



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FARKLI DÜZLEMSEL BOBİN TİPLERİNDE
KALİTE FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ
İÇİN OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Rümeysa COŞDU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Rümeysa COŞDU tarafından hazırlanan “Farklı Düzlemsel Bobin Tiplerinde Kalite Faktörünün İyileştirilmesi İçin Optimizasyon Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi” adlı tez çalışması 27/09/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Hasan Erdiñç KOÇER

Danışman

Prof. Dr. İlhan İLHAN

Üye

Doç Dr. Hüseyin HAKLI

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

FBE Müdürü
Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Rümeysa COŞDU

27/09/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI DÜZLEMSEL BOBİN TİPLERİNDE KALİTE FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Rümeysa COŞDU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Prof. Dr. İlhan İLHAN
Doç. Dr. Emrehan YAVŞAN

2024, 77 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. İlhan İLHAN
Prof. Dr. Hasan Erdiç KOÇER
Doç. Dr. Hüseyin HAKLI

Nikola Tesla ile başlayan kablosuz güç transferi araştırmaları temelde iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar yakın alan ve uzak alan güç transferi teknolojileridir. Uzak alan enerji transferi yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayınımları ile gerçekleşmektedir ve uzak mesafelere enerji transferi için uygun bulunmaktadır. Ancak uzak alan teknolojisi 10 MHz ve üzeri frekanslarında çalışacak güç elektroniği devre teknolojileri gerektirdiğinden pahalı ve verimi düşük olarak nitelendirilmektedir. Buna karşın yakın alan güç transferi, çok kısa mesafelerde ve düşük frekanslarda endüktif kuplaj yoluyla gerçekleşmektedir. Bu teknoloji nispeten daha verimli ve düşük maliyetli olduğundan kablosuz şarj uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir. Kablosuz şarj uygulamalarında tercih edilen bu teknolojiye düzlemsel bobinler kullanılmaktadır. Özellikle güç elektroniği devresi ve kuplajlı sargıların optimum tasarımı oldukça önemlidir. Düzlemsel bobinlerin tasarımında temelde maksimum olması beklenen kalite faktörü parametresi bobinde biriken enerji ile bobin tarafından kaybedilen enerjinin oranı olarak ifade edilmektedir. Kalite faktörünün maksimum olması güç aktarım verimliliğini doğrudan etkilediğinden tasarım noktasında dikkate alınması gereken temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada farklı geometrik tasarımlara sahip düzlemsel bobinlerin maksimum kalite faktörüne sahip olması için bobinlerin tasarım geometrisini etkileyen anahtar parametrelerin optimum değerlerini hesaplayan optimizasyon algoritmalarının başarı oranları incelenmiştir. Önerilen optimizasyon algoritmaları için çeşitli geometrideki düzlemsel bobinler üzerinden bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu ile, anahtar tasarım parametrelerinin sınırlarına ve bağımlı-bağımsız parametrelerine karar verilmiştir. Kare, dairesel ve çokgen şekillerdeki bobinler için kalite faktörleri parçacık sürü optimizasyon algoritması, genetik algoritma ve gri

kurt optimizasyon algoritması kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar açık kaynak olarak sunulan hesaplama araçları üzerinden doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler Düzlemsel bobin, geometri optimizasyonu, güç iletim verimliliği, indüktans, kalite faktörü, tasarım optimizasyonu



ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE EVALUATION OF OPTIMIZATION ALGORITHMS FOR IMPROVEMENT OF QUALITY FACTOR IN DIFFERENT PLANAR COIL TYPES

Rümeysa COŞDU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHATRONICS ENGINEERING**

Advisor:

**Prof. Dr. İlhan İLHAN
Assoc. Prof. Dr. Emrehan YAVŞAN**

2024, 77 Pages

Jury

**Prof. Dr. İlhan İLHAN
Prof. Dr. Hasan Erdiñ KOÇER
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin HAKLI**

Research on wireless power transfer, initiated by Nikola Tesla, is fundamentally divided into two main categories: near-field and far-field power transfer technologies. Far-field energy transfer occurs through the propagation of electromagnetic waves at high frequencies and is deemed suitable for long-distance energy transfer. However, far-field technology, which operates at frequencies of 10 MHz and above, requires power electronics circuitry that is expensive and considered to have low efficiency. In contrast, near-field power transfer occurs through inductive coupling at very short distances and low frequencies. This technology is relatively more efficient and cost-effective, making it especially preferred in wireless charging applications. Planar coils are used in this technology, which is favored in wireless charging applications. The optimal design of the power electronics circuitry and coupled coils is particularly important. In the design of planar coils, the quality factor parameter, which is expected to be maximized, is expressed as the ratio of the energy stored in the coil to the energy lost by the coil. Since maximizing the quality factor directly impacts power transfer efficiency, it is considered one of the key parameters to be taken into account during the design process. In this study, the success rates of optimization algorithms that calculate the optimum values of key parameters affecting the design geometry of coils for planar coils with different geometric designs to have maximum quality factors were investigated. An objective function was created for the proposed optimization algorithms over planar coils with various geometries. With the objective function, the limits of key design parameters and their dependent-independent parameters were determined. Quality factors for coils with square, circular and polygonal shapes were calculated separately

using particle swarm optimization algorithm, genetic algorithm and gray wolf optimization algorithm and the obtained results were verified through open-source computational tools.

Keywords: Design optimization, geometric optimization, inductance, planar coil, power transmission efficiency, quality factor



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi birikimlerini ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. İlhan İLHAN ve ikinci danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Emrehan YAVŞAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Onların rehberliği ve teşvikleri, bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösterici olmuştur.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim. Onların sevgisi, sabrı ve teşviki, bu yolculukta bana güç vermiştir. Anneme, babama ve kardeşlerime, gösterdikleri anlayış ve destek için minnettarım.

Bu süreçte yanımda olan ve moral desteğini esirgemeyen yakın dostlarım ve erkek arkadaşım da özel bir teşekkür etmek isterim. Onların desteği ve motivasyonu, zorlu zamanlarda bana güç katmış ve çalışmalarımı sürdürmemde büyük bir etken olmuştur.

Rümeysa COŞDU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	iv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kablosuz Güç İletimi	1
1.2. Düzlemsel Bobinler ve Kalite Faktörünün Önemi	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Kablosuz Güç İletim Teknolojisi: Modern Teknolojinin Temassız Enerji Transferi	4
2.1.1. Kablosuz Güç İletimi Tarihçesi	5
2.1.2 Kablosuz Güç İletimi Uygulama Alanları	5
2.1.3. Elektromanyetik Uyumluluk Ölçütleri	7
2.2. Kablosuz Güç İletiminde Kullanılan Bobinler	8
2.3. Düzlemsel Bobinlerde Maksimum Enerji Verimliliği ve Kalite Faktörü.....	10
2.4. Kalite Faktörüne Etki Eden Tasarım Parametreleri.....	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. Düzlemsel Bobin Geometrileri ve İndüktans.....	16
3.1.1. Düzlemsel Kare Bobin.....	17
3.1.2. Düzlemsel Dairesel Bobin	18
3.1.3. Düzlemsel Altıgen Bobin	19
3.1.4. Düzlemsel Sekizgen Bobin.....	20
3.2. Bobin Çalışma Frekansı.....	20
3.3. Parazitik Direnç	22
3.4. Kapasitans	23
3.5. Tasarım Parametreleri.....	26
3.5.1 Düzlemsel Bobin Dış Çapı (d_{out})	26

3.5.2 Düzlemsel Bobin Sarım Sayısı (N)	27
3.5.3 Düzlemsel Bobin İletken Genişliği (w)	27
3.5.4 Düzlemsel Bobin İletkenler Arası Mesafe (s).....	27
3.6. Kalite Faktörünün Optimizasyonu.....	27
3.6.1. Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması.....	35
3.6.2. Genetik Algoritma (GA).....	40
3.6.3. Gri Kurt Optimizasyon (GWO) Algoritması	44
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	59
5.1. Sonuçlar	59
5.2. Öneriler	59
KAYNAKLAR	60

ŞEKİLLER VE ÇİZELGELER DİZİNİ

ŞEKİLLER

Şekil 2. 1. Nikola Tesla'nın Wardencllyffe Kulesi	5
Şekil 2. 2. Elektromanyetik güç iletimi	6
Şekil 2. 3. Elektromanyetik uyum ortam unsurları.....	7
Şekil 2. 4. Farklı geometrilere düzlemsel spiral bobinler.....	9
Şekil 2. 5. Elektromanyetik indüksiyon ve elektrik devresi etkileşimi	12
Şekil 2. 6. LC osilatör devresi	13
Şekil 3. 1. Düzlemsel kare bobin.....	18
Şekil 3. 2. Düzlemsel dairesel bobin	19
Şekil 3. 3. Düzlemsel altıgen bobin.....	19
Şekil 3. 4. Düzlemsel sekizgen bobin.....	20
Şekil 3. 5. PSO akış diyagramı	37
Şekil 3. 6. Örnek bir PSO başlangıç popülasyonu.....	39
Şekil 3. 7. GA akış diyagramı	41
Şekil 3. 8. GWO akış diyagramı.....	45
Şekil 4. 1. Düzlemsel kare bobin GWO ile belirlenen optimal tasarım parametreleri ve kalite faktörü bobin tasarım programı değerleri	52
Şekil 4. 2. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	56

ÇİZELGELER

Çizelge 2. 1. Bobin geometrilerine ait akım yoğunluğu yöntemine dayalı katsayılar....	16
Çizelge 3. 1. Tasarım parametrelerine ait sınırlar	33
Çizelge 4. 1. Kullanıcı tarafından belirlenen giriş parametreleri	51
Çizelge 4. 2. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	51
Çizelge 4. 3. Kalite faktörünün GA ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	52
Çizelge 4. 4. Kalite faktörünün GWO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	52
Çizelge 4. 5. PSO hata analizi	53
Çizelge 4. 6. GA hata analizi.....	53
Çizelge 4. 7. GWO hata analizi	54
Çizelge 4. 8. Kullanıcı tarafından belirlenen algoritma giriş parametreleri	55
Çizelge 4. 9. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	55
Çizelge 4. 10. Kalite faktörünün GA ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	55

Çizelge 4. 11. Kalite faktörünün GWO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri	56
Çizelge 4. 12. PSO hata analizi	56
Çizelge 4. 13. GA hata analizi	57
Çizelge 4. 14. GWO hata analizi	57
Çizelge 4. 15. Farklı düzlemsel bobinler için PSO, GA ve GWO hata oranları (Çizelge 4.1)	58
Çizelge 4. 16. Farklı düzlemsel bobinler için PSO, GA ve GWO hata oranları (Çizelge 4.8)	58



SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

ε_f	: Hata fonksiyonu
ε_{rc}	: Hava dielektrik sabiti
ε_{rs}	: FR-4 substrat dielektrik sabiti
ε_0	: Vakumun elektriksel permitivitesi
δ	: Deri derinliği
μ_0	: Uzayın manyetik geçirgenliği
μ_r	: İletken malzeme manyetik geçirgenliği
ρ	: Dolu faktörü
ρ_{cu}	: İletken direnci
ω_s	: Açısız frekans
w	: İletken iz genişliği
s	: İletken izler arası mesafe
N	: Sarım sayısı
d_{out}	: Bobin dış çap
d_{in}	: Bobin iç çap
R_s	: Parazitik direnç
C_p	: Parazitik kapasitans
C_h	: Harici kapasitans
C_{tot}	: Toplam kapasitans
t_c	: İletken kalınlığı
L	: İndüktans
Q	: Kalite faktörü
l_g	: İletken izler arasındaki boşluğun uzunluğu
l_c	: İletken iz uzunluğu

KISALTMALAR

GP	: Geometrik optimizasyon
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
GWO	: Gri kurt optimizasyonu
GA	: Genetik Algoritma
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
AC	: Alternatif akım (alternating current)
MRI	: Manyetik rezonans görüntüleme (magnetic resonance imaging)
RF	: Radyo frekansı
BSA	: İkili arama algoritması (binary search algorithm)

1. GİRİŞ

1.1. Kablosuz Güç İletimi

Kablosuz güç iletimi, elektrik enerjisinin bir kaynaktan bir alıcıya herhangi bir fiziksel bağlantıya ihtiyaç duyulmadan iletilmesini sağlayan önemli bir teknolojidir. Bu teknoloji, elektrik enerjisinin uzak mesafelerde veya fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı durumlarda iletimini sağlamaktadır. Nikola Tesla ile başlayan kablosuz güç transferi araştırmaları temelde iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar yakın alan ve uzak alan güç transferi teknolojileridir. Uzak alan enerji transferi yüksek frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayınımları ile gerçekleşmektedir. Ancak uzak alan teknolojisi 10 MHz değerinden büyük frekanslarda çalışacak güç elektroniği devre teknolojileri gerektirdiğinden pahalı ve verimi düşük olarak nitelendirilmektedir (Tezcan ve diğerleri, 2022). Uzak alan güç transferi yönteminde, enerji kaynağı ve enerji alıcı arasında daha geniş bir mesafe bulunmaktadır. Enerji transferi genellikle manyetik rezonans veya mikrodalga iletimi yoluyla gerçekleştirilmektedir. Buna karşın yakın alan güç transferi, enerjinin bir kaynaktan bir alıcıya kısa mesafede iletilmesini sağlamaktadır. Yakın alan güç transferinde enerji iletimi manyetik indüksiyon veya manyetik rezonans yolu ile gerçekleşmektedir. Bu teknoloji nispeten daha verimli ve düşük maliyetli olduğundan kablosuz şarj uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir.

Günümüzde, kablosuz iletişim ve güç iletimi teknolojileri giderek daha büyük bir önem kazanmaktadır. Özellikle, mobil cihazların yaygınlaşması ve akıllı cihazların kullanımının artmasıyla birlikte, kablosuz iletim sistemlerine olan talep hızla artmaktadır. Bu talep, cihazların daha verimli ve kullanıcı dostu olmasını sağlayan temel bir gereklilik olarak görülmektedir. Bu bağlamda, kablosuz güç iletimi teknolojisi, elektrik enerjisinin kablolar veya fiziksel bağlantılar olmaksızın iletilmesini sağlayarak bu gereksinimleri karşılamak için önemli bir potansiyel barındırmaktadır.

Kablosuz güç iletimi, temel olarak manyetik rezonans, elektromanyetik iletim ve mikrodalga güç aktarımı gibi farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir (Arslan ve Erkan, 2022). Bu teknoloji, elektrik enerjisinin uzak mesafelerde veya fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı durumlarda iletimini sağlamaktadır. Manyetik rezonans, iletim ve alım bobinlerinin birbirleriyle rezonansa girmesi esasına dayanırken elektromanyetik iletim daha çok radyo dalgaları aracılığıyla enerji transferini

gerçekleştirmektedir. Her iki yöntem de benzersiz avantajlara sahiptir ve kullanım senaryolarına bağlı olarak tercih edilebilmektedirler.

Sağladığı avantajlar ile tercih edilen yakın alan güç transferi yönteminde kullanılan bobinler, birbirine yakın konumlandırıldıklarında manyetik bir kuplaj meydana gelmektedir. Oluşan bu kuplaj karşılıklı enerji iletimini sağlamaktadır (Tezcan ve diğerleri, 2017). Bu kuplajlı enerji aktarımında önemli noktalardan birisi de iki bobinin karşılıklı hizalanmasıdır. İdeal hizalanma sağlandığında maksimum verimde enerji iletimi sağlanırken, bobinlerin tam karşı karşıya olmama durumlarında yanlış hizalamadan kaynaklanan enerji iletiminde verim kayıpları meydana gelmektedir (Arslan ve Erkan, 2022). Yakın alan güç iletiminde kullanılan bazı bobin tipleri düzlemsel bobinler, ferrit çekirdekli bobinler, toroidal bobinler ve rezonans bobinleri olarak sıralanmaktadır. Tasarım gereksinimleri ve uygulama alanlarına bağlı olarak farklı bobin yapıları ve geometrileri bulunmaktadır.

1.2. Düzlemsel Bobinler ve Kalite Faktörünün Önemi

Günümüz teknolojisi gereği kompakt ürünlerin imalatında en aktif rol alan bobin yapısının düzlemsel bobinler olduğu gözlemlenmiştir (Venkatarayalu ve diğerleri, 2019). Düzlemsel bobinler kablosuz şarj sistemlerinde, elektrikli araç şarj istasyonlarında, biyomedikal uygulamalarda, elektronik tasarım ve prototipleme alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Düzlemsel bobinlerin kablosuz güç transferlerinde kullanılmasının bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar yüksek verimlilik, yüksek güç iletimi, uyumluluk ve alan tasarrufu olarak sıralanmaktadır. Bu avantajlar, düzlemsel bobinlerin kablosuz güç transferi için popüler bir seçenek olmasını sağlamaktadır. Ancak, iletim mesafesi, verimlilik ve maliyet gibi faktörler, tasarım sürecinde dikkate alınması gereken diğer önemli faktörlerdir.

Düzlemsel bobinlerin kullanımına olan talebin artması ile bu bobinlerin güç iletim verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Güç iletim verimliliğini etkileyen parametreler bobin formu ve geometrisi, indüktans değeri, manyetik rezonans frekansı, çalışma mesafesi ve kalite faktörü şeklinde sıralanmaktadır (Jow ve Ghovanloo, 2007). Bu parametreler arasında yer alan kalite faktörü parametresi, bobinde biriken enerji ile bobin tarafından kaybedilen enerjinin oranı olarak ifade edilmektedir.

Kalite faktörü, bobinlerin performansını etkileyen ve enerji transfer verimliliği, frekans stabilitesi, sinyal gücü ve bant genişliği gibi kritik faktörleri belirleyen temel bir parametredir. Kalite faktörünün maksimize edilmesi enerji transfer verimliliğinin de maksimum olacağı anlamını taşımaktadır. Maksimum kalite faktörüne sahip olmak, düzlemsel bobinlerin enerji depolama kapasitesini ve enerji kayıplarını optimize etmek için önemlidir. Bu da kablosuz güç transferinin daha etkin, verimli ve uzun mesafelerde çalışmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada farklı geometrilere sahip düzlemsel bobinlerin kalite faktörleri maksimize edilerek optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için üç farklı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmaların kalite faktörünü maksimize etmekteki başarı oranları incelenmiştir. Düzlemsel bobinin sahip olduğu dış çap, bobinin bir katmanındaki sarım sayısı, iletken iz genişliği ve iletken izler arasındaki boşluk gibi anahtar parametrelerinin, kalite faktörünün iyileştirilmesi ile optimal değerleri elde edilmiştir. Bu çalışma, kablosuz güç iletimi teknolojisinin gelişimine ve kullanım alanlarının genişlemesine katkı sağlayabilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kablosuz Güç İletim Teknolojisi: Modern Teknolojinin Temassız Enerji Transferi

Günümüzde kablosuz güç aktarımı, elektronik cihazların ve mobil teknolojinin yaygınlaşmasıyla önemli bir alan haline gelmiştir. Bu teknoloji, enerjinin kaynaktan alıcıya manyetik alan aracılığıyla temassız olarak iletilmesini sağlayarak kabloların ve prizlerin karmaşıklığını azaltırken kullanım kolaylığı sunmaktadır. Kablosuz güç aktarımı zamanla değişen elektrik, manyetik rezonans veya elektromanyetik indüksiyon prensipleri üzerine kuruludur (Özupak, 2022).

Rezonans, bir sistemin doğal frekansında titreşme eğilimi gösterdiği bir durum olarak ifade edilebilmektedir. Manyetik rezonans prensibi, elektrik enerjisini kaynaktan alıcıya iletmek için manyetik alanın kullanıldığı bir yöntemdir. Bu yöntem ile kablosuz güç aktarımında rezonans değerlerine ulaşmış iki bobin arasındaki güçlü manyetik alandan faydalanılmaktadır (Arslan ve Erkan, 2022). Bu sistemde, bobinlerden biri kaynak bobin diğeri ise alıcı bobin olarak sınıflandırılmaktadır. Kaynak bobini, elektrik enerjisini alır ve manyetik bir alan oluşturarak enerjiyi iletim haline dönüştürür. Alıcı bobin ise bu manyetik alanı algılar ve elektrik enerjisine dönüştürerek alıcı cihaza iletir. Genellikle, kaynak bobini ve alıcı bobini arasındaki mesafe birkaç santimetre ile birkaç metre arasında değişebilmektedir.

Ancak, kablosuz güç aktarımıyla ilgili bazı zorluklar da vardır. Mesafe, verimlilik ve elektromanyetik parazitler gibi konular, teknolojinin geliştirilmesi gereken nicelikler olarak görülmektedir. Bununla birlikte, sürekli olarak geliştirilen yeni teknolojiler ve standartlar, kablosuz güç aktarımının daha yaygın bir şekilde kullanılmasını ve daha güvenli ve verimli hale gelmesini sağlamaktadır. Kızıldağ ve Yılmaz (2021) çalışmalarında bu sistemlerinin alt kategorilerini araştırmış ve güç aktarım sistemlerinin farklı yöntemlerle sağlanmasına sebep olan frekans, güç verimliliği gibi nicelikleri incelemiştir. Kablosuz güç aktarımının, gelecekte elektrikli cihazların şarj edilmesinde ve enerji transferinde önemli bir rol oynamaya devam etmesi beklenmektedir.

2.1.1. Kablosuz Güç İletimi Tarihçesi

Kablosuz güç aktarımının tarihçesi, 19. yüzyılın sonlarına kadar uzanmaktadır. Nikola Tesla'nın 1890'larda yaptığı çalışmalar, kablosuz enerji iletiminin öncülüğü niteliğini taşımaktadır. Tesla, manyetik alanların kullanılmasıyla elektrik enerjisinin kablosuz iletimini sağlamak amacıyla çalışmalar yapmıştır. O dönemdeki kule ve bobin deneyleri, kablosuz enerji aktarımının ilk adımlarını oluşturmuştur.



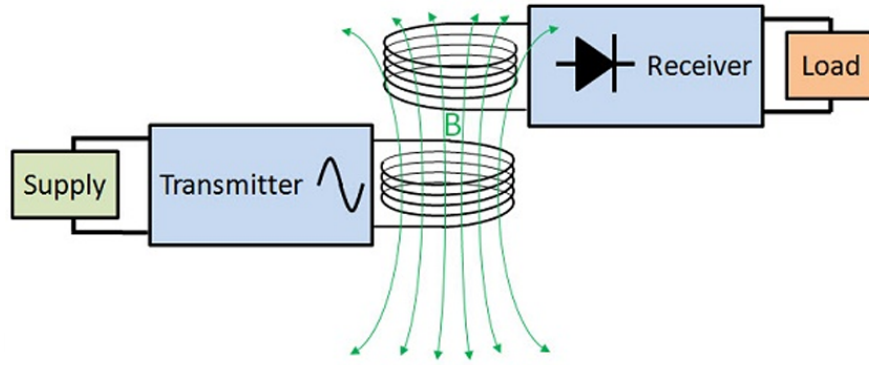
Şekil 2. 1. Nikola Tesla'nın Wardenclyffe Kulesi (Arslan ve Erkan, 2022)

20. yüzyılda mikrodalga teknolojisinin de gelişmesi ile kablosuz güç iletimi daha da önem kazanmıştır. 1963 ve 1970 yıllarında mikrodalga güç iletimi deneyleri gerçekleştirilmiştir (Pashaei ve diğerleri, 2016). Elektromanyetik indüksiyon prensiplerinin geliştirilmesi ve manyetik rezonans teknolojisinin keşfi, kablosuz güç aktarımı alanında önemli adımlardır. Bu teknolojilerin ilerlemesiyle birlikte, elektrik enerjisinin daha uzun mesafelere ve daha verimli bir şekilde kablosuz olarak iletilmesi mümkün hale gelmiştir.

2.1.2 Kablosuz Güç İletimi Uygulama Alanları

Kablosuz güç aktarımı, günümüzde birçok farklı alanda çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Bu teknolojinin esnekliği ve kullanım kolaylığı, birçok endüstride ve günlük hayatta çeşitli ihtiyaçları karşılamak için benzersiz fırsatlar sunmaktadır. Öncelikle, tüketici elektroniği alanında kablosuz güç aktarımı oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cep telefonları, akıllı saatler, kablosuz kulaklıklar ve diğer taşınabilir

cihazlar, kullanıcıların şarj kablosu karmaşasından kurtulmasını sağlayan kablosuz şarj teknolojisi ile donatılmıştır. Bu, kullanıcıların cihazlarını şarj etmelerini kolaylaştırır ve günlük kullanımda büyük bir rahatlık sağlamaktadır.



Şekil 2. 2. Elektromanyetik güç iletimi (Biswas ve Saxena, 2022)

Elektrikli araçlar da kablosuz güç aktarımından önemli ölçüde faydalanmaktadır. Bu teknoloji, araçların şarj edilmesini kolaylaştırır ve kullanıcıların araçlarını park yerlerinde veya belirli güzergahlarda otomatik olarak şarj etmelerine olanak tanımaktadır. Endüstriyel uygulamalarda da kablosuz güç aktarımı önemli bir rol oynamaktadır. Otomasyon sistemleri, robotik uygulamalar ve diğer endüstriyel ekipmanlar, kabloların kullanımını azaltarak daha esnek ve verimli bir çalışma ortamı sunmaktadır.

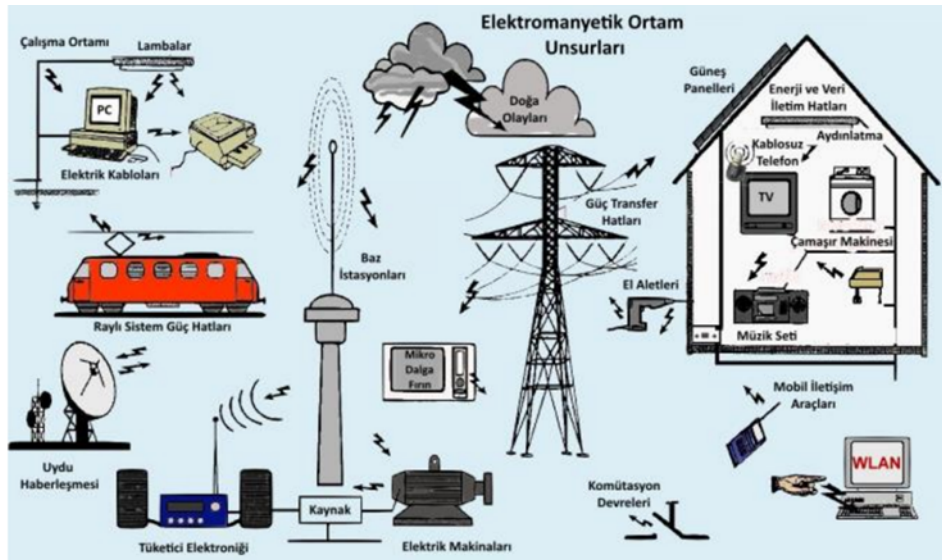
Tıbbi cihazlar da kablosuz güç aktarımının önemli bir uygulama alanıdır. İçinde bulunan pillerin sıklıkla değiştirilmesi gereken tıbbi cihazlar, kablosuz güç aktarımı ile sürekli olarak şarj edilebilir hale gelmektedir. Özellikle koklear implant cihazlarında, kablosuz güç aktarımı cihazın içine yerleştirilen bir bobin aracılığıyla gerçekleştirilerek hastaların yaşam kalitesini artırabilmektedir.

İleri teknolojilerin yanı sıra kablosuz güç aktarımı günlük hayatta da uygulama alanı bulmaktadır. Örneğin, ıslak ortamda kullanılan elektrikli tıraş makinesi, elektrikli diş fırçası gibi aygıtların bataryalarının doldurulması vb. Bunların yanı sıra piyasada cep telefonlarını, dizüstü bilgisayarların pillerini dolduran kablosuz enerji iletimi aygıtlarına rastlanmaktadır. Bu teknolojinin günümüzde kullanım alanı bulmasının temel nedenleri ise, kablosuz enerji transferini sağlayacak güç elektroniği teknolojisinin yeterli olgunluğa ulaşmış olması, günlük yaşamda ve sanayide gittikçe artan sayıda çeşitli boyutlarda çeşitli güçlerde bataryalı elektrikli aygıtların çok büyük bir hızla artmasıdır (Fincan, 2015).

2.1.3. Elektromanyetik Uyumluluk Ölçütleri

Kablosuz güç aktarımı, günümüzde birçok cihazın şarj edilmesini sağlayan popüler bir teknoloji olması ile elektromanyetik uyumluluk (EMC) konusu da önem kazanmaktadır. EMC, elektronik cihazların birbirleriyle veya çevreleriyle etkileşimini ve bu etkileşimlerin olası zararlarını değerlendiren bir disiplin olarak açıklanmaktadır.

Kablosuz güç aktarımında elektromanyetik uyumluluk, iki temel yönüyle ele alınmaktadır. Birincisi, kablosuz güç aktarımı cihazlarının kendi aralarında uyumlu olması gerekliliğidir. Bu, vericilerin ve alıcıların birbirleriyle uyumlu olması, verici tarafından üretilen manyetik alanın alıcı tarafından verimli bir şekilde yakalanması ve enerjinin aktarılması anlamına gelmektedir. İkincisi, kablosuz güç aktarımı cihazlarının diğer elektronik cihazlarla uyumlu olmasıdır. Bu, kablosuz güç aktarımı sırasında diğer elektronik cihazlara veya iletişim sistemlerine müdahale etmemesi gerektiği anlamına gelir. Koklear implant cihazlarda da kullanılan bu teknoloji canlıların sağlığı üzerinde termal ve termal olmayan belli etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, kablosuz güç aktarımı sistemleri elektromanyetik uyumluluk standartlarına uymalı ve elektromanyetik girişim riskini minimize etmek için gerekli önlemleri almalıdır. Cüce ve diğerleri (2023), çalışmalarında elektromanyetik uyumluluk için global standartları kullanım alanlarına göre incelemiştir.



Şekil 2. 3. Elektromanyetik uyum ortam unsurları (Sayın, 2017)

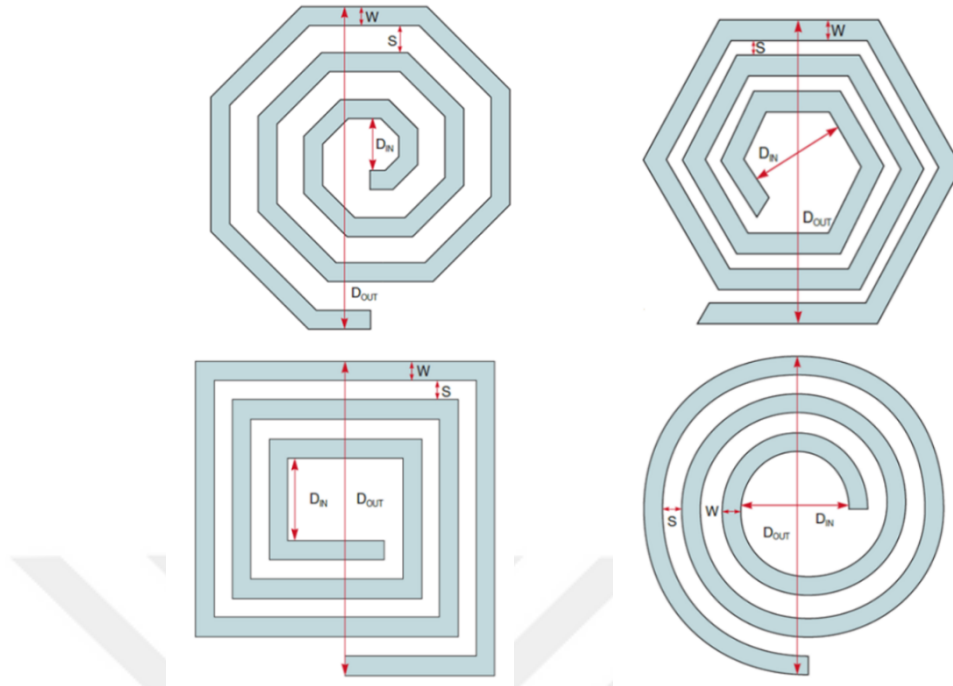
Kablosuz güç aktarımında elektromanyetik uyumluluk, hem cihazların güvenliğini ve performansını sağlamak hem de elektromanyetik spektrumun düzenlenmesini ve verimli kullanımını desteklemek için hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, üreticiler, tasarımlarında elektromanyetik uyumluluğu göz önünde bulundurmalı ve uygun test ve sertifikasyon süreçlerini takip etmelidirler. Bu yaklaşım, kablosuz güç aktarımı teknolojisinin güvenilirliğini ve kabul edilebilirliğini artırırken, aynı zamanda elektronik cihazların birlikte uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlar.

2.2. Kablosuz Güç İletiminde Kullanılan Bobinler

Bobin, üzerinden akım geçtiğinde manyetik alan içinde enerji depolayan bir devre elemanıdır. Elektromanyetik bobinler bir indüktans ya da elektromıknatis oluşturma amacıyla nüve üzerine sarılmış iletken telden oluşmaktadırlar. Metal telin bir döngüsü sarım olarak adlandırılmakta ve bobin bir veya birden fazla sarımdan meydana gelmektedir. Bobine alternatif akım uygulandığında, akımın yönünün zamana bağlı olarak değişmesinden dolayı bobin etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Bu bobinler, manyetik alan üretmek, indüktans sağlamak, enerji transferi yapmak ve sinyal işleme gibi birçok kullanım alanına sahiptirler.

Bobinler üzerinden akan elektrik akımının değişimi yavaş olduğundan, güç kaynaklarında ve sinyal işleme devrelerinde filtre görevinde kullanılmaktadırlar. Sarım sayıları farklı olan iki bobinden oluşan trafolar ise, AC gerilimin alçaltılmasında veya yükseltilmesinde tercih edilmektedir. Ayrıca manyetik alan depolama özellikleri sayesinde bobinler, anahtarlamalı güç kaynaklarında da kullanılmaktadır.

Elektromanyetik bobinler çeşitli şekil, boyut ve yapısal özelliklere sahip olabilmektedir. Günümüzde kullanılan bobinler, makara, mandren veya karkas olarak isimlendirilen yalıtkan üzerine spiral, helezon, düz, petek şeklinde sarılı tellerden oluşmaktadır. Ayrıca baskı devrelerde kullanılan düzlemsel bobinler de bulunmaktadır. En yaygın şekilde tasarlanan bobin geometrileri dörtgen, altıgen, sekizgen ve spiral yapılarıdır (Durmuş ve Karagöl, 2018). Pashaei ve diğerleri (2016), yaptıkları çalışmada sarmal sargı yapılarının üzerinde durmuş ve düzlemsel bobinlerin kullanım alanları ile geometrilerinin önemi üzerine açıklamalarda bulunmuşlardır.



Şekil 2. 4. Farklı geometrilerde düzlemsel spiral bobinler (Ti, 1995)

Son 10 yıldır bu indüktörlerin tasarımı, modellenmesi ve optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Modelleme tekniklerinin büyük bir bölümü, alan çözümleme (field solver), Maxwell, EM-Sonnet ve MagNet programları kullanarak bobinin tasarım üzerindeki davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Günümüzde kullanılan bobinler, makara, madren veya karkas olarak adlandırılan yalıtkanlar üzerine (plastik, seramik, sert kâğıt) spiral, helezon, düz, petek şeklinde sarılı tellerden (sargı şekli) oluşmaktadır. En yaygın tasarlanan bobin modelleri kare, altıgen ve sekizgen spiral yapılarıdır. Bu bobinler, gerilim kontrollü osilatörler (VCO'lar), düşük gürültülü yükselteçler (LNA'lar) ve ara frekans filtreleri (IFF'ler) gibi iletişim devresi bloklarının temel elemanları haline gelmiştir. Ayrıca baskı devrelerde kullanılan düzlemsel bobinlerin ve transformatörlerin özellikle kablosuz enerji transferinde ve yüksek frekanslı elektronik sistemlerde kullanımı artmıştır. Düzlemsel bobinler, bobinleri oluşturmak için kullanılan metal tel yerine genellikle bir baskı devre kartı üzerinde yassı sargı kullanılarak oluşturulmaktadır. Diğer bobinlere nazaran düzlemsel bobinler kullanım hacmini 10 kata kadar azaltabilmektedir.

Kablosuz güç aktarım elemanı olarak ele alınan düzlemsel bobinlerin üretimi için çeşitli teknikler bulunmaktadır. Yüzey mikro işleme, kalın bakır bobinin püskürtülmesi, SU-8 kullanılarak mikro kalıplama ve elektro kaplama yöntemleri düzlemsel bir bobinin

imalatında yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. Püskürtme ve mikro kalıplama kullanan metal biriktirme tekniği, PCB üzerinde elektrolizle kaplanmış bakır malzeme üzerinde üretilen düzlemsel mikro bobine kıyasla daha pahalıdır. Öte yandan, düzlemsel mikro bobinin boyutu, manyetik çalıştırma kabiliyetini önemli ölçüde etkilemektedir (Pawinanto ve diğerleri, 2014).

2.3. Düzlemsel Bobinlerde Maksimum Enerji Verimliliği ve Kalite Faktörü

Enerji verimliliği, sistemin toplam performansını doğrudan etkileyen bir faktördür ve kaynaktan alıcıya ne kadar enerjinin etkili bir şekilde aktarılabilirdiğini göstermektedir. Verimliliği optimize etmek için rezonans frekanslarının eşleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Kablosuz güç aktarım sistemlerinde hem kaynak hem de alıcı bobinlerin aynı rezonans frekansına sahip olması, enerji transferinin en verimli şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Bobinlerin geometrisi ve malzemeleri de enerji verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha fazla sarım sayısı, manyetik alanın daha yoğun olmasını sağlar ancak aynı zamanda direnç artışıyla enerji kaybına yol açabilmektedir. Bu dengeyi sağlamak için optimum sarım sayısı belirlenmeli ve düşük dirençli iletken malzemeler kullanılmalıdır. Ayrıca, bobinlerin düzlemsel yapısı, enerji transferinde minimum kayıp sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Kaynak ve alıcı bobinler arasındaki mesafe de enerji verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Mesafe arttıkça, manyetik alanın gücü azalır ve enerji transferi verimliliği düşer. Bu nedenle, bobinler mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir, ancak belirli bir mesafenin ötesine geçildiğinde verimlilik hızla düşer. Bu yüzden bobinler arasındaki ideal mesafe dikkatlice ayarlanmalıdır.

Kalite faktörü basit olarak bobinde biriken enerji ile bobin tarafından kaybedilen enerjinin oranı olarak tanımlanmaktadır. Kalite faktörü kablosuz enerji aktarım sistemlerinde bağlantı faktöründen sonra verimliliğe etkileyen ikinci önemli büyüklüktür ve “ Q ” ile ifade edilmektedir. Kablosuz enerji aktarım sistemlerinde kalite faktörü ne kadar büyük olursa verim aynı oranda büyük olmaktadır (Fincan, 2015). Kalite faktörünü etkileyen başlıca unsurlar arasında direnç, malzeme kalitesi ve bobin tasarımı yer almaktadır. Bobin tellerinin direnci, enerji kayıplarının ana kaynaklarından biri olarak görülmektedir. Düşük dirençli teller kullanmak kalite faktörünü artırmaktadır. Bu nedenle genellikle bakır veya gümüş gibi düşük dirençli iletkenler tercih edilmektedir. Bobinlerin substrat malzemelerin dielektrik özellikleri de enerji kayıplarını etkilemektedir. Yüksek

kaliteli dielektrik malzemeler kullanmak, enerji kaybını azaltarak kalite faktörünü artırmaktadır. Bu, özellikle çok katmanlı bobinlerde önemlidir. Çünkü her katmanın dielektrik özellikleri toplam enerji kaybını etkiler. Bobinlerin tasarımı ve yapısı, manyetik alanın yoğunluğunu ve dağılımını etkilemektedir. Optimum tasarım, manyetik alanın maksimum yoğunlukta ve eşit dağılımda olmasını sağlamaktadır. Bu, enerji kayıplarını minimize eder ve kalite faktörünü artırır. Düzlemsel spiral bobinler, bu açıdan avantajlıdır çünkü yüzey alanı geniş olduğu için manyetik alanın etkin bir şekilde yayılmasını sağlar. Kalite faktörü rezonans frekans ile indüktans ve direnç arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bobin rezonansı, bir bobin ve ona bağlı bir kapasitörün seri veya paralel bağlantısıyla oluşan bir elektrik devresinin, rezonans frekansında maksimum enerji transferini sağladığı durumu ifade etmektedir. Rezonans frekansı bobin indüktansı ve kapasitör kapasitansı ile belirlenmektedir. Rezonans frekansında enerji transferi en üst değerlere sahip olmaktadır. Yüksek bir indüktans ve düşük bir direnç daha yüksek bir kalite faktörüne sahip bobini ifade etmektedir.

Düzlemsel bobinlerde kalite faktörü, bobin yapısının tasarımı ve malzemenin seçimiyle etkilenebilmektedir. Ayrıca bobin sarım sayısı, bobin boyutları ve bobin geometrisi de kalite faktörünü etkilemektedir. Kim ve Park (2016), çalışmalarında doğrudan düzlemsel bobinlere odaklanarak belirli bir geometride kalite faktörünü matematiksel olarak hesaplamış, bu hesaplar doğrultusunda imal etmiş ve kalite faktörü değerlerini analiz etmişlerdir. Böylece kalite faktörünü etkileyen parametreler üzerine dikkat çekilmiştir. Hao ve diğerleri (2011), spiral bir geometriye sahip düzlemsel bobin kalite faktörünü analiz ederek bir ultrasonik yapıştırma cihazı verimi üzerine çalışmışlardır. Ancak bir tip geometri üzerinden ilerlenmesi kalite faktörü maksimizasyonu karşılamadığından bu çalışmada birden fazla geometride bobin üzerinde kalite faktörü maksimizasyonu incelenmesi amaçlanmaktadır. Buna ek olarak farklı optimizasyon algoritmaları ile maksimize işlemi yapılarak en ideal algoritmanın önerilmesi hedeflenmiştir.

$$Q = \frac{\omega_s L}{R} \quad (2.1)$$

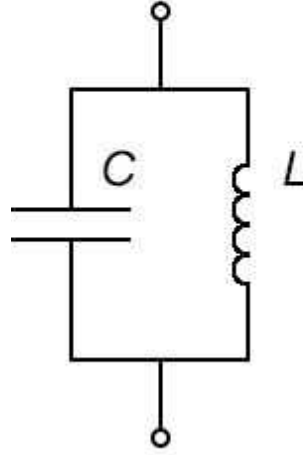
Kalite faktörü denkleminde yer alan ω_s bobinin rezonans frekansı, L bobin indüktansını ve R bobin direncini ifade etmektedir. Kablosuz enerji aktarım sistemlerinde, alt tabakalar üzerindeki bobinlerin omik direncinin ve indüktansının doğru hesaplanması bobin boyutunu maksimum verimliliğini optimize etmek için önemlidir. Özellikle, birkaç

MHz'den daha yüksek bir frekans aralığında omik direncin kesin olarak hesaplanması için cilt ve yakınlık etkileri dikkate alınmalıdır (Kim ve Park, 2016)



Şekil 2. 5. Elektromanyetik indüksiyon ve elektrik devresi etkileşimi

Bu çalışmada, düzlemsel bir bobinin kalite faktörünü incelemek amacıyla bir LC osilatör devresi temel alınmıştır. LC tank/osilatör sistemi baz alınarak bu sistem üzerinden amaç fonksiyonu olarak bir kalite faktörü denklemi sunulmuştur. LC osilatörler bir osilasyon kaynağıdır ve radyo frekans uygulamalarından sensör uygulamalarına kadar çeşitli alanlarda kullanılabilirler (Yavsan, 2023, 2024a, 2024b). Temelde bir indüktör (L) ve bir kapasitör (C) elemanından oluşan, elektromanyetik enerji depolama ve salınımını sağlayan bir devre yapısıdır. Devredeki indüktör, manyetik alan üzerinden enerji depolarken, kondansatör elektrik alanı aracılığıyla enerji depolar. Bu iki elemanın bir araya gelmesi, devrenin belirli bir rezonans frekansında çalışmasına olanak tanımaktadır. Rezonans frekansı, indüktans ve kapasitansın büyüklüklerine bağlı olarak değişmekte ve devrenin salınım özelliklerini belirlemektedir. Sensör uygulamaları için bu elemanların meydana getirdiği LC osilatör frekansı (rezonans frekansı, ω_s) ölçülmek istenen fiziksel büyüklüğe bağlı olarak değişebilmektedir. Değişen frekans ölçülerek bir sensör uygulaması geliştirilebilir. LC osilatörlerin kalite faktörü (Q), sensör uygulamalarında duyarlılık, frekans stabilitesi ve enerji verimliliği gibi önemli özellikleri etkilemektedir. Yüksek kalite faktörü (Q), daha iyi ölçüm hassasiyeti ve sinyal-gürültü oranı sağlamaktadır. Dolayısıyla, LC osilatörlerin tasarımı ve performansı, sensör uygulamalarının başarısı açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 2. 6. LC osilatör devresi

İncelenen bobin geometrileri, özellikle manyetik alanın yayılımı ve enerji kayıplarını minimize etme açısından optimize edilmiştir. Bu çalışmada, kalite faktörünü optimize etmek amacıyla bobin tasarım parametreleri ve devre koşulları detaylı olarak analiz edilmiştir. Kalite faktörünün matematiksel modellenmesi, enerji kayıplarını minimize eden ve verimliliği maksimize eden bir yaklaşım temel alınarak yapılmıştır. Bu bağlamda, devre tasarımındaki indüktans ve kapasitans değerlerinin doğru seçimi, kalite faktörünün artırılmasında kilit rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, düzlemsel spiral bobinlerin enerji verimliliği ve kalite faktörü, kablosuz güç aktarım sistemlerinin performansını belirleyen ana unsurlardır. Enerji verimliliğini artırmak için rezonans frekansı eşleşmesi, bobin geometrisi ve malzemeleri ile bobinler arasındaki mesafe dikkatlice optimize edilmelidir. Aynı şekilde, kalite faktörünü yükseltmek için direnç, malzeme kalitesi ve bobin tasarımı üzerinde çalışılmalıdır. Bu parametrelerin optimize edilmesi, kablosuz güç aktarım sistemlerinin daha verimli, güvenilir ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu da kablosuz şarj cihazları, tıbbi implantlar, endüstriyel otomasyon sistemleri ve elektrikli araçlar gibi birçok uygulama alanında daha geniş bir kullanım potansiyeli sunar. Düzlemsel spiral bobinlerin enerji verimliliği ve kalite faktörü üzerinde yapılan iyileştirmeler, gelecekte kablosuz güç aktarım teknolojilerinin gelişimine önemli katkılar sağlayacaktır.

2.4. Kalite Faktörüne Etki Eden Tasarım Parametreleri

Denklem 2.1’de ifade edildiği üzere kalite faktörünün elde edilmesinde kullanılan sistem frekansı, bobin indüktansı ve bobin direnci hesaplamaları dikkate alınmalıdır.

Manyetik rezonans sistemlerinde, özellikle indüktif ve kapasitif devrelerde, açısal frekans (ω_s) önemli bir parametredir. Manyetik alanlardaki enerji depolama ve transferinde sıklıkla kullanılmaktadır. Manyetik rezonans sistemlerinde açısal frekansın doğru bir şekilde ayarlanması, sistem verimliliğini artırabilmekte ve istenmeyen kayıpları minimize edebilmektedir. Ayrıca, enerji transferi sırasında oluşan rezonans durumunu korumak için açısal frekansın dikkatlice kontrol edilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle, manyetik rezonans sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda açısal frekansın dikkatlice incelenmesi gerekmektedir.

Düzlemsel bobinlerin indüktansı (L) ve bobin direnci (R), kablosuz güç aktarımı sistemlerinde diğer kritik öneme sahip olan diğer iki temel parametredir. İndüktans (L), bir bobinin manyetik alanını oluşturma kapasitesini temsil etmektedir. Bu değer, bobinin geometrisine, sarım sayısına ve sarımın boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Düzlemsel bobinlerde endüktansın artması, manyetik alanın gücünü artırarak enerji aktarım verimliliğini artırabilmektedir.

Bobin direnci (R), bobin iletken direncini ve bobin içindeki iletken yapıların direncini ifade etmektedir. Direnç, enerji transfer sürecindeki kayıpları temsil etmektedir. Bobinlerdeki iletkenin direnci, iletken uzunluğu, kalınlığı ve malzeme cinsine bağlı olarak belirlenmektedir. Wang ve diğerleri (2021), çalışmalarında karşılıklı iki dairesel düzlemsel bobinin sabit bir frekansta oluşturdukları öz indüktans ve karşılıklı indüktans değerlerini incelemişlerdir. Aynı zamanda katman sayısı gibi tasarım parametrelerini değiştirerek indüktans değerinde meydana gelen değişimi gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak katman sayısındaki değişimin bobinlerin güç iletim performansını pozitif yönde etkilediğini deneysel ve simülasyon yolu ile doğrulamışlardır.

İndüktans değerindeki değişiminin doğrudan kalite faktörüne etki ettiği Denklem 2.1 üzerinde ifade edilmiştir. Andreica ve diğerleri (2020), indüktans değerindeki değişimi analiz edebilmek için farklı geometrilere sahip düzlemsel bobinleri incelemişlerdir. Kare, dairesel, altıgen ve sekizgen şekilleri baz alan bu çalışmada tasarım parametreleri sabit tutulduğunda bobin geometrisinin indüktansını analitik ve deneysel yol ile tayin etmişlerdir.

Bir diğer parametre olan frekans hakkında da literatürde çalışmalar yer almaktadır. Tasarım geometrilerini sabit alarak karesel bobini farklı frekans değerleriyle analiz eden Racasan ve diğerleri (2017), çalışmalarında mikrometrik boyutlarda yüksek frekanslarda meydana gelen fenomenleri ve etkileri indüktans değişimi açısından değerlendirmişlerdir.

Pacurar ve diğerleri (2013), çalışmalarında düzlemsel bobinlerin indüktans hesaplaması ve düzen optimizasyonu üzerine dört modülden oluşan bir program oluşturmuşlardır. Tasarım parametreleri sabit bir bobinin indüktansını hesaplama, değişken geometrik parametrelere göre hesaplama yapmalarının yanı sıra talep edilen bir indüktans değeri için optimal tasarım parametrelerini de analiz ve tespit edebilmektedirler. Yazılımlarından elde ettikleri sonuçları ticari bir alan üzücü ile karşılaştırarak %4-10 oranında hata payı ile algoritmalarını detaylandırmışlardır (Pacurar ve diğerleri, 2012).

Endüktif g aktarımının en çok tercih edildiği kullanım alanı olan implant edilebilir cihazların, güç aktarım verimliliği inceleyen Jow ve Ghovanloo (2009), optimum geometriye sahip karesel bobinleri farklı çevresel ortamlarda incelemişlerdir. Böylelikle indüktansı ve kalite faktörünü etkileyen parazitik parametreleri analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, farklı geometrilere sahip düzlemsel bobinlerin maksimum kalite faktörüne sahip olabilmesi için gerekli optimal tasarım parametrelerini belirleyen optimizasyon algoritmaları incelenmiştir ve başarı oranları analiz edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Düzlemsel Bobin Geometrileri ve İndüktans

Bobin tasarımının temelini oluşturan indüktans hesaplamaları çok eski teori ve metotlara dayanmaktadır. Ancak bu indüktörler küçüldükçe, geçmişte tasarımı yönlendiren varsayımlar giderek daha az geçerli hale gelmektedir. Greenhouse (1974), temel fizik kavramlarından ve Faraday yasasından yola çıkarak öz indüktans ve karşılıklı indüktans hesaplamalarını incelemiştir. Bobinin indüktans hesabı için kullanılan yöntemler genişletilmiş Grover yöntemi, Terman yöntemi, Wheeler yöntemi, akım levhası yaklaşımı ve monom ifade yöntemi olarak sıralanmaktadır.

Bu çalışmada bobin indüktans hesaplamalarında akım levhası yaklaşımına dayalı ifade referans alınmaktadır. Bu ifade, bobin yapısının bir düzlem olarak ele alınması ve bu düzlemdeki akım dağılımının bir levha gibi düşünülmesidir. Bu yaklaşıma göre, bobin içindeki akım, düzlemsel bir levha üzerinde akım yoğunluğu olarak kabul edilir ve bu levhanın indüktansı hesaplanır. Bu yöntem, düzlemsel bobinlerin indüktansının hızlı ve doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Mohan ve diğerleri (1999), çalışmalarında kare, dairesel, altıgen ve sekizgen geometrik şekle ait indüktans formüllerini analiz etmişlerdir. Bu indüktans hesabında akım dağılımı ve geometrik ortalama ve aritmetik ortalama kavramlarına dayanarak elde edilen katsayılar kullanılarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 2. 1. Bobin geometrilerine ait akım yoğunluğu yöntemine dayalı katsayılar

GEOMETRİ	C1	C2	C3	C4
Kare	1.27	2.07	0.18	0.13
Daire	1.09	2.23	0.00	0.17
Altıgen	1.07	2.29	0.00	0.19
Sekizgen	1.00	2.46	0.00	0.20

Denklem 2.2' de yer alan N sarım sayısı, d_{avg} ortalama çap, ρ dolum faktörüdür. Dolum faktörü F sarım boşluklarının, bobinin içindeki toplam hacme oranını ifade etmektedir.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 d_{avg} C_1}{2} \left[\left(\ln \frac{C_2}{\rho} \right) + C_3 \rho + C_4 \rho \right] \quad (2.2)$$

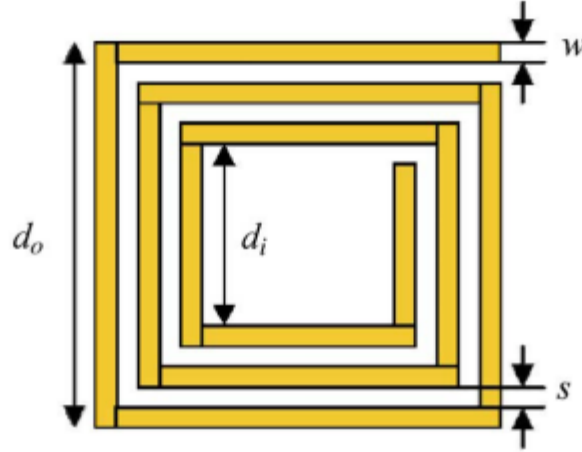
$$d_{avg} = 0.5(d_{out} + d_{in}) \quad (2.3)$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (2.4)$$

μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Bu formül ideal bir hava bobini için geçerli sayılmaktadır. Dolum faktörü, bobin içindeki manyetik akı yoğunluğunun ve dolayısıyla indüktansın etkin bir şekilde artmasına yardımcı olmaktadır. Dolum faktörü de bobin sarımının şekline ve geometrisine bağlıdır. Etkin bir indüktans elde etmek ve enerji transferini optimize etmek için dolayısıyla kalite faktörünü maksimize etmek için dolum faktörünün uygun seviyede seçilmiş olması önem taşımaktadır.

3.1.1. Düzlemsel Kare Bobin

Düzlemsel kare bobinler, basit ve simetrik yapılarından dolayı kolay tasarım ve imal edilebilme olağanı sağlamaktadır. Bu bobinlerde manyetik alan, kare yapının simetriği sayesinde homojen bir şekilde dağılmaktadır. Bu, manyetik alanın bobinin içinde dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır. Kare bobinler diğer geometrilere göre daha yüksek bir indüktansa sahip olabilmektedir. Kare şeklinin içerdiği daha fazla sarım uzunluğu ve alan bobinin indüktansını arttırmaktadır. Analitik hesaplamaların yapılabilmesi için düzlemsel kare bobinin indüktans değerinin hesaplanması gerekmektedir. Akım taşıyan bir iletken tarafından üretilen manyetik akı ile içinden geçen akım arasındaki oran, öz endüktansını gösterir (Ahire ve diğerleri, 2022).

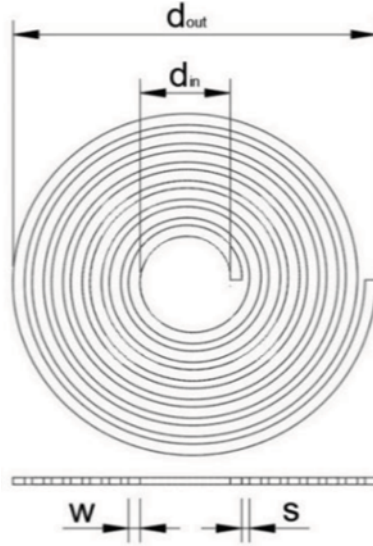


Şekil 3. 1. Düzlemsel kare bobin (Jow ve Ghovanloo, 2007)

$$L = \frac{1.27\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left(\ln\left(\frac{1.07}{\rho}\right) + 0.18\rho + 0.13\rho^2 \right) \quad (3.1)$$

3.1.2. Düzlemsel Dairesel Bobin

Bu düzlemsel bobinde tasarlanan geometri sarımın spiral şeklinde düzlemsel bir yüzeye sarılması ile karakterize edilmektedir. Bu spiral yapı, bobinin kompakt olmasını sağlamakla birlikte alan kullanımını da optimize etmektedir. Alternatif akım için indüktör, elektriksel direncin yanı sıra indüktans adı verilen ve indüktör çevresinde bir manyetik alan üretme kabiliyetini tanımlayan bir özellik de gösterir. Elektriksel açıdan indüktans, alternatif akımın frekansıyla orantılı olan karmaşık empedans gibi davranmaktadır. İdeal indüktör, elektriksel direnci ihmal edilebilirken yalnızca indüktansı gösterir (Hrabocsky ve Kravets, 2019).

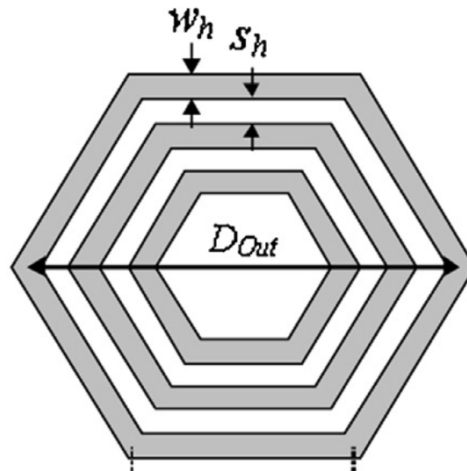


Şekil 3. 2. Düzlemsel dairesel bobin (Hrabocsky ve Kravets, 2019)

$$L = \frac{\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left(\ln \left(\frac{2.46}{\rho} \right) + 0.20 \rho^2 \right) \quad (3.2)$$

3.1.3. Düzlemsel Altıgen Bobin

Altıgen bobinler, özellikle düzlemsel bobin tasarımlarında kullanılan ve yüksek verimliliğe sahip bir yapı sunan geometrilerdendir. Bu şeklin sunduğu simetrik yapı, manyetik alanın bobin içindeki dağılımını dengeleyerek elektromanyetik performansı artırmaktadır. Altıgen bir bobinde her bir kenar eşit uzunlukta olduğundan, bobinin içindeki manyetik alan dağılımı nispeten homojen bir yapıya sahiptir. Bu durum, endüktansın dengeli bir şekilde dağılımını sağlayarak yüksek frekanslı devrelerde etkili bir performans sergilemesine olanak tanımaktadır.

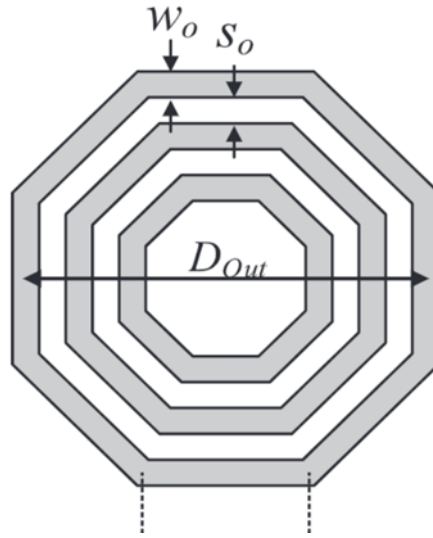


Şekil 3. 3. Düzlemsel altıgen bobin (Tavakkoli ve diğerleri, 2019)

$$L = \frac{1.09\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left(\ln\left(\frac{2.23}{\rho}\right) + 0.137 \right) \quad (3.3)$$

3.1.4. Düzlemsel Sekizgen Bobin

Sekizgen bobinler, simetrik yapıları ve geniş yüzey alanları sayesinde manyetik alan dağılımını optimize eden bir tasarım sunmaktadır. Bu geometrik şekil, özellikle düzlemsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır ve endüktans hesaplamaları, bobinin boyutları, sarım sayısı ve tel kalınlığı gibi parametrelere dayanmaktadır. Sekizgen bobinlerde, her bir kenar eşit uzunlukta olduğu için manyetik alanın bobin içindeki dağılımı daha homojen hale gelmekte ve bu da yüksek frekanslı uygulamalar için daha verimli bir performans sağlamaktadır.



Şekil 3. 4. Düzlemsel sekizgen bobin (Tavakkoli ve diğerleri, 2019)

$$L = \frac{1.07\mu_0 N^2 d_{avg}}{2} \left(\ln\left(\frac{2.29}{\rho}\right) + 0.19\rho^2 \right) \quad (3.4)$$

3.2. Bobin Çalışma Frekansı

Düzlemsel bobinler, çeşitli elektronik uygulamalarda enerji depolama ve elektromanyetik etkileşimleri optimize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde, açısal frekans (ω_s) manyetik ve elektriksel performansı belirleyen önemli bir parametredir. Manyetik alanlardaki enerji depolama ve transferinde sıklıkla kullanılmaktadır. Manyetik rezonans sistemlerinde açısal frekansın doğru bir şekilde

ayarlanması, sistem verimliliğini artırabilmekte ve istenmeyen kayıpları minimize edebilmektedir. Bu kalite faktörü denklemleri amaç fonksiyonunu temsil etmektedir. Açısal frekans, periyodik hareketlerin, özellikle de AC (alternatif akım) devrelerinde sinüzoidal dalga formlarının davranışını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$\omega_s = 2\pi f \quad (3.5)$$

Burada f , bobinin çalıştığı devrenin Hertz cinsinden frekansını temsil etmektedir. Bu formül, bir döngünün tamamlanması için geçen zamanın bir fonksiyonu olan periyodik hareketlerin hızını ifade etmektedir. Bir düzlemsel bobinde, açısal frekans, devreye uygulanan AC sinyalinin frekansına bağlıdır.

Düzlemsel bobin tasarımında açısal frekans ayrıca rezonans frekansıyla da yakından ilişkilidir. Bir bobin ve kondansatör içeren rezonans devresinde rezonans frekansları şu şekilde hesaplanır:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi LC_p}} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'ya göre, rezonans frekansında çalışan bir devre için açısal frekans, bobinin endüktansına ve kapasitörün kapasitesine bağlıdır. Bu ilişki, düzlemsel bobinlerde açısal frekansın devre tasarımındaki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Düzlemsel bir bobin AC sinyali ile beslendiğinde, bobin içinde bir manyetik alan oluşmaktadır. Açısal frekans, bu manyetik alanın oluşma hızını ve değişim hızını belirlemektedir. Daha yüksek açısal frekanslarda, manyetik alan daha hızlı değişir, bu da daha büyük bir manyetik akı yoğunluğu oluşturabilmektedir. Ancak, aşırı yüksek açısal frekanslar cilt etkisi (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) gibi kayıplara neden olabilir, bu da bobin verimliliğini düşürür.

Açısal frekans, endüktans ile doğru orantılıdır. Yani, bobinin endüktansı arttıkça açısal frekans da artmaktadır. Ancak, rezonans frekansında çalışmayan bir bobinde, açısal frekans artışı enerji kayıplarını artırabilmektedir. Bu kayıplar genellikle direnç ve kapasitif reaktans nedeniyle meydana gelmektedir. Düzlemsel bobinlerin kalite faktörünü optimize etmek için açısal frekans, bobinin endüktans ve direnç değerlerine uygun bir şekilde seçilmelidir.

Düzlemsel bobinlerin uygulamaları genellikle yüksek frekanslı devrelerde olduğu için açısal frekansın doğru seçilmesi, devrenin performansı açısından büyük önem

taşmaktadır. Özellikle, kablosuz enerji transferi, manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve radyo frekansı (RF) devrelerinde kullanılan bobinlerde açılal frekansın etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Bobin tasarımında kullanılan malzeme, bobin çapı, sarım sayısı gibi parametreler açılal frekans üzerinde doğrudan etkilidir.

Düşük frekanslarda bobin verimliliği daha yüksek olabilirken, yüksek frekanslarda kayıplar artabilir. Bu nedenle, rezonans frekansına yakın bir açılal frekans seçimi, devre verimliliği ve kalite faktörünü maksimize etmek için genellikle tercih edilen bir yaklaşımdır.

3.3. Parazitik Direnç

Düzlemsel bobinlerin parazitik dirençleri, bobinlerin elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli bir faktördür. Bu dirençler, genellikle bobin yapısındaki malzeme seçiminden, bobin yapısına ve çevresel etkilere kadar çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bobinin yapısında kullanılan iletken malzeme, parazitik direnci büyük ölçüde etkilemektedir. İletken malzemesi genellikle bakır veya altın gibi düşük dirençli metallere oluşmaktadır. Düşük dirençli malzemelerin kullanımı, parazitik direnci azaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır. Bobinlerin fiziksel yapısı, parazitik dirençlerin oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Bobinlerin katman sayısı, dönüş sayısı, izolasyon malzemesi ve sargı yöntemi gibi faktörler, parazitik direnç seviyelerini belirlemektedir.

Bobin yüzeyinin pürüzlülüğü, temas direncini artırabilir ve dolayısıyla parazitik direnci artırabilmektedir. Düzgün bir yüzeye sahip bobinler, temas direncini azaltarak parazitik direnci düşürebilmektedir. Bobinlerin çevresel koşullara maruz kalması, parazitik direnci artırabilmektedir. Bobinlerdeki parazitik dirençler, frekansa bağlı olarak değişebilmektedir. Yüksek frekanslı uygulamalarda, özellikle AC sinyalleri için, parazitik dirençler daha belirgin hale gelebilir ve bu da enerji kayıplarını artmasına sebep olabilmektedir. Parazitik direncin devredeki etkileri özellikle LC rezonans devrelerinde belirgin hale gelmektedir. Bu direnç, devre rezonans frekansında enerji kayıplarına neden olarak, devrenin verimliliğini azaltarak istenmeyen harmoniklerin oluşumunu tetikleyebilmektedir. Düzlemsel bobinlerdeki parazitik dirençlerin anlaşılması, tasarım sürecinde enerji verimliliğini artırmak ve istenmeyen kayıpları minimize etmek için önemlidir.

Düzlemsel bobinin toplam parazitik direncinin bulunabilmesi için iletken uzunluğu, iletken malzemenin kalınlığı ve iletken malzemenin direnci bilinmelidir. Bu çalışmada iletken olarak bakır kullanılmıştır. Bakır iletkeninin kalınlığı genellikle 1 oz-cu (yaklaşık 35 μm) seçilmektedir. Bu çalışmada kabul edilen bakır kalınlığı da 35 μm 'dir.

$$R_s = \frac{K_f 2\pi \rho_{CU}}{wt} (d_{out} * N - N^2 * (w + s)) \quad (3.7)$$

$$K_f = \frac{t}{\delta(1 - e^{-\frac{t}{\delta}})} \quad (3.8)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{CU}}{2\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (3.9)$$

Deri derinliği olarak ifade edilen δ (delta), elektriksel iletkenliğe sahip bir malzemenin içine giren bir alternatif akımın derinliğini tanımlamaktadır. Elektriksel iletkenlik gösteren bir malzeme içindeki bir akımın, frekansına bağlı olarak malzemenin derinliklerine ne kadar nüfuz edebileceğini belirtmektedir. f , frekans değişkenini ifade ederken μ_0 manyetik sabit ya da boş alanın geçirgenliği olarak ifade edilmektedir. μ_r ise iletken malzemenin geçirgenliğidir (Chawda, 2018).

Parazitik direnç, düzlemsel bobinlerin performansını doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Düşük frekanslı devrelerde bu direnç daha az önemli bir faktörken, yüksek frekanslı uygulamalarda cilt ve yakınlık etkilerinin de devreye girmesiyle direnç artar ve bu da bobinin verimliliğini azaltır. Düşük dirençli malzeme ve uygun tel geometrisi seçimi, direnç kayıplarını minimize etmek ve kalite faktörünü maksimize etmek için önemli stratejilerdir. Enerji kayıplarını azaltmak ve verimliliği artırmak için tasarım parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir.

3.4. Kapasitans

Düzlemsel bobinlerin performansını ve verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan kalite faktörü, bobinin enerji depolama kapasitesi ve devredeki kayıpların bir göstergesidir. Düzlemsel bobin sistemlerinde kapasitans, harici kapasitans (C_h) ve

parazitik kapasitans (C_p) bileşenlerinden oluşan toplam kapasitans (C_{tot}) olarak ele alınmaktadır. Kapasitans, bobinin rezonans frekansını ve enerji depolama yeteneğini belirlediği için kalite faktörü optimizasyonunda kilit bir rol oynamaktadır.

$$C_{tot} = C_h + C_p \quad (3.10)$$

C_h , sisteme harici olarak bağlanmış kapasitans, devrenin istenen frekansta çalışmasını sağlamak ve rezonans frekansını optimize etmek amacıyla kullanılan bir kapasitans elemanıdır. Bu kapasitans, genellikle harici bir kondansatör tarafından sağlanmaktadır. Bu çalışmada harici kapasitans değeri 330 pF olarak belirlenmiştir (Chawda ve diğerleri, 2017). Harici kapasitans, devre performansını stabilize etmek, istenen rezonans frekansını sağlamak ve uygulama gereksinimlerine uygun olarak belirli bir standart doğrultusunda seçilmiştir. Bu, devrenin frekans tepkisini belirlemek için önemli bir parametredir.

Parazitik kapasitans (C_p), bobinlerin endüktansını etkileyerek istenmeyen frekans bağımlı bir direnç oluşturmaktadır. Özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda, parazitik kapasitansın etkisi daha belirgindir ve bobinlerin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Islam ve diğerleri, 2013). Bu kapasitans, bobinin sarımları arasındaki kapasitif etkileşimler, devrenin iletim hatları ve çevresel faktörlerden dolayı oluşur. Parazitik kapasitans, bobinin istenen performansını olumsuz etkileyebilir, bu yüzden minimize edilmeye çalışılır. Bu çalışmada düzlemsel bobinlerin bir FR-4 substratı üzerine imal edildiği baz alınarak parazitik kapasitans hesaplaması yapılmıştır. FR-4 substratı, güçlü ve dayanımlı bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Mekanik stabilitesi sayesinde düzlemsel bobinde uzun dayanım ömrü sağlamaktadır. Ayrıca FR-4 malzemesinin ısıya dayanım yüksekliği beklenen standartları karşılamaktadır (Chawda ve diğerleri, 2017). Ayrıca kaplama malzemesi olarak bir yalıtkan tercih edilmemiş olup hava dielektrik sabiti dikkate alınmıştır.

$$l_c = 4Nd_{out} - 4Nw - (2N + 1)^2(s + w) \quad (3.11)$$

$$l_g = 4(d_{out} - wN)(N - 1) - 4sN(N + 1) \quad (3.12)$$

Denklem 3.11, iletken izin toplam uzunluğunu, Denklem 3.12 ise yüzeydeki boşluğun uzunluğunu bulmak için kullanılan hesaplamalardır.

$$C_p = C_{pc} + C_{ps} \approx (\alpha \epsilon_{rc} + \beta \epsilon_{rs}) \epsilon_0 \frac{t}{s} l_g \quad (3.13)$$

Denklem 3.13 ile ifade edilen parazitik kapasitans formülasyonunda yer alan ϵ_{rc} havanın dielektrik iken ϵ_{rs} FR-4 substratının dielektrik sabiti olarak kabul etmektedir. α ve β sabit katsayılarıdır. β katsayısı bobinin yerleştirildiği FR-4 substratının kalınlığını ifade ederken α katsayısı bobinin çevresindeki yalıtkan ortamın kalınlığını ifade etmektedir. Bu çalışmada α ve β katsayıları deneysel olarak 0.7 m olarak belirlenmiştir.

Bobinin yerleştirildiği substratın FR-4 malzemesinden yapılması ve bobinin üzerindeki yalıtkan ortamın hava olması, devrenin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. FR-4, cam elyafı takviyeli epoksi reçine esaslı bir malzeme olup, baskı devre kartlarında (PCB) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme, düşük maliyetli, iyi elektriksel yalıtkan özelliklere sahip ve yüksek mekanik dayanıklılığıyla bilinmektedir. Elektriksel olarak FR-4'ün dielektrik sabiti ($\epsilon_{rs} \approx 4.4$) ve düşük kayıp faktörü, yüksek frekanslarda bile etkili bir yalıtım sağlar.

Bobinin çevresindeki yalıtkan ortamın hava olması ise önemli avantajlar sunmaktadır. Havanın dielektrik sabiti ($\epsilon_{rc} \approx 1$) düşük olduğundan, hava ile çevrili bir bobin parazitik kapasitansın daha düşük olmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, bobinin yüksek frekanslı uygulamalarda daha verimli çalışmasını ve istenmeyen kapasitif etkilerin azalmasını sağlar. Havanın elektriksel iletkenliği olmadığı için, bobin iletkenlerinin dış ortamla yalıtılması ve elektriksel parazitlerden korunması sağlanır.

Özetle, FR-4 substratı, bobinin sağlam bir mekanik destek üzerinde olmasını sağlarken, bobinin üzerindeki hava tabakası ise düşük parazitik kapasitans sağlayarak, devrenin elektriksel performansını optimize etmektedir. Bu kombinasyon, özellikle yüksek frekanslı devrelerde istenen performansı elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Parazitik kapasitans, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda devrenin performansını sınırlayan bir faktördür. Yüksek frekanslarda, bobin sarımları arasında meydana gelen kapasitif etkiler artar ve bu durum, istenmeyen enerji depolama ve kayıplara neden olabilir. Parazitik kapasitansın devreye eklenmesi, rezonans frekansını kaydırarak bobinin verimliliğini düşürebilir ve kalite faktörünü olumsuz etkileyebilir. Bu

nedenle, bobin tasarımında parazitik kapasitansın minimize edilmesi için dikkatli bir mühendislik yaklaşımı benimsenir.

Harici kapasitans C_h ise, genellikle tasarımın istenen frekansta çalışmasını sağlamak için bir ayarlama parametresi olarak kullanılmaktadır. Sabit bir harici kapasitans, rezonans frekansını kontrol ederek bobinin performansını iyileştirebilir ve toplam kapasitansın C_{tot} optimize edilmesine katkıda bulunur.

Toplam kapasitans düzlemsel bobinlerin kalite faktörü hesaplamasında önemli bir parametre olarak rol oynamaktadır. Harici kapasitans, bobinin istenen çalışma frekansını belirlerken, parazitik kapasitans bobinin performansını sınırlayan istenmeyen bir etki olarak ortaya çıkmaktadır. Parazitik kapasitansın doğru hesaplanması ve minimize edilmesi, yüksek performanslı bobin tasarımlarında kalite faktörünün iyileştirilmesi için kritik bir gerekliliktir.

3.5. Tasarım Parametreleri

Düzlemsel bobinlerin kalite faktörünün maksimize edilmesi bobinin performansını doğrudan etkilemektedir ve tasarım sürecinde dikkat edilmesi gereken birkaç tasarım parametresi bulunmaktadır. Bu tasarım parametrelerinin her biri, bobinin performans ve verimliliğini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Kalite faktörünün maksimum değerini elde edebilmek için bu parametrelerin optimum değerlerinin elde edilmesi önem arz etmektedir.

3.5.1 Düzlemsel Bobin Dış Çapı (d_{out})

Tasarım geometrisi ve ölçülerine bağlı olarak belirlenen düzlemsel bobinin tüm katmanlarını kapsayan ölçüdür. Bu parametre geometriye göre indüktans formülüne etki ettiğinden dolayı kalite faktörünü etkilemektedir. İndüktörün dış çapı parametresinin artması kalite faktörünü ters orantılı olarak azaltmaktadır. Dış çap artışı indüktör içindeki telin uzunluğunu ve dolayısıyla seri direncini artırmaktadır. Seri direnç indüktörde enerji kayıplarına sebep olmaktadır.

3.5.2 Düzlemsel Bobin Sarım Sayısı (N)

Sarım sayısı, indüktansı doğrudan artıran bir parametredir. Sarım sayısının artması ile indüktans arttığı için kalite faktörü bu parametreden etkilenmektedir. Daha yüksek bir indüktans, enerjinin bobinde daha iyi depolanmasına ve dolayısıyla kalite faktörünün artmasına yardımcı olmaktadır. Kalite faktörünün maksimize edilmesinin istendiği noktada belirtilen ölçüler dahilinde maksimum sarım sayısı tercih edilmektedir.

3.5.3 Düzlemsel Bobin İletken Genişliği (w)

PCB üzerinde bakır yollar ile elde edilen sarımlarda bu her bir sarıma ait yol genişliği, tasarımın geometrik ölçülerine etki etmektedir. Yol genişliği arttıkça kalite faktörü düşmektedir. Yol genişliği arttıkça bobindeki iletken malzemenin miktarı da artmaktadır. Bu durum bobinin seri direncinin artmasına sebep olmaktadır. Seri direnç enerji kayıplarından sorumlu olmasından dolayı kalite faktörüne ters orantıda bir etkiye bulunmaktadır.

3.5.4 Düzlemsel Bobin İletkenler Arası Mesafe (s)

Her bir sarım arasındaki mesafe indüktans değişimine sebep olmaktadır. İmalatı mümkün kılacak seviyede minimum tutulması gereken bu değer kalite faktörünü dolaylı olarak etkilemektedir. İletken yollar arasındaki mesafe arttıkça bobinler arasındaki karşılıklı indüktans değeri azaltmaktadır. Karşılıklı indüktans enerjinin bobinler arasındaki transferini etkilemektedir. Yol arası mesafe arttıkça enerji transferi azalmakta ve dolayısıyla kalite faktörü düşmektedir.

3.6. Kalite Faktörünün Optimizasyonu

Optimizasyon, bir problemin hedeflenen amaçlara en uygun çözümü bulma süreci olarak ifade edilmektedir. Genellikle bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerini bulmayı içerir ve mühendislik, ekonomi, biyoloji gibi birçok disiplinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimizasyon sürecinde, bir dizi karar değişkeni tanımlanmakta ve bu değişkenlerin belli bir hedefe ulaşmak için nasıl ayarlanacağı araştırılmaktadır. Bu hedef genellikle maliyeti minimize etmek, performansı artırmak veya kaliteyi iyileştirmek

şeklinde. Optimizasyon, belirli kısıtlamalar altında en uygun çözüme ulaşmayı amaçlamaktadır. Kısıtlamalar, karar değişkenlerinin kabul edilebilir değer aralıklarını belirlemekte ve gerçek hayattaki fiziksel, teknik ya da finansal sınırlamaları yansıtmaktadır.

Optimizasyon problemleri genellikle iki grupta incelenmektedir: doğrusal ve doğrusal olmayan. Doğrusal optimizasyon hem amaç fonksiyonunun hem de kısıtların doğrusal olduğu durumları ifade ederken, doğrusal olmayan optimizasyon bu doğrusal yapıyı içermeyen, daha karmaşık problemlere yöneliktir. Ayrıca, optimizasyon problemleri, global ve lokal çözümler açısından da sınıflandırılabilirler. Global optimizasyon, tüm çözüm uzayı içindeki en iyi çözümü bulmayı amaçlarken, lokal optimizasyon sadece mevcut konuma en yakın çözümü hedeflemektedir.

Optimizasyon problemleri, problem yapısına ve çözümün zorluğuna göre farklı yöntemlerle çözülmektedir. Bu yöntemler genellikle matematiksel optimizasyon teknikleri, sezgisel yöntemler veya doğaya dayalı algoritmalar olarak sınıflandırılmaktadır. Matematiksel optimizasyon teknikleri analitik ve türev bazlı yöntemleri kullanırken, sezgisel yöntemler belirli kurallara dayanan ve genellikle belirli bir çözüm garantisi olmayan yaklaşımlardır. Doğaya dayalı algoritmalar, biyolojik süreçlerden, hayvan davranışlarından veya fiziksel fenomenlerden ilham almaktadır. Bu algoritmalar, özellikle çok boyutlu ve karmaşık problemlerde çözüm uzayını keşfetmek için etkili araçlardır. Parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO), genetik algoritma (GA) ve gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) gibi doğa temelli yöntemler, geniş çözüm alanlarını keşfetme yetenekleriyle öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar, özellikle küresel optimuma ulaşmak için güçlü yöntemler sunar ve kısıtlı optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılır.

Kısıt fonksiyonları, optimizasyon algoritmalarının karar değişkenlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak ve böylece geçerli bir çözümün elde edilmesine olanak tanımaktadır. Kısıtlı optimizasyon problemlerinde kullanılan kısıt işleme yöntemleri genellikle dört ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu kategoriler, ceza fonksiyonları, özel durum ve operatörler, kısıt ve amaçların ayrı işlenmesi ve hibrit yaklaşımlar olarak sıralanmaktadır. Bu yöntemler arasında ceza fonksiyonları en yaygın tercih edilen yöntemlerden biridir.

Ceza fonksiyonları yöntemi, optimizasyon algoritmalarında kullanılan yaygın bir kısıt işleme tekniğidir. Bu yöntem, kısıtlı bir problemi kısıtsız bir problem gibi çözmek için, kısıt ihlallerini cezalandırarak uygunluk fonksiyonunu modifiye etmektedir. Eğer

çözüm, problemdeki kısıtları ihlal ediyorsa, bu ihlalleri temsil eden bir ceza terimi uygunluk fonksiyonuna eklenmektedir. Ceza terimi genellikle negatif bir değer olarak eklenmekte ve bu değer, ihlalin büyüklüğüne göre artmaktadır.

Ceza fonksiyonlarının temel avantajı, kısıtlı optimizasyon problemlerini klasik optimizasyon algoritmalarıyla çözmeyi mümkün kılmasıdır. Yani, algoritma her seferinde kısıtları kontrol etmek yerine, ihlalleri bir ceza ile işleyerek uygun çözüme daha kolay ulaşmaktadır. Optimizasyon sürecinde, ceza terimleri ihlalin doğası ve problemi çözmek için kullanılan algoritmanın hassasiyetine göre farklı şekillerde yapılandırılabilir. Ancak, ceza fonksiyonları kullanılırken, ceza terimlerinin uygun şekilde ayarlanması büyük önem taşır. Çok büyük ceza terimleri uygun çözümleri dışlayabilirken, çok küçük ceza terimleri ise ihlalleri yeterince cezalandıramaz.

Optimizasyon algoritmalarında farklı türlerde ceza fonksiyonları kullanılmaktadır. Bunlar ölüm cezası, statik ceza, dinamik ceza ve adaptif ceza olarak dört kategoriye ayrılmaktadır. Ölüm cezası, optimizasyon problemlerinde, kısıtları ihlal eden çözümleri tamamen geçersiz sayan ve bu çözümleri doğrudan eleme yaklaşımıdır. Bu yöntem, ihlal edilen kısıtları tolere etmez ve bu çözümler optimizasyon sürecinde dikkate alınmaz. Ölüm cezası yaklaşımı, kısıtı ihlal eden çözümleri tamamen eleme esasına dayanır. Avantajları arasında basitliği ve kolay uygulanabilir olması yer almaktadır. Kısıtları ihlal eden çözümler doğrudan elendiği için hesaplama yükü azalmaktadır. Ancak bu yaklaşımın dezavantajları da bulunmaktadır. İhlal edilen çözümleri tamamen göz ardı ettiği için potansiyel olarak iyi çözümler dışlanabilir. Bu durum, bazı iyi çözümlerin erken elenmesine ve arama alanının daralmasına neden olabilir. Ayrıca, çözümlerin gelişim potansiyelini değerlendirme fırsatı tanımaz.

Statik ceza, kısıt ihlaline uğrayan çözümlere sabit bir ceza puanı ekleyen bir yöntemdir. Bu ceza miktarı optimizasyon süreci boyunca değişmez ve önceden belirlenen sabit bir değerdir. Bu yöntem, kısıt ihlallerinin şiddetine bakılmaksızın sabit bir ceza uygulandığı için, ceza fonksiyonlarının basit bir versiyonu olarak kabul edilmektedir. Statik ceza yöntemi, sabit bir ceza değeri belirleyerek kısıtları ihlal eden çözümleri cezalandırmaktadır. Avantajları arasında uygulama kolaylığı ve ceza değerinin sabit olması nedeniyle hesaplamanın basit olması bulunur. Bu yaklaşım, kısıtları ihlal eden çözümleri tamamen elemekten süreçte esneklik sağlar. Ancak, dezavantaj olarak her duruma uygun sabit bir ceza değerinin bulunmasının zor olması öne çıkar. Bazı durumlarda ceza değeri yetersiz kalabilirken, diğer durumlarda fazla olabilir. Bu da algoritmanın çözüm arayışındaki etkinliğini azaltabilir.

Dinamik ceza yönteminde, ceza miktarı optimizasyon sürecine bağlı olarak değişir. Genellikle, kısıtı ihlal eden çözümlere verilen ceza, iterasyon sayısına veya çözümün kısıtı ihlal etme derecesine göre artar. Bu sayede, süreç ilerledikçe kısıtı ihlal eden çözümler giderek daha çok cezalandırılır ve algoritma, kısıtları ihlal etmeyen çözümler aramaya teşvik edilir. Dinamik ceza yöntemi, ceza miktarını iterasyon sayısına veya optimizasyon sürecine göre ayarlar. Avantajları arasında esnek yapısı ve optimizasyon sürecinin ilerlemesiyle ceza miktarının kademeli olarak artırılması yer alır. Bu sayede algoritma, ilerleyen iterasyonlarda kısıt ihlallerine karşı daha duyarlı hale gelir ve kısıtlara uygun çözümler bulma eğiliminde olur. Ancak, bu yöntemin dezavantajları arasında ceza miktarının doğru bir şekilde ayarlanmasının zorluğu bulunur. Yanlış ayarlanan ceza miktarı, algoritmanın performansını olumsuz etkileyebilir ve hesaplama karmaşıklığını artırabilir.

Adaptif ceza, kısıt ihlal eden çözümlere uygulanan ceza miktarını, problemin o anki durumuna ve çözümün kısıtları ihlal etme derecesine göre uyarlayan bir yöntemdir. Ceza miktarı, iterasyonlara ve algoritmanın ilerleme durumuna bağlı olarak optimize edilmektedir. Bu yaklaşım, statik ve dinamik cezaya kıyasla daha esnek olup, problem gereksinimlerine daha uygun cezalar belirlemeyi hedeflemektedir. Adaptif ceza yöntemi, ceza değerinin optimizasyon süreci ve problemin özelliklerine göre otomatik olarak ayarlanmasını sağlamaktadır. Avantajları arasında, algoritmanın daha esnek hale gelmesi ve kısıtı ihlal eden çözümlerden daha etkili bir şekilde uzaklaşabilmesi bulunur. Adaptif ceza, algoritmanın kısıtları ihlal eden çözümler üzerinde aşamalı olarak daha fazla baskı oluşturmaya olanak tanır. Ancak, bu yaklaşımın dezavantajları arasında, adaptif yapı nedeniyle ceza miktarının doğru bir şekilde ayarlanmasının zorluğu ve bu sürecin hesaplama maliyetini artırabilmesi yer alır. Ayrıca, doğru adaptasyon sağlanamazsa algoritma beklenen performansı göstermeyebilir.

Bu bağlamda, kalite faktörü optimizasyonu özellikle elektronik devrelerde kullanılan bileşenlerin verimliliğini artırmaya yönelik bir optimizasyon problemidir. Elektriksel devrelerin kalite faktörünü artırmak, kayıpları minimize ederek sistem performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Kalite faktörü maksimize optimizasyonu için günümüzde birçok seçenek bulunmaktadır. Kalite faktörünün maksimize edilmesinde bahsi geçen optimizasyon, bir sistem veya sürecin en iyi veya en optimum sonuca ulaşmasını sağlamak amacıyla mevcut kaynakları en etkin şekilde kullanma süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu süreçte, belirli bir hedefi veya kriteri en iyi şekilde karşılayan değerleri bulmak için değişkenleri optimize etmek önemli rol oynamaktadır.

Optimizasyon algoritmaları ise bir optimizasyon problemini çözmek için kullanılan matematiksel veya hesaplama tabanlı yöntemlerdir. Bu algoritmalar bir hedef fonksiyonu maksimize veya minimize etme gibi amaçlara yönelik tasarlanmaktadır. Bu algoritmalar, genellikle bir başlangıç noktasından başlayarak sistemi veya süreci iteratif bir şekilde geliştirmektedirler. Her adımda, mevcut çözüm veya değerler bir hedef fonksiyonu kullanılarak değerlendirilir ve daha iyi bir sonuç elde etmek için değiştirilmektedir. Bu iteratif süreç belirli bir durdurma kriterine ulaşıncaya kadar veya belirli bir zaman aşıldığında sona ermektedir. Süreç sonunda girdiler ve kısıt parametrelerine göre en ideal sonuç elde edilmektedir. Kısıt fonksiyonları, optimizasyon problemlerinde çözümlerin uyması gereken kuralları veya sınırlamaları tanımlamaktadır. Bu fonksiyonlar, genellikle eşitsizlikler veya eşitlikler şeklinde ifade edilir ve optimizasyon sürecinde belirli değişkenlerin alabileceği değer aralıklarını belirler. Kısıt fonksiyonları, gerçek dünya problemlerinin daha doğru ve anlamlı çözümler üretmesini sağlar.

Düzlemsel bobinlerin kalite faktörü değerinin optimizasyonunda sıklıkla kullanılan optimizasyon algoritmaları GWO, PSO, GA, ABC algoritması şeklinde sıralanmaktadır. Khan ve Choi (2016), çalışmalarında dört düzlemsel bobinli kablosuz güç transfer ünitesi tasarlamış ve kalite faktörünü optimize ve simüle etmek için frekans yapı simülasyonu programı ANSYS-HFSS kullanmışlardır. Ancak yaptıkları bu çalışmada yalnızca spiral ve karesel düzlemsel bobinleri tek katmanlı olarak ele almışlardır. Xie ve diğerleri (2022), araştırmalarında iki katmanlı bir spiral bobin için ANSYS-Maxwell yazılımı kullanarak modelleme gerçekleştirmiş, ardından kalite faktörünü optimize etmek için doğal bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olarak bilinen gri kurt optimizasyon algoritmasını (GWO) kullanmışlardır.

Jow ve Ghovanloo (2007), çalışmalarında kablosuz bağlantının güç iletim verimliliğini optimize etmek için yinelemeli bir bobin tasarım metodolojisi geliştirmişlerdir. Tasarım parametrelerini sabit indüktansa göre optimal şekilde seçmek için kullanılan geometrik programlama, global ve etkili bir çözüm algoritması olarak nitelendirilmektedir (Del Mar Hershenson ve diğerleri, 1999). Düzlemsel bobin tasarım imkanı sunan bir programda ise ikili arama algoritması (binary search algorithm) kullanılmıştır. Bu algoritma, arama sürecinin daha verimli ve hızlı olmasını sağlamak için tercih edilmiştir (Chawda, 2018).

Bu çalışmada, düzlemsel bobinlerin kalite faktörünün (Q) optimizasyonunu gerçekleştirmek amacıyla, PSO, GA ve GWO gibi meta sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Kalite faktörü, bobinin verimliliği ile doğrudan ilişkilidir

ve bobinin endüktansı, direnci ve kapasitansı gibi parametrelerle belirlenmektedir. Bu nedenle, kalite faktörünün optimize edilmesi hem bobin tasarımının performansını artırmak hem de endüstriyel uygulamalarda daha verimli devreler elde etmek açısından büyük önem taşır.

Bu üç optimizasyon algoritması, amaç fonksiyonu olan kalite faktörünün maksimum seviyeye çıkarılması için kullanılmaktadır. Optimizasyon işlemi sırasında, bobin tasarımının belirli fiziksel sınırlar ve kısıtlamalar altında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu kısıtlamalar ve sınırlar, bobinin geometrisi ve kullanılan malzeme özellikleri ile ilgilidir.

Bobin optimizasyonunda tasarım parametreleri, bobinin performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Bu parametrelerin belirlenmesi ve sınır aralıklarının doğru bir şekilde tanımlanması, bobinin kalitesini artırmak ve istenen elektriksel özellikleri elde etmek açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bobin tasarımında dikkate alınması gereken parametreler sarım sayısı (N), bobin dış çapı (d_{out}), iletken genişliği (w), iletkenler arasındaki mesafe (s) olarak belirlenmiştir. Dış çap (d_{out}) parametresine ait maksimum ve minimum sınır aralıkları bobinin yerleştirileceği alana ve uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sarım sayısı (N), bobinin indüktans ve direnç gibi elektriksel özelliklerini doğrudan etkileyen diğer bir parametredir. Sarım sayısı için belirlenen sınır aralıkları, istenen indüktans değerine ulaşmak ve bobinin performansını optimize etmek amacıyla titizlikle belirlenmelidir. İletken genişliği (w) ve iletkenler arasındaki mesafe (s) ise elektriksel iletim ve bobinin verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Tüm bu tasarım parametreleri, bobin optimizasyonu sürecinde birlikte değerlendirilerek belirlenen sınır aralıkları içerisinde en iyi performansı sağlayacak şekilde optimize edilmelidir. Optimizasyon algoritmaları kullanarak, bu parametrelerin etkilerini simüle etmek ve sonuçları analiz etmek, bobin tasarımında daha verimli çözümler elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu şekilde, bobinin performansı artırılarak daha etkili ve güvenilir bir tasarım elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada bobin tasarımı için parametre sınırları bobin tasarımcısı (coil designer) programı referans alınarak oluşturulmuştur. Parametreler arasında yer alan sarım sayısı ayrık değer iken, diğer parametrelerin tamamının sürekli değer alabildikleri görülmektedir.

Optimizasyon süreçlerinde tasarım parametrelerinin değerlerinin seçilmesi noktasında dikkate alınması gereken minimum ve maksimum değer aralıkları Çizelge

3.1’de sunulmuştur. Tüm bu sınır aralıkları çalışmanın inceleme yapmış olduğu dört farklı geometriye sahip bobin için de uygulanmıştır.

Çizelge 3. 1. Tasarım parametrelerine ait sınırlar

Sembol	Parametre	Birim	Sınır Aralığı
N	Sarım sayısı	-	1-16
d_{out}	Dış çap	mm	1.067-149.86
w	İletken genişliği	mm	0.051-1.016
s	İletkenler arası uzaklık	mm	0.051-0.305

Kısıtlı optimizasyon problemlerinde, kısıtların ihlal edilmemesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, kısıtların yönetimi için statik ceza fonksiyonları yöntemi kullanılmıştır. Statik ceza fonksiyonları yöntemi, kısıtları ihlal eden çözümlere sabit bir ceza puanı ekleyerek, bu çözümlerin uygunluk fonksiyonunu düşürür. Bu sayede, kısıtları ihlal eden çözümlerden uzaklaşılır.

Kalite faktörü maksimizasyon işleminde belirlenmesi gereken optimal tasarım parametrelerinin sınır aralıklarına göre seçilirken aynı zamanda iç çapın (d_{in}) iletken genişliğinden (s) büyük veya eşit olması gerektiği kısıtını sağlaması gerekmektedir (Pacurar ve diğerleri, 2014). Bu durum, bobin tasarımında güvenlik ve dayanıklılık sağlamak amacıyla gereklidir.

$$d_{in} \geq s \quad (3.14)$$

Bu tasarım kısıtı, bobin sarımlarının düzgün bir şekilde yerleştirilmesi için gerekli alanı sağlamaktadır. İç çap (d_{in}) bobinin merkezinden itibaren ilk sarımın başladığı noktayı belirlemektedir. Eğer iç çap (d_{in}) sarım aralığından küçük olursa, sarımlar fiziksel olarak birbirine çok yakın olur veya üst üste binebilir. Bu da bobinin tasarımının bozulmasına neden olabilmektedir. Sarımların birbirine çok yakın olması durumunda bobin iletkenleri arasında kısa devre olma riski artar ve bu durum elektriksel arızalara yol açabilmektedir.

Aynı zamanda bobinler üzerinden akım geçtiğinde, tellerde direnç nedeniyle bir miktar ısı meydana gelmektedir. İç çapın sarım aralığından büyük tutulması, sarımlar arasındaki mesafenin artmasını sağlayarak daha iyi hava akışı ve soğutma imkanı sunmaktadır. Sarımların birbirine çok yakın olması, ısının dışarıya yayılmasını

zorlaştırabilir. Bu da bobinin sıcaklığının artmasına ve olası aşırı ısınma sorunlarına yol açabilir. Daha büyük bir iç çap, sarımların ısıyı daha verimli bir şekilde dağıtmasına yardımcı olmaktadır.

Parazitik kapasitans, bobin telleri arasında oluşan istenmeyen kapasitif etkileşimlerdir. Sarımların çok yakın olması durumunda bu kapasitans artar ve bobinin performansını olumsuz etkileyebilir. İç çapın sarım aralığından büyük tutulması, bu etkileşimleri azaltarak parazitik kapasitansın düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda bobinin performansını iyileştirebilmektedir.

İç çapın sarım aralığından büyük olması, bobinin fiziksel yapısını korumanın yanı sıra manyetik alanların verimli yayılmasını, ısının daha iyi dağılmasını ve parazitik kapasitansın azalmasını sağlamaktadır. Bu tasarım kuralı, bobinin hem mekanik bütünlüğünü hem de elektriksel performansını garanti altına almak için önemli bir kısıt olarak uygulanmaktadır.

Sınır aralıklarına göre seçilecek olan optimal tasarım değerleri dış çapın, iç çap ve diğer parametrelerin bir kombinasyonuna eşit veya daha büyük olması gerektiğini ifade edecek şekilde Denklem 3.15'te yer alan kısıtı sağlamalıdır (Pacurar ve diğerleri, 2014). Bu kısıt ile kalite faktörünün maksimum olmasını sağlayacak parametreler belirlenirken iletken kalınlığının ve aralarındaki boşluğun anlamlı değerlerden oluşması kriteri aranır. Aynı zamanda iç çap ile dış çap arasındaki 0.3 oranının korunması tasarım açısından önem teşkil etmektedir (Ti, 2021).

$$d_{out} = d_{avg} + N(w + s - s) \quad (3.15)$$

$$d_{in} / d_{out} > 0.3 \quad (3.16)$$

İç çap ve dış çap arasındaki oranının 0.3 değerinin üzerinde olması, bobin tasarımında hem mekanik hem de elektriksel performans açısından önemli bir kısıtlamadır. Bu gereklilik, bobin tasarımında verimliliği ve performansı optimize etmek için çeşitli nedenlerle tercih edilmektedir. Bobin tasarımında iç çap ve dış çap arasındaki ilişki, bobinin fiziksel bütünlüğünü etkilemektedir. İç çapın dış çapa oranı çok küçük olduğunda, bobinin merkezi aşırı sıkışık olur ve bu durum mekanik gerilimlerin artmasına neden olabilir. Küçük bir iç çap, bobinin sarımlarının çok yakın olmasına ve sarımların düzgün bir şekilde yerleşmemesine yol açar. İç çapın dış çapa oranı 0.3 değerinin

üzerinde tutulduğunda, bobin daha sağlam bir yapıya sahip olur ve bu sayede bobinin mekanik dayanımı artar.

Bobinler, bir manyetik alan oluşturarak çalışır ve bu manyetik alanın verimli bir şekilde dağıtılması, bobinin performansını belirler. İç çap ve dış çap arasındaki farkın çok büyük olması durumunda, bobinin merkezine yakın sarımların oluşturduğu manyetik alan ile dış sarımların manyetik alanı arasında bir uyumsuzluk meydana gelebilir. Bu uyumsuzluk, manyetik alanın homojen bir şekilde yayılmasını zorlaştırarak bobinin endüktansını ve kalite faktörünü olumsuz etkileyebilir. İç çapın dış çapa oranı en az 0.3 olduğunda, manyetik alan daha dengeli bir şekilde dağıtılır ve bobin verimli bir manyetik yapı sağlar.

Bobin tasarımında, parazitik kapasitans istenmeyen bir etkidir. Sarımlar arasındaki kapasitif etkileşimler, özellikle iç çap çok küçük olduğunda artar. Küçük bir iç çap, sarımların birbirine çok yakın olmasına neden olarak bu kapasitif etkileşimleri artırır. Parazitik kapasitansın artması, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda bobinin performansını düşürür. İç çap/dış çap oranının en az 0.3 olması, bu kapasitif etkileşimleri azaltarak parazitik kapasitansın minimuma indirilmesine yardımcı olur.

Bobinin kalite faktörü, bobinin enerji depolama verimliliğinin bir ölçüsüdür. Kalite faktörünü maksimize etmek için bobinin endüktansının yüksek, seri direncinin ise düşük olması istenmektedir. İç çapın çok küçük olması, sarım uzunluğunu artırarak parazitik direnci yükseltir ve bu da kalite faktörünü olumsuz etkiler. İç çapın dış çapa oranı 0.3 değerinin üzerinde olduğunda, sarım uzunluğu dengelenir. Böylece seri direnç minimuma indirgenir ve bobinin kalite faktörü maksimize edilir.

Bu kısıtlar, statik ceza fonksiyonları yardımıyla optimizasyon sürecine entegre edilmiştir. Her bir algoritma, bu kısıtları göz önünde bulundurarak kalite faktörünü maksimum seviyeye çıkarmaya çalışır. Sonuç olarak, PSO, GA ve GWO algoritmaları hem hız hem de doğruluk açısından karşılaştırılarak en iyi algoritmanın belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, bobin tasarımı süreçlerinde kalite faktörünü optimize etmenin yanı sıra, modern optimizasyon algoritmalarının mühendislik problemlerine uygulanabilirliğini de göstermektedir.

3.6.1. Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) Algoritması

Günümüzde doğadan ve biyolojik sistemlerden ilham alınarak tasarlanmış birçok hesaplama ve optimizasyon yöntemi bulunmaktadır. Biyolojik sistemlerin bir başka türü

olan sosyal sistemler, özellikle bireylerin çevresiyle ve diğer bireylerle olan etkileşimlerini ve topluca (kolektif) davranışlarını analiz etmektedir. Bu tür toplu davranışlar, genellikle "sürü zekası" olarak tanımlanmaktadır (Tamer ve Karakuzu, 2006). PSO, biyolojik sistemlerde gözlemlenen kolektif davranışları taklit eden sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu yöntem, kuşların veya balıkların sürü davranışlarını taklit ederek çözüm arayışında bulunmaktadır. PSO, bir popülasyon (sürü) içindeki her bireyin (parçacık) en iyi çözümünü ve tüm sürünün en iyi çözümünü dikkate alarak çözüm uzayında hareket eder (Özsağlam ve Çunkaş, 2008). Her parçacık, hız ve pozisyon bilgisine sahiptir ve bu bilgileri kullanarak en iyi çözümü arar. Parçacıklar, kendi en iyi konumlarına ve sürünün en iyi konumuna göre hızlarını ve pozisyonlarını günceller.

PSO, özellikle karmaşık ve çok değişkenli problemlerin çözümünde etkili bir yöntem olarak bilinmektedir. PSO'nun avantajları arasında basitliği, az parametre gerektirmesi ve çeşitli problemler için esneklik sunması bulunmaktadır. PSO ile maksimizasyon yapmak, bir hedef fonksiyonunun en büyük değerini bulmak anlamına gelir. Bu süreç, parçacıkların hedef fonksiyonun en büyük değerini ararken birbirleriyle etkileşime geçerek ve en iyi çözümleri paylaşarak gerçekleştirilir. Parçacıklar, rastgele bir başlangıç noktasından başlayarak hızlarını ve pozisyonlarını güncelleyerek hedef fonksiyonun en yüksek değerine doğru hareket ederler.

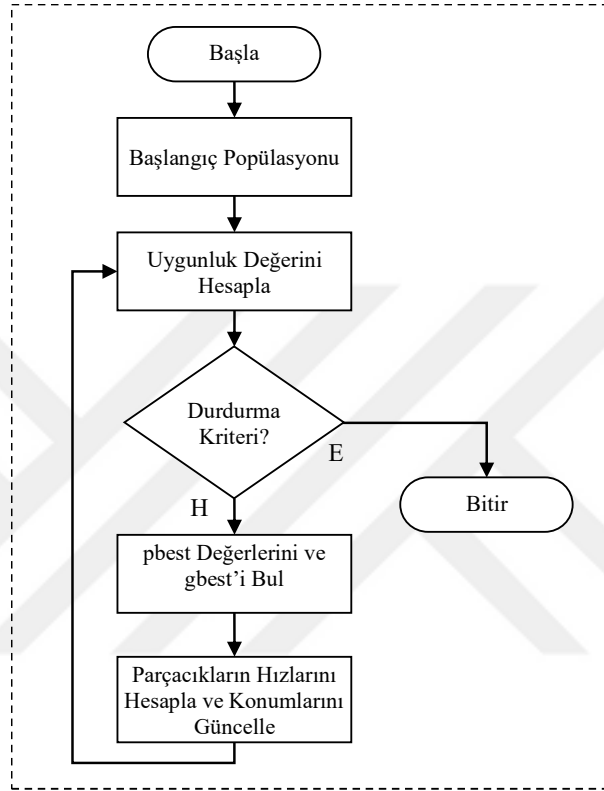
Çözüm uzayında, belirli bir sayıda parçacık (birey) rastgele konumla başlatılarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulmaktadır. Her parçacık bir çözüm vektörü olarak düşünülmektedir. Başlangıç popülasyonu için oluşturulan rastgele hızlar bu parçacıkların çözüm uzayındaki hareketini belirlemektedir. Her iterasyonda bu hız değerleri güncellenmektedir. Bu hız, parçacığın kişisel (*pbest*) ve sürünün en iyi konumunu (*gbest*) baz alarak hesaplanmaktadır.

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 rand_1^k (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 rand_2^k (gbest^k - x_i^k) \quad (3.17)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k \quad (3.18)$$

Denklem 3.17'de yer alan ω atalet katsayısını, v_i^k parçacığın mevcut hızını, x_i^k parçacığın mevcut konumu ifade etmektedir. c_1 parçacığın kendi bilgilerine göre ve c_2 parçacığın sürü bilgilerine göre hareket etmesini sağlayan katsayılar olarak kabul edilmektedir ve öğrenme faktörleri olarak adlandırılmaktadırlar. Denklem 3.18'de parçacığın çözüm uzayında yeni bir konuma hareket etmesini sağlayan ifade verilmiştir.

Hız ve pozisyon güncellemeleri belirli bir iterasyon sayısı ya da durdurma kriteri sağlanana dek devam etmektedir. Bu adımlar, parçacık sürü optimizasyonunun temelini oluşturmakta ve algoritmanın etkinliğini sağlayarak çözüm uzayında optimum çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Her iterasyonda, parçacıkların konumları güncellenir ve en iyi çözüme yaklaşmaları sağlanır. Şekil 3.5’de PSO’nun akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 3. 5. PSO akış diyagramı

Bu çalışmada parçacık sürü optimizasyon algoritması, kalite faktörünün maksimize edilmesi işleminde kullanılmaktadır. Kodda, parçacıkların pozisyonları ve hızları başlangıçta rastgele olarak belirlenir ve her iterasyonda güncellenmektedir. Parçacıklar, kişisel en iyi pozisyonlarını ve sürünün en iyi pozisyonunu kullanarak hedef fonksiyonun en yüksek değerine ulaşmaya çalışırlar. Bu süreç, belirli bir iterasyon sayısı boyunca tekrarlanarak en iyi çözümü bulur. Sonuçta elde edilen değerler sınır aralıkları ve kısıtlar dikkate alınarak maksimum kalite faktörünü sağlayan optimal tasarım parametrelerini vermektedir.

3.6.1.1. PSO Uygulama Adımları

PSO için kullanıcıdan girdi olarak talep edilen parametreler iterasyon sayısı (GN), parçacık sayısı (PN), öğrenme faktörleri (c_1, c_2) ve atalet ağırlığıdır (ω). İterasyon sayısı (GN), PSO'nun kaç iterasyon çalışacağını belirlemektedir. Parçacık sayısı (PN), çözüm uzayında kaç parçacığın (çözüm adayının) bulunduğunu belirlemektedir. Öğrenme faktörleri (c_1, c_2), parçacıkların hem kendi en iyi çözümlerine (pbest) hem de küresel en iyi çözüme (gbest) göre hareket etmelerini kontrol etmektedir. c_1 , parçacığın kendi deneyimlerine dayanarak ne kadar hızla hareket ettiğini belirlerken c_2 , sürünün en iyi çözümüne ne kadar hızla yaklaştığını göstermektedir. Atalet ağırlığı (ω), parçacığın mevcut hızını ne ölçüde koruyacağını belirlemektedir. Yüksek atalet ağırlığı, parçacığın daha geniş bir arama alanını keşfetmesini sağlarken, düşük atalet ağırlığı daha dar bir alanda arama yapmasını teşvik etmektedir. Bu parametreler, PSO'nun verimli çalışması için kritik öneme sahiptir ve optimizasyon sürecinin sonuçlarını doğrudan etkiler.

Optimize edilecek tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu sınırlar, dört temel tasarım parametresiyle ilişkilidir. Bu tasarım parametreleri sarım sayısı (N), bobin dış çapı (d_{out}), iletken genişliği (w), iletkenler arasındaki mesafe (s) şeklinde ifade edilmektedir. Bu parametreler, düzlemsel bobinlerin fiziksel tasarımını tanımlamakta ve belirlenen sınırlar ve kısıtlar dahilinde kalite faktörünün maksimum değerini sağlayacak şekilde optimum değerleri belirlenmektedir.

Başlangıç popülasyonu, tasarım parametrelerine ait sınırlar dahilinde rastgele oluşturulmuş parçacıklardan meydana gelmektedir. Her bir parçacık, dört farklı tasarım parametresi için rastgele seçilmiş bir çözümden oluşmaktadır (Şekil 3.6). Popülasyonun ilk konumu, verilen sınırlar dahilinde rastgele olarak oluşturulmakta ve her bir parçacığın başlangıç hızları sıfır olarak ayarlanmaktadır. Bu aşamada, aynı zamanda parçacıkların kendi en iyi konumları (pbest) ve sürünün en iyi çözümü (gbest) tanımlanmaktadır. Başlangıçta, pbest değerleri parçacıkların başlangıç konumları ile aynıdır, ancak iterasyon ilerledikçe güncellenmektedir. Problemin doğası gereği bobin dış çapı (d_{out}), iletken genişliği (w), iletkenler arasındaki mesafe (s) değerleri sürekli iken sarım sayısı (N) ayrık bir parametredir. Bunu sağlayabilmek için popülasyon oluşturma aşamasında sarım sayısı değerine round() fonksiyonu uygulanmıştır. Bu fonksiyon, ondalık bir sayıyı en yakın tam sayıya yuvarlar. Bu işlem sonucunda elde edilen sarım sayısı değeri sürekli bir değer yerine tam sayılardan oluşan ayrık bir değere dönüşür.

	1	2	3	4	5
	ParcacikNumarasi	N	Dout	w	s
1	1	6	60.9036	0.2582	0.0701
2	2	1	1.4814	0.7974	0.2195
3	3	13	25.3930	0.1457	0.1761
4	4	10	107.6294	0.3239	0.1852
5	5	12	35.7295	1.0148	0.1728
6	6	4	6.3284	0.2961	0.2473
7	7	13	75.3662	0.7516	0.2681
8	8	4	71.1372	0.7616	0.1794
9	9	8	81.7599	0.9581	0.0957
10	10	3	115.8910	0.8972	0.2139
11	11	3	3.0366	0.7732	0.0516
12	12	9	44.7626	0.9865	0.1848
13	13	16	17.5490	0.5820	0.1193
14	14	7	86.2855	0.3747	0.1808
15	15	12	11.8715	0.6171	0.1612
16	16	2	42.5548	0.5292	0.2680
17	17	9	71.3519	0.2573	0.1157
18	18	13	90.7613	0.5453	0.0896
19	19	11	140.1213	0.3593	0.2275
20	20	6	33.1746	0.8614	0.2387

Şekil 3. 6. Örnek bir PSO başlangıç popülasyon

Uygunluk değeri, optimizasyon probleminin amacını temsil etmekte ve algoritmanın çözüm uzayındaki en iyi çözümleri bulmasına imkan tanımaktadır. Bu işlem için amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Genellikle probleme özel olarak belirlenen bu fonksiyon, tasarım kriterlerine, kısıtlara ve optimizasyon hedeflerine dayanmaktadır. Bu çalışmada uygunluk değeri, bobinin kalite faktörünü (Q) maksimize etmek üzere tasarlanmıştır. Bu fonksiyonun hesaplanmasında, tasarım parametrelerinin yanı sıra fiziksel sabitler ve malzeme özellikleri de dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada kalite faktörü için Denklem 2.1’de verilen matematiksel ifade kullanılmıştır. Uygunluk değeri bu denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

Başlangıç popülasyonunun uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra, her bir parçacığın şu ana kadarki en iyi bireysel çözümü (pbest) ve popülasyonun genelinde bulunan en iyi çözüm (gbest) belirlenmektedir. Bireysel en iyi çözüm, her parçacığın önceki iterasyonlar boyunca bulduğu en iyi konumdur. Grup en iyi çözüm ise, tüm popülasyon içerisinde en yüksek uygunluk değerine sahip olan parçacığın konumudur. PSO algoritmasının en önemli özelliği, bu bireysel ve grup çözümlerine göre parçacıkların davranışlarını dinamik olarak güncellemesidir.

Her iterasyonda, parçacıkların hız ve konumları Denklem 3.17 ve Denklem 3.18’e göre güncellenmektedir. Burada, v_i parçacığın hızı, x_i ise konumunu temsil eder. Her parçacık, kendi en iyi çözümüne ve sürünün en iyi çözümüne göre hızını günceller. Rastgele faktörler bu süreçte parçacıkların farklı yollardan ilerlemesini sağlar. Bu da

çözümlerin çeşitli olmasına ve algoritmanın yerel minimumlara takılmamasına yardımcı olur.

Bu optimizasyon probleminde bazı fiziksel kısıtlamalar bulunmaktadır. Algoritmanın kontrol ettiği kısıt fonksiyonları Denklem 3.14, Denklem 3.15 ve Denklem 3.16' da matematiksel olarak açıklanmıştır. Bu kısıtlar, her iterasyonda kontrol edilir ve ihlal edilen kısıtlar için ceza puanı uygulanır. Ceza mekanizması, uygunluk fonksiyonuna eklenerek parçacığın uygunluk değerini düşürür, bu da kısıtları ihlal eden çözümlerin tercih edilmemesini sağlar.

Her iterasyon sonunda, tüm parçacıklar arasında en iyi uygunluk değerine sahip olan çözüm (gbest) seçilir. Ayrıca, her parçacığın kendi en iyi konumu (pbest) da güncellenir. İterasyonların sonunda en iyi çözüm ve bu çözümle ilişkili parametreler Excel dosyasına kaydedilir. Böylece, en iyi bobin tasarımı ve bu tasarımı elde eden parametreler tespit edilmiş olur.

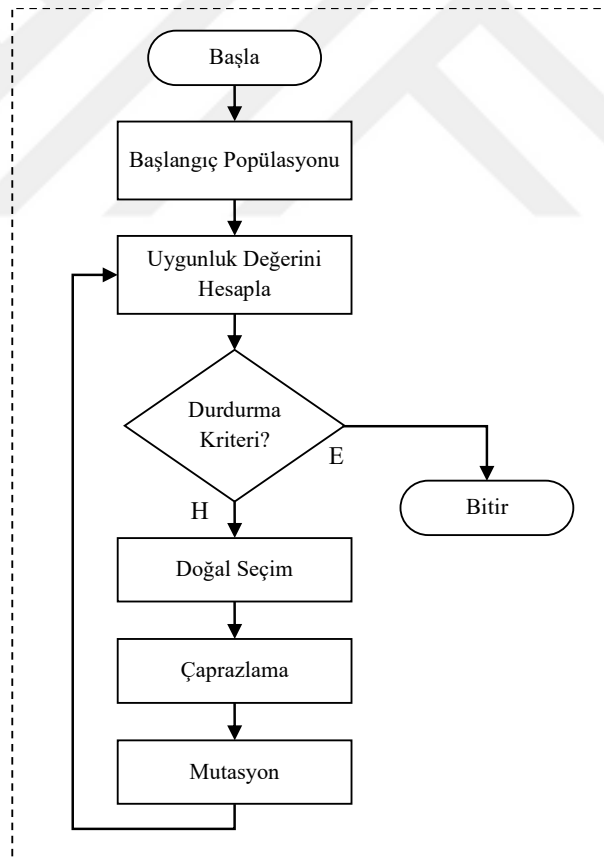
Uygunluk fonksiyonu, bobinin endüktans, kapasitans ve seri direnç gibi elektriksel parametrelerine dayanarak hesaplanır. Özellikle, bobin tasarımındaki kısıtlar ve ceza mekanizması, algoritmanın sadece fiziksel olarak geçerli çözümleri aramasını sağlar. Tasarım parametrelerinin geniş bir çözüm uzayı boyunca optimize edilmesi, bobinlerin çeşitli fiziksel ve elektriksel parametrelerinin dikkate alınarak gerçekleştirilir. Böylece, bobinin kalite faktörü gibi kritik performans ölçütleri en üst düzeye çıkarılmaktadır.

3.6.2. Genetik Algoritma (GA)

Biyolojik sistemlerden ilham alınarak tasarlanmış bir diğer algoritma ise GA'dır. GA, evrimsel biyolojiden ilham alan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma mantığı Charles Darwin'in en uygun olanın hayatta kalması ilkesini temel almaktadır (Beryl ve diğerleri, 2013). Bu yöntem, doğal seçim ve genetik süreçleri taklit ederek çözüm arayışında bulunmaktadır. GA, popülasyon bazlı bir yaklaşımla çalışmakta ve bireylerin genetik özelliklerini kullanarak evrimsel süreçleri simüle etmektedir. Her birey, bir çözüm vektörü olarak düşünülmekte ve genetik operatörler kullanılarak yeni bireyler oluşturulmaktadır.

GA'nın temel adımları, başlangıç popülasyonu oluşturma, uygunluk değerlendirmesi, doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon olarak sıralanmaktadır (Şekil 3.7). Başlangıç popülasyonu rastgele çözümlerden oluşur ve her bireyin uygunluğu

hesaplanmaktadır. Bu işlem için amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Doğal seçim işlemi, daha iyi çözümleri seçmek için uygulanmaktadır. Daha yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin, bir sonraki nesle geçme olasılığı daha yüksektir. Genetik algorithmada rulet tekerleği, rastgele, ağırlıklı, ağırlıklı rastgele, eşik değer, seçkinlik, turnuva ve hiyerarşik metotları doğal seçim yöntemleridir. Doğal seçim, popülasyondaki iyi çözümlerin bir sonraki nesle aktarılmasını sağlayarak, evrimsel sürecin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. Çaprazlama işlemi, genetik materyalin birleştirilmesiyle yeni çözümler oluşturmayı ifade etmektedir. İki ebeveyn bireyin genetik bilgisini birleştirerek yeni bireyler (çocuklar) üretme işlemidir. Bu işlem, popülasyonda genetik çeşitliliği artırmakta ve iyi özelliklerin bir araya gelmesini sağlamaktadır. Tekdüze çaprazlama, çok noktalı çaprazlama ve karma çaprazlama, çaprazlama yöntemlerinden yalnızca birkaçıdır. Mutasyon, genetik çeşitliliği artırarak yerel minimumlara takılmayı önlemektedir. Yeni popülasyon oluşturulurken zayıf ebeveynler güçlü yavrularla değiştirilmektedir (Ulukök Köse, 2017).



Şekil 3. 7. GA akış diyagramı

Bu çalışmada GA, düzlemsel spiral bobinlerin kalite faktörünü maksimize etmek için kullanılmaktadır. Her birey, tasarım parametrelerini içeren bir kromozom olarak

temsil edilmektedir. Başlangıçta rastgele oluşturulan popülasyonda her bireyin kalite faktörü hesaplanmakta ve bu değer uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Çaprazlama ve mutasyon işlemleriyle yeni bireyler oluşturularak, uygunluk değeri yüksek bireyler bir sonraki nesil için seçilmektedir. Çaprazlama oranı, çaprazlama işleminin ne sıklıkla uygulanacağını belirtirken mutasyon oranı, popülasyondaki bireylerin genlerinde mutasyon işleminin ne sıklıkla uygulanacağını belirlemektedir. Algoritma, kalite faktörünü maksimize eden en iyi tasarım parametreleri setini bulana kadar iterasyonlarla tekrarlanmaktadır.

3.6.2.1. GA Uygulama Adımları

Kalite faktörünün maksimizasyonu için uygulanan GA, kullanıcıdan gerekli parametreler alınarak başlatılmaktadır. Bu parametreler arasında jenerasyon sayısı (GN), popülasyon büyüklüğü (PN), çaprazlama oranı (CO) ve mutasyon oranı (MO) yer almaktadır. Jenerasyon sayısı, algoritmanın kaç iterasyon yapacağını belirlerken, popülasyon büyüklüğü her nesilde kaç bireyin yer alacağını ifade etmektedir. Çaprazlama oranı, algoritmada popülasyondaki bireylerin ne kadarının çaprazlanacağını belirlemektedir. Bu işlem, iki bireyin genetik bilgilerini birleştirerek yeni bireyler oluşturmakta ve genetik çeşitliliği artırmaktadır. Yüksek çaprazlama oranı (%70–%90), daha geniş bir arama sağlar, ancak yerel optimumlara takılma riskini artırabilir. Düşük çaprazlama oranı (%50 veya daha az), çeşitliliği korur ancak çözüm sürecini yavaşlatabilir. Mutasyon oranı, bireylerin genlerinde rastgele değişiklikler yapılmasını sağlar ve çözüm uzayında keşif yapmayı kolaylaştırır. Yüksek mutasyon oranı (%10 veya daha fazla), daha fazla keşif sağlar ancak iyi çözümleri bozabilir. Düşük mutasyon oranı (%1–%5), yerel optimumlardan kaçınmak için yeterli çeşitlilik yaratır. Çaprazlama ve mutasyon oranları, algoritmanın hem çözüm üretme hem de yerel optimumlardan kaçınma kabiliyetini etkiler. Dengeyi sağlamak hem hızlı hem de etkili bir optimizasyon süreci için kritik öneme sahiptir.

Kullanıcının giriş parametrelerini tanımlamasının ardından Çizelge 3.1’de yer alan sınır aralıkları içerisinde başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Her bireyin dört parametresi bulunmaktadır. Bu parametreler sarım sayısı (N), bobin dış çapı (d_{out}), iletken genişliği (w), iletkenler arasındaki mesafe (s) şeklinde sıralanmaktadır. Popülasyondaki her birey için bir uygunluk değeri hesaplanır. Bu hesaplama, kalite faktörüne ait amaç fonksiyonuna dayanmaktadır. Ayrıca, tasarım kısıtları kontrol edilerek, bu kısıtları ihlal

eden bireyler cezalandırılmaktadır. Uygunluk değeri, bobin tasarımında istenen performans kriterlerine en uygun çözümün ne kadar yakın olduğunu göstermektedir.

Her nesilde popülasyondaki bireyler arasında en iyi çözüm belirlenmektedir. En yüksek uygunluk değerine sahip birey, "global en iyi çözüm" olarak kaydedilmektedir. Bu birey, daha sonraki nesillerde çaprazlama ve mutasyon süreçlerinde rehber alınacak olan bireydir. Algoritma, her nesilde en iyi çözümü güncelleyerek daha iyi sonuçlar elde etmeye çalışır.

Doğal seçim aşaması, genetik algoritmanın önemli bir parçasıdır. Bu aşamada, her bireyin seçilme olasılığı uygunluk değeriyle orantılıdır. Yani, uygunluk değeri yüksek olan bireylerin seçilme olasılığı yüksektir. Bunun amacı, popülasyondaki çeşitliliği artırmak ve daha geniş bir çözüm uzayını araştırmaktır. Bu çalışmada doğal seçim işleminde rulet tekerleği yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem GA'da kullanılan en yaygın doğal seçim yöntemleri arasında yer almaktadır. Bireylerin popülasyon içerisindeki uygunluk değerlerine göre bir sonraki nesil için seçilmelerini sağlamaktadır. Bu işlem, doğada güçlü olan bireylerin daha yüksek hayatta kalma olasılığına sahip olduğu biyolojik seleksiyon mekanizmasına dayanmaktadır. Rulet tekerleği seçimi, her bireyin uygunluk değeriyle orantılı olarak seçilme olasılığını artırarak, daha iyi performans gösteren çözümlerin bir sonraki nesle geçme şansını yükseltmektedir.

Bu çalışmada doğal seçim işleminin ardından karıştırarak çaprazlama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem iki ebeveyn bireyden yeni bireyler üretmeyi sağlayan genetik bir operatördür. Çaprazlama işlemi sırasında iki ebeveynin genetik bilgileri bir araya getirilerek, yeni bireyler (çocuklar) oluşturulmaktadır. Bu işlem, her iki ebeveynin özelliklerinin yeni bireylere aktarılmasını sağlamaktadır. Eğer çaprazlama işlemi sarım sayısı (N) üzerinde yapılmışsa, bu değerler tam sayı olmalıdır ve bu nedenle çaprazlama sonrası elde edilen değerler yuvarlanmalıdır. Bunun sebebi sarım sayısı parametresinin diğer parametrelerin tersine ayrık özellikte olmasıdır.

Mutasyon işlemi, popülasyona rastgele varyasyon ekleyerek yeni çözümler keşfetmeyi amaçlar. Kodda, mutasyon oranına göre rastgele seçilen bireylerin genlerinde değişiklik yapılır. Bu işlem, yerel minimumlardan kaçınmak ve çözüm uzayında daha geniş bir arama yapmak için önemlidir. Eğer mutasyon işlemi sarım sayısı üzerinde gerçekleşirse, bu parametre de tam sayıya yuvarlanır.

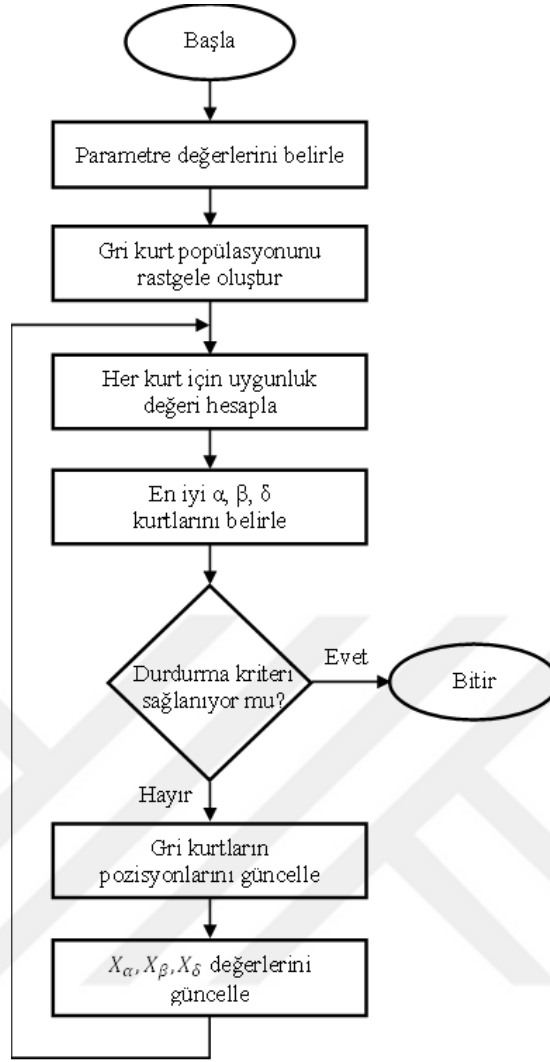
Her nesli oluşturan popülasyon, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulduktan sonra, yeni bireyler üretilir ve bu bireylerin uygunluk değerleri tekrar

hesaplanır. Böylece algoritma, daha iyi çözümler elde etmek için nesiller arası ilerleme sağlar. Bu süreç, belirlenen jenerasyon sayısına ulaşılan kadar devam eder.

3.6.3. Gri Kurt Optimizasyon (GWO) Algoritması

GWO, sosyal hayvanlardan ilham alan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir ve özellikle gri kurtların sürü davranışlarını taklit etmektedir. Gri kurtların avlanmasından esinlenerek geliştirilen algorithmada, model davranış olarak avı çevreleme, avlanma, ava saldırma, avı keşif aşamaları baz alınmaktadır (Belli ve Bingol, 2023). GWO, bir popülasyon içindeki her bireyin en iyi çözümünü ve tüm sürünün en iyi çözümünü dikkate alarak çözüm uzayında hareket etmektedir.

GWO'nun temel adımları, başlangıç popülasyonu oluşturma, uygunluk değerlendirmesi, sosyal etkileşimler ve çözüm güncellemeleri olarak sıralanmaktadır (Şekil 3.8). Başlangıç popülasyonu rastgele çözümlerden oluşur ve her gri kurdun uygunluğu değerlendirilmektedir. Sosyal etkileşimler, en iyi çözümlerle iletişim kurarak ve lider olarak en iyi çözüme yönelerek gerçekleşmektedir. Bu etkileşimler, gri kurtların pozisyonlarını güncelleyerek en iyi çözüme ulaşmalarını sağlamaktadır. Bu algorithmada kurtların hiyerarşileri alfa (α), beta (β), ve delta (δ) olarak üç sınıf olarak ele alınmaktadır. α , en güçlü konumda kabul edilmekle birlikte diğer kurtlara avlanma yönünde rehberlik etmektedir. β , ikinci sırada yer almakta ve karar sürecince rol almaktadır. İkinci en iyi çözüm niteliğindedir. δ , üçüncü en iyi çözümü temsil etmektedir. Savunma ve gözetleme gibi görevleri üstlenmektedir. Algoritmanın akışında, arama ajanları bu üç en iyi çözüme göre pozisyonlarını güncelleyerek optimum çözüm arayışını sürdürmektedirler.



Şekil 3. 8. GWO akış diyagramı

Kurtların sosyal hiyerarşisi matematiksel olarak modellenirken en uygun çözüm alfa (α) olarak kabul edilmektedir. Sonraki çözümler ise sırası ile beta (β), ve delta (δ) olarak sınıflandırılmaktadır. GWO algoritmasında avlanma alfa (α), beta (β), ve delta (δ) tarafından yönlendirilmektedir. Kurtlar bu üç lider kurdu takip ederek avlanma yani optimizasyon sürecini yürütmektedirler.

Kurtlar, hedefe (ava) yaklaştıkça onu çevrelemektedirler. Bu çevreleme davranışını modellemek için bazı matematiksel denklemler kullanılmaktadır. Gri kurtlar, avın pozisyonuna yakınlaşırken vektörlerle (A ve C katsayılarıyla) avın konumu güncellenmektedir. Bu katsayılar ve vektörler yardımıyla kurtlar avın konumuna yaklaşarak kendi pozisyonlarını sürekli olarak güncellemektedir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (3.19)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (3.20)$$

Matematiksel modellerde yer alan t iterasyon sayısını ifade ederken \vec{X}_p adayın konum vektörünü ve \vec{X} bir kurdun pozisyon vektörünü ifade etmektedir. \vec{A} ve \vec{C} vektörlerinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifadeler ise Denklem 3.21 ve Denklem 3.22' de yer almaktadır.

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3.21)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (3.22)$$

Denklem 3.21 ve Denklem 3.22'de yer alan r_1 ve r_2 $[0,1]$ aralığında rastgele sayılardan oluşmaktadır. \vec{a} , iterasyon ilerledikçe lineer olarak 2'den 0'a azalmaktadır. Bu katsayı, kurtların avdan uzaklıklarına göre nasıl hareket edeceklerini kontrol etmektedir.

Gri kurtlar, avın yerini bulup onu kuşatma yeteneğine sahiptir. En iyi çözüm (alfa) hedefin en yakınında kabul edilir. Diğerleri (beta ve delta) ise bu sürece katılabilir. Ancak avın tam yeri hakkında kesin bilgi olmadığından kurtlar sürekli olarak konumlarını güncellerler. Burada, alfa, beta ve delta kurtların avın yerini tespit etme süreci matematiksel olarak modellenir ve yeni pozisyonlarını bulmak için bu ifadeler kullanılır. Her kurt, alfa, beta ve delta kurtların en iyi pozisyonlarına göre kendi pozisyonunu güncelleyerek optimizasyon sürecine katkıda bulunur. Bu süreçte, her bir ajanın (kurt) pozisyonu üç lider ajanın (alfa, beta, delta) pozisyonlarının ortalaması alınarak belirlenir.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \quad \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (3.23)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta, \quad (3.24)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (3.25)$$

Ava saldırma aşamasında kurtlar avı kuşattıklarında hareketsiz kalarak avı çevreler ve saldırıyı başlatırlar. Ava yaklaşmanın matematiksel modeli, \vec{A} 'nın azalması ile gösterilir. \vec{A} 'nın değeri 2'den 0'a doğru azalır ve bu azalma süreci, algoritmanın sömürü aşamasına geçtiğini gösterir. Yani, başlangıçta geniş bir alanı arayan kurtlar, zamanla

daralan bir bölgeye odaklanır ve avın konumuna daha fazla yaklaşırlar. Kurtlar avı çevrelediğinde ve hareketsiz kaldığında, saldırı gerçekleşmiş olur.

Keşif aşamasında gri kurtlar, alfa, beta ve delta pozisyonlarına göre avı arar. Aradaki farkı (mesafeyi) matematiksel olarak modellemek için \vec{C} katsayısı kullanılır. \vec{C} 'nin değeri 1'in üzerinde veya altında olduğunda, kurtlar avdan uzaklaşarak geniş bir arama yapar. Bu durum, algoritmanın keşif aşamasında olduğunu gösterir. Keşif aşamasında kurtlar, daha geniş bir arama alanını keşfeder ve global optimuma ulaşmak için rastgele değerler kullanır. $|\vec{A}| < 1$ olduğunda kurtlar avı yakalamaya daha yakın olur (sömürü aşaması). $|\vec{A}| > 1$ olduğunda ise kurtlar avdan uzaklaşarak geniş bir alanı keşfeder (keşif aşaması).

Algoritmanın araştırma kapasitesini artırmak için kullanılan \vec{C} vektörü, kurtların avdan ne kadar uzaklaştığını veya ne kadar yaklaştığını kontrol eder. \vec{C} , kurtların rastgele bir şekilde hareket etmelerini sağlar ve onları yerel tuzaklardan kurtararak daha geniş alanları keşfetmelerine olanak tanır. \vec{C} vektörü, gri kurtların avlanma süreçlerinde, doğadaki engellerin avlara ulaşmayı zorlaştırmasına benzer şekilde, kurtların avın pozisyonuna erişimini rastgele bir biçimde zorlaştıran bir etkiye sahiptir. Bu, kurtların daha geniş bir alanı keşfetmelerini ve avın konumunu daha iyi tahmin etmelerini sağlar. C vektörü, kurtların avın etrafında serbestçe dolaşmalarına yardımcı olan bir araçtır. Aynı zamanda, avın etrafında rastgele bir ağırlık yaratır ve bu da kurtların avı yakalamak için daha dikkatli bir şekilde pozisyonlarını güncellemelerini sağlar.

3.6.3.1. GWO Uygulama Adımları

GWO algoritması, belirli bir iterasyon sayısı (GN) ve popülasyon büyüklüğü (PN) ile çalışmaktadır. Başlangıç popülasyonu, algoritmada belirtilen sınırlar içinde rastgele değerler ile oluşturulmaktadır. Rastgele oluşturulan başlangıç popülasyonuna göre uygunluk (fitness) değerleri hesaplanmaktadır. Bu uygunluk değerleri, çözümün hedef fonksiyonuna ne kadar yakın olduğunu ölçmektedir. Algoritma, bu uygunluk değerini maksimize etmeyi amaçlamaktadır.

GWO algoritmasında, en iyi çözümü temsil eden kurt alfa (α) olarak adlandırılmıştır. İkinci en iyi çözüm beta (β) ve üçüncü en iyi çözüm delta (δ) olarak adlandırılmaktadır. Diğer tüm kurtlar ise omega (ω) olarak tanımlanır ve lider kurtların yönlendirdiği pozisyonlara göre hareket ederler. Algoritmada en iyi değerlerin

belirlenmesi adımı, popülasyonun geri kalan kısmının lider kurtların pozisyonlarına göre konumlarını güncelleyebilmesi için gereklidir.

Her iterasyonda kurtların uygunluk değerleri hesaplanır ve en iyi uygunluk değerine sahip kurt alfa olarak güncellenir. Benzer şekilde, beta ve delta da uygunluklarına göre güncellenir. Bu güncelleme işlemi, kurtların avı çevrelemesi ve en iyi çözüme (alfa kurt) yaklaşması için yapılan bir simülasyondur. Her iterasyon sonunda, algorithmada kullanılan parametrelerden biri olan a değeri, iterasyon sayısına göre lineer olarak azaltılır. Bu, kurtların arama alanını daraltarak daha hassas bir çözüm arayışına girmelerini sağlar. Ayrıca, parametrelerin sınırların dışına çıkmaması için kontrol mekanizmaları uygulanır. Eğer herhangi bir parametre sınırları aşarsa, o parametre sınırlar dahilinde güncellenir: \vec{A} ve \vec{C} katsayıları kullanılarak kurtların avı kuşatması ve ona yaklaşması sağlanır. Denklem 3.23, Denklem 3.24 ve Denklem 3.25 kullanılarak kurtların lider kurtların pozisyonuna ne kadar yakın veya uzak oldukları belirlenmektedir. \vec{A} katsayısı, kurtların avı çevreleme ve ona yaklaşma eğilimlerini kontrol ederken, \vec{C} katsayısı rastgele sayılara dayalı bir hareket belirler. Diğer kurtların pozisyonları, bu üç lider kurdun ortalama pozisyonuna göre güncellenir. Ayrıca, fiziksel tasarım sınırlarını ihlal eden çözümler için ceza fonksiyonları kullanılarak uygunluk değeri düşürülür. Algoritma, bu parametrelerin optimize edilmesini ve kalite faktörünün maksimize edilmesini hedefler.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

MATLAB programı kullanarak gerçekleştirilen bu çalışmada, kalite faktörünü maksimize etmek amacıyla dört tasarım parametresinin optimal değerlerini belirlemek için optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalite faktörünün maksimum değerinin elde edilmesi için optimum tasarım parametrelerini sunan üç ayrı algoritma test edilmiş ve sonuçları Texas Instruments tarafından sunulan web tabanlı bir araç ile karşılaştırılmıştır. (Ti, 1995), bir elektronik mühendisliği yazılımıdır ve indüktörlerin tasarımını optimize etmek için kullanılmaktadır.

Bu yazılım, kullanıcıların belirli bir uygulama için en uygun indüktör parametrelerini belirlemelerine yardımcı olur. Tasarım parametreleri arasında endüktans, akım taşıma kapasitesi, frekans tepkisi ve termal performans gibi faktörler bulunmaktadır. Bobin tasarımı, kablosuz güç aktarımı, manyetik sensörler, yüksek frekanslı devreler ve RFID gibi uygulamalarda kullanılan bobinlerin elektriksel ve manyetik parametreleri hakkında kullanıcıya cevaplar sunmaktadır. Bunlar arasında endüktans (L), direnç (R), frekans tepkisi ve Q faktörü gibi önemli parametreler yer almaktadır.

Kalite faktörünü iyileştirmede kullanılan PSO, GA ev GWO algoritmaları için ortak parametreler iterasyon sayısı (GN) ve parçacık sayısı (PN) dır. PSO için spesifik olarak gerekli parametreler öğrenme faktörleri (c_1, c_2) ve atalet ağırlığı (ω) olarak belirlenmiştir. GA için ise gerekli olan ek parametreler çaprazlama ve mutasyon oranı olarak belirlenmiştir.

Her bir algoritma için ilgili giriş değeri kullanıcıdan alınarak sabit tutulmuş ve bu değerlerle program her değerlendirme için 50 kez çalıştırılmıştır. Optimizasyon işlemlerinin her bir çalıştırmasında elde edilen veriler Excel dosyasına kaydedilmiş ve daha sonra bu verilerin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar analiz edilmiştir. Bu yöntem, rastgele sapmaları minimize ederek daha güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmuştur. Kullanılan dört temel tasarım parametresi şunlardır: N , d_{out} , s ve w . Bahsedilen bu işlemler üç optimizasyon algoritması için de gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon işlemi, kare, dairesel, altıgen ve sekizgen geometrilere sahip bobinler için ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir geometrik şekil için tasarım parametrelerinin maksimum kalite faktörünü sağlayacak optimum değerleri belirlenmiştir. Bu sürecin her bir adımında MATLAB kodu, belirlenen sınır değerler içinde rastgele başlangıç popülasyonları oluşturmuş ve her iterasyonda bu popülasyonları güncelleyerek en uygun çözümleri aramıştır.

$$\varepsilon_f = \frac{Q - Q_{Ti}}{Q_{Ti}} 100, \% \quad (4.1)$$

Q_{Ti} , bobin tasarım uygulamasından elde edilen kalite faktörünü ifade ederken Q değeri bu çalışmada elde edilen kalite faktörü değerini göstermektedir. ε_f , hata oranını temsil etmektedir.

Hata oranlarının hesaplanması, MATLAB'da elde edilen parametrelerin pratikte ne kadar doğru ve geçerli olduğunu göstermektedir. Hata oranı düşük olan sonuçlar, optimizasyon sürecinin ve kullanılan algoritmanın güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu süreçte elde edilen hata oranları, optimizasyon işleminin başarısını ve doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Test sürecinde, MATLAB ile belirlenen optimum parametreler Coil Designer Texas Instruments web uygulamasına girilmiştir. Bu uygulama, bobin tasarımının pratikte nasıl performans göstereceğini analiz etmek için kullanılmıştır. Uygulama, bobinlerin elektriksel özelliklerini hesaplayarak tasarımın gerçek dünya performansını simüle etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, MATLAB optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda, her bir geometrik şekil (kare, dairesel, altıgen ve sekizgen) için hata oranları hesaplanmıştır. Hata oranı, MATLAB ile elde edilen teorik sonuçlar ile Coil Designer uygulamasında elde edilen pratik sonuçlar arasındaki farkı ifade etmektedir. Bu fark, genellikle yüzde olarak ifade edilir ve optimizasyon sürecinin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır.

Kullanıcı tarafından belirlenen algoritma giriş parametreleri, bir optimizasyon algoritmasının performansını ve sonuçlarını doğrudan etkileyen önemli bileşenlerdir. Giriş parametreleri arasında popülasyon büyüklüğü (PN), jenerasyon sayısı (GN), çaprazlama oranı (CO) ve mutasyon oranı (MO) gibi değerler bulunmaktadır. Bu parametreler, algoritmanın arama alanında en uygun çözümü bulma yeteneğini belirlemektedir. Popülasyon büyüklüğü (PN), her jenerasyonda kaç bireyin değerlendirileceğini belirler ve algoritmanın çözüm uzayında ne kadar geniş bir alanda arama yapacağını tanımlar. Daha büyük popülasyonlar genellikle daha kapsamlı bir arama sağlar, ancak hesaplama maliyeti de artar. Jenerasyon sayısı (GN) ise algoritmanın kaç iterasyon çalışacağını belirler.

Daha fazla jenerasyon, algoritmanın daha iyi çözümler bulma olasılığını artırabilir, ancak bu da zaman açısından maliyetli olabilir. Çaprazlama oranı (CO) ve

mutasyon oranı (MO), genetik algoritmalar gibi evrimsel algoritmalarda çözüm çeşitliliğini artırmak için kullanılır. Çaprazlama oranı, çözümlerin nasıl karışacağını belirlerken, mutasyon oranı ise bireylerin özelliklerini küçük değişikliklerle nasıl değiştireceğini tanımlar. Yüksek mutasyon oranları, çözümlerin çeşitliliğini artırabilir, ancak çok yüksek mutasyon oranları arama sürecinin kararlılığını etkileyebilir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, optimizasyon algoritmalarının başarısını doğrudan etkiler. Herhangi bir problem için en iyi sonuçları elde etmek amacıyla, kullanıcı bu parametreleri dikkatlice seçmeli ve algoritmanın arama sürecinde denge sağlamalıdır.

Çizelge 4.1’ de yer alan giriş parametre değerleri kullanıcı tarafından belirlenmiştir ve incelenmekte olan üç algoritma için de aynı değerler kullanılmıştır. Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4’te yer alan tasarım parametre değerlerinin tamamı optimal sonuçlar için analiz edilmiştir ve aritmetik ortalama ile elde edilen bu sonuçlar bobin tasarım programında test edilmiştir.

Çizelge 4. 1. Kullanıcı tarafından belirlenen giriş parametreleri

Algoritma	İterasyon Sayısı (GN)	Popülasyon Büyüklüğü (PN)	Öğrenme Faktörü (c_1, c_2)	Atalet Ağırlığı (w)	Çaprazlama Oranı (CO, %)	Mutasyon Oranı (MO, %)
PSO	1000	120	$c_1=2.05$ $c_2=2.05$	0.3	-	-
GA	1000	120	-	-	0.8	0.05
GWO	1000	120	-	-	-	-

Çizelge 4. 2. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\epsilon_f(\%)$
Kare	11	105.150	0.969	0.258	78.251	33.236	95.008	8.42
Daire	12	108.526	0.991	0.242	78.320	28.707	93.661	7.87
Altıgen	14	110.831	0.989	0.267	76.910	34.277	88.168	6.91
Sekizgen	12	112.462	0.958	0.257	83.223	31.028	85.153	9.21

Çizelge 4. 3. Kalite faktörünün GA ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\varepsilon_f(\%)$
Kare	7	4.557	0.729	0.187	18.522	1.069	175.384	6.49
Daire	9	13.057	0.703	0.170	29.229	1.427	204.918	7.34
Altıgen	10	18.992	0.602	0.191	31.810	3.857	167.68	8.87
Sekizgen	8	10.432	0.675	0.221	23.345	1.250	185.756	7.95

Çizelge 4. 4. Kalite faktörünün GWO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\varepsilon_f(\%)$
Kare	11	59.502	0.995	0.085	35.911	10.029	112.790	7.13
Daire	9	49.364	0.014	0.270	26.775	4.132	106.079	9.09
Altıgen	8	60.293	0.986	0.281	40.583	5.397	101.527	7.06
Sekizgen	12	37.489	0.951	0.059	13.349	3.977	109.286	6.03

2: Select Coil Type

Hexagonal

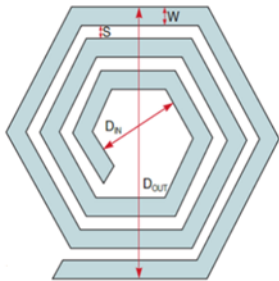


Figure :Hexagonal selected

4: Select Coil Geometry And Other Parameters

Metric Imperial Oz-Cu: ON OFF

LC sensor capacitance(C) pF
min: 1 - max: 10000

Outer diameter of inductor(D_{out}) mm
min: 1.067 - max: 149.860

Layers(M) Layer
min: 1 - max: 8

Turns per layer(N) Turns
min: 1 - max: 120

Trace width(W) mm
min: 0.051 - max: 1.016

Spacing between traces(S) mm
min: 0.051 - max: 0.305

Copper thickness(t) oz-Cu
min: 0.5 - max: 5

Temperature(T) °C
min: -50 - max: 150

Voltage (Oscillation Amplitude)(V) V
min: 1 - max: 4

Output Parameters	
Name	Output
Total inductance - Hexagonal	3.734 μ H
Sensor frequency	4352.566 kHz
Q factor	114.747
AC resistance (skin effect only)	0.89 Ω
Coil fill ratio	0.329
Coil inner diameter (D_{in})	12.35 mm
DC resistance	0.538 Ω
Average diameter	24.92 mm
Geometric mean diameter	0.504
Self inductance per layer	3.734 μ H
Coil length per layer	1035.886 mm
Skin depth	0.031 mm
Self resonant frequency	23.299 MHz
Resonance impedance	12142.093 Ω
Current	0.116 mA
Power dissipation	0.209 mW

Şekil 4. 1. Düzlemsel kare bobin GWO ile belirlenen optimal tasarım parametreleri ve kalite faktörü bobin tasarım programı değerleri (Ti, 1995)

Elde edilen sonuçlarda algoritmaların başarı oranlarını değerlendirebilmek için ortalama hata oranları hesaplanmıştır. Gözlemlerdeki hataların (ε_i) toplam gözlem sayısına (n) oranı ile ortalama hata oranı (ε_{ort}) elde edilmektedir. En düşük ortalama hata oranına sahip algoritma, bir düzlemsel bobinin maksimum kalite faktörü için optimum tasarım parametrelerini belirlemede en ideal optimizasyon yöntemi olarak bilinmektedir.

$$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (4.2)$$

Ortalama hata oranının incelenmesinin ardından standart sapma (σ) değeri değerlendirilmiştir. Böylece elde edilen sonuçlardaki her bir değer ortalamadan ne kadar uzaklaştığı incelenmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{ort})^2} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4'te yer alan sonuçlara göre algoritma bazında hesaplanan hata oranları ve standart sapma değerleri Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4. 5. PSO hata analizi

PSO	ε_f (%)	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	8.42	$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{4}(8.42 + 7.87 + 6.91 + 9.21)$	$\sigma \approx 0.967$
Daire	7.87		
Altıgen	6.91		
Sekizgen	9.21		
		$\varepsilon_{ort,PSO} = 8.103$	

Çizelge 4. 6. GA hata analizi

GA	ε_f (%)	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	6.49	$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{4}(6.49 + 7.34 + 8.87 + 7.95)$	$\sigma \approx 1.003$
Daire	7.34		
Altıgen	8.87		
Sekizgen	7.95		
		$\varepsilon_{ort,GA} = 7.663$	

Çizelge 4. 7. GWO hata analizi

GWO	ε_f (%)	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	7.13	$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{4}(7.13 + 9.09 + 7.06 + 6.03)$	$\sigma \approx 1.278$
Daire	9.09		
Altıgen	7.06		
Sekizgen	6.03		
		$\varepsilon_{ort,GWO} = 7.328$	

Farklı optimizasyon algoritmalarının düzlemsel bobin geometrileri üzerindeki performanslarının incelendiği bu çalışmada, kalite faktörü (Q) ve hata oranları üzerine kapsamlı analizler yapılmıştır. Her algoritmanın hata oranları ve standart sapmaları, bu algoritmaların çeşitli geometrik formlar üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla detaylı bir şekilde hesaplanmıştır. Algoritmaların kalite faktörünü iyileştirmedeki etkisini gözlemleyebilmek için kullanıcı tarafından alınan parametreler çeşitlendirilmiş ve farklı değerlere dayalı analizler yapılmıştır.

Çizelge 4.5 baz alınarak PSO algoritmasının sonuçları değerlendirildiğinde, ortalama hata oranının $\varepsilon_{ort,PSO} = 8.103$ olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu algoritma için standart sapma değeri (σ) yaklaşık 0.967'dir. Bu değerlerden PSO'nun, tutarlı sonuçlar üretme kabiliyeti ile dikkat çektiği anlaşılmaktadır.

GA'nın sonuçları, ortalama hata oranının $\varepsilon_{ort,GA} = 7.663$ olduğunu göstermektedir. GA'nın standart sapması (σ) yaklaşık 1.003 olarak hesaplanmıştır. Bu algoritmanın optimizasyon sürecinde, PSO'ya kıyasla biraz daha fazla hata oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

GWO için ortalama hata oranı $\varepsilon_{ort,GWO} = 7.3287$ ve standart sapma değeri (σ) yaklaşık 1.278 olarak hesaplanmıştır. Bu algoritma, diğer iki algoritmaya kıyasla daha geniş bir hata oranı sergilemiş, bu da bazı bobin tasarımlarında daha fazla değişkenlik göstermesine neden olmuştur. GWO'nun sonuçlarının daha geniş bir aralıkta dağıldığı ve belirli geometrik formlarda hata oranlarının daha değişken olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak, bu üç algoritmanın farklı bobin geometrileri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, PSO'nun en düşük hata oranı ve standart sapma ile en tutarlı sonuçları ürettiği görülmüştür. GWO ise en yüksek varyans ile diğer algoritmalarından daha değişken sonuçlar üretmektedir. Bu bulgular ışığında, optimizasyon sürecinde

kullanılacak algoritmanın seçimi, uygulama alanının gereksinimlerine göre dikkatlice yapılmalıdır.

Çizelge 4.8’de yer alan giriş parametre değerleri kullanıcı tarafından belirlenmiştir ve incelenmekte olan üç algoritma için de aynı değerler kullanılmıştır. Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11’de yer alan tasarım parametre değerlerinin tamamı optimal sonuçlar için analiz edilmiştir ve aritmetik ortalama ile elde edilen bu sonuçlar bobin tasarım programında test edilmiştir.

Çizelge 4. 8. Kullanıcı tarafından belirlenen algoritma giriş parametreleri

Algoritma	İterasyon Sayısı (GN)	Popülasyon Büyüklüğü (PN)	Öğrenme Faktörü (c_1, c_2)	Atalet Ağırlığı (w)	Çaprazlama Oranı (CO, %)	Mutasyon Oranı (MO,%)
PSO	100	20	$c_1=1.50$ $c_2=2.00$	0.1	-	-
GA	100	20	-	-	0.5	0.01
GWO	100	20	-	-	-	-

Çizelge 4. 9. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\varepsilon_f(\%)$
Kare	11	96.393	0.981	0.229	69.087	32.449	100.831	5.33
Daire	12	108.526	0.974	0.252	80.044	29.286	97.919	6.02
Altıgen	12	11.184	0.993	0.244	82.949	28.760	88.588	5.38
Sekizgen	10	104.595	0.992	0.234	86.553	27.973	88.811	6.21

Çizelge 4. 10. Kalite faktörünün GA ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\varepsilon_f(\%)$
Kare	6	118.298	0.187	0.063	114.157	15.196	18.392	9.46
Daire	5	111.902	0.237	0.081	105.640	8.186	28.288	7.31
Altıgen	8	149.019	0.266	0.103	145.786	31.367	5.421	6.83
Sekizgen	7	98.660	0.146	0.080	91.431	11.721	17.743	8.13

Çizelge 4. 11. Kalite faktörünün GWO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri

Bobin Şekli	Ölçümler							
	N	d_{out}	w	s	d_{in}	$L(\mu H)$	Q	$\epsilon_f(\%)$
Kare	8	43.068	0.901	0.174	26.021	6.069	113.251	7.11
Daire	7	44.743	0.934	0.173	29.420	4.393	105.682	9.09
Altıgen	8	49.963	0.886	0.165	32.511	6.882	101.997	7.16
Sekizgen	8	45.240	0.902	0.158	29.319	4.908	106.230	6.23

2: Select Coil Type

Circular

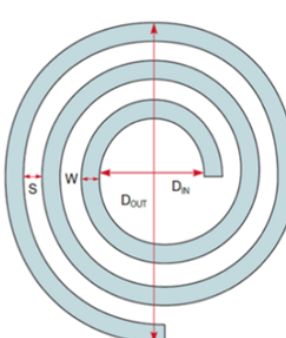


Figure :Circular selected

4: Select Coil Geometry And Other Parameters

Input Parameters		Output Parameters	
Name	Value	Name	Output
LC sensor capacitance(C)	290 pF	Total inductance - Circular	23.079 μ H
Outer diameter of inductor(D_{out})	108.51 mm	Sensor frequency	1834.365 kHz
Layers(M)	1 Layer	Q factor	106.198
Turns per layer(N)	12 Turns	AC resistance (skin effect only)	2.505 Ω
Trace width(W)	0.974 mm	Coil fill ratio	0.722
Spacing between traces(S)	0.252 mm	Coil inner diameter (D_{in})	78.37 mm
Copper thickness(t)	1 oz-Cu	DC resistance	1.785 Ω
Temperature(T)	25 $^{\circ}$ C	Average diameter	93.443 mm
Voltage (Oscillation Amplitude)(V)	1.8 V	Geometric mean diameter	0.161
		Self inductance per layer	23.079 μ H
		Coil length per layer	3522.718 mm
		Skin depth	0.048 mm
		Self resonant frequency	5.508 MHz
		Resonance impedance	31772.713 Ω
		Current	0.044 mA
		Power dissipation	0.08 mW

Şekil 4. 2. Kalite faktörünün PSO ile maksimum değerlerinde optimal tasarım parametreleri (Ti, 1995)

Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11’de yer alan sonuçlara göre algoritma bazında hesaplanan hata oranları ve standart sapma değerleri Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4. 12. PSO hata analizi

PSO	$\epsilon_f(\%)$	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	5.33	$\epsilon_{ort} = \frac{1}{4}(5.33 + 6.02 + 5.38 + 6.21)$ $\epsilon_{ort,PSO} = 5.735$	$\sigma \approx 0.466$
Daire	6.02		
Altıgen	5.38		
Sekizgen	6.21		

Çizelge 4. 13. GA hata analizi

GA	ε_f (%)	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	9.46	$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{4}(9.46 + 7.31 + 6.83 + 8.13)$	$\sigma \approx 1.151$
Daire	7.31		
Altıgen	6.83		
Sekizgen	8.13		
		$\varepsilon_{ort,GA} = 7.933$	

Çizelge 4. 14. GWO hata analizi

GWO	ε_f (%)	Ortalama Hata Oranı	Standart Sapma
Kare	7.11	$\varepsilon_{ort} = \frac{1}{4}(7.11 + 9.09 + 7.16 + 6.23)$	$\sigma \approx 1.206$
Daire	9.09		
Altıgen	7.16		
Sekizgen	6.23		
		$\varepsilon_{ort,GWO} = 7.398$	

PSO'nun ortalama hata oranı $\varepsilon_{ort,PSO} = 5.735$ olarak hesaplanmış, standart sapma değeri (σ) ise yaklaşık 0.466 olarak belirlenmiştir. GA'nın ortalama hata oranı $\varepsilon_{ort,GA} = 7.933$ olarak tespit edilmiş, standart sapma değeri (σ) ise yaklaşık 1.151 olarak hesaplanmıştır. GWO algoritması için elde edilen ortalama hata oranı $\varepsilon_{ort,GWO} = 7.398$ ve standart sapma (σ) ise yaklaşık 1.206 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak, bu üç algoritmanın farklı bobin geometrileri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, PSO'nun en düşük hata oranı ve standart sapma ile en tutarlı sonuçları ürettiği görülmüştür.

PSO, GA ve GWO'nun Çizelge 4.1'deki parametre değerleri ile bobin geometrileri üzerinde nasıl bir performans sergilediği Çizelge 4.15'te, Çizelge 4.8'deki parametre değerleri ile nasıl bir performans sergilediği ise Çizelge 4.16'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablolardan da görülebildiği gibi iterasyon sayısı ve popülasyon büyüklüğü azaldığı halde PSO'nun hata oranlarında azalma söz konusudur. Bu azalma aslında öğrenme faktörleri ve atalet ağırlığındaki değişimden kaynaklanmaktadır. GA'nın hata oranlarındaki değişim bobin tipine göre değişmektedir. GWO'da ise kayda değer bir değişim söz konusu değildir.

Çizelge 4. 15. Farklı düzlemsel bobinler için PSO, GA ve GWO' Çizelge 4.1' deki parametre değerleri ile elde edilen hata oranları

	PSO Hata Oranı ϵ_f (%)	GA Hata Oranı ϵ_f (%)	GWO Hata Oranı ϵ_f (%)
Düzlemsel Kare Bobin	8.42	6.49	7.13
Düzlemsel Dairesel Bobin	7.87	7.34	9.09
Düzlemsel Altıgen Bobin	6.91	8.87	7.06
Düzlemsel Sekizgen Bobin	9.21	7.95	6.03

Çizelge 4. 16. Farklı düzlemsel bobinler için PSO, GA ve GWO' Çizelge 4.8' deki parametre değerleri ile elde edilen hata oranları

	PSO Hata Oranı ϵ_f (%)	GA Hata Oranı ϵ_f (%)	GWO Hata Oranı ϵ_f (%)
Düzlemsel Kare Bobin	5.33	9.46	7.11
Düzlemsel Dairesel Bobin	6.02	7.31	9.09
Düzlemsel Altıgen Bobin	5.38	6.83	7.16
Düzlemsel Sekizgen Bobin	6.21	8.13	6.23

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı geometrik tasarımlara sahip düzlemsel bobinlerin maksimum kalite faktörüne sahip olması için bobinlerin tasarım geometrisini etkileyen anahtar parametrelerin optimum değerlerini hesaplayan optimizasyon algoritmalarının başarı oranları incelenmiştir. Önerilen optimizasyon algoritmaları için çeşitli geometrideki düzlemsel bobinler üzerinden bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu ile, anahtar tasarım parametrelerinin sınırlarına ve bağımlı-bağımsız parametrelerine karar verilmiştir. Kare, dairesel ve çokgen şekillerdeki bobinler için kalite faktörleri PSO, GA ve GWO algoritmaları kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar açık kaynak olarak sunulan hesaplama araçları üzerinden doğrulanmıştır.

Kalite faktörünü iyileştirmeye yönelik optimizasyon süreçlerinde PSO algoritması, düşük hata oranları ve standart sapma değerleri ile en başarılı sonuçları vermektedir. GWO ise yüksek hata oranları ve standart sapma değerleri ile diğer iki algoritmaya göre daha kötü sonuçlar üretmiştir. PSO, GA ve GWO algoritmaları farklı parametre değerleri ile çalıştırıldığında hata oranları açısından en büyük değişim PSO'da gözlenirken en az değişim GWO'da gözlenmiştir.

5.2. Öneriler

Optimizasyon sonuçlarının pratik uygulamalarda test edilmesi, sonuçların gerçek dünya koşullarında doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, laboratuvar ortamında veya endüstriyel uygulamalarda bobinlerin performansının test edilmesi ve bu test sonuçlarının optimizasyon süreci ile karşılaştırılması önemlidir.

Düzlemsel spiral bobinlerin enerji verimliliğinin optimize edilmesi, özellikle kablosuz güç aktarımı uygulamalarında büyük önem taşır. Enerji kayıplarının minimize edilmesi ve verimliliğin artırılması için tasarım ve malzeme optimizasyonu yapılmalıdır.

Bu öneriler, düzlemsel spiral bobinlerin tasarımı ve optimizasyonu konusundaki gelecekteki çalışmalar için yol gösterici olabilir. Bu alanlarda yapılacak detaylı araştırmalar, bobinlerin performansını ve uygulama alanlarını genişleterek, daha verimli ve yüksek performanslı sistemler geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahire, D. B., Gond, V. J. ve Chopade, J. J. (2022). Geometrical Parameter Optimization of Planner Square-Shaped Printed Spiral Coil For Efficient Wireless Power Transfer System To Biomedical Implant Application. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. doi:10.1016/j.prime.2022.100045
- Andreica, S., Munteanu, C., Gliga, M., Pacurar, C., Giurgiuman, A. ve Constantinescu, C. (2020). Design of Multilayer Spiral Coils with Different Geometries to Determine the Inductance. *2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)* içinde . doi:10.1109/EPE50722.2020.9305615
- Arslan, M. ve Erkan, K. (2022). Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması. *European Journal of Science and Technology*. doi:10.31590/ejosat.1187350
- Belli, F. ve Bingol, H. (2023). Performance Comparison of Biology based Metaheuristics Optimization Algorithms using Unimodal and Multimodal Benchmark Functions. *Turkish Journal of Science & Technology Research Paper*, 18(1), 157-167. doi:10.55525/tjst.1214897
- Beryl, R., Vaithianathan, V. ve Kirubaveni, S. (2013). Comparative Analysis Of Various On-Chip Spiral Inductors. *2013 International Conference on Communication and Signal Processing* içinde (s. 1179). doi:10.1109/iccsp.2013.6577091
- Biswas, A. ve Saxena, R. (2022). Fast Charging Method for Wireless Power Transfer Enabled Devices (ss. 203-209). <http://www.springer.com/series/7818> adresinden erişildi.
- Chawda, P. K. (2018). An Automated Design Flow For Synthesis Of Optimal Multi-layer Multi-shape PCB Coils For Inductive Sensing Applications. *Nineteenth International Symposium on Quality Electronic Design: ISQED 2018* içinde . California USA: IEEE.
- Chawda, P. K., Mansour, M. M. ve Perry, J. (2017). Method and Apparatus For A Coil Designer. Texas Instruments Incorporated .
- Cüce, A., Başaran, H., Çelik, O. ve Yeşilyurt, S. (2023). *Otonom Araçların Kablosuz Şarjı İçin Bobin Tasarımları*.
- Del Mar Hershenson, M., Mohan, S. S., Boyd, S. P. ve Lee, T. H. (1999). Optimization of Inductor Circuits Via Geometric Programming. *Proceedings 1999 Design Automation Conference (Cat. No. 99CH36361)* içinde . doi:10.1109/DAC.1999.782241

- Durmuş, F. ve Karagöl, S. (2018). Mutual Inductance Calculation Formula for Planar Square Coils. *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* içinde . doi:10.1109/ISMSIT.2018.8567040
- Fincan, B. (2015, Ocak). *Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Greenhouse, H. M. (1974). Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging* , 10(2), 101-109.
- Hao, K., Huang, S., Zhao, W., Wang, S. ve Dong, J. (2011). Analytical Modelling And Calculation Of Pulsed Magnetic Field And Input Impedance For EMATs With Planar Spiral Coils. *NDT&E International*. doi:10.1016/j.ndteint.2011.01.001
- Hrabocsky, P. ve Kravets, O. (2019). The Design And Simulation Of Spiral Planar Coil In Comsol Multiphysics. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* içinde . IEEE.
- <https://webench.ti.com/wb5/LDC/#/spirals>. (1995). Coil Designer.
- Islam, A. B., Islam, S. K. ve Tulip, F. S. (2013). Design and Optimization of Printed Circuit Board Inductors for Wireless Power Transfer System. *Circuits and Systems*, 04(02), 237-244. doi:10.4236/cs.2013.42032
- Jow, U. ve Ghovanloo, M. (2007). Design and Optimization of Printed Spiral Coils for Efficient Transcutaneous Inductive Power Transmission. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 1(3), 193-202. doi:10.1109/TBCAS.2007.913130
- Jow, U. ve Ghovanloo, M. (2009). Modeling And Optimization Of Printed Spiral Coils In Air, Saline And Muscle Tissue Environments. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 3(5), 339-347. doi:10.1109/TBCAS.2009.2025366
- Khan, S. ve Choi, G. (2016). Analysis and Optimization of Four-Coil Planar Magnetically Coupled Printed Spiral Resonators. *Sensors*, 16(8). doi:10.3390/s16081219
- Kızıldağ, U. ve Yılmaz, A. S. (2021). Wireless Charging Systems In Electric Vehicles And A Simple System Investigation. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 209-224. <https://orcid.org/0000-0003-2811-0570> adresinden erişildi.
- Kim, D. H. ve Park, Y. J. (2016). *Optimization Of A Small Planar Spiral Coil On A Magnetic Substrate For Quality Factor Using Volume Filament Model*. 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/WPT.2016.7498869

- Mohan, S. S., Del Mar Hersenson, M., Boyd, S. P. ve Lee, T. H. (1999). *Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances. IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS* (C. 34).
- Özsağlam, Y. ve Çunkaş, M. (2008). Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçaçık Sürü Optimizasyonu Algoritması. *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt, 11(4)*, 299-305. doi:10.2339/2008.11.4
- Özüpak, Y. (2022). Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(1)*, 209-219.
- Pacurar, C., Topa, V., Munteanu, C., Racasan, A. ve Hebedean, C. (2013). Studies Of Inductance Variation For Square Spiral Inductors Using CIBSOC Software. *Environmental Engineering and Management Journal, 12(6)*, 1161-1169. <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/> adresinden erişildi.
- Pacurar, C., Topa, V., Racasan, A. ve Munteanu, C. (2012). Inductance Calculation and Layout Optimization for Planar Spiral Inductors. *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* içinde . doi:10.1109/OPTIM.2012.6231846
- Pacurar, C., Topa, V., Racasan, A., Munteanu, C. ve Hebedean, C. (2014). Spiral Inductors Analysis and Modelling. *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* içinde . doi:10.1109/OPTIM.2014.6850928
- Pashaei, A., Aydın, A., Polat, E. M., Yıldırım, E. ve Aydemir, M. T. (2016). Elektrikli Araçlar İçin Temassız Güç Aktarım Sistemleri. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal, Kontrol Mühendisliği Bilimsel Hakemli Dergisi, 6(11)*.
- Pawinanto, R. E., Yunas, J., Said, M. M., Noor, M. M. ve Majlis, B. Y. (2014). Design And Fabrication Of PCB Based Planar Micro-coil For Magnetic MEMS Actuator. *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings, ICSE* içinde (ss. 487-490). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/SMELEC.2014.6920904
- Racasan, A., Pacurar, C., Munteanu, C., Constantinescu, C., Andreica, S. ve Dusa, S. (2017). High Frequency Analysis of Monolayer Spiral Inductors. *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)* içinde . doi:10.1109/OPTIM.2017.7974957

- Sayın, S. F. (2017). *Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve PCB Uygulamaları Elektromanyetik Dalga Nedir?*
- Sensor Design for Inductive Sensing Applications Using LDC.* (2021). www.ti.com adresinden erişildi.
- Tamer, S. ve Karakuzu, C. (2006). *Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ve Benzetim Örnekleri.*
- Tavakkoli, H., Abbaspour-Sani, E., Khalilzadegan, A., Abazari, A. ve Rezazadeh, G. (2019). Mutual Inductance Calculation Between Two Coaxial Planar Spiral Coils With An Arbitrary Number Of Sides. *Microelectronics Journal*, 85, 98-108. doi:10.1016/j.mejo.2019.01.012
- Tezcan, Y., Ünal, H. ve Boztepe, M. (2017). Endüktif Kuplajlı Kablosuz Güç Aktarım Sistemlerinin Analizi ve Tasarımı. *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi* içinde . İzmir.
- Ulukök Köse, M. (2017). Impact of Genetic Algorithm's Parameters on Solution of Numerical Optimization Benchmark Problems (s. 121). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Venkatarayalu, N. V., Bui, V. P., Rajkumar, A. R. K. ve Ng, K. H. (2019). Design and Characterization of PCB based Planar Coil Eddy Current Probes. *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation, ICIRT 2018* içinde . Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ICIRT.2018.8641678
- Wang, X., Pang, J., Tan, Q., Dong, H., Zhao, N. ve Xue, T. (2021). Design Of Double-layer Parallel Printed Spiral Coil For Wireless Power Transfer Applied To Rotating Equipment. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112761. doi:10.1016/j.sna.2021.112761
- Xie, Z., Chen, X. ve Sun, Y. (2022). Analysis and Optimization of Planar Excitation Coil for EPS Torque Sensor Based on GWO. *Journal of Physics: Conference Series* içinde (C. 2363). Institute of Physics. doi:10.1088/1742-6596/2363/1/012023
- Yavsan, E. (2023). A PDMS-BASED SOFT SENSOR-ACTUATOR FOR ROBOTIC SYSTEMS. *INTERNATIONAL ASIAN CONGRESS ON CONTEMPORARY SCIENCES – IX* içinde (ss. 459-466). Baku, Azerbaijan.
- Yavsan, E. (2024a). A Planar Coil-Based Novel Two-Channel Differential Inductive Tilt Sensor With a Simple Pendulum Mechanism. *IEEE Sensors Journal*, 24(5), 6286-6292. doi:10.1109/JSEN.2024.3351952

Yavsan, E. (2024b). Inductive sensing of air bubbles in intravenous fluids: A novel approach for patient safety. *Flow Measurement and Instrumentation*, 96(December 2023), 102554. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2024.102554

