



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ
RTLS SİSTEMLERİ İÇİN ENERJİ
HASATLAYICI TASARIMI VE ANALİZİ**

Aşkın TEKER

Yüksek Lisans Tezi



**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ RTLS
SİSTEMLERİ İÇİN ENERJİ HASATLAYICI TASARIMI
VE ANALİZİ**

Aşkın TEKER



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ RTLS SİSTEMLERİ İÇİN ENERJİ
HASATLAYICI TASARIMI VE ANALİZİ**

Aşkın TEKER

0000-0001-9687-1342

Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA– 2021

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ RTLS SİSTEMLERİ İÇİN ENERJİ HASATLAYICI TASARIMI VE ANALİZİ

Aşkın TEKER

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sibel YENİKAYA

Bu çalışmada endüstri 4.0 ın gerçek zamanlı konum takibi (RTLS) sistemlerinin, endüstriyel alanlarda karşılaştığı elektromanyetik sorunların çözülmesi için metamalzeme yapıda grafen bazlı anten tasarımı önerilmiştir.

Endüstride kullanım avantajı sağlayacak RTLS teknolojilerinin en verimli şekilde nasıl kullanılabileceğiyle ilgili çalışmalar incelenmiştir. RTLS sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında metal etkileşimine bağlı olarak elektromanyetik sorunların çözümüne yönelik çalışma oluşturulmuştur. Çalışmada enerji hasatlama amacıyla kullanılacak, metamalzeme yapıda birim hücreler tasarlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlar CST Studio aracılığıyla 3-20 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Grafen ve gümüş bazlı enerji hasatlayıcı birim hücreler: Verimlilik, göreceli kazanç oranı, büküm sonucu oranı ve çoklu birim hücre tasarımına uyum karşılaştırmalarıdır. Verimlilik karşılaştırılmasında; grafen gümüşe göre 6,5 kat daha yüksek verimlilik değeri göstermiştir. Göreceli kazanç oranı karşılaştırılmasında; grafen gümüşe göre 1,7 kat daha iyi sonuç vermiştir. Enerji hasadı birim hücre tasarımı üzerinden yürütülen çalışmada görülmüştür ki grafen bazlı simülasyonlar, gümüşe göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Grafen bazlı enerji hasatlayıcı birim hücrelerin kullanımıyla hareketli varlıkların hassas konum takipleri, metal etkileşimine bağlı elektromanyetik bozulmalara uğramadan endüstriyel alanlara entegre edilebilir olacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, RTLS, enerji hasatlama, metamalzeme, grafen, radar kesit alanı (RCS)

ABSTRACT

MSc Thesis

ENERGY HARVESTER DESIGN AND ANALYSIS FOR RTLS SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS

Aşkın TEKER

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Supervisor: Dr. Instructor Member Sibel YENİKAYA

In this study, a metamaterial graphene-based antenna design is proposed to solve the electromagnetic problems faced by the real-time location tracking (RTLS) systems of industry 4.0 in industrial areas.

Studies on how RTLS technologies can be used in the most efficient way, which will provide usage advantage in the industry, are examined. In industrial applications of RTLS systems, a study has been created to solve electromagnetic problems depending on metal interaction. In the study, unit cells in metamaterial structure to be used for energy harvesting were designed and simulations were carried out.

Simulations were carried out in the frequency range of 3-20 GHz via CST Studio. Graphene and silver based energy harvesting unit cells: Efficiency, relative gain ratio, twist result ratio and compatibility with multiple unit cell design comparisons. In efficiency comparison; Graphene showed 6.5 times higher efficiency than silver. In the relative earnings ratio comparison; Graphene gave 1.7 times better results than silver. In the study carried out on the energy harvesting unit cell design, it was seen that graphene-based simulations give better results than silver.

With the use of graphene-based energy harvesting unit cells, it has been observed that precise location tracking of mobile assets can be integrated into industrial areas without suffering electromagnetic disturbances due to metal interaction.

Key words: Industry 4.0, RTLS, energy harvesting, metamaterial, graphene, radar cross section (RCS)

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	Error! Bookmark not defined.
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Endüstri 4.0	5
2.1.1. İş zekası (BI)	6
2.1.2. Kurumsal kaynak planlaması (ERP)	7
2.1.3 Üretim yönetim sistemi (MES)	8
2.1.4. Endüstri 4.0’da gerçek zamanlı konum takibi.....	9
2.2. RTLS	9
2.2.1. RTLS çözümlerinin kaza önleyici olarak kullanımı	11
2.2.2. İsviçre peyniri (Swiss-Cheese) modeli	12
2.2.3. RTLS sınıflandırılması.....	14
2.2.4. Dış mekan (açık alan) konumlandırma(Outdoor Positioning System)(OPS)	16
2.2.5. İç mekan (kapalı alan) konumlandırma(İndoor Positioning System)(IPS).....	16
2.3. Endüstride Kullanım Alanı Bulan Başlıca RTLS Teknolojileri	16
2.3.1. Merkezi hücreleme (Cell of Origin) (CoO)	16
2.3.2. Radyo frekansıyla tanımlama (RFID) ile iç mekân konum belirleme	17
2.3.3. RFID teknolojisinin uygulanabilirliği	18
2.3.4. Kablosuz yerel alan ağı (Wi-Fi) ile iç mekân konum belirleme	19
2.3.5. BLE teknolojisi ile iç mekân konum belirleme.....	21
2.3.6. BLE teknolojisinin uygulanabilirliği	22
2.3.7. Ultra geniş band (UWB) sensörler kullanarak iç mekân konum belirleme	23
2.4. Genel Kullanım Alanı Bulmuş RTLS Teknolojilerinin Kıyaslanması	24
2.5. RTLS Teknolojileri ve Endüstrideki Faraday Etkisi.....	27
2.6. Enerji Hasatlama	28
2.6.1. Enerji hasatlama empedans kavramı	33

2.6.2. Enerji hasatlamada doğrultucu tasarımı ve harmonik kavramı.....	37
2.6.3. Akım pompa devrelerinin enerji hasatlamada kullanımı	41
2.6.4. Kalite faktörü	43
2.6.5. Serbest haldeki elektromanyetik dalga kaybı.....	47
2.7. Metamalzeme	49
2.7.1. Enerji hasatlama ve metamalzeme	53
2.7.2. Enerji hasatlama ve metamalzeme çalışmaları	54
2.8. Grafen.....	56
2.9. Elektromanyetik Enerjinin İnsan Vücuduna Etkileri	57
2.10. Radar Teknolojisi	60
2.10.1. Radar kesit alanı (RCS).....	62
2.10.2. Enerji hasatlamada RCS nin önemi.....	63
2.11. Anten Kazancı.....	65
2.12. Anten Işıma Paterni.....	66
2.13. Anten Işıma Yönlülüğü	67
2.14. Anten Verimliliği	67
3. MATERYAL VE YÖNTEM	68
3.1. Yöntem.....	68
3.1.1. Zaman domeninde sonlu farklar metodu (FDTD)	68
3.1.2. Sonlu elemanlar metodu (FEM).....	69
3.1.3. Sonlu integrasyon tekniği (FIT)	69
3.1.4. Moment metodu (MOM).....	70
3.1.4. İletim hattı matrisi (TLM)	70
3.2. Materyal	71
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	75
4.1. Verimlilik Karşılaştırması.....	75
4.2. Göreceli Kazanç Oranı Karşılaştırması.....	77
4.3. Bükülebilir Birim Hücrelerin RCS Değerlerinin Karşılaştırılması.....	79
4.4. Bütünleşik Hücrelerin RCS Değerlerinin Karşılaştırılması	82
5. SONUÇ	87
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

λ	Dalga boyu
f	Frekans
E	Elektrik alan şiddeti
H	Manyetik alan şiddeti
Hz	Hertz
ϵ_0	Elektiriksel geçirgenlik
ϵ_r	Bağıl elektiriksel geçirgenlik
μ_0	Manyetik geçirgenlik
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
σ	İletkenlik

Açıklama

Kısaltmalar

EM	Elektromanyetik
IOT	Nesnelerin İnterneti
IIOT	Endüstriyel Nesnelerin İnterneti
RFEH	Radyo Frekans ile Enerji Hasatlama
RF	Radyo Frekans
ERP	Kurumsal Kaynak Planlaması
RTLS	Gerçek Zamanlı Konum Takibi
PLC	Endüstriyel Kontrolcü
HMI	İnsan Makine Arayüz Ekranı
PC	Bilgisayar
MES	Üretim Yönetim Sistemi
BI	İş Zekası
SCM	Tedarik Zinciri Yönetimi
RFID	Radyo Frekans ile Tanımlama
MRO	Bakım Onarım ve Yenileme
OHSA	Sağlık ve Güvenlik İdaresi
ICAO	Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
4G	Dördüncü Nesil
5G	Beşinci Nesil
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
GNSS	Küresel uydu seyrüsefer sistemi
IR	Infrared
UWB	Ultra Geniş Bant
Wi-Fi	Kablosuz Alan
WLAN	Kablosuz Yerel Alan Ağı
LAN	Yerel Alan Ağı
PAN	Kişisel Alan Ağı
AP	Erişim Noktaları
LE	Düşük Enerji
OPS	Dış Mekan Konumlandırma
IPS	İç Mekan Konumlandırma
CoO	Merkezi Hücreleme
RSS	Sinyal Gücü
ToA	Variş Zamanı

TDoA
WAP
LOS
3D
BGF
AGF
YGF
DC
AC
WPT
Q
SRR
TV
SSRR
GSM
GRM
SAR
SA
RKA
RCS
FDTD
FEM
FIT
FSS
GND

Variş Zamanı Farkı
Kablosuz Erişim Noktası
Görüş Hattı
Üç Boyutlu
Bant Geçiren Filtre
Alçak Geçiren Filtre
Yüksek Geçiren Filtre
Doğru Akım
Alternatif Akım
Kablosuz Güç Aktarımı
Kalite Faktörü
Seri Halka Rezonatör
Televizyon
Ayrık Kare Halka Rezonatör
Uluslar arası Mobil Sistem
Grafen Bazlı Malzeme
Özgöl Soğurulma Oranı
Özgöl Soğurulma
Radar Kesit Alanı
Radar Kesit Alanı
Sonlu Farklar Zaman Domeni
Sonlu Elemanlar Metodu
Sonlu İntegrasyon Tekniği
Frekans Seçici Yüzey
Topraklama

Şekil 2. 1. Endüstri 4.0'ın başlıca çalışma alanları	6
Şekil 2. 2. ERP yönetim modülü.....	7
Şekil 2. 3. Endüstri 4.0 işletmelerinde üretim ve yönetim kısımlarının temel yönetim modülleri	8
Şekil 2. 4. RTLS Yönetim Modülleri.....	10
Şekil 2. 5. Reason kaza faktörü İsviçre peyniri modeli.....	12
Şekil 2. 6. RTLS sınıflandırması (Teknoloji-Sistem-Yöntem)	15
Şekil 2. 7. Chae ve Yoshidanın şantiye alanındaki RFID tabanlı RTLS çözümü.....	18
Şekil 2. 8. (a) Pasif RFID etiketler. (b) Aktif RFID etiketler.....	19
Şekil 2. 9. Uluslararası wireless standartları	20
Şekil 2. 10. BLE teknolojisinin RTLS çözümlerinde kullanımı	22
Şekil 2. 11. Faraday kafesi gösterimi	27
Şekil 2. 12. Elektromanyetik enerji hasatlama sisteminin blok diyagramı	29
Şekil 2. 13. Elektromanyetik enerji hasatlama sistem gösterimi	34
Şekil 2. 14. Polarizasyon türleri.....	35
Şekil 2. 15. Bant geçiren filtre devresi.....	36
Şekil 2. 16. Tek kademeli tam dalga Greinacher doğrultucu devresi	37
Şekil 2. 17. Schottky diyotun eşdeğer devre modellemesi.....	38
Şekil 2. 18. RFID Sistemlerde kullanılan Shottky diyot temelli akım pompası devresi.....	42
Şekil 2. 19. (a) NMOSFET lerin kullanımıyla oluşturulmuş akım pompa devresi (b) Akım pompası birim hücresi.....	43
Şekil 2. 20. Maksimum güç transferi devre şeması	44
Şekil 2. 21. Seri rezonans devresi	45
Şekil 2. 22. Seri rezonans devresinin frekans karakteristiği	47
Şekil 2. 23. Serbest uzay dalga kaybı.....	48
Şekil 2. 24. Metamalzeme birim hücre yapısı.....	50
Şekil 2. 25. Malzemenin sınıflandırılması	52
Şekil 2. 26. Radar tarafından belirli bir uzaklıktan algılanan cisim.....	62
Şekil 2. 27. RCS durumunu etkileyen dalga formları	64
Şekil 2. 28. Işıma Paterni	66
Şekil 3. 1. CST programında kullanılan sınır koşulları	71
Şekil 3. 2. Birim hücre geometrik yapısı	72
Şekil 3. 3. Tasarlanan birim hücre ölçüleri	74
Şekil 4. 1. (a) Grafenin kazanç(dB) ve verimlilik(%) grafiği, (b) Gümüşün kazanç(dB) ve verimlilik(%) grafiği	77
Şekil 4. 2. (a) Grafenin 10.5GHz için uzak alan ışıma paterni, (b) Gümüşün 10.5GHz için uzak alan ışıma paterni	78
Şekil 4. 3. (a) 10° büküme uğratılmış birim hücre (b) 30° büküme uğratılmış birim hücre (c) 60° büküme uğratılmış birim hücre	79
Şekil 4. 4. Grafen bazlı birim hücrenin 10°, 30°, 60° büküm açılarıyla elde edilen RCS değerlerinin frekans ile değişimi.....	80
Şekil 4. 5. Gümüş bazlı birim hücrenin 10°-30°-60° büküm açılarıyla elde edilen RCS grafiği	81

Şekil 4. 6. 60° bükümler ile elde edilmiş bütünleşik yapı (a) Yandan görüntüsü (b) Üstten görüntüsü	83
Şekil 4. 7. (a) Birim hücre ve bütünleşik hücre ebatları (b) Her bir birim hücrenin yükseklik değerinin bulunması.....	83
Şekil 4. 8. Grafen birim hücresinin çoklanmasıyla 12 parçalı bütünleşik rezonatör yapısının X-Y-Z yönlü RCS grafiği.....	85
Şekil 4. 9. Gümüş birim hücresinin çoklanmasıyla 12 parçalı bütünleşik rezonatör yapısının X-Y-Z yönlü RCS grafiği.....	85



Çizelge 1. 1. Enerji hasatlama tekniklerinin kaynak ortam ve özelliklerinin, elde edilen güç verileriyle karşılaştırılması.....	2
Çizelge 1. 2. Sağlık sektöründe kullanılan düşük güçte çalıştırılan implant cihazların harcadığı güç ve batarya ömrü.....	3
Çizelge 2. 1. Endüstrideki kaza oranlarının yüzdelik dağılımı	13
Çizelge 2. 2. Halawa ve arkadaşlarının (2019) çalışmalarındaki kıyaslama adımları	25
Çizelge 2. 3. RTLS teknolojilerinin özellikleri.....	26
Çizelge 2. 4. Alttaş türünün değiştirilmesiyle elde edilen verimlilik (%) ve enerji soğurulma oranı (%)	30
Çizelge 2. 5. Enerji Hasatlamada genel kullanım alanı bulan Schotky diyotlar (Gözel, Kasar ve Kahriman, 2018)	39
Çizelge 2. 6. Belen'in 2,4-2,7 GHz frekans aralığında, 5 farklı RF gücünde, 3 farklı direnç değerinde elde ettiği çıkış gerilim değerleri.....	40
Çizelge 2. 7. Belen, Papotto ve Le'nin farklı diyot seçimleri ile oluşturdukları Grainacher devresinin gerilim, güç ve frekans verilerinin karşılaştırılması	40
Çizelge 2. 8. Dünya sağlık örgütü (WHO) tarafından belirlenen elektromanyetik alan ışıması (iyonize yapmayan ışıma) standartları	58
Çizelge 2. 9. Radar frekans bantları (Kapan, 2007).....	61
Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan grafen ve gümüşün optik özellikleri.....	73
Çizelge 4. 1. Grafen ve gümüşün kazanç, yönlülük ve verimlilik değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri	76
Çizelge 4. 2. Grafen ve gümüş metalmalzemeleri ile uzak alandaki kazanç değerleri	78
Çizelge 4. 3. Grafen ve gümüş bazlı birim hücre yapısının, RCS değerlerinin büküm açısı-frekans değişimi	80
Çizelge 4. 4. Grafen ve Gümüş bazlı birim hücrelerin çoklanmasyla elde edilen RCS değerlerinin frekans ile değişimi.....	84

1.GİRİŞ

Tarihsel süreçte insanoğlu enerjiye olan ihtiyacını farklı yollarla gidermiştir. İnsan oğlunun geliştirdiği yöntemler arasında su çarkları, yel değirmenleri, enerji santralleri, yenilenebilir enerji kaynakları gibi birçok farklı metotla enerji elde edilmeye çalışılmıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte küçülen elektronik cihazlar beraberinde düşük güçle çalışan ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Düşük güçle çalışan ve kullanım alanı gereği küçük ebatlarda üretilen elektronik cihazlar, bataryaya gereksinim duymaksızın çalıştırılma ihtiyacını oluşturmuştur. Teknolojinin gelişimi, ihtiyaçlara çözüm arayışları ve buluşlarla ilerlemektedir. Enerji hasadı ile havada serbest halde gezinen enerjinin, elektronik cihazlar için güç kaynağı oluşturulması planlanmıştır. Gelişen teknolojiyle otonom akıllı sistemlerin sayısı artmakta olup bu artış beraberinde enerji gereksinimi, enerjinin taşınması gibi engellere takılmaktadır. Günümüzde elektronik cihazlar batarya sistemlerine bağımlı durumdadır. Kablosuz elektronik cihazlar artsa da bu cihazlar enerjiye ihtiyaç duydukları için şarj edilebilir bataryalara ve bu bataryaların ömürlerinin kısılmasıyla batarya değişimlerine ihtiyaç duymaktadır. Batarya sistemleri, enerjinin depolanması sorunları elektronik alandaki gelişimlerin daha hızlı olmasını engellemektedir. Dünyamızı çevrelemesi ve her alanda kullanım alanı bulması planlanan nesnelerin interneti IOT kavramının gelişmesiyle bu alanda kullanılacak çok sayıda sensör olacaktır. Yeni kavramlarla birlikte oluşturulmak istenen otonom sistemlerin var olan durumda uygulanabilir olmadığı açıktır. Bahsedilen tüm bu ihtiyaçlar enerji hasatlama sistemlerinin gelişmesine duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. Enerji hasatlama yenilenebilir enerji kategorisinde değerlendirilmektedir. Söz konusu hasatlama titreşim, ısı, optik veya elektromanyetik (EM) enerjinin kullanımıyla sağlanabilmektedir. Bu çalışmada enerji hasatlama metodu olarak EM enerjinin emilimi prensibi kullanılacaktır.

Teknolojisinin ilerleyişi ve insanların talepleri doğrultusunda enerji kaynaklarının düşük bakım maliyetli, uzun ömürlü ve sürekli olması istenmektedir. Belirtilen sebepler bilim insanlarını farklı yöntem arayışlarına sürüklemiştir, kullanılabilecek yöntemlerden biride radyo ve mikrodalga frekanslarından enerji hasat etmektir.

Çizelge 1. 1. Enerji hasatlama tekniklerinin kaynak ortam ve özelliklerinin, elde edilen güç verileriyle karşılaştırılması

Kaynak	Enerji Kaynağın Ortamı	Kaynak Özellikleri	Hasat Edilen Güç	Hasatlama Tekniği	Avantaj	Dezavantaj
Güneş	Ofis	0,1 mW / cm ²	10 uW/cm ²	Fotovoltaik	Yüksek Güç Yoğunluğu	Işık olmalı, İmplant Edilemez, Pahalı
	Dış Ortam	100 mW / cm ²	10 mW/cm ²			
Titreşim	İnsan	0.5m @ 1Hz 1m/s2 @ 50Hz	4 uW/cm ²	Piezoelektrik	Yüksek Verim, İmplant edilebilen	Titreşim olmalı, Fiziksel büyüklük
	Endüstri	1m @ 5 Hz 10m/s2 @ 1 kHz	100 uW/cm ²			
Termal	İnsan	20 mW/cm ²	25 uW/cm ²	Termoelektrik	Yüksek Güç Yoğunluğu, İmplant edilebilen	Aşırı ısı, Her an ortamda olmaz
	Endüstri	100 mW/cm ²	1-10 mW/cm ²			
Radyo Frekans (RF)	GSM 900MHz 1800MHz	0,03-0,3 uW/cm ² 0,01-0,1 uW/cm ²	0,1 uW/cm ²	Anten-Radyo Frekans ile Enerji Hasatlama (RFEH)	Her an ortamda mevcut, İmplant edilebilen	Düşük Güç Yoğunluğu, Uzak mesafe
	WiFi 2.4 GHz	0,001-0,01 mW/cm ²	0,01 uW/cm ²			

Çizelge 1.1’de enerji hasatlama için ortam özellikleri olarak endüstriyel kullanım alanı veya insan odaklı kaynaklar referans alınarak sunulmuştur. Çizelgede güneş, titreşim, termal ve RF enerji kaynaklarının, farklı ortamlarda, birbirinden farklı hasatlama teknikleriyle elde edilen enerjileri verilmiş. Çizelgede görülmektedir ki ortam fark etmeksizin RF dalgalarıyla enerji hasatlamanın diğer hasatlama metotlarına göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. 2. Sağlık sektöründe kullanılan düşük güçte çalıştırılan implant cihazların harcadığı güç ve batarya ömrü

Vücuttaki Kullanım Yeri	Harcadığı Güç (Watt)	Batarya Ömrü (saat / gün)
Organların çalışmasını düzenleyen cihazlar	10 μ W	15000 saat = 625 gün
Kulak içi cihazlar	1mW	1500 saat = 62 gün
Deri yüzeyindeki cihazlar	10mW	150 saat = 6 gün

Sağlık sektöründe kullanılan implant ürünlerin batarya ömürlerinin uzatılmasında enerji hasatlama tekniklerinin kullanımı önem arz etmektedir. Özellikle kalp pilleri hastanın durumuna göre değişebilir olmakla birlikte ortalama 5-6 yıl gibi bir kullanım ömrüne sahiptir. Kullanım ömrü dolan kalp pili implantlı hasta tekrardan ameliyat süreci geçirmek zorunda kalmaktadır. Çizelge 1.2’de de görüldüğü üzere insan vücudu implant cihazları, ultra düşük güçlerde çalışabilmektedir. Elektromanyetik enerji hasatlama tekniği ile batarya ömrü sorunu yaşamadan implantlı hastalar ömürleri boyunca cihazlarını vücutlarında sağlıklı bir şekilde taşıyabilir olacaktır (Tekir, 2009).

Verici anten ile yayılım göstermeye başlayan elektromanyetik dalgaların taşıdığı enerji ilerlediği yol boyunca zayıflama, saçılma ve yansıma gibi durumlar sonucunda alıcıya ulaşır. Elektrik alan ve güç yoğunluğu uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak değişmektedir. Havada serbest halde dolaşan elektromanyetik dalgalar, antenin efektif ışıma açıklığında birim hücre yapısıyla etkileşime girerek analog işarete dönüşür. Birim hücrelerce üretilen enerji verimli bir şekilde yükseltici ve doğrultucu devreye gönderilmelidir. Elde edilen enerjinin iletiminde kullanılan empedans uygunlaştırma, filtre ve gerilim yükselten akım pompaları devreleri kayıpsız olmalıdır (Karakuş, 2018).

Bu çalışmada endüstriyel ortamlarda konum takibi (canlı ve cansız varlık izlemesi) yapılırken karşılaşılan bazı çevresel problemlerin çözülmesi amaçlanmıştır. Metaller ile etkileşime giren elektromanyetik dalgalar faraday kafesi etkisine maruz kalarak iletim sinyallerini metallerin arkasına iletememektedir. Faraday kafesinde iletken bir yüzey dalgayı indükleyebilmektedir, topraklamalı iletken yüzeylerde ise

gelen dalgalar zayıflatılabilmektedir. Faraday kafesine maruz kalan bölgeler gelen dalgaların bozucu etmenlere (yansıma, soğurulma, zayıflama) maruz kalmasına sebep olmaktadır. Konum takibinde süreklilik ve verinin doğruluğunun çokça önem arz ettiği çalışma alanlarında metaller ile oluşan bu etkileşim problemini aşmaya yönelik olarak grafen bazlı ürünlerin tercih edilmesi gerekliliği, araştırmaların sunulması ve simülasyon verileriyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Grafen bazlı enerji hasatlayıcı birim hücrelerin, operatörlerin kıyafetlerine entegre edilmesiyle birden fazla konum takip ekipmanına taşınabilirlik (mobilité) sağlanmış olacağı düşünülmektedir. Mobilité sağlanan konum takip cihazlarıyla hassas konum takibi yapılabilecektir.

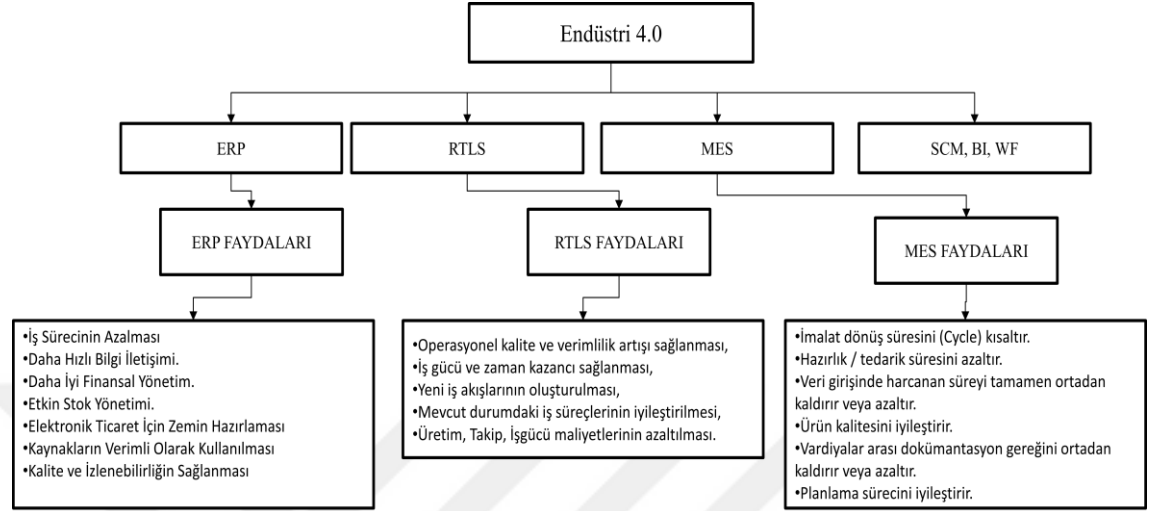
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Endüstri 4.0

Sanayi devrimlerinin ilk adımları İngiltere’de atılmıştır. Makineleşmenin var olmaya başladığı ancak daha çok tarım ve insan gücü odaklı üretime dayalı bu yapı birinci sanayi devrimi olarak isimlendirilmiştir. Sanayide elektrik enerjisinin kullanımı ve Henry Ford’un montaj hatlarına, hareketli montaj hattı uygulamaları ile düşük maliyetli seri üretimi esas alan yapıya geçilmiştir, bu yapı ikinci sanayi devrimi olarak nitelendirilmektedir. Elektronik alanındaki gelişimler ve buna takiben bilgisayar kavramının var oluşuyla, otomasyon alanı geliştirilerek sanayide insan odaklı üretim değil makine odaklı üretim yer almaya başlamıştır (Dengiz, 2017). Makinelerin karar mekanizmalarına sahip olması ve insanın zayıf yönlerini kapatmasıyla üçüncü sanayi devrimi olarak adlandırılan devrim ortaya çıkmıştır. İletişim çağında olduğumuz şu dönemde makinelerinde bu iletişime katılması vazgeçilmez bir olgudur. İnsan odağından çıkılması gibi artık makine odağından da çıkılarak sanayide bir fabrikayı yada üretim tesisini bütün olarak ele alabilmemizi sağlayan akıllı fabrikalar vasıtasıyla daha düşük maliyetli, daha esnek, daha verimli ve daha hızlı üretim yapabilmeyi amaçlamayan yapı günümüzdeki sanayi 4.0 uygulamalarını kapsamaktadır (Kılıç ve Alkan, 2018).

Adını ilk defa 2011 yılında Almanya’daki Hannover Fuarı’nda duyuran Endüstri 4.0 yapısı, üretim gücünün Doğuya kaymasını engellemek adına dijital teknolojilerin kullanımını bir zorunluluk haline getirmiştir. Endüstri 4.0’ın, global dünyada ucuz işgücüne dayalı rekabetin yerine yüksek katma değerli üretime dayalı rekabete geçişi sağlayacağı düşünülmektedir. Yeni bir yapı oluşu sebebiyle farklı adlandırmaları mevcuttur. Örneğin; Avrupa’da, “Geleceğin Fabrikaları”, Almanya’da “Endüstri 4.0”, ABD’de “Endüstriyel İnternet” ve Çin’de “İnternet +” olarak anılmaktadır. Şuan da tüm sektörleri etkileme gücüne sahip olan Sanayi 4.0 kavramı “Endüstriyel İnternet”, “Akıllı imalat” ya da “Entegre Sanayi” adlarını da almaktadır (Qin, Liu ve Grosvenor, 2017).

Endüstri 4.0 ile birlikte yeni kavramlarla karşılaşmıştır, bu kavramlardan en çok duyulanı “Dijitalleşme” veya “Dijital Dönüşüm” kavramlarıdır (Dengiz, 2017).



Şekil 2. 1. Endüstri 4.0’ın başlıca çalışma alanları

Endüstri 4.0 uygulamalarında bulunacak olan tesisler kendi ihtiyaçları ve yeterlilikleri doğrultusunda, kendileri için en uygun endüstri 4.0 yapıtaşını belirlerler. Şekil 2.1’de endüstri 4.0’ın başlıca çalışma adımları verilmiştir. Kurumsal kaynak planlaması (ERP) yapılan işletmelerde; işletmeler kendi eksiklerini görmekte ve elde ettikleri veriler doğrultusunda, işletme içerisinde düzenleme kararları alabilmektedir. RTLS ile işletmeler anlık olarak üretimi takip edebilmekte ve üretim akışını kontrol edebilmektedir. MES ile üretim aşamasında karşılaşılan olumsuzluklar minimize edilebilmekte ve operatörün üretim sürecindeki entegrasyonu kontrol edilebilir olmaktadır.

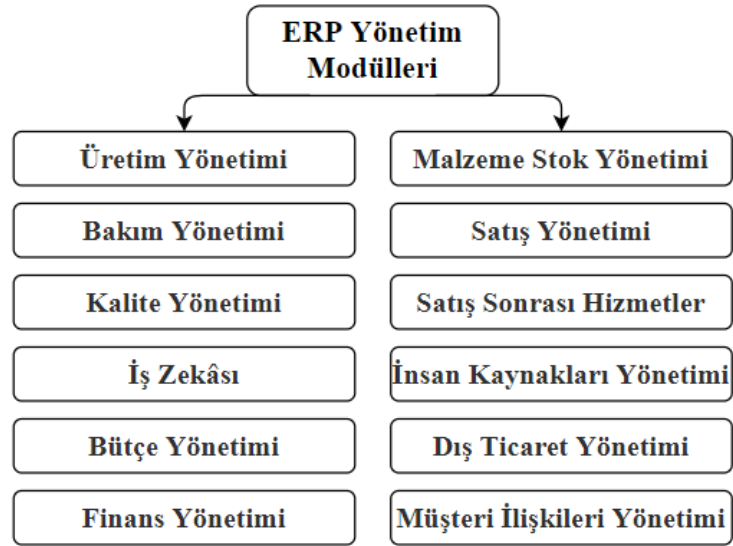
2.1.1. İş zekası (BI)

Kurumsal zeka olarak da adlandırılan iş zekası yapay zeka teknolojisinin gelişim göstermesiyle işlevini daha iyi bir şekilde yerine getirmektedir. İş zekası ile toplanan büyük veriler anlamlandırılarak kullanılabilir raporlamalara dönüştürmektedir. BI teknolojisi veri madenciliği, online analitik işlemler, depolama, erişim, sorgulama ve raporlama gibi birçok süreçle ilgilenir.

2.1.2. Kurumsal kaynak planlaması (ERP)

ERP kavramı ilk olarak 1913 yıllarında mühendis Ford Whitman Harris tarafından temelleri atılmıştır. İlk modellemede ekonomik sipariş miktarı (EOQ) olarak adlandırılan, kağıt bazlı üretim sistemi geliştirildi. 1964 yılına gelindiğinde bilgisayarların insan hayatına girmesiyle malzeme ihtiyaç planlaması (MRP) kavramı ortaya atıldı, bu kavram bilgisayar sistemleriyle yönetim anlayışını benimsemekteydi. Bilgisayar temelli planlamalarda ıskarta oranlarının düşüşü, envanter yönetiminin kolaylığı gibi avantajlarla karşılaşan işletmeler 1970-1980 yıllarında MRP2 benzeri kavramlar ile tanışmış oldu. 1990'lı yıllarda iş yönetim planlamaları bir bütün halde değerlendirmeye alınarak, iş analistlerince kurumsal kaynak planlaması (ERP) adını aldı.

Bu sistem kendi içinde barındırdığı farklı iş planı modellemeleriyle bir bütün olarak değerlendirilmelidir. ERP projeleriyle hız, verimlilik, karar mekanizmalarının stabilliği gibi konularda büyük ölçekte yarar sağlayabilmektedir.

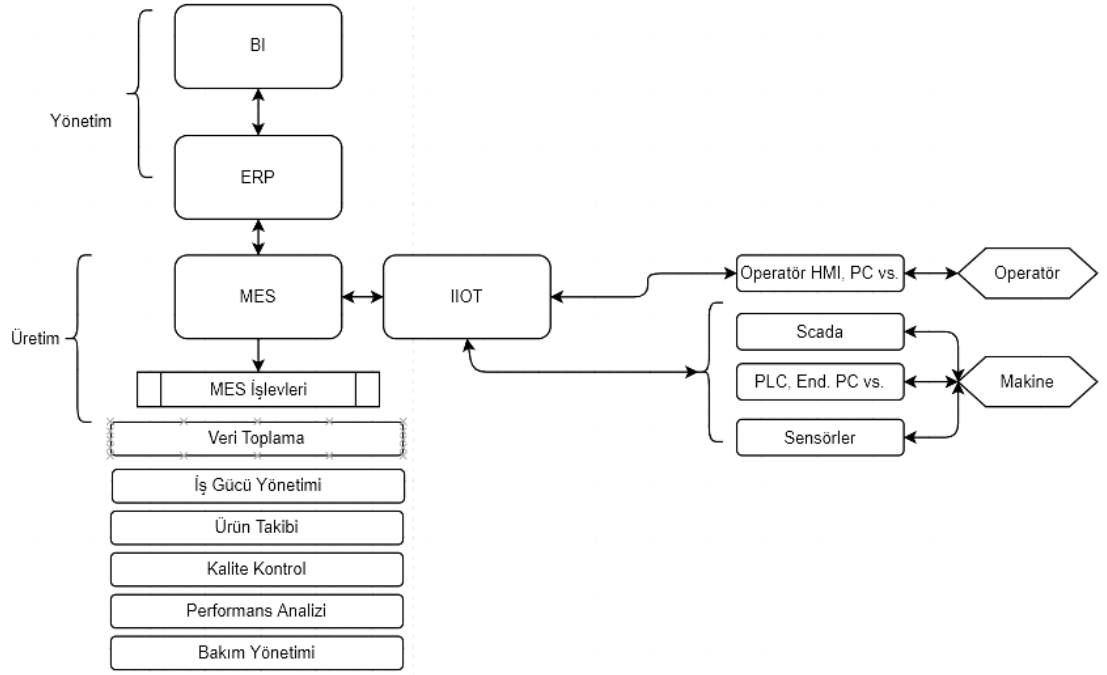


Şekil 2. 2. ERP yönetim modülü

Şekil 2.2’de görülen iş yönetim modülleri işletmelerin ihtiyaçlarına yönelik olarak belirlenmekte ve özelleştirilebilmektedir. Yönetim modülleri içerisinde ERP sistemine ilk defa giriş sağlayacak işletme; üretim, bakım ve kalite yönetim modüllerine sahip olmalıdır.

2.1.3 Üretim yönetim sistemi (MES)

MES kavramı ilk olarak 1992 yılında AMR Research tarafından “üretim işlemlerinin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlayan dinamik bilgi sistemi” olarak tanımlanmıştır. ERP sistem modülleriyle entegre olarak çalıştırıldığında iş emirlerini kendi içinde düzenleyerek üretim kısmına aktarır. Bunun yanı sıra gerçek zamanlı detaylı planlama ile iş emirlerine karşın tepki vererek verimlilik ve kaliteyi arttırmaktadır.



Şekil 2. 3. Endüstri 4.0 işletmelerinde üretim ve yönetim kısımlarının temel yönetim modülleri

Şekil 2.3’de de görüldüğü gibi MES bir işletmedeki üretim kısımlarının tam kontrolünün sağlanmasında kullanılır. MES ile üretim kontrol altına alınırken aynı zamanda operatör, makine, IIOT kavramlarının ERP sistemiyle uyumlu çalışması sağlanabilmektedir. İmalat işlemlerinin etkinliğini kontrol etmek, üretimde süreklilik,

kalite gibi kontrol mekanizmalarını geliştirmektedir. MES ile birlikte makinelerden veri analizi, zaman yönetimi, personel kaynak yönetimi, süreç takibi, üretim performans değerleri gibi bir çok veriye erişim ve yönetim imkanı sunmaktadır.

2.1.4. Endüstri 4.0’da gerçek zamanlı konum takibi

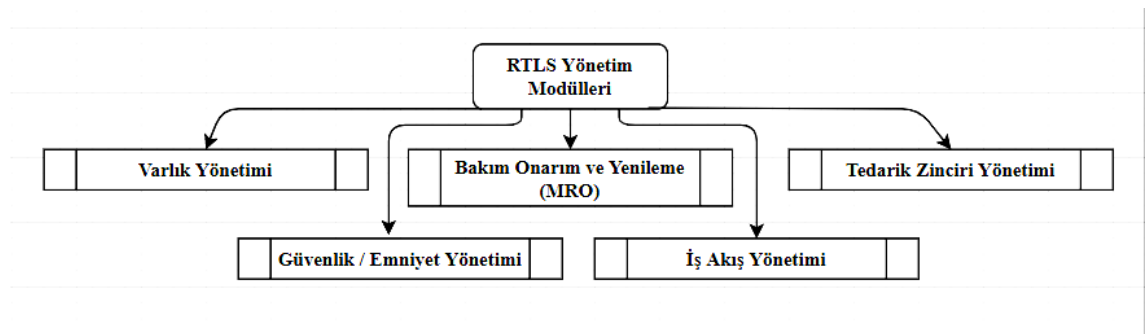
Endüstri 4.0’ın adımlarından biri olan gerçek zamanlı konum takibinin (RTLS) temellerinin atıldığı yıl 1990’lı yılların sonlarına dayanmaktadır. Dönemsel teknolojik ilerlemeler ve Ar-Ge çalışmalarıyla popülerliği arttırılmakta ve kullanımından gelen avantajlar her sektörde şirketlerin dikkatini çekmiştir. Konum belirleme sistemi olan RTLS hızla gelişmesi ile çalışanların ve ekipmanların takibi, kontrolü, ziyaretçi izleme, demirbaş – varlık yönetimleri gibi her alanda uygulanması mümkün hale gelmiştir.

2.2. RTLS

RTLS kavramı sektör bazında standartlaştırılabilir bir endüstri 4.0 adımıdır. Fabrikalar ve şirketler dijital dönüşümlerini sağlarken kendi kullanımlarına yönelik şekillendirmeleriyle RTLS alanını sektör yönünden zenginleştirmiş ve geliştirmişlerdir ancak bazı sektörlerde RTLS sisteminin getirdiği çözümler kolay entegre olabilirken bazı sektörlerin ise entegrasyonunda farklı sorunlar gözlemlenebilmektedir. Sektörün ihtiyacına yönelik şekillenen gerçek zamanlı konumlandırmada, varlığın değerine veya bir nesnenin içinde bulunduğu işlemin hangi fiziksel aşamasında olduğuna bağlı olarak önem sıralaması değişebilir. Daha çok iş güvenliği konularındaki RTLS çözümlerinde yüksek hassasiyet istenir. Bazı durumlarda ise nesnenin geçtiği son kontrol noktasının bilinmesi yeterli olabilmektedir. Çoğu durumda, işlem veya iş akışı hedeflerine ulaşmak için çoklu teknolojilere ihtiyaç vardır.

Konumlandırma teknolojisinin temelleri 1998 yılında ID EXPO fuarında atılmıştır. Fuarda sunulan sistem aktif RFID etiketlerle; otomatik tanımlama ve takip, süreç akışı izleme gibi temel RTLS (Reel Time Location System) sistemiydi. Fuarda ilk olmaya değer olan özellik bu olmamakla birlikte; konumlandırma sistemini bilgisayar ekranında görüntüleme özelliği de katılarak, yeni bir teknolojiyi tanımlamak ve farklılaştırmak amaçlanmıştır. Ticari radyo tabanlı RTLS sisteminin ilk örnekleri bu fuarda gösterilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk ticari RTLS 2000'li yılların başında kuruldu ve aktif, pasif etiket gönderimini esas alıyordu. İlk kurulumundan bu yana yazılımsal ve donanımsal olarak RTLS sistemleri geliştirildi. RTLS kullanıcıları, günümüzde kestirimli analizler yapabilmekte ayrıca şirketlerinin performanslarını daha da artırma yönünde iş akış algoritmaları uygulayabilmektedir.

Konumlandırma çözüm sistemleri temelde bir varlık veya kişi takibini esas alır. Konumlandırma çözümlerinin tercih edilmesinde şirket verileri toplanır ve anlık şirket içi operasyonel durumlar göz önünde bulundurularak, şirketler ticari karar mekanizmalarını geliştirirler. RTLS sisteminin kazandırdıkları arasında hareket izleme, denetimli kontrol, devam eden işler, insan kaynakları, araçların takibi ve entegrasyonu, rota hesaplamaları, konum ve hız belirleme sistemleri, trafik kontrol sistemleri endüstride kullanım alanı bulmaktadır.



Şekil 2. 4. RTLS Yönetim Modülleri

Şekil 2.4’de de görüldüğü gibi modüler yapıda şirketlerin ihtiyaçlarına yönelik olarak RTLS çözümleri geliştirilmektedir. Varlık yönetimi operatör takip sistemlerinde ön plana çıkmaktadır. Operatörlerin takibi oluşabilecek iş güvenliği sorunlarının önüne geçebilmek adına sıklıkla kullanılan bir RTLS çözümdür. MRO yönetim modülünde araç, ekipman ve taşıt gibi materyallerin işlevlerini yerine getirebilmesi ve olası aksilikte anlık müdahale için takip sağlanmaktadır. Tedarik zinciri yönetimi; üretim tesislerinde ham madde, ekipman ve son kullanıcıya ulaşana kadarki tüm sürecin takibini sağlar.

2.2.1. RTLS çözümlerinin kaza önleyici olarak kullanımı

RTLS çözümlerinin tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında en önemlisi kaza önleyici sistem tasarımlarıdır. RTLS çözümleri güvenlik bakımından incelendiğinde iş güvenliği, işçi güvenliği, üretim güvenliği gibi güvenlik esaslarına cevap verebilmektedir.

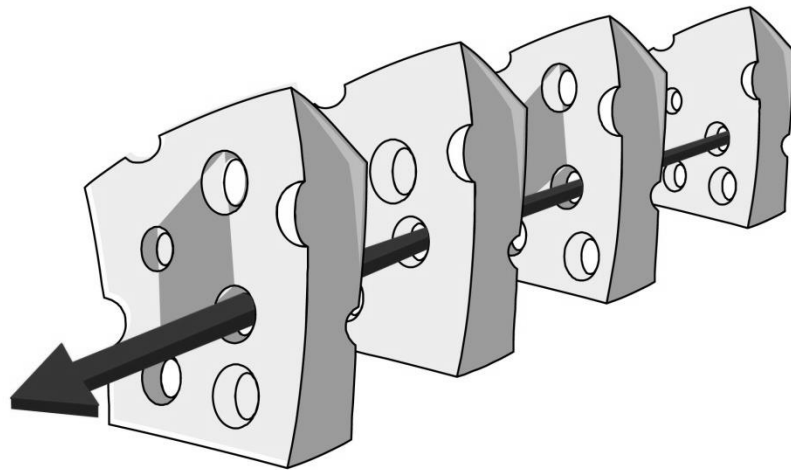
RTLS in temel amaçlarından biride kaza risk oranını düşürmektir bununla ilgili yapılan çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik İdaresi (OHSA) istatistiklerine, Halawa’nın 2019’da yayınladığı makalesinde yer verilmiştir. ABD de her yıl 85 ölümcül kaza ve 34900 ciddi yaralanma tamamen forklift kaynaklı olup bu kazaların %73 ü trafik sorunlarından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Kazalarla ilgili Hollanda da bulunan 78 depoyla yürütülen çalışmalarda, depo güvenlik sorunları kategorize edilmiştir.

- 1) Trafik
- 2) Güvenlik eğitimi
- 3) Temizlik
- 4) Depolama ve park etme

Trafiğin birincil tehdit unsuru olduğu görülmektedir. Çalışmalar sonucunda trafik sorununun çözümünde; RTLS'in kullanılması gerektiği belirtilmiştir (Halawa, Daoud ve Lee, 2019).

2.2.2. İsviçre peyniri (Swiss-Cheese) modeli

J. Reason (1997) kaza faktörünü katmanlara ayırmış ve kaza oluşum yönlerini bu katmanlardaki delikler olarak tanımlamıştır. Şekil 2.5'de de görüldüğü gibi İsviçre peynirinin şekline benzetmesindeki temel gaye, bu peynirin farklı boyutlarda delikli yapısı olmasından kaynaklıdır. Bu modellemede katmanlar sıralandığında ve delikler üst üste geldiğinde kaza oluşabileceği ön görülmeye çalışılmıştır. Kaza oluşumunun ön görüldüğü durumlarda, bir katman kazayı durdurabilmeye yetmektedir. Modellemede delikler görülebilir, kaybolabilir veya büyüklükleri değişiklik gösterebilir olacak şekilde tasarlanmalıdır. Reason'a göre olaylar bir bütün olarak görülemediğinden kaynaklı, hataların analizinde sorunlar yaşanabilmektedir. Bu modelin en büyük sorunu standartlaştırılamamasıdır. Standart olabilmesi için kazalar sektörel bazda incelenmeli ve oluşturulmalıdır, hatalar yaşandıkça, tecrübeye dayalı delikler belirlenmelidir.



Şekil 2. 5. Reason kaza faktörü İsviçre peyniri modeli

İsviçre peynirinin kaza nedenselliği modeli, havacılık, mühendislik, sağlık, acil servis organizasyonları dahil olmak üzere risk analizi ve risk yönetimi durumlarında kullanılmaktadır. Bunun yanında yazılımcılar için bilgisayar güvenliği ve savunmasında kullanılmaktadır. Katmanlı güvenliğin arkasındaki ilke olarak kullanılan bir modeldir. Bu model birçok kişi, şirket ve Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) gibi dünya havacılık otoriteleri tarafından kabul görmüştür (Griffin, Young ve Stanton, 2015).

Çizelge 2. 1. Endüstrideki kaza oranlarının yüzdelik dağılımı

Kaza Tipi	Yüzdelik Oran (%)
Kaza türü belirtilmedi	%41
Çarpışma kazaları	% 34
Sağlık sorunları	%6
Düşme kazaları	% 9
Çarparak düşme	% 4
Gaz patlaması	% 3
Ramak kala	% 3

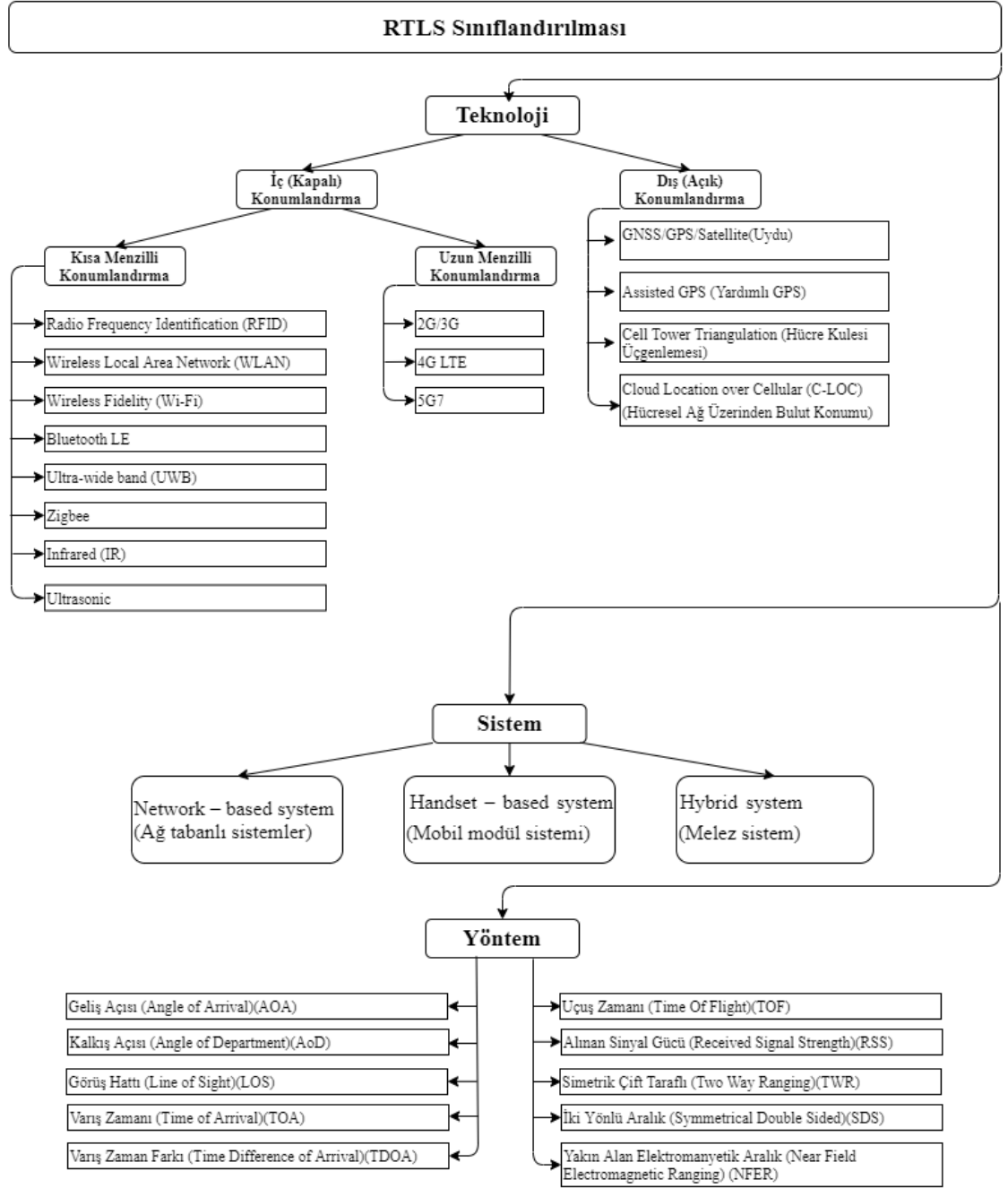
Çizelge 2.1'deki oranlardan da görüldüğü gibi en yüksek belirlenebilir kaza oranı riski %34 oran ile çarpışma kazalarıdır. Bu durumun oluşması insan faktörünün dahil olduğu, operatör kullanımına muhtaç makine ve ekipmanlarda görülmektedir, en başta forklift kullanımına bağlı kazalar, çarpışma kazalarına sebebiyet vermektedir (Soltanmohammadlou, Sadeghi ve Moktarpour, 2019).

2.2.3. RTLS sınıflandırılması

RTLS çözümleri 3 başlık altında sınıflandırılabilir. Sınıflandırma sırasıyla teknoloji, sistem ve yöntem olarak nitelendirilebilir. Sınıflandırmaya olan ihtiyaç RTLS çözümü entegre edilecek işletmelerin farklı tiplerde olmasından kaynaklıdır. Farklı işletmelerin ortak bir RTLS sınıflandırması ile çözüme varmaları daha kolay olacaktır. Sınıflandırmalar ile RTLS çözüm ortakları ve işletmesine RTLS çözümü entegre edilecek yatırımcı arasında ortak bir vizyon oluşturması planlanmaktadır.

Sınıflandırmalar karar ağacı algoritmasını temel alınarak oluşturulmuştur. Karar ağacı algoritması veri madenciliğinde ve yapay zeka çözümlerinde sıklıkla başvuru alan bir metoddur. Endüstri 4.0'ın bir alanı olan RTLS çözümlerinin işletmelerce kendi karar ağaçlarını oluşturması, dijital dönüşümünü tamamlayan tesislerde yapay zekanın RTLS çözümlerine katkısını arttıracaktır.

Şekil 2.6'da RTLS sınıflandırması detaylı olarak sunulmuştur. RTLS alanında kullanılan teknolojiler dış ve iç konumlandırma olarak ayrılmaktadır. En sık kullanıma sahip olan RTLS teknolojileri kapalı alan konumlandırmaları içerisinde yer alan teknolojilerdir. RTLS sistemleri bakımından yapılan irdelemeler; ağ tabanlı, mobil uyumlu ve farklı sistemlerin birleştirilmesiyle oluşturulan sistemler olarak ele alınmıştır. RTLS yöntemleri, kullanılan teknolojik altyapıların çalışma prensiplerini içermektedir.



Şekil 2. 6. RTLS sınıflandırması (Teknoloji-Sistem-Yöntem)

2.2.4. Dış mekan (açık alan) konumlandırma(Outdoor Positioning System)(OPS)

Küresel konumlama sistemi (GPS) yaygın olarak mobil cihazlarda kullanılır ve baz istasyonu, uydular vasıtasıyla GPS adres sunucusu üzerinden kullanıcının konumunu bulmayı hedefler. Ancak bu çözümlerin kapalı alanlarda uygulanması, sinyali bloke eden malzemeler, çevresel bozucular ve yansıtıcılar nedeniyle mümkün değildir, zira iç mekânda sinyal gücünün zayıflaması söz konusudur. GPS'in dış mekân konum belirlemede sağladığı doğruluk 15 m, iç mekânda ise 50 m'dir. Dolayısıyla iç mekân konum belirlemede daha farklı teknolojileri kullanmak gerektiği görülmektedir (Arsan 2018).

2.2.5. İç mekan (kapalı alan) konumlandırma(Indoor Positioning System)(IPS)

Bu çalışmanın bir kısmında iç mekan konumlandırma sistemi ile çok katlı yada tek katlı kapalı alanlarda kullanımı uygun olan RTLS çözümleri ele alınacak olup, bu alandaki çalışmalar aktarılacaktır. Başlıca genel kullanım alanı bulabilmiş konumlandırma teknolojileri; infrared, ultrasonik, hücresel, radyo frekansı ile tanımlama (RFID), kablosuz ağ (Wi-Fi), Bluetooth veya ultra geniş band (UWB) sensörleri ile tanımlama olarak aktarılabilir.

2.3. Endüstride Kullanım Alanı Bulan Başlıca RTLS Teknolojileri

2.3.1. Merkezi hücreleme (Cell of Origin) (CoO)

Daha çok kapalı alan konum belirleme sistemi olarak kullanılır. Çok katlı yapılarıdaki RTLS çözümlerinde tercih edilir. Sınırlı menzilde fiziksel bir kaynağın konumu belirlenir. Avantajı kullanıcıya kurulum kolaylığı sağlamaktadır. Yüksek frekanslarda çalıştırıldığında, yüksek hızlarda veri akışı sağlayarak konumlandırmadaki hassasiyeti arttırılmış olmaktadır. Mobil, taşınabilir, kablolu ihtiyacının olmadığı RTLS çözüm

teknolojilerini kendi içinde barındırır. CoO teknolojisinde konumlandırmayı arttırmak için alıcı sayısı artırılmalıdır. Alıcı sayısındaki artış antenlerin sinyal güçleri ve yayın menzilleri doğrultusunda konumlandırılmalıdır.

2.3.2. Radyo frekansı ile tanımlama (RFID) ile iç mekân konum belirleme

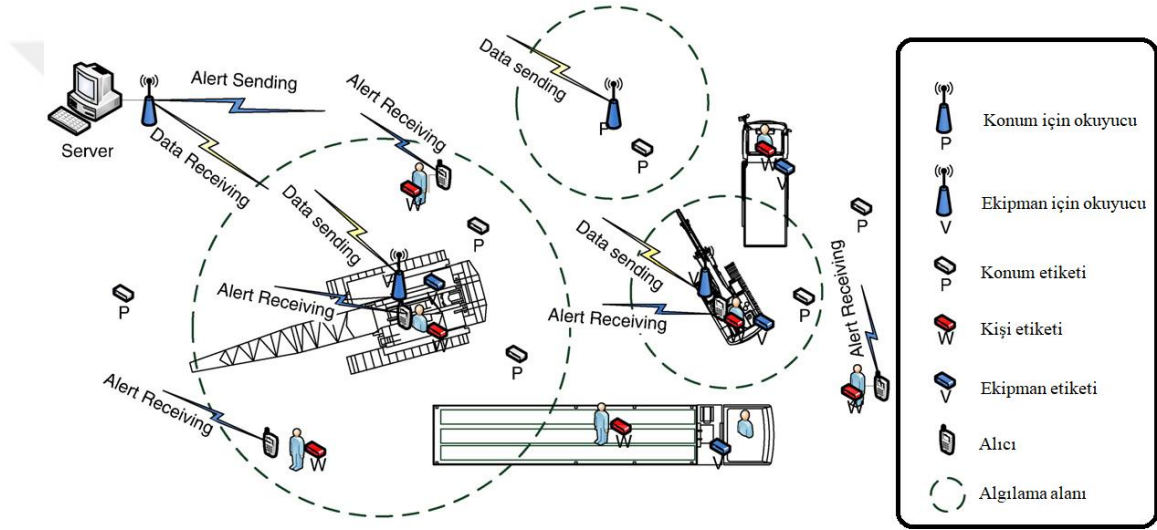
RFID teknolojisinin endüstriyel uyarlamaları iki tipte olmaktadır. Aktif RFID etiketler ve Pasif RFID etiketler. RFID teknolojisi Radyo frekansı ile tanımlama olarak adlandırılan RFID (Radio Frequency Identification) teknolojisi, radyo frekansı uyumlu bir entegre devreyi elektromanyetik aktarım yoluyla veri depolama ve veriyi alma aracı olarak tanımlama prensibine dayanmaktadır (Arsan 2018).

Pasif RFID etiketler ile konum takibi kısa mesafe okuma alanları için uygundur, Pasif etiketlerin gücü okuyucudan gelen radyo dalgalarının indüklenmesiyle, pasif etiket içerisinde tanımlı olan adres değerini (Identification (ID)) kimliğini, kendi anteni vasıtasıyla ve indüklediği enerjiyi kullanarak yayın yapmaya başlar. Esas olarak geleneksel barkod teknolojisini değiştirmek için kullanılırlar ve aktif etiketlerden daha hafif, daha küçük ve daha ucuzdurlar. Pasif RFID etiketlerin okuma aralıkları 1-2 m'dir ve okuyucular kısa mesafe yayına uygun dizayn edildikleri için geniş alanlarda RFID ile RTLS çözümlerinde çok sayıda anten kullanılmalıdır, bu okuyucuların sayısının artırılmasıyla mümkün olacağından ek maliyet oluşturmaktadır.

Aktif RFID etiketlerde kendi kimlik bilgilerini sürekli yayın yapan verici antenler mevcuttur enerjisini kendi içindeki güç kaynağından alır, bu durumda okuma aralığı pasif etiketler gibi 1-2 m değil 50 m'lik bir okuma alanı sunulmaktadır. RFID ile RTLS çözümlerinde ortalama hata yaklaşık olarak 1 m civarındayken, maksimum hatanın 2 m'den az olduğu görülmüştür (Arsan 2018).

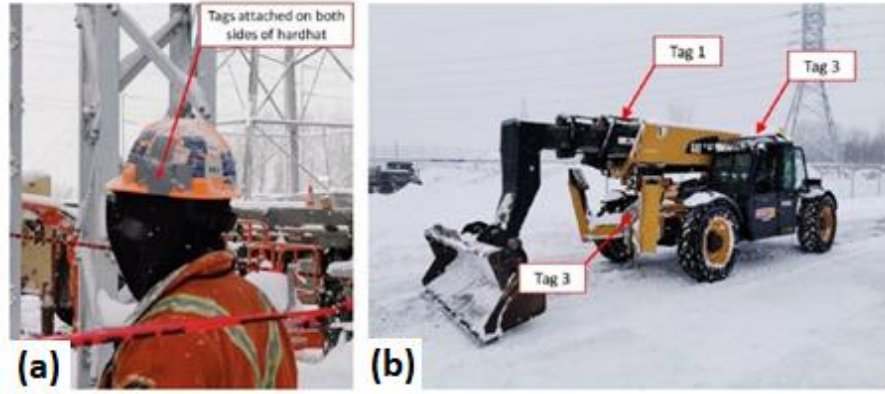
2.3.3. RFID teknolojisinin uygulanabilirliği

RFID teknolojisiyle tasarlanan RTLS çözümlerinde Chae ve Yoshida (2010) inşaat şantiyesi gerçeklemeleri doğrultusunda 4 metreden az hata payına sahip konum saptamalarına ulaşmışlardır. Çalışmalarında RFID teknolojisiyle veri elde edip bunu görselleştirmede; görsel ibarelerin, RFID etiket ve alıcıların sınıflandırılmalarını yapmışlardır.



Şekil 2. 7. Chae ve Yoshidanın şantiye alanındaki RFID tabanlı RTLS çözümü

Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi bir şantiye alanında RFID ile RTLS çözümü yapılması için okuyucular ekipman ve konum odaklı okuma sağlarken RFID etiketler sayesinde 3 tip etiketlemeyle (Lokasyon-Kişi-Ekipman) konum takibi sağlanabilmektedir.



Şekil 2. 8. (a) Pasif RFID etiketler. (b) Aktif RFID etiketler.

Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi pasif RFID etiketler ile konum takibi yapılabilmesi için operatörlerin baş kısımları tercih edilmektedir bu sayede etiketleri aktif edecek enerji çevresel etkilerden etkilenmesi düşürülmeye çalışılmaktadır. Aktif RFID etiketler (Tag1-2-3) daha çok enerji temininin kolay yapılabilceği iş makineleri, operatör robotları gibi alanlarda tercih edilmektedir.

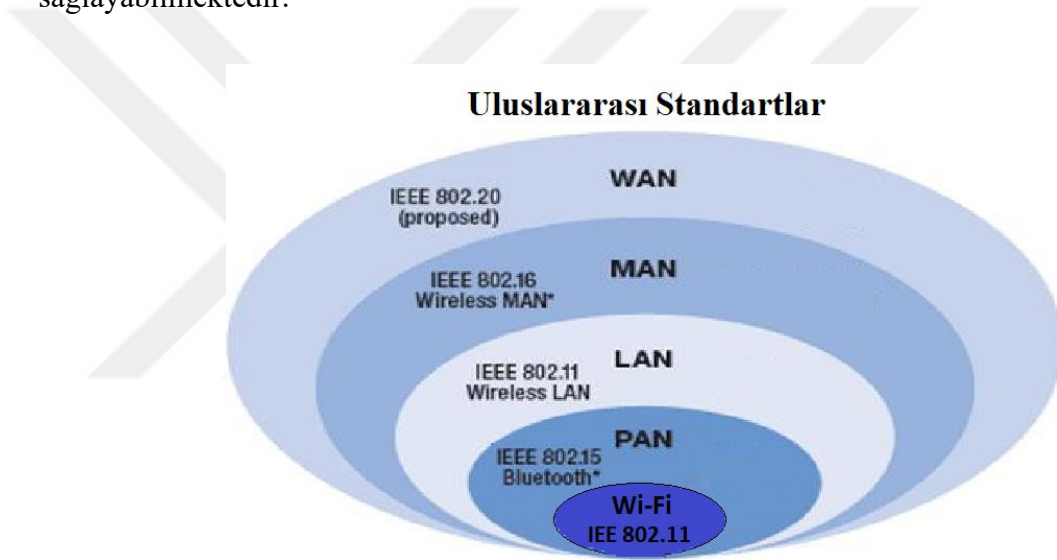
RTLS çözümlerinde, RFID teknolojisinin kullanımı risk bölgeleri oluşturularak sağlanır. RFID etiketlemeler yüksek risk bölgelerinde (hareketli araçlar) aktif RFID etiket tercih edilirken düşük risk alanlarında pasif RFID etiketleme yapılır. RFID okuyucuların konumlandırmaları ve menzilleri, risk bölgelerinin kesişim yerlerine veya büyüklüklerine göre yapılmaktadır.

2.3.4. Kablosuz yerel alan ağı (Wi-Fi) ile iç mekân konum belirleme

Genel anlamda tüm kullanımlar bir ağın parçasıdır. Tüm küçük ağların toplanarak bir süper ağı oluşturmaya geniş alan ağı (Wide Area Network) (WAN) denmektedir. İnternet bir WAN örneğidir 4G, LTE, fiber optik gibi teknolojiler bu ağı oluşturmak için kullanılır. Kablosuz bağlantı alanı Wireless Fidelity (Wi-Fi) yada yerel Ethernet bağlantıları WAN’a bağlıdır, bu ağ yönlendirici (router), merkezi anahtar (hub),

yönlendirilmiş anahtar (switch), tekrarlayıcı (repeater) gibi donanımsal cihazlardan meydana gelmektedir. Bu donanımlar ihtiyaçlara yönelik olarak standart topolojilerle birbirine bağlanmaktadır.

LAN fiziksel olarak interneti, hatlarda istenen şekilde bize ulaştırır. Kablosuz yerel alan ağı (Wireless Local Area Network) (WLAN) veriyi LAN hattından alarak elektromanyetik dalgalar ile etrafa kablosuz ulaştırmak adına kendi alanını oluşturur. WLAN, Wi-Fi gibi birkaç yüz metrede bir tekrarlanabilir olan bağlantı alanlarına ihtiyaç duyar, Wi-Fi ise bu tekrarlamaları kendi içinde erişim noktaları (Access Point) (AP) ile sağlayabilmektedir.



Şekil 2. 9. Uluslararası wireless standartları

Şekil 2.9’da IEEE standartları verilmiştir. Standartlar incelendiğinde LAN ve Wi-Fi standartlarının aynı olduğu görülmektedir, bunun sebebi Wi-Fi sistemlerinin yerel bir ağ kaynağına bağımlı olarak kullanılabilmesinden kaynaklıdır. Wi-Fi teknolojisi 2.4 GHz bandında çalışan 100 Mbps’lik veri iletim hızıyla 50-100 m lik alanlara yayın yapabilen, IEEE 802.11 gibi kablosuz ağ standartına bağlı popüler bir RTLS çözüm teknolojisi olarak endüstride kullanım alanı bulmaktadır. Wi-Fi altyapısı aslında bir RTLS çözümü olarak tasarlanmamıştır ancak uyarılama, hesap ve yöntem kullanımlarıyla endüstride kullanım imkanı bulmuştur.

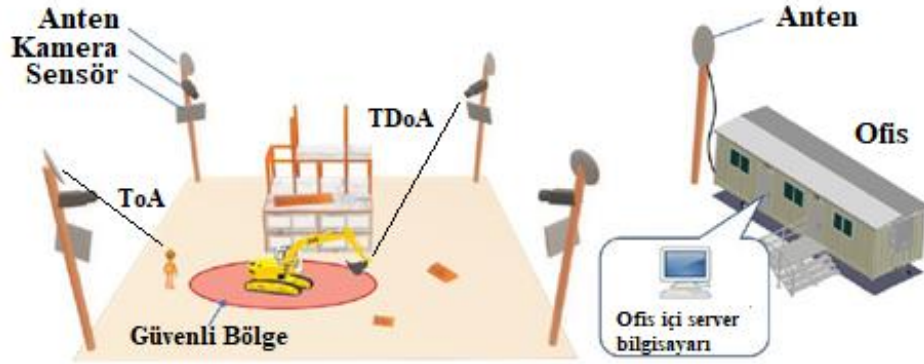
Wi-Fi ile iç mekân konum belirlemede genellikle alınan sinyal gücü (RSS) tabanlı RTLS yöntemi kullanılmaktadır. Üç ve daha fazla AP'den alınan RSS bilgisi, üçgenleştirme (triangulation) metodu ile hesaplanarak mobil kullanıcının iç mekân konumunu bulmak için kullanılabilir. RSS kullanan tipik Wi-Fi konumlandırma sistemlerinin ortalama hatası 3 m ile 30 m arasındadır (Arsan 2018).

2.3.5. BLE teknolojisi ile iç mekân konum belirleme

Bluetooth Ultra Yüksek Frekanslı radyo dalgalarını kullanan, yüksek hızlı veri iletimi sağlayan (2,4 ile 2,485 GHz ISM Frekans değerlerinde) bir kablosuz iletişim teknolojisi. Bluetooth frekans atlama ve parazit önlemede kullanılır. Kişisel alan ağı (Personal Area Network) (PAN) ile cihazları bağlar ve ağ sistemi oluşturur. BLE çok fazla bant genişliğine sahip olmayan cihazları bile bağlayabilme kapasitesine sahiptir. BLE düşük güç tüketimi durumunda aktif ve düzgün veri alış-verişinde 100 m gibi uzak mesafelerde dahi kapalı alanlarda olumlu sonuçlar vermektedir.

BLE teknolojisi küçük boyutta veri aktarımı için uygun olup, bluetooth işaretlerini 15 m ye kadar ulaştırabilmektedir. BLE teknolojisi RSS yöntemiyle iç mekan konumlandırmada (IPS) kullanılmaktadır. Üçleme (Trilaterasyon) metoduyla, üç farklı işaretçiden alınan RSS verileriyle konumlandırma tam olarak saptanmış olmaktadır. BLE işaretçiler ile çoklu laterasyon (multilaterasyon) ve hücre tabanlı (Cell-Based) metotlar kullanılarak da konum saptaması yapılabilir.

Şekil 2.10'da da görüldüğü gibi çoklu laterasyon (Multilaterasyon) ile iç mekan konum belirlemede birden çok alıcı tarafından algılanan sinyalin varış zamanı (ToA) ve varış zamanı farkı (TDoA) gibi zaman aralıklarının ölçülüp anlamlandırılmasına dayalı yöntemler tercih edilir. Hücresel (Cell-Based) BLE teknolojisinin kullanımı herhangi bir mesafe ölçümü değil, işaretçilerin görünürlüğüne dayalı RSS yöntemi esaslı ölçümlerle konum belirlemeyi esas almaktadır. BLE beacon tabanlı iç mekân konum belirleme sistemlerinde ortalama hata, genellikle 1-2 m aralığında değişmektedir (Arsan 2018).



Şekil 2. 10. BLE teknolojisinin RTLS çözümlerinde kullanımı

İstasyonlar bulunduğu ve etkinliklerini gösterdikleri alan içerisinde kablosuz erişim noktası (Wireless Access Point (WAP)) kullanır. İstasyonların ağ yapısı sayesinde, istasyonlardan birisine kablosuz erişim sağlandığında, tüm istasyonlara ulaşan bilgiler eş zamanlı olarak tek bir sistem üzerinden kontrol edilebilir olmaktadır.

2.3.6. BLE teknolojisinin uygulanabilirliği

Bluetooth ile konumlandırmada mesafe uzaklıkları arttıkça, hassasiyet artırımı yapılmak istenilen durumlarda; ara istasyonlarla Bluetooth yönlendirici yada sinyal kaynak yakalayıcıları kullanılmaktadır. Hu ve arkadaşlarının 2020 de yaptığı çalışmalarında 3 adet istasyon kullanılmıştır bu istasyonlarla 0,6 ile 1,2 sn sıklığında veri alış-verişi olmakta ve bu alış-verişte alınan sinyal gücü göstergesi (RSSI) ile net bir konumlandırma yapılabildiği gösterilmiştir (Hu, Yu, Chuang, Hsu ve diğerleri, 2020).

Huanh ve arkadaşları 2020 de yaptıkları çalışmalarda inşaat şantiyesinde RTLS çözümleriyle iş güvenliği sağlayabilmeyi hedeflemişlerdir. Hedeflerini 3 ana başlık altında belirtmişlerdir. RTLS'in kablosuz şemasını kullanarak fizibilitesini test etmek. Yakınlıkları neredeyse gerçek zamanlı olarak etkili bir şekilde tespit eden bir yöntem

geliştirmek. İşçiler için tasarlanmış uyarı mekanizmalarının (titreşimli bileklik) testlerini gerçekleştirmek. Sayılan bu 3 amaca yönelik araştırmalar ve saha uygulamalarında bulunan Huang ve arkadaşları tarafından; UWB ve GPS in maliyet yönünden sahada uygulanmaya alınamayacağı belirtilmiştir. UWB (Ultra geniş bantlı) yapı tercih edilmemesinin sebebi zamanlama kablolarıdır. Zamanlama kabloları şantiyeyi çevreleyen sensörlerin verilerini senkronize etmede kullanılır. UWB sistem kurulum yönünden maliyetli ve zaman kaybı olarak görülmüştür. GPS tercih edilmemesinin sebebi olarak, hassasiyet yönünden zayıf olması gösterilmiştir.

BLE (Bluetooth Low energy) ile kablolamaya ihtiyaç duyulmayacağını ve iki yönlü iletişim desteğiyle etiketler ve sensörler sayesinde işçilerin bilekliklerine titreşimsel uyarılar gönderilebileceği öngörülmüştür. BLE teknolojisini kullanarak inşaat işçilerinin bilekliklerine taktıkları titreşimli BLE vericiler ile kaza risk faktörünü düşürebilmek adına yüksek hızlarda veri alış-verişi sağlayabilecek ve hatasız, hassas veri elde edebilecekleri bir RTLS çözümü gerçekleştirmişlerdir.

2.3.7. Ultra geniş band (UWB) sensörler kullanarak iç mekân konum belirleme

Ultra geniş band (UWB) sensor teknolojisi, kısa menzilli yüksek band genişliği iletişiminde kullanılan bir radyo teknolojisidir. UWB 500 MHz den daha geniş bir bant genişliğine sahiptir, bu geniş bant sensörlerin kullanılması sinyallerin birden fazla yolla alıcıya ulaşmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede çoklu yol problemlerine ve bozucu etkilere karşı bir çözüm olarak kullanılabilir. UWB vericileri diğer iç mekân konum belirleme teknolojilerine kıyasla daha düşük güç tüketir, daha verimlidir ve daha uzun bir pil ömrü vardır.

Giyilebilir veya montajlanabilir UWB verici sensörlerin güç tüketimleri genellikle 1 mW'dan daha az iken, UWB alıcı sensörlerin güç tüketimleri 400 mW civarlarındadır. Haberleşmede UWB frekans aralığı olarak 3,1-10,6 GHz frekans aralığı önerilmektedir,

bunun başlıca sebebi bu frekans aralığının endüstriyel ortamdaki bozucu sinyallerden daha az etkilendiğinin gözlemlenmiş olmasıdır. Özellikle 2,4 GHz frekans bandında çalışan Bluetooth veya Wi-Fi gibi diğer sinyal yayıcı teknolojilerin bozucu etkilerinden kurtulmaktadır.

İç mekan konumlandırmada insan sayısının fazlalığı yada nesnelerin çokluğuna bağlı olarak sinyal kayıpları yaşanabilir. Görüş hattının (Line of Sight) (LoS) engellenmesi ve düşüşü konum doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. RTLS çözümü olarak kullanılacak UWB teknolojisi konum belirlemede uçuş zamanı (Time of Flight) (TOF) ve varış zamanı (Time of Arrival) (ToA) varış zamanı farkı (TDoF) yöntemlerini de kullanmaktadır, bu kullanılan üç tip yöntemle 30 cm civarında ortalama hata ile konumlandırma yapılabilmektedir (Arsan 2018).

2.4. Genel Kullanım Alanı Bulmuş RTLS Teknolojilerinin Kıyaslanması

Halawa ve arkadaşlarının (2019) yaptıkları bir anket çalışmasında 15 lider depo firması ile çalışılmıştır. Depolarında RTLS çözüm sistemi kullanan firmaların uyguladıkları RTLS teknolojilerini irdemiş ve depo sistemindeki forklift konum takiplerinin nasıl yapıldığı hakkında bilgiler toplamışlardır.

Çizelge 2. 2. Halawa ve arkadaşlarının (2019) çalışmalarındaki kıyaslama adımları

Parametreler	UWB	Aktif RFID	Wi-Fi	Kamera Sis.
Fiyat (USD)	15000-33000	36000-48000	15000-55000	50000-75000
Doğruluk (m)	0.1 – 0.3	1 - 2	5-15	<0.1
Ölçeklenebilirlik	Kolay	Kolay	Kolay	Zor
Sıcaklık Aralık (C°)	-20 - 55	-40 – 85	-30 – 85	> -10
3D yerelleştirme	Uygun	Uygun değil	Uygun değil	Uygun
Kurulum kolaylığı	Orta	Orta	Kolay	Zor
Enerji tüketimi	Verimli	Verimli	Verimli	Verimli
Konum raporlama oranı	< 100 Hz	< 4 Hz	Veri YOK	< 1 Hz
Sinyal gücü	Düşük	Düşük	Düşük	Veri YOK

Çizelge 2.2’de Halawa ve arkadaşları, farklı RTLS çözümleri uygulamış olan 15 depo firmasıyla yürüttükleri anket sonuçları görülmektedir.

Çizelge 2.2’deki veriler doğrultusunda kıyaslama yapıldığında:

- Maliyet uygunluğu yönünden sıralamada: UWB , Wi-Fi , RFID, Görüntü işleme sistemleri
- Doğruluk yönünden sıralamada: Görüntü işleme sistemleri, UWB, RFID, Wi-Fi
- 3D yerelleştirmeye uygunluk yönünden sıralamada: UWB ve Görüntü işleme sistemleri
- Konum raporlama oranı yönünden sıralamada: Görüntü işleme sistemleri, RFID, UWB

teknolojilerinin sıralanabildiği görülmektedir.

Yukarıdaki veriler doğrultusunda kıyaslamalar yapıldığında ve 15 firmanın anket sonuçları incelendiğinde görülmektedir ki UWB teknolojisi diğer teknolojilere nazaran ön plana çıkmakla birlikte hemen akabinde RFID teknolojisi RTLS çözüm teknolojileri olarak saha uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 2. 3. RTLS teknolojilerinin özellikleri

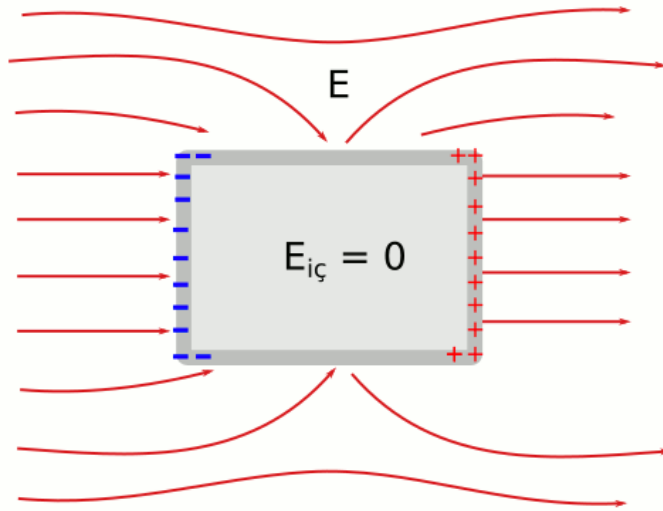
	PASİF RFID	UWB	BLUETOOTH (BLE)	Wi-Fi	GPS
Avantaj	Ucuz Etiketler	Yüksek Hatasızlık	Konuşlandırma Kolaylığı	Her Yerde Var	Dış Mekanda Hatasızlık
Menzil	1-8m Menzil	200m Menzil	10m Menzil	30m Menzil	Dünya Çapında Menzil
Hata Oranı	Orta Hatasızlık Oranı	Yüksek Hatasızlık Oranı	Düşük Hatasızlık	Düşük Hatasızlık	Düşük Hatasızlık
Konum	Konuşlandırması Zor	Konuşlandırması Zor	Konuşlandırma Kolaylığı	Orta Konuşlandırma Kolaylığı	Konuşlandırması Kolay
Pil Ömrü	Pil Ömrü (yok)	Uzun Pil Ömrü	Uzun Pil Ömrü	Zayıf Pil Ömrü	Zayıf Pil Ömrü
Maliyet	Orta Maliyetli	Yüksek Maliyetli	Düşük Maliyetli	Orta Maliyetli	Yüksek Maliyetli

Çizelge 2.3’de RTLS çözümleri içerisinde yer alan farklı teknolojiler verilmiş ve ortak başlıklar altında kıyaslamaları ve avantajları verilmiştir. UWB teknolojisi yüksek hassasiyet ve yüksek kapsama alanı sunarken, projelerde yüksek maliyet oluşturabilmektedir (“Konumlandırma çözümleri”, 2020).

Endüstriyel ihtiyaçlara yönelik olarak RTLS çözümleri farklılıklar gösterebilmektedir. Kapalı alan RTLS teknolojileri genel anlamda değerlendirildiğinde en sık tercih edilen teknolojilerin başında UWB ve RFID gelmektedir.

2.5. RTLS Teknolojileri ve Endüstrideki Faraday Etkisi

Faraday kafesi 1836 yılında İngiliz fizikçi Michael Faraday tarafından bulunmuştur. İletken bir yüzey ile kısmen yada tamamen kapalı bir yapı faraday kafesi etkisi gösterebilmektedir. Şekil 2.11’de de görüldüğü gibi iletken malzemelerin atomik yapıları incelendiğinde dış katmandaki (valans) elektronlar, elektrik alana maruz kaldıklarında, serbest halde hareket etme yeteneklerine sahiptir. İletkenlerdeki elektronların bu hareketi faraday kafesi içinde kendini sürekli tekrar ederek elektrik alanı ($E_{iç} = 0$) sıfırlar. Elektrik alanın sıfırlanmasıyla elektronlar kararlı yapılarına dönüş sağlayarak, hareket etme durumları ortadan kalkar. Tüm bu durumların sonucu olarak kafes içinde elektrik alan ve manyetik alan giriş çıkışı engellenmiş olur.



Şekil 2. 11. Faraday kafesi gösterimi

Endüstri 4.0’ın RTLS alanında karşılaşılan elektromanyetik sorunlar arasında; elektromanyetik sinyallerin metaller ile olan etkileşimi gelmektedir. RTLS teknolojilerinin yaydıkları sinyaller metaller ile etkileşime girdiğinde faraday kafesi etkisine maruz kalarak sinyal etkileşimi kesilmiş olmaktadır. Hassasiyetin ve anlık veri akışının kesilmek istenmediği RTLS çözüm sistemlerinde bu durum ile karşılaşılmaması istenmeyen bir durum olarak görülmektedir.

Mikoda ve arkadaşlarının 2020 de yaptıkları çalışmada kapalı alan konumlandırma teknolojisi olarak kullanılan UWB sinyallerinin farklı metaryaller ile olan etkileşiminden kaynaklı sinyallerindeki bozulmalar ve kopmalar incelenmiştir. Çalışmalarında: Karton kutu kabı anten üzerine geçirildiğindeki sinyal ölçümleri, Plastik kutu kabı anten üzerine geçirildiğindeki sinyal ölçümleri, Çalan cep telefonu yanındaki sinyal ölçümleri, Metal kap anten üzerine geçirildiğindeki sinyal ölçümleri yapmışlardır.

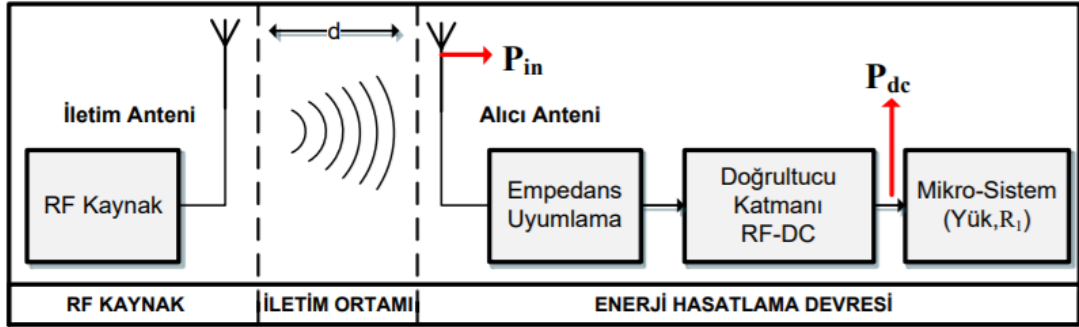
Mikoda ve arkadaşları çalışmaları sonucunda 15 cm lik hassasiyet ile ölçümlerini gerçekleştirmeyi başarmışlardır ancak 4 tip engel ile oluşturdukları deney düzeneklerinde azda olsa hatalı ölçümler elde ettiklerini gözlemlemişlerdir. Plastik ve karton kutunun UWB sinyallerini engellemesinin yada bozucu etkisinin beklendiği gibi çok düşük olduğu görülmüştür. Çalan bir cep telefonunun yanında gerçekleştirilen deneyin amacı endüstrideki elektronik alet ve cihazlarla olan etkileşimden kaynaklanabilecek bozulmaları simüle etme amacı güdülmüştür. Çalan cep telefonu deneyindeki bozucu etkinin karton ve plastik ile oluşturulan deneye göre hata oranının biraz daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. En çok hata oranı metal kap ile yapılan deneyde ortaya çıkmıştır.

2.6. Enerji Hasatlama

Enerji hasatlama yeni bir enerji kaynağı olarak nitelendirilmektedir. Düşük güç harcayan cihazların kendi kendine yetebilmesi amaçlanarak enerji hasatlayıcılar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan enerji hasatlama şekli RF enerji hasatlayıcılarıdır.

Şekil 2.12’de de görüldüğü gibi radyo frekans aracılığıyla enerji hasatlama (RFEH) temelde 3 kısma ayrılmaktadır. Birinci kısım RF kaynak kısmı olup iletim anteni bu kısımda yer alır. Enerji hasatlama doğrudan iletim yapacak antenin çalışma frekansına bağlıdır. Sistem tasarımı ve birim hücre tasarımları yayın yapan iletim anteninin çalışma frekansına göre şekillenmektedir. İkinci kısım iletim ortamıdır. Bu çalışmada

iletim ortamı; kayıplı ve kayıpsız iletim ortamları olarak incelenecektir. Üçüncü kısım olarak enerji hasatlama devre ve anten tasarımlarıyla RTLS alanında karşılaşılan metallerin elektromanyetik dalgalarındaki bozucu etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalar sunulacaktır.



Şekil 2. 12. Elektromanyetik enerji hasatlama sisteminin blok diyagramı

Blok diyagramı verilen enerji hasatlama sisteminde, verimlilik en önemli parametredir. Sistem verimliliği RFEH doğrultucu katmanında;

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{in}} 100\% = \frac{V_{dc}^2}{R_L P_{in}} 100\% \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmektedir (Karakuş, 2018). Burada R_L yük direnci (Ω), P_{dc} yüke aktarılan güç (W), P_{in} doğrultucu devrenin girişinde görülen güç (W), V_{dc} yük üzerindeki gerilim (V), η doğrultucu devrenin verimliliğini ifade etmektedir.

Enerji hasatlamada farklı şekil (halka, kare vb.) ve malzemede rezonatorler kullanılır, rezonator tasarlanan birim hücrenin üst kısmında yer alan genellikle iletken malzeme tabanlı cisimdir.

Tek halka rezonatörlü çalışmaları üç kısımda incelenmiştir (Karakaya, Bağcı, Yılmaz ve Akaoğlu, 2017).

- Taban malzemesi (Altaş) kalınlığının değişiminde emilim değerinin değişimi
- Yük direncindeki değişimin verimliliğe etkisi
- Altaştaki elektriksel geçirgenlik (ϵ) değerlerindeki değişimin verimliliğe etkisi

Altaş kalınlığındaki değişimin verimlilik artışına neden olduğu gösterilmiştir. Altaş kalınlığı 0,758 mm de elektromanyetik enerjinin soğurulma oranının % 88,2 olduğu belirtilmiştir. Kalınlığın 1,575 mm olarak arttırılması ile de % 99,5 soğurma değeri elde edilmiştir.

Karakaya ve arkadaşları 2017'deki çalışmalarında enerji hasatlamada yük direnci değişimi ile simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Bu simülasyonlar 1-2-3-4-5 k Ω mertebelerinde yapılmıştır. 2000 Ω yük direnci 5,78 GHz rezonans frekansı ile birlikte sınır değeri olarak belirlenmiştir. 2000 Ω yük direnci altındaki direnç değerlerinde maksimum %99,5 güç verimliliği gözlemlenirken, belirlenen direnç üstündeki maksimum verimlilik %97,2 olarak gözlemlenmiştir (Karakaya, Bağcı, Yılmaz ve Akaoğlu, 2017).

Çizelge 2. 4. Altaş türünün değiştirilmesiyle elde edilen verimlilik (%) ve enerji soğurulma oranı (%)

Yük direnci 2000 Ω	Altaş türlerinin elektriksel geçirgenlikleri (ϵ)	Elektromanyetik enerji soğurulma oranı (%)	Yük direncinde Harcanan gücün verimliliği (%)
FR4	4,3	%99,3	%95
Arlon AD 295	2,95	%99,9	%97
Rogers 5880	2,2	%99,5	%97,2

Çizelge 2.4 de görüldüğü gibi alttaş malzemenin değişimi verimliliği etkilemede çok fazla etkili olmamıştır. Çalışma verileri incelendiğinde görülmüştür ki alttaş tipindeki değişim rezonans frekansında kaymalara neden olmuştur. Alttaş dielektrik katsayısı arttıkça rezonans frekansı küçülmüştür.

Enerji hasatlamada enerjinin en verimli şekilde soğurulabilmesi temel amaçtır. Enerjinin soğurulmasında yüzey akım dağılım grafiğine bakılır, yüzey akımları rezonatör üzerinde hangi kısımlarda yoğunlaştığına bakılarak, yoğunlaşan bölgedeki paralel ve anti paralel akım oldukları yönlerine bakılarak tayin edilir. Paralel akan akımlar elektrik alana sebep olurken, anti paralel akımlar manyetik akıma sebep olur. Gelen elektromanyetik dalgalar bir bütün olarak ilk defa birim hücredeki rezonator yapısıyla karşılaşır ve rezonator tasarım şekli bu durumda önem arz ederek elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri rezonatör üzerinde elektromanyetik alan noktaları oluşturur. Elektrik alan alttaş içinde dolaşarak serbest haldeki elektronları tetikler. Yüzey akımları elektrik alanın yoğun olarak gözüktüğü noktalarda oluşur bu oluşum manyetik tepkiye yol açacaktır bu tepki sonucunda ve empedans uyumuda sağlandığında rezonans frekansını oluşturur.

Anten ışımları sonucu oluşan rezonans frekansında sinyal emiliminin maksimum olması beklenmektedir çünkü alttaş arkasına birim hücreyi tümüyle kaplayacak metal yüzey, iletim katsayısını minimuma indirmektedir. Maksimum enerji verimliliği için sinyal emilimi aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2.2)$$

$$R(\omega) = |s_{11}|^2 \quad (2.3)$$

$$T(\omega) = |s_{21}|^2 \quad (2.4)$$

Yukarıdaki sinyal Emilimi formülünde $A(\omega)$ Emilimi (soğurulma), $R(\omega)$ yansımayı ve $T(\omega)$ ise iletimi simgelemektedir. Emilim değeri, yansıma (s_{11}) ve iletim (s_{21}) değerlerinin sıfıra yaklaştığı durumlar için maksimum değer kazanmaktadır.

Yapılan kapsamlı araştırmalar ve literatür taramalarında görülmektedir ki enerji hasatlamada yaygın kullanım olarak Schottky diyot tercih edilmektedir. Schottky diyot yapısını diğer diyotlardan ayıran özellik fiziksel açıdan incelendiğinde n ve p bölgelerinin kesişim bölgesinde gümüş, altın veya platin gibi malzemelerin tercih edildiği görülmektedir. Normal bir silisyum bazlı diyot 0,6-0,7V eşik gerilimlerine sahiptir, ancak Schottky diyotlar 0,15V kadar düşük gerilimlerde iletim özelliği kazanabilmektedir. Schottky diyotların düşük eşik değerinde olması ve hızlı tepki sürelerine sahip olmasından kaynaklı olarak yüksek frekans devrelerinde tercih edilmektedirler. Enerji hasatlaması yapılacak birim hücre tasarımında yapılan devrede verimlilik artışına yönelik olarak düşük yüzey kayıpları ve hassasiyeti ön planda tutulmalıdır.

İletkenler endüktif bileşenlerden oluşur. İndüktörlerden kaynaklanan reaktans sinyalin frekansı arttıkça artar. Rezonatörlerin yaklaşık endüktans değeri

$$l_{Mikroserit} = 0.0002 * l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+h} \right) + 0.2235 * \left(\frac{w+h}{l} \right) + 0.5 \right] \mu h \quad (2.5)$$

olarak ifade edilir (Wheeler, 2011; Ali, 2016; Zumbahlen, 2008). Bu formülde l, w ve h sırasıyla rezonatör uzunluğu, genişliği ve yüksekliğidir. Enerji hasadı sistemlerinin verimliliği açısından parazitik endüktansı azaltmak gerekmektedir. Bu yüzden rezonatör yapıları olabildiğince yüzey alanı küçük tasarlanmalıdır (Wheeler, 2011; Ali, 2016; Zumbahlen, 2008).

2.6.1. Enerji hasatlamada empedans kavramı

Karakteristik empedans elektromanyetik dalga yayılabilen her ortamda vardır. Karakteristik empedans basitçe elektromanyetik iletim gösteren bir hattın her noktasındaki gerilimin akıma oranlanması olarak düşünülebilir. Birim hücre tasarımlarında rezonatör yapısı mikroşerit iletim hattı davranışı sergiler. Mikroşerit iletim hatlarının karakteristik empedansı

$$Z_{Mikroşerit} = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{2(1+\epsilon_r)}} \ln \left(1 + \frac{4h}{w_{eff}} \left[\left\{ \frac{14+\frac{8}{\epsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{eff}} \right\} + \sqrt{\left(\frac{14+\frac{8}{\epsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{eff}} \right)^2 + \pi^2 \left(\frac{1+\frac{1}{\epsilon_r}}{2} \right)} \right] \right) \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir (Wheeler, 2011).

Burada $Z_{mikroşerit}$ iletim hattının karakteristik empedansıdır, Z_0 serbest uzayın empedansıdır, ϵ_r bağıl dielektrik sabiti, h alt tabakanın kalınlığıdır.

$$w_{eff} = w + t \frac{1+\frac{1}{\epsilon_r}}{2\pi} \ln \left(\frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h} \right)^2 + \left[\frac{1}{\pi \frac{w}{t} + \frac{11}{10}} \right]^2}} \right) \quad (2.7)$$

Efektif değişken w_{eff} alt indistir w iz genişliğidir, h alt tabakanın (alttaş) kalınlığıdır ve t iletken kalınlığıdır (Wheeler, 2011).

Enerji hasatlamada her bir rezonator yapısı iletim hat modeli gibi davranmaktadır. Bir iletim hattının karakteristik empedansı

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilmektedir.

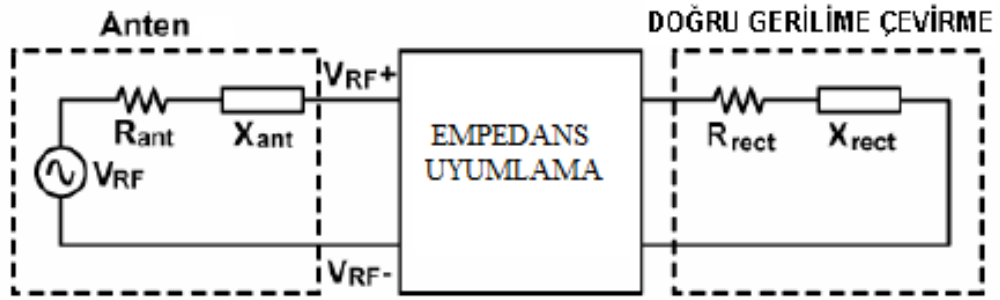
Bu formülde R, L, G ve C sırasıyla; direnç, endüktans, iletkenlik, kapasite olarak adlandırılır. Kayıpsız iletim hatlarında R ve G değerleri sıfır olarak kabul edilmektedir.

Bu durumda kayıpsız bir iletim hattının karakteristik empedansı

$$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.9)$$

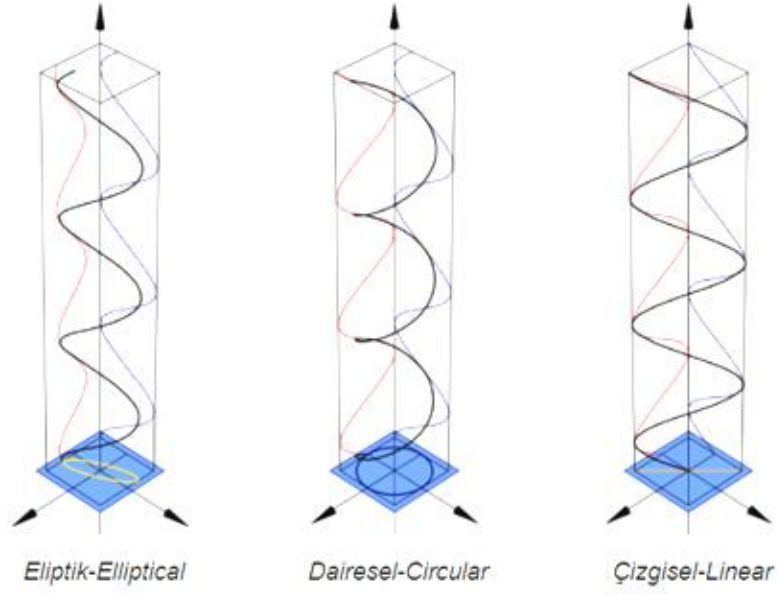
olarak ifade edilir.

Enerji hasadı birim hücre yapıları basite indirgenmek istenirse L değeri rezonatör yapısını simgelerken C değerinde rezonatörler arası yalıtkan malzemeyi (alttaş) simgelemektedir.



Şekil 2. 13. Elektromanyetik enerji hasatlama sistem gösterimi

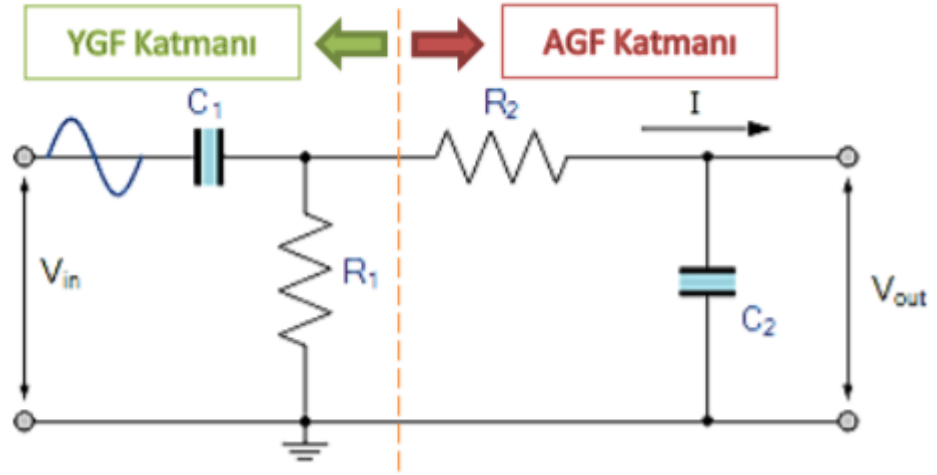
Şekil 2.13'te de görüldüğü gibi empedans uyumlama anten ve güç devresi (doğru gerilime çevirme) arasında bir bölüm olup enerji hasatlamanın stabil çalışmasını sağlar. Elektromanyetik enerji hasadıyla elde edilen enerjinin güç çevrimi kısmına gelindiğinde, elde edilen güç yükseltici ve doğrultucu devrelerinden maksimum verimlilikte geçirilmelidir. Şekil 2.14'te de görüldüğü gibi 3 tür (eliptik, dairesel, çizgisel) polarizasyon diyagramı mevcuttur. Polarizasyon kavramı basitçe açıklamak gerekirse dalga yoluna dik gelen düzlemdeki dalgaların, salınım işleminin olası yönlenmelerini ifade eder. Serbest haldeki elektromanyetik enerji hasadı için dairesel polarizasyona sahip ve geniş bantlı antenler kullanılır.



Şekil 2. 14. Polarizasyon türleri

Geniş bantlı birim hücre tasarım amacı birden çok RF sinyalinden gelen enerjiyi soğurarak yüksek DC güç üretimini sağlamaktır. Birim hücre ile yükseltici devre arasına band geçiren filtre tasarımları entegre edilmelidir. Bunun başlıca sebebi rezonans yapılması istenen frekanslar dışındaki frekans değerlerinin sistem üzerindeki bozucu etkisini azaltmaktır. Ek olarak alçak geçiren filtre entegresiyle yüke RF gücün akması engellenir bu sayede harmoniklerin bastırılması amaçlanır.

Şekil 2. 15’de de görüldüğü gibi bant geçiren filtre tasarımında belirlenen bant genişliği içindeki frekansların geçişine izin verilir. Belirlenen frekans aralığı dışında kalan elektriksel işaretlerin iletimi yapılmaz. Bant geçiren filtreler temelde yüksek (YGF) ve alçak geçiren (AGF) filtrelerin birleşiminden oluşur. YGF katmanının kesim frekansı alt kesim frekans (f_L) değerini, AGF katmanının kesim frekansı üst kesim frekansını (f_H) oluşturur. Belirtilen filtrelerin sınır koşulları oluşturmasıyla bant genişliği (BW) elde edilir.



Şekil 2. 15. Bant geçiren filtre devresi

$$BW = f_H - f_L \quad (2.10)$$

YGF kesim frekansı;

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.10a)$$

AGF kesim frekansı;

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (2.10b)$$

Tasarlanan birim hücre yapısının verimliliği

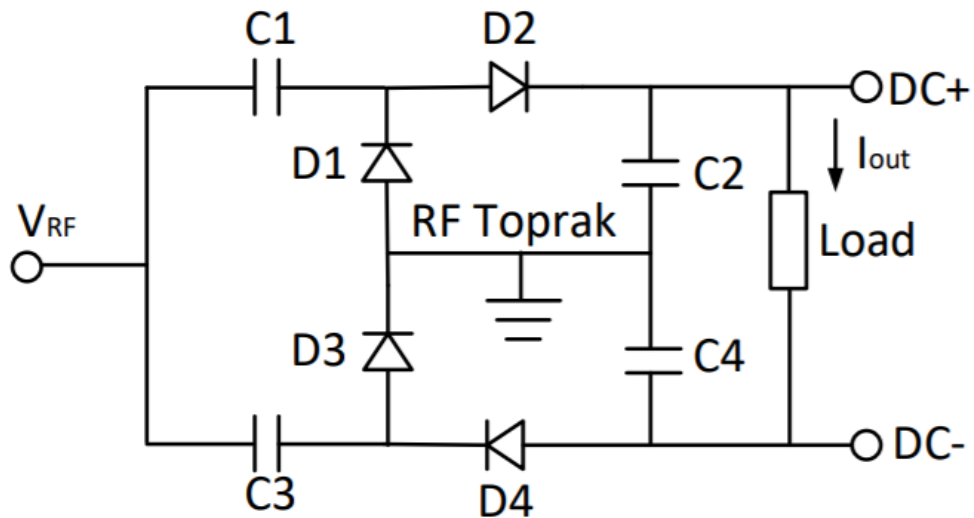
$$n_0 = \frac{P_{dc}}{P_{RF}} = \frac{V^2 / R_{yük}}{P_{RF}} \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir (Karakuş, 2018). Burada P_{RF} RF gücünü, P_{dc} DC çıkış gücünü ve $R_{yük}$ yük direncini ifade etmektedir.

2.6.2. Enerji hasatlamada doğrultucu tasarımı ve harmonik kavramı

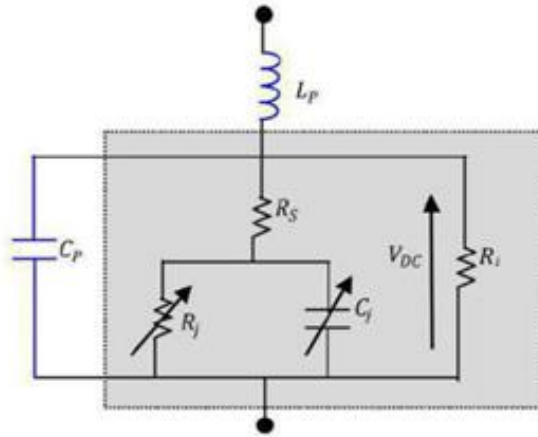
Enerji hasatlama yapılırken birim hücre tasarımları ve bu tasarımlardada farklı geometrik yapılar ile rezonatörler kullanılır. Rezonatörlerde indüklenen gerilimin hasatlama için kullanılabilir olması için diyot yapılarından oluşan doğrultucu devre tasarımları kullanılır.

Çalışmalarda farklı tiplerde doğrultucu seçimleriyle enerji hasatlama yapıldığı görülmektedir. Enerji hasatlamada sıklıkla tercih edilen doğrultucu modelleri Dickson, Villard veya Greinacher doğrultucu devreleridir. Farklı tipte doğrultucu seçiminin tercih edilmesinin sebebi çalışılmak istenen frekans aralığı, elde edilmek istenen gerilim değeri, harmoniklere karşı duyarlılık ve en kazançlı doğrultucu yapılarının enerji hasadı sistemlerinde kullanılmak istenmesinden dolayıdır. Önerilen doğrultucu devresi Greinacher'dir bu doğrultucu devresinde diyotlar simetrik olarak devre modeline yerleştirilmiştir. Simetrik diyot yerleşimi diyotların aynı anda tetiklenmesini sağlamaktadır. Simetrik bu yapının bir diğer artısı diyotların oluşturacakları harmonik etkiler minumuma indirilmektedir, hatta çalışmalarda harmoniklerin birbirlerini sönmülediği görülmüştür (Olgun, Chen ve Volakis, 2012).



Şekil 2. 16. Tek kademeli tam dalga Greinacher doğrultucu devresi

Şekil 2.16’da tek kademeli schottky diyot devresi gösterilmektedir. İndüklenmiş gerilim DC bloklama kapasitörlerinden geçer (C1 ve C3 kondansatörleri) doğrulan akım çıkışı depolama kapasitörlerine (C2 ve C4 kondansatörleri) aktarılır. Diyot yapıları (D1, D2, D3 ve D4) sıfır bias akımlı, düşük gerilim tetikli Schottky diyotlarıdır. Bu diyotların greinacher devre tasarımında belirtilen şekilde yerleşimi, devrenin RF gücün düşük olmasına rağmen yüksek seviyelerdeki kazanç oranıyla çıkışta elde edilecek olan geriliminde yüksek olmasını sağlamaktadır.



Şekil 2. 17. Schottky diyotun eşdeğer devre modellemesi

Şekil 2.17’de gösterilen R_j ve C_j diyotun esas elemanları olup birleşme kapasitansı ve direnci olarak isimlendirilir. R_s seri direnç, V_j ise yarı iletken ile metal arasındaki gerilim değeridir. Greinacher doğrultucularının tek dezavantajı R_s değerlerinin yüksek olması gerekmektedir. R_s direnci ne kadar düşükse schottky diyot yapısı harmoniklere karşı açık olmakla birlikte parazitlenme etkisine maruz kalmaktadır.

Gözel ve arkadaşlarının (2018) yaptıkları çalışmada Grainacher doğrultucu devresini kullanarak beş farklı Schotky diyot kullanarak, diyotların güç dönüştürmedeki verimlilikleriyle ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada kullanılan diyotlar Çizelge 2.5’te verilmiştir.

Çizelge 2. 5. Enerji Hasatlamada genel kullanım alanı bulan Schotky diyotlar (Gözel, Kasar ve Kahrıman, 2018)

	Diyot Parametre Değerleri								
Kullanılan Diyotlar	C_{j0} (pF)	I_s (A)	R_s (Ω)	BV (V)	I_{b_v}	M	N	P_b (V)	EG (eV)
HSMS 2820	0,7	2,2E-8	6	15	1E-4	0,5	1,08	0,65	0,69
HSMS 2860	0,22	5E-8	12	7	1E-5	0,5	1,08	0,65	0,69
HSMS 285C	0,18	3E-6	25	3,8	3E-4	0,5	1,06	0,35	0,69
HSMS 286C	0,18	5E-8	6	7	1E-5	0,5	1,08	0,65	0,69
SMS 7630	0,14	5E-6	20	2	1E-4	0,5	1,05	0,34	0,69

Diyot parametreleri C_{j0} sıfır polarlama bağlantı kapasitansı, I_s doyum akımı, R_s seri (parazite) direnç, BV ters kırılma gerilimi, I_{b_v} ters kırılma akımı, M bağlantı derecelendirme katsayısı, N emisyon katsayısı, EG aktivasyon enerjisi, P_b bağlantı potansiyeli olarak isimlendirilmektedir (Gözel ve diğerleri, 2018).

Diyot seçiminde düşük güçlü sistemlerde çalışma yapılacaksa R_s değeri yüksek seçilmelidir. R_s değerinin yüksek seçilmesi bozucu RF dalgalanmalarının diyodu etkilememesini sağlar. I_s diyot seçimlerinde olabildiğince büyük seçilmelidir, bunun sebebi devrenin saturasyona (doyuma) uğramasını engellemektir.

Grainacher doğrultucu devresi ile doğrultma işlemi yapılacaksa HSMS-285C ve SMS-7630 diyotlarının düşük güçlü sistemler için kullanımının diğer diyotlara göre daha verimli olduğu görülmüştür (Gözel, Kasar ve Kahrıman, 2018).

Çizelge 2. 6. Belen'in 2,4-2,7 GHz frekans aralığında, 5 farklı RF gücünde, 3 farklı direnç değerinde elde ettiği çıkış gerilim değerleri

Giriş RF Gücü (dBm)	V_{out} (mV) (DC)		
	1kΩ	10kΩ	100kΩ
-30	16	22	36
-20	69	124	214
-10	115	404	682
0	182	1100	1750
10	327	2959	4023

Belenin 2018 de yaptığı çalışmalarda Wifi (2,4 - 2,7GHz) sinyal aralığında çalışmalarını sürdürmüştür. Çalışmalarında Greinacher doğrultucu devre yapısını ve HSMS 2850 Schottky diyotları kullanılmıştır. Doğrultucu devresi girişine -30 ile +10 dBm arasında RF sinyalleri uygulanmış. Ölçümler 3 farklı yük direnci üzerinde yapılmıştır. DC gerilim çıkış değerleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2. 7. Belen, Papotto ve Le'nin farklı diyot seçimleri ile oluşturdukları Grainacher devresinin gerilim, güç ve frekans verilerinin karşılaştırılması

Kaynak	Belen 2018'deki Çalışması	(Papotto, Carrara, 2011)	(Le, Mayaram, 2008)
f (GHz)	2,4	0,9	0,91
P_{RF} (dBm)	-10	-22	-15
V_{rec} (V)	0,17	1	2,8
Kademe	1	17	16
Teknoloji (Diyot)	HSMS 2850	CMOS 90 μm	CMOS 150 μm

Çizelge 2.7'de görülen çizelgede Belen çalışma sonuçlarını Le'nin 2008 de yaptığı ve Papotto'nun 2011 de yaptığı çalışmalarla kıyaslamıştır. Elde ettiği sonuçlar düşük

empedansta sistem tasarımı yapıldığında Grainacher doğrultucu devresinin verimliliğinin daha yüksek olduğunu yüksek empedans seçiminde ise çıkış gerilimini arttırdığı ifade edilmiştir.

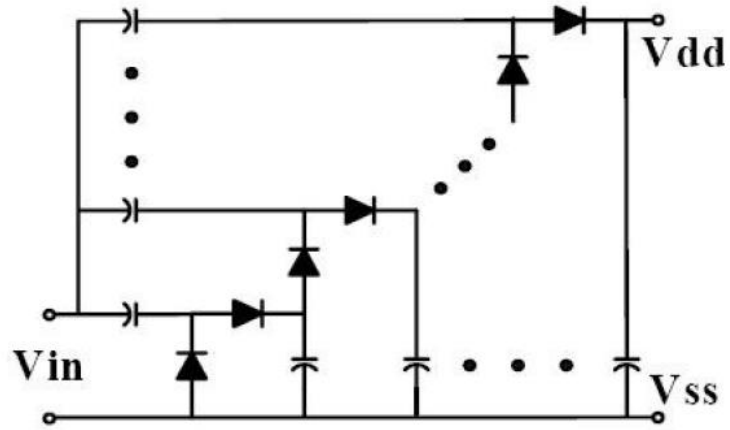
Belen yaptığı çalışmada 10 dBm giriş gücünde, 100 k Ω 'luk yük direncinde 4,02 V'luk DC gerilim elde ettiğini ifade etmiştir.

2.6.3. Akım pompa devrelerinin enerji hasatlamada kullanımı

Akım pompaları enerji hasatlamayla elde edilen düşük gerilim değerlerini (5-10 mV) yükselterek 3,3V, 5V, 9V değerlerine çıkarması için tasarlanan devrelerdir. Giriş gerilim değerleri kullanılacak akım pompa devrelerini değiştirmektedir. AC-DC dönüştürücü yada DC-DC dönüştürücü, yükseltici ve doğrultucu tipte akım pompa devreleri kullanılmaktadır.

$$n \times \Delta V = V_{dc} \quad (2.12)$$

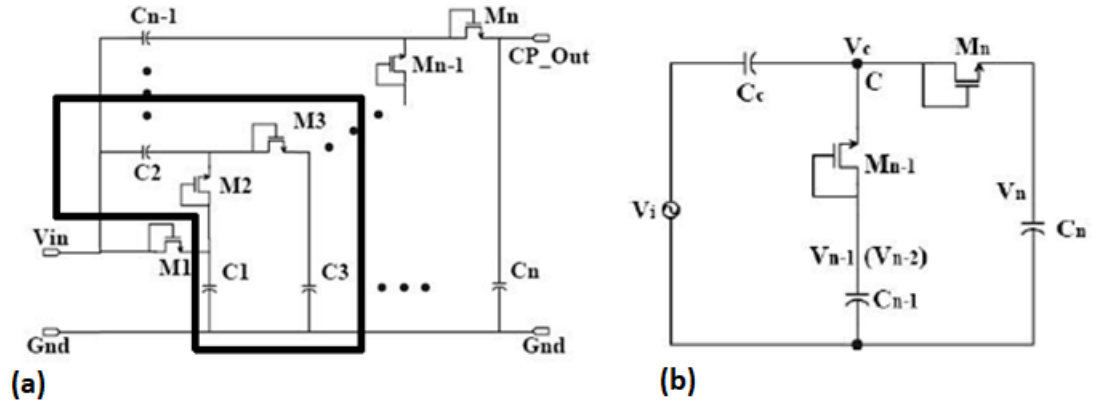
Girişe uygulanan gerilim değişimi ΔV olarak nitelendirilir. Akım pompaları devrelerinin girişine uygulanan, doğru (DC) yada alternatif (AC) gerilim n kat yükseltilerek stabil hale getirilir. Yükseltilecek gerilim değeri çıkış gerilimini V_{dc} oluşturur. Yukarıdaki formülle akım pompa devrelerinin performansını, verimliliğini belirleyen en önemli parametre n katsayısıdır.



Şekil 2. 18. RFID Sistemlerde kullanılan Shottky diyot temelli akım pompası devresi

Şekil 2.18’ de görülen akım pompası devreleri birbirlerini tekrarlayan Shottky diyot temelli yapıların birleşimiyle oluşmaktadır. V_{in} akım pompası devresinin girişine uygulanan gerilim değeridir. V_{dd} ve V_{ss} çıkış gerilimleridir. V_{ss} kondansatör gerilimi olup V_{dd} diyot gerilimidir.

Akım pompası devrelerinde düşük iletkenlik direnci ve kapasite değerlerinin hassas ayarlanması gerekmektedir. Shottky diyot yapılarıyla kurulan devrelerde kapasite ve dirençlerinde tutarsızlıklar görüldüğü için CMOS transistörler kullanılmaktadır. CMOS transistörler enerji hasat etmedeki, akım pompa devrelerinde yaygın kullanıma sahiptir (Tekir 2009).



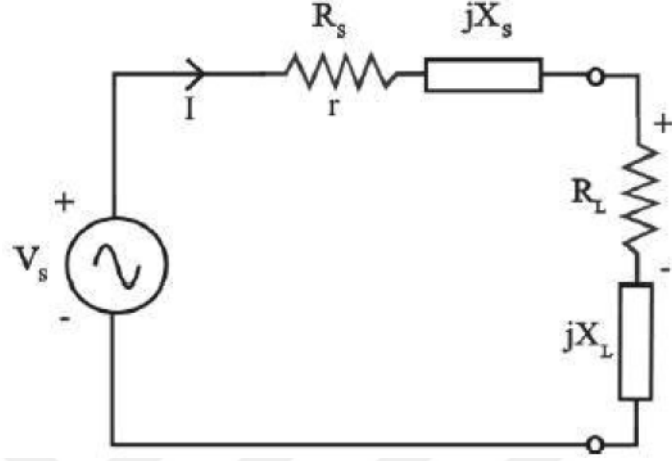
Şekil 2. 19. (a) NMOSFET lerin kullanımıyla oluşturulmuş akım pompa devresi (b) Akım pompası birim hücresi

Akım Pompa devreleri temel olarak iki kısımda incelenmektedir. Bu kısımlar MOS akım pompa devresi ve seri diyot yapılarıyla devre regülasyonu sağlayan kısımlardır. Şekil 2.19’da görülen C_n ve C_{n-1} kapasiteleri depoladığı enerji ile DC gerilim kaynağı gibi davranır. C_{n-1} kapasitörünün üzerine düşen gerilim (V_{n-1}), giriş gerilimi (V_i) düşürülen C_c kapasitörü ile birleştirilir, bu sayede giriş gerilim değeri ΔV kadar yükseltilmiş olur.

2.6.4. Kalite faktörü

Empedans uyumluluğu enerji hasadı devrelerinde çoğu parametreyi doğrudan etkilemektedir. Enerji hasatlamada birden çok devre tipi ve bu devrelerinde içinde kendini tamamlayan seri yada paralel devreler bulunmaktadır. Bir bütünü oluşturan her devre birbiriyle bağlantılı ve adım adım ilerlemelerle çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Devrelerin kaskat yapıda oluşu empedans uyumluluğunun ve enerji-güç teoremlerinin kullanımına olan ihtiyacı arttırmaktadır.

Şekil 2.20’de maksimum güç devresi verilmiştir. Maksimum güç teoreminde; kaynaktan yüke maksimum seviyede güç aktarımı için yük empedansı, kaynak empedansının kompleks eşleniğine eşit olması gerektiği ifade edilir.



Şekil 2. 20. Maksimum güç transferi devre şeması

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.13)$$

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (2.14)$$

Burada Z_s giriş empedansı ve Z_L yük empedansıdır. Maksimum güç transferi için; $R_L = R_s$ ve $jX_L = jX_s$ olmalıdır.

Akım pompası devrelerinin seri (kaskat) yapıda bağlamasıyla giriş gerilim değeri her kaskat adımında arttırılarak çıkış gerilimi, giriş gerilimine göre yükseltilmektedir. Kaskat yapıda bağlanan devreler optimal noktaya gelene kadar gerilimi yükseltebilir. Belirlenen optimal düzeyden sonra devre kaskat yapısını tekrar etmeye devam ettirilirse, maksimum güç transferinde uyumsuzluk gözlemlenir ve kalite faktörü düşürülmüş olunur, bu durum çıkış gerilimini düşürür. Enerji hasadı devrelerinde, akım

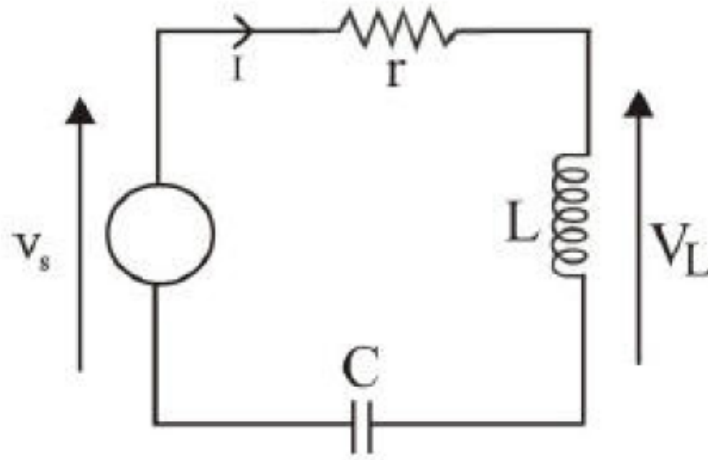
pompalarının kaskat yapılış sayısı; çıkış gerilimini ve güç değerini maksimum yapacak olan yüksek kalite faktörü değerinin elde edilmesine bağlıdır.

Maksimum güç faktörüne uyan bir devrenin kalite faktörü hesabı aşağıda verilmiştir.

$$Q = 2\pi \frac{P_r}{P_L} \quad (2.15)$$

Burada P_r rezonans durumunda güç, P_L kayıp güç olarak ifade edilir.

Kaskat bağlı akım pompa devreleri ve rezonans devrelerinde temel amaç minimum empedans değeri üzerinden maksimum akım değeri elde edilebilmesidir. Şekil 2.21' de seri rezonans devresi gösterilmektedir. Burada r devre elemanları ve komponentlerden kaynaklı kayıp direnç değerini simgelemektedir.



Şekil 2. 21. Seri rezonans devresi

Bu devrenin toplam empedansı Z_T ;

$$Z_T = \sqrt{R_r^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.16)$$

$$X_L = 2\pi f_r L \quad (2.16a)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (2.16b)$$

olarak ifade edilir.

Rezonans frekansı bulunurken $X_L - X_C = 0$ olarak alınır. Bunun sebebi bobin ve kondansatörlerin empedans değerleri maksimum güç teoremince eşit kabul edilmektedir ancak zıt işaretli oldukları için bobin (+90 fazda) ve kondansatörün (-90 fazda) empedans değerleri birbirlerini sönümleyecektir. Bu durumda devrenin toplam empedansı R_r ye eşittir.

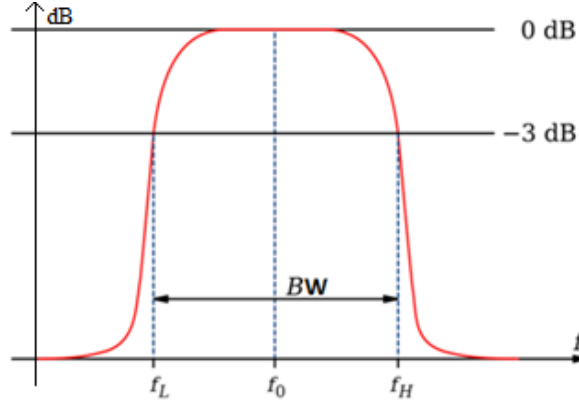
$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (2.17)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.17a)$$

Seri rezonans devrelerinde f_r frekansında devrenin empedansı minimum seviyededir. Seri rezonans devrelerinin enerji hasatlamada kullanılmasının temelinde, maksimum güç teoremine uyması ve empedans değerinin minimuma indirgeniyor olmasından kaynaklıdır. Paralel rezonans devrelerini enerji hasatlama için uygun olmamasının nedeni, seri rezonans değerinden farklı olarak; devre çıkışına paralel olarak bağlanacak yük direnci üzerinden geçen akım değeri minimum seviyede olmaktadır. Bu durumda seri rezonans devresinin kalite faktörü

$$Q = \frac{2\pi f_r L}{R_r} = \frac{X_L}{R_r} \quad (2.18)$$

olarak ifade edilir.



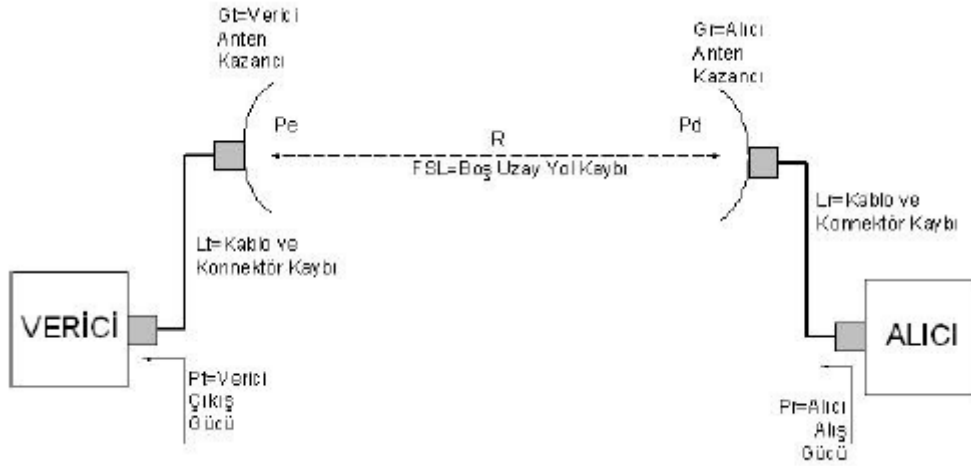
Şekil 2. 22. Seri rezonans devresinin frekans karakteristiği

$$BW = \frac{f_r}{Q} = f_H - f_L \quad (2.19)$$

Şekil 2.22 deki grafiğin kesiştiği yarı güç noktaları arasında kalan alan bant genişliği (BW) olarak ifade edilir. Bant genişliği ile kalite faktörü (Q) ters orantılıdır bu yüzden enerji hasadı projelerinde olabildiğince küçük bant genişliğinde çalışılmaktadır.

2.6.5. Serbest haldeki elektromanyetik dalga kaybı

Yapılan çalışmalar ile kayıpsız ortamdaki elektromanyetik dalgaların yayılımları incelendiğinde, birim hücre tasarımlarının verimliliğinin atmosfer içindeki ölçümlerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durumun başlıca sebebi elektromanyetik kayba sebep olan atmosferik şartların ortadan kaldırılması gösterilmektedir.



Şekil 2. 23. Serbest uzay dalga kaybı

Serbest uzayda elektromanyetik dalga kaybı hesaplanırken hava, nem gibi enerjiyi emen parametrelerin sistemden çıkması enerji hasatlama için olumlu bir durumdur. Serbest uzayda alış güç değeri bulunurken

$$FSL = -20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad (2.20)$$

olarak ifade edilen Friis denklemden yararlanılmaktadır (Karakuş, 2018).

FSL değeri anten yönlülüğü ile ilişkilendirilebilir.

Anten Yönlülüğü (D)

$$D = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$$

Burada, A: antenin efektif yüzey alanı ve λ : Işıma frekansındaki dalga boyunu göstermektedir.

$$d = A / \lambda$$

olarak kabul edilirse

$$FSL = D \times \frac{d\lambda}{A} \quad (2.20a)$$

olarak yeniden düzenlenebilir.

Bu durumda $\frac{d\lambda}{A}$ sabit değerler olduğu için, bir antenin yönlülüğü arttığında serbest uzay yol kaybı da artacaktır.

Alış gücü Friis denkleminin yardımıyla

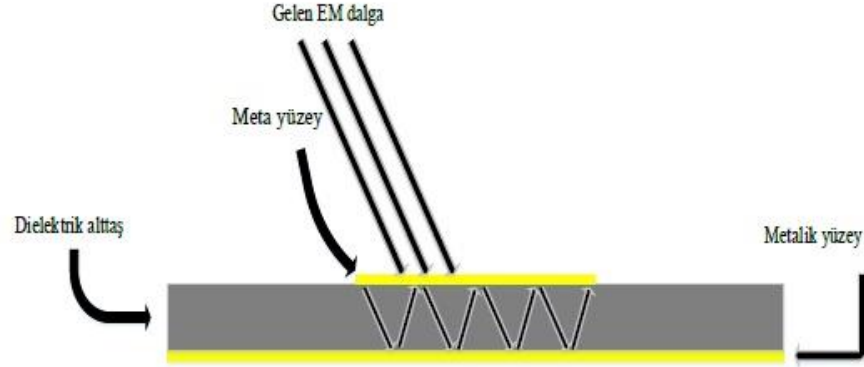
$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - FSL \text{ (Watt)} \quad (2.21)$$

olarak ifade edilir.

P_r , P_t , G_t , G_r , L_t , L_r ve FSL hesaplamada kullanılan d, sembolleri sırasıyla alış gücü, verici çıkış gücü, verici anten kazancı, alıcı anten kazancı, verici tarafta hat kaybı, alıcı tarafta hat kaybı, serbest uzay yol kaybında (Free Space Loss (FSL)) kullanılan d sembolü alıcı verici antenler arasındaki uzaklığı (metre) simgeler.

2.7. Metamalzeme

Metamalzemeler mühendislik çalışmalarıyla üretilen, farklı amaçlar doğrultusunda üretimi çeşitlilik gösteren, doğada doğrudan karşılık bulamayan dalga boyu altı yapay malzemelerdir (Shelby, Smith ve Schultz, 2001). Metamalzeme kavramı İlk olarak Rus bilim adamı Victor Veselago tarafından 1968 yılında teorik olarak ortaya atılmıştır.



şekil 2. 24. Metamalzeme birim hücre yapısı

şekil 2.24'te de görüldüğü gibi metamalzemeler birim yapıda değerlendirildiğinde farklı şekillerdeki rezonator ve alt kısmı metal kaplı dielektrik bir taban malzemesi (alttaştan) oluşur. Metamalzemeler sahip oldukları negatif kırılma indisiiyle enerji soğurabilmekte ve teorik olarak mkemmek sinyal emilimi göstermektedir (Bakır, 2018).

Metamalzemeler karakteristik özellikleri birbirinden farklı iki tip ana malzemenin birleşiminden oluşmaktadır. Karakteristik zellikleri; negatif elektriksel geçirgenlik taşıyan malzemeler ile negatif manyetik geçirgenlik özelliklerine sahip malzemelerin birleşimiyle oluşmaktadır. Elektriksel ve manyetik geçirgenlikleri negatif olan malzemelerden oluşan metamalzeme yapıları EM dalgaların faz ve grup hızlarını zıt yönlere dağıtmaktadır.

Veselago tarafından maxwell denklemleriyle teorik olarak sağlanan negatif kırılma indisli malzeme kavramı ortaya atılmıştır. Negatif kırılma indisli malzemeler ters yayılma özelliği gösterdiği için solak malzemeler olarak adlandırılmıştır. Literatür taramalarında metamalzemelerin, kırılma indisinin tersine çevrilmesi olayı farklı isimlerle tanımlanmıştır. Metamalzemelerin farklı adlandırmaları; Doppler etkisi (Lee, Park, Seo ve Kim, 2010), tersine Vavilov-Cherenkov radyasyonu (Zharov, Shadrivov ve

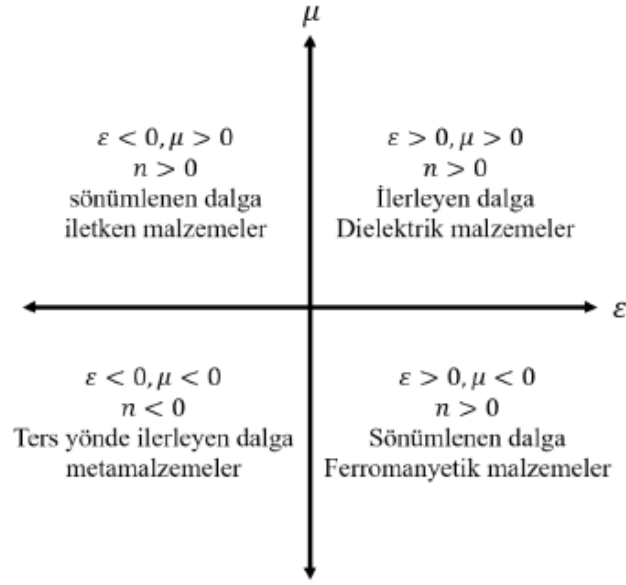
Kirshor, 2003), negatif yansıma indeksi (Smith, Pendry ve Viltshire, 2004), çift negatif özellik (Sun ve diğerleri, 2015).

Doğada doğrudan bulunamayan metamalzeme yapılar, yapay yollarla elde edilebilmektedir ancak solak malzeme özelliği taşıyabilmesi için metamalzeme yapısı homojen olmalıdır. Tasarlanan birim hücre yapıları rezoans yapılması istenen dalga boyunun 1/4 ü yada 1/5 i civarında seçilerek tasarlanmalıdır. Elektromanyetik (EM) dalganın dalga boyunun 0,25 - 0,20 katı aralığındaki tasarımlar metamalzeme yapılarının homojenlik limiti olarak tanımlanmaktadır (Hong ve Lancaster, 2001).

Malzemeleri birbirinden ayırt etmede ve karakteristik özelliklerini belirlemede iki temel parametre üzerinde durulur, bu parametreler elektrik geçirgenlik ϵ ve manyetik geçirgenlik μ sabitleridir.

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.22)$$

Yukarıdaki denklemde n malzemenin karakteristiği, ϵ_r bağıl elektriksel geçirgenlik ve μ_r bağıl manyetik geçirgenlik olarak ifade edilmektedir. Boş uzayın elektriksel geçirgenliği $8.854 \times 10^{-12} \text{ F. m}^{-1}$ ve manyetik geçirgenliği $4 \pi \times 10^{-7} \text{ H. m}^{-1}$ dir. Elde edilen malzeme karakteristikleri sınıflandırıldığında Şekil 2.25'te de görüldüğü gibi 4 farklı kombinasyon oluşmaktadır.



Şekil 2. 25. Malzemenin sınıflandırılması

Metamalzeme yapıları Snell yasasına göre;

$$n_1 \sin Q_1 = n_2 \sin Q_2 \quad (2.23)$$

n_1 ve n_2 simgeleri sırasıyla 1. ve 2. ortamların kırılma indisleridir. Q_1 ve Q_2 ise ışının geliş kırılma açısıdır. Metamalzeme karakteristik özelliklerini taşıyan yapılarda, gelen dalga ile yansıyan dalga normal ile aynı bölgededir, bu durumun oluşması malzemenin kırılma indeksinin negatif değerde olduğunu göstermektedir. Metamalzemeler genliği azalan dalgaların, genliklerini arttırmada kullanılabilmektedir. Genlik kuvvetlendirici metamalzeme tabanlı üretimler kablosuz güç aktarımında da (WPT) kullanım alanı bulmaktadır (Wang, Teo, Nishino ve diğerleri, 2011).

Metamalzemelerde birim hücre yapıları temelde kapasitansı (C) ve indüktansı (L) olan bir eşdeğer devre tasarımına dayanır. Metamalzeme hücrelerinin bir bütün oluşturması ile periyodik bir yapı oluşur ve bu yapıda Mie rezonansının oluşmasına yol açmaktadır. Eşdeğer devresinde kapasitans birim hücredeki boşluklu yapıyı, indüktans ise rezonatör yapısını temsil etmektedir. Elektromanyetik dalga frekansları metamalzeme bazlı birim hücre anten yapısıyla temas ettiğinde, LC rezonansı meydana gelir ve negatif geçirgenlik meydana gelir. İlk başlarda tasarlanan metamalzeme yapıları tamamı metal olacak şekilde dizayn edilmiştir ancak daha sonra enerji kaybını azaltmak için dielektrik malzemelerle metamalzeme tasarımı yapılmıştır. Mie rezonansının dielektrik yapıdaki birim hücrelerde de negatif geçirgenliğe yol açtığı görülmüştür (Zhao, Zhou, Zhang ve Lippens, 2009).

2.7.1. Enerji hasatlama ve metamalzeme

Veselago 1968 deki kuramsal çalışmalarında çift negatif materyal hipotezini literatüre sunmuştur. Pendry teorik olarak, metamalzeme tabanlı çalışmalarını 1990'ların sonunda kanıtlamış ve “mükemmel merceke” yapısını tasarlamıştır (Pendry, 2000). Kendisinden önceki teorik temelleri referans alan Smith ve arkadaşları 2001 yılında ilk seri halka rezonatör (SRR) yapılarını bakır teller ile yapay olarak üretmiştir.

Elektromanyetik enerji hasatlama çalışmaları 2000 lerin başlarında hız kazanmıştır. Bu çalışmaların artışı radyo frekans (RF) vericilerin artması ve düşük güçte çalışabilen elektronik malzemelerin artmasından kaynaklıdır. Powercast 2005 yılında sürdürdüğü bir projede 5kW lık radyo istasyonu ile 2.4 km yarıçaplı bir alan içinde enerji hasadı yapmayı başarmıştır. Hagerty ve arkadaşları 2006 yılında geniş bantlı, 2-18 GHz frekans aralığında enerji hasadı yapabilen bir anten sıralaması oluşturmuşlar ve literatüre sunmuşlardır. Research Seattle'ın sunmuş olduğu verilerde 960 kW'lık bir TV yayını yapan anten istasyonu, deneyde kullanılarak 4,1 km yarı çapındaki alanda enerji hasadı yapılabildiği gösterilmiştir (Sample ve Smith, 2009).

Günlük yaşantımızdaki mobil telefon yada Wi-Fi bantlarında sürekli bir veri akışı söz konusudur, buna bağlı olarak sürekli bir EM kirlilikten söz edilmekte ve bu kirlilik metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı sistemler için sürekli açık olan bir kaynak gibidir. İlk olarak 2012 yılında metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı, ayırık kare halka rezonatör (SSRR) yapıları kullanılarak sunulmuştur. Söz konusu ayırık kare rezonatörlerin açıklık kısmına bir devre elemanı eklenmiştir. Böylece metamalzeme yapısında hapsolan EM dalğanın iletken halka üzerinde indüklediği akım, devre elemanı üzerinde alternatif akım (AC) olarak harcanmıştır (Ramahi ve Almoneef, 2014).

2.7.2. Enerji hasatlama ve metamalzeme çalışmaları

Karakaya ve arkadaşları çalışmalarında birim hücre tasarımı üç temel yapıda değerlendirmişlerdir. Bu yapılar malzeme özellikleri, kullanılan direnç değerleri ve rezonatörün geometrik yapısıdır. Belirtilen üç parametrenin değiştirilmesiyle %90 üzerinde elektromanyetik enerji emilimini arttırdıklarını gözlemlemişlerdir (Karakaya, Bağcı, Yılmaz ve Akaoğlu, 2017).

Bakır çalışmasında 1,8 GHz, 2,45 GHz ve 2,60 GHz frekanslarında çalışabilen değişik boyutlardaki halka anten birim hücre tasarımları gerçekleştirmiştir. Bu frekans aralıkları GSM (Global System for Mobile) hem de ISM (Industrial Scientific Medical) hemde IMT-2000 (Global Mobile Broadband) bantlarında enerji hasadını amaçlar. Tasarlanan birim hücrenin gerçektelemesi yapılmış ve 47,6 mV luk bir gerilim elde edilmiştir (Bakır, 2018).

Pinuela elektromanyetik enerji hasadı birim hücre yapılarında farklı bir çalışma ile birim hücrelerin boyutlarını değiştirerek farklı rezonans frekansları (GSM Bandının farklı frekanslarını elde etmişlerdir) elde etmeyi başarmışlardır. Rezonans frekansları hesaplanırken $\lambda / 5$ değeri baz alınarak hesaplamalar gerçekteştirilmiştir (Pinuela, Mitcheson, Lucyszsn, 2013).

Ramahi ve arkadaşları çalışma frekansı olarak 5,8 GHz frekans bandını seçmişlerdir. Ayırık halka rezonatör (SRR) tasarımı gerçekleştirmişler ve verici anten olarak 19 dBi'lık bir horn anten tercih etmişlerdir. SRR nin aralıklarına yerleştirdikleri 2,7 k Ω 'luk direnç üzerinden, horn antenden elde ettikleri gerilim 613 mV olmuştur (Ramahi ve Almoneef, 2014).

Wang ve arkadaşları metamalzeme yapısını kablosuz enerji aktarımında (WPT) kullanmışlardır. Metamalzeme yapıdaki lavhaları arka arkaya dizerek iki bobin arasında enerji gönderilmesinde verimliliği yaklaşık olarak 3 katına çıkarmışlardır (Wang, Teo, Nishino ve diğerleri, 2011).

Lim ve Lee çalışma frekansı olarak mikrodalga frekansını seçmişler ve çift rezonanslı, bant genişliği yükseltilmiş bir metamalzeme birim hücresi tasarlamışlardır. Çalışmalarında verici antenden farklı polarizasyon açısı değerlerinde sinyal metamalzeme hücrelerine gönderilmiştir. Horn antenden gönderilen sinyaller 0-90 derece arasında onar derecelik farklarla gönderilmiş ancak metamalzeme tabanlı enerji hasadı birim hücresinin polarizasyon farklılıklarından etkilenmediği gözlemlenmiştir. 9,75 GHz ve 10.3 GHz frekans aralığında %98 oranında güç emilimi elde edilmiştir (Lim ve Lee, 2011).

Dinçer polarizasyon farklılıklarından etkilenmeyen sekizgen yıldız şekilli metamalzeme birim hücresi tasarlamışlardır. Tasarladıkları birim hücre yapısına esneklik katabilmek adına esnek dielektrik katman kullanmışlardır. Esneyebilen metamalzeme birim hücresiyle farklı frekanslarda rezonansa girebilen ve kapasitif özelliği değiştirilebilen birim hücre tasarımları gerçekleştirmişlerdir (Dinçer, 2000).

Bu çalışmada grafen metamalzemesi tercih edilmiştir. Grafen yapısı gereği birçok alanda kullanılabilir bir malzeme oluşuyla, metamalzeme formunda kullanımında mevcuttur. Bu çalışmada grafen malzemesi; metamalzeme tasarımında rezonatör ve taban malzemesi yapılarında kullanılmıştır.

2.8. Grafen

Grafen malzemesinin keşfi 2004 yılında Manchester Üniversitesi Geim ve Novoselov tarafından 17 atom kalınlığında saf grafen tabakasının izolesiyle başlamıştır. Grafen yakın dönemdeki ilerlemeleri 2009 yılında Pablo Jorillo-Herrero Nikel nano grafen düzlemleri kesim işlemi için kullanmıştır. 2009 yılında Stanford Üniversitesi Hagjie Dai Argon plazma ışını ile nano ribbonlar içinde grafen düzlemi kesmeyi başarmıştır. New York IBM Thomas J. Watson araştırma merkezinde Phaeton Auris ilk grafen foto dedektörü yapmıştır. 2009 yılında MIT den Thomas Palacios grafen bilgisayar çipi geliştirmiştir. 2010 yılında Samsung grafenin en büyük kararlı yapısını üreterek 30 inç polyester levha üzerine sentezlenmiştir. İlk grafen temelli dokunmatik ekran olduğu belirtilmiştir. New Scientist'in 2015 raporuna göre grafenin ışık enerjisini hareket enerjisine dönüştürebileceği ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Graphene Flagship araştırmacıları 2018 deki araştırmalarında grafenin 1,1 derece açıyla başarılı bir şekilde büküldüğünde dirençli olmayan bir süperiletken elde edildiğini belirtmiştir. Acarer'in 2019 daki yazısında grafenin büyük antenlerin yaptığı işi 1 mikron uzunlukta ve 10-100 nanometre genişlikte antenlerle yapması sağlanacağı söylenmiştir. Bu antenler ile 0,1 ve 10 terahertz bandında çalışma sağlanabilmesi öngörülmektedir. Şuan ki mevcut hızlar Gigabit/sn iken grafen bazlı antenler ile Terabit/sn leri desteklemesi beklenmektedir.

Grafenin son dönemdeki çalışmaları grafen bazlı malzemeler (GRM) ile ilgilidir. Graphene Flagship araştırmacıları projelerinden birinde perovskit ve elektron toplama TiO₂ (Titanyum oksit) katmanları arasındaki bağlantıyı araştırmak için perovskit hücrelerine iki farklı GRM eklemiştir. Bu durum Grafen pullarının TiO₂ tabakasına karıştırılması ve perovskit ile TiO₂ arasına ayrı bir Lityum indirgenmiş grafen oksit tabakası ilave edilerek başarılmıştır. Bu tipteki GRM lerin yenilenebilir güneş hücrelerinde %12,6 verimlilik artışına sebep olduğu belirtilmiştir.

Grafen karbon atomunun bal peteği yapısındaki formudur. Grafenin kristal yapısı incelenirken Raman ve Rayleigh gibi yüksek mikroskopi yöntemler kullanılmıştır ve ağ örgüsü bu sayede ispatlanmıştır. Grafen 2 boyutlu kristal yapısı sayesinde incelik,

sağlamlık, şeffaflık, iletkenlik gibi konularda diğer malzemelere nazaran ön plana çıkmaktadır. Grafen Flagship'in araştırmalarında 1mm kalıklı grafit tabakasının içerisinde ortalama 3 milyon grafen tabakasının var olduğu belirtilmiştir. Grafenin hafifliği ve şeffaflığı üzerine yürütülen çalışmalarda Graphene Flagship 2018 deki araştırma ve ölçümlerinde 1 m² lik grafen katmanı yaklaşık sıfır ağırlığında kabul edildiği, tam olarak ise 76 mg ölçüm yapıldığı belirtilmiştir. Başka bir ölçümde ise grafenin şeffaflığının ışığın sadece %2 sini emmesinden kaynaklandığı deneylerle açıklanmıştır (Graphene Flagship).

2.9. Elektromanyetik Enerjinin İnsan Vücuduna Etkileri

Baz istasyonları, evimizde kullandığımız Wi-Fi cihazları, günlük hayatımızın parçası haline gelen bluetooth cihazları elektromanyetik yayılım yapmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar ile 5G teknolojisinin en kısa sürede hayatımıza entegre olması beklenmektedir. 5G teknolojisiyle baz istasyonlarının, yayılım yapacağı frekans aralığının 6GHz civarında olması planlanmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alınarak, insan vücudunun elektromanyetik enerjiye maruziyetinin gün ve gün artacağı söylenebilir.

Işınım (radyasyon), enerjinin bir ortamda dalga veya tanecik halinde yayılması olarak tanımlanır. Elektromanyetik (EM) ışınım ise elektromanyetik dalgaların herhangi bir ortamda yayılmasıdır. Işınım enerjisi

$$W=h \times f \quad (\text{Joule}) \quad (2.24)$$

olarak ifade edilir.

Burada h ; planck sabiti ve değeri $h = 6,626.10^{-34}$ J.s dir. Işınım enerjisi 1 eV olan bir atomun son katmanından, bir elektron kopartabilmek için $1,6.10^{-19}$ Joule enerji gerekmektedir. Formül elektron-volt (eV) cinsinden yeniden düzenlendiğinde

$$W = 4,14125 \cdot 10^{-15} \times f \quad (\text{eV}) \quad (2.25)$$

olarak ifade edilir.

Elektromanyetik dalgalar güçlerini ortamın ve dalganın özelliklerine bağlı olarak değişik oranlarda aktarırlar. Işımlar iyonlaştıran (ionizing) ve iyonlaştırmayan (nonionizing) ışınlımlar olarak iki sınıfta incelenir.

İyonlaşma olayı atomik düzeyde düşünülmelidir. Atomlar çekirdek ve etraflarındaki elektronlardan oluşur. İyonlaşma için atomun elektronunu yörüngesinden ayıracak bir enerji verilmelidir. Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi 13,6 eV dur. Hidrojen atomu referans alınarak belirlenen iyonlaşma sınırı, insan sağlığı için 10 eV civarındır. İyonlaşma sınırı aşıldığında biyolojik bozulmalar meydana gelebilmektedir (Dinçer, 2000).

Çizelge 2. 8. Dünya sağlık örgütü (WHO) tarafından belirlenen elektromanyetik alan ışıması (iyonize yapmayan ışıma) standartları

Foton eneşisi	<12eV
Dalga boyu	>100nm
Frekans	<300THz

Elektromanyetik enerji canlılar tarafından soğurulmaktadır. İnsan vücudu elektromanyetik enerjiye karşı bir anten gibi davranış sergilemektedir. İnsan vücudu belirli bir dalga boyunda daha fazla elektromanyetik enerji soğurumu yapar, bunun sebebi monopol anten gibi davranış sergileyen insan vücudu yarım dalga boyu

(rezonans frekansı) olduğunda daha fazla enerji yutar. Çocuklar yetişkinlere göre daha yüksek rezonans frekansına sahiptir (Dinçer, 2000).

Teknolojik gelişmeler ile elektromanyetik cihazların sayısı artış göstermektedir. Elektromanyetik enerji alanlarının artışı insan sağlığını korumaya yönelik olarak belli standartların oluşmasına neden olmuştur. Amerikan standartlarına göre maksimum özgül soğurulma hız (SAR) değeri 1,6 W/kg'dır. Avrupa standartlarına göre maksimum SAR değeri 2 W/kg'dır. İdeal SAR değeri 1 W/kg'dır ve günümüz teknoloji cihazları bu sınır değeri üzerinden cihazlarını üretmektedir. SAR değerinin 4 W/kg değerini aşması durumunda zararlı etkileri hızlı bir şekilde görülecektir. 4 W/kg'lık ışıma maruz kalan insan bedeninde sıcaklığın $\sim 1C^0$ yükseldiği gözlemlenmiştir (Dinçer, 2000).

SAR değeri yüksek cihazların uzun sürelerde insan bedeniyle etkileşimi sonucu insan metabolizması buna tepki olarak; baş ağrısı, mide bulantısı, kulak çınlaması, kap ritmi bozuklukları gibi etkenlerle karşılaşabilmektedir.

Özgül soğurulma (SA) insan vücudunun birim kütle olarak hesaplanmasıyla oluşan bir değerdir. Birim kütlenin soğurduğu enerji; ağırlığı Δm olan bir birim kütlenin, soğurduğu enerji ΔW ise aşağıdaki formül ile SA değeri elde edilmektedir.

$$SA = \frac{\Delta W}{\Delta m} \quad (J/kg) \quad (2.26)$$

Öz kütle $d = \Delta m / \Delta v$ ilişkisiyle SA formülü revize edildiğinde;

$$SA = \frac{\Delta W}{\Delta m} = \frac{\Delta W}{d \cdot \Delta V} \quad (kg/m^3) \quad (2.26a)$$

elde edilir.

SA değeri, özgül soğurulma hızı (SAR) değerinin zamana göre integraline eşittir.

$$SA = \int_0^t (SAR) dt \quad (W/kg) \quad (2.26b)$$

SAR değerinin ısı değer parametreleriyle değerlendirildiğinde

$$SAR = c_1 \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (J/kg \cdot s^2) \quad (2.26c)$$

elde edilir.

Burada c_1 vücutun özgül ısı kapasitesidir ve birimi $J/kg \cdot K$ 'dir. ΔT vücut sıcaklığının zamana göre Δt değişim hızıdır ve birimi K/s 'dir.

2.10. Radar Teknolojisi

Radar kelime anlamı bakımından incelendiğinde Radio Detection and Ranging kelimelerinden türetilmiştir. Radar elektromanyetik enerjiyi iletir, hedef üzerine çarpan elektromanyetik dalgalar hedef üzerinde akım oluşturur, bu akım elektromanyetik saçılımlara sebep olur ve bu saçılımlar radar tarafından işlenerek hedefin boyutu, fiziksel şekli, hedefi oluşturan maddenin cinsi gibi hedefe ait bazı parametreleri tespit eder.

Radar tarafından bir nesnenin algılanabilir olması, hedeften yansıyan dalgaların radarın alıcısına ulaşması ve radar alıcısındaki iç gürültüden yüksek bir güce sahip olması gerekmektedir. Radar soğurucu sistemlerde RCS (Radar Cross Section) değerinin azaltılması hedeflenmektedir bu hedefe yönelik olarak elektromanyetik dalgaların emilimi, rezonans ve saçınım mekanizmalarının kontrolü gibi mekanizmalar tercih edilir. Hedefi nitelendiren belirli parametreler, RCS olarak adlandırılan radar özel parametresi olarak ifade edilebilir. RCS tam modelleme ve yaklaşım modellemesi olmak üzere iki yöntemle tahmin edilebilir.

Tam modellemede sınır koşullar dikkate alınarak diferansiyel ve integral çözümlemelerden yararlanılır. Belirlenen sınır koşulları Maxwell denklemleriyle oluşturulmaktadır. Tam modellemede işlem yükünün fazlalığı, basit cisimlerin

algılanmasında dahi çok fazla işlem hacminin doğmasından kaynaklı olarak bilgisayar simülasyonları gerçekleştirmek ve yorumlamak oldukça zor bir hal almaktadır.

Tam modellemedeki zorluklar dikkate alındığında yaklaşım modelini kullanmanın daha uygun olacağı düşünülmüştür. Yaklaşık model optik alanda çözümler sunmaktadır. Yaklaşım modelleri günümüzde yaygın kullanıma sahip olmakla birlikte gerçeğe çok yakın modellemeler oluşturmaktadır. Yaklaşık model sadece basit cisimlerin değil aynı zamanda kompleks cisimlerin de RCS tahminlerinde kullanılmaktadır (Kapan, 2007).

Çizelge 2. 9. Radar frekans bantları (Kapan, 2007).

Bantlar	Frekans (GHz)	Yeni band dizaynı (GHz)
Yüksek Frekans (HF)	0,003-0,03	A
Çok Yüksek Frekans (VHF)	0,03-0,3	A<0,25 : B>0,25
Ultra Yüksek Frekans (UHF)	0,3-1,0	B<0,5 : C>0,5
L	1,0-2,0	D
S	2,0-4,0	E<3,0 : F>3,0
C	4,0-8,0	G<6,0 : H>6,0
X	8,0-12,5	I<10,0 : J>10,0
Ku	12,5-18,0	J
K	18,0-26,5	J<20,0 : K>20,0
Ka	26,5-40,0	K
MMW	Normal > 34,0	L<60,0 : M>60,0

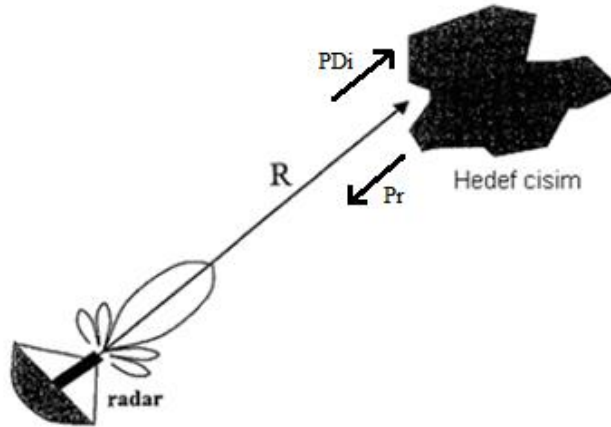
Çizelge 2.9’da da görülen VHF ve UHF bandlar çok uzun mesafe erken uyarı radarlarında kullanılır. L bant tipi radar sistemleri uzun mesafe askeri ve hava trafik kontrol arama operasyonlarında kullanılırlar. S bant tipi kara sistemlerinde, C bant tipi çoğu hava sistemlerinde kullanım alanı bulmaktadır. X bant tipi anten yapıları fiziksel olarak sınırlandırılması gerektiği durumlar için kullanılır. X bant tipi, Ku, K ve Ka bant tipine göre hava şartlarına karşı daha düşük tolerans seviyelerine sahiptir.

2.10.1. Radar kesit alanı (RCS)

Elektromanyetik dalgalar algılanmak istenen hedefe çarpıp yansıma yaparlar bu yansıma iki kısımda incelenir.

- Alıcı anten ile aynı polarizasyona sahip dalgalar
- Alıcı anten ile aynı polarizasyona sahip olmayan dalgalar

Yukarıda verilen iki yansıma polarizasyon tipide birbirine diktir. Polarizasyon adlandırmalarında temel polarizasyon PP (Principal Polarization) buna dik olan polarizasyon tipi OP (Orthogonal Polarization) olarak adlandırılır. Saptanmak istenen hedeften yansıyan dalgalar, alıcı anten ile aynı polarizasyonda ise enerji yoğunluk noktaları eşitlenir ve bu oluşan enerji yoğunlukları bir bütün olarak değerlendirildiğinde hedefin RCS sini tanımlamada kullanılır. Hedeften yansıyan yakın alan dalgalar dairesel polarizasyon gösterirken bunun aksine uzak alandan yansıyan dalgalar doğrusal polarizasyon davranışı sergilemektedir.



Şekil 2. 26. Radar tarafından belirli bir uzaklıktan algılanan cisim

Şekil 2.26’da da görüldüğü gibi R uzaklığında hedef cisme gelen güç yoğunluğu P_{Di} dir, hedefe çarpıp yansıyan güç P_r dir. Hedefin etkin kesit alan (σ) saptaması yapılırken aşağıdaki formülden yararlanılır.

$$\sigma = \frac{P_r}{P_{Di}} \quad (2.27)$$

Alıcı anten tarafından cisme çarpıp gelen sinyalin güç yoğunluğu P_{Dr} dir.

$$P_{Dr} = \frac{P_r}{4\pi R^2} \quad (2.28)$$

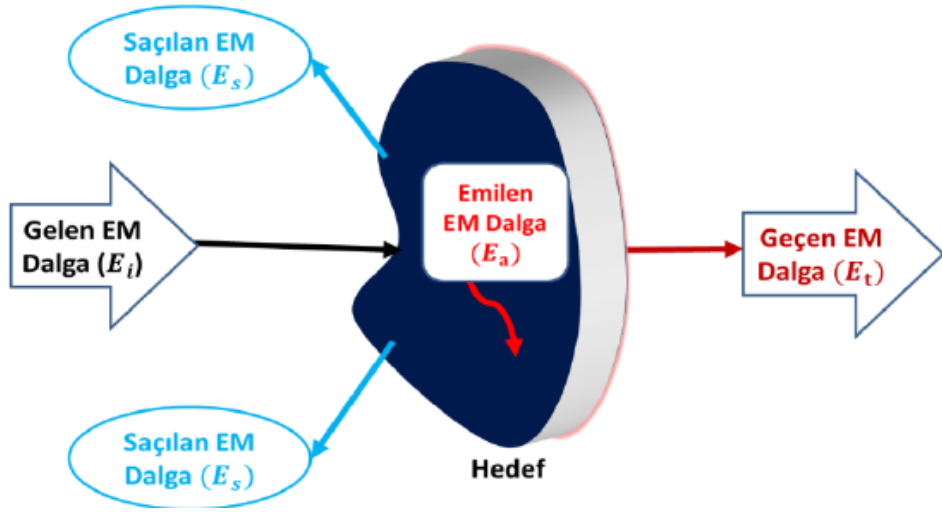
Hedef cisimden yansıyan güç yoğunluğu ile alıcı anten tarafından algılanan güç yoğunluklarının değerlendirilerek hedefin etkin kesit alanı

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (2.29)$$

olarak verilmektedir (Kapan, 2007).

2.10.2. Enerji hasatlamada RCS nin önemi

Enerji hasatlamada tasarlanan birim hücre radar tarafından algılanabilirliği ne kadar fazlaysa, o derecede enerji emilimi de fazla olacaktır. Radar kesit alanı değerinin bağlı olduğu parametreler: Radarın hedefe bakış açısı, radar tarafından gönderilen sinyal frekans değeri, polarizasyon, hedefin geometrik yapısı, hedefin radar yönündeki yönlülük (directivity) değerlerine bağlıdır.



Şekil 2. 27. RCS durumunu etkileyen dalga formları

Şekil 2.27’de E_s yansıyan dalga, E_i gelen dalga, E_t iletilen dalga, E_a emilen dalga yapısını simgelemektedir. Verilen parametreler doğrultusunda RCS değeri

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (m^2) \quad (2.30)$$

Formülüyle elde edilir.

Bu formül aracılığıyla dBsm birim yapısı elde edilebilmektedir (formül (2.34)). Tasarlanan elektromanyetik enerji hasadı birim hücre yapısının arkasına metal (GND) bir yüzey eklenerek geçen (iletilen) dalga (T) oranı minimuma indirgenmelidir. Birim hücre yapısı yansıma (R) ve emilim (A) oranları arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$R = |S_{11}|^2 = \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (2.31)$$

$$A = 1 - R - T \quad (T=0 \text{ kabul edilirse})$$

$$\frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = 1 - A \quad (2.32)$$

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 (1 - A) \quad (m^2) \quad (2.33)$$

Süper iletken özellik gösteren metal kaplı bir birim hücrenin emilim oranı maksimum olacağı için RCS değeri yani radar tarafından algılanabilirliği minimum derecelere düşmektedir. Radar kesit alanının bu kıyas metoduyla hesaplanması sonucu dBsm biriminde aşağıdaki formül elde edilmektedir.

$$\Delta\sigma = 10 \log(1 - A_{\text{Tamamen Metal Kaplı Plaka}}) - 10 \log(1 - A_{\text{Metamalzeme Enerji Hasadı Birim Hücresi}}) \quad (dBsm) \quad (2.34)$$

$A_{\text{Tamamen Metal Kaplı Plaka}} = 0$ olduğu için;

$$\Delta\sigma = \{-10 \log(1 - A_{\text{Metamalzeme Enerji Hasadı Birim Hücresi}})\} \quad (dBsm) \quad (2.35)$$

2.11. Anten Kazancı

Serbest halde havada yayılım yapan elektromanyetik dalgalardan yüksek verimlilikte enerji hasadı gerçekleştirebilmek için ısıma güc yoğunluğunun değeri, verici gücüne, verici anten kazancına ve uzaklığa bağlıdır. Elektromanyetik enerji hasat etmede anten kazancı, verimliliği doğrudan etkilemektedir. Anten kazancı

$$G = \eta \times D \quad (2.36)$$

olarak ifade edilir.

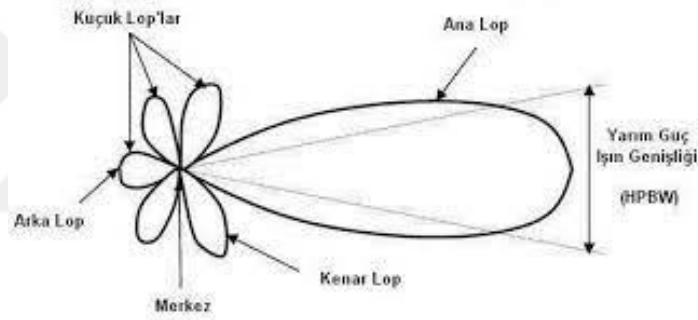
$$D = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.36a)$$

$$G = \eta \times \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2.36b)$$

Burada η verimlilik, D yönlülük, A antenin efektif açıklık alanını göstermektedir.

2.12. Anten Işıma Paterni

Antenler kullanılmak istenen sistemlere entegre ediliş metodlarına göre farklı ışıma paternlerine sahip olabilmektedirler. Antenden yayımlanan sinyal güçleri (elektromanyetik dalgalar) antenlerin belirli sabit noktadaki açısal değişimlerini gösteren grafik örüntüleridir.



Şekil 2. 28. Işıma Paterni

Şekil 2.28’de de görüldüğü gibi anten ışıma paterni 3 kısımda incelenebilmektedir ana kulak (lob), yan kulak ve arka kulaklardan oluşmaktadır. Yan ve arka kulaklar istenmeyen paternlerdir, asıl dikkate alınması gereken ana kulaktır. Anten ışıma paterni simülasyonlarla elde edildiğinde antenlerin ışıma yaptıkları yön hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.

2.13. Anten Işıma Yönlülüğü

Anten yönlülük parametresi hesaplanırken antenin maksimum ışıma yaptığı noktalara bakılır, bu noktalar izotropik antenin aynı uzaklıktaki güç yoğunluğu oranıdır. Işıma yönü ve kazanç genellikle birbirleri için kullanılabilir ancak bu kullanımın olması için ışıma yönündeki kayıplar göz ardı edilmelidir. Işıma yönündeki kayıplar antende kullanılan dielektrik malzemenin direnç polarizasyonundan kaynaklı kayıp ve yansıma (voltage standing wave ratio (VSWR)) kayıplarıdır. Bu kayıplar göz ardı edilebilecek derecede küçük kayıplar olduğu için genellikle anten kazancı ve ışıma yönlülüğü benzer sonuçlar verir. Yayılma acısı küçüldükçe antenin ışıma yönü kazancı artar. (Karakuş, 2018).

2.14. Anten Verimliliği

Işıma verimliliği antenin yaydığı ışıma gücünün, antene uygulanan elektriksel güce oranlanması sonucu oluşan değerdir ve

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (2.37)$$

olarak ifade edilir.

Burada P_{rad} antenin yaydığı ışıma gücüdür, P_{in} antene uygulanan elektriksel güçtür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Elektromanyetik problemlerin çözümlenmesi için sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Sayısal yöntem kullanımındaki amaç yıllar içinde geliştirilen formüller analizlerin, matematiksel modellerin; bilgisayar yardımıyla belli bir sayı ve algoritmik sıra takip edilerek hassas sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır. Sayısal yöntem kullanımında problemin saptanması, problemin çözüm hızı ve çözümün hassasiyeti gibi parametreler kullanılacak algoritmayı belirlemektedir. Farklı türde problemlerin birden fazla sayısal metodla çözümü söz konusudur. Problem tipine göre en uygun sayısal yöntem saptanarak analizler yapılmalıdır. Elektromanyetik çözümleme ve analizlerinde genel olarak 5 tip sayısal yöntem kullanılmaktadır.

1. Zaman domeninde sonlu farklar metodu (FDTD)
2. Sonlu elemanlar metodu (FEM)
3. Sonlu integrasyon tekniğidir (FIT)
4. Moment metodu (MOM)
5. İletim hattı matrisi (TLM)

3.1. Yöntem

3.1.1. Zaman domeninde sonlu farklar metodu (FDTD)

Yee tarafından 1966 da ortaya atılmış bir metoddur. FDTD Metoduyla birim hücreler daha küçük birim hücrelere ayrıştırılır, her bir parçalı hücre için elektrik ve manyetik alanların x, y, ve z yönlerinde sergiledikleri karakteristik durumlar bulunarak yapı bir bütün olarak değerlendirilmektedir. Maxwell denklemlerinin zaman domeninde çözümlenmesiyle tasarım hakkında analizler yapılabilir.

3.1.2. Sonlu elemanlar metodu (FEM)

Courant tarafından 1943 yılında ortaya atılmış bir metoddur. Bu yöntem ile Maxwell denklemleri ayrıştırılmakta ve elektromanyetik dalgaların (EM) nesneler üzerindeki hareketleri izlenebilir olmaktadır. FEM yöntemi kullanım alanı olarak biyolojik nesnelerin emilim değerlerinin bulunması, yarı iletken teknolojileri, elektrik makineleri gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.

3.1.3. Sonlu integrasyon tekniği (FIT)

Weiland tarafından 1977 yılında ortaya atılmış bir metoddur. FIT ile frekans domeninde, Maxwell denklemlerinin integral formlarında nümerik analizler yapılabilmektedir (Weiland, 1977).

FIT Metodu formülleri aşağıda verilmiştir. Formüllerdeki simgeler pozisyon vektörü (R), zaman (t), elektrik akım yoğunluğu (j_e) ve manyetik akım yoğunluğunu (j_m) ifade etmektedir. Formüllerde kullanılan ε'' ve ν'' simgeleri sırasıyla ikinci dereceden, dielektrik sabiti ve manyetik dirençtir.

$$\frac{\partial}{\partial t} B(R, t) = -\nabla \times E(R, t) - j_m(R, t) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} D(R, t) = -\nabla \times H(R, t) - j_e(R, t) \quad (3.1a)$$

$$D(R, t) = \varepsilon''(R).E(R, t) \quad (3.1b)$$

$$H(R, t) = v''(R).B(R, t) \quad (3.1c)$$

3.1.4. Moment metodu (MOM)

Harrington tarafından 1968 yılında geliştirilen integral denklem sistemlerini lineer denklem sistemlerine dönüştürerek analizler yapmayı sağlayan nümerik bir yöntemdir (Harrington, 1968).

İntegral denklemlerinin analitik çözümleri pratikte zorluklar barındırmaktadır. Moment metodu ile integral dönüşümleri lineer sisteme taşındığından çözüm kolaylığı sağlamaktadır. Moment metodunun diğer nümerik analizlere nazaran dezavantajları da söz konusudur. Moment metodunda lineer sisteme aktarımda, problem matris denklemine dönüştürülerek çözümlenmektedir bu doğrultuda ele alınan nesnenin boyutları genişlediğinde, matris denkleminin boyutları da büyümektedir. Matris denkleminin boyutlarının büyümesi; problem çözümünde harcanan zaman ve çözümleme aşamasında gereksinim duyulan bellek miktarının artmasına yol açmaktadır.

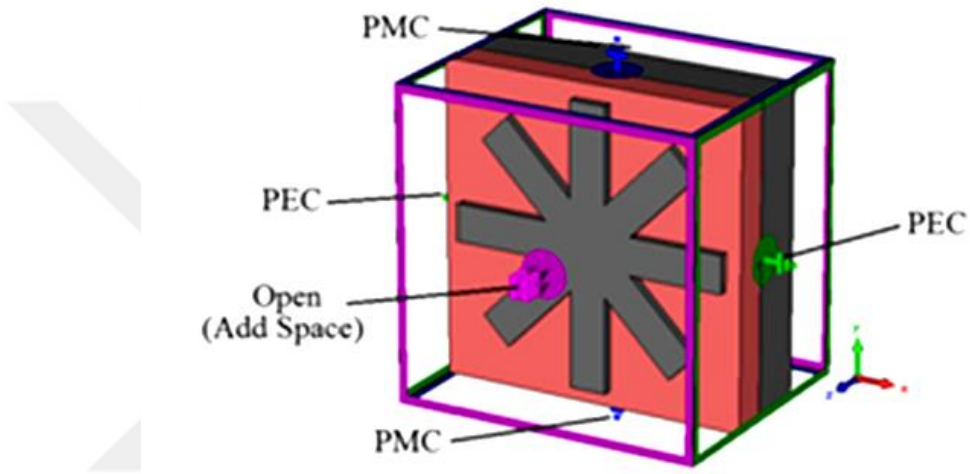
3.1.4. İletim hattı matrisi (TLM)

Johns ve Beurle tarafından 1971 yılında geliştirilen maxwell denklemleri ile saptanan EM alan bileşenleri ile iletim hat denklemlerini bütünleşik yapıda değerlendiren nümerik bir yöntemdir (Johns ve Beurle, 1971).

İletim hattı matrisi metodu tüm uzayın seri ya da pararel iletim hatları ile modellenmesi esasına dayanır. Diferansiyel denklemler aracılığıyla, akım ve gerilim cinsinden hatların maxwell denklemleri ile eşleştirilmesi prensibine dayanır. TLM yöntemi gerilim darbelerinin bağımsız parametreler olarak ele alındığı devre teorisi mantığına dayanır.

3.2. Materyal

Bu tez çalışmasında sonlu integrasyon tekniği temelli olan, CST programı ile simülasyon verileri elde edilmiştir. Elektromanyetik alan problemlerinin çözümünde nümerik analiz metodları kullanan CST Studio, zaman ve frekans domenlerinde simülasyon yapmaya imkan vermektedir. Bu çalışmadaki simülasyon verileri zaman ve frekans domeninde yapılmıştır.

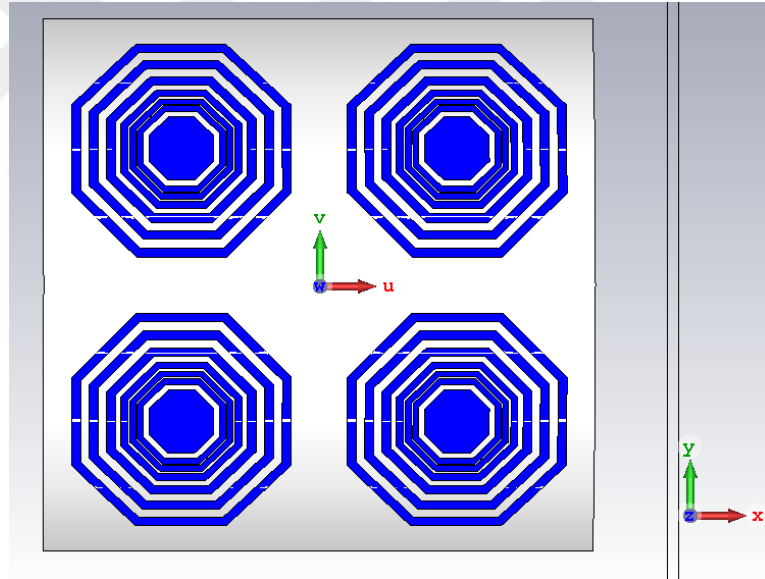


Şekil 3. 1. CST programında kullanılan sınır koşulları

Şekil 3.1’de de görüldüğü gibi CST de sınır koşulları olarak; x yönünde süper elektriksel iletkenlik (PEC), y yönünde süper manyetik iletkenlik (PMC) ve z yönünde uzay aralıklı açıklık tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın yapılmasının amacı metamateryal formundaki grafen ile tasarlanabilecek; en verimli, enerji hasatlayıcı birim hücre tasarımı yapabilmektir. RF enerji hasadındaki verim artışıyla ve cihazların enerji tüketiminin azaltılması çalışmaları bir bütün olarak değerlendirildiğinde enerji kaynağından bağımsız mobilite cihazlar günlük yaşantımıza daha çok entegre edilebilir olacaktır.

Grafenin elde edilmesi ve işlenebilirliğinin günümüzde çokta kolay olmamasından kaynaklı olarak simülasyonlar ile analizleri yapılabilmektedir. Bu çalışmada CST studio ile 4 farklı simülasyon yapılmış ve simülasyonların daha iyi açıklanabilmesi için yaygın kullanıma sahip en iyi iletken statüsünde olan gümüş ile birlikte kıyaslama metodlu analizler yapılmıştır. CST studio ile yapılan simülasyonlarda FIT ve FEM metodları kullanılmakla birlikte daha çok zaman domeninde çalışmalar sürdürülmüştür. Frekans cevabının bulunması gereken simülasyon verilerinde frekans domeninde çalışılmıştır. Simülasyonlar ortalama olarak 15 dakika ile 3 saat arasındaki sürelerde gerçekleştirilmiştir. CST programı; hücreleme ile her bir hücrenin analizini yaparak bir sonuç üretmektedir. Bu çalışmada en küçük hücre boyutu $\sim 0.068\text{mm}$ ve en büyük hücre boyutuda $\sim 0.997\text{mm}$ boyutlarındadır toplamda 13 milyona yakın hücreleme yapılmıştır. Bu çalışma CST programı ile 3-20 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 2. Birim hücre geometrik yapısı

Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi birim hücre yapısına gönderilen elektromanyetik dalgalarda elektrik alan yz-düzleminde yayılırken, manyetik alan elektrik alana dik olduğu için xz-düzleminde yayılım göstermektedir. Dalga yayılımında yön açısından değerlendirildiğinde z doğrultusunda $-z$ yönünde yayılım göstermektedir.

RTLS teknolojisi konum belirleme sistemi olup endüstride metal malzeme kullanımının çok yoğun olduğu alanlarda verimli sonuçlar üretmekte yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu çalışmada RTLS teknolojisinde kullanımı en kolay ve maliyeti düşük RFID etiket tasarımıyla çözüm bulunmaya çalışılmıştır. RFID etiket tasarımıyla sınırla kalınmayıp BLE ve UWB teknolojileriyle birlikte RTLS teknolojisinin metallerle olan sorununun çözümüne yönelik çalışmalar şekillenmiştir.

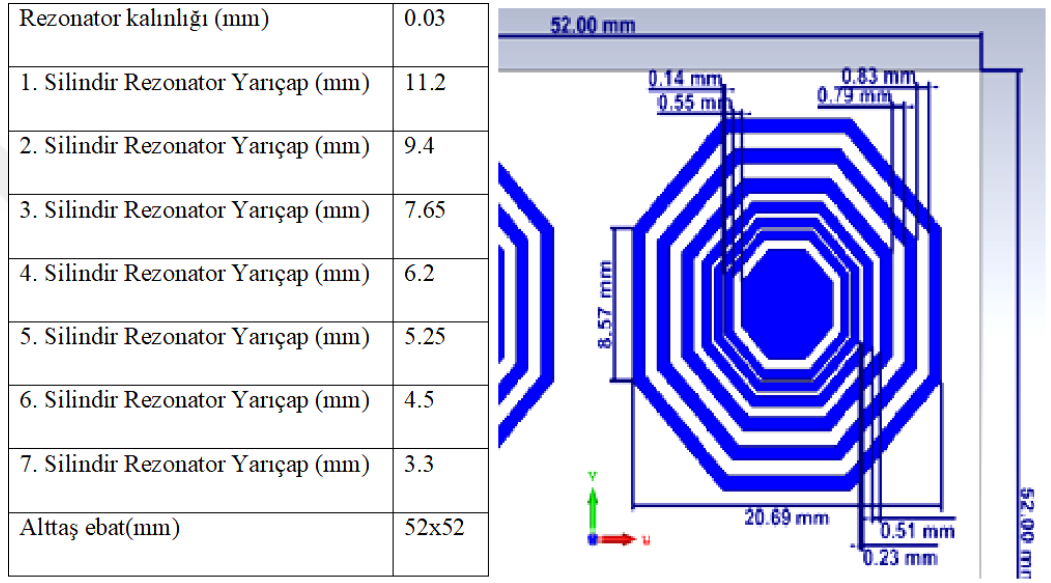
Çizelge 3. 1. Çalışmada kullanılan grafen ve gümüşün optik özellikleri

Optik Özellikler	Grafen	Gümüş
Temperature (K°)	293	573
Chemical Potential (eV)	0,1	3,5
Relaxation time (ps)	0,1	0,018
Thickness (nm)	0,3	17

Çizelge 3.1 de görüldüğü gibi optik özellikler kullanılarak CST’de simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bir malzemenin optik özelliği belirlenirken, malzemenin görünür bölgede ($\lambda \sim 0,3 - 0,8 \mu m$) elektromanyetik enerji alanında gösterdiği tepkiler ile belirlenir. Malzemelerin optik özelliklerinde malzeme üzerine elektromanyetik dalgalar gönderilerek malzemenin yansıma, kırılma ve emme verileri doğrultusunda malzemenin optik özellikleri belirlenmektedir.

Bu çalışmada dört adet aynı yapıda rezonatörden oluşan, grafen veya gümüş malzemeleri ile ayrı ayrı GND ve rezonatörü oluşturulan, ortasında Mika dielektrik malzemesinin yer aldığı enerji hasadı birim yapı hücresi oluşturulmuştur. Grafenin en yüksek iletkenlik özelliğinin ($\sim 10^8$ S/m) çok yüksek tabaka direncinin ($\sim 30 \Omega$) ve aşırı ince atomik yapısının (0.34nm) GHz frekans bantlarında çalışmaya olanak sağlamaktadır (Zhang ve arkadaşları 2019). Simülasyonlarda grafen ile birlikte gümüş metamalzemesi seçilmiştir. Bunun nedeni; gümüşün yaygın kullanımı ve iyi bir iletken olmasından kaynaklıdır. Gümüşün iletim katsayısı $6,3 \times 10^7$ S/m dir, rezonatördeki kalınlığı 0,03mm ve alttaştaki kalınlığı 0.05mm’dir. Mika malzemesi iletim katsayısı 1×10^{-14} S/m dir, kalınlığı 0.1mm’dir.

Ara yüzey tasarımlarındaki malzeme seçiminde, dielektrik katsayısı yüksek malzemelerin tercih edilmesi durumunda verimlilik artışı gözlemlenmiştir. Mika bağlı dielektrik sabiti (ϵ_r) çok yüksek olan ve çok az kayıplı bir elemandır. Bu özelliklerinden dolayı da, yüksek frekans devrelerinde kullanılmaya uygundur. Mika kalınlığının rezonatör kalınlığından büyük seçilmeside enerji hasadı verimliliğini arttırdığını gözlemlemiştirler (Karakaya, Bağcı, Yılmaz ve Akaoğlu, 2017).



Şekil 3. 3. Tasarlanan birim hücre ölçüleri

Şekil 3.3’de görüldüğü üzere yapı 1 adet 8 segmentli silindirik iç içe geçmiş yapılardan oluşmaktadır. Yapı tasarlanırken rezonans yapılması istenen frekans değerleri göz önüne alınarak dalga boyunun 1/5 değerinde boyutlar kullanılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Verimlilik Karşılaştırması

Bu çalışmada Şekil 3.3'teki rezonator şekli kullanılmış olup Betancourt ve arkadaşlarının 2016 da yapmış oldukları çalışma referans alınmıştır. Betancourt çalışmalarında sekizgen yongasız RFID etiket tasarlamış ve bu tasarlanan etiket frekans seçici yüzey (FSS) esas alınarak tasarlanmıştır. Çalışmalarını gerçekleştirme aşamasında sorun yaşamamak adına malzeme seçiminde esnekliği ön plana alarak plastik, kağıt gibi malzemelerle gerçekleştirmiştir. Tasarımın üretiminde serigrafi metodunu kullanmıştır. Betancourt 16mm ye kadar eğrilik yarıçapına sahip bükülmüş etiketler ile çalışarak bu etiketlerin RCS değerleri üzerinde durmuştur.

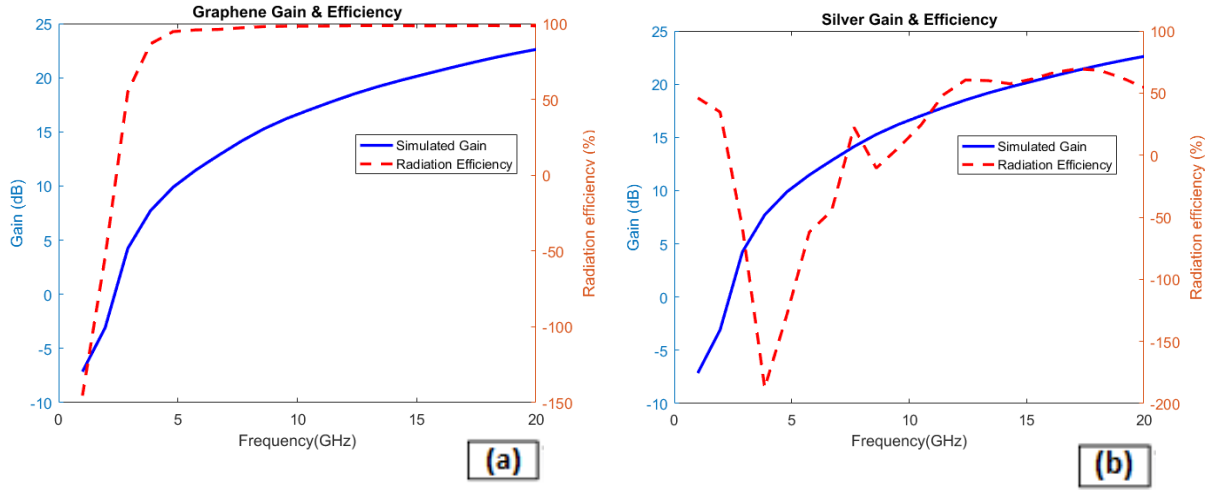
Bu çalışmada Betancourtun çalışmalarının referans alınma amacı gerçekleştirilmesi yapılmış bir çalışma olup aynı zamanda bükülebilir bir tasarımda gerçekleştirmelerin yapılmış olmasıdır.

Çizelge 4. 1. Grafen ve gümüşün kazanç, yönlülük ve verimlilik değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri

	Grafen			Gümüş		
Frekans (GHz)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Verimlilik (%)	Kazanç (dB)	Yönlülük (dB)	Verimlilik (%)
2,9	4,24	7,70	55,05	-4,75	8,14	-58,40
3,85	7,72	8,92	86,62	-7,39	3,94	-187,28
4,8	9,89	10,45	94,70	-5,80	4,53	-128,15
5,75	11,47	11,98	95,79	-4,06	6,55	-61,95
6,7	12,83	13,35	96,13	-3,39	7,57	-44,82
7,65	14,13	14,54	97,16	2,20	9,84	22,39
8,6	15,28	15,59	98,00	-0,72	6,92	-10,46
9,55	16,22	16,51	98,27	0,49	8,22	5,98
10,5	17,03	17,33	98,27	2,45	10,17	24,14
11,45	17,79	18,09	98,37	6,21	12,82	48,46
12,4	18,52	18,78	98,59	8,06	13,32	60,51
13,35	19,16	19,42	98,67	7,52	12,53	60,01
14,3	19,73	20,02	98,58	7,22	12,56	57,46
15,25	20,27	20,58	98,48	8,64	14,09	61,36
16,2	20,79	21,11	98,50	10,12	15,19	66,64
17,15	21,30	21,61	98,57	10,73	15,45	69,47
18,1	21,78	22,08	98,61	10,64	15,57	68,33
19,05	22,21	22,53	98,58	9,79	15,71	62,34
20	22,61	22,95	98,52	8,83	16,25	54,36
Ortalama	-	-	76,48	-	-	11,95
Standart Sapma	-	-	61,06	-	-	70,62

Simülasyonlarda kazanç ve yönlülük değerleri referans alınarak verimlilik (η) hesabı yapılmıştır. Grafen ve gümüş için yapılan kazanç (G) ve yönlülük (D) parametreleri kullanılarak;

Şekil 4.1’de grafen ve gümüşün kazanç-verimlilik çizelgesi verilmiştir. Grafikler Exel ve Matlab programları kullanılarak oluşturulmuştur. Matlab grafiklerinde de görüldüğü üzere frekans değeri 3-20 GHz arası, Kazanç dB cinsinden görselleştirilerek, asıl ulaşılacak istenen değer olan verimlilik yüzde (%) olarak verilmiştir.

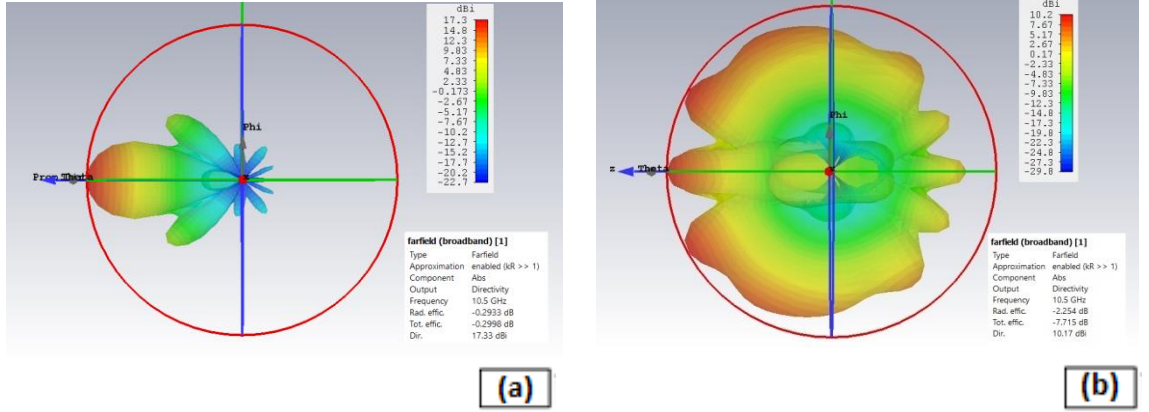


Şekil 4. 1. (a) Grafenin kazanç(dB) ve verimlilik(%) grafiği, (b) Gümüşün kazanç(dB) ve verimlilik(%) grafiği

Yapılan hesaplamalar sonrasında grafenin verimlilikteki ortalama değeri %76,48, gümüşün verimlilikteki ortalama değeri %11,95 olarak elde edilmiştir. Ortalama değerleri karşılaştırıldığında grafenin, gümüşe göre 6,5 kat daha verimli bir performans sergilediği görülmektedir.

4.2. Göreceli Kazanç Oranı Karşılaştırması

Enerji dağılımı kararlı ve her yönde olan, ideal bir anten olarak kabul edilen izotropik anten referans alınarak göreceli kazanç hesabı yapılmaktadır. Göreceli kazanç oranı dBi ile simgelenmektedir. Frekansın değişimi sonucu dBi değeri arttıkça; istenmeyen sinyal dalgalanmaları düşürülür, kaliteli sinyal yayılımı ve emilimi olur, antenin uzak mesafelere düzgün yapıda ışıma yapabildiği anlamına gelmektedir.



Şekil 4. 2. (a) Grafenin 10.5GHz için uzak alan ışıma paterni, (b) Gümüşün 10.5GHz için uzak alan ışıma paterni

Çizelge 4. 2. Grafen ve gümüş metamalzemeleri ile uzak alandaki kazanç değerleri

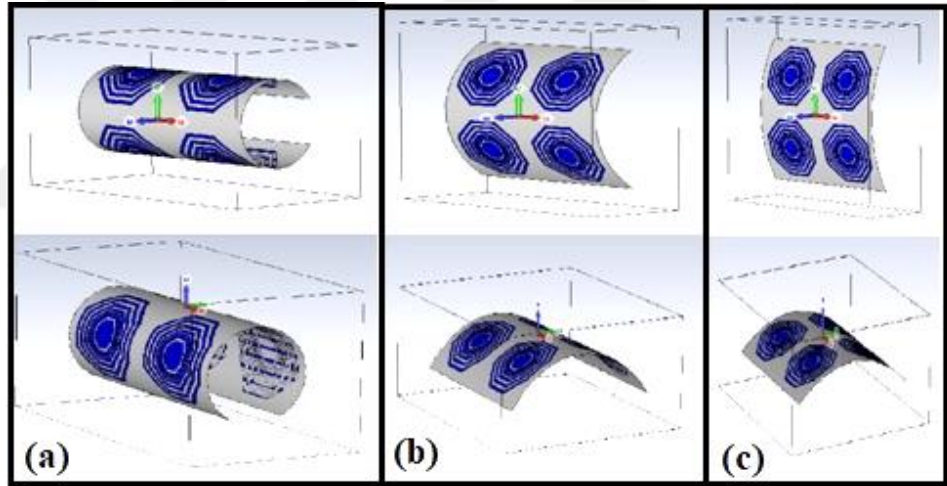
GHz	6	8	10	10.5	12	14	16	18	20
Gümüş (dBi)	4,84	7,87	8,03	10,17	12,85	11,82	14,36	15,42	15,88
Grafen (dBi)	12,16	14,84	16,81	17,33	18,41	19,76	20,91	21,97	22,86

CST de uzak alan nümerik çözümlemeleri yapılan metamalzeme, frekans aralığı olarak 1-20 GHz frekans bandı tercih edilmiştir. Yapılan simülasyonlar 1-20 GHz olduğu için 10,5 GHz frekans bandı referans frekans olarak belirlenmiştir. 5G iletişim frekans spektrumu, fiziksel özellikler açısından 6 GHz altı ve 6 GHz üstü olarak iki aralıkta tanımlanmaktadır (Lee ve ark., 2018). Belirlenen frekans değerinin seçiminde gelişen teknolojiyle 5G cihazların hayatımızda çokça yer alacağı ön görülmüş ve 6GHz frekansın üstündeki 9 adet frekans değerinde gümüş ve grafen tabanlı birim hücreler için elde edilen nümerik değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Uzak alan ışıma diyagramı çalışılan frekans aralığının tam ortası olan 10,5GHz frekansında çözümlenmiş ve Şekil 4.2 de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda grafen ana lob büyüklüğü 17,33 dBi iken gümüş bazlı metamalzeme 10,17 dBi değerlerindedir. Veriler karşılaştırıldığında grafen bazlı rezonatör tasarımının, gümüşe göre göreceli kazanç oranının (dBi) 1,7 kat daha iyi

olduğu elde edilmiştir. Çizelge 4.2’de görülen veriler doğrultusunda referans frekansı (10,5 GHz) dışındaki verilere bakıldığında grafen; 6-20 GHz aralıkta 9 farklı frekansta sırasıyla 2,5- 1,8- 2- 1,7- 1,4- 1,6- 1,4- 1,4- 1,4 kat grafen, gümüşe göre daha iyi dBi oranına sahiptir.

4.3. Bükülebilir Birim Hücrelerin RCS Değerlerinin Karşılaştırılması

Tekstil sektöründe kullanılacak birim hücre tasarımları büküm ile deforme olmayacak biçimde tasarlanmalı ve malzeme seçimleri bu yönde yapılmalıdır. İnsan bedeni yada nesnelerin bükülebilir, esneyebilir enerji hasadı hücreleriyle kaplanması endüstriyel saha uygulamalarını kolaylaştırması beklenmektedir.

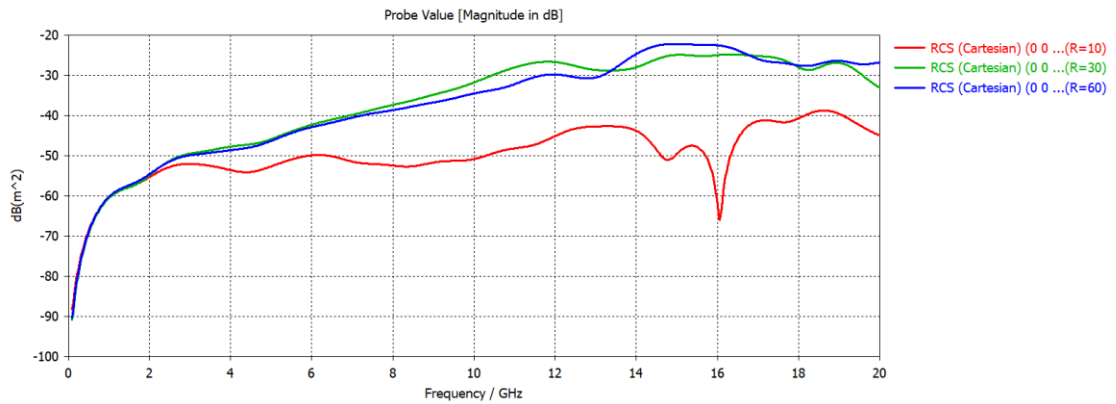


Şekil 4. 3. (a) 10° büküme uğratılmış birim hücre (b) 30° büküme uğratılmış birim hücre (c) 60° büküme uğratılmış birim hücre

Şekil 4.3’de de görüldüğü gibi tasarlanan birim hücre farklı açı değerlerinde büküme uğratılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda tüm parametreler aynı tutularak sadece malzeme türü (grafen ve gümüş) değiştirilerek grafikler ve değerler elde edilmiştir.

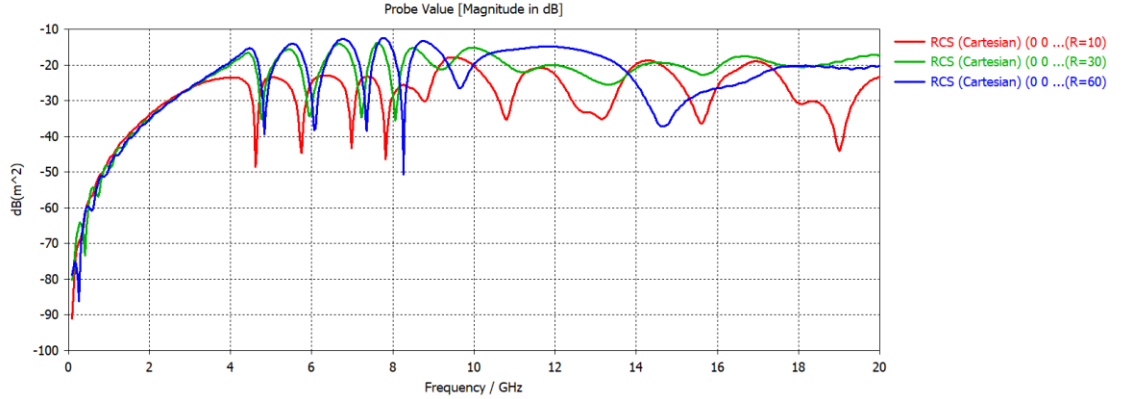
Çizelge 4. 3. Grafen ve gümüş bazlı birim hücre yapısının, RCS değerlerinin büküm açısı-frekans değişimi

	Grafen			Gümüş		
(GHz)	Büküm Açısı $dB(m^2)$			Büküm Açısı $dB(m^2)$		
Frekans	10°	30°	60°	10°	30°	60°
0.1	-88,34	-90,92	-90,26	-91,06	-80,24	-78,89
2	-55,26	-54,85	-54,55	-33,89	-35,33	-35,13
4	-53,52	-47,70	-48,59	-23,46	-19,90	-19,15
6	-49,85	-42,26	-42,84	-24,76	-31,36	-30,48
8	-52,40	-37,33	-38,62	-28,70	-28,37	-15,95
10	-50,78	-31,71	-34,44	-20,29	-15,18	-19,72
12	-45,09	-26,63	-29,74	-22,65	-20,01	-14,85
14	-43,79	-27,91	-24,60	-19,64	-20,83	-25,39
16	-62,32	-24,91	-22,47	-26,05	-20,74	-26,52
18	-40,62	-27,91	-27,48	-30,70	-20,44	-20,30
20	-44,96	-33,04	-26,76	-23,37	-17,20	-20,19
Ortalama	-47,96	-33,0	-33,40	-26,20	-20,21	-20,93
En Küçük	-65,93	-49,45	-49,84	-48,54	-35,49	-50,77
En Büyük	-38,70	-24,71	-22,11	-17,86	-13,77	-12,40



Şekil 4. 4. Grafen bazlı birim hücrenin 10°, 30°, 60° büküm açılarıyla elde edilen RCS değerlerinin frekans ile değişimi

Şekil 4.4 incelendiğinde, grafik verilerinin doğru değerlendirilebilmesi için 3-20 GHz veri aralığı dikkate alınmalıdır çünkü birim hücre tasarımı 3GHz sonrası rezonans yapabilmeye uygun olarak tasarlanmıştır. Grafikte de görüldüğü gibi en iyi RCS değeri 10° büküm sonucu elde edilmiştir. 10° büküme uğratılmış birim hücre verileri incelendiğinde 16,05 GHz de RCS değeri -65,93 dB ölçülmüştür.



Şekil 4. 5. Gümüş bazlı birim hücrenin 10° - 30° - 60° büküm açılarıyla elde edilen RCS grafiği

Şekil 4.5'deki grafikte de görüldüğü gibi gümüş bazlı birim hücre tasarımında en iyi RCS değeri 60° büküm sonucu elde edilmiştir. 60° büküme uğratılmış birim hücre verileri incelendiğinde 8,25 GHz de RCS değeri -50,77 dB ölçülmüştür.

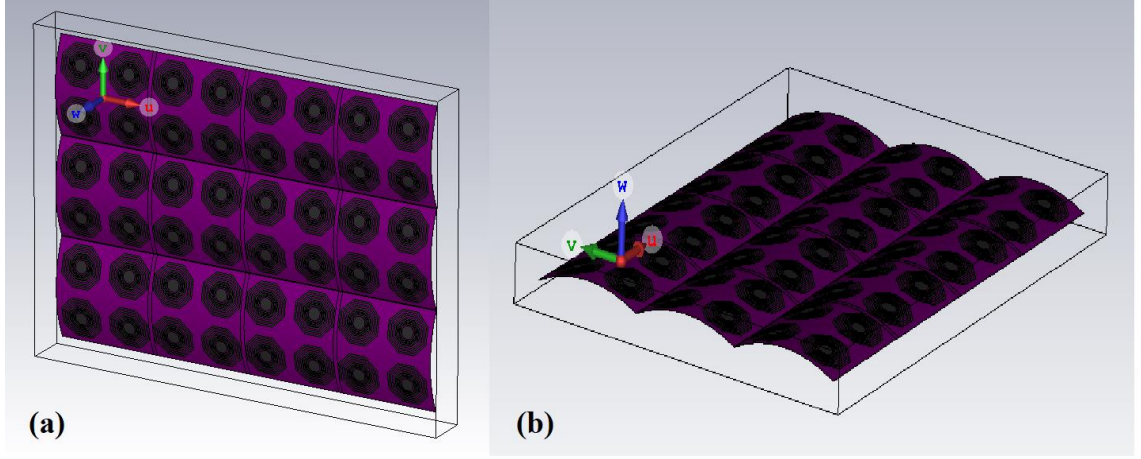
Grafiklerdeki en düşük RCS değerleri farklı frekanslarda elde edilmiş olsa da grafenin, gümüşe göre 1,29 kat daha iyi bir RCS değerine sahip olduğu görülmektedir. Çizelge ve grafik verileri bir bütün olarak değerlendirildiğinde; gümüş bazlı birim hücre yapısı büküme uğratıldığında RCS değeri olumsuz etkilenmektedir. Grafen bazlı birim hücre yapısında ise büküm sonucu RCS değeri olumlu yönde etkilenmektedir. Grafen, gümüşe göre esneme katsayısı yüksek olması ve esnediğinde deforme olmasının gümüşe göre daha zor olması sebebiyle tekstil sektöründe kullanımı yaygınlaştırılabilir.

Gümüşün rezonansa girdiği frekans sayısı grafene göre daha fazla olmasının sebebi birim hücre tasarımının gümüş, bakır gibi yaygın kullanılan malzeme yapısına göre tasarlanmış olmasından kaynaklıdır. Grafenin optik özellikleri incelendiğinde THz seviyelerinde rezonansa girmeye daha uygun bir malzeme olduğu görülmektedir. Grafenin GHz seviyelerinde dahi gümüşe göre RCS değerinin yüksek çıkması grafenin, gümüşe göre radar ile algılanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

4.4. Bütünleşik Hücrelerin RCS Değerlerinin Karşılaştırılması

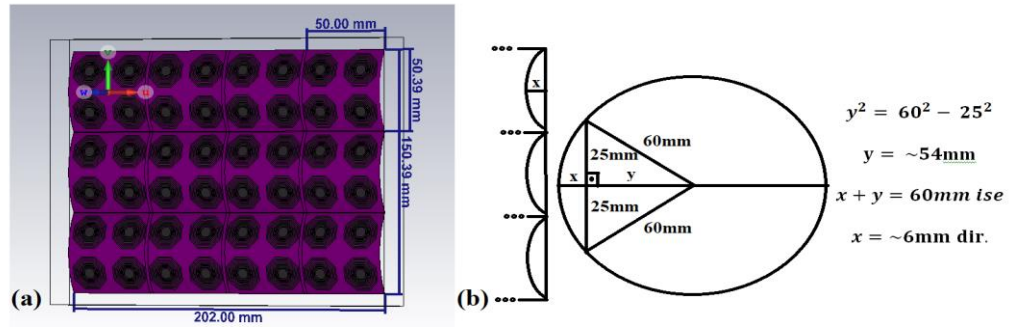
Birden fazla birim hücre birleştirilerek enerji hasatlamadan elde edilecek enerjinin artırılması hedeflenmektedir. Bunun yanında çoklanmış birim hücre gruplarının radara yakalanma oranlarının yüksek olması beklenmektedir çünkü yüzey alanı genişletilmektedir. Birbiriyle bağlantılı duruma getirilen birim hücreler, birleşerek bütünleşik hücreleri oluşturmaktadır.

Bu çalışmada bütünleşik hücre tasarımı yapılırken sadece 60° büküm için simülasyon gerçekleştirilmiştir çünkü 10° ve 30° büküm açıları birim hücrelerin tekstil ürünlerine entegrasyonunu zorlaştıracaktır. Düz ve hafif boğmeli bir bütünleşik hücre tasarımı yapılmaya çalışıldığı için 10°'lik büküm açısıyla bütünleşik bir hücre yapısı oluşturulamamaktadır bu yüzden simülasyon yapılamamıştır. 30°'lik büküm açısında bütünleşik bir yapı elde edilmektedir ancak boğmeli yapının artışından dolayı, tekstil sektörüne uyarlamada sorunlar ön görüldüğü için en uygun simülasyon açısı 60° olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 6. 60° bükümler ile elde edilmiş bütünleşik yapı (a) Yandan görüntüsü (b) Üstten görüntüsü

Şekil 4.6’da da görüldüğü gibi 60° bükümlerle elde edilen birim hücreler bütünleşik bir yapı oluşturularak RCS değerleri elde edilmiş ve grafik ile gösterilmiştir. Simülasyonlar 3-20 GHz frekans aralığında yapılmıştır. Bütünleşik bu yapının, endüstride operatör giysilerine entegre edilmesiyle enerji hasatlamada verimlilik artışı ön görülmektedir. Bütünleşik yapı üzerinde sadece malzeme türü değiştirilerek (grafen ve gümüş) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

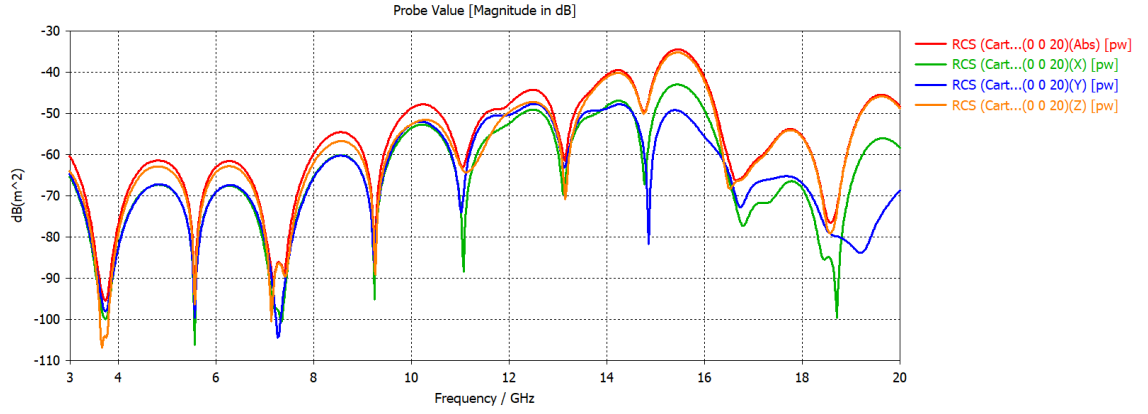


Şekil 4. 7. (a) Birim hücre ve bütünleşik hücre ebatları (b) Her bir birim hücrenin yükseklik değerinin bulunması

Şekil 4.7 deki yapı yaklaşık olarak $15 \times 20 \text{ cm}^2$ lik bir yüzeye sahiptir. Yapının yüksekliği 1cm den küçük olup şekil (b) de yükseklik değeri yaklaşık 6mm olarak hesaplanmıştır. Bütünleşik yapının kavisli yapıda oluşturulma nedeni tekstilde kullanımına yönelik olarak insan bedeninin girintili çıkıntılı yapısından kaynaklıdır.

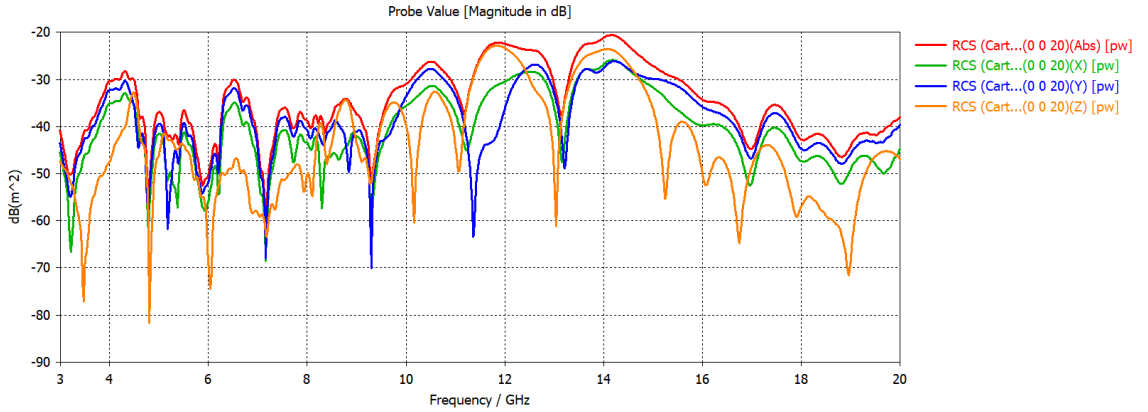
Çizelge 4. 4. Grafen ve Gümüş bazlı birim hücrelerin çoklanmasyla elde edilen RCS değerlerinin frekans ile değişimi

Frekans (GHz)	Grafen ($\text{dB}(m^2)$)	Gümüş ($\text{dB}(m^2)$)
0.1	-54.74	-47.74
2	-64.26	-44.48
4	-76.12	-30.31
6	-62.89	-50.02
8	-59.56	-38.77
10	-48.64	-31.01
12	-47.60	-22.43
14	-40.54	-21.16
16	-41.42	-34.30
18	-55.58	-42.68
20	-48.35	-37.92
Ortalama	-57.23	-35.49
En Küçük	-95.44	-61.92
En Büyük	-34.43	-20.58



Şekil 4. 8. Grafen birim hücresinin çoklanmasıyla 12 parçalı bütünleşik rezonatör yapısının X-Y-Z yönlü RCS grafiği

Şekil 4.8 de görüldüğü gibi en iyi RCS değeri olarak 3,7GHz frekansında -95,44 dB değeri elde edilmiştir. Birim hücrelerin çoklanmasıyla rezonans frekansları artmış ve verimlilik artışı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 9. Gümüş birim hücresinin çoklanmasıyla 12 parçalı bütünleşik rezonatör yapısının X-Y-Z yönlü RCS grafiği

Şekil 4.9 daki grafik verileri incelendiğinde en iyi RCS değeri olarak 7,1GHz frekansında -61,92 dB değeridir. Gümüş ile oluşturulan bütünleşik yapının Z eksenindeki RCS değerleri göz önüne alındığında rezonansa girdiği frekans sayısı grafene göre daha fazladır.

Tüm veriler bir bütün olarak değerlendirildiğinde grafen ile tasarlanan bütünleşik yapının ortalama değeri -57,23 dB dir. Gümüş ile tasarlanan bütünleşik yapının ortalama değeri -35,49 dB dir. Grafen, gümüşe göre 1,6 kat daha verimli RCS değerlerine sahiptir. Tüm bu sonuçlar ile görülmektedir ki grafen bazlı bir enerji hasatlayıcı tasarımı, tekstil sektöründe kullanımıyla verimlilik artışı elde edilebilecektir.

Endüstri 4.0 ın bir adımı olan RTLS teknolojilerinin insan giysilerine entegre edilmesinde grafen bazlı enerji hasatlayıcılarının kullanımı gümüşe göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. RTLS Teknolojisinde metallerin arkasında kalan nesne yada kişiler, grafen bazlı enerji hasatlayıcılar ile faraday kafesi etkisine daha az maruz kalacaklar ve sürekli, düzgün bir konumlandırma yapılabilecektir. Tasarlanan bütünleşik yapının fabrika içi çalışanların giysilerine entegre edilmesiyle; gövde, ayak ve el bileklerini de saracak şekilde giysiler çalışanların konumlarının takibini kolaylaştıracaktır.

Fabrika içi çalışanların giysilerinin tümüyle enerji hasatlayabilir olması çok hassas konum takibi gerektiren çalışma alanlarında birden fazla RTLS teknolojisinin giysilere uyarlanmasıyla konum verisi daha kararlı bir şekilde iletilebilecektir. Konum takibinde hassasiyetin olabildiğince artırılması, iş güvenliği açısından değerlendirildiğinde çoğu kazayı engelleyici nitelikte olacaktır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada endüstri 4.0'ın alanı olan RTLS çözümleri ve bu alanda karşılaşılan elektromanyetik sorunlar araştırılmıştır. Endüstriyel alanlarda kullanılan RTLS sistemleri kablosuz haberleşme sistemlerini kullandığı için haberleşme esnasında elektromanyetik dalgaları kullanmaktadır. Araştırmalar sonucunda görülmüştür ki endüstriyel alanlarda geniş, büyük metal levhalar veya yüzeylerin varlığı RTLS teknolojisi için kullanılan modüller üzerinde faraday kafesi etkisi yapabilmektedir. Faraday kafesi etkisine maruz kalan modül elektromanyetik sönümlenmeye uğradığı için sinyal kayıplarına yol açmakta ve bu durum da konum takibini olumsuz etkilemektedir.

Çalışmada enerji hasatlama ve metamateryale hakkında detaylı araştırmalar sunulmuştur. Araştırmalar ile varılmak istenen amaç endüstriyel alanda RTLS teknolojilerinin herhangi bir güç kaynağına bağımlı olmaksızın çalışabilir olmasını sağlamaktır. Taşınabilir RTLS modüllerinin boyutunu en çok büyüten kısmı enerji depoladığı kısımdır. Enerji hasatlama ile şarj ünitesi ortadan kaldırıldığında konum takip modüllerinin boyutları küçültülmüş ve maliyetleri düşürülmüş olacaktır. Boyut ve maliyeti düşürülen takip modülleri, hassas konum takibi istenen noktalarda, konum takibi yapılacak varlığa birden fazla entegre edilebilir olmasını sağlayacaktır. Tüm bu durumlar RTLS çözümlerinin endüstriyel alanlarda daha sağlıklı konum verileri elde edilmesini sağlayacaktır.

Çalışmada birim hücre yapısı tasarlanırken 4 adet 8 segmentli silindirik iç içe geçmiş yapılardan oluşan rezonatör yapısı ve dielektrik alttaşı olarak mika tercih edilmiştir. Rezonatör ve metalik yüzey grafen ve gümüş bazlı olacak şekilde 4 tipte simülasyon yapılmıştır. Simülasyonlar 3-20 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Belirtilen frekans aralığında çalışılma sebebi gelişen teknolojiyle (5G teknolojisi) RTLS alanında kullanılacak modüllerinde ihtiyaçlara cevap verebilmesine katkı sağlayabilmektir.

Bu çalışmada yapılan simülasyon tipleri; verimlilik, göreceli kazanç oranı, büküm sonucu tepkiler ve çoklu birim hücre tasarımına uyum karşılaştırmalarıdır. Simülasyonlar uzak alan hesaplamaları ve RCS değerleri referans alınarak oluşturulmuştur. Simülasyonların gümüş ile karşılaştırmalı olarak verilmesinin sebebi gümüşün en iyi iletken statüsünde değerlendiriliyor olması ve gümüş bazlı enerji hasatlama hücresi tasarımlarının kullanılıyor olmasından kaynaklıdır. Tasarlanan birim hücrenin verimliliği açısından yapılan simülasyon verilerinde grafen gümüşe göre 6,5 kat daha fazla verimlilik göstermiştir. Göreceli kazanç oranı verileri karşılaştırıldığında grafenin gümüşe göre 1,7 kat daha yüksek değerde olduğu gözlemlenmiştir.

Operatörlerin giysilerine entegre edilmesi planlanan RTLS teknolojileri çalışabilmeleri için enerji kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada tasarlanan birim hücrelerin tekstil sektörüne entegresiyle kişiler enerji hasatlayıcı kıyafetler giyerek üzerlerinde taşıdıkları konum takip modüllerine enerji sağlayabilir olacaklardır. Ancak enerji hasatlama amaçlı kullanılacak kıyafetler bükülebilir, esneyebilir, deforme olması zor olan malzemelerden seçilmelidir. Grafen malzemesinin enerji hasatlayıcı kıyafet olarak kullanımı bu çalışmada araştırılmış ve birim hücrelerin bükülebilirliği üzerine yapılan çalışmalar sonucunda grafen gümüşe göre 1,29 kat daha iyi performans göstermiştir. Enerji hasadı kıyafetlerinin geniş yüzeyde olması elde edilecek enerjiyi arttırmaktadır, bu yüzden birim hücreler birleşerek bütünleşik hücreleri oluşturmalıdır. Bütünleşik hücreler ile yapılan çalışmalarda grafen gümüşe göre 1,6 kat daha iyi RCS değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada endüstride çalışan insanlar üzerine entegre edilecek birim hücrelerin enerji hasatlama esnasında, insan vücuduna verebileceği etkileri minimuma indirebilmek adına birim hücre tasarlanırken metalik yüzey katmanı en iyi iletken seçilmelidir bu sayede insan vücudunu saran birim hücreler, insan vücudunda faraday kafesi etkisi oluşturacak ve konum takip modülünü taşıyan canlı radyoaktiviteden olabildiğince az etkilenecektir.

Grafen yeni bir malzeme olup araştırmaları sürmekte olan ve her geçen gün yeni bulgularla gelecek için kullanımı yaygınlaşacak gibi gözükten bir malzemedir. Grafeni ilerleyen yıllarda hayatımızın hemen hemen her yerinde kullanabilir olacağımız için tekstil sektöründe de grafen kullanımının yaygınlaşmasıyla farklı bir çok sistem ve teknolojiye katkı sağlayabilecektir. Bu alışma da grafen bazlı enerji hasatlayıcı kıyafetlerin endüstriyel ortamlardaki kullanımına yönelik olarak yapılmış olup özgün bir çalışma niteliğindedir.



KAYNAKLAR

Ali, S.W. 2016. Critical guidelines for RF and microwave PCB Design. Embedded.

Anonim, 2014. İletim hatları. Erişim adresi: <https://elektronikhobi.net/iletim-hatlari>

Anonim, 2020. Konumlandırma çözümleri. Erişim adresi: <https://www.zebra.com>

Arsan, T. 2018. Büyük patlama büyük çöküş optimizasyon yöntemi ile ultra geniş band sensörlerinin iç mekân konum belirleme doğruluklarının iyileştirilmesi. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 24(5), 921-928, 2018.

Au, N.D., Seo, C. 2017. A Novel Design of an RF-DC Converter for a Low-Input Power Receiver, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*. 17(2): 191-196.

Bakır, M. 2018. Metamalzeme Tabanlı Çok Bantlı Enerji Hasadı Uygulaması., *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(1), 527-528. Doi: 10.25092/baunfbed.433960

Belen, A.M., 2018. RF Enerji Hasatlama Sistemleri için Çift Bandlı Greinacher Doğrultucu Devre Tasarımı., *Journal of Engineering Sciences and Design*., 1308-6693., DOI: 10.21923/jesd.396269

Betancourt, D., Haase, K., Hübler, A., Ellinger, F., Member, S. 2016. Bending and Folding Effect Study of Flexible, Fully-Printed and Late-Stage Codified Octagonal Chipless RFID Tags. *IEEE*. Erişim adresi: http://www.ieee.org/publications_standards

Castano, L.M., Flatau, A.B. 2014. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review. *Smart Material Structure*, 23(5), 1-27.

Chae, S., Yoshida, T. 2010. Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment. Kajima Technical Research Institute, 2-19-1, Chofushi, Tokyo, 182-0036, Japan

Cheng, Z., Liu, L., Xu, S., Lu, M., Wang, X. 2015. Temperature Dependence of Electrical and Thermal Conduction in Single Silver Nanowire. *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/srep10718

Courant, R. 1943. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American mathematical Society*, 49(1), 1-23.

Delipinar, T., Ozek, E. A., Kaya, C. E., Tanyeli, S., Yapici, M. K. 2020. Flexible Graphene Textile RFID Tags Based on Spray, Dispense and Contact Printing. Sabanci University Nanotechnology Research Center, Istanbul, TR 34956, Turkey. 978-1-7281-5278-3/20/\$31.00 ©2020 IEEE

Dengiz, O. 2017. Endüstri 4.0: Üretimde Kavram ve Algı Devrimi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*. Erişim adresi <http://dergipark.gov.tr/matim/issue/36791/419135>, 2017.

Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Sabah, C. 2013. Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resoanator and octa-star strip configuration. *Progress In Electromagnetics Research*, 141, 219-231.

Diñçer, H. 2000. Elektromanyetik Işınımların İnsan Sağlığına Etkisi, Kocaeli Üniversitesi, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi sayı:406, Elektronik ve haberleşme Sistemleri Araştırma ve uygulama Merkezi

Gözel M.A., Kasar Ö., Kahrman M. 2019. 545 MHz ile 5800 MHz Arası GSM ve ISM Bantlarda, HSMS 285c Diyodu Kullanılarak Yapılan Dickson Doğrultucu Devresinde Tek/Çift Katmanlı Yapının, RF-DC Güç Dönüştürme Verimine Etkisinin İncelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1); 24-30.

Gözel, M.A., Kasar, Ö., Kahrman, M., 2018. Comparison of Diode Models in RF Energy Harvesting Using Grainacher Voltage Multiplier Rectifier Circuit. 3. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/329093273>

Griffin, T., Young, M., Stanton, N. 2015. Human Factors Models For Aviation Accident Analysis and Prevention”, England: Ashgate Publishing Limited.

Hagerty, J.A., Helmbrecht, F.B., McCalpin, W.H., Zane, R., Popovic, Z.B., 2004. Recycling ambient microwave energy with broadband rectenna arrays. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 52(3), 1014–1024.

Halawa, F., Daoud, H., Lee I. 2019. Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency. *International Journal of Production Economics*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107541>.

Harrington, R.F. 1968. Field computation by moment methods, Mcmillan, New York, (reprinted by IEEE Press, 1993).

Hong, J.S. G., Lancaster, M. J. 2001. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, Wiley-Interscience.

Hu, B., Li, D., Manandharm, P., Fan, Q., Kasilingam, D., Calvert, P. 2012. Cnt/Conducting polymer composite conductors impart high flexibility to textile electroluminescent devices. *Journal of Material Chemical*, 22(4), 1598-1605.

Hu, X., Yu, K., Chuang, H., Hsu, H., Liu, C., Tung, S., Chen, Y., Lei, M., Tsai N. 2020. Design and implementation of indoor positioning system using bluetooth low energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Dept. Of Information Management, Chung Hua University, Hsinchu, Taiwan

Huanh, Y., Hammad, A., Zhu, Z. 2020. Providing proximity safety alerts to workers on construction sites using bluetooth low energy RTLS. *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 007*, Budapest University of Technology and Economics

Johns, P. B. ve Beurle. R. L. (1971). Numerical Solution of Two-Dimensional Scattering Problems using TLM, Proc. IEE, 118, 1203-1208.

Jiang, Y., Pillai, S., Green, M. A. 2016. Grain Boundary Effects on the Optical Constants and Drude Relaxation Times of Silver Films. Journal of Applied Physics 120, 233109 (2016) doi: 10.1063/1.4972471

Kapan, M. 2007. Basit cisimlerin radar kesit alanı uygulamaları. Gazi Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi. Erişim adresi: <https://dspace.gazi.edu.tr>

Karakaya, E., Bağcı, F., Yılmaz, A. E., Akaoğlu B. 2017. Yaygın olarak kullanılan GSM ve Wi-Fi frekanslarında meta malzeme tabanlı dört bantlı elektromanyetik enerji toplama. Journal of Electronic Materials.

Karakuş, C., 2018. Antenler ve Elektromanyetik Işıma, Serbest Tez Çalışması, İTÜ, İstanbul Erişim adresi: <https://ckk.com.tr/ders/antennapropag.pdf>

Kılıç, S., Alkan, R. M. 2018. Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye Değerlendirmeleri. *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*. Erişim adresi <https://doi.org/10.31006/gipad.417536>, 2018.

Kim, H., Kim, Y., Kim, B., Yoo, H.J. 2009. A wearable fabric computer by planar-fashionable circuit board technique. *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Washington, DC, USA, 03-05.

Krykpayev, B., Farooqui, M.F., Bilal, R.M., Vaseem, M., Shamim, A. 2017. A wearable tracking device inkjet-printed on textile”. *Microelectronics Journal*, 65(1), 40-48, 2017.

Kumar, J., Basu, B., Talukdar, F.A., Nandi, A. 2017. Graphene-Based wideband antenna for aeronautical radio-navigation applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 5071(11), 1-9, 2017.

Kuralay, A., Ertürk, E., Yıldırım, H. 2017. Mikrodalga ve radyo dalga enerji hasadı. Erzurum Teknik Üniversitesi. Erişim adresi: <http://ogrencidergisi.erzurum.edu.tr/>

Lee, J., Lim, S. 2011. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance. *Electronics Letters*, 47(1), 8-9.

Lee, J., Tejedor, E., Ranta-aho, K., Wang, H., Lee, K. T., Semaan, E., Mohyeldin, E., Song, J. , Bergljung, C., and Jung, S. 2018. Spectrum for 5G: Global status, challenges, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 12-18. “Spectrum for 5G: global status, challenges, and enabling Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 56 (3), pp. 12-18, 2018.

Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., Kim, C. K. 2010. Reversed Doppler effect in double negative metamaterials. *Physical Review B*, 81(24), 241102.

Olgun, U., Chen, C.C., Volakis, J.L., 2012. Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system. *IET Microw. Antennas Propag.*, 6(11), 1200–1206.

Pendry, J. B. 2000. Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.

Pinuela, M., Mitcheson, P.D., Lucyszyn, S. 2013. Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 61(7), 2715-2726.

Qin, J., Liu, Y., Grosvenor, R. 2017. A Framework of Energy Consumption Modelling for Additive Manufacturing Using Internet of Things. *Procedia CIRP*. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.procir>.

Ramahi, O. M., Almoneef, T. S. 2014. Can split-ring resonators be viable for electromagnetic energy harvesting?. In 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) (pp. 424-425). IEEE.

Ramahi, O. M., Almoneef, T. S., AlShareef, M., Boybay, M. S. 2012. Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 101(17), 173903.

Reason J. 1997. Managing the Risks of Organizational Accidents. Farnham: Ashgate.

Rojebuathong, S., Chindaudom, P., Luangtip, W., Horphatum, M., Eiamchai, P., Patthanasetthakul V., Limsuwan, P. 2008. Temperature Dependence of Optical Constants of Silver Film Studied by in situ Spectroscopic Ellipsometry, *Advanced Materials Research Vols 55-57*, pp 445-448, Doi: 0.4028/www.scientific.net/AMR.55-57.445

Sample, A., Smith, J, 2009. Experimental results with two wireless power transfer systems. *Proc. IEEE RWS*, 16– 18.

Shelby, R. A., Smith, D. R., Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.

Smith, D. R., Pendry, J. B., Wiltshire, M. C. 2004. Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 305(5685), 788-792.

Soltanmohammadlou, N., Sadeghi, S., Hon, C., Mokhtarpour, K. 2019. Real-time Locating Systems and Safety in Construction Sites: *A Literature Review*. Tehran, Iran. Faculty of Conservation and Restoration, University of Art.

Sun, K., Fan, R. H., Zhang, Z. D., Yan, K. L., Zhang, X. H., Xie, P. T., Pan, S. B. 2015. The tunable negative permittivity and negative permeability of percolative Fe/Al₂O₃ composites in radio frequency range. *Applied Physics Letters*, 106(17), 172902.

Tekir, O., 2009. Havada Yayınım Yapan Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etmede Verimliliği Etkileyen Faktörlerin Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Üner, İ., Gürcüm, B.H. 2019. Elektronik Tekstillerde İletken Mürekkep Uygulamaları. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 25(7), 794-804, 2019. Doi: 10.5505 / pajes.2019.55890

Veselago, V.G. 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, Jan.–Feb.

Wang, B., Teo, K. H., Nishino, T., Yerazunis, W., Barnwell, J., Zhang, J. 2011. Experiments on wireless power transfer with metamaterials. *Applied Physics Letters*, 98(25), 254101.

Wang, B., Yerazunis, W., Teo, K. H. 2013. Wireless power transfer: Metamaterials and array of coupled resonators. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1359-1368.

Weiland, T. 1977. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 31, 116-120.

Wheeler, H. 2011. Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* IEEE Trans. Microwave.

Yee, K. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14(3), 302-307.

Zhang, B., Tang, X., Zhang, J., Liu, C., He, D., Wu, Z. P. 2019. Long Read Range and Flexible UHF RFID Tag Antenna Made of High Conductivity Graphene-based Film. *Wuhan University of Technology, Wuhan, China (WILEY)*. DOI: 10.1002/mmce.21993

Zhao, Q., Zhou, J., Zhang, F., Lippens, D. 2009. Mie resonance-based dielectric metamaterials. *Materials Today*, 12(12), 60-69.

Zharov, A. A., Shadrivov, I. V., Kivshar, Y. S. 2003. Nonlinear properties of lefthanded metamaterials. *Physical Review Letters*, 91(3), 037401.

Zumbahlen H. 2008. Printed Circuit Board (PCB) Design Issues. In *Linear circuit Design Handbook*, Newnes: ch. 12.