test on the magnetic separation of finest particles from fluids, Part II: Separation of microorganisms with adhering paramgnetic particles in the magnetic field,* **F&S Internatinal Editon**, 7(2007).
[64] Z. V. P. Murthy, C. Nancy, A. Kant*, Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation,* **Separation Science and Technology,** 42 (2007), 819 – 833.
[65] D. Norrgan, *Magnetic filtration: Producing fine high-purity feedstocks,* **Filtration&Separation,** 2008.
[66] Z. Yıldız, A. Sarımeşeli, *Elektromanyetik Filtrasyon Üzerine Viskozite ve Dış Manyetik Alanın Etkisi,* 8. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Malatya, 2008.
[67] F. Mishima, T. Terada, T. Ohnishi, K. Iino, H. Ueda, S. Nishijima, *High-Speed Magnetic Filtration System Using HTS Bulk Magnet for Used Wash Water of Drum,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 19:2 (2009) 2165 – 2168.
[68] A. Eskandarpour, K. Iwai, S. Asai, *Superconducting Magnetic Filter: Performance, Recovery and Design,* **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 19:2 (2009) 84 - 95.
[69] F. Köksal, *Elektromanyetizma*, 19 Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, 1990.
[70] H. Köroğlu, *Elektrik ve manyetizma*, Fen yayınevi, Ankara, 1978.
[71] M. E. Evans, F. Heller, *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetism*, Academic press, UK, 1986.
[72] D. Karaboğa, *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Atlas Yayıncılık, İstanbul, Mayıs 2004.
[73] Ç. Elmas, *Yapay Zeka Uygulamaları,* Şeçkin, Ankara, 2007.
[74] İ. Akça, *Elektrik Verilerinin Lamarckian Genetik Algoritma ile Ters-Çözümü*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2005.

[75] T. F. Edgar, D. M. Himmelblau, *Optimization of chemical processes*, McGraw-Hill Press, 1989.
[76] E. Şener, *İki kutuplu Dolgulu Kolon Reaktöründe Kobalt(III) Asetat Elektrosentezinin Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Malatya, 1988.
[77] B. Altunkaynak, A. Esin, *Doğrusal Olmayan Regrasyonda Parametre Tahmini İçin Genetik Algoritma Yöntemi,* **G. Ü.-Fen Bil. Derg.** 17(2):43-51, 2004.
[78] M. L. Salit, *Development of a multielement AAS system and extension of simplex optimization to multiresponse situations*, Arizona State University, Doktora tezi, 1986.
[79] F. H. Walters, S. L. Morgan, L. R. Parker, S. N. Deming, *Sequential simplex optimization*, CRC Press LLC, 2000.
[80] S. L. Morgan, *Simplex optimization and experimental design in the development of analytical chemical methods*, Emory University, Doktora tezi, 1975.
[81] A. Lopez-Molinero, R. Sanz, D. Sipiera, J. R. Castillo, *Proposal and Evaluation of New Variations to the Modified Simplex Method,* **Analytical Letters**, 36:10 (2003) 2337–2353.
[82] R. Chelouah, P. Siarry, *Genetic and Nelder–Mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multiminima functions,* **European Journal of Operational Research,** 148 (2003)335-348
[83] E. Şener, A. E. Karagözler, A. T. Pekel, *Simplex optimization of reaction variables in the production of cobalt (III) acetate in a bipolar packed-bed reactor,* **Analytica Chimica Acta**, Vol. 335, Issues 1-2 (1996) 35-40.
[84] R. Chelouah, P. Siarry, *A hybrid method combining continuous tabu search and Nelder–Mead simplex algorithms for the global optimization of multiminima functions*, **European Journal of Operational Research,** 161 (2005) 636-654.
[85] P. Hedlunda, A. Gustavsson, *Design and evaluation of an improved simplex method,* **Analytica Chimica Acta,** 371 (1998) 9-21.
[86] J. A. M. Pulgarın, A. A. Molina, M. T. A. Pardo, *The use of modified simplex method to optimize the room temperature phosphorescence variables in the determination of an antihypertensive drug*, **Talanta**, 57 (2002) 795–805.
[87] A. T. Bayraktar, C. Porte, A. Delacroix, C. M. Moreno, *Catalytic oxidation of sodium sulfite in a gas–liquid tubular ejector: optimization of the operational conditions by Simplex method*, **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,** 65 (2003) 113-117.
[88] L. Han, M. Neumann, J. Xu, *On the roots of certain polynomials arising from the analysis of the Nelder–Mead simplex method*, **Linear Algebra and its Applications,** 363 (2003) 109-124.
[89] J. Siemek, J. Stopa, *Optimisation of the wells placement in gas reservoirs using sımplex method,* **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 54 (2006) 164–172
[90] P. Hedlund, A. Gustavsson, *Design and evaluation of an effective modified simplex method,* **Analytica Chimica Acta,** 391 (1999) 257-267
[91] M. Pohanka, K. A. Woodbury, *A Downhill Simplex Method for computation of Interfacial Heat Transfer Coefficients in Alloy Casting,* **Inverse Problems in Engng,** 11: 5 (2003) 409-424

[92] U. Norinder, *Support vector machine models in drug design: applications to drug transport processes and QSAR using simplex optimisations and variable selection,* **Neurocomputing**, 55 (2003) 337-346

[93] C. Vannecke, A. N. M. Nguyet, M. S. Bloomfield, A.J. Staple, Y. V. Heyden, D. L. Massart, *Development and optimisation of a flow injection assay for fluticasone propionate using an asymmetrical design and the variable-size simplex algorithm,* **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, 23 (2000) 291-306.

[94] J. A. M. Pulgarın, A. A. Molina, M. T. A. Pardo, *Simplex optimization and kinetic determination of nabumetone in pharmaceutical preparations by micellar-stabilized room temperature phosphorescence,* **Analytica Chimica Acta,** 528 (2005) 77-82.

[95] F. Momenbeik, Z. Momeni, J. H. Khorasani, *Separation and determination of Vitamins E and A in multivitamin syrup using micellar liquid chromatography and simplex optimization,* **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, 37 (2005) 383-387.

[96] J. A. M. Pulgarın, A. A. Molina, M. T. A. Pardo, *Simplex optimization of the variables a Vecting the micelle-stabilized room temperature phosphorescence of 6-methoxy-2-naphthylacetic acid and its kinetic determination in human urine,* **Analytical Biochemistry,** 339 (2005) 157-164.

[97] Y. Wang, T. Han, Z. Xu, G. Bao, T. Zhu, *Optimization of phosphorus removal from secondary effluent using simplex method in Tianjin, China,* **Journal of Hazardous Materials,** B121 (2005) 183-186.

[98] B. Ustun, W. J. Melssen, M. Oudenhuijzen, L. M. C. Buydens, *Determination of optimal support vector regression parameters by genetic algorithms and simplex optimization*, **Analytica Chimica Acta**, 544 (2005) 292-305.

[99] P. Barry Ryan, R. L. Barr, H. D. Todd, *Simplex Techniques for Nonlinear Optimization,* **Anal. Chem.,** 52(1980)1460-1467.

[100] M. W. Routh, P. A. Swartz, M. B. Denton, *Performance of the Super Modified Simplex*, **Analytıcal Chemistry**, 49: 9 (1977).

[101] J. Dahlen, S. Eckardstein, *Development of a capillary zone electrophoresis method including a factorial design and simplex optimisation for analysis of amphetamine, amphetamin analogues, cocaine, and heroin,* **Forensic Science International,** 157 (2006) 93-105

[102] S. Dragovic, A. Onjia, G. Bacic, *Simplex optimization of artificial neural networks for the prediction of minimum detectable activity in gamma-ray spectrometry,* **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, 564 (2006) 308-314

[103] G. Cernivec, J. Krc, F. Smole, M. Topic, *Band-gap engineering in CIGS solar cells using Nelder–Mead simplex optimization algorithm*, **Thin Solid Films**, 511- 512 (2006) 60–65

[104] S. Kai, S. Fan, E. Zahara, *A hybrid simplex search and particle swarm optimization for unconstrained optimization,* **European Journal of Operational Research,** 181 (2007) 527-548

[105] S. H. Oh, B. C. Lee, *Development of an Efficient Algorithm for Global Optimization by Simplex Elimination*, **Engineering Optimization**, 35:6, (2003) 607-625

[106] J. Yang, F. Lee, S. Shou, *Simplex Optimization of PCA-Based Infrared Expert Systems,* **Anal. Chem.**, 71 (1999) 960-967

[107] V. Toğan, A. Daloğlu, *Genetik Algoritma ile Üç Boyutlu Kafes Sistemlerin Şekil ve Boyut Optimizasyonu*, **IMO Teknik Dergi**, (2006) 3809-3825.

[108] P. Turgut, A. Arslan, *Sürekli bir kirişte maksimum momentlerin genetik algoritmalar ile belirlenmesi,* **DEÜ mühendislik fakültesi fen ve mühendislik dergisi,** 3:3 (2001)1-9.
[109] G. G. Emel, Ç. Taşkın, *Genetik Algoritma ve Uygulama Alanları*, **Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi,** 21:1 (2002) 129-152.
[110] M. E. Uçaner, O. N. Özdemir, *Genetik Algoritmalar ile İçme Suyu Şebekelerinde Klorlama Optimizasyonu,* **Gazi Üniv. Müh. Fak. Der**., 17:4, (2002)157-170.
[111] H. Güden, B. Vakvak, B. E. Özkan, F. Altınparmak, B. Dengiz, *Genel Amaçlı Arama Algoritmaları İle Benzetim Eniyilemesi*, **En İyi Kanban Sayısının Bulunması, Endüstri Mühendisliği Dergisi**, 16:1, 2-15.
[112] V. Yiğit, O. Türkbey, *Tesis Yerleşim Problemlerine Sezgisel Metotlarla Yaklaşım,* **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der**., 18:4 (2003) 45-56.
[113] A. Kalınlı, N. Karaboğa, *Benzetilmiş Tavlama Algoritması Kullanılarak Yüksek Dereceden IIR Filtrelerin Tasarlanması,* **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 20:1-2 (2004) 20-27.
[114] O. F. Genceli, *Ölçme Tekniği,* Birsen Yayınevi, 1998.
[115] A. Uyanık, *Analitik Kimyacılar İçin İstatistik ve Kemometri*, İlke Yayınevi, 2008.
[116] A. Sözak, *Uncertainty Analysis of Coordinate Measuring Machine (CMM) Measurements,* ODTÜ, Doktora Tezi, 2007.
[117] Final Report and Recommendations to the 25th ITTC, *The Specialist Committee on Uncertainty Analysis,* Proceedings of 25th ITTC – Volume II, Fukuko, 2008.
[118] A. Baysar, *Microwave Heating Applications of Fluidized Beds: High Purity Silicon Production,* Arizona State University, Doktora tezi, 1992.
[119] H. Erkut, *Kolloid Kimya*, İstanbul Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1984.

EK-1. BAŞLANGIÇ SİMPLEKSİ İÇİN KATSAYILAR ÇİZELGESİ

Nk									
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0
0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.866	0	0
0.204	0.204	0.204	0.204	0.204	0.817	0	0	0
0.158	0.158	0.158	0.158	0.791	0	0	0	0
0.129	0.129	0.129	0.129	0	0	0	0	0
0.109	0.109	0.109	0.764	0	0	0	0	0
0.094	0.094	0.756	0	0	0	0	0	0
0.083	0.75	0	0	0	0	0	0	0
0.075	0.745	0	0	0	0	0	0	0
0.742	0	0	0	0	0	0	0	0

EK-2. SİMPLEKS OPTİMİZASYON PROGRAMI

```
%%%% GİRİŞ VERİLERİ%%%%%%%%

İAB: İlk adım büyüklüğü
İAB=input

EK: Konum değiştirme
EK=input

İAB=0.2;

EK=0.5;

k=4 etken düzeyleri

Optimize edilecek etkenler: d, L, H, Vf

d: Filtre matris elemanının çapı (m)

L: Filtre uzunluğu (m)

H: Dış manyetik alan şiddeti (A/m)

Vf: Filtreleme hızı (m/s)

Data

kj: Orijinal etken düzeyi

      kj: [d, L, H, Vf]

kjmin: Etken düzeyinin alt sınırı

      kjmin=[4.75x10^-3; 1x10^-2; 30x10^3; 5x10^-2];

kjmax: Etken düzeyinin üst sınırı

      kjmax=[14 x10^-3; 10 x10^-2; 150 x10; 2x10^-1];


%%%% BAŞLANGIÇ SİMPLEKSİ %%%%%%%%%%%%%


i: Etken düzeyi (k)
for i=1:4
    j: Etken düzeyi (k+1)

    for j=1:5

        Nk(i,j): Normalize edilmiş etken düzeyi

        k(j,i): Etken düzeylerini hesaplamada kullanılan bağıntı

    k(j,i)=kjmin(i)+(Nk(j,i)*IAB+EK)*(kjmax(i)-kjmin(i));

    end
```

```
end
k=kt';

%%%%%İLK SİMPLEKSİN NORMALİZE EDİLMİŞ DEĞERLERİ%%%%

kn=k(1:5,:)
NORMALİZE ET
for il=1:7
kn(il,:): Normalize edilmiş orijinal etken düzeyleri
 kn(il,:)=(k(il,:)-min(k))./(max(k)-min(k))
    end
end

%%%%% SİMPLEKS İLERLEME %%%%%%%%

Yanıt01: ψ
      ψ=    ——
      ψ = Elektromanyetik filtrasyon kalite faktörü
      Ci = giriş konsantrasyonundaki toplam demir miktarı (mg/L)
            Ci: 11.42 mg/L
      Co = çıkış konsantrasyonundaki toplam demir miktarı (mg/L)
Co: yanıt1
ψ=(11.42- Co)/11.42
ann=uzunluk(Co);
yanıt= Co (1:ann)
Sonuc=[Dn yanıt];
eiek: Yanıtların en iyiden en kötüye doğru olan sıralaması
[eiek]=sortrows(Sonuç, uzunluk (Sonuç))
ann1=length(eiek)
Yb: En iyi yanıta sahip köşe
Yb =eiek(j,1:ann1);
Yb=ei
```

```
Yw: En kötü yanıta sahip köşe

Yw =eiek(1,1:ann1);

Yw=ek

Yn: En kötü 2. yanıta sahip köşe

Yn =eiek(2,1:ann1);

Yn=ek2

 : Köşelerin orta noktası

 =mean(Sonuc);

fark0=( - Yw);

fark1=( - Yw)/2;

Yr: En kötü köşenin yansıtımı

Ye: En kötü köşenin genişletimi

    Yey=Ye(:,ann1)

Ycr: pozitif daralma

 Ycry=Ycr(:,ann1)

 Ycw: Negatif daralma

Ycwy=Ycw(:,ann1)

Yry=Yr(:,ann1)

Yby=Yb(:,ann1)

Ywy=Yw(:,ann1)

Yny=Yn(:,ann1)

%%%%%KIYASLAMA%%%%%%%%%


Yb=ei
Yw=ek

Yn=ek2

pause

Ye=Yr+( -Yw);

Ycr= +((1/2)*( -Yw));

Ycw= -((1/2)*(  -Yw));
```

```
Yr= +( - Yw);
 Pause
YanitYr=input('değeri gir... :')
Yry=YanitYr;
Yry=Yr(:,ann1)
Yby=Yb(:,ann1)
Ywy=Yw(:,ann1)
Yny=Yn(:,ann1)
 DENORMALİZE ET
Ycr= +((1/2)*( -Yw));
Ycw= -((1/2)*(  -Yw));
Ycwy=Ycw(:,7)
Ycry=Ycr(:,7)
 Ye
 Yw
 Yr
if Yry>Yby
   disp('Yr>Yb bulundu')
   Ye=Yr+( -Yw);
   pause
   YanitYe=input('değeri gir... :')
Yey=YanitYe;
          Pause
if Yey>Yry
   disp('Ye>Yr bulundu')
   Yw=Ye
   Pause
   if abs(  (:,ann1)-Yw(length(Yw)))<10
       break
   else
```

```
       hesap2
   end
   hesap2
   disp('ss hesapla ve dur')
   break
else
    disp('Ye<Yr bulundu')
    Yw=Yr
    disp('ss hesapla ve dur')
    break
end
else
    disp('Yr<Yb bulundu')
if Yry>Yny
    disp('Yr>Yn bulundu')
    Yw=Yr
    hesap2
    disp('ss hesapla ve dur')
    break
else
    disp('Yr<Yn bulundu')
if Yry>Ywy
    disp('Yr>Yw bulundu')
    Ycr= +((1/2)*( -Yw));
    Ycry=Ycr(:,ann1)
if Ycry>Yny
   disp('Ycr>Yn bulundu')
   Yw=Ycr
else
   disp('Ycr<Yn bulundu')
```

```
   Yw=Ycr
   hesap3
   Ryi Nden hesapla
   2
end
else
disp('Yr<Yw bulundu')
Ycw= -((1/2)*(  -Yw));
Ycwy=Ycw(:,ann1)
if Ycwy>Yny
disp('Ycw>Yn bulundu')
disp('W yerine Cw alindi')
Yw=Ycw
hesap2
else
disp('Ycw<Yn bulundu')
Yw=Ycw
Yr=Yn
hesap3
Ryi Nden hesapla 2
end
end
end
end
```

ÖZGEÇMİŞ

Zehra Yıldız, 19 Ekim 1978 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğretimini İzmir'de tamamladı. İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Lisans programından 2000 yılında ve Yüksek Lisans programından ise 2004 yılında mezun oldu. 2004 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı'nda doktora programına başlamış olup, aynı yıl içerisinde İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. SCI kapsamındaki çeşitli dergilerde altı tane makalesi bulunmaktadır.