

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZLEMSEL BASKI DEVRELERDE DESEN
TASARIMINA DAYALI MANYETİK ALAN
ANALİZİ

Emre YAZICI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aviyonik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Serkan KURT

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜZLEMSEL BASKI DEVRELERDE DESEN TASARIMINA
DAYALI MANYETİK ALAN ANALİZİ**

Emre YAZICI tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı, Aviyonik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Serkan KURT
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan KURT, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Peyman MAHOUTİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aysel ERSOY, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Danışmanım Doç. Dr. Serkan KURT sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Düzlemsel Baskı Devrelerde Desen Tasarımına Dayalı Manyetik Alan Analizi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emre YAZICI

İmza



Anneme
ve
Babama

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında emeği geçen, destek olan ve katkıda bulunan herkese iten teŖekkürlerimi sunmak isterim. Öncelikle, tez sürecim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, her zaman sabırla destek olan değerli danışmanım Doç. Dr. Serkan KURT'a en içten teŖekkürlerimi sunuyorum. Kendilerinin akademik rehberliği, eleŖtirel bakıŖ açısı ve teŖvik edici tutumu, bu çalışmanın Ŗekillenmesinde büyük rol oynamıŖtır. AraŖtırma sürecinde veriye eriŖim ve teknik konularda destek sağlayan çalışma arkadaşlarıma, minnettarım. Bu sürecin manevi yönünü de unutmadan, her zaman yanımda olan sevgili aileme; sabırları, anlayıŖları ve verdikleri destek için sonsuz teŖekkür ederim. Ayrıca bu yolculukta beni yalnız bırakmayan, moral veren dostlarıma ve arkadaşlarıma da yürekten teŖekkür ederim.

Emre YAZICI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 MANYETİZMA	5
2.1 Manyetik Alan.....	5
2.2 Elektromanyetizma	6
2.3 Doğrusal İletken Etrafında Bulunan Manyetik Alan	6
2.4 Dairesel İletken Etrafında Bulunan Manyetik Alan.....	8
2.5 Karmaşık İletkenlerin Etrafında Oluşan Manyetik Alan	10
2.6 Sarmal Yapılarda Manyetik Alan	10
2.7 Alternatif Akım ile Oluşan Manyetik Alanlar	13
2.8 Yüzey Etkisi (Skin Effect)	14
2.9 Yakınlık Etkisi (Proximity Effect).....	15
2.10 Farklı İletkenler Arası Etkileşim.....	16

3 BASKI DEVRE KARTLARI	18
3.1 Baskı Devre Kartları	18
3.2 Layer Stack-Up Yapıları	19
3.3 Via Çeşitleri	19
4 TEST ve DENEY DÜZENEKLERİ	22
4.1 Çalışmada Kullanılan Kart Tipleri	22
4.2 Test ve Simüle Edilecek Desen Tipleri	22
4.2.1 Desen-1	23
4.2.2 Desen-2	25
4.2.3 Desen-3	26
4.2.4 Desen-4	26
4.3 Testlerin Yapıldığı Ortamlar	31
5 BASKI DEVRE KARTLARI	32
5.1 Kullanılan Programlar	32
5.2 Desen-1	33
5.2.1 Desen-1A	33
5.2.2 Desen-1B	36
5.2.3 Desen-1C	39
5.3 Desen-2	42
5.3.1 Desen-2 Ek Simülasyon	44
5.4 Desen-3	46
5.5 Desen-4	49
5.5.1 Desen-4A Dairesel	49
5.5.2 Desen-4A Dairesel	53
5.6 Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirmesi	57
6 SONUÇ	60

KAYNAKÇA

62

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

66



SİMGE LİSTESİ

I, i	Akım
A	Amper
E	Elektrik Alan
V	Gerilim/Voltaj
Hz	Hertz
x	İletken şle örnek nokta arası normal eksene düşey uzaklık
R, r	İletken ve örnek nokta arası mesafe
L	İndüktans
B	Manyetik Alan
μ	Manyetik alan geçirgenliği
MHz	Mega-Hertz
M	Ortak indüktans
π	Pi sabiti (3.14)
ρ	Sıklık oranı / iletken direnci

KISALTMA LİSTESİ

3D	3 Boyut
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
EMI	Electromagnetic Interference - Elektromanyetik Girişim
FEA	Finite Element Analysis - Sonlu Elemanlar Analizi
FR4	Flame Retardant - Alev Geciktirici
HDI-PCB	High-Density Interconnect PCB - Yüksek Yoğunluklu Ara Bağlantılı Baskılı Devre Kartı
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
PCB	Printed Circuit Board - Baskı Devre Kartı
TEM	Transverse Electromagnetic - Transvers Elektromanyetik

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Manyetik alan görüntüsü.....	5
Şekil 2.2	Doğrusal bir iletken etrafında oluşan manyetik alan	6
Şekil 2.3	Doğrusal iletken etrafındaki manyetik alan simülasyonu	7
Şekil 2.4	Dairesel bir akımın etrafında oluşan manyetik alan	8
Şekil 2.5	Dairesel bir akımın etrafındaki herhangi bir noktada manyetik alan....	8
Şekil 2.6	Dairesel bir akımın merkez eksenindeki manyetik alan	9
Şekil 2.7	Dairesel bir akımın etrafında oluşan manyetik alanın simülasyon görüntüsü.....	10
Şekil 2.8	PCB üzerinde kullanılabilecek sarmal yapılar	11
Şekil 2.9	Baskı devre kartında 2 katlı sarmal yapı.....	12
Şekil 2.10	Frekansa göre yüzey etkisinin kablo kesitindeki görseli	15
Şekil 2.11	Yakınlık etkisinin kablo kesitindeki görüntüsü	16
Şekil 2.12	İki iletken arası kapasitif etki parametreleri.....	17
Şekil 3.1	Örnek rigid-flex-rigid PCB kartı.....	18
Şekil 3.2	Baskı devre kartı örnek Stack-Up yapısı	19
Şekil 3.3	Baskı devre kartı via yapıları	21
Şekil 4.1	Tek ve çift yapılardaki baskı devre kartı kesit örnek görüntüsü	22
Şekil 4.2	Desen-1 örnek görüntüsü	23
Şekil 4.3	Desen-1A örnek görüntüsü	23
Şekil 4.4	Desen-1A ile oluşması beklenen manyetik alanın kart etrafındaki temsili.....	24
Şekil 4.5	Desen-1A ile oluşması beklenen manyetik alanın kart etrafındaki yatay kesit görüntüsü	24
Şekil 4.6	Desen-1B örnek görüntüsü	25
Şekil 4.7	Desen-1C örnek görüntüsü	25
Şekil 4.8	Desen-2 örnek görüntüsü	26
Şekil 4.9	Desen-3 örnek görüntüsü	26
Şekil 4.10	Dairesel sarmal yapı örnek görüntüsü.....	27
Şekil 4.11	Karesel sarmal yapı örnek görüntüsü.....	27
Şekil 4.12	Dairesel sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi.....	28

Şekil 4.13	Üçgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi.....	28
Şekil 4.14	Kare sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi	29
Şekil 4.15	Beşgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi	29
Şekil 4.16	Altıgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi	30
Şekil 5.1	Desen-1A simülasyon modeli	33
Şekil 5.2	Desen-1A modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkışı	34
Şekil 5.3	Desen-1A modeli mantıksal görüntüsü.....	34
Şekil 5.4	Desen-1A modeli vektörel simülasyon sonucu.....	35
Şekil 5.5	Desen-1A modeli alansal simülasyon sonucu.....	35
Şekil 5.6	Desen-1A modeli üzerindeki örnek noktada oluşan manyetik alanın frekansa göre değişimi	36
Şekil 5.7	Desen-1B simülasyon modeli	36
Şekil 5.8	Desen-1B modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkışı.....	37
Şekil 5.9	Desen-1B modeli mantıksal görüntüsü	37
Şekil 5.10	Desen-1B modeli vektörel simülasyon sonucu.....	38
Şekil 5.11	Desen-1B modeli alansal simülasyon sonucu.....	38
Şekil 5.12	Desen-1 B modeli üzerindeki örnek noktada oluşan manyetik alanın frekansa göre değişimi	39
Şekil 5.13	Desen-1C simülasyon modeli	40
Şekil 5.14	Desen-1C modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkışı.....	40
Şekil 5.15	Desen-1C modeli mantıksal görüntüsü	41
Şekil 5.16	Desen-1C modeli vektörel simülasyon sonucu.....	41
Şekil 5.17	Desen-1C modeli alansal simülasyon sonucu.....	42
Şekil 5.18	Desen-2 simülasyon modeli	42
Şekil 5.19	Desen-2 modeli mantıksal görüntüsü.....	43
Şekil 5.20	Desen-2 modeli vektörel simülasyon sonucu	43
Şekil 5.21	Desen-2 modeli alansal simülasyon sonucu	44
Şekil 5.22	Kart üzerindeki iki manyetik alanın birleşimi	44
Şekil 5.23	Desen-2 ek simülasyon denemesi akım giriş ve çıkışı.....	45
Şekil 5.24	Desen-2 ek simülasyon denemesi vektörel simülasyon sonucu	45
Şekil 5.25	Desen-2 ek simülasyon denemesi alansal simülasyon sonucu	46
Şekil 5.26	Desen-3 altium programı üzerinde oluşturulan modeli	47
Şekil 5.27	Desen-3 altium programı layout tasarımı	47
Şekil 5.28	Desen-3 modeli üzerinde tanımlanan akımlar	47
Şekil 5.29	Desen-3 vektörel simülasyon sonucu.....	48
Şekil 5.30	Desen-3 alansal simülasyon sonucu.....	48

Şekil 5.31	Desen-4A simülasyon modeli	49
Şekil 5.32	Desen-4A vektörel simülasyon sonucu.....	50
Şekil 5.33	Desen-4A vektörel yan kesit görüntüsü	50
Şekil 5.34	Aynı yönlü çift daire sarmal vektörel simülasyon sonucu.....	51
Şekil 5.35	Aynı yönlü çift daire sarmal vektörel yan kesit görüntüsü	51
Şekil 5.36	Zıt yönlü çift daire sarmal vektörel simülasyon sonucu	51
Şekil 5.37	Zıt yönlü çift daire sarmal vektörel yan kesit görüntüsü	52
Şekil 5.38	Çoklu daire sarmal model	52
Şekil 5.39	Çoklu daire sarmal model vektörel simülasyon sonucu	52
Şekil 5.40	Çoklu daire sarmal model alansal simülasyon sonucu	53
Şekil 5.41	Desen-4B altıgen sarmal simülasyon modeli.....	54
Şekil 5.42	Desen-4B altıgen sarmal model üzerinde tanımlanan akım	54
Şekil 5.43	Desen-4B altıgen tekli yapı simülasyon sonucu	55
Şekil 5.44	Çift altıgen sarmal model.....	55
Şekil 5.45	Çift altıgen sarmal model aynı yönlü akım tanımlaması	55
Şekil 5.46	Çift altıgen sarmal model aynı yönlü akım simülasyon sonucu	56
Şekil 5.47	Çift altıgen sarmal model zıt yönlü akım tanımlaması	56
Şekil 5.48	Çift altıgen sarmal model zıt yönlü akım simülasyon sonucu	56

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Farklı sargı şekillerinin C değişkenleri	12
Tablo 2.2	AA ve DA manyetik alanların farkları.....	14
Tablo 3.1	Via çeşitleri	20
Tablo 4.1	Geometrik şekillerin yüzey kaplama oranları	31
Tablo 5.1	Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi	57



Düzlemsel Baskı Devrelerde Desen Tasarımına Dayalı Manyetik Alan Analizi

Emre YAZICI

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Serkan KURT

Üzerinden akım geçen her iletken maddenin çevresinde, akımın yönüne, şiddetine ve frekansına bağlı olarak değişen bir manyetik alan meydana gelir. Eğer akım doğru akım (DA) ise bu manyetik alan sabit bir yapı olurken, alternatif akım (AA) söz konusu olduğunda manyetik alan zamana bağlı olarak değişim gösterir. Ayrıca, kaynaktan uzaklaştıkça alanın şiddeti azalma eğilimindedir; dolayısıyla manyetik alan şiddeti akım ile doğru orantılıyken, uzaklıkla ters orantılıdır. İletken yolun geometrisi karmaşıklaştıkça, ortaya çıkan manyetik alanın geometrik yapısı da aynı ölçüde karmaşıklaşmaktadır.

Farklı iletken şekilleri tasarlamak ve bu şekillerin yeterince küçük olmasını sağlamak ve belli bir düzende tasarlayabilmek için bu tasarımları baskı devre kartları (PCB) üzerinde tasarlanmasına karar verilmiştir. PCB'ler hem tasarımların daha dayanıklı olmasını hem de belli bir standart üzerinde ilerlenilmesini sağlamaktadır.

Birbirinden farklı dört adet desen tasarımı yapılmıştır. Bu sayede olabildiğince farklı geometrilere ve doğrultuda manyetik alanlar oluşturulması amaçlanmıştır.

Desen tasarımları yapılırken manyetik alanların üç farklı ekseninde oluşacağı düşünülmüş ve ileriye taşınmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen ilk PCB'de bulunan ilk desen yalnızca kartın tek yüzeyinde yer alan ve birbirine paralel doğrultuda ilerleyen doğrusal iletken hatlardan oluşan bir yapıdır. Bu desende hatlara aynı yönde ve farklı yönlerde akımlar uygulanmıştır. Bunun sonucunda aynı yönde akım uygulandığında kartın etrafını saran bütünsel bir manyetik alan görülmüştür. Zıt yönlü akımlar akıtıldığında ise birbirine zıt şekilde oluşan manyetik alanların birbirlerini söğürdüğü gözlemlenmiştir.

Tasarlanan ikinci desende ise birinci yapıya ilave olarak kartın alt yüzeyinde de üst yüzeye dik doğrultuda yer alan hatlar oluşturulmuştur. Böylece iki katmanlı ve birbirine dik doğrultularda akan akımların etkileşimi incelenmiştir. Bu yapı simülasyon ortamına aktarıldığında, alt ve üst yüzeydeki hatların oluşturduğu manyetik alanların birleşerek, yüzeye 45 derecelik bir açıyla yönelen bir alan çizgisi oluşturduğu görülmüştür. Bu durum, belirli varyasyonlarla her açıya yönlenebilen manyetik alanların üretilebileceğini göstermektedir. Akım yönleri ve büyüklükleri üzerinde yapılan değişikliklerle, oluşan manyetik alanın açısal yönü aktif biçimde kontrol edilebilmektedir.

Tasarlanan üçüncü desen ise, PCB üzerine dik olarak yerleştirilmiş paralel/seri bobin yapılarını içermektedir. Bu modelde, katmanlar arası bağlantı için via adı verilen geçiş yapıları kullanılmıştır.

Tasarlanan son desen yapısında ise kart üzerine farklı geometrik formlarda sarmal yapılar yerleştirilmiştir. Her geometrinin yüzey alanı kullanımı ve manyetik alan üretme kapasitesi farklıdır. Simülasyonlar dairesel yapı ve altıgen yapısı tercih edilmiştir. Bu sarmal desenlerin simülasyonlarında, kartın merkezinde dik bir biçimde oluşan manyetik alanın kenarlara doğru yönelerek dairesel bir dağılım gösterdiği görülmüştür. Ancak bu modeldeki birim boyutlarının büyük olması sebebiyle, hatlar arası etkileşim daha sınırlı düzeyde kalmıştır. Yani manyetik alanların birleşme etkisi, daha küçük ve sıkı yerleştirilmiş hatlara göre daha zayıf olmuştur.

Bu değerlendirmeler doğrultusunda, kullanım senaryosuna göre en uygun desen tipi seçilebilmektedir. Özellikle manyetik alanın yönü, yayılımı ve şiddeti gibi

özelliklerin kontrol edilebildiği bu tarz sistemlerin, sağlık teknolojilerinde hedef cihazın vücut içi yönlendirimi, üretim sistemlerinde paketlerin tesis içi taşınması, eğlence sektöründe aktif yüzey tasarımlarında ve hatta savunma sanayinde aktif görünmezlik yüzeyleri gibi kullanım alanları bulabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik Alan, elektromanyetizma, baskı devre, desen.



Magnetic Field Analysis Based on Pattern Design in Planar Printed Circuits

Emre YAZICI

Department of Avionics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan KURT

A magnetic field is generated around every conductive material carrying current, and this field varies depending on the direction, intensity, and frequency of the current. If the current is direct current (DC), the magnetic field has a constant structure, whereas in the case of alternating current (AC), the magnetic field varies over time. Furthermore, the intensity of the field tends to decrease with increasing distance from the source; therefore, while the magnetic field intensity is directly proportional to the current, it is inversely proportional to the distance. As the geometry of the conductive path becomes more complex, the geometric structure of the resulting magnetic field also becomes equally complex.

To design different conductor shapes, ensure they are sufficiently small, and arrange them in a specific pattern, it was decided to implement these designs on printed circuit boards (PCBs). PCBs ensure both greater durability of the designs and progress in accordance with a certain standard.

Four different pattern designs have been created. In this way, it was aimed to generate magnetic fields in as many different geometries and directions as possible. While designing the patterns, it was considered that magnetic fields would be formed along three different axes.

The first pattern on the first PCB produced within the scope of this thesis study consists of linear conductive tracks placed only on one surface of the board and running in parallel directions. In this pattern, currents were applied in the same and opposite directions through the tracks. As a result, when current was applied in the same direction, a unified magnetic field surrounding the board was observed. When currents were applied in opposite directions, it was observed that the oppositely formed magnetic fields canceled each other out.

In the second pattern, in addition to the first structure, tracks were also created on the bottom surface of the board, oriented perpendicular to the top surface. Thus, the interaction of currents flowing in two layers and in perpendicular directions was examined. When this structure was transferred to the simulation environment, it was observed that the magnetic fields generated by the tracks on the top and bottom surfaces merged to form a field line directed at a 45-degree angle to the surface. This shows that magnetic fields that can be directed at any angle can be generated with certain variations. By changing the directions and magnitudes of the currents, the angular direction of the resulting magnetic field can be actively controlled.

The third pattern includes parallel/series coil structures placed perpendicularly on the PCB. In this model, structures called vias were used for interlayer connections.

In the final pattern design, spiral structures in different geometric forms were placed on the board. Each geometry has different surface area usage and magnetic field generation capacity. Circular and hexagonal structures were preferred for the simulations. In the simulations of these spiral patterns, it was observed that the magnetic field formed vertically at the center of the board and showed a circular distribution toward the edges. However, due to the large unit dimensions in this model, the interaction between tracks remained at a more limited level. In other words, the merging effect of the magnetic fields was weaker compared to smaller and more tightly placed tracks.

In light of these evaluations, the most suitable pattern type can be selected according to the usage scenario. It has been concluded that such systems, in which features such as the direction, distribution, and intensity of the magnetic field can be controlled, may find applications in medical technologies for the in-body guidance of target devices, in production systems for the internal transport of packages within

facilities, in the entertainment sector for active surface designs, and even in the defense industry for active invisibility surfaces.

Keywords: Magnetic Field, electromagnetism, printed circuit board, pattern.



1.1 Literatür Özeti

Harold N. Allen'ın 1904 tarihli "The Graphical Representation of Magnetic Theories" adlı çalışması, manyetik alan kuramlarının anlaşılmasını kolaylaştırmak amacıyla görsel anlatımları merkeze alan öncü bir yaklaşımdır. Yazar, dönemin farklı manyetizma anlayışlarını karşılaştırarak bu kuramların fiziksel etkilerini şekillerle ifade etmeye çalışmıştır. Çalışma, alanın yalnızca matematiksel yönüyle değil, aynı zamanda görselleştirilebilir yönüyle de ele alınabileceğini göstermesi açısından dikkat çekicidir. Bu yönüyle Allen'ın çalışması, günümüzde desen ve form temelli manyetik alan araştırmalarına kuramsal bir zemin sunmaktadır.[1]

Koohestani ve Skrivervik tarafından önerilen analitik bir yaklaşım, entegre devrelerin yakınında kapalı iletken döngüler kullanımı üzerine odaklanmakta olup, bu konfigürasyonun uzak alan emisyonlarını önemli ölçüde azaltırken simülasyon karmaşıklığını da en aza indirebildiğini göstermiştir [2]. Bunu tamamlayan Wang, çekirdeksiz aksenal alanlı kalıcı mıknatıslı bir motorda sargı geometrisini optimize ederek, iletken yerleşimindeki küçük değişikliklerin 3D manyetik alan üzerinde önemli farklar yarattığını ve doğru değerlendirme için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) simülasyonlarının gerekli olduğunu bulmuşlardır [3].

PCB sargılarında frekansa bağlı etkiler üzerine yapılan araştırmalar, Litz yapılarının ve iz katmanlarının akım dağılımı ve direnç üzerinde güçlü etkileri olduğunu göstermiştir. Lope, Litz yapılı düzlemsel bobinler için yarı-analitik bir kayıp modeli önermiş, farklı alan şekillerinin farklı modelleme stratejileri gerektirdiğini ortaya koymuştur [4]. Benzer şekilde, Zhou ve Preindl, hem Litz hem de katı sargılar kullanan indüktör tasarımlarını optimize etmek için bir sinir ağı

modeli sunmuş, iletken yapısı ve katman sayısının yumuşak anahtarlamalı dönüştürücülerdeki performansı kritik şekilde etkilediğini vurgulamıştır [5].

Konumsal alan etkileşimlerinin daha karmaşık modellenmesi Nejadpak ve Mohammed tarafından 3D FEM simülasyonları ile gerçekleştirilmiş, güç dönüştürücü davranışını karakterize ederken iletken izlerindeki ince alan dağılımının yakalanması gerekliliği vurgulanmıştır [6]. Bu simülasyonları hızlandırmak amacıyla Ordenez, düzlemsel PCB manyetik bileşenler için özel olarak uyarlanmış analitik bir termal model önermiş, 2D alan tahminlerinde doğruluktan ödün vermeden hızlı iterasyonlar yapılabilmesini sağlamıştır [7].

Du, orta gerilimli endüktif güç aktarım sistemleri için PCB spiral bobinleri incelemiş, optimize edilmiş şekillerin hem bağlaşım verimini hem de manyetik alan düzgünlüğünü artırabildiğini ve bunun kablosuz enerji aktarım uygulamaları için kritik olduğunu göstermiştir [8]. El-Sharkh ve Wang ise bu geometrik analizi helisel indüktörlere genişletmiş, yüzey alanı ve eğrilik parametrelerinin yakın alan emisyonlarını büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir [9].

Kayıp modelleme, merkezi bir tema olmaya devam etmektedir ve Lope, PCB'ye entegre edilmiş manyetik cihazlarda AC kayıplarının hesaplanmasında, özellikle geometri ve katman konfigürasyonlarının değiştirilmesi durumunda karşılaşılan temel pratik sorunları belirlemiştir [10]. Margueron, belirli PCB iz şekillerinin yüksek frekanslı bakır kayıplarını nasıl etkilediğini araştırmış, FEA simülasyonları kullanarak keskin dönüşler ve eğriliklerin verimliliği azalttığını göstermiştir [11].

Nükleer manyetik rezonans (NMR) uygulamalarında Noohi, düzgün manyetik alanlar üretecek şekilde optimize edilmiş dikdörtgen bir PCB bobini tasarlamış, iletken yerleşiminin NMR sinyal kalitesini doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur [12]. Benzer şekilde, Letellier, güç PCB'lerinde halkalı geometri ve yerleşimin saçılma endüktansını, özellikle yüksek di/dt anahtarlama koşullarında nasıl etkilediğini nicel olarak incelemiştir [13].

Yüksek frekanslı alan şekillendirmesi ise Bahmani tarafından araştırılmış, elektromanyetik şekillendirme sistemlerinde şekilli alan yoğunlaştırıcıların varlığının genel manyetik alan dağılımını nasıl etkilediğini anlamak için 3D simülasyon kullanılmıştır [14]. Schäfer, saçak alanını telafi etme konseptiyle son derece kompakt PCB indüktörleri geliştirmiş, gelişmiş yerleşim tekniklerini

simülasyon geri besleme döngüleri ile entegre etmişlerdir [15]. Aynı ekibin sonraki çalışmasında, bu konfigürasyonların termal avantajları gösterilerek, kompakt otomotiv PCB ortamlarında performansın artırıldığı ortaya konmuştur [16].

Mardiguian, döngüler ve izler gibi basit devre geometrilerinin nasıl manyetik alan yaydıkları konusunda temel bilgiler sağlamış, yalnızca şekle dayalı EMI azaltma stratejileri geliştirilmesi için bir referans olmuştur [17]. Son olarak, Mandic, TEM hücreleri simülasyonları kullanarak, alan kuplajının iz genişliği, yüksekliği ve yönelimine nasıl bağlı olduğunu nicel olarak belirlemiş, alan şiddetinin yerleşim geometrisine göre büyük farklılıklar gösterdiğini doğrulamıştır [18].

1.2 Tezin Amacı

Gelişen teknoloji ile birlikte birçok alanda temassız uygulamalar gelişmektedir. Manyetik alanlar bu temassız uygulamalarda çokça yer almaktadır. Bu manyetik alanlar uygulama alanlarında çoğunlukla enerji aktarımı için kullanılırken daha küçük bir alanda sinyal ve kuvvet iletimi olarak da kullanılmaktadır.

İş sinyal ve kuvvet iletimi olunca oluşturulan ve vericiden alıcıya gösterilen manyetik alanın karakteristiği çok büyük bir önem oluşturmaktadır. Sinyal iletimi için manyetik alanın şiddeti ve çevresel faktörlerden etkilenmesi aktarılacak olan sinyalin bozulup bozulmayacağı ve sonuç olarak haberleşmenin sağlığını etkilemektedir. Kuvvet olarak ise oluşturulan manyetik alanın şiddeti, şekli, karakteristiği ve çevresel faktörlerden etkilenmesi istenilen kuvvetin şiddetini ve doğrultusunu etkileyebilir.

Bir diğer kullanım alanı olarak ise Manyetik alan olan bir X bölümü ile manyetik alanın minimum olması istenen bir Y alanı arasında bir izolasyon elde edebilmektir. Eğer karşılaşılabilecek manyetik alan öngörülebiliyorsa veya yeteri kadar hızlı şekilde analiz edilebiliyorsa bu manyetik alana karşı zıt bir karakteristik bir manyetik alan ile soğurma işlemi yapılabilir. Bu işlem için oluşturulacak olan manyetik alanı büyük önem taşımaktadır. Manyetik alanın kaynağı olan iletken üzerindeki akımın bu durumda yüksek olması gerektiği için bir tercih çatışması (trade-off) oluşur ve kullanım durumuna göre optimum olacak bir tasarım gerektirmektedir.

Bu sebeple bu çalışmadaki amacımız baskı devrelerde bulunan güç ve haberleşme hatlarındaki akımdan kaynaklanan manyetik alanlara benzer şekilde kasıtlı olarak

belli şekillerde tasarlanan hatlarda akım akıtarak manyetik alan oluşturmak ve bu manyetik alanları analiz etmek. Aynı zamanda hat üstündeki akımı ve frekansı kontrol ederek, oluşturulan manyetik alandaki değişimleri gözlemlemek ve çeşitli parametrelerin manyetik alana olan etkisi ile ilgili bir veri seti oluşturmak.

Farklı kullanımlar için daha öncesinde belirlenmiş manyetik alan şekillerini oluşturulan desenler kullanılarak gerçekleştirmek ve bu iş için kullanılan desen tasarımlarının artı ve eksi taraflarını gözlemleyerek optimum desenleri belirlemek.

Simülasyon ortamında karar verilen desenler üzerinde farklı akımlar akıtarak sonuçları gözlemlemek ve bu sonuçlar ışığında farklı kullanım amaçlarına yatkınlıklarını belirlemek.

Kart üzerindeki hat kalınlığı, desen büyüklüğü ve desen tekrar sayısı gibi parametrelerin manyetik alana olan etkisini gözlemlemek.

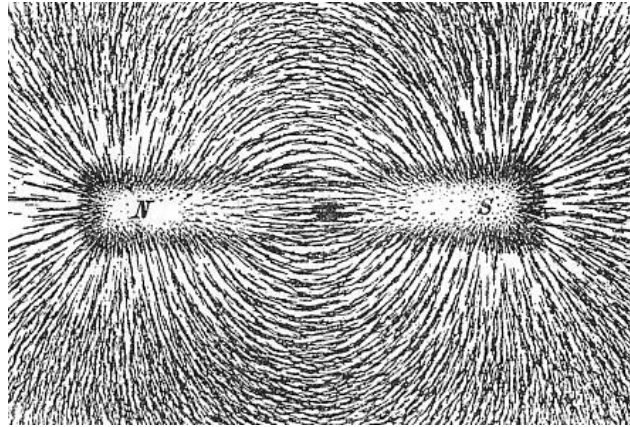
1.3 Hipotez

Bu tezde, baskı devre kartlarında farklı desenler kullanılarak istenen manyetik alanların üretilmesi hedeflenmiştir. Hipotezimiz, belirli geometrik desenlerin ve malzeme özelliklerinin, manyetik alanın yoğunluğunu ve yönünü kontrol edebileceği yönündedir. Bu bağlamda, farklı desenlerin manyetik alan üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenecek ve sonuçlar analiz edilecektir. Ayrıca, bu desenlerin manyetik alanın homojenliği ve gücü üzerindeki etkileri de değerlendirilecektir. Hipotezimiz, doğru desen ve malzeme kombinasyonlarının, istenen manyetik alan özelliklerini elde etmek için optimize edilebileceğini öngörmektedir. Manyetik alanın 3 eksen doğrultusunda da istenilen şekilde oluşturulması amaçlanmıştır. Manyetik alanların etkileşiminin önemi özellikle uçaklar gibi düşük görünürlükte EM alanların etkileşimi konusunda analizlere katkı sağlaması hedeflenmiştir. Literatürde elektriksel alanlardan ziyade manyetik alanlar ve bu alanların etkileşimi konusunda boşluklar bulunmaktadır. Manyetik alanlar konusu geniş bir konudur. Manyetik alanların yönlendirilmesi, istenilen geometride oluşturulabilmesi özellikle sensör teknolojileri için önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında bu kapsamda analizler ile literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2 MANYETİZMA

2.1 Manyetik Alan

Manyetizma, elektrik yüklerinin hareketinden kaynaklanan temel bir fiziksel olgudur ve nesnelar arasında çekici veya itici kuvvetler oluşturur [19]. Manyetik alanlar, elektrik akımları veya temel parçacıklar tarafından yaratılabilir ve bu alanlar, diğer manyetik momentleri ve akımları etkileyebilir. Manyetizma, mıknatıslar gibi manyetik malzemelerin davranışlarını ve bu malzemelerin etrafındaki alanları inceler. Manyetik alanların gücü ve yönü, manyetik alan çizgileri ile temsil edilir ve bu çizgiler, manyetik kutuplar arasında uzanır. Bu kutuplar, birbirine zıt manyetik alanlar oluşturur ve bu alanlar, manyetik kuvvetlerin kaynağıdır. Manyetik alanların etkisi, sadece mıknatıslar ve elektrik akımları ile sınırlı değildir, aynı zamanda Dünya'nın manyetik alanı gibi doğal manyetik alanlar da vardır. Dünya'nın manyetik alanı, gezegenimizin çekirdeğindeki hareketli erimiş demir nedeniyle oluşur ve bu alan, pusulaların çalışmasını sağlar. Şekil 2.1'de bir mıknatısın üzerinde oluşan manyetik alan görülmektedir.



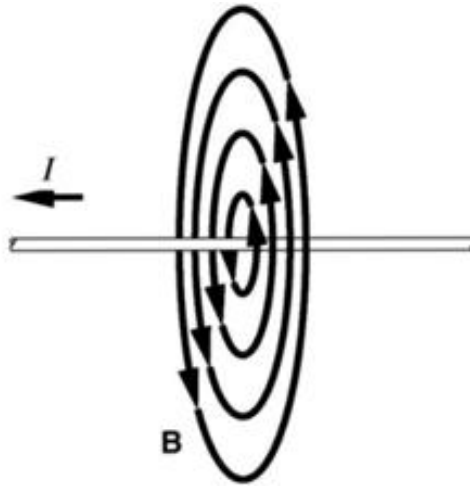
Şekil 2.1 Manyetik alan görüntüsü

2.2 Elektromanyetizma

Elektromanyetizma, elektriksel olarak yüklü parçacıklar arasındaki fiziksel etkileşimleri inceleyen bir bilim dalıdır. Bu etkileşimler elektrik ve manyetik alanlar aracılığıyla gerçekleşir ve matematiksel olarak Maxwell denklemleri ile tanımlanır [20]. Elektrik akımı ile manyetik alan arasındaki ilişki, temel bir fizik prensibine dayanmaktadır. Akımın olduğu iletken maddenin şekline, dolayısıyla akımın akış şekline göre farklı manyetik alanlar oluşmaktadır. Manyetik alanın büyüklüğü, akım ile doğru orantılıdır. Bu fenomen, elektromanyetizma prensiplerine dayanarak, elektrik enerjisinin manyetik enerji ile etkileşimini açıklar. Manyetik alanın oluşturulması, elektrik akımının temel bir özelliği olarak elektrik akımı içeren sistemlerin anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Elektrik akımının kontrolü ve yönetimi, manyetik alanların da kontrolünü sağlar. Elektrik akımı ve manyetik alanlar arasındaki bu ilişki, modern teknolojinin temel taşlarından biridir ve elektromanyetik cihazların, motorların, jeneratörlerin ve hatta manyetik depolama birimlerinin çalışma prensiplerini anlamamıza yardımcı olur.

2.3 Doğrusal İletken Etrafında Bulunan Manyetik Alan

Üzerinden akım geçiren doğrusal bir iletken etrafında merkezi iletken materyal olacak şekilde bir manyetik alan oluşmaktadır. Bu manyetik alan, iletkenin etrafında dairesel manyetik alan çizgileri oluşturur ve bu çizgiler, akımın yönüne bağlı olarak oluşur. Şekil 2.2 'de doğrusal bir iletken üzerinden akan akım sonucu oluşan manyetik alan görülmektedir.



Şekil 2.2 Doğrusal bir iletken etrafında oluşan manyetik alan

İletken etrafında herhangi bir noktadan alınan manyetik alanın hesabı için (2.1) denklemi kullanılmaktadır.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.1)$$

B: Manyetik Alan

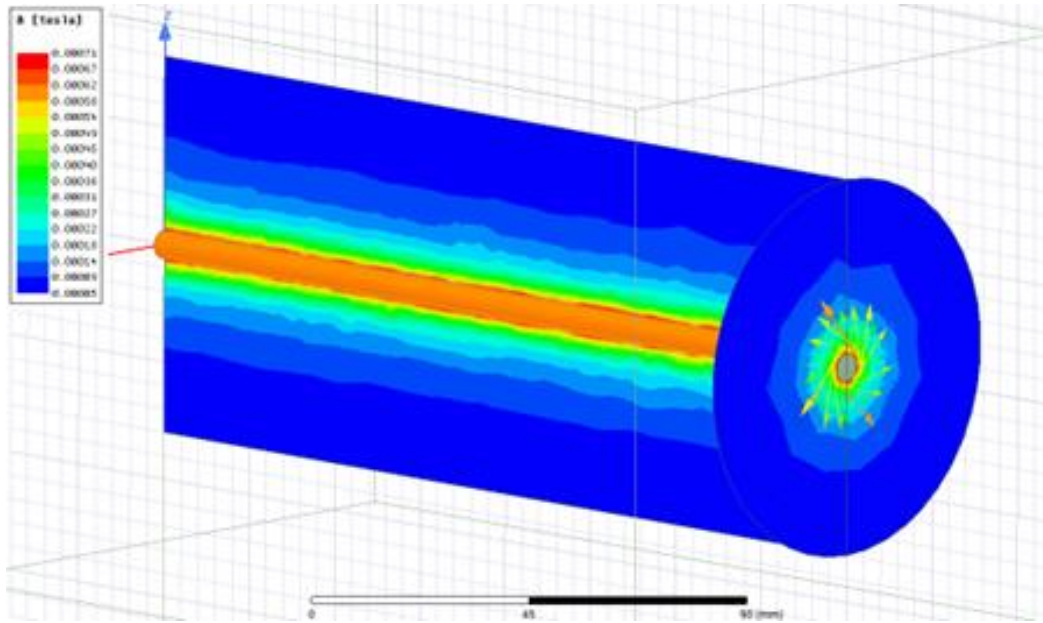
μ_0 : Ortam geçirgenliği

I: İletken üzerinden akan akım

r: Hesaplanan noktanın iletken ile olan mesafesi

Manyetik alanın şiddeti, akım ile doğru orantılıdır, akım ne kadar yüksekse manyetik alan da o kadar güçlü olur. Ancak manyetik alan, hat üzerindeki uzaklıkla ters orantılı olarak azalır, hat üzerinden uzaklaştıkça manyetik alanın şiddeti azalır.

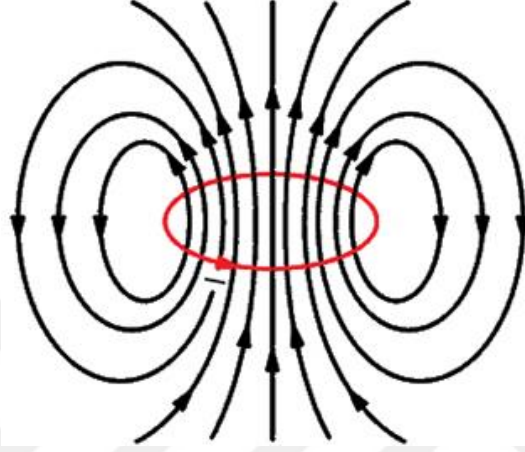
Şekil 2.3'de ANSYS Maxwell simülasyon ortamında doğrusal bir iletken üzerinde akıtılan akım sonucunda iletkenin etrafında oluşan manyetik alan görülmektedir. Alansal renkler manyetik alanın yoğunluğunu dairesel düzlem üzerindeki oklar ise manyetik alanın dönüş yönünü göstermektedir. Bu simülasyonda iletken üzerine doğru akım (DA) verilmiştir. Bu sebeple manyetik alanda statik olarak zamana bağlı olarak değişmeyen bir yapıda oluşmaktadır.



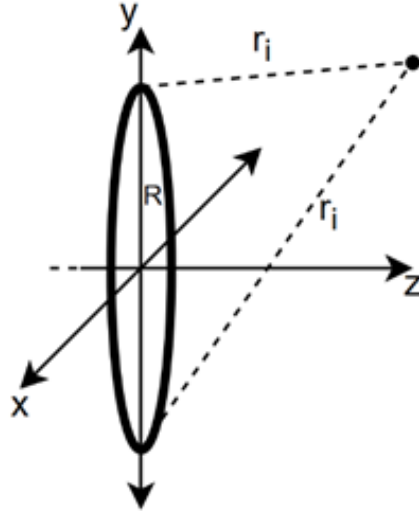
Şekil 2.3 Doğrusal iletken etrafındaki manyetik alan simülasyonu

2.4 Dairesel İletken Etrafında Bulunan Manyetik Alan

Akım doğrusal bir iletken üzerinde değil dairesel bir yol izliyor ise manyetik alan da buna bağlı olarak daha farklı şekillerde oluşacaktır. Bu şekil yine akımın etrafında bir daire oluşturacak şekilde iletken dairesi boyunca devam eden daireler kümesine benzer bir şekil oluşmaktadır. Şekil 2.4'de dairesel bir iletken üzerinde akan akımın neden olduğu manyetik alan karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Dairesel bir akımın etrafında oluşan manyetik alan



Şekil 2.5 Dairesel bir akımın etrafındaki herhangi bir noktada manyetik alan

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi dairesel iletkenin etrafında herhangi bir noktadaki manyetik alan değerini bulmak için kullanacağımız formül:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i \vec{dl} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2.2)$$

B: Manyetik Alan

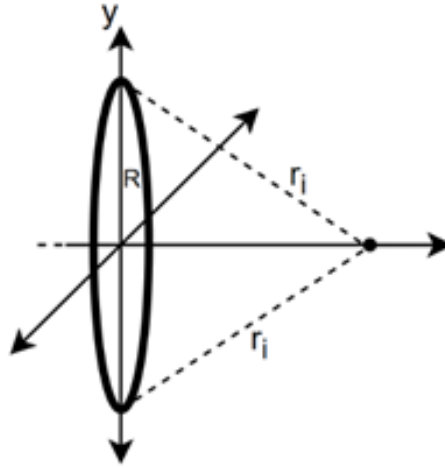
μ_0 : Ortam geçirgenliği

i: İletken üzerinde akan akım

r, l: Hesaplanan noktanın iletken ile olan mesafesi

Denklem dairesel yapının her bir birim bölümü etrafında oluşan dairesel manyetik alanların toplamını ele alarak tüm daireyi toplayan bir integral hesaplamasıdır.

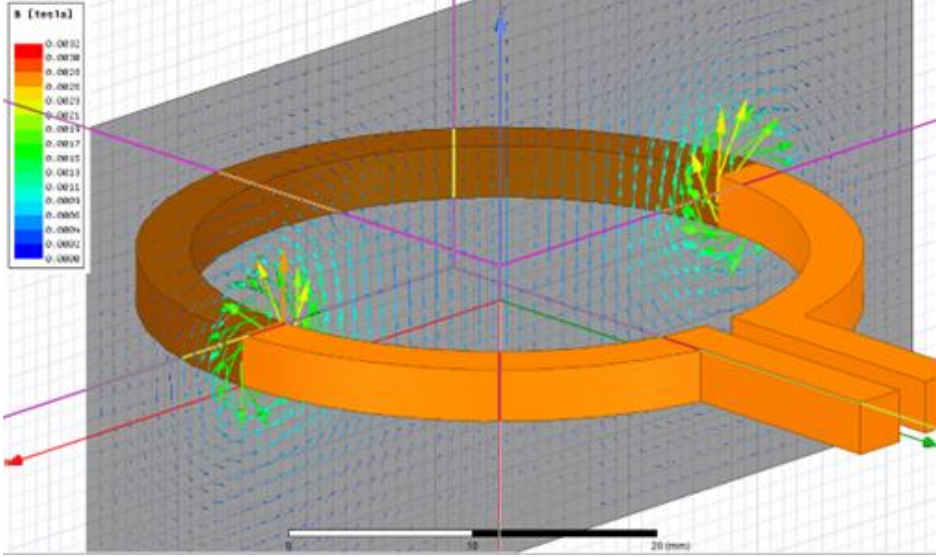
Özel olarak dairenin merkezi hizasında alacağımız bir noktadaki manyetik alanı daha sade bir formüller bulunabilir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi dairenin merkezinden daireye dik olarak uzanan eksen üzerinden alınmış bir noktada bulunan manyetik alanı bulmak için daha basitleştirilmiş olan aşağıdaki denklem kullanılabilir.



Şekil 2.6 Dairesel bir akımın merkez eksenindeki manyetik alan

$$B = \frac{\mu_0 i r^2}{2(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2.3)$$

Dairesel iletken etrafında oluşan manyetik alanı gözlemlemek için Ansys Maxwell programı üzerinde dairesel model olarak oluşturulan iletken üzerinde akım akıtılarak dairesel yapının kesiti üzerine yerleştirilen dikdörtgen bir düzlem üzerinde manyetik alan gözlemlenmiştir. İletkene DA uygulandığı için manyetik alan zamana bağlı olarak değişmemektedir ve Şekil 2.7'de gözlemlenen yapısı ile sabit şekilde oluşmaktadır.



Şekil 2.7 Dairesel bir akımın etrafında oluşan manyetik alanın simülasyon görüntüsü

2.5 Karmaşık İletkenlerin Etrafında Oluşan Manyetik Alan

İletken malzeme her zaman doğrusal veya dairesel yapı gibi düzgün şekillerde olmayacaktır. Daha karmaşık yapıdaki iletken yapılar çevrelerine daha karmaşık manyetik alanlar oluşturacaktır. Bu alanların hesaplanması ve analiz edilmesi çok daha zor olacaktır.

Aynı zamanda birbirinden farklı kaynaklarda oluşan manyetik alanlar birbirleri ile etkileşime girerek daha farklı şekiller oluşturmaktadır. Farklı amaçlar üzerine tasarlanmış her elektronik kart üzerinde küçük büyük manyetik alanlar oluşturmaktadır. Bu türdeki manyetik alanlar çok karmaşık ve birbiri ile karışmış alanlardır. Bu seviyedeki karmaşık manyetik alanlarda yardımımıza bilgisayar simülasyonları koşturmaktadır. Simülasyonlar, manyetik alanların etkileşimlerini ve davranışlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Bu sayede daha verimli ve etkili elektronik sistemler tasarlayabiliriz. Karmaşık manyetik alanların anlaşılması, modern teknolojinin gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır.

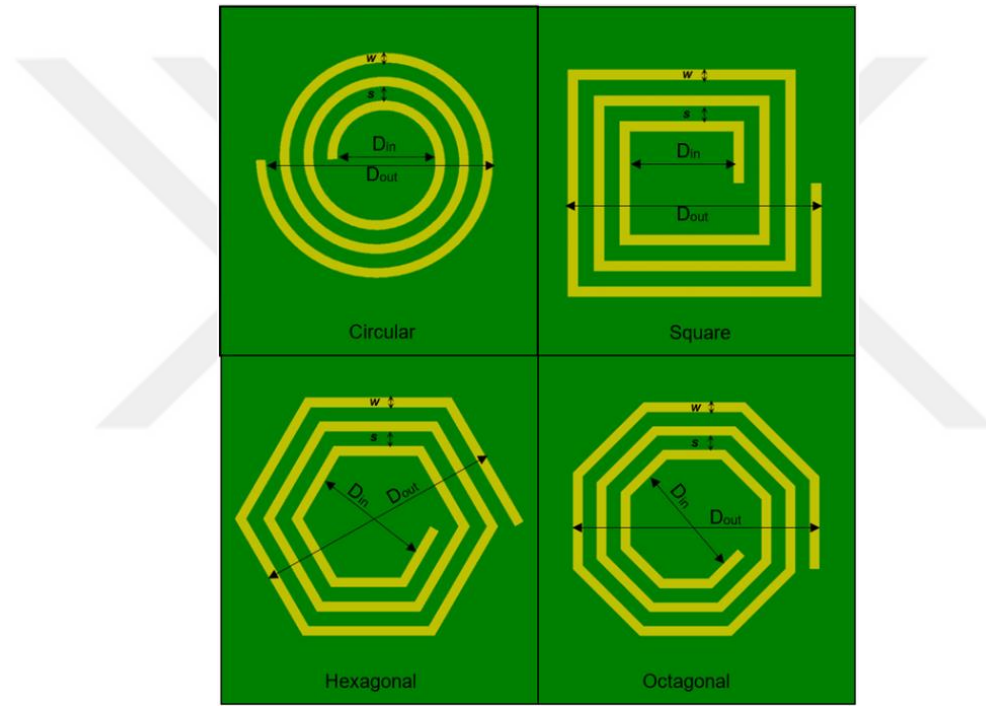
2.6 Sarmal Yapılarda Manyetik Alan

PCB spiral bobin (PCB Coil) olarak da bilinen, baskı devre kartları (PCB) üzerinde sarmal yapılar ile elde edilen yapılar ile manyetik alan oluşturmak mümkündür. Tabi burada bu sarmal yapının birçok parametresi vardır. Bunlar:

- Sarım sayısı
- Hat genişliği
- Hatlar arası mesafe
- Genel sargının şekli
- Kat sayısı

gibi sıralanabilir.

Çalışma sırasında kullanacağımız geometrik şekiller ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır. Bu sebeple bu bölümde sadece bu şekillerin arasında manyetik alan oluşturma açısından farklarına değinilecektir.



Şekil 2.8 PCB üzerinde kullanılacak sarmal yapılar

Şekil 2.8'de görüldüğü üzere daire, kare, altıgen ve sekizgen şeklinde farklı sarımlı yapılar bulunmaktadır [21]. Şeklin seçimi uygulama üzerinde farklar yaratacaktır.

Bu çizilen yapılar PCB Coils olarak bilinmesinden de anlaşılacağı üzere bir endüktansa sahiptir. Çalışmadaki simülasyon çalışmalarında bir gerilim kaynağı değil akım kaynağı kullanıldığı için burada bahsedilen hesaplama simülasyonda üretilen modellerde kullanılmamıştır. Ama pratik çalışmalarda bir gerilim kaynağı tarafından beslenen devrelerde hattın endüktans hesabının yapılması

gerekmektedir. Bu istenilen akım seviyesine ulaşabilmek için önemli bir noktadır. Hattın sahip olduğu endüktans (2.4) denklemi ile hesaplanabilmektedir [22].

$$L = \mu_0 \frac{n^2 d_{avg} c_1}{2} \left(\ln \frac{c_2}{\rho} + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad (2.4)$$

L: Hat indüktansı

μ_0 : Boş uzayın geçirgenliği ($4\pi 10^{-7} \text{H/m}$)

d_{avg} : İç ve dış çap ortalaması $((D_{out} + D_{in})/2)$

D_{out} : Dış çap

D_{in} : İç çap

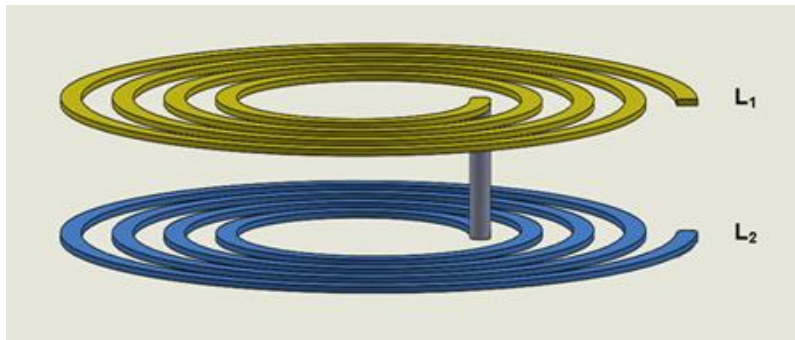
ρ : Sıklık oranı $((D_{out} - D_{in})/(D_{out} + D_{in}))$

c_1, c_2, c_3, c_4 : Geometriye bağlı katsayılar

C_i olarak adlandırılan değişkeni farklı araştırmalar üzerinden elde edebiliyoruz. Bu katsayılar tablo (2.1)'deki gibidir [21] [22].

Tablo 2.1 Farklı sargı şekillerinin C değişkenleri

Geometri	C_1	C_2	C_3	C_4
Kare	1,27	2,07	0,18	0,13
Altıgen	1,09	2,23	0,00	0,17
Sekizgen	1,07	2,29	0,00	0,19
Daire	1,00	2,46	0,00	0,20



Şekil 2.9 Baskı devre kartında 2 katlı sarmal yapı

Baskı devre kartları birden fazla kattan oluşabileceği gibi bu sarmal yapılarda Şekil 2.9'da görüldüğü gibi alt alta birden çok katlı şekilde olabilir [21] [22]. İki katlı bir PCB de üst üste konumlandırılmış iki sarmal yapı için toplam endüktans hesabı aşağıdaki gibidir [22].

$$L_{Total} = L_1 + L_2 \pm 2M \quad (2.5)$$

L: Toplam endüktans

L1: 1. kattaki endüktans

L2: 2. kattaki endüktans

M: Ortak endüktans

Ortak endüktans (2.6) denklemi ile bulunabilir [22]

$$M = K_c \sqrt{L_1 L_2} \quad (2.6)$$

Kc: $[(0.64n^2)/(0.184x^3 - 0.525x^2 + 1.038x + 1.001)] \times (1.67n^2 - 5.84n + 65)$

Söz konusu denklem daha fazla kat sayısı oldukça değişmektedir. Çalışma sırasında maksimum 2 katlı PCB'ler ile çalışıldığı için bu denklemlere değinilmemiştir.

2.7 Alternatif Akım ile Oluşan Manyetik Alanlar

Daha önceki bölümlerde bahsedilen manyetik alan durumları akım kaynağının sabit akım diğer bir deyişle DA akım olarak düşünülmüştür. Akım kaynağı doğru akım (DA) değil alternatif akım (AA) olarak ayarlanır ise bu akım sonucu oluşan manyetik alanda da bazı değişimler olacaktır.

İlk olarak DA ile oluşan manyetik alan zamandan bağımsızdır ve akım var olduğu sürece sabit bir şekilde var olmaya devam eder. Öteki yandan ise AA ile oluşan manyetik alanlar zamana bağlı olarak değişmektedir. Bunun sebebi manyetik alana sebep olan akımın yönü, şiddeti gibi değerlerin değişmesidir. Aynı zamanda bunun sonucunda manyetik alanın kendi kaynak akımı ile aynı frekansta olacağı sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca manyetik alanın sürekli olarak değişmesi elektromanyetik endüksiyona neden olmaktadır.

DA ile oluşan manyetik alanlar (2.1) ve (2.2) denklemleri ile formüle edilmişti. AA ile oluşan manyetik alan ise zamana bağlı şekilde gösterilmektedir. DA'da olduğu

gibi iletkenin şekli gibi değişken parametrelere bağlı olsa da örnek olarak (2.7) denklemi verilebilir.

$$B(t) = B_0 \sin (2\pi ft) \quad (2.7)$$

B(t): Zamana bağlı manyetik alan

B₀: Manyetik alan genliği

f: Frekans

t: Zaman

İki farklı akım tipinin oluşturduğu manyetik alanların canlılara olan etkisi incelendiğinde DA kaynaklı manyetik alanlar sabit alanlardır ve biyolojik dokular ile etkileşime girmezler. Öteki yandan ise değişen manyetik alanlar dokularda indüklenen akımlar oluşturabilmektedirler. Özellikle yüksek frekanslar ve uzun süreli maruziyet sağlık risklerine yol açabilirler. Tablo 2.2'de AA ve DA akımlarının oluşturacağı manyetik alanların bazı farklılıkları belirtilmiştir.

Tablo 2.2 AA ve DA manyetik alanların farkları

Özellik	DA Manyetik Alan	AA Manyetik Alan
Zamana bağlılık	Sabit	Değişken
İndüksiyon	Sadece akım değişiminde	Sürekli
Yüzey etkisi	Yok	Var
Yakınlık etkisi	Yok	Var
Matematiksel model	Biot-Savart/Ampere	Maxwell

2.8 Yüzey Etkisi (Skin Effect)

Alternatif akımın iletken içerisindeki dağılımı, frekansla birlikte değişir. Yüksek frekanslarda, akım iletkenin merkezinden yüzeyine doğru kayar ve çoğunlukla iletkenin dış bölgelerinde yoğunlaşır. Bu olaya cilt etkisi (skin effect) denir. Cilt etkisi, iletkenin kesit alanı içerisindeki akımın aktığı bölgenin azaltarak alternatif

akım direncinin artmasına neden olur. Bu durum, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda iletken kayıplarını önemli ölçüde artırır.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu f}} \quad (2.8)$$

δ : Deri kalınlığı

μ : İletkenin manyetik geçirgenliği ($\mu_0 \times$ (İletkenin geçirgenlik katsayısı))

ρ : İletkenin direnci

f: Frekans

Denklem (2.8)'de δ , deri kalınlığı parametresi gösterilmektedir. Bu ifade akımın yüzeydeki yoğunluğunun yaklaşık %37 kadar azaldığı mesafeyi temsil eder [22].

Bu durum akımın frekansı arttıkça etkisi daha da büyümektedir ve akımın aktığı çevresel alan daha da incelerken kendi içinde yoğunlaşmaktadır. Akımın iletkenin kenar kesimlerinde yoğunlaşması iletkenin iç bölgesinde de manyetik alan oluşumu görmemize sebep olmaktadır. Şekil 2.10'da frekans arttıkça akım yoğunluğunun iletken kesitinde nasıl görüldüğü gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Frekansa göre yüzey etkisinin kablo kesitindeki görseli

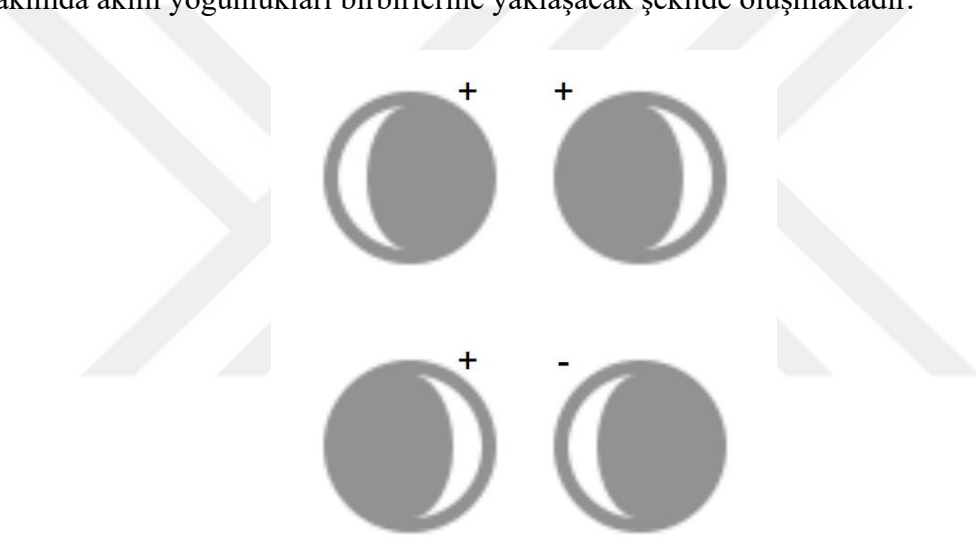
2.9 Yakınlık Etkisi (Proximity Effect)

Alternatif akımın iletkenler üzerindeki dağılımı yalnızca iletkenin kendi yapısından değil, aynı zamanda çevresindeki diğer iletkenlerden de etkilenir. Bu etkileşim, yakınlık etkisi olarak adlandırılır. Yakınlık etkisi, bitişik iletkenlerde akan alternatif akımın, birbirlerinin manyetik alanlarından etkilenerek iletken içindeki akım

dağılımını düzensiz hâle getirmesiyle ortaya çıkar. Özellikle yüksek frekanslarda iletkenin etkili direncinin artmasına neden olur [23].

Yakınlık etkisi, özellikle yüksek frekanslarda daha belirgin hale gelir. Bu etki sonucunda, iletkenin yüzeyine sıkışan akım (yüzey etkisi) daha da dengesiz bir dağılım sergileyerek sistemdeki kayıpları artırır. Yüksek frekanslı sistemlerde iletkenlerin geometrik yerleşimi ve birbirlerine olan uzaklıkları, sistem performansı üzerinde kritik öneme sahiptir.

Şekil 2.11'de aynı yönde ve farklı yönde akım akmakta olan iki iletken kesiti içerisinde meydana gelen yakınlık etkisi görülmektedir. Aynı yönde akan akımlarda akım yoğunluğu birbirlerinden uzaklaşacak şekilde oluşurken zıt yönlerde akan akımda akım yoğunlukları birbirlerine yaklaşacak şekilde oluşmaktadır.



Şekil 2.11 Yakınlık etkisinin kablo kesitindeki görüntüsü

2.10 Farklı İletkenler Arası Etkileşim

Bir PCB spiral bobininin kesit görünümü, iletkenlerin yan duvarları arasında paralel plaka parazit kapasitansı C_p olduğunu gösterir. Bu paralel kapasitans, spiral bobin boşluğunun uzunluğu boyunca dağıtılır ve hava ile FR4 di-elektrik alt tabakası tarafından etkilenir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi iki hat arasında hava üzerinden C_{pc} ve FR4 malzeme üzerinden C_{ps} olarak adlandırılan kapasitif etkiler oluşmaktadır [21]. Denklem (2.9)'da ise bu kapasitif etkinin hesabı gösterilmektedir [21].

$$C_p = C_{pc} + C_{ps} \approx (a\epsilon_{rc} + \beta\epsilon_{rs})\epsilon_0 \frac{l}{s} l_g \quad (2.9)$$

C_{pc} : Havadan kaynaklanan kapasitif etki

C_{ps} : FR4 malzemesinden kaynaklanan kapasitif etki

ϵ_{rc} : Havanın bağıl di-elektrik sabitidir ve değeri 1'dir.

ϵ_{rs} : FR4 malzemesinin bağıl di-elektrik sabitidir ve değeri 4.4'tür.

ϵ_0 : Vakum geçirgenliğidir.

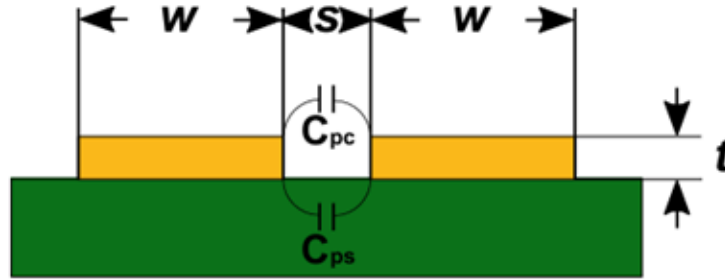
s : Hatlar arası mesafe

t : Hat kalınlığı

l_g : Yakınlığın olduğu uzunluk

α : FR4 malzeme için 0.9

β : FR4 malzeme için 0.1



Şekil 2.12 İki iletken arası kapasitif etki parametreleri

Denklem (2.9)'da görüldüğü üzere iki hat arasındaki kapasitif etki hatlar arası mesafe ile ters orantılı; hat kesitleri ve yakınlık boyu ile doğru orantılıdır.

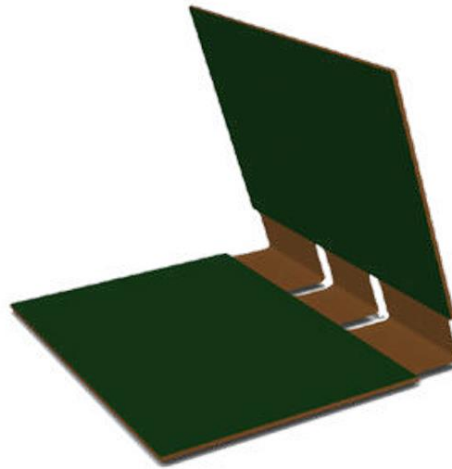
3

BASKI DEVRE KARTLARI

3.1 Baskı Devre Kartları

Elektronik devre elemanları arasında iletken yollar, adalar ve içi iletken kaplı delikler ile bağlantı sağlayan yalıtkan malzemeden üretilen plakalara Baskı Devre Kartı denilmektedir. Bu kartlar tek katlı olabileceği gibi birden çok kata da sahip olabilmektedir. Katların arasında yalıtkan malzeme bulunmaktadır. Kartlar rigid (katı) yapıda olabileceği gibi flex (esnek) yapıda da olabilmektedir.

Rigid yapıdaki kartlar, esneklik göstermezler ve iç yapısında bulunan di-elektrik malzemeler oldukça serttir. Bu tür kartlar, baskı devre kartları arasında en yaygın olarak kullanılan tiptir. Bu kartlar, dayanıklılık ve sağlamlık açısından birçok uygulama için uygun olup, performans ve güvenilirlik sağlarlar. Flex yapıdaki kartlar ise bükülebilme özelliği gösterirler ve bu özelliği desteklemek amacıyla içlerinde kullanılan di-elektrik malzemeler bu yönde seçilmektedir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi hem rigid hem de flex yapılar birlikte kullanılabilir [24].

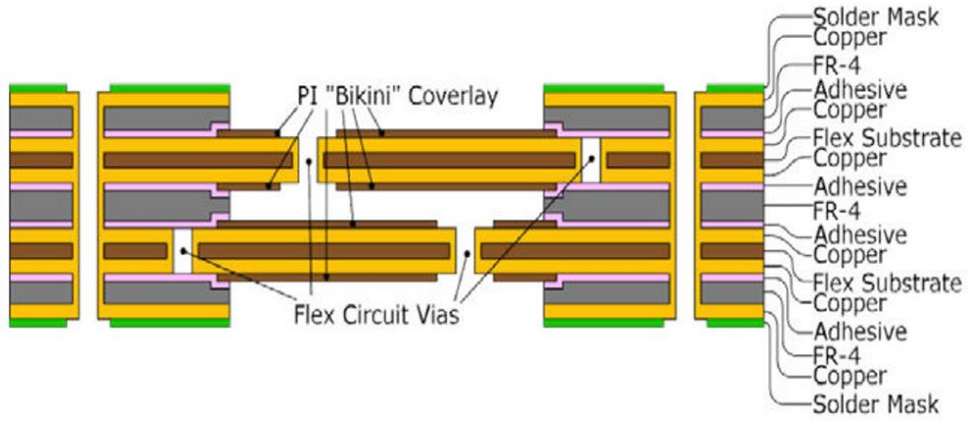


Şekil 3.1 Örnek rigid-flex-rigid PCB kartı

3.2 Layer Stack-Up Yapıları

Baskı devre kartları, sahip oldukları katman sayısına göre bir stack-up yapısına sahiptir. Stack-up, kartın fiziksel katmanlarının düzenini ve yerleşimini tanımlar. Katmanlarda bulunan iletken malzeme genellikle bakır materyalidir. Bakır, yüksek iletkenliği sayesinde elektrik sinyallerinin iletiminde önemli bir rol oynar.

Katmanlar arasında bulunan yalıtkan malzemeler de çeşitlilik gösterebilir. Yalıtkan malzemeler, elektrik sinyallerinin istenmeyen yollarla akmasını engeller ve katmanlar arasında elektriksel izolasyonu sağlar. Genel olarak kullanılan yalıtkan malzemeler arasında fenol türevli selülozik kağıt, camyünü+epoksi, selülozik kağıt+epoksi gibi çeşitler bulunmaktadır. Bu malzemeler, kartın mekanik dayanıklılığını artırır ve çevresel koşullara karşı direnç sağlar. Şekil 3.2'de örnek bir katman yerleşimi görülmektedir [24].



Şekil 3.2 Baskı devre kartı örnek Stack-Up yapısı

3.3 Via Çeşitleri

PCB'lerde istenmeyen bakır bölümler, foto aşındırma yolu gibi farklı yöntemler kullanılarak sadece gerekli bakır izleri bırakılır. Çift taraflı ya da çok katmanlı kartlar, alt tabakanın karşı yüzeylerindeki izleri birbirine bağlamak için deliklerden (via'lar) yararlanır.

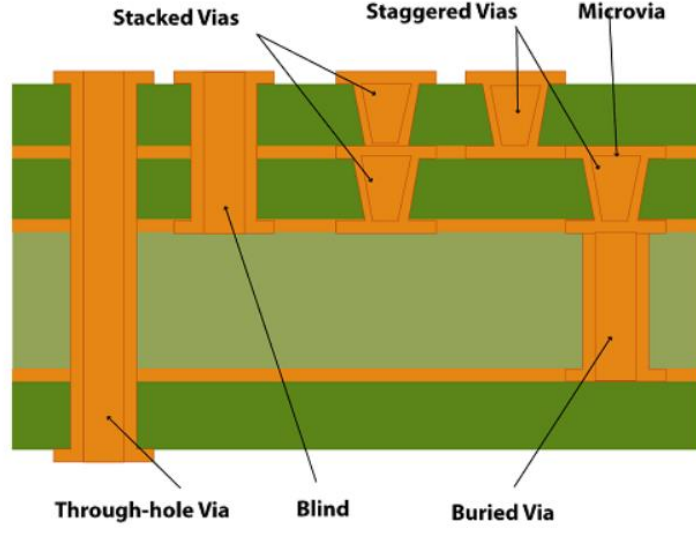
Yapılacak bağlantının tipi, via'nın kart üzerindeki konumu ve kartın tasarım karmaşıklığına bağlı olarak seçilir. Karmaşık ve yoğun devrelerde, farklı tipte via'lar kullanılarak tasarımın optimize edilmesi ve performansın artırılması hedeflenir. Via'ların doğru yerleştirilmesi ve seçilmesi, sinyal bütünlüğünü koruma

ve elektromanyetik girişimi azaltma açısından önemlidir. Genel itibari ile via çeşitleri tablo 3.1'de belirtilmiştir.

Tablo 3.1 Via çeşitleri

Via Çeşidi	Açıklama
Through-Hole (Geçişli Delik)	Tüm katmanları birbirine bağlar; en basit ve en sağlam via türüdür.
Blind Via (Kör Via)	Dış katmanı iç katmanlardan biri veya birkaçına bağlar.
Buried Via (Gömülü Via)	Sadece iç katmanlar arasında bağlantı kurar; dışarıdan görünmez.
Microvia (Mikrovia)	HDI-PCB'lerde kullanılan çok küçük (lazerle açılan) via türüdür.
Stacked Via (Yığılmış Via)	Derin bağlantılar için üst üste yerleştirilen birden fazla mikrovia.
Via-in-Pad (Pad üzerinde via)	Alan tasarrufu için pad altına yerleştirilen via; BGA uygulamaları için uygundur.
Backdrill Via	Sinyal bütünlüğünü artırmak için via'nın uç kısmı geri delinerek çıkarılır.

Şekil 3.3'de via çeşitlerinin kart üzerindeki görünümü gösterilmektedir [25]. Tabloda görülüp şekilde görülmeyen "Via-in-Pad" kart üzerindeki herhangi bir devre elemanının pad'inin direkt via üzerine konumlandırılmış halidir. "Backdrill Via" ise via üzerinde kullanılmayan alanın anten görevi görmemesi için hassas ekipmanlar ile üst veya alt yüzeyden başlanarak kırılmasıdır.



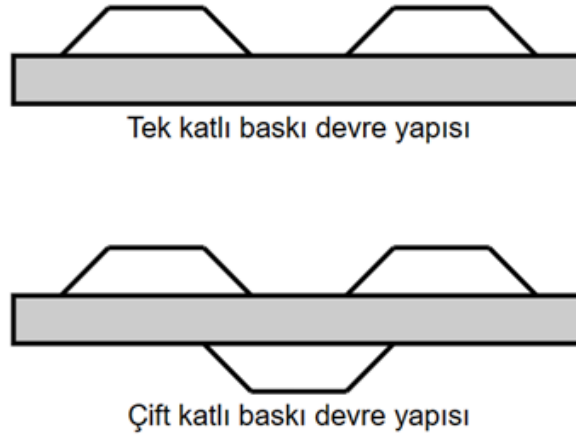
Şekil 3.3 Baskı devre kartı via yapıları

Farklı via tipleri PCB'lerin maaliyet ve üretim sürelerine etki etmektedir.

Bu bölümde testlerde ve simülasyon ortamında kullanılacak olan kart tiplerini, desen şekillerini ve sonuçta da elde etmeyi amaçladığımız manyetik alanlar üzerinde durulacaktır.

4.1 Çalışmada Kullanılan Kart Tipleri

Projede üretilecek ve analizi yapılacak olan baskı devreler, klasik rigid yapıdaki baskı devre şeklindedir. Desenin gerektirdiğine göre maksimum 2 katlı baskı devreler tasarlanmıştır. Şekil 4.1'de tek katlı ve çift katlı kartlar için kesit görüntüleri temsili görseli bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Tek ve çift yapılardaki baskı devre kartı kesit örnek görüntüsü

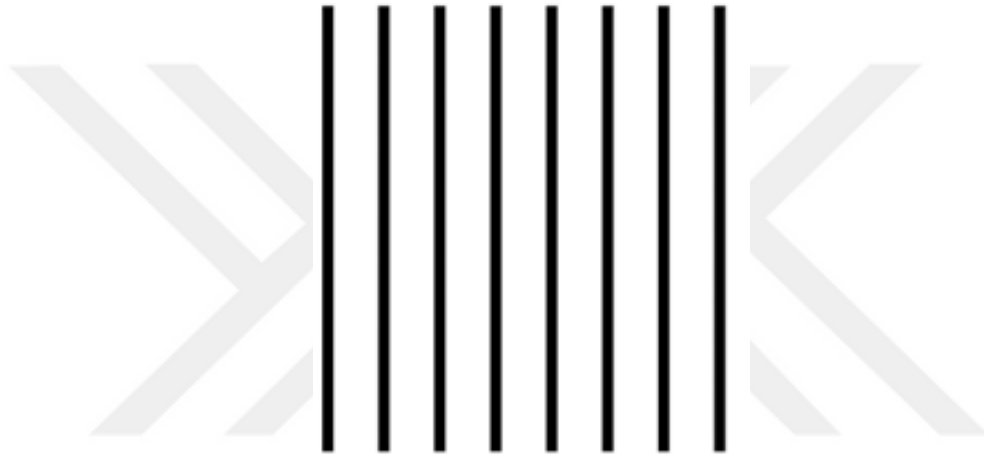
4.2 Test ve Simüle Edilecek Desen Tipleri

Farklı manyetik alanlar oluşturmak için sadece iletkenin akımı ve frekansını değiştirmek yeterli değildir. İletkenin şekli manyetik alanın değişiminde önemli bir yer tutmaktadır. Çalışma içerisinde birden çok farklı desen kullanarak oluşturulan

manyetik alanlar incelenmiştir. Bu desenler kendi içlerinde farklı yönlerde akım akıtılarak oluşturulan manyetik alanlarda değişimler yapılabilmektedir.

4.2.1 Desen-1

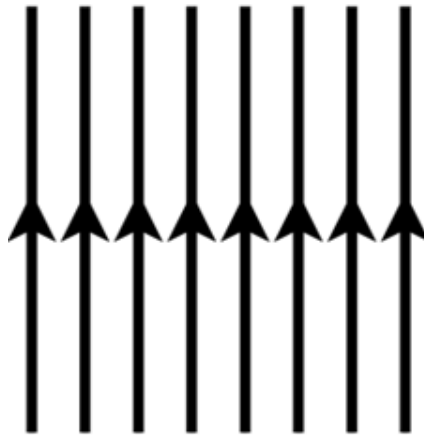
Desen-1 olarak belirlediğimiz desen ızgara desenidir. Bu desende Şekil 4.2'de görüldüğü üzere iletkenler doğrusaldır ve birbirlerine PCB üzerinde paralel şekilde konumlandırılmıştır. Akımların yönleri ise bağımsız olarak ayarlanarak farklı varyasyonlarda kullanılabilir. Bu desen üzerinde 3 farklı akım varyasyonu kullanılacaktır. Bu varyasyonlar desen-1A, desen-1B ve desen-1C olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.2 Desen-1 örnek görüntüsü

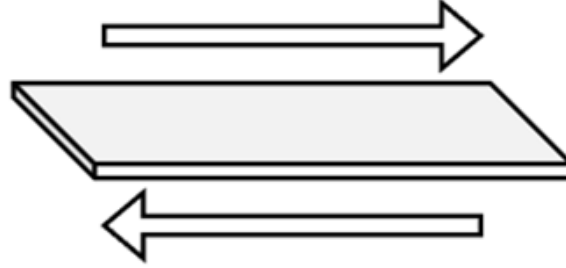
4.2.1.1 Desen-1A

Hatlardan aynı yönde akım akıttığımız durum desen-1A olarak adlandırılacaktır. Desen-1A özelinde hatlardaki akım yönleri Şekil 4.3'de görülmektedir.

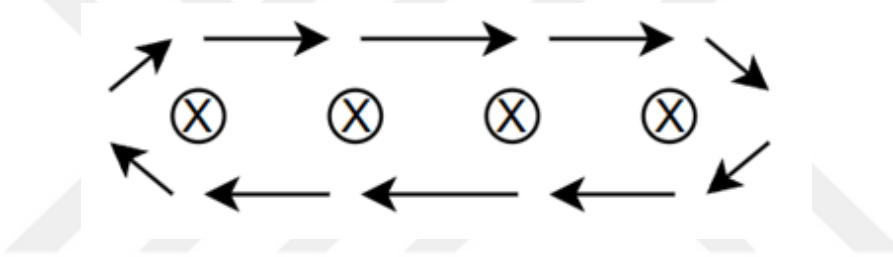


Şekil 4.3 Desen-1A örnek görüntüsü

Hatlardan aynı yönde akım akıtıldığında kartın etrafında oluşacak olan manyetik alanın kartın bir yüzünde karta paralel, hatlara ise dik olacak şekilde, kartın diğer yüzünde ise aynı şekilde ama farklı yönde olacağı öngörülmektedir. Desen-1A sonucunda elde edilmesi beklenen manyetik alan görüntüleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.4 Desen-1A ile oluşması beklenen manyetik alanın kart etrafındaki temsili

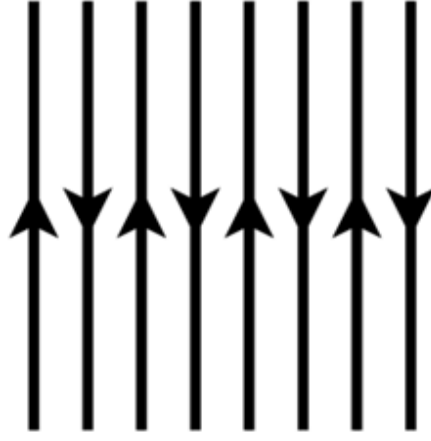


Şekil 4.5 Desen-1A ile oluşması beklenen manyetik alanın kart etrafındaki yatay kesit görüntüsü

Tek başına bir doğrusal iletkenin etrafında oluşan manyetik alan bu durumda birbirleri ile etkileşime girerek büyük bir döngü oluşturmaktadır. Bu nedenle karta paralel olan bu manyetik alan kartın iki yüzeyinde ters yöndedir.

4.2.1.2 Desen-1B

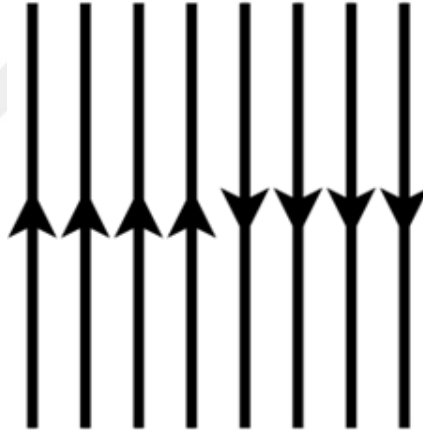
Desen-1 içerisinde kullanacağımız bir diğer akım varyasyonu paralel hatların yan yana sürekli akımın yön değiştirdiği durumdur. Bu durumda manyetik alanlar birbirinin tersi olacağı için kart etrafında kümülatif bir manyetik alanın oluşmasına engel olacaktır ve kart etrafında manyetik alan minimum seviyede olacaktır. Desen-1B özelinde hatlardaki akım yönleri Şekil 4.6'de görülmektedir. Desen-1B için elde edilmesi hedeflenen manyetik alan minimum seviyededir.



Şekil 4.6 Desen-1B örnek görüntüsü

4.2.1.3 Desen-1C

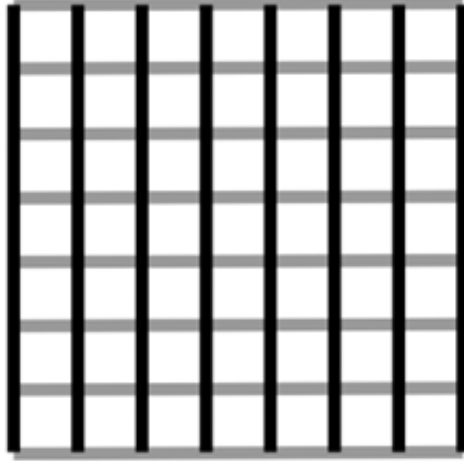
Desen-1C olarak isimlendirdiğimiz akım varyasyonunda hatların ilk yarısında akım bir yönde diğer yarısında ise zıt yönde akacak şekilde tasarlanmıştır. Desen-1C özelinde hatlardaki akım yönleri Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 Desen-1C örnek görüntüsü

4.2.2 Desen-2

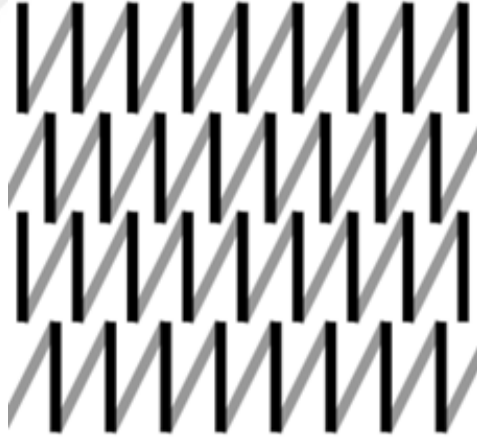
Bir başka desen olarak Şekil 4.8'de görüldüğü üzere kartın bir yüzeyinde ızgara olmak üzere diğer yüzeyinde bu ızgaraya dik açı ile yerleştirilen başka bir ızgara deseni de deney havuzuna eklenmiştir. Bu durum desen-1A durumuna benzer bir durum oluşturacaktır. Farklı olarak ise oluşacak olan manyetik alanın rotasyonunu değiştirme fırsatımız bulunmaktadır. İletken hatlar birbirlerinden ne kadar bağımsız olursa ve ne kadar farklı şekilde sürülebilirse manyetik alan üzerindeki hakimiyetimiz o kadar yüksek olacaktır.



Şekil 4.8 Desen-2 örnek görüntüsü

4.2.3 Desen-3

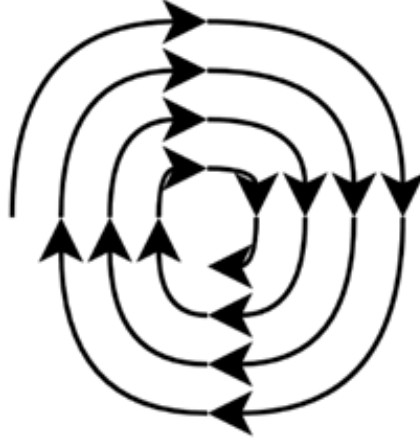
Karta paralel bir şekilde manyetik alan oluşturacağı öngörülen başka bir desenimiz ise Şekil 4.9'da görüldüğü üzere iki katlı bir kart üzerinde kurgulanacak olan helisel yapıdır. Dairesel iletken etrafında oluşan manyetik alan bölümünde anlatıldığı gibi bir manyetik alan bu durumda merkezindeki manyetik alan çizgileri karta paralel olacak şekilde konumlanmış olacaktır.



Şekil 4.9 Desen-3 örnek görüntüsü

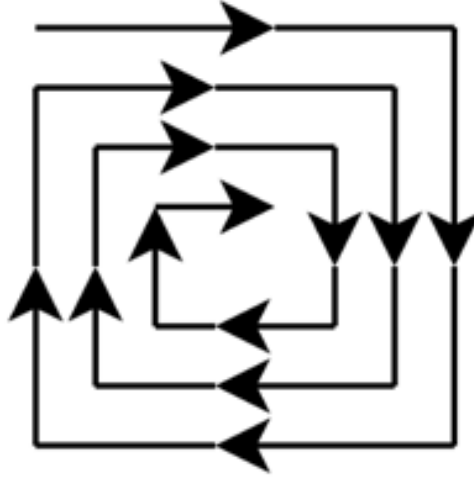
4.2.4 Desen-4

Son olarak ise en efektif şekilde kullanacağımızı düşündüğümüz sarmal yapıdır. Bu sarmal yapı birçok farklı şekilde kurgulanabilir. Tasarlanabilecek örnekler arasında olan daire ve kare yapıları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de görülmektedir.



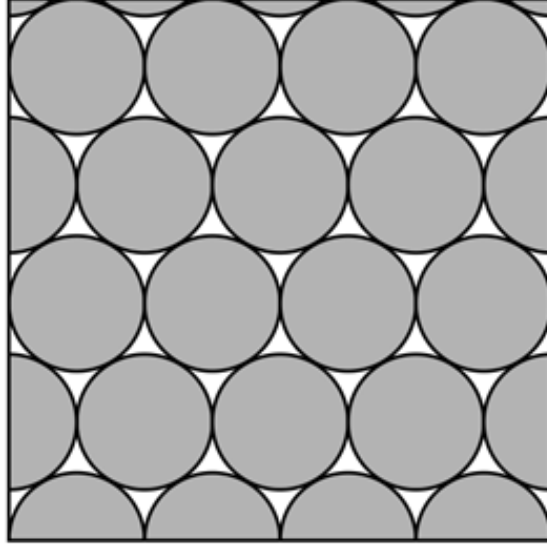
Şekil 4.10 Dairesel sarmal yapı örnek görüntüsü

Sarmal yapının şekli hem oluşturulacak manyetik alan için hem de kullanılacak alanın verimli şekilde kullanılması için önemli hale gelmektedir. İlk olarak manyetik alanlar için en uygun olan dairesel yapı düşünülse de alanın daha verimli kullanılabilmesi için farklı şekiller de değerlendirilmiştir.



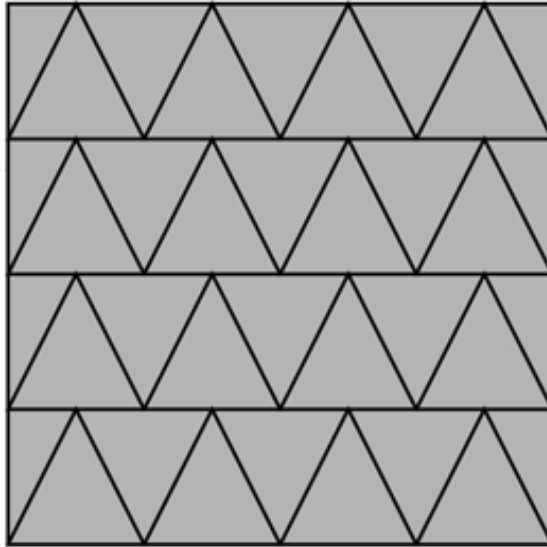
Şekil 4.11 Karesel sarmal yapı örnek görüntüsü

Hangi şekiller üzerinden gidileceğine karar vermek için örnek bir uzay üzerinde denemeler yapılmıştır. Bu denemedeki amaç örnek alınan karesel bir düzey (kullanacağımız baskı devre kartını temsil etmekte) üzerinde şekilleri optimum şekilde yerleştirdiğimizde yüzeyin ne kadar bir bölümünü kullanmaktayız. Bu sayede yüzeyin ne kadar verimli şekilde kullanıldığını görmekteyiz.



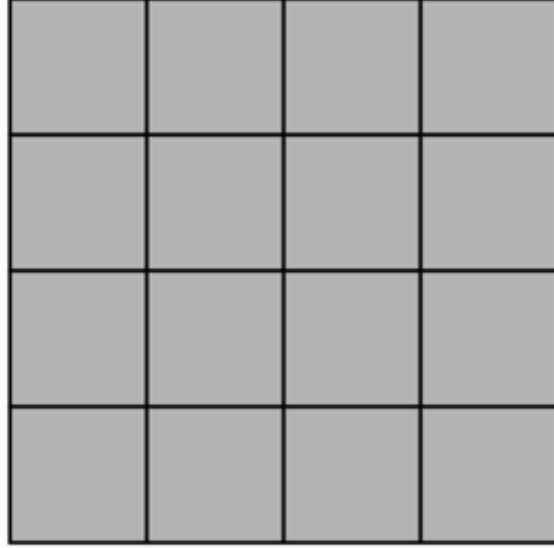
Şekil 4.12 Dairesel sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi

Şekil 4.12'de daire tipi için örnek yerleşim görülmektedir. Manyetik alan için en uygun şekil olan dairesel şekil kullanıldığında yüzey tam olarak kullanılmamaktadır ve kör bölgeler kalmaktadır. Gerekli hesaplar yapıldığına toplam yüzeyin kullanılan kısmı yaklaşık 90% olmaktadır.



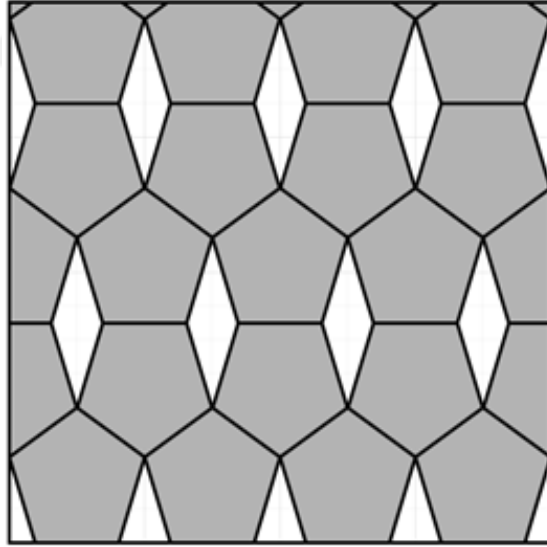
Şekil 4.13 Üçgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi

Şekil 4.13 'de üçgen tipi için örnek yerleşim görülmektedir. Üçgen şeklinde ise 180° çevirerek birbirleri ile uyumlu bir şekilde dizilebilmektedir. Aldığımız örnek yüzeyin 100% ünü kullanmaktayız. Fakat üçgen dar açılı ve keskin dönüşlü yapısı nedeniyle manyetik alan çalışmalarında istenmeyen sonuçlar doğurabilecektir.



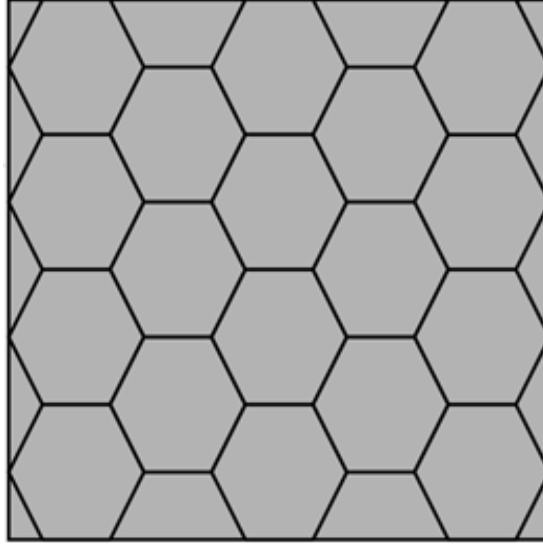
Şekil 4.14 Kare sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi

Şekil 4.14 'de kare tipi için örnek yerleşim görülmektedir. Kare, dikdörtgen veya eşkenar dörtgen yapılar kullanıldığında alınan örnek yüzeyin 100%'ünü kullanılabilmekteyiz. Üçgen yapıdan daha uyumlu olsa da yine keskin köşelerinden dolayı bu yapılarda istenmeyen sonuçlara yol açabilir.



Şekil 4.15 Beşgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi

Şekil 4.15'de beşgen tipi için örnek yerleşim görülmektedir. Beşgen yapısında şekiller tam olarak bir örüntü oluşturamamaktadır. Çalışmada oluşturulan dizilimde alanın 81,25%'ü kaplayabilmekteyiz.



Şekil 4.16 Altıgen sarmal yapının kart üzerinde yerleşimi

Şekil 4.16'de altıgen tipi için örnek yerleşim görülmektedir. Altıgen şekli hem kendi içerisinde bir örüntü oluşturabilmektedir hem de alanın 100%'ünü kullanabilmekteyiz. Aynı zamanda 120 derecelik iç açısı ile birlikte manyetik alan çalışmaları için daha uyumludur.

Bu çalışmalarda görüldüğü üzere bazı şekiller bir örnek uzayı kaplarken bazı şekiller nasıl dizesek dizelim her zaman alanda boşluklar bulunmaktadır. Bir şeklin bir yüzeyi tamamen kaplayabilmesine “tesselation” diğer bir deyişle “döşeme” denilmektedir. Bu şekilleri bulabilmek için çok basit bir işlem yapmamız gerekiyor. Bu şekillerin bir noktada birleşen en az üç tanesi 360° yapmalıdır. Şeklin bir iç açısını bulabilmek için (4.1) denklemi uygulanır. Daha sonrasında (4.2) denklemi ile sonucun tam sayı olması beklenir.

$$\theta = \frac{(n - 2) \times 180^\circ}{n} \quad (4.1)$$

$$\frac{360}{\theta} = \left[\frac{360}{\frac{(n - 2) \times 180}{n}} \right] \in Z \quad (4.2)$$

Çalışma sırasında kullanılacak olan daha büyük bir alanın bir parçası düşünülerek bir alan oluşturulmuştur. Asıl kullanılacak olan desenlerde kullanılan en küçük parçanın boyutlarının değişimi desenin çözünürlüğünü değiştireceği için kullanılan alanın oranında da değişime sebep olacaktır. Bu nedenle hesaplama yapılırken ve

örnek görsel çizilirken yapı taşı olan şekiller birbirleri ile aynı boyutlarda olacak şekilde çizilmiş ve hesaplanmıştır. Sonuçlar tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1 Geometrik şekillerin yüzey kaplama oranları

Geometrik Şekil	Hesaplama	Tesselation	Deneyerek ulaşılan yüzdelik
Üçgen	6	Evet	100%
Kare	4	Evet	100%
Beşgen	3,33	Hayır	81,25%
Altıgen	3	Evet	100%
Daire	-	Hayır	99,5%

Simülasyon ortamında bu sonuçlara göre dairesel yapı ve altıgen yapıların denenmesine karar verilmiştir.

4.3 Testlerin Yapıldığı Ortamlar

Simülasyon çalışmaları için ANSYS ürünlerinden biri olan MAXWELL programı kullanılmıştır. Desen tasarımı için ise yine tekrardan Ansys-Maxwell programı ve ek olarak Altium-Designer programı kullanılmıştır.

5

BASKI DEVRE KARTLARI

5.1 Kullanılan Programlar

Çalışma için yapılacak olan simülasyonlar Ansys Maxwell programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Ansys Maxwell, Ansys firması tarafından geliştirilen ve elektromanyetik alan simülasyonu için kullanılan bir mühendislik yazılımıdır. Elektrik makineleri, transformatörler, sensörler, aktüatörler ve diğer elektromanyetik bileşenlerin tasarımı ve analizi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEA) tabanlı çözümler sunar.

Modeller mümkün oldukça Maxwell üzerinde oluşturulmuştur. Maxwell üzerinde oluşturması zor olan modeller için ise Altium Designer programı kullanılmıştır. Bu şekilde planlanmasında etkili olan sebep Altium Designer programında tasarlanan modeller çok daha detaylı çıktılar vereceğinden dolayı simülasyon programı üzerinde simülasyonları zorlaştırarak simülasyon sürelerini dramatik şekilde artırmaktadır.

Altium Designer, elektronik devre tasarımı ve baskılı devre kartı (PCB) geliştirme süreçleri için kullanılan, Altium Limited tarafından geliştirilen kapsamlı bir elektronik tasarım otomasyon (EDA) yazılımıdır. Elektronik mühendisleri ve tasarımcılar tarafından devre şematiklerinin oluşturulması, PCB düzenleme, bileşen kütüphanelerinin yönetimi, katman tabakalı tasarım ve üretim dokümantasyonu hazırlama gibi işlemler için tercih edilir.

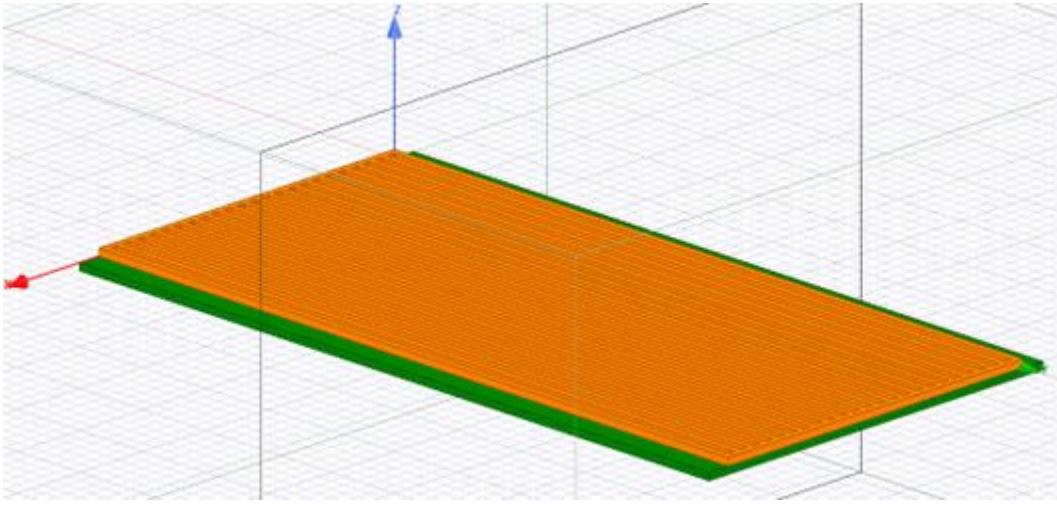
Maxwell programı içerisinde Maxwell 3D modülü kullanılmıştır. DA simülasyonu için Magnetostatic adındaki çözüm tipi (solution type), AA akım simülasyonu için ise EddyCurrent çözüm tipi (solution type) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları

vektörel ve alansal olmak üzere iki çeşitte gösterilmiştir. Manyetik alanın karakteristiğine göre en iyi anlaşılabilir eksende görüntülenmesi yapılmıştır.

5.2 Desen-1

5.2.1 Desen-1A

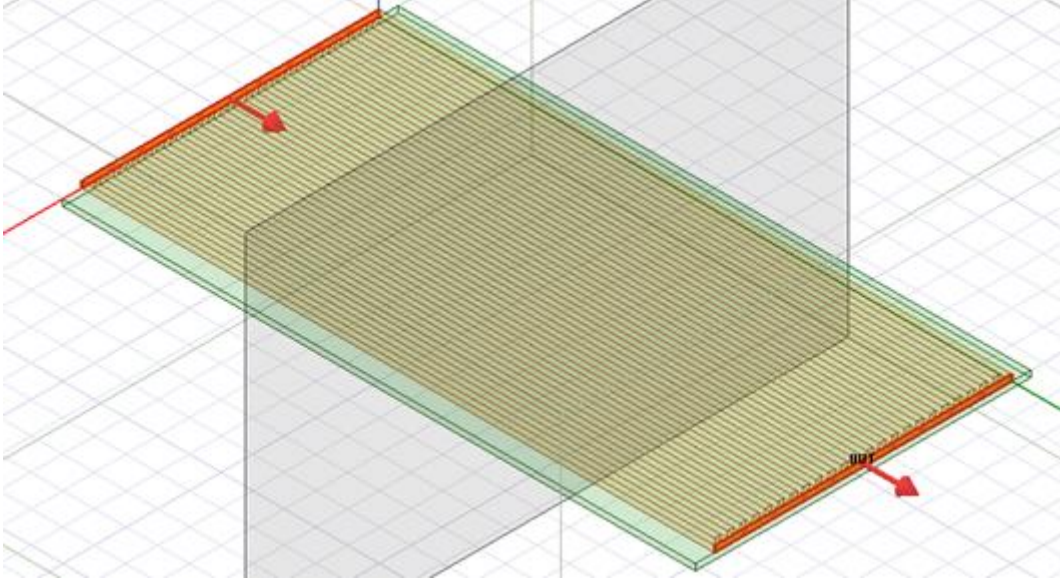
Simülasyon ortamında birbirine paralel 24 adet hat çizilmiştir. Bu hatlar başta ve sonda dik bir hat ile birleştirilerek akım tanımlaması yapılacak yüzey oluşturulmuştur. İletken malzeme olarak bakır di-elektrik malzeme olarak FR4 seçilmiştir. Oluşturulan model şekil 5.1'de görülmektedir.



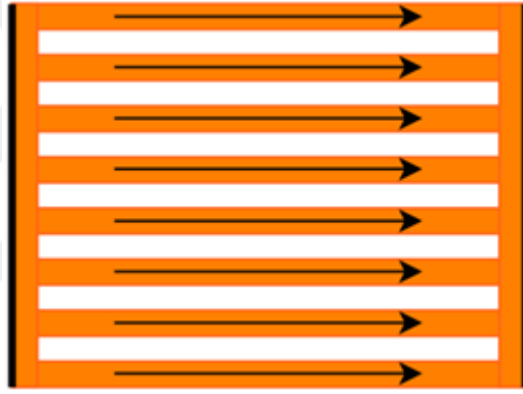
Şekil 5.1 Desen-1A simülasyon modeli

Akım tanımlaması yapılan yüzey üzerinde her bir hatta 1A düşecek şekilde 24A değerinde bir akım tanımlaması yapılmıştır. Akım bir noktadan diğer noktaya herhangi bir yön değiştirme yapmadan ilerleyecek şekilde planlanmıştır. Şekil 5.2'de akım tanımlamalarının yapıldığı yüzeyler ve akım doğrultusu gösterilmektedir.

Simülasyon ortamında oluşturulan modelin daha rahat anlaşılması için şekil 5.3'de modelin basitleştirilmiş bir çizimi gösterilmektedir. Şekil kenarlarında bulunan siyah çizgili kenarlar üzerinde akım tanımlaması bulunmaktadır.



Şekil 5.2 Desen-1A modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkışı

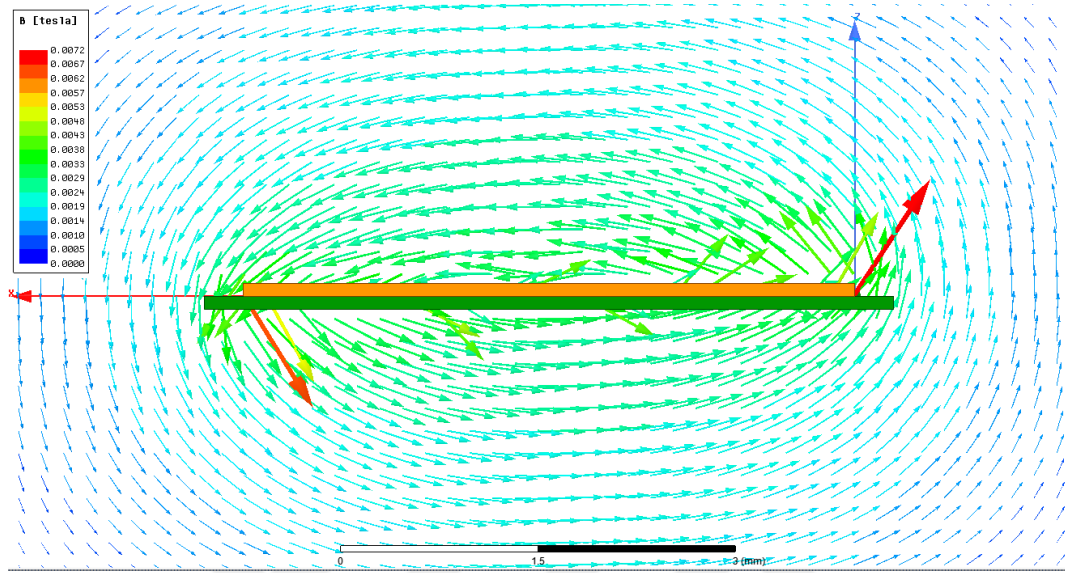


Şekil 5.3 Desen-1A modeli mantıksal görüntüsü

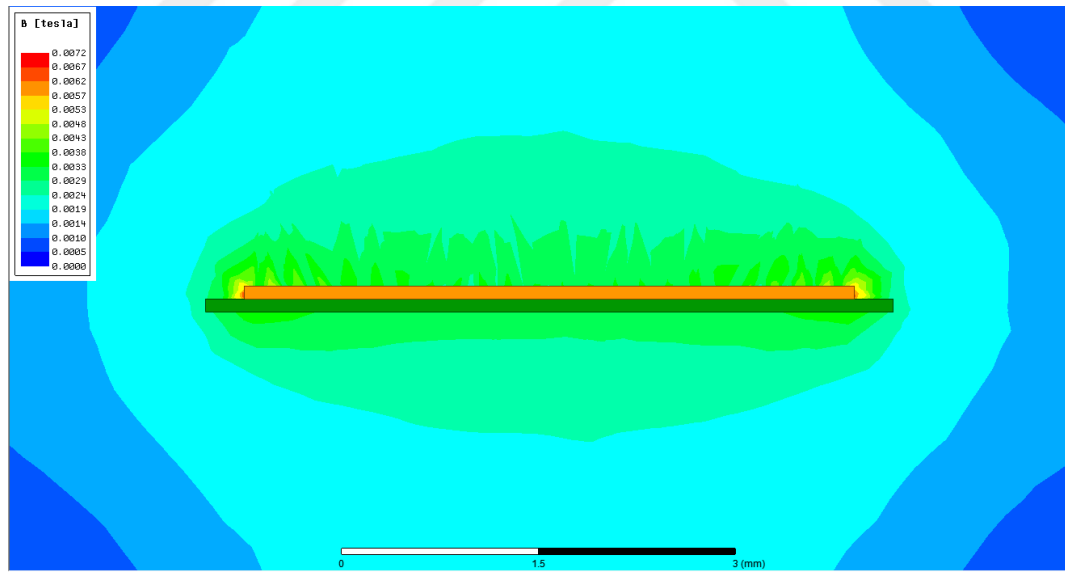
Şekil 5.4'de vektörel simülasyon sonucu görülmektedir. Sonuçta elde edilen manyetik alan beklenildiği üzere kart etrafında hatları dik şekilde kesen bir düzlemde dönen bir şekilde oluşmuştur. Desenin bittiği noktalarda noktasal olarak daha yüksek seviyelerde alanlar görünse de desenin daha da uzadığı durumlarda kart üzerinde teoride düşünülen paralel vektör yapıları dışında bir durum gözlemlenmeyecektir. Modelin kenarları yerine ortada oluşan manyetik alan bize daha doğru bir sonuç göstermektedir. Tanımlanan akım değerleri doğru akım şeklinde olduğu için hat içerisindeki yakınlık etkisi veya yüzey etkisine değinilmemiştir.

Şekil 5.5'de ise simülasyon sonucun vektörel dışında alansal sonucu görülmektedir. Gözlemlenen sonuca göre kart ortasında karttan uzaklaştıkça düşen bir manyetik

alan şiddeti görülmektedir. Kartın sağ ve sol kenarlarına yaklaştıkça oluşan manyetik alan şiddet seviyelerinin alanları azalmaktadır. Kartın daha büyük bir alana yayıldığında bu azalmanın olmayacağı kartın orta hizasında alınan sonucun daha büyük bir alanda bozulmadan kendini göstereceği yorumu yapılmıştır.

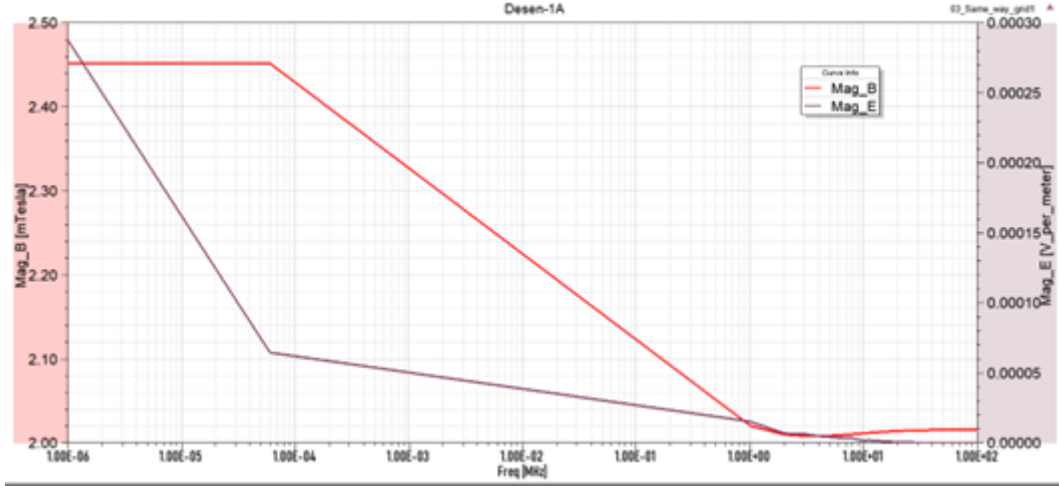


Şekil 5.4 Desen-1A modeli vektörel simülasyon sonucu



Şekil 5.5 Desen-1A modeli alansal simülasyon sonucu

Son olarak ise aynı model üzerine AA tanımlanarak simülasyonu yapılmıştır. Akım 10Hz seviyesinden 100MHz seviyelerine çıkmaktadır. Bu aralıkta kartın orta noktasından yukarı 1mm yükseklikteki bir noktadan alınan örnek nokta üzerindeki B ve E alanları ölçülmüştür. Frekans değişimine göre manyetik alandaki değişim şekil 5.6'de görülmektedir.

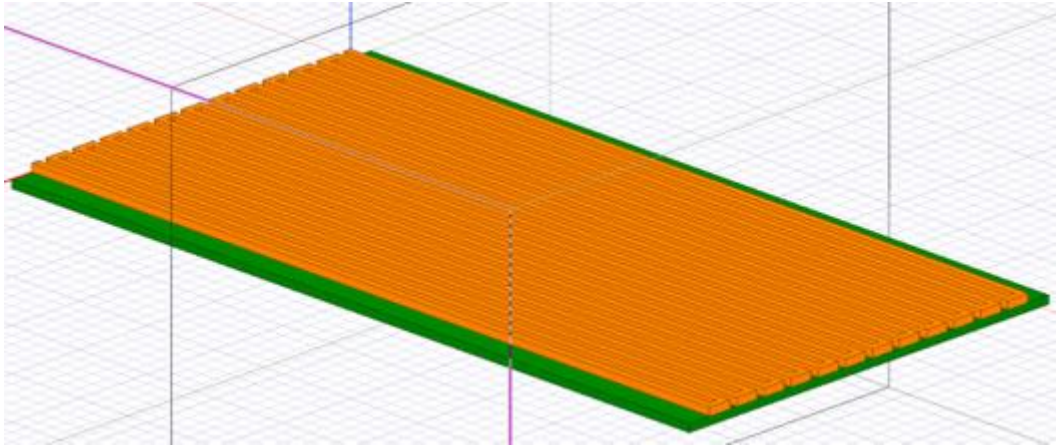


Şekil 5.6 Desen-1A modeli üzerindeki örnek noktada oluşan manyetik alanın frekansa göre değişimi

Grafik incelendiğinde frekansın artması manyetik alanın düşmesine sebep olmaktadır. Bu düşüşün başlıca sebebinin artan frekans sonucunda yüzey ve yakınlık etkilerinin artması ve bu sebepten dolayı eddy akımlarının oluşması ve bu akımların oluşacak olan manyetik alana ters olacak manyetik alanlar oluşturmasıdır.

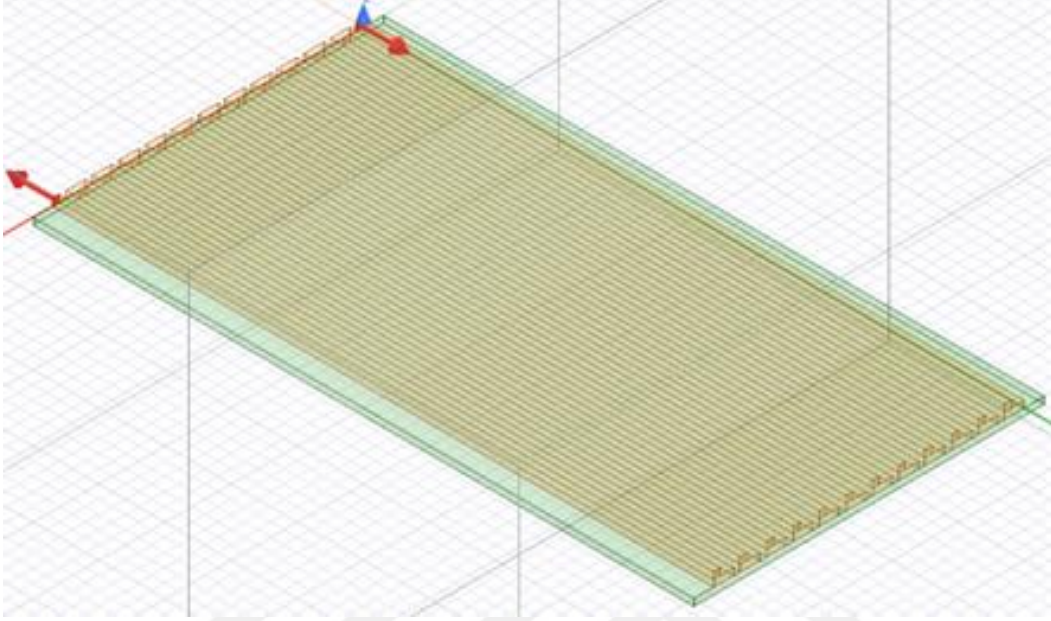
5.2.2 Desen-1B

Simülasyon ortamında 180° dönüşler yaparak birbirine paralel 24 adet hat oluşturan bir hat çizilmiştir. Bu hattın başlangıç ve bitiş yüzeylerine akım tanımlaması yapılmıştır. İletken malzemesi olarak bakır, di-elektrik malzeme olarak ise FR4 malzeme kullanılmıştır. Şekil 5.7'de oluşturulan model görülmektedir. İletken malzeme turuncu renk, di-elektrik malzeme ise yeşil renk ile görülmektedir.



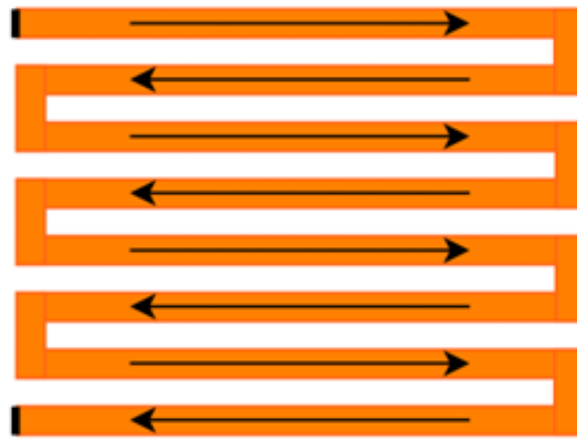
Şekil 5.7 Desen-1B simülasyon modeli

Paralel oluşturulan tüm hatlar birbirlerine seri olarak bağlı olduğu için hepsinden aynı akım geçecektir bu sebeple oluşturulan tek hattın akım tanımlaması 1A olarak belirlenmiştir. Bu sayede paralel olan tüm hatlardan 1A akım akacaktır. Akım tanımlamasının yapıldığı yüzeyler ve akımın yönü şekil 5.8'de görülmektedir.



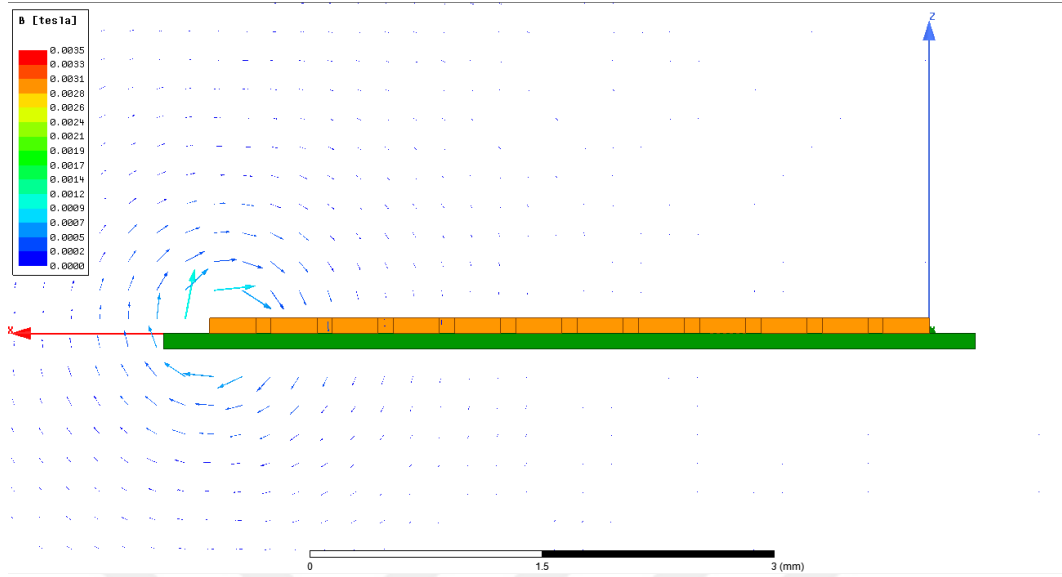
Şekil 5.8 Desen-1B modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkışı

Simülasyon ortamında oluşturulan modelin daha rahat anlaşılması için şekil 5.9'de modelin basitleştirilmiş bir çizimi gösterilmektedir. Şekil kenarlarında bulunan siyah çizgili kenarlar üzerinde akım tanımlaması bulunmaktadır. Simülasyon görüntüleri desenin ortasından kesit halinde alınmıştır bu sayede U dönüşlerinde oluşan fark sonuçlarda gözlemlenmemiştir.

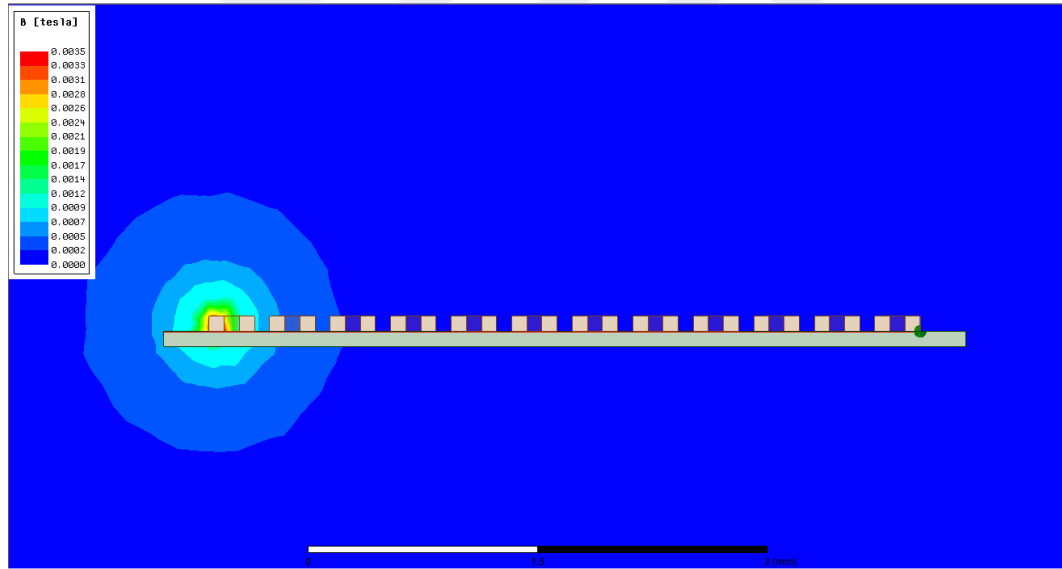


Şekil 5.9 Desen-1B modeli mantıksal görüntüsü

Şekil 5.10'de vektörel simülasyon sonucu, şekil 5.11'de ise alansal simülasyon sonucu görülmektedir.



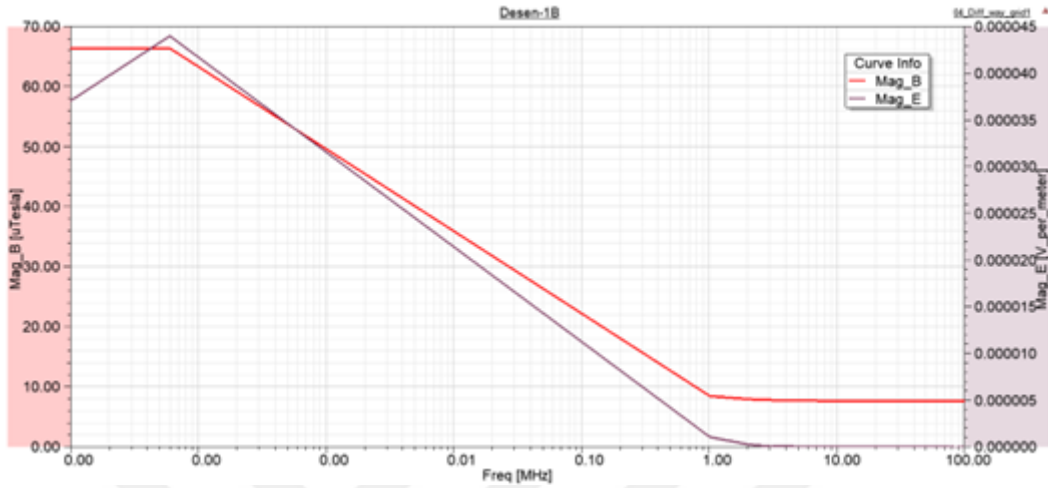
Şekil 5.10 Desen-1B modeli vektörel simülasyon sonucu



Şekil 5.11 Desen-1B modeli alansal simülasyon sonucu

Elde edilen sonuçlara göre yan yana olan hatların akımları ters olduğu için manyetik alan yönleri de birbirlerine ters olmuş durumdadır. Ters yönlü manyetik alanlar birbirlerini soğurarak kart etrafındaki alanı minimum seviyelerine inmesine neden olmuştur. Birbirine sarılan iki kablo üzerindeki akım ters yönlü olduğu için kablonun etrafında manyetik alan oluşmamaktadır. Kartın sol tarafında oluşan manyetik alan paralel hatların devam etmemesinden kaynaklı olarak o manyetik alanı soğuracak başka bir manyetik alan oluşmaması olarak yorumlanmıştır.

Aynı model üzerine AA tanımlanarak simülasyonu yapılmıştır. Akım 1Hz seviyesinden 100MHz seviyelerine çıkmaktadır. Bu aralıkta kartın orta noktasından yukarı 1mm yükseklikteki bir noktadan alınan örnek nokta üzerindeki B ve E alanları ölçülmüştür. Değerler şekil 5.12’de görülmektedir.



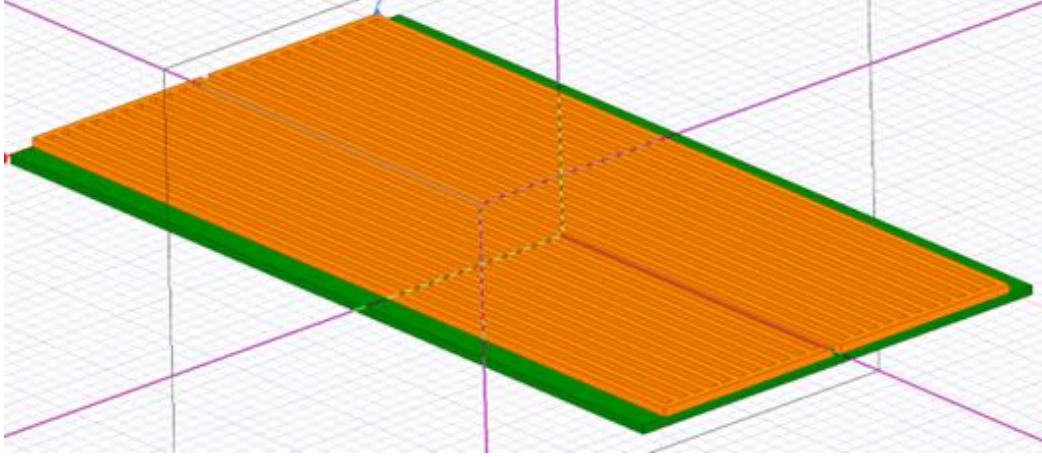
Şekil 5.12 Desen-1 B modeli üzerindeki örnek noktada oluşan manyetik alanın frekansına göre değişimi

Grafik incelendiğinde Desen-1A'da görülen duruma benzer olarak, frekansın artması manyetik alanın düşmesine sebep olmaktadır. Bu düşüşün başlıca sebebinin artan frekans sonucunda yüzey ve yakınlık etkisini artması ve bu sebepten dolayı eddy akımlarının oluşması ve bu akımların oluşacak olan manyetik alana ters olacak manyetik alanlar oluşturmasıdır.

DA analizlerde de Desen-1A'ya göre Desen-1B'nin çok daha küçük değerlerde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum AC akımda da gözlemlenmiştir.

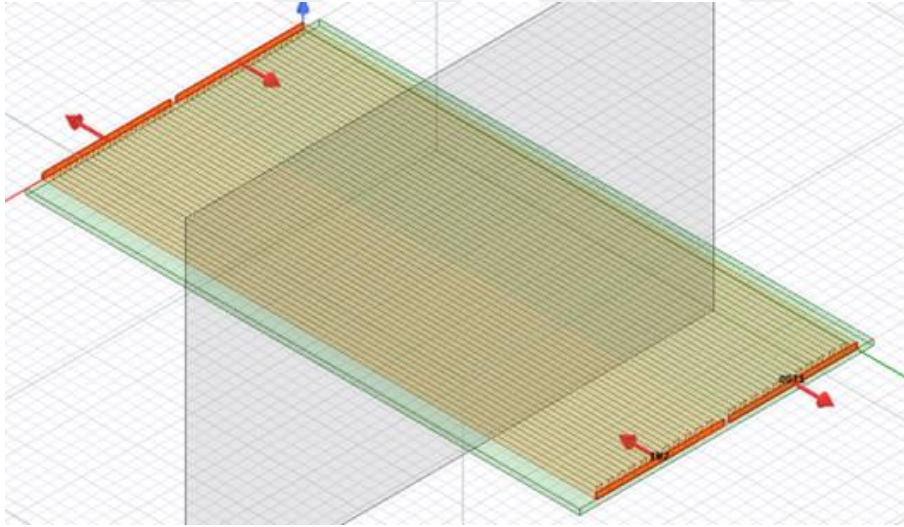
5.2.3 Desen-1C

Simülasyon ortamında Desen-1C için şekil 5.13'de görüldüğü üzere birbirine paralel 24 adet hat çizilmiştir. Bu hatlar 2 grup olacak şekilde baştan ve sondan birbirlerine bağlanmıştır. İletken malzemesi olarak bakır, di-elektrik malzeme olarak ise FR4 malzeme kullanılmıştır. İletken malzeme turuncu renk, di-elektrik malzeme ise yeşil renk ile görülmektedir.



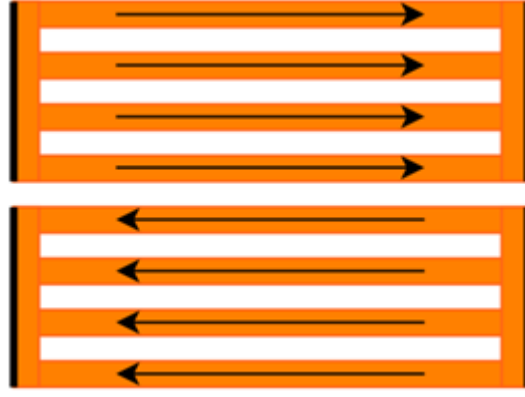
Şekil 5.13 Desen-1C simülasyon modeli

Hatların her birinden 1A akıtılacak şekilde akım ataması yapılmıştır. Bunun için 12 hattın bağlı olduğu başlangıç ve bitiş yüzeylerine 12A değerinde akım tanımlanmıştır. Ters yönde akacak olan akım içinde diğer 12 hatta aynı akım değeri ters yönde tanımlanmıştır. Akım tanımlanan yüzeyler ve akım yönleri şekil 5.14'de görülmektedir.



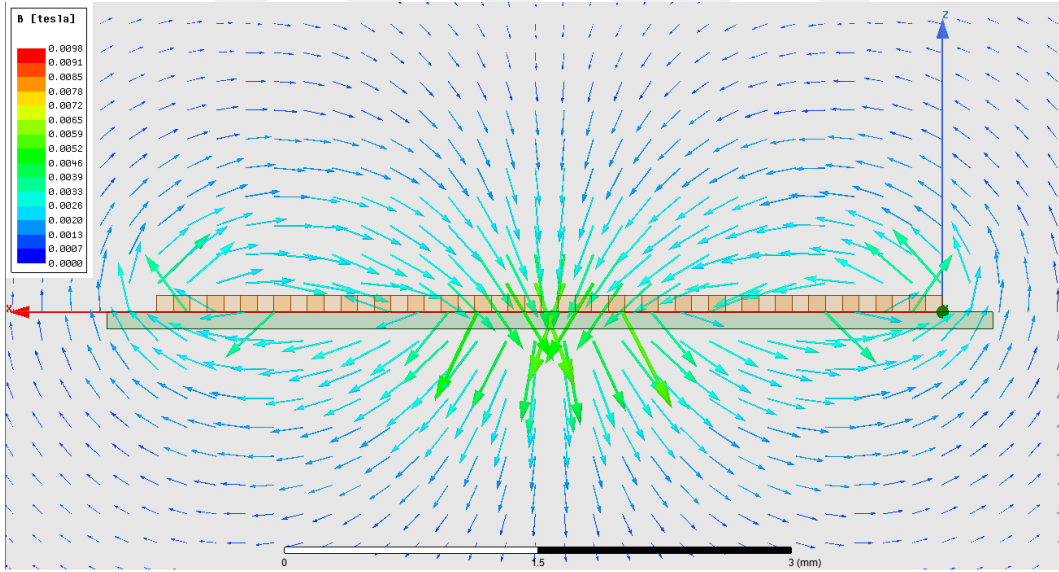
Şekil 5.14 Desen-1C modeli üstünde tanımlanan akım giriş ve çıkış

Oluşturulan modelin basitleştirilmiş çizimi şekil 5.15'de görülmektedir. Şekil üzerinde siyah kenarlar üzerinde akım tanımlamaları yapılmıştır. Simülasyon sonuç görüntüsü hatlara dik olacak şekilde orta noktada bulunan bir yüzey üzerinde oluşturulmuştur.

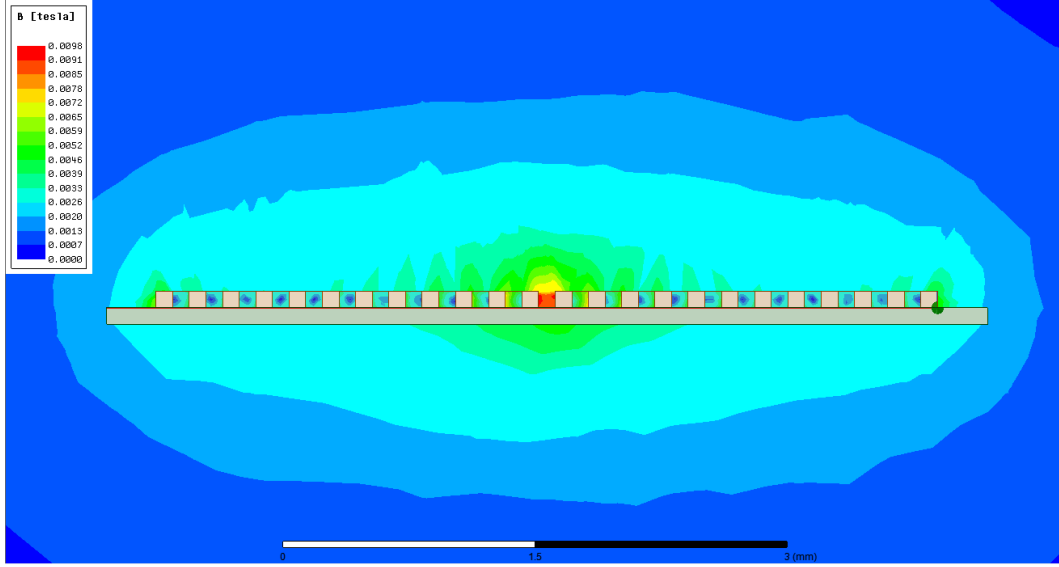


Şekil 5.15 Desen-1C modeli mantıksal görüntüsü

Simülasyon sonucunda görülen şey ise daha çok transformatörlerde görülen bir manyetik alan yapısıdır. Modeldeki iki bölüm birbirlerine zıt olan iki manyetik alan oluşturmuştur. Bu desenin bir yüzey üzerinde belli bir örüntüde devam ettirilmesi Desen-1B'ye benzer sonuçlar ortaya koyacaktır. Aradaki tek fark birim tek bir hat değil birden fazla hat şeklinde ilerleyecektir. Şekil 5.16 ve şekil 5.17'de simülasyon sonuçlarının vektörel ve alansal sonuçları görülmektedir.



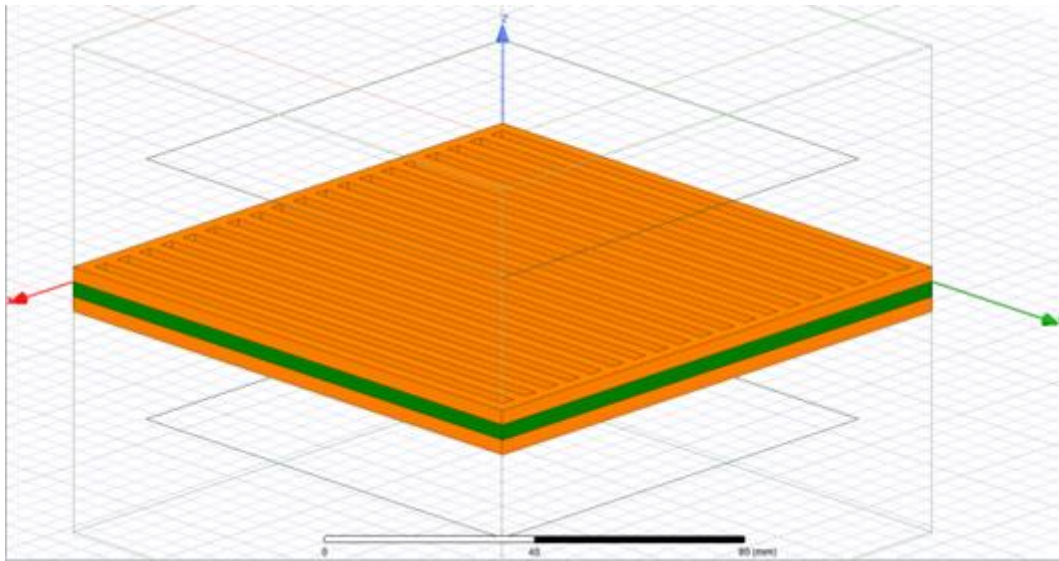
Şekil 5.16 Desen-1C modeli vektörel simülasyon sonucu



Şekil 5.17 Desen-1C modeli alansal simülasyon sonucu

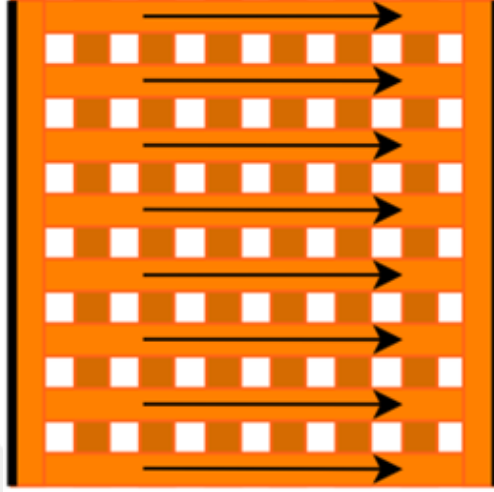
5.3 Desen-2

Öncelikle simülasyon ortamında desen-1'e benzer bir yapı oluşturuldu. Farklı olarak aynı yapı FR4 malzemenin diğer tarafına 90° döndürülmüş şekilde yerleştirildi. Üstte ve altta bulunan yapılar birbirinden bağımsız şekilde hatlarında aynı yönde akım olacak şekilde akım akitildi. Bu şekilde üstte ve altta akan akım birbirlerine dik olacak şekilde akmış oldu. İletken olarak bakır, di-elektrik malzeme olarak ise FR4 seçilmiştir. Oluşturulan model şekil 5.18'de görülmektedir. İletken malzeme turuncu renk, di-elektrik malzeme ise yeşil renk ile görülmektedir.



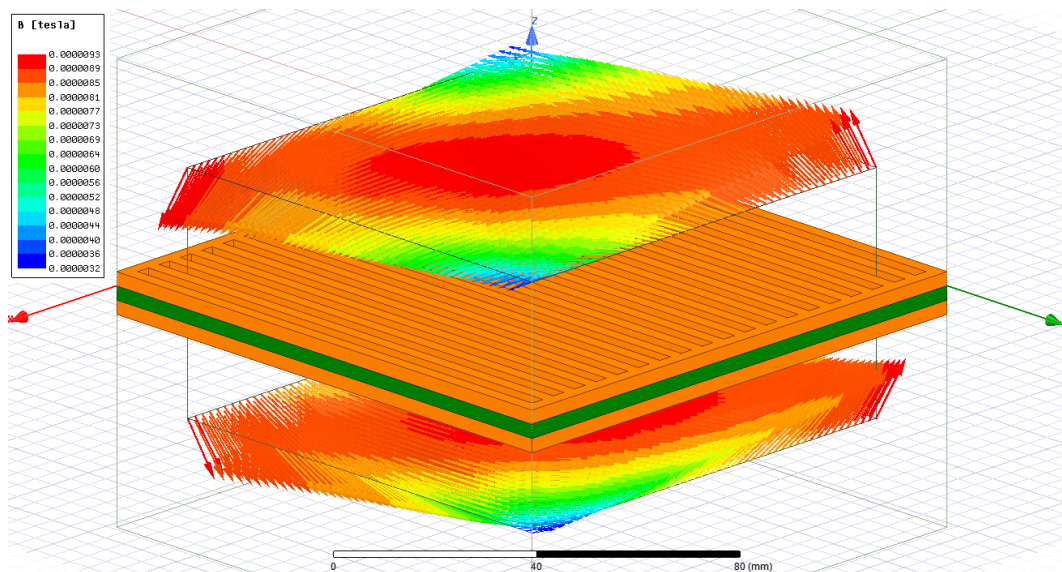
Şekil 5.18 Desen-2 simülasyon modeli

Simülasyon modelinin daha anlaşılabilir mantıksal çizimi şekil 5.19'de görülmektedir. Hem üst katmanda hem de alt katmandaki tüm hatlardan 1A geçecek şekilde akım tanımlamaları yapılmıştır. Akım doğrultuları üst katmanda +Y doğrultusunda, alt katmanda ise +X doğrultusundadır.

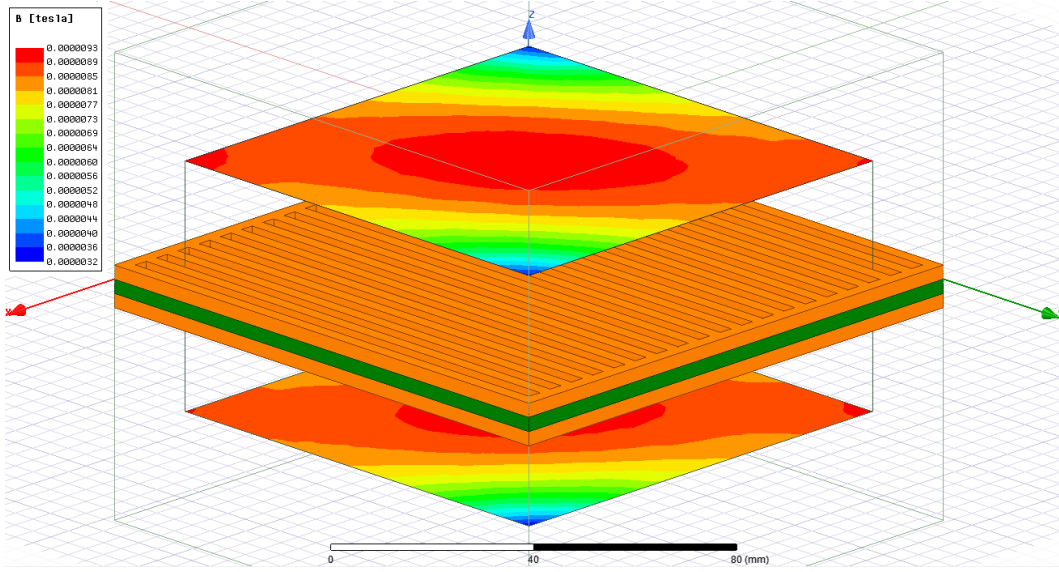


Şekil 5.19 Desen-2 modeli mantıksal görüntüsü

Simülasyon sonuçları şekil 5.20 ve şekil 5.21'de görülmektedir. Elde edilen simülasyon görüntüsüne göre desen-1A'da elde edilen sonuca ek olarak iki yüzeydeki akımların oluşturması gereken manyetik alanların birleşerek doğrultu değiştirdiği gözlemlendi. Bu durum akım değerleri üzerinde değişiklikler yaparak manyetik alanın PCB üzerinde Z ekseninde yaptığı rotasyonu kontrol edebileceğimiz sonucuna bizi ulaştırıyor.

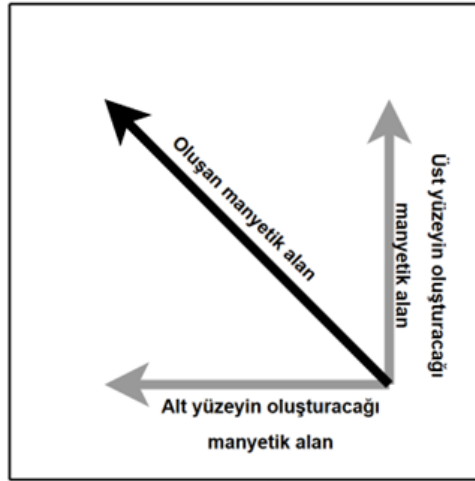


Şekil 5.20 Desen-2 modeli vektörel simülasyon sonucu



Şekil 5.21 Desen-2 modeli alansal simülasyon sonucu

Simülasyon sonuçları göstermişlerdi ki üst ve alt yüzeylerin oluşturacağı manyetik alanlar birbirine dik olacağı durumda manyetik alanlar ortak bir açıya yönelen bir manyetik alan oluşturmaktadır. Bu bir yüzeye paralel olan manyetik alanın sadece yüzeydeki hatlara paralel veya dik olmayacağını, Üst ve alt yüzeylerin oluşturacağı manyetik alanların karakteristikleri birbirlerinden farklılaşınca ortaya hibrit bir çözüm çıkmaktadır. Şekil 5.22’de bu basitçe görselleştirilmiştir.

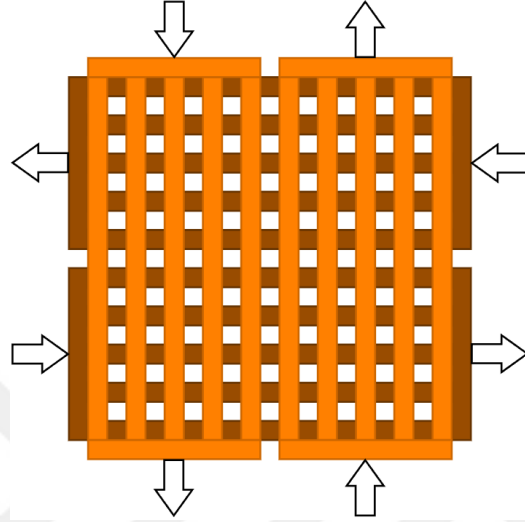


Şekil 5.22 Kart üzerindeki iki manyetik alanın birleşimi

5.3.1 Desen-2 Ek Simülasyon

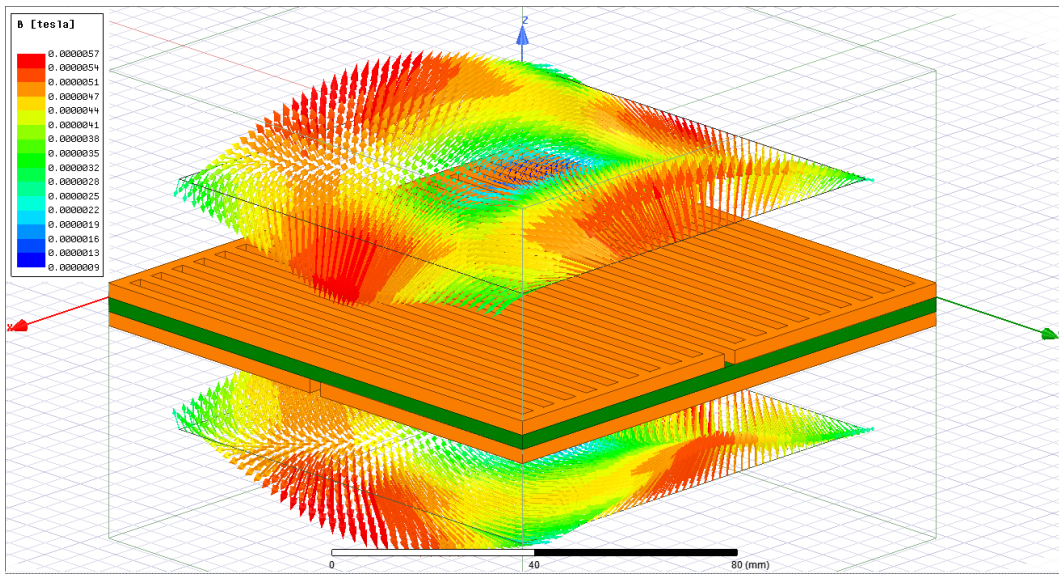
Modelin üst ve alt bölmesinde uygulanan akımların oluşturduğu manyetik alanların birleşerek ortak bir yöne doğru yönelmesi sonucu aynı model üzerinde akım değerleri değiştirilerek manyetik alanın yönü değiştirilmeye çalışılmıştır. Bu iş için

hem üstte hem de altta Desen-1A yapısına benzeyen hatlar Desen-1C'ye benzetilerek kart üzerinde birbirinden bağımsız çalışabilecek 4 adet bölge oluşturulmuştur. Bu 4 bölgenin her birinde farklı yönlere bakacak manyetik alanlar oluşturmak için toplamda 4 akım oluşturulmuştur. Şekil 5.23'de oluşturulan modelin basitleştirilmiş temsili çizimi ve akım tanımlamaları gösterilmiştir.

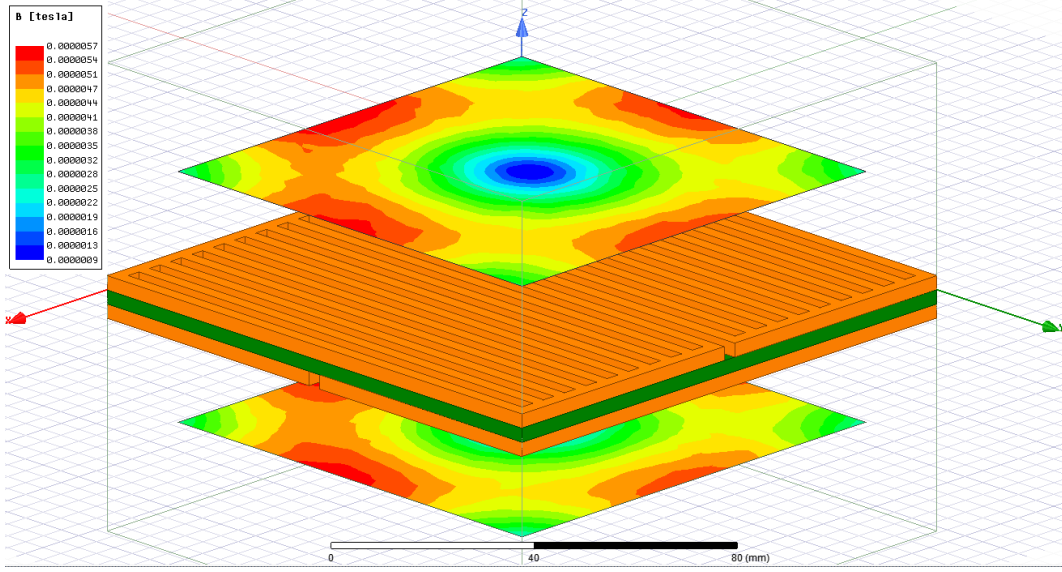


Şekil 5.23 Desen-2 ek simülasyon denemesi akım giriş ve çıkışı

Üst ve alt kısımda bulunan Desen-1A tipindeki yapıları Desen-1C tipine getirerek daha öncesinde modele çapraz şekilde yönlene manyetik alanın bu sefer kart üstünde 4 farklı şekilde yönlene sağlanmıştır. Bu yönlene birleştiğinde Dairesel bir yapı oluşturmaktadır. Şekil 5.24 ve şekil 5.25 'de yapılan simülasyonun vektörel ve alansal sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.24 Desen-2 ek simülasyon denemesi vektörel simülasyon sonucu

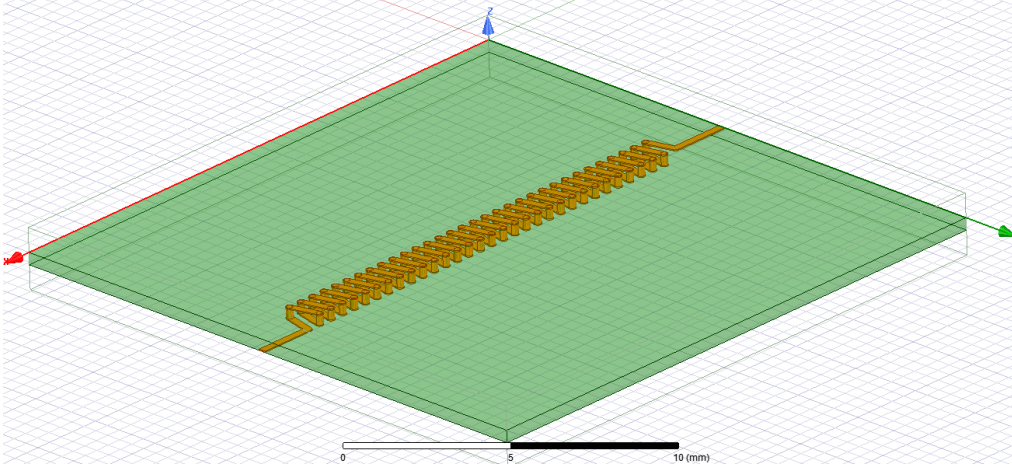


Şekil 5.25 Desen-2 ek simülasyon denemesi alansal simülasyon sonucu

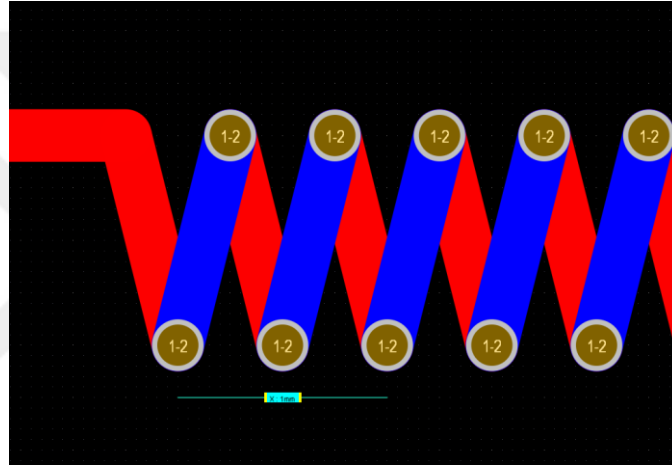
Desenin kontrolünü daha da ileri seviyelere taşımak için akım portlarını çoğaltmak ve her hattım birbirinden bağımsız kontrol edilmesi sağlanabilir. Ama bu çok karmaşık kart yapıları ve kontrolcü algoritmaları gerektirecektir. Aynı zamanda kontrol edilecek hücre bileşenleri küçüldükçe ve sayısal anlamda çoğaldıkça arka planda bu hücreleri besleyecek olan iletken hatlar da çoğalacaktır. Bu da elde etmeye çalıştığımız manyetik alana etki edecektir.

5.4 Desen-3

Desen-3 olarak adlandırdığımız desen kartın üzerinde bir helisel yapıdır. Bunun için PCB kartlarında kullanılan "via" yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Hat sürekli olarak üst ve alt katman arasında geçiş yaparken bu "via" yapılarını kullanacaktır. Bölümün başında belirtildiği üzere oluşturulacak desen Ansys-Maxwell programı üzerinden yapılması çok karmaşık bir şekilde olacağından dolayı modelin tasarımı Altium-Designer Programı üzerinden yapılmıştır. Tasarlanan model şekil 5.26'de görülmektedir. Tasarımın 2D hali ise şekil 5.27'de görülmektedir

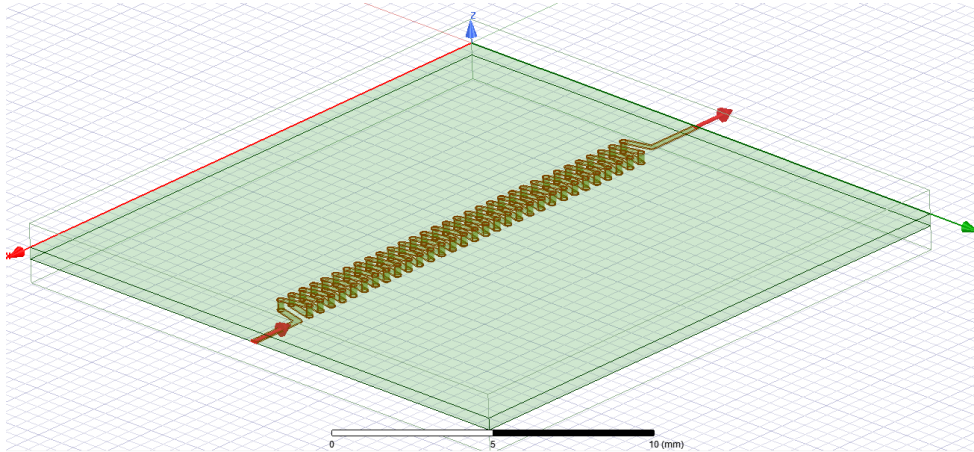


Şekil 5.26 Desen-3 altium programı üzerinde oluşturulan modeli



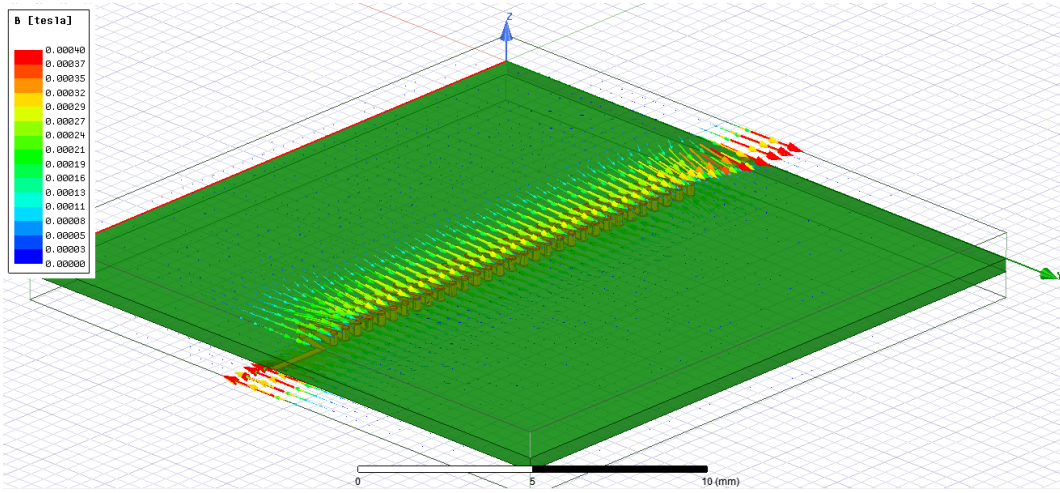
Şekil 5.27 Desen-3 altium programı layout tasarımı

Altium üzerinde tasarlanan model Ansys-maxwell ortamına aktarılarak hat üzerine 1A değerinde akım tanımlanmıştır. Tanımlanan akımları ve yönlerini şekil 5.28'de görülmektedir.

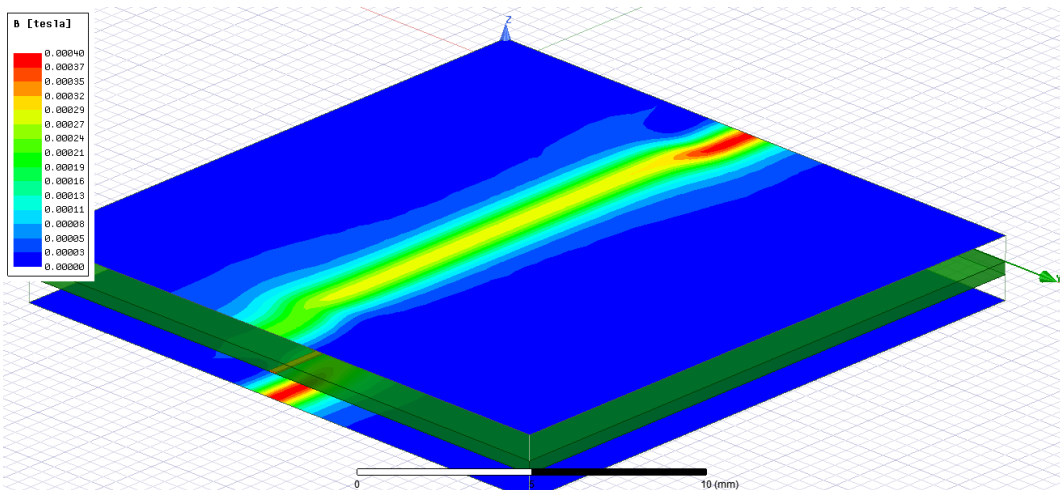


Şekil 5.28 Desen-3 modeli üzerinde tanımlanan akımlar

Simülasyon sonucu oluşan vektörel ve alansal görüntüler şekil 5.29 ve şekil 5.30'da görülmektedir. Simülasyon sonucu bize beklediğimiz kart üzerinde helisel yapının başlangıcından bitişine kadar uzanacak olan ve karta paralel şekilde ilerleyen manyetik alan çıktısını vermemiştir. Bunun yerine daha çok düz hattın oluşturduğu bir çıkış vermiştir. Buna sebep olarak Helisel yapı için kart kalınlığı ve üst-alt katmanlarda çizilen yol uzunluklarının uyumsuzluğu olabilmektedir. Tasarım için çok daha küçük hatlar çizmek PCB maliyetlerini ve üretim sürelerini uzatacağı için uygulamaya göre karar verilmesi gereken bir tasarım kararı olmaktadır. Bir diğer yol ise PCB kalınlığını arttırmak olacaktır. Bu yola yine aynı şekilde uygulama alanına göre karar verilmesi gerekir.



Şekil 5.29 Desen-3 vektörel simülasyon sonucu



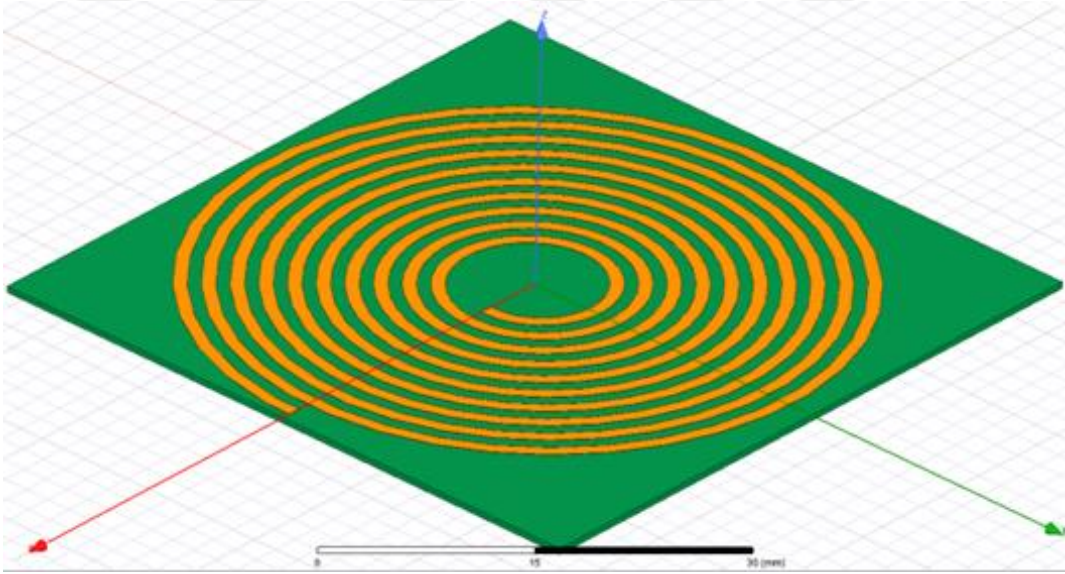
Şekil 5.30 Desen-3 alansal simülasyon sonucu

5.5 Desen-4

Çalışmada bulunan desen-4 olarak adlandırılan desen sarmal yapılarıdır. Simülasyon ortamında hem dairesel olarak hem de birbirleri ile boşluk bırakmadan uyum sağlayabildikleri için altıgen yapılar denenmiştir. Dairesel yapı Desen-4A, altıgen yapı ise Desen-4B olarak isimlendirilmiştir.

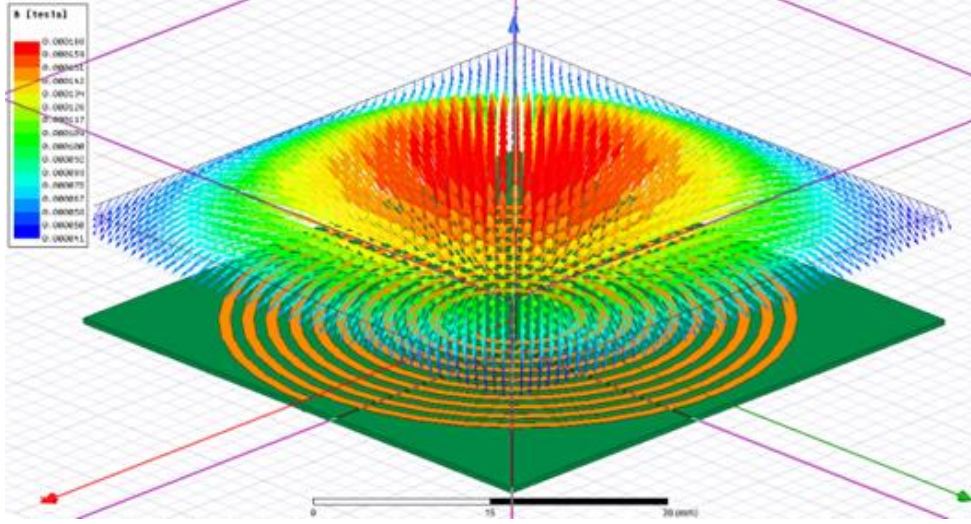
5.5.1 Desen-4A Dairesel

İlk olarak dairesel bir yapı simülasyon ortamında hazırlanmıştır. Hatların kalınlığı 0.05mm genişliği 0.5mm'dir ve hat 10 tur atmaktadır. Sarmalın iki ucu FR4 malzemenin altından geçen bir yol ile birleştirilerek simülasyon ortamında bir akım için bir döngü oluşturulmuştur. İletken olarak bakır, di-elektrik malzeme olarak FR4 seçilmiştir. Bakır turuncu, FR4 ise yeşil olarak şekil 5.31'de görülebilmektedir.

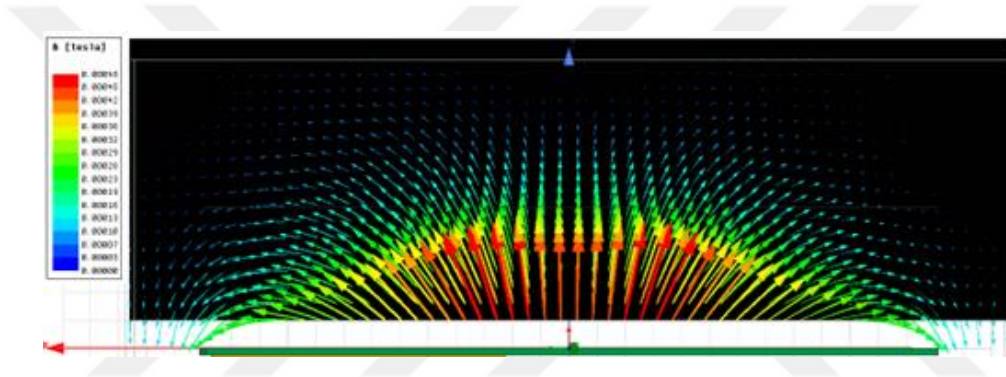


Şekil 5.31 Desen-4A simülasyon modeli

Hat üzerine 1A değerinde akım tanımlaması yapılarak simülasyon yapılmıştır. Vektörel simülasyon sonuçlarının dimetrik ve yatay açılardan görüntüleri şekil 5.32 ve şekil 5.33'de görülmektedir.

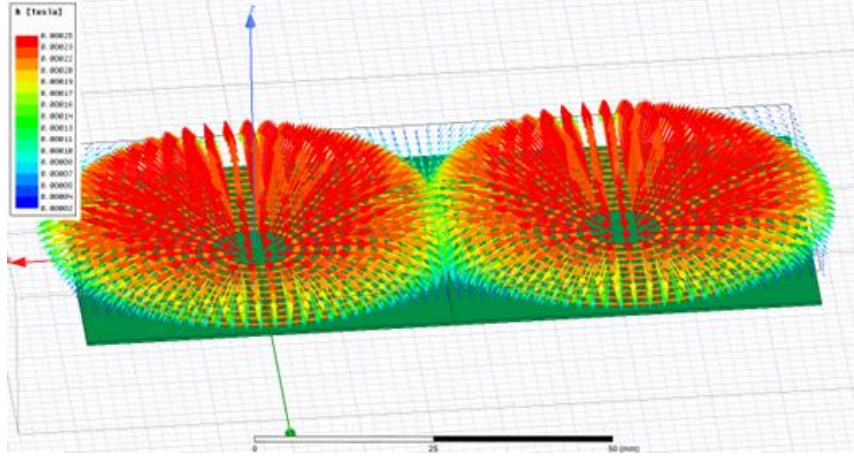


Şekil 5.32 Desen-4A vektörel simülasyon sonucu

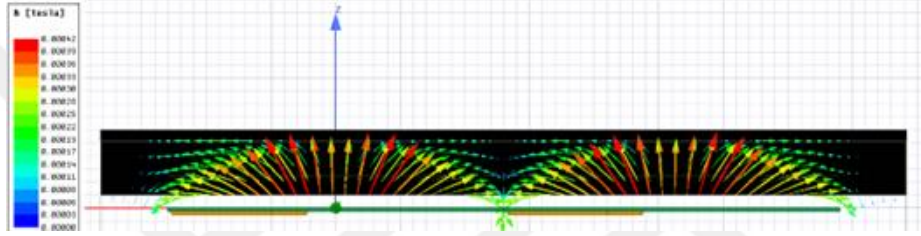


Şekil 5.33 Desen-4A vektörel yan kesit görüntüsü

Simülasyon sonucunda orta noktada karta dik şekilde başlayan manyetik alan şeklin kenarlarında doğru şiddeti azalarak yön değiştirip sarmalın üzerinde iki adet döngü oluşturmaktadır. Diğer desenlerde yapıldığı gibi şekli bir örüntü haline getirerek bütünleşik bir manyetik alan oluşumunu gözlemleyebilmek için öncelikle iki desenin birbiri ile etkileşimi çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonucu şekil 5.34 ve şekil 5.35'de görülmektedir. Simülasyon sonucunda iki desenin oluşturduğu manyetik alanların birbirleri ile etkileşimleri minimum seviyede olduğu görülmüştür.

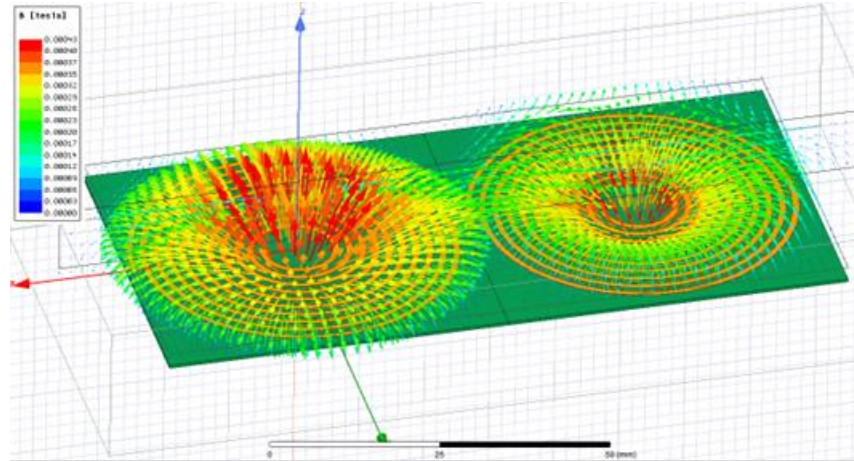


Şekil 5.34 Aynı yönlü çift daire sarmal vektörel simülasyon sonucu

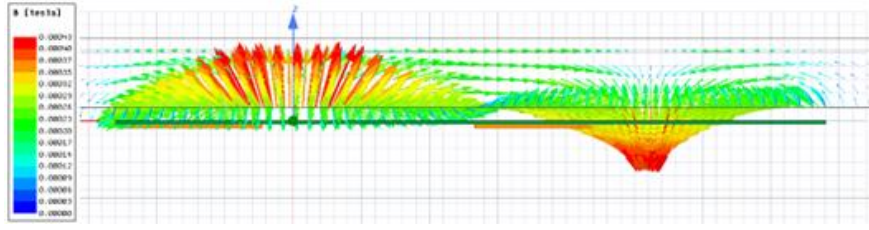


Şekil 5.35 Aynı yönlü çift daire sarmal vektörel yan kesit görüntüsü

Aynı durumun bir sarmal saat yönünde diğer sarmal ise saat yönünün tersinde akım akacak şekilde simülasyon ayarlanınca alınan sonuçlar şekil 5.36 ve şekil 5.37 'de görülmektedir. Zıt akımlı dairesel sarmalların simülasyon sonucunda manyetik alanların birbirleri ile etkileşimi aynı yönlü simülasyona göre daha kolay şekilde görülmektedir. İki birimin ortasında karta paralel şekilde ilerleyen manyetik alan çizgileri gözlemlenmiştir. Bu çizgilerin pratikte kullanımı çok verimli olmayacaktır.

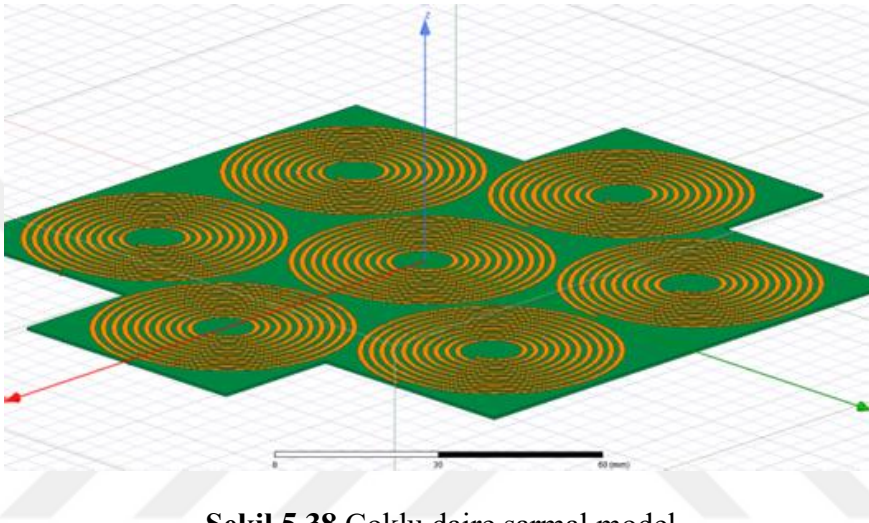


Şekil 5.36 Zıt yönlü çift daire sarmal vektörel simülasyon sonucu

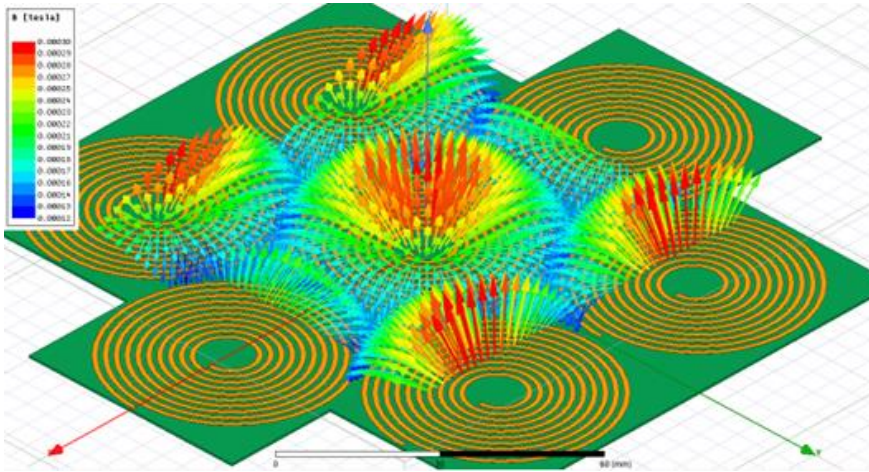


Şekil 5.37 Zıt yönlü çift daire sarmal vektörel yan kesit görüntüsü

Şekil 5.38 'de görüldüğü üzere dairesel yapıyı çoğaltarak board üzerinde yan yana yerleştirilmiştir.



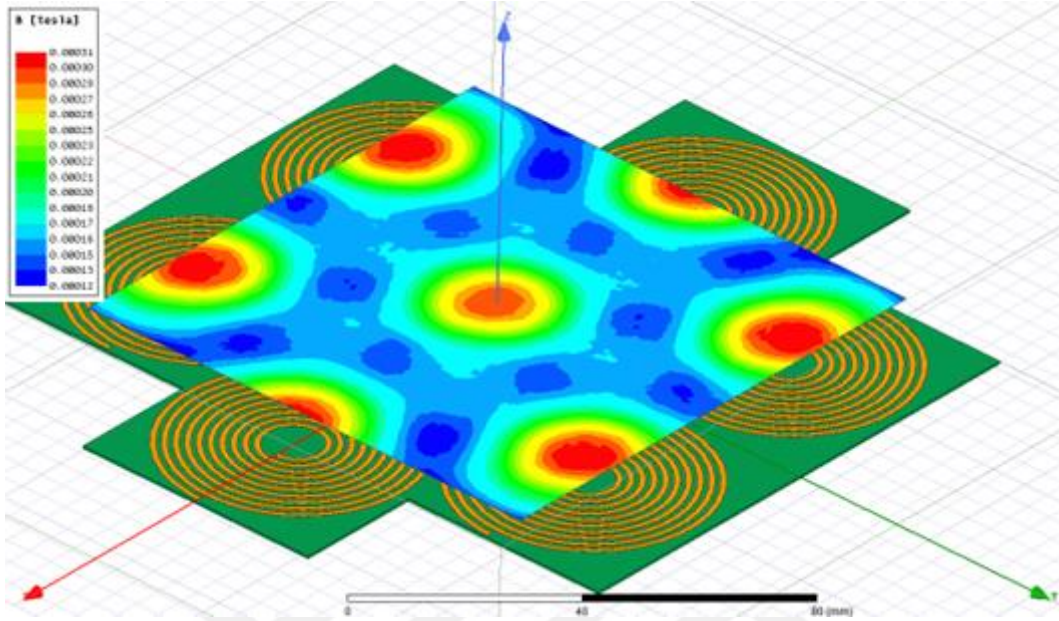
Şekil 5.38 Çoklu daire sarmal model



Şekil 5.39 Çoklu daire sarmal model vektörel simülasyon sonucu

Bu sarmalların hepsine birbirinden bağımsız şekilde akım tanımlanmıştır. Her bir sarmala aynı yönde ve aynı seviyede akım tanımlanmıştır. Simülasyonun süresi gibi faktörlerden dolayı ana yapının etrafı sarılarak simülasyon koşulmuştur. Simülasyon sonucunda da ortadaki yapının etrafını çevreleyecek şekilde sonuç

görüntülemesi yapılmıştır. Şekil 5.39 ve şekil 5.40'da görüldüğü üzere simülasyon sonucunda her bir yapının oluşturduğu manyetik alan net şekilde görülüp ayırt edilebilmektedir. Ortada ortak birleşmiş bir yapı görülmemiştir.

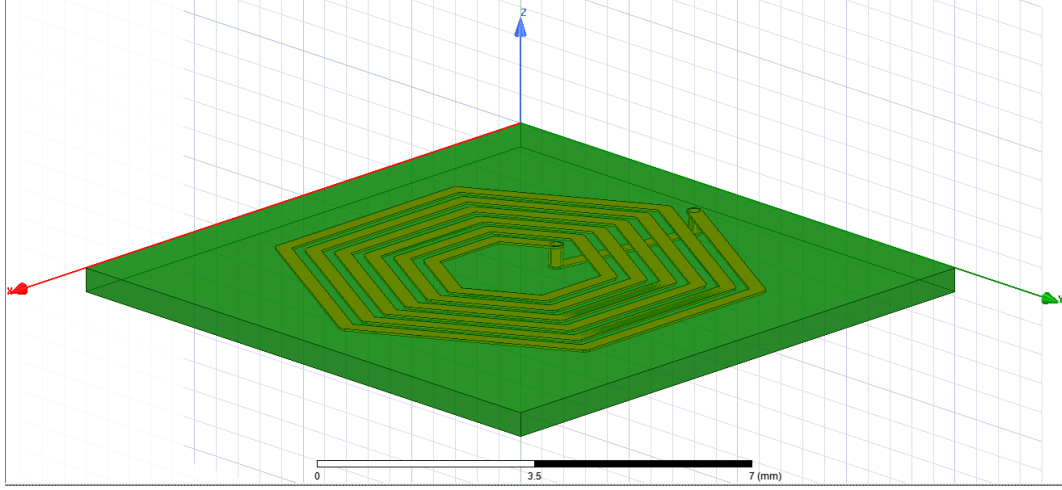


Şekil 5.40 Çoklu daire sarmal model alansal simülasyon sonucu

Her bir sarmal yapının merkezi ekseninde en yüksek manyetik alan değerlerini alırken sarmal yapıların aralarında manyetik alan minimuma düşmektedir. Sarmal yapının tek başına oluşturduğu manyetik alanında kenarlarında yön değiştirmiş olan manyetik alan başka sarmal yapılar eklenince diğer yapılarında yön değiştirmiş parçaları birbirlerine denk geldiği için ortada desen-1A veya desen-2'deki bir birleşik yapı görülmemiştir.

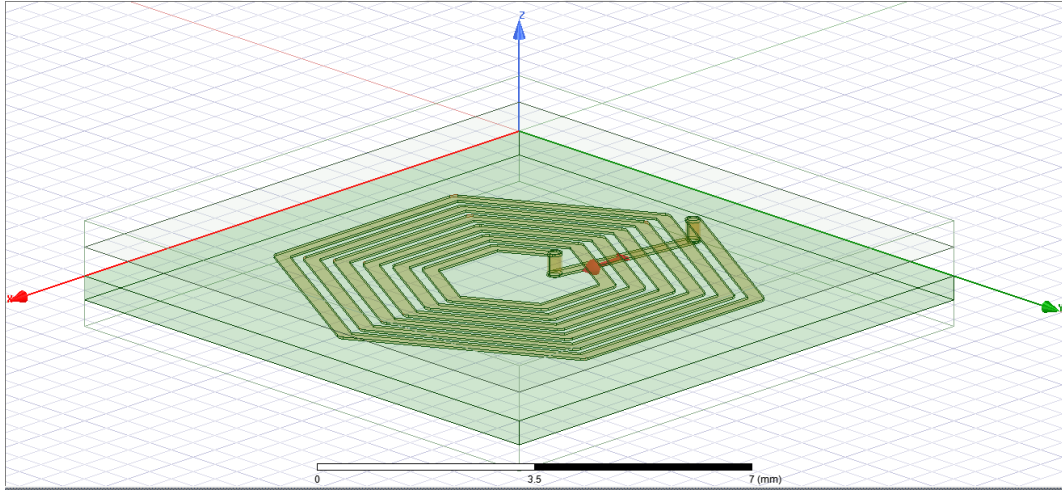
5.5.2 Desen-4A Dairesel

Desen-4 için ikinci seçilen geometrik şekil altıgendir. Altıgenin seçilmesinde bir yüzeyi tamamen kaplayabilmesi ve geniş iç açılara sahip olması gibi maddeler etkili olmuştur. Model Altium Designer programı üzerinde tasarlanmıştır. Model şekil 5.41'de görülmektedir.



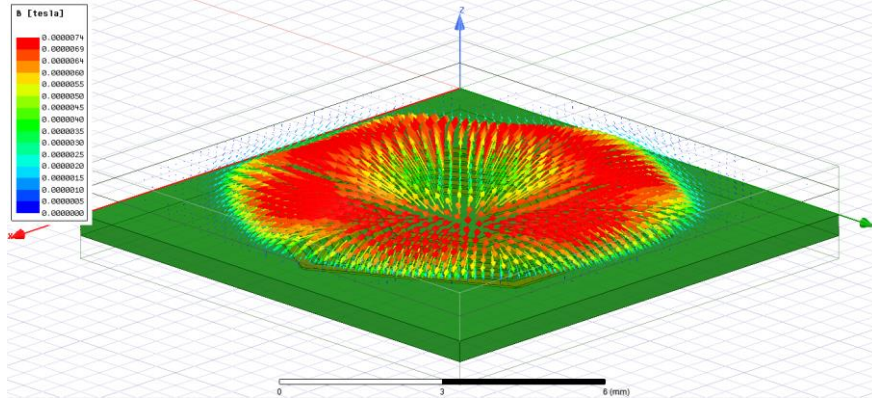
Şekil 5.41 Desen-4B altıgen sarmal simülasyon modeli

Sarmal yapının akım tanımlaması alt katmandan bağlanan hat üzerinde bir döngü oluşturacak şekilde tanımlanmıştır. Bu sayede tek bir akım yüzeyi/tanımlaması ile simülasyon sağlanmıştır. Akım tanımlaması şekil 5.42'de görülmektedir.



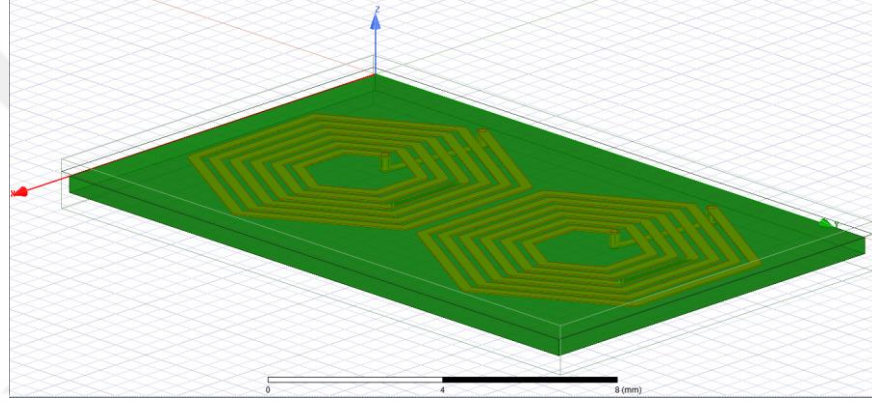
Şekil 5.42 Desen-4B altıgen sarmal model üzerinde tanımlanan akım

Hattın üzerinden 1A değerinde bir akım akıtılmıştır. Simülasyon vektörel sonucu şekil 5.43'de görülmektedir. Sonuç dairesel yapıya benzer şekildedir. Dairesel ve Altıgen yapıları farklı platformlar üzerinden tasarlandığı için hat kalınlığı kart kalınlığı döngü sayısı gibi farklılıklardan dolayı tam aynı manyetik alan görünmese de manyetik alan karakteristiğinden anladığımız kadarı ile manyetik alan davranışında dramatik bir değişim olmamaktadır.



Şekil 5.43 Desen-4B altıgen tekli yapı simülasyon sonucu

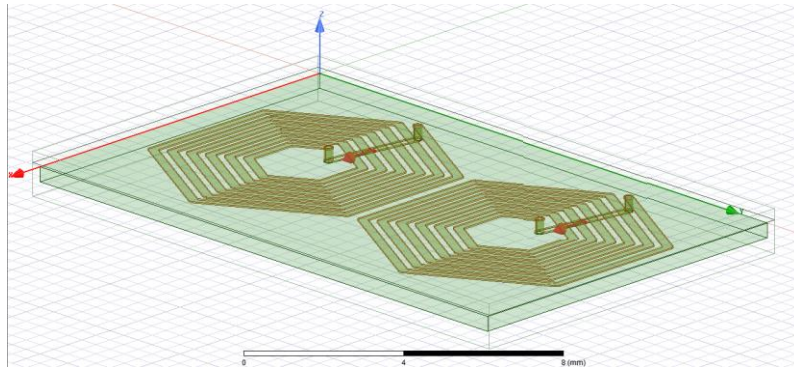
Altıgen sarmal yapısının çift versiyonu şekil 5.44'de görülmektedir.



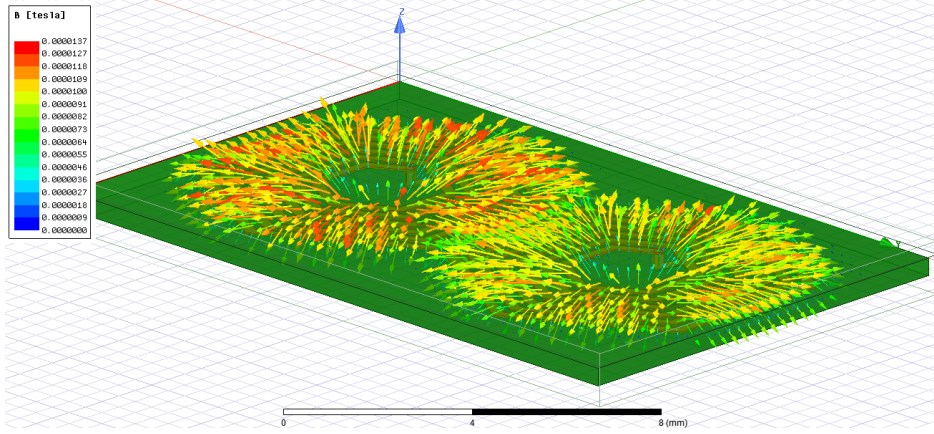
Şekil 5.44 Çift altıgen sarmal model

Öncelikler her bir altıgen sarmalda aynı yönde birer amper akım geçecek şekilde akım tanımlaması yapılmıştır. Akım tanımlamaları şekil 5.45'de görülmektedir.

Aynı yönlü akım durumunda simülasyon koşulduğunda yine dairesel yapıdan çok farklı olmayan bir sonuç ile karşılaşmıştır. İki manyetik alan birbirleri ile etkileşime girmemektedir. Simülasyon sonucu şekil 5.46'de görülmektedir.

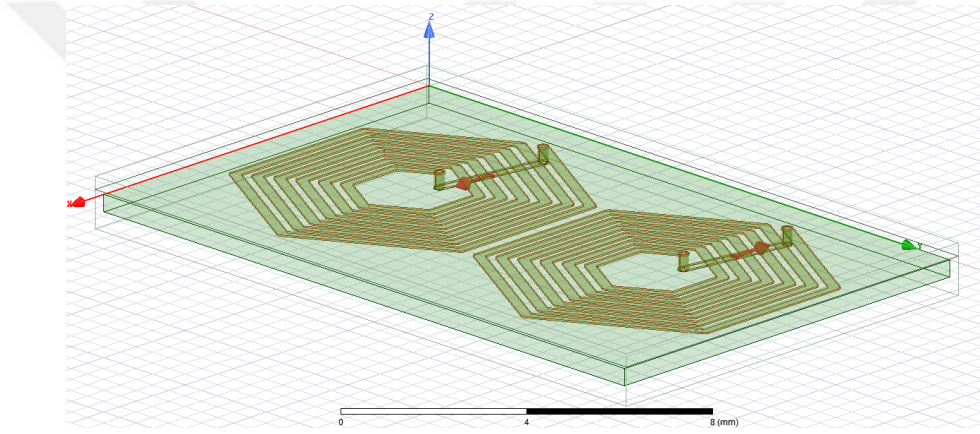


Şekil 5.45 Çift altıgen sarmal model aynı yönlü akım tanımlaması



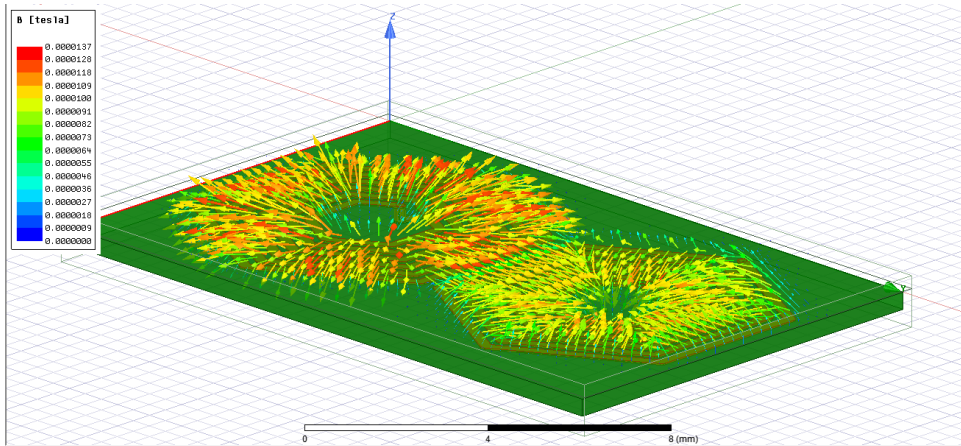
Şekil 5.46 Çift altıgen sarmal model aynı yönlü akım simülasyon sonucu

Akımlar zıt yönlere olacak şekilde tanımlanmıştır. Şekil 5.47'de görülmektedir.



Şekil 5.47 Çift altıgen sarmal model zıt yönlü akım tanımlaması

Aynı yönlü akım durumunda simülasyon koşulduğunda yine dairesel yapıdan çok farklı olmayan bir sonuç ile karşılaşmıştır. İki manyetik alan birbirleri ile etkileşime girmemektedir. Simülasyon sonucu Şekil 5.48'de görülmektedir.



Şekil 5.48 Çift altıgen sarmal model zıt yönlü akım simülasyon sonucu

5.6 Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirmesi

Çalışmada

- Desen-1A
- Desen-1B
- Desen-1C
- Desen-2
- Desen-2(Ek)
- Desen-3
- Desen-4A
- Desen-4B

olmak üzere sekiz farklı desen üzerinde simülasyon yapılmıştır. Çalışma içerisinde denenen tüm desenlerin sonucunda bazı desenlerde istenilen sonuçlar elde edilirken bazı desenlerde beklenen ve kullanılabilir herhangi bir sonuca ulaşılamamıştır. Sonuçların değerlendirmeleri tablo 5.1'de bulunmaktadır.

Tablo 5.1 Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi

Desen Adı	Desen Açıklaması	Alınan sonuç	Yorum
Desen-1A	Tek yüzeyde birbirine paralel hatlardan akan aynı yönlü akımlar	Yüzeye paralel şekilde oluşan bütünlük bir manyetik alan	Beklenen sonuç alınmıştır. Yüzeye paralel şekilde oluşacak bir manyetik alan gerekiyorsa kullanılabilir. Fakat manyetik alanın Z-ekseni üzerindeki rotasyonu sabittir
Desen-1B	Tek yüzeyde birbirine paralel hatlardan akan birbirlerine zıt yönlü akımlar	Minimum manyetik alan. Zıt akımlardan oluşan manyetik alanlar birbirlerini soğurmuşlardır	Desen-1A ile aynı fiziki altyapı kullanılabilir. Sistemin manyetik alan oluşturması istenmediği durumlarda bu statüye geçilebilir

Tablo 5.1 Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi (devamı)

Desen-1C	Tek yüzeyde birbirine paralel hatlardan akan zıt yönlü gruplanmış akımlar	Birbirine zıt iki manyetik alan elde edilmiştir. (Transformatör kesiti benzeri)	Desenin devamlılığı halinde Desen-1B'ye benzer bir sonuç elde edilecektir. Birim boyutu daha büyük olduğundan dolayı manyetik alanların etkileşimi daha sınırlı kalmıştır
Desen-2	Bir yüzeyde birbirine paralel hatlar. Diğer yüzeyde ise birbirine paralel, diğer yüzeydeki hatlara dik şekilde yerleştirilmiş hatlar	İki yüzeyin manyetik alanları birleşerek bu eksenlere 45 derecelik bir açı yapacak şekilde oluşmuştur	Desen-1A'da karşılaşılan Z-eksenindeki rotasyon sınırlaması bu desen ile birlikte aşılmaktadır. Akım seviyeleri değiştirilerek Z-ekseninde rotasyon sağlanabilir
Desen-2(Ek)	Desen-2 akım yönlerinin farklılaştırılarak 4 farklı bölüme bölünmüş hali	Her bir bölümde birbirine 90 derece olacak şekilde oluşan manyetik alanlar, yüzey üzerinde yüzeye paralel bir daire oluşturmuştur	Yüzey üzerinde devamlılığı olan herhangi bir şekil oluşturulabileceği görülmüştür. Birim boyutu ne kadar küçültülürse manyetik alan üzerine olan kontrol o kadar detaylı olacaktır

Tablo 5.1 Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi (devamı)

Desen-3	Karta entegre edilmiş helisel yapı. Üst ve alt yüzeyler arasında sürekli via ile geçiş yapılmaktadır	Beklenen Helisel yapıyı çevreleyen bir manyetik alan oluşmamıştır. Üst ve alt yüzeydeki hatların üzerinde yüzeye paralel zayıf manyetik alanlar oluşmuştur	Kart üzerinde oluşturulan helisel yapının sağlıklı şekilde kurulamadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kart kalınlığı ile yüzeylerdeki yol uzunluklarının aynı olması gerekmektedir. Bu da üretim maliyet ve sürelerini arttıracaktır
Desen-4A	Dairesel PCB bobini	Bütünleşik bir manyetik alan gözlemlenmemiştir	Manyetik alanın döngüsünü tamamlaması gerektiği için karta dik aynı yönlü manyetik alan çizgileri alınamamıştır
Desen-4B	Altıgensel PCB bobini	Bütünleşik bir manyetik alan gözlemlenmemiştir	Manyetik alanın döngüsünü tamamlaması gerektiği için karta dik aynı yönlü manyetik alan çizgileri alınamamıştır

6

SONUÇ

Çalışma içerisinde birbirinden farklı tipteki iletken şekillerinin manyetik alan üzerindeki etkileri incelenmiştir. ANSYS Maxwell simülasyon programı ortamında yapılan simülasyonlar sonucu birbirinden farklı birçok manyetik alan elde edilmiştir. Sadece doğrusal bir yol ile dairesel paralel doğrusal hatlar ile karta paralel manyetik alanlar oluşturulabilirken. İletkene verilen akımlar yönü değiştirildiğinde oluşturulan manyetik akımın şeklinde de değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Manyetik alanın hem akımla hem iletken şekli ile değiştiği görülmüştür. İki adet desende akım, alternatif akım olarak da simüle edilmiştir. Bunun sonucunda frekansın artması ile birlikte manyetik alanda azalma görülmüştür. Bunun sebebinin eddy akımları olduğu yorumu yapılmıştır.

Desen-1'de aynı yönlü akım ile kart yüzeyine paralel akan bir manyetik akım elde edilebileceği görülmüştür. Bunun için aynı yönlü akım akıtılan Desen-1A varyasyonu kullanılmıştır. Desen-2 de ise karta paralel oluşturulan bu manyetik alanın Z ekseninde döndürülebileceği görülmüştür. Kartın iki yüzeyinde birbirine dik olan hatlar sayesinde kart yüzeyine paralel ama birbirleri ile aynı doğrultuda olmayan manyetik alanların birleşerek belli bir açığa gelebildiği görülmüştür.

Desen-3 yapısında yine karta paralel olacak bir yapı beklenirken elde edilen manyetik alan bekleneni karşılamamıştır. Bunun sebebinin solenoid yapısının düzgün bir şekilde kurulamamasının olduğu sonucuna varılmıştır. Düzgün bir yapı oluşturmak için kartın üst ve alt bölümlerinde kart kalınlığına yakın seviyede mesafe olarak via'lara bağlanması gerekmektedir. Ama bu denli bir detayda tasarım yapmak hem maliyeti arttıracaktır hem de hata oranını yükseltecektir. Sonuçta elde edilmesi beklenen kart yüzeyine paralel olan manyetik alan Desen-1A ve Desen-2 ile elde edildiği için bu desen özelinde çok detaya inilmemiştir.

Desen-4 yapısında ise sarmal yapıların birim alanı diğer desenlere göre daha büyük olduğu için oluşan manyetik alanların birbirleri ile etkileşime girmeleri daha sınırlı seviyede olmuştur. PCB Coils dediğimiz bu yapıların enerji ve bilgi aktarımı gibi faaliyetlerinde çalışmada olduğu gibi yan yana değil üstü üste olarak kullanılmasından dolayı daha efektif bir kullanım olmaktadır. Ama bizim çalışmamızda önemli olan yüzey üzerinde devamlılığı olan bir karakteristik oluşturmak olduğu için verimli bir yol görülmemiştir.

Tüm desenler için oluşturulan manyetik alanlar üzerinde daha çok etkiye sahip olunabilmesi için hatların akım kapasitesinin büyümesine veya birim örnek desenin küçülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ama bu iki madde birbirlerini engelleyen faktörlerdir. Bu sebeple hem manyetik alanın şiddetini arttırmak hem de kontrol çözünürlüğünü yükseltmek mümkün görünmemektedir. Kullanım amacına göre bir oranda karar verilmesi gerekmektedir. Simülasyon sonuçları, sistemin hassasiyetini artırmak adına çözünürlüğün artırılmasının faydalı olduğunu gösterse de bu durumun akım kapasitesi ve dolayısıyla manyetik alan gücü üzerindeki sınırlamaları da beraberinde getirdiği unutulmamalıdır.

- [1] H. N. Allen, “The graphical representation of magnetic theories,” Ph.D. dissertation, Dept. of Physics and Astronomy, Univ. of Nebraska – Lincoln, 1904. [Online]. Available: <https://digitalcommons.unl.edu/physicsdiss/2>
- [2] M. Koohestani, A. K. Skrivervik and M. Ramdani, “An analytical approach for the estimation of the far-field reduction obtained by placing closed conductor loops in proximity to a chip,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 5, pp. 1384-1394, Oct. 2021, DOI: 10.1109/TEMPC.2021.3072235. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9435761>
- [3] X. Wang, C. Li and F. Lou, “Geometry optimize of printed circuit board stator winding in coreless axial field permanent magnet motor,” in 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hangzhou, China, 2016, pp. 1-6, DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791695. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7791695>
- [4] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, R. Alonso and J. M. Burdio, “Frequency-dependent resistance of planar coils in printed circuit board with litz structure,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 12, pp. 1-9, Dec. 2014, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2337836. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6851880>
- [5] L. Zhou and M. Preindl, “Inductor design for nonisolated critical soft switching converters using solid and litz pcb and wire windings leveraging neural network model,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 3357–3373, Mar. 2022, DOI: 10.1109/TPEL.2021.3113171. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9540251>.
- [6] A. Nejadpak and O. A. Mohammed, “Physics-based modeling of power converters from finite element electromagnetic field computations,” *IEEE*

- Transactions on Magnetics, vol. 49, no. 1, pp. 567–576, Jan. 2013, DOI: 10.1109/TMAG.2012.2206046. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6226473>.
- [7] L. C. Ordonez, A. D. Exposito, P. A. Cervera, M. Bakic and T. Wijekoon, “Fast and accurate analytical thermal modeling for planar pcb magnetic components,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 6, pp. 7480–7491, Jun. 2023, DOI: 10.1109/TPEL.2023.3259064. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10076836>.
- [8] X. Du, C. Li and D. Dujić, “Design and characterization of pcb spiral coils for inductive power transfer in medium-voltage applications,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 5, pp. 6168–6180, May. 2022, DOI: 10.1109/TPEL.2021.3131013. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9627815>.
- [9] M. El-Sharkh and S. Wang, “Modeling and critical winding geometric parameter identification for the near electric field from helical inductors,” in 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, LA, USA, 2019, pp. 253–258, DOI: 10.1109/ISEMC.2019.8825234. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8825234>.
- [10] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, J. M. Burdío and R. Alonso, “Practical issues when calculating ac losses for magnetic devices in pcb implementations,” in 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1017–1022, DOI: 10.1109/APEC.2012.6165943. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6165943>.
- [11] J. S. Ngoua Teu Magambo, R. Bakri, X. Margueron, P. Le Moigne, A. Mahe and T. Bensalah, “Impact of pcb track shape on hf copper losses of planar magnetic components,” in 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, Italy, 2016, pp. 973–978, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525958. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7525958>.

- [12] M. Noohi, H. F. Baghtash and H. B. Ghavifekr, "A flexible rectangular pcb coil to excite uniform magnetic field in nuclear magnetic resonance spectroscopy: Design, optimization and implementation," *Sensing and Imaging*, vol. 25, Art. no. 17, Mar. 2024, DOI: 10.1007/s11220-024-00465-6. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11220-024-00465-6>.
- [13] A. Letellier, M. R. Dubois, J. P. F. Trovão and H. Maher, "Calculation of printed circuit board power-loop stray inductance in gan or high di/dt applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 612–623, Jan. 2019, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2826920. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8337781>.
- [14] M. A. Bahmani, K. Niayesh and A. Karimi, "3d simulation of magnetic field distribution in electromagnetic forming systems with field-shaper," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 5, pp. 2295–2301, Mar. 2009, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.05.024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013608004366?via%3Dihub>.
- [15] J. Schäfer, D. Bortis and J. W. Kolar, "Optimal design of highly efficient and highly compact pcb winding inductors," in *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Padua, Italy, 2018, pp. 1–8, doi: 10.1109/COMPEL.2018.8460166. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8460166>.
- [16] J. Schäfer, D. Bortis and J. W. Kolar, "Novel highly efficient/compact automotive pcb winding inductors based on the compensating air-gap fringing field concept," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 9, pp. 9617–9631, Sept. 2020, DOI: 10.1109/TPEL.2020.2969295. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8968357>.
- [17] M. Mardiguian, "Electric and magnetic fields from simple circuit shapes," in *Controlling Radiated Emissions by Design*, Cham: Springer, 2014, pp. 17–51.
- [18] T. Mandic, R. Gillon, B. Nauwelaers and A. Baric, "Characterizing the tem cell electric and magnetic field coupling to pcb transmission lines," *IEEE*

- Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 54, no. 5, pp. 976–985, Oct. 2012, DOI: 10.1109/TEMC.2012.2193888. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6204082>.
- [19] J. Lasek, A. K. Stefańska, S. Kierońska-Siwak, R. Obuchowicz and A. T. Krzyżak, “Reduction of systematic errors in diffusion tensor imaging of the human brain as a prospect for increasing the precision of planning neurosurgical operations with particular emphasis on fiber tracking,” *Computers in Biology and Medicine*, vol. 194, Art. no. 110503, Aug. 2025, DOI: 10.1016/j.combiomed.2025.110503. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482525008546>.
- [20] M. A. G. Abushagur, “Introduction to quantum mechanics,” in *Applied Photonics*, Cham: Springer, 2025, pp. 295–337.
- [21] Azoteq Ltd, “Inductive sensing application note,” Application Note AZD115, version v1.3, Jun. 2024, Accessed: 10 February 2025. [Online]. Available: https://www.azoteq.com/images/stories/pdf/AZD115_Inductive%20Sensing.pdf.
- [22] A.G. Özşönmez and S. Kurt, “Kulak kemikçiklerinin titreşimini algılayan algılayıcının yükleme etkisinin analizi ve algılayıcı verilerinin anlaşılması,” M.S. thesis, Dept. of Electronics Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey, Mar. 2024.
- [23] J. Davis, “Realistic transmission lines,” in *High-Speed Digital System Design*, Cham: Springer, 2006, pp. 53–77.
- [24] B. Jordan, “The guidebook of rigid-flex pcb design in altium designer,” Guide Book, 2023, Accessed: March 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.pcbelec.com/wp-content/uploads/2023/10/The-guidebook-of-Rigid-flex-PCB-design-in-Altium-designer.pdf>.
- [25] Altium LLC, Types of pcb vias, Accessed: 2025-06-13, 2024. [Online]. Available: https://files.resources.altium.com/sites/default/files/styles/max_width_1300/public/inline-images/via-types.png.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Yazıcı and S.Kurt, “Düzlemsel Baskı Devrelerde Desen Tasarımına Dayalı Manyetik Alan Analizi,” in *7th Baskent International Conference on Multidisciplinary Studies*, Ankara, Turkey, Jun. 2025, pp. 271-272, Available: <https://www.izdas.org/uluslararasıibaskent>

