

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÖNLENDİRİLMİŞ ELEKTROMANYETİK ENERJİ TRANSFERİ VE
GEREKLİ YÜKSEK GÜÇ İÇİN TORYUM REAKTÖRLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sabahattin Cihad YURT**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ömer USTA

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÖNLENDİRİLMİŞ ELEKTROMANYETİK ENERJİ TRANSFERİ VE
GEREKLİ YÜKSEK GÜÇ İÇİN TORYUM REAKTÖRLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sabahattin Cihad YURT
(504091065)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ömer USTA (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Tayfun Günel (İTÜ)
Doç. Dr. Belgin Emre Türkay (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

Son bir yıl içerisinde kaybettiğim dedeme ve anneanneme,

ÖNSÖZ

Çalışmamda her zaman fikirleriyle beni aydınlatan, her türlü desteği veren ve ofisini kullanımına açan değerli hocam Sayın Dr. Cahit Karakuş'a, fikirleriyle destek olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer USTA, Sayın Prof. Dr. Serhat ŞEKER ve Sayın Prof. Dr. Sıddık Yarman'a, tez yazımı ve araştırması sırasında kullandığım İTÜ merkez kütüphanesini yirmidört saat açık hale getiren İTÜ personeline ve tez yazımı sırasında beraber çalıştığım arkadaşım Serkan YILDIZ'a teşekkür ediyorum. Ayrıca maddi manevi desteklerini her an hissettiğim aileme en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs 2011

Sabahattin Cihad Yurt
(Elektrik - Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Özeti	3
2. YÖNLENDİRİLMİŞ ELEKTROMANYETİK ENERJİ.....	5
2.1 Elektromanyetik Fırlatıcılar	5
2.1.1 Neden elektromanyetik fırlatıcı?.....	6
2.1.2 Elektromanyetik fırlatıcılar kuramı.....	7
2.1.3 Elektromanyetik fırlatıcıların çeşitleri	9
2.1.3.1 Raylı elektromanyetik fırlatıcılar.....	9
Raylı fırlatıcılar kuramı.....	13
2.1.3.2 Sargılı elektromanyetik fırlatıcılar.....	16
2.1.3.3 Karma elektromanyetik fırlatıcılar.....	17
2.1.3.4 Doğrusal hareketli elektromanyetik fırlatıcılar.....	17
2.1.4 Elektromanyetik fırlatıcıların kullanım alanları.....	18
2.2 Yüksek Güçte Elektromanyetik Dalga Yayan Sistemler	19
2.2.1 Yüksek irtifa elektromanyetik darbe (YEMD)	19
2.2.1.1 Yüksek irtifa elektromanyetik darbe kavramının tanımı.....	19
2.2.1.2 YEMD'in bozucu etkisi.....	21
2.2.2 Yüksek güç mikrodalga (YGM)	22
2.2.2.1 YGM'lerin tanımlanması.....	23
2.2.2.2 YGM terminolojisi ve karakteristiği.....	24
Giriş Noktaları.....	25
Mikrodalga etkileri.....	25
Mikrodalga'nın yok ediciliği.....	26
“Önleme” terimi.....	26
“Bozma” terimi.....	26
“Zarar verme” terimi.....	27
“Yok etme” terimi.....	27
Hareket kabiliyeti.....	27
Hava durumundan etkilenmeme.....	27
Uzun menzil, ölçeklenebilen büyüklük.....	28
Mikrodalga kaynaklar ve antenler.....	28

2.2.2.3 YGM'lerin amaçlarına göre sınıflandırılması.....	28
Elektronik sistemlere yönelik YGM.....	28
Biyolojik hedeflere yönelik YGM.....	29
Dar bant sistemler.....	32
Orta bant sistemler.....	33
Aşırı orta bant sistemler.....	33
Yüksek bant sistemler.....	33
2.2.2.4 Sistem elemanları.....	35
İlk güç.....	37
Darbeli güç.....	40
Marx jeneratörü.....	45
Darbe keskinleştirme sistemi.....	46
Mikrodalga kaynaklar.....	48
Mod çevirici ve anten.....	50
2.2.2.5 Sistem sorunları.....	51
3. YÖNLENDİRİLMİŞ EM ENERJİ İÇİN TORYUM REAKTÖRLER.....	53
3.1 Toryum Elementi.....	54
3.2 Nükleer Yakıt Olarak Toryum.....	57
3.3 Likit Florit Toryum Reaktör.....	61
3.3.1 LFTR'nin çalışma şekli.....	61
3.3.2 LFTR'nin avantajları.....	65
3.3.2.1 Tamamen tükenmesi.....	68
3.3.2.2 Atık konusu.....	69
3.3.2.3 Maliyet durumu.....	70
3.3.2.4 Tehlikeli nükleer kullanımını önleme.....	71
3.3.2.5 Süreklilik.....	71
3.3.3 Kullanım alanları.....	72
4. YGM'LER İÇİN ANTEN SİSTEMLERİ VE EMD YAYILIMI	73
4.1 Anten Temelleri.....	73
4.1.1 Anten parametreleri.....	73
4.1.1.1 Anten kazancı.....	74
4.1.1.2 Anten ışıma yönelticiliği.....	74
4.1.1.3 Anten ışıma diyagramı.....	75
4.1.1.4 Anten ışıma açıklığı verimliliği.....	77
4.1.2 Parabolik antenler.....	77
4.1.2.1 Parabolik anten tasarım formülleri.....	79
4.2 YGM'lerde Anten Sistemleri	79
4.2.1 Darbant antenler	80
4.2.2 Genişbant antenler.....	80
4.2.3 Ultra genişbant (UWB) antenler	81
4.2.4 Darbe ışımalı dar huzmeli antenler	82
4.2.5 Geniş huzmeli antenler.....	82
4.2.6 TEM horn antenler	83
4.3 EMD Yayılımı	86
4.3.1 Tanımlama.....	86
4.3.2 Temel alan denklemleri.....	86
4.3.3 Serbest uzay yol kaybı.....	87
4.3.4 Verici gücünden elektrik alan şiddetinin hesaplanması	89
4.3.5 Alış gücünden elektrik alan şiddetinin hesaplanması	90
4.3.6 Elektrik alan şiddetinin alıcı devrenin giriş gerilimi cinsinden ifadesi.....	91

5. TEM HORN ANTEN TASARIM, SİMULASYON ve EMD HESAPLARI ..	93
5.1 Anten Tasarım	93
5.2 Simulasyon ve Sonuçlar	94
5.2.1 Antenin geri dönüş kaybı (Return Loss)	94
5.2.2 Antenin üç boyutlu uzak alan ışıma diyagram	95
5.2.3 Antenin iki boyutlu uzak alan ışıma diyagram	95
5.3 Parabolik Reflektör Tasarımı	98
5.4 EMD Yayılım Hesapları	100
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	107

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternatif Akım
BO	: Bant Oranı
dB	: Desibel
DBH	: Darbe Biçimlendirme Hattı
dB_i	: Desibel İzotropik
DBŞ	: Darbe Biçimlendirme Şebekesi
dBW	: Desibel Watt
DC	: Doğru Akım
DYA	: Darbe Yayan Anten
EIRP	: Equivalent Isotropically Radiated Power (Eşdeğer İzotropik Işıyan Güç)
EM	: Elektromanyetik
EMD	: Elektromanyetik Dalga
FSL	: Free Space Loss
IEME	: Intentional Electromagnetic Environments (İstemli Elektromanyetik Çevreler)
IEMI	: Intentional Electromagnetic Interference (İstemli Elektromanyetik Girişim)
IRA	: Impulse Yayan Anten
LFTR	: Likit Florit Toryum Reaktör
MeV	: Mega Elektron Volt
MHD	: Magneto Hidrodinamik
RF	: Radyo Frekans
SDIO	: Secure Digital I/O
TEM	: Transverse Electromagnetic
UWB	: Ultra Wideband
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)
Y_{bg}	: Yüzde Bant Genişliği
YEMD	: Yüksek İrtifa Elektromanyetik Darbe
YGM	: Yüksek Güç Mikrodalga
YGEM	: Yüksek Güç Elektromanyetik

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bant genişliğine bağlı sınıflandırma	30
Çizelge 2.2 : Yüksek güç dar bant sistem örneği	32
Çizelge 2.3 : Darbeli güç uygulamalarında kullanılan anahtarların özellikleri.....	43
Çizelge 3.1 : Dünyadaki ve Türkiye'deki toryum rezervleri	56
Çizelge 4.1 : Darbant YGM anten tiplerinin özellikleri	80
Çizelge 5.1 : Tasarlanan antenin parametreleri	93
Çizelge 5.2 : Kazancın farklı çap uzunluklarında değişimi.....	99
Çizelge 5.3 : 10 kW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı ...	101
Çizelge 5.4 : 100 kW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı .	102
Çizelge 5.5 : 1 MW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı ...	103
Çizelge 5.6 : 1 GW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Basit bir elektromanyetik fırlatıcının açık ve kapalı yapısı	7
Şekil 2.2 : Sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi.....	8
Şekil 2.3 : Sargılı fırlatıcının elektriksel eşdeğer devresi	8
Şekil 2.4 : Raylı ve sargılı fırlatıcıların şemasal olarak gösterimi.....	9
Şekil 2.5 : Raylı elektromanyetik fırlatıcının a) genel yapısı, b) fiziki yapısı,.....	10
c) örnek prototip	10
Şekil 2.6 : a)İnce tabakalı yapıda olan b)90mm 9MJ mesafeli c) top kalibreli	12
elektromanyetik fırlatıcı	12
Şekil 2.7 : Kavramsal fırlatıcı biçimi.....	12
Şekil 2.8 : Basit raylı fırlatıcı biçimi (Lorentz kuvvetine göre)	13
Şekil 2.9 : Raylı fırlatıcının beklenen ve elde edilen hızlarının karşılaştırılması.....	15
Şekil 2.10 : Sargılı elektromanyetik fırlatıcı a) genel yapı, b) tabanca prototipi	16
Şekil 2.11 : Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı.....	17
Şekil 2.12 : EM fırlatıcı yerleştirilmiş askeri savaş aracı, b)EM fırlatıcı kullanılan uçak fırlatma sistemi fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı.....	18
Şekil 2.13 : Elektromanyetik spektrum.	24
Şekil 2.14 : YGEM sınıflandırılması	31
Şekil 2.15 : Prototip bir DYA sisteminin fotoğrafı	34
Şekil 2.16 : Arayüz parametreleri bileşenleri birbirine bağlar.	36
Şekil 2.17 : Bir YGM sisteminde bileşen sınıfları arasındaki enerji akışı.....	37
Şekil 2.18 : Darbeli güce bağlı ilk güç için bağlantı parametreleri.	38
Şekil 2.19 : Sürekli güç için muhtemel ilk güç bileşeninin bağlantıları.....	38
Şekil 2.20 : Patlamalı mod güç için muhtemel ilk güç bileşeni bağlantıları	39
Şekil 2.21 : Patlamalı mod çalışmasının dört adımı	40
Şekil 2.22 : Mikrodalga kaynağa bağlanan darbeli güç için bağlantı parametreleri .	41
Şekil 2.23 : Hat modülatörünün şematik gösterimi.	42
Şekil 2.24 : Tesla transformatörü ve Marx generatörü arasındaki farka bakış.....	44
Şekil 2.25 : Tesla trafosunun birincil ve ikincil taraftaki gerilim dalga şekilleri	44
Şekil 2.26 : Marx jeneratörünün şematik gösterimi.....	46
Şekil 2.27 : Tesla transformatörü ve darbe keskinleştirme sistemi	47
Şekil 2.28 : Darbe hattında gerilim dalga şekli	48
Şekil 2.29 : Darbeli gücün mikrodalga kaynağa ve anten üzerine bağlanması için ..	49
bağlantı parametreleri. AD=açık devre	49
Şekil 2.30 : Kritik darbeli güç mikrodalga kaynağın arayüzü için verilen devre. Empedans bileşimi elektriksel girişi kaynağa tanımlar.....	49
Şekil 2.31 : Mikrodalga kaynağı anten bağlamak için bağlantı parametreleri.	50
Şekil 2.32 : Anten çıkış parametreleri mikrodalga huzmesinin ayrımını belirler.....	50
Şekil 2.33 : YGM ve darbeli geleneksel kaynaklar için gerilim ve empedans parametre uzayı	52

Şekil 3.1 : Torit kristali.	54
Şekil 3.2 : Bölünebilir madde oluşumunun döngüsü	57
Şekil 3.3 : Zincir reaksiyonun bir parçası olarak, Th 232 nötron yakalamasından,yeni yakıt (Th 233) üretme ve çoğaltma süreçlerinin yer aldığı gösterimdir. ..	58
Şekil 3.4 : Toryum yakıt döngüsü.....	59
Şekil 3.5 : Toryum ve uranyum yakıt çevrimlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 3.6 : Likit Florit Toryum Reaktör'ün şematik gösterimi	63
Şekil 3.7 : Likit Florit Toryum Reaktör'ün üç boyutlu şematik gösterimi	65
Şekil 3.8 : Hafif sulu uranyum yakıtlı reaktör ile Likit Florit Toryum Reaktör'ün şematik karşılaştırması	67
Şekil 3.9 : Radyoaktif atık zaman grafiği	70
Şekil 4.1 : Yatay ve düşey ışıma genişliği. (HG=Huzme genişliği)	75
Şekil 4.2 : Anten ışıma diyagram örneği	75
Şekil 4.3 : Eliptik alanlı anten ışıma diyagram örneği.....	76
Şekil 4.4 : Dikdörtgen alanlı anten ışıma diyagram örneği	76
Şekil 4.5 : Parabolik antenin yapısı.	78
Şekil 4.6 : Kutupsal koordinat sisteminde parabolik antenin ışıma diyagramı.	78
Şekil 4.7 : Genişbant YGM antenler için kullanılan klasik anten tipleri	81
Şekil 4.8 : Temel TEM horn antenin geometrik yapısı.....	83
Şekil 4.9 : TEM horn antenin geometrik yapısı (koaksiyel kablo ile).....	83
Şekil 4.10 : Paralel-plaka iletim hattı ile beslenen TEM horn anten	84
Şekil 4.11 : α ve β açılarının bir fonksiyonu olarak TEM horn antenin karakteristik empedansı Z_c	84
Şekil 4.12 : TEM horn antenin elektriksel uzunluğuna karşı giriş empedansı $Z=R+jX$. Örnek için $\alpha=47,30^\circ$, $\beta=20^\circ$ ve $Z_c=100\Omega$ 'dur.	85
Şekil 4.13 : $s/\lambda=5$ ile TEM horn antenin kazanç diyagramlarının değişimi için açıklamalar	85
Şekil 4.14 : Çeşitli ayırma açıları için Şekil 4.13'teki diyagramların üstüste koyulması	86
Şekil 4.15 : Serbest uzay yol kaybı.....	88
Şekil 4.16 : Alış gücü (dikey eksen) – uzaklık ilişkisi (yatay eksen)	89
Şekil 5.1 : Tasarlanan antenin a)yandan b)yandan açısal olarak c) önden geometrik görünümü	93
Şekil 5.2 : Tasarlanıp simulasyonu yapılan antenin geri dönüş kaybı.....	94
Şekil 5.3 : Tasarlanıp simulasyonu yapılan antenin üç boyutlu ışıma diyagramı.....	95
Şekil 5.4 : Antenin 1GHz'deki iki boyutlu yatay ışıma diyagramı	96
Şekil 5.5 : Antenin 1GHz'deki iki boyutlu dikey ışıma diyagramı	97
Şekil 5.6 : Tasarlanan parabolik reflektörlerin geometrik gösterimi	99

YÖNLENDİRİLMİŞ ELEKTROMANYETİK ENERJİ TRANSFERİ VE GEREKLİ YÜKSEK GÜÇ İÇİN TORYUM REAKTÖRLER

ÖZET

Bu tezde, günümüzde daha çok iletişim alanında uygulamaları olan elektromanyetik konusu farklı bir boyutta ele alınmaktadır. Son yıllarda, gündemde olan ve üzerinde birçok araştırma yapılan elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesi özellikle ülke savunma sistemleri için önemli bir konudur. Elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesi yeni bir konu olmamasına rağmen, gerektirdiği ileri teknoloji, yüksek güç gereksinimleri ve sistem maliyetleri gibi nedenlerle laboratuvarlarda uygulamaları yapılsa da pratik olarak kendisine çok fazla kullanım alanı bulamamıştır. Ancak gelişen teknoloji ile sistem verimlerinin artırılması mümkün olmakta ve gereken yüksek güçleri hareket kabiliyeti olacak şekilde sağlamak için alternatif sistemler önerilmektedir.

Tezin kapsamı içerisinde, elektromanyetik dalga oluşturularak yapılan elektromanyetik fırlatıcılar konusunun, günümüze kadar geçirmiş olduğu evreleri, temel çalışma yapısı, türleri ve kullanım alanlarına değinilmektedir. Bunun yanında yüksek güçte mikrodalga iletimi konusunun, temel elemanları, dünyadaki örnek sistemler, sistemin teorik yapısı ve yüksek güç gereksiniminin nedenlerine değinilmektedir. Her iki sistem için gereken yüksek gücü sağlamak için ise, dünya gündeminde de yeni bir konu olan Likit Florit Toryum Reaktör kullanımı önerilmekte ve sistemin yapısı ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmektedir. Ayrıca toryum yakıtlı reaktörlerin dikkatle incelenmesi gereken bir konu olduğu anlatılmaktadır. Tezin son bölümünde, elde edilen yüksek güçlü mikrodalgaların yönlendirilmesinde kullanılan anten sistemleri ele alınmış, örnek bir anten olarak reflektör ile birlikte bir TEM horn anten HFSS yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve yönlendirilen elektromanyetik dalganın yayılımına ilişkin hesaplar verilmiştir.

DIRECTED ELECTROMAGNETIC ENERGY TRANSFER AND THORIUM REACTORS FOR REQUIRED HIGH POWER

SUMMARY

In this thesis, we present a different approach to electromagnetic which has much more applications in communication sector. Recently, directing electromagnetic waves ,which are very interesting field for researchers, is very important issue for country's defense systems. Although directing electromagnetic waves are not a newly researched field, it cannot find much usage field practically due to required high technology, high power issue and system costs. However, it has been possible by increasing system efficiencies with improved technology and offering alternative systems to provide required high powers.

Within the scope of the thesis, it is discussed historical research processes, basic working structures and types and areas of use of electromagnetic launchers which are formed with electromagnetic waves. In addition, it is discussed the basic elements, developed model systems in the world, the theoretical structure of the system and the reasons for the high power requirement of high-power microwave transmission. For both systems, we offer usage of Liquid Fluoride Thorium Reactors (LFTR) to provide required high power and give detailed information about systems structure. It is also explained thorium-fueled reactors as a subject should be carefully considered. In the light of these informations, it is discussed antenna systems which are used to direct and transmit high power microwaves. A TEM horn antenna is designed with using HFSS software as a model antenna with designed reflector and given directed electromagnetic wave calculations.

1. GİRİŞ

Varlıkları milattan önceki çağlarda fark edilen elektrik ve manyetik alanlar, ancak teknolojinin de yeterli olgunluğa ulaşması ile birlikte çağımızda gün geçtikçe artan uygulama alanları bulmaktadır. Bu tezde, birçok başarılı uygulamasını iletişim alanında gördüğümüz ve uygulamaları sadece yüz yıllık bir geçmişe sahip olan elektromanyetik (EM) dalgalar, farklı bir bakış açısıyla “Yönlendirilmiş Elektromanyetik Enerji” başlığı altında ele alınmaktadır.[1] Elektromanyetik dalgaların kullanılması, ülke savunmaları için yeni bir uygulama alanı meydana getirmiştir. Elektromanyetik savunma, elektromanyetik spektrum veya yönlendirilmiş elektromanyetik enerjinin belirlenen hedeflere karşı veya karşı atakların önlenmesi amaçlı kullanılmasıdır.

1.1 Tezin Amacı

Yönlendirilmiş elektromanyetik enerji kavramı iki temel tür üzerine kurulmuştur. Ya EM dalga oluşturularak cisimler fırlatılmaya çalışılır ya da doğrudan EM dalga darbe veya mikrodalgalar olarak anten yardımı ile hedefe doğru gönderilir. Burada konunun doğasından gelen bir soru karşımıza çıkıyor; hedef menzili ne kadar olabilir? Klasik sistemleri incelediğimizde bu menzilin oldukça sınırlı olduğunu görmekteyiz. Ancak EM dalgalar kullanıldığında bu doğrudan kaynağınızın gücüne bağlıdır. Ne kadar çok güç sağlayabilerseniz o kadar uzaktaki bir hedefe ulaşabilirsiniz. Tabi burada bir diğer konuda bu cihazların uygun taşınabilir boyutlarda olmasıdır ki gerçekten büyük sorun teşkil etmektedir. Şimdiye kadar EM dalgaların yönlendirilmesi için gereken güç devasa kapasiteler veya jeneratörlerden sağlanıyordu. Bu şekilde çok yüksek güçlere ulaşmak mümkün olmadığı gibi hedef menzilide fazla olmuyordu. Büyük güçleri sağlamak beklenildiği gibi kolay bir iş olmadığından bu sorunu aşmak için ilk akla nükleer reaktörler ile bu sistemlere gereken ilk gücü verme fikri gelmiştir. Ancak burada geleneksel tip uranyum yakıtlı reaktörler kullanmak çok da mümkün olmadığından farklı bir fikir ihtiyacı doğmaktadır. Sonuç olarak Likit Florit Toryum Reaktör (LFTR) sahip olduğu birçok

avantajın yanında taşınabilir olabilmesi ve yüksek güçler sağlaması gibi özellikleri ile tezin konseptine uygun istenilen bir kaynak oldu.

Tezin ikinci bölümünde yönlendirilmiş elektromanyetik sistemler, EM fırlatıcılar ve yüksek güç yayan sistemler olmak üzere iki ana başlık altında anlatılmıştır. EM fırlatıcılar da kendi içinde raylı, sargılı, karma ve doğrusal hareketli fırlatıcılar olmak üzere dörde ayrılmıştır. EM fırlatıcılar başlığında, günümüze kadar geçirmiş olduğu evrelere, tarihsel gelişmelerine kısaca göz atılmakta ve EM fırlatıcılar kuramı, temel yapıları ve kullanım alanları verilmektedir. Yüksek güç EM dalga yayan sistemlerde kendi içerisinde yüksek irtifa EM darbe (YEMD) ve yüksek güç mikrodalga (YGM) olarak ikiye ayrılmıştır. YEMD konusunda ise ortaya çıkışı ve tanımlamaları yapılmakta, bunun yanında bozucu etkileri ele alınmaktadır. Tezde ağırlıklı olarak yer alan YGM başlığı altında ise, tanımlamaları terminoloji ve karakteristiği, sınıflandırılması, sistem elemanları ve sistem sorunları gibi başlıkları ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, bir önceki bölümde anlatılan sistemler için gereken yüksek gücü sağlayabilecek bir kaynak olan LFTR ele alınmaktadır. LFTR ilk defa Nobel ödüllü Cern profesörlerinden Carlo Rubia tarafından ortaya atılmıştır ve ilk uygulaması 2009 yılında gerçekleştirilmiştir, 2025 yılında ise seri üretime geçilmesi planlanmaktadır. Bu bölümde geleneksel tip reaktörlerden LFTR'lere gelen sürecin gelişimi, karşılaştırılması, LFTR'nin yakıtı olan toryumun bir element ve nükleer yakıt olarak incelenmesi, çalışma yapısı, avantajları ve kullanım alanları gibi konulara değinilmektedir.

Dördüncü bölümde, YGM sistemlerinde kullanılan genel anten türleri, genel anten parametreleri, parabolik antenler, YGM antenlerinde elektromanyetik dalga hesaplamaları denklemlerle anlatılmaktadır.

Beşinci bölümde ise, bir önceki bölümde anlatılan anten parametreleri ve YGM antenlerinden olan bir TEM horn anten tasarlanmış ve geliştirip simülasyonunu yaptığımız bu antene ait sonuçlar verilmektedir. Ayrıca bu antenin kazancı hesaba katılarak YGM'lerin güçlerini iletebildikleri mesafe hesaplamaları bir önceki bölümde anlatılan elektromanyetik darbe yayılım denklemleri kullanılarak yapılmaktadır. Son bölümde de sonuçlar ve konuyla ilgili önerilere yer verilmektedir.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde EM fırlatıcılar ve YGM'ler ile ilgili ağırlıklı olarak son on yılda yapılmış birçok araştırma ve kaynak olmasına karşın ülkemizde malesef bu konuda yapılmış yüzeysel birkaç araştırmanın dışında geniş kapsamlı bir çalışma yoktur. LFTR konusunda ise dünyada da yeni bir çalışma alanı olduğu için sınırlı sayıda yayın veya araştırma bulunmaktadır. Ülkemizde ise bu konuda yayınlanmış bir çalışma yoktur. Gelecekte ülke savunması açısından çok öncelikli olacak sistemleri işleyen bu tez, konu olarak ilgi çekici, güncel ve geliştirilmeye açık olduğundan ve Türkçe olması bakımından araştırmacıların faydalanacağı bir kaynak olacağı görüşündeyim.

2. YÖNLENDİRİLMİŞ ELEKTROMANYETİK ENERJİ

Yönlendirilmiş elektromanyetik enerji, hedefleri (biyolojik, elektronik devreye sahip cihazlar, askeri tesisler) geçici olarak devre dışı bırakmak ya da kalıcı ağır hasar vermek amacı ile elektrik, ısı veya mekanik enerjiyi boşlukta uzağa transfer etmek amacı ile güçlü enerji kaynağına sahip güçlü yayılım yapan sistemlerdir.

Bu bölümde yönlendirilmiş EM enerji iki ana başlık altında anlatılacaktır, ilki ivmelendirici sargılar, bu sargıları besleyen güç katından oluşan ve cisimleri fırlatan EM fırlatıcılardır. İkincisi ise yönlendirilmiş elektromanyetik enerji ile genellikle korunmasız elektronik sistemleri hedef alan yüksek güçte darbe veya mikrodalga yayan sistemlerdir.

2.1 Elektromanyetik Fırlatıcılar

Elektromanyetik fırlatıcılar ile ilgili çalışmalar, 1980'lerin öncesinden beri ABD'de ciddi olarak takip edilmektedir. İlk çalışma bir kaç gramdan daha ağır kütlelerin yüksek hızlarla fırlatılabileceğini göstermek için yapılmıştı. ABD Ordusu ve İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından gerçekleştirilen ilk başarılı fizibilite gösteriminin ardından, ABD'nin çalışmaları manyetik olarak kaldırılan trenleri içeren manyetik tahrik, elektromanyetik mancınıklar (katapult) kullanılarak uçakların fırlatılması, metallerin uzaya fırlatılması, küçük mermilerin aşırı yüksek hızlarda fırlatılması, füzyon reaktörleri için yakıt elde etmek amacı ile eritilerek elde edilen ufak toprak hızlandırılması vb. birçok konuda yaygınlaşmıştır.

Daha sonra 1985'lerde DARPA, ABD Denizcilik İşletmeleri ve ABD Ordusunun gelişmiş zırhlı savaş araçlarını yenilgiye uğratabilecek kapasiteye sahip arazi savaş araçları için elektromanyetik fırlatıcı teknolojilerini değerlendirmeye yönelmesiyle [2], ABD Savunma Bilimi Biriminin (DSB) desteği ile ABD'nin araştırmaları tekrar elektromanyetik fırlatıcılar konusuna yönelmiştir. Fakat bu yönelmede hâlihazırda kullanılabilen teknolojiler, SDIO (Güvenli Dijital Giriş Çıkış) 'nın belirlediği ihtiyaçları karşılamaktan uzak kalmıştır. Çünkü zırhlı araçları tahrip etmek amacı ile fırlatılacak mermilerin tüm uçuşları atmosferin yoğun olduğu yerlerde gerçekleşecek

olması nedeni ile fırlatma hızları, 3km/s ve aşağısına limitlenmiş durumda kalmıştır. Bu ise elektromanyetik fırlatıcıların ağır savaş araçlarının önündeki zırhlarını delme (tahrip etme) kabiliyetini zorlaştıran bir etkidir. Bu nedenle sonraki elektromanyetik fırlatıcı sistemlerinde yüksek verim amaçlı, raylı sistemlerden fırlatmalar için plazma armatürleri yerine katı armatürler seçilmiştir. Potansiyel güç kaynakları olarak da kondansatörler ve darbeli alternatörler kullanılmıştır [1].

2.1.1 Neden elektromanyetik fırlatıcı?

Tipik olarak itici güçlü sistemlerin namlu hızı saniyede 2,000 metre olarak sınırlanmıştır. Bu da doğal olarak fırlatıcıyı namluya süren yaygın gaz kullanımıyla sınırlıdır. Namlular, itici yanma ürünlerinin (normal olarak CO₂ ve NO_x) yüksek genleşme oranı için gereken sıcaklık ve basınçlara kolayca dayanamazlar. Yüksek hızlı sistemler için bir diğer girişimde diferansiyel pistonlar kullanmaktır. (geniş olan metan ve oksijen yanmasıyla sürülür, küçük olan ise sürülen gazın basıncı için bağlanır). Bu konuda bazı iyi sonuçlar alınmasına rağmen, kullanılan aletler hala oldukça hantal ve hızları limitlidir. Yörüngesel fırlatma için özel olan bazı uygulamalarda bunlar yeterli olmamıştır. (yeryüzünden çıkış hızı 11,200 m/s) dir [2].

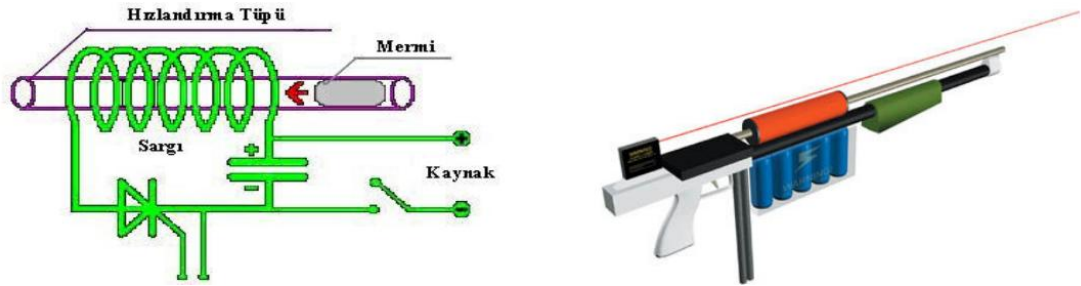
Elektromanyetik fırlatıcılar, tüm hızlandırıcı güçlerini elektromanyetik dalgaların ve güçlü elektrik akımların etkileşimi ile sağladıkları için nesneleri çok yüksek hızlarda itebilirler. Geleneksel sistemler ve roketler itici kimyasalların yanması ile maddeleri hızlandırır. Gazları yakarak itme yüksek sıcaklık ve basınç getirir (geleneksel sistemlerde) veya yüksek yanan gaz itici gücü oluşturmak için hızı düşürür (geleneksel roketlerde). Yanan gazların içerisindeki moleküllerin boyutuna bağlı olarak itici güç sağlayan yanma ile hız elde edilebilir. Pratik olarak bu sınırlı hız yüksek performanslı sistemler için yaklaşık 2km/sn dir (1.5 km/sn kara ordusunun 120mm lik tankının hızı olmak üzere). Buna karşın elektromanyetik enerji kullanılması ile oluşturulan sistemler laboratuvar ortamında 6-7 km/sn hızında nesneleri hızlandırmışlardır. Alçak yörüngede nesneleri hızlandırmak için gereken hız ise yaklaşık olarak 6.5 km/sn'dir [2].

Elektromanyetik raylı bir fırlatıcı için gereken teknoloji yıllardır var, ancak çok yüklü güç gereksinimleri, geçmişteki girişimlerin heyecanını yok etmişti. Hiçbir araç, bu sistemi ateşleyecek veya saklayacak elektrik enerjisine sahip değildi. Son günlerde başta ABD olmak üzere yapılan birçok araştırmanın amacı, onlarca kg'lık

bir mermiyi yüzlerce km ötedeki hedefe göndermektir. Bunun için sağlanması gereken yüksek güçler için de çeşitli öneriler mevcuttur. 3. Kısımda gereken yüksek gücü sağlamak için kullanılabilecek bir sistem tartışılacaktır.

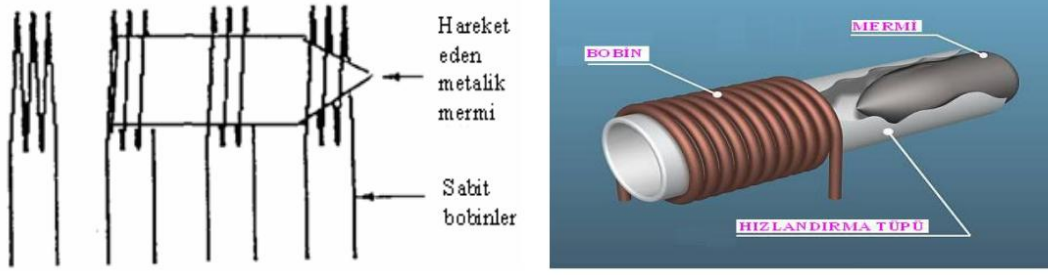
2.1.2 Elektromanyetik fırlatıcılar kuramı

Elektromanyetik fırlatıcıların temel prensibi, Faraday'ın temel kanunları ve Lorentz kuvveti olarak isimlendirilen, B kuvvetinin manyetik alanına maruz kalan elektrik akımı taşıyan iletken tel gibi diğer gözlemlere dayanmaktadır. Gerçekleştirilmek istenen durum, değişen ya da hareket eden güçlü bir elektromanyetik alan yaratarak, hareket ettirilecek ya da fırlatılacak nesnenin bu elektromanyetik alanı takip etmesini sağlamaktır. Kuramsal olarak elektromanyetik alanın hareket etme hızında bir sınır olmadığı için, itici kuvvetin hızına ulaşması beklenen durumda, hızlandırılan nesne için de bir hız limiti yoktur. Bu tip uygulamaları bu denli ilginç kılan özellik de gelişmeye açık olmasıdır. Şekil 2.1 de basit bir elektromanyetik fırlatıcının açık ve kapalı yapısı gösterilmiştir [1-2].



Şekil 2.1 : Basit bir elektromanyetik fırlatıcının açık ve kapalı yapısı [1]

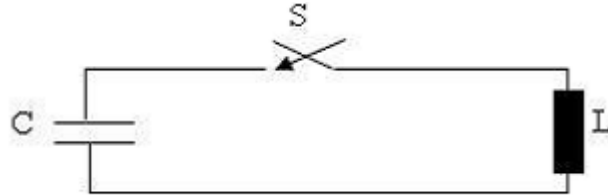
Hareket eden elektromanyetik alan ile nesneleri hareket ettirmek ilkesinden yararlanarak, farklı tipte uygulamalar yapmak mümkündür. Aslında bu yeni değildir; günlük hayatta sık kullandığımız elektrik motorları bunun çok genel uygulamalarıdır. Bu fırlatıcı türünde asenkron motorlarda olduğu gibi, elektromıknatıslara benzer bir yapı kullanılmaktadır. Bir sargıdan akım aktığında sargının çevresinde manyetik alan oluşturacaktır. Sargının iç hacminde bu manyetik akı yoğunlaşacaktır. Metalik bir cisim (mermi) sargının yakınına yerleştirilecek olursa manyetik akı, düşük relüktanslı olması nedeniyle bu cisim içinden akmayı tercih edecek ve manyetik indüksiyon oluşturarak cismi içine çekecektir. Şekil 2.2 de sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi verilmiştir [1].



Şekil 2.2 : Sargılı fırlatıcının ilkesel gösterimi [1]

Tek bir sargı kullanmak yerine, yan yana dizilmiş belirli sayıda sargılar kullanıldığında ve içinde hareket eden cismin hızına da bağlı olarak uygun bir hızda “elektrik akımın tetiklenmesi (ateşleme)” gerçekleştirildiğinde, fırlatma işlemi yapılmış olacaktır. Şekil 2.2 deki sargıdan akım geçirildiğinde, sargı içinde oluşan elektromanyetik alan mermiyi içine doğru çekmek isteyecektir. Bu noktadan hareketle, yan yana dizilmiş ve sıra ile akım verilen sargılar mermiyi içlerine çekerek hızlandıracaklar ve sargıların bittiği yerde kazandığı kinetik enerji ile mermi dışarı fırlatılacaktır [1].

Bu fırlatıcının elektrik eşdeğer devresi, temelde bir anahtar üzerinden paralel olarak bağlanmış bir sargı ve bir kondansatörden ibarettir. Bu elektriksel eşdeğer devresi Şekil 2.3’de gösterilmiştir [1].



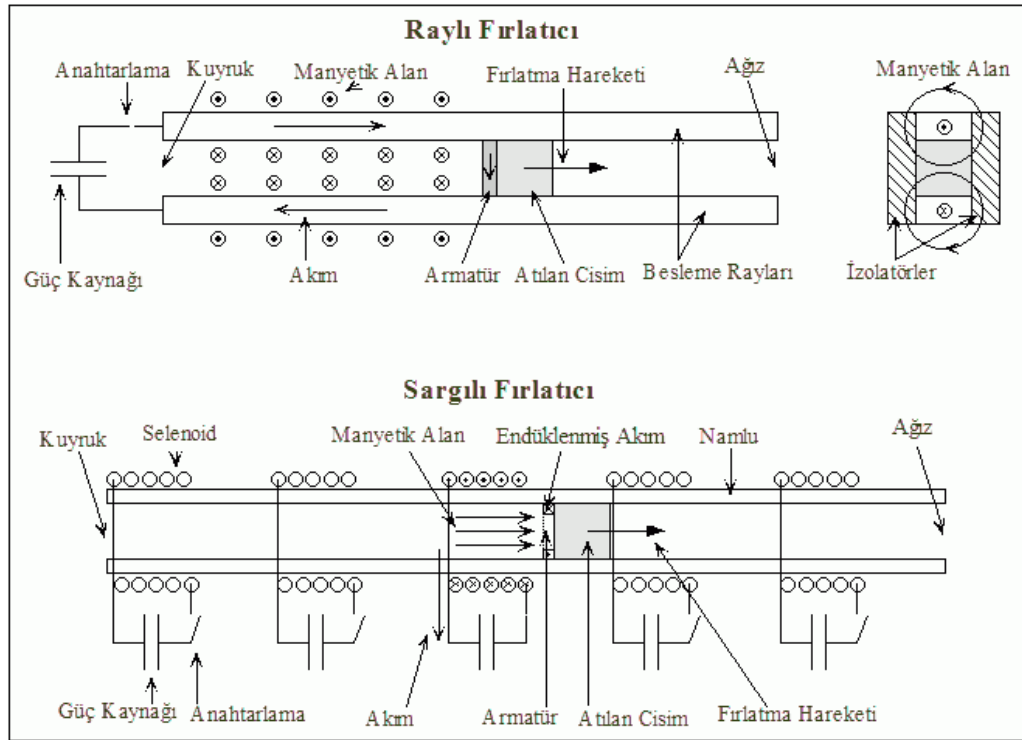
Şekil 2.3 : Sargılı fırlatıcının elektriksel eşdeğer devresi

Şekil 2.3’deki devre oldukça sade olup, sargıdan tekrar kondansatöre akacak ters (negatif) akım, aynı devreden birden fazla bağlanması durumunda, tetikleme zamanının ayarlanması gibi ihtiyaçlardan dolayı devreye bazı ilave elemanların da bağlanmasını zorunlu kılar [1].

Şekil 2.3’deki devreden görüleceği gibi elektromanyetik fırlatıcılarda kullanılan sargıdan dolayı indüktans ve direnç, sargıyı besleyen kapasiteden dolayı seri bir RLC devresine benzemektedir. Dolayısıyla elektromanyetik fırlatıcıları incelerken RLC devrelerinin özelliklerini de dikkate almak gerekir. Seri RLC devreleri, çoğu yüksek gerilim ve darbeli boşalma devrelerinde öncelikli bir modeldir [1].

2.1.3 Elektromanyetik fırlatıcıların çeşitleri

Raylı ve sargılı fırlatıcılar olmak üzere iki temel elektromanyetiğin kullanıldığı tip tanımlanmıştır. Her ikisi de armatüre doğru yüksek elektrik alan ve geniş manyetik alan üretmek için depolanmış enerji kaynaklarını kullanır. Armatürü iten gücü manyetik alan ile akımın etkileşimi üretir (ve herhangi bir mermi, cisim vb. bağlanır) [3]. Bunların yanında çok yaygın olmayan karma ve doğrusal hareketli fırlatıcılarda vardır. Şekil 2.4'te raylı ve sargılı elektromanyetik fırlatıcıların şemasal gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4 : Raylı ve sargılı fırlatıcıların şemasal olarak gösterimi [3]

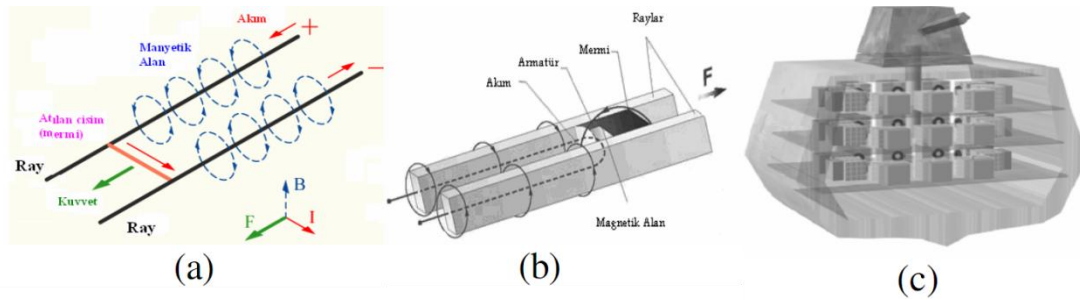
2.1.3.1 Raylı elektromanyetik fırlatıcılar

Elektromanyetik fırlatıcı olarak tanımlanan raylı fırlatıcılar fikir 1800'lü yıllardan bu yana araştırılmış ve geliştirilmiştir. Raylı elektromanyetik fırlatıcılar metal iki ray kullanılarak bu raylar arasındaki cismin, üzerinde (daha çok ufak kütlelerin) oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile fırlatılması ilkesine dayanır [1]. Bu tip fırlatıcıların oldukça basit bir kavramı vardır. Bir elektromanyetik fırlatıcı mermiyi ateşlemek için büyük bir Lorentz kuvveti kullanır [4].

Yalıtkan ile birbirine sertçe bağlanmış paralel iki iletken ray arasında konumlanmış iletken bir armatürden oluşmaktadır. Bir enerji kaynağına (ya bir kapasite ya da eşuzaylı jeneratör) bağlanması ile rayların birinden aşağı armatüre doğru ve diğer rayın üzerinden kaynağa doğru geri akım akmasına neden olur. Raylardaki manyetik alan içerisindeki armatüre doğru akan akım armatürü rayın aşağısına doğru iten bir kuvvet oluşturur [3].

Elektromanyetik itici bir sistem olarak raylı fırlatıcıların genel tanımı, raylı fırlatıcı bir mermiyi itmek için elektromanyetik etkileşimleri kullanan fırlatıcı bir sistemdir. Raylı fırlatıcı aynı zamanda mermiyi sabit bir şekilde ve doğru bir hat içerisinde hızlandırabilen elektromanyetik doğrusal hızlandırıcı olarak da adlandırılmaktadır (doğrusal hızlandırma) [4].

Raylı fırlatıcılarda ray malzemesi olarak çoğunlukla bakır kullanılmakla beraber, yüksek etkinlikli raylı fırlatıcılar için daha yüksek iletkenlikli, daha yüksek mekanik dayanımlı ve mega amperler mertebesindeki akımları taşıyabilecek daha özel çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Raylı fırlatıcılar konusunda ray direnci ile ilgili olarak raylarda oluşan ısınma nedeni ile ray ömrü, ray oyuk geometrilerinin verimliliğe etkisi vb. birçok konuda çalışmalar devam etmektedir. Şekil 2.5 de raylı fırlatıcıların genel yapısı ve gemilerden güdümlü mermilerin aşırı hızlarda fırlatılarak uzak kıyılardaki askerlere destek verilmesini sağlayacak örnek bir raylı fırlatıcı prototip gösterilmiştir [1].



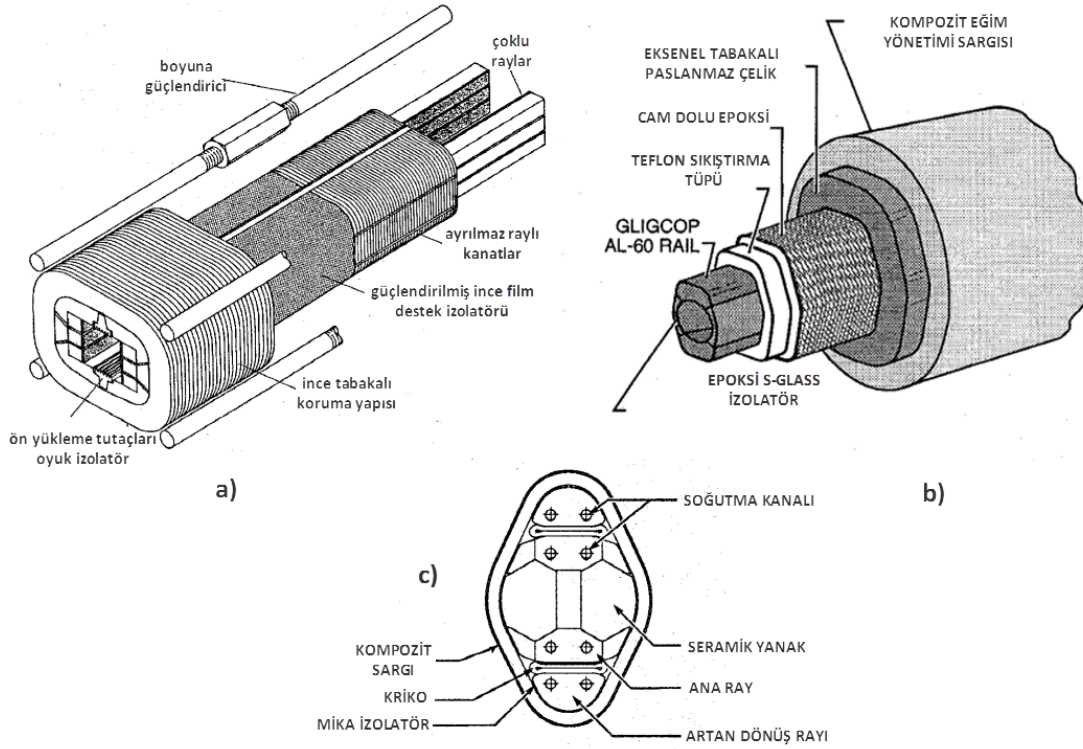
Şekil 2.5 : Raylı elektromanyetik fırlatıcının a) genel yapısı, b) fiziki yapısı, c) örnek prototip [1]

Raylı fırlatıcıların ana problemi raylar ile armatür arasında kayan elektrik bağlantısıdır. Eğer armatür katı iletken metal olursa, yüksek akımlar onu raylara kaynak yapmak için çoğu kez yeterli olacaktır. Bunun için bulunan çözümlerden bir tanesi, uygulanan akım kadar yakın bir plazma armatür formunda buharlaşan çok

ince bir alüminyum armatürü kullanmaktır. İnci problem ise harekete dönüşen uygulanan enerjinin önüne geçebilmek için raylar arasında atlama oluşmasıdır [3].

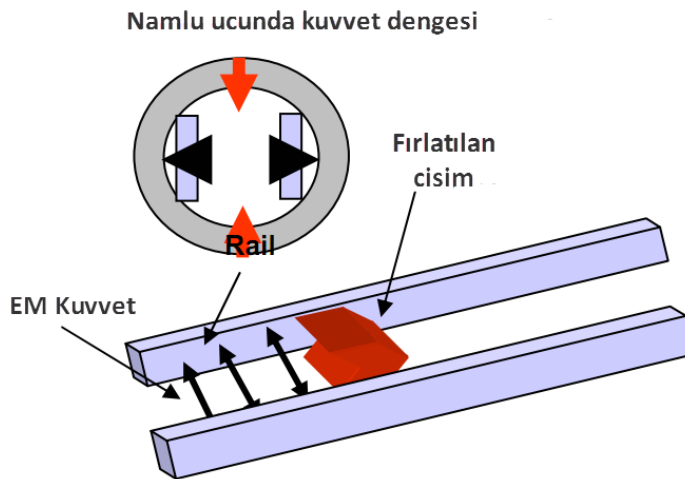
Raylı fırlatıcıyı ateşlemek için güç kaynağı kısa süreli büyük bir akım sağlamak zorundadır. Aynı zamanda gereken akımı sürmek ve armatürden geriye doğru herhangi bir elektromanyetik alanı bastırmak için gereken yeterli yüksek gerilimde çalışmalıdır. Kurşun-asit benzeri DC kaynaklar kısa süreli birkaç bin amper seviyelerine ulaştırabilirler. Fakat gereken akım ve gerilimi sağlamak için daha büyük miktarlara ihtiyaç olduğu için büyük bir sistem için pratik değildir. Kapasiteler ve kompülsatörler çok büyük miktarlarda enerjiyi depolayabilir ve yüzlerce kiloamperi iletebilirler. Kapasiteler elektrik alan üzerinden enerji depolarlar; kompülsatörler çarktaki mekanik enerjiyi depolarlar. Kompülsatör “kompanze darbe üretici” anlamına gelmektedir (Compensated Pulsed Alternator). Kompülsatör enerji depolamak için yüksek enerji yoğunluklu çark ve hızlı akım yükselmesine izin vermesi için çok düşük endüktanslı jeneratör kullanmaktadır. Kompülsatör raylı fırlatıcıyı birkaç kez ardarda ateşlemek için gerekli enerjiyi depolayabilir. Kondansatörler ise her atışta enerjinin hepsini kullanır ve her atıştan sonra tekrar şarj edilmesi gerekir. Kompülsatörler kondansatörlere göre genellikle birim hacim başına daha fazla enerji depolayabilirler [5].

Geçmişte dizayn edilip yapılmış üç farklı elektromanyetik fırlatıcı şekil 2.6’da gösterilmiştir. İlki ince tabakalı çelik namluya sahip olan, ikincisi 90mm 9MJ mesafeli sistem, diğeri ise top kalibreli elektromanyetik fırlatıcıdır. Elektriksel olarak sökölüp takılması kolay olan birçok benzer ince tabakalı namluya sahip fırlatıcı laboratuar ortamlarında oluşturulup kullanılmıştır. İnce tabakalı çelik yapı raylar ve izolatörler için iyi bir çevresel sertlik ve sınırlama sağlamaktadır. Fakat taktiksel operasyonlarda çok ağırdırlar. 90 mm 9MJ sistem ise ince tabakalı çelik çekirdeğin aksenel sertlik ve güç için bileşik kullanan farklı versiyonudur. top kalibreli elektromanyetik fırlatıcı da fırlatma esnasında kişisel bağlantı bileşenlerini tutmak için önstres mekanizması gibi çelik bir kat kullanmaktadır [6-9].



Şekil 2.6 : a)İnce tabakalı yapıda olan b)90mm 9MJ mesafeli c) top kalibreli elektromanyetik fırlatıcı [6-9]

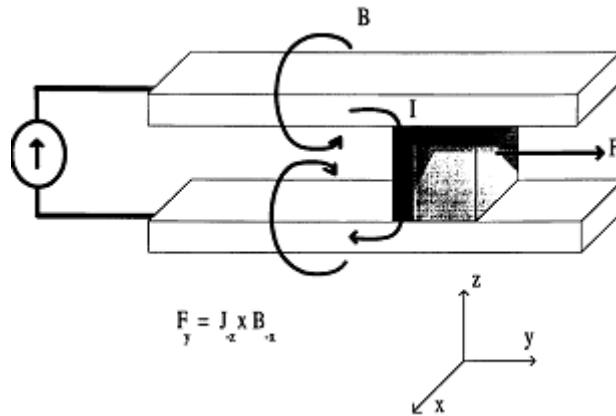
Yapısal dizayn ve geometrileri oldukça farklı olsa da, farklı dizaynlar ve biçimlerde bazı benzerlikler göze çarpmaktadır. Raylara yükleme koşulları temelde uyguladıkları yöntemler aynıdır. Şekil 2.7 raylı fırlatıcılarda yükleme koşulları ve fırlatıcı oyuğunun biçimi şematik olarak gösterilmektedir. Yükleme koşulları genelde birçok raylı fırlatıcı dizaynı için benzerlik gösterir.



Şekil 2.7 : Kavramsal fırlatıcı biçimi [10,11]

Raylı fırlatıcılar kuramı

Raylı fırlatıcıların temel fiziksel planı çok basittir. Birçok temel raylı fırlatıcılarda daha öncede bahsedildiği gibi iki iletken ray, bir akım kaynağı ve bir armatür bulunmaktadır. Rayların birinden armatüre ve diğer raydan kaynağa doğru geri akan akımın basit kurulumu Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bir raylı fırlatıcı kaynaktan aldığı elektromanyetik enerjiyi mermiye kinetik enerji olarak dönüştürür. Enerji transferi çok iyi bir şekilde gerçekleşir [12].



Şekil 2.8 : Basit raylı fırlatıcı biçimi (Lorentz kuvvetine göre) [12]

Lorentz kuvveti denklemi şu şekilde yazılır;

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

burada F=kuvvet birimi N, q=elektrik yükü birimi C, E=elektrik alan birimi V/m, V=hız birimi m/s ve B=manyetik akı birimi Tesladır. Bir raylı fırlatıcıda, elektrik alanın etkisi manyetik alanın oluşturduğu güçle mukayese edildiğinde çok küçük olduğundan görmezden gelinebilir. Raylardaki akım tarafından oluşturulan manyetik akı, armatürde bir güç oluşturmak için elektrik akımın hareketi ile etkileşime girer. Bu kuvvet, akı ve yük hareketinin her iki doğrultusu için düşey doğrultuda yükün hareketine göre davranır ve armatür üzerinden mermiye transfer edilir.

Mermi üzerindeki güç için yazılan denklem raylara doğru akan akım ve rayların geometrisi gibi birçok şeye bağlıdır. Mermideki kuvvet için (2.1)’den elde edilen basitleştirilmiş denklem aşağıda verilmiştir;

$$F = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (2.2)$$

burada F = kuvvet birimi N, L' = raylardaki metre başına endüktans değeri birimi H/m ve I = armatürdeki akım birimi A. Şunu söylemek gerekir ki burada güç hala vektörel bir büyüklüktür fakat gücün sadece bileşeni z yönündedir. Mermi hızının beklenen değeri denklem (2.3)'den elde edilebilir. $F=ma$ olduğundan, merminin hızlanması için gereken denklem şu şekildedir;

$$a = \frac{I^2}{2m} L' \quad (2.3)$$

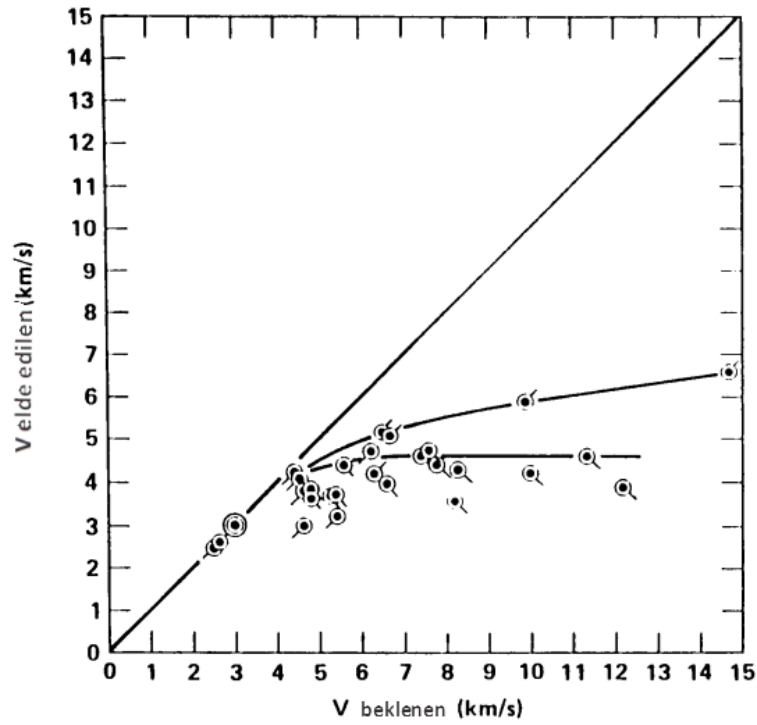
burada m , merminin kg cinsinden kütlesidir. Hız, zamana göre hızlanmanın basit integralidir.

$$v = \int_0^{\tau} \frac{I^2}{2m} L' dt = \frac{I^2}{2m} L' \tau + v_0 \quad (2.4)$$

burada v =hız birimi m/s, v_0 = başlangıç hızı birimi m/s ve τ = akım darbesinin süresi birimi saniyedir. Bu denklem merminin kütlesini ve akım darbesinin her ikisini de sabit olarak kabul eder. Aynı zamanda plazma armatürdeki yapışık sürtünme kuvvetlerini ve merminin sürtünme kuvvetini görmezden gelir. Gerçekte, raylı fırlatıcı yükü için akım darbesi nadiren sabit olur ve merminin kütlesi plazma armatür içine süpürülen namlunun ağzından kesilen maddeler nedeniyle artar. Raylı fırlatıcı içerisindeki kayıpları içeren daha eksiksiz denklem şöyledir;

$$v = \frac{1}{m} \int \left(\frac{L' I^2}{2} - F_a - F_d - F_p \right) dt \quad (2.5)$$

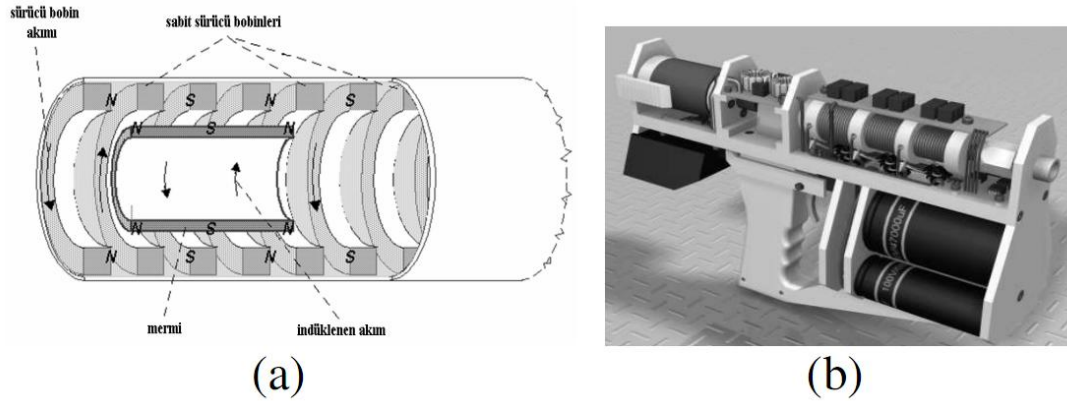
burada F_a = kesim gerileme kuvveti, F_d =yapışık gerileme ve F_p = arkaplan gazı nedeniyle oluşan kuvvet. F_a , F_d ve F_p kuvvetleri komplekstir ve birçok değeri içerir. Bu terimlerin detaylandırılmış denklemleri referans [13]'da verilmiştir. Denklem 2.4, yaklaşık 4.5 km/s'ye kadar ola mermi hızı tahminini oldukça düzgün yapmaktadır. Daha düşük hızlarda, raylı fırlatıcılar ideal duruma nispeten yakın davranırlar, fakat yüksek hızlarda, raylı fırlatıcıların performansı düşer. Bu performans düşmesinin kanıtı Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Performanstaki bu azalma "hız doygunluğu" olarak adlandırılır. Şekil 2.9 Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarında üç küçük (yaklaşık 1cm) yuvarlak namlulu raylı fırlatıcı için düzenlenmiştir. Düz çizgi ideal raylı fırlatıcı hızını gösterir. Diğer sağa doğru olan iki çizgi ise deneysel sonuçlardan alınmıştır. Üsteki çizgi iki 1.6 m raylı fırlatıcının verilerini gösterir. Altındaki ise 5.2m'lik raylı fırlatıcının verilerini gösterir [12].



Şekil 2.9 : Raylı fırlatıcının beklenen ve elde edilen hızlarının karşılaştırılması [12]

2.1.3.2 Sargılı elektromanyetik fırlatıcılar

Sargılı fırlatıcılar ardışık sürücü sargılar kullanılarak oluşturulan elektriksel itme kuvveti ile bu sargılar arasındaki cismin fırlatılması ilkesine dayanır. Sargılı fırlatıcılar daha çok orta hızlarda fakat büyük kütleli cisimlerin fırlatılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Şekil 2.10 da sargılı fırlatıcıların genel yapısı ile örnek bir sargılı fırlatıcı tabanca prototipi gösterilmiştir [1].



Şekil 2.10 : Sargılı elektromanyetik fırlatıcı a) genel yapı, b) tabanca prototipi [1]

Sargılı fırlatıcılar doğrusal endüksiyon motoru gibi çalışır. Bir dizi selenoid sargı, fırlatıcının namlusunun içinde hareket eden bir manyetik alan oluşturmak için depolanan elektrik enerji kaynağına sıralı olarak bağlanır. Süratle değişen manyetik alan halka şeklindeki armatürde akım oluşturur, yön olarak selenoiddeki akıma ters yöndedir. Selenoidin manyetik alanı içinde armatürde oluşan akım, armatürü namluya iten bir kuvvet üretir [3].

Bir sargılı fırlatıcı uygun verimlilikte işlev gördüğü için, selenoidler armatür solenoitten çıkıyor gibi akım verilmiş olmalıdır. Optik veya endüktif olarak armatürün konumunu hisseden ve hızlı yarıiletken anahtarlara dayanan çeşitli zamanlama ve belirleme devreleri tanımlanmıştır. Bunların hepsi yararlı yük için ihtiyaç duyulan akım seviyesinde engelleyici derece pahalı olur [3].

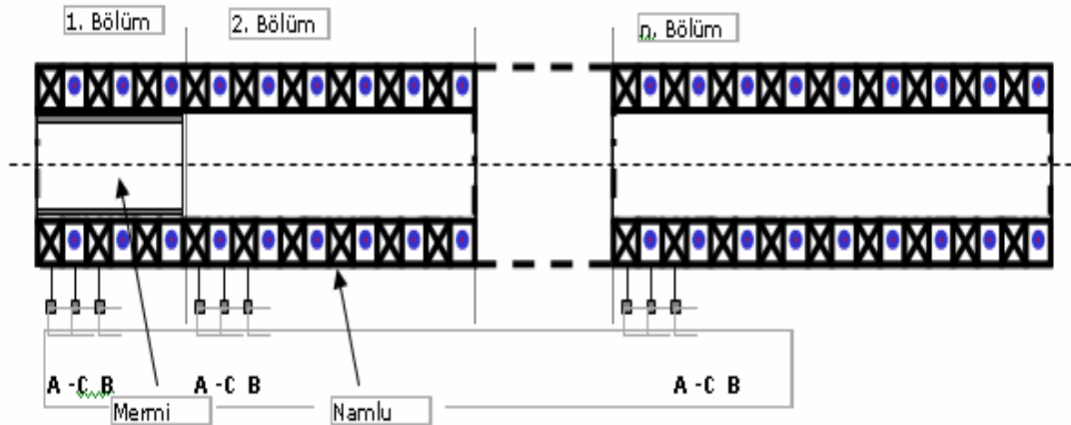
Sargılı fırlatıcıların raylı fırlatıcılara göre temel üstünlükleri mevcut mekanik zorlanmanın daha geniş bir yüzeye yayılmış olması, mermi ve namlu arasındaki temassızlık nedeni ile uzun ömür ve daha yüksek verim olarak sayılabilir. Sargılı fırlatıcılar tek ya da çok bölmeli sargı yapıları kullanılarak üretilebilirler [1].

2.1.3.3 Karma elektromanyetik fırlatıcılar

Karma fırlatıcılar, yapılarında hem raylı hem de sargılı fırlatıcıları bulunduran sistemlerdir. Karma fırlatıcılar, yüksek akımlara ihtiyaç duyan raylı fırlatıcılar ve yüksek maliyetlerle gerçekleştirilebilen sargılı fırlatıcılara karşı en büyük üstünlüğü aynı sonuçlara ulaşmak için daha az akıma ihtiyaç duymalarıdır. Yine karma fırlatıcıların tasarımları ve gerçeklenmelerinin raylı ya da sargılı fırlatıcılara karşı daha basit olduğu belirlenmektedir [1].

2.1.3.4 Doğrusal hareketli elektromanyetik fırlatıcılar

Doğrusal hareketli fırlatıcılar, asenkron motor prensibine göre çalışan hava nüveli sargılı fırlatıcılardır. Namludaki sargılar, çok fazlı (3, 5 veya daha fazla) alternatif akım kaynağından beslenerek namluda seyahat eden dalga oluşması sağlamaktadır. Mermi kapsülü ise içi boş bir alüminyum tüpten oluşmaktadır. Enerji kaynağı olarak kapasitör grupları veya motor/jeneratör sistemi kullanılmaktadır. Enerji verimliliğinin artırılması için namlu birden fazla bölüme ayrılabilir. Her bölüm farklı frekanslara sahip enerji kaynakları tarafından beslenmektedir. Bir bölümdeki enerji kaynağının frekansı, bir önceki bölümden daha yüksektir. Şekil 2.11 de üç fazlı çok bölmeli bir doğrusal hareketli fırlatıcı yapısı gösterilmiştir [1].

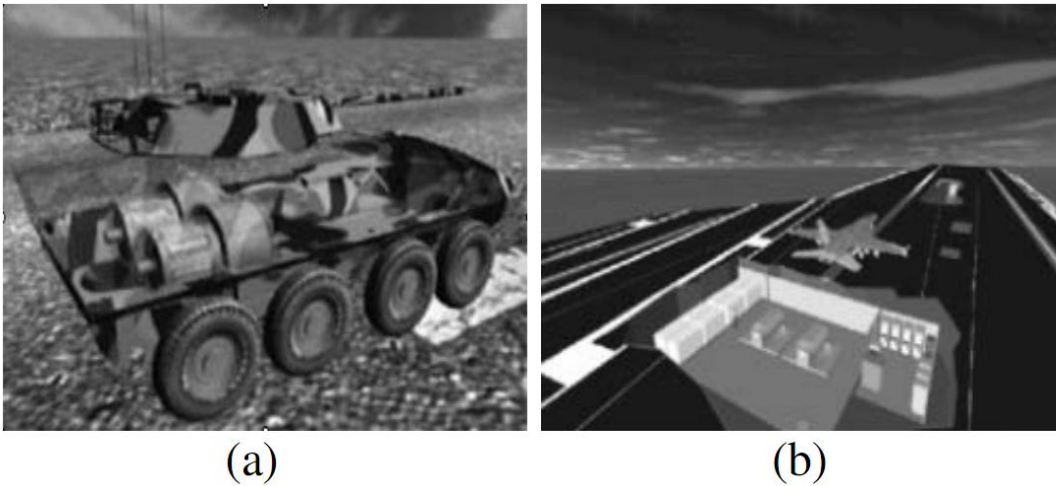


Şekil 2.11 : Üç fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı[1]

Yukarıda bahsedilen fırlatıcılardan başka elektrotermal-kimyasal (ETC) fırlatıcılar da mevcut olup, bu tür fırlatıcılar uygun bir maddenin elektromanyetik enerji ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin oluşturduğu itme kuvveti ile çalışır. Ayrıca ETC'ler ile raylı ve sargılı fırlatıcıların birlikte kullanıldığı karma sistemler mevcuttur [1].

2.1.4 Elektromanyetik fırlatıcıların kullanım alanları

Son yıllarda özellikle ABD’de, elektromanyetik fırlatıcı bilimi ve teknolojisi yeni bir ilerlemenin eşiğindedir. Bu ilerleme yüksek ve çok yüksek hızlı elektromanyetik fırlatıcılardaki yeni gelişmelere paralel olarak, gelişmiş EM enerji kullanan sistemler için önemli bir adım olmuştur. Elektromanyetik fırlatıcıların kullanıldığı EM enerji kullanan sistemleri, uçak gemilerinden uçakların kaldırılması (fırlatılması), güdümlü ateşleme sistemlerine karşı koruma sağlanması, mermilerin olağanüstü menzillerde fırlatılması, askeri araçlara uygulanabilen elektromanyetik zırh koruma sistemlerin geliştirilmesi, denizaltı ve gemilerden torpido fırlatılması, zırh delme yolu ile zırhlı sistemlerin bozguna uğratılması vb. birçok uygulama alanına sahiptir. Bu bağlamda elektromanyetik fırlatıcı teknolojileri geleneksel ateşleme ve füze sistemlerine karşı esas tehlike ve önemli bir rakip olarak gösterilmektedir. Şekil 2.12 de elektromanyetik fırlatıcıların kullanıldığı sistemler gösterilmektedir [1].



Şekil 2.12 : EM fırlatıcı yerleştirilmiş askeri savaş aracı, b)EM fırlatıcı kullanılan uçak fırlatma sistemi fazlı çok bölmeli doğrusal hareketli fırlatıcı [1]

2.2 Yüksek Güçte Elektromanyetik Dalga Yayan Sistemler

Bu bölümde iki farklı elektromanyetik etki yapan sistemden bahsetmek mümkündür. Bunlardan ilki Yüksek İrtifa Elektromanyetik Darbe (YEMD) olarak adlandırılır. YEMD aslında 1962 yılında Amerika'nın atmosferin 30 km üstünde bir nükleer bomba denemesiyle başladı. Patlamanın neden olduğu gamma ışıması 1200 kilometre uzaklıktaki radyo istasyonlarını bile kullanılmaz hale getirdi. İstasyonların devre dışı kalması bir saniyeden daha az sürede hiçbir insanın zarar görmemiş olması, yönlendirmiş elektromanyetik enerjinin potansiyelini gözler önüne serdi. Nükleer bomba kullanılmadan da elde edilebilen elektromanyetik dalgalar, ABD'nin New Mexico eyaletindeki Kirtland hava üssünde birçok araştırmanın konusu oldu.

Bu tezin odak noktalarından biri olan diğer sistem ise Yüksek Güç Mikrodalga (YGM) sistemlerdir. YGM'ler yapısal olarak yüksek teknolojik kullanılarak üretilmektedir. Bunun için yapılan araştırmalar özellikle bu teknolojiyi geliştirmeye yöneliktir. Bu bölümde YGM'lerin yapısına ayrıntılı olarak yer verilecektir.

2.2.1 Yüksek irtifa elektromanyetik darbe (YEMD)

Elektromanyetik darbe (EMD), özellikle güç dalgalanmalarına karşı hassas olan yüksek teknoloji mikro devrelerin ve pek çok elektrik sisteminin uzak mesafede bozulmasına veya aşırı yüklenmesine neden olabilecek anlık, yoğun bir enerji alanıdır. Büyük ölçekli EMD etkisi atmosferde nükleer patlama olması ile üretilebilir. Bu metod Yüksek İrtifa EMD (YEMD) olarak adlandırılır [14].

Yüksek irtifa elektromanyetik darbe (YEMD), nükleer patlamanın yaydığı radyasyon ve güç ile atmosferde üretilen anlık elektromanyetik alandır. Aynı zamanda patlamanın irtifasına ve nükleer cihazın gücüne bağlı olarak çok geniş alan içerisindeki elektronik malzemelere zarar verebilir. Bir de YEMD sistemler yüksek irtifa füzeleri fırlatmak için gereken teknoloji ile birlikte nükleer kapasite geniş ölçekte mevcuttur [14].

2.2.1.1 Yüksek irtifa elektromanyetik darbe kavramının tanımı

YEMD, bir nükleer bomba yeryüzünden yüksekte patlatıldığı zaman üretilir. YEMD, dışarıya doğru yayıldığından insanlar için zararlı olabilen, anlık ve yoğun elektromanyetik enerji alanı oluşturmak için atmosfer ile etkileşime geçerek gama ışınlarını meydana getirerek bilgisayar devrelerinin aşırı yüklenmesine sebep

olabilen ve bir yıldırım çarpmasından daha hızlı bir şekilde zarara neden olabilen bir yapıdadır. YEMD etkisinin tam olarak anlaşılması, 1962 yılında Pasifik Okyanusu üzerinde bir yüksek irtifa nükleer testi esnasında (kod ismi “Starfish Prime” olan) ABD’de 800 mil uzaklıktaki Hawaii’nin semtlerine doğru radyo istasyonları ve elektronik malzemelerde bozulma olduğunda farkedilmiştir. YEMD etkisi irtifaya ve nükleer patlamanın gücünün dizaynına (yeterli yükseklikte Kansas üzerinde tek bir cihazın patlaması ile bütün Amerika kıtasını etkileyebileceği tahmin edilmektedir) bağlı olarak binlerce yıllık bir uzaklıkta olabilir ve araçların elektronik sistemlerine, uçaklara veya telekomünikasyon malzemelerine enerji şok dalgası ileten bir anten görevi görebilen tel veya havai elektrik hatları gibi metalik iletkenler tarafından elde edilebilir [14].

Bir nükleer patlama, Compton etkisi olarak adlandırılan bir süreç içinde hava molekülleri ile etkileşerek gama ışınları üretir. Elektronlar atmosferi iyonize eden yüksek enerjilerde saçılır ve güçlü bir elektrik alan üretir. Bu EMD etkisi 30,000 m’nin üzerindeki irtifada en güçlüdür ve özetle insanlara zarara yol açan akım insan vücuduna doğru akar [14].

Bir yüksek irtifa nükleer patlama (YEMD’i oluşturan) sırayla ulaşan üç ana enerji bileşeni üretir ve elektronik malzemelere kümülatif olarak zarar verebilen, ölçülebilir farklı etkilere sahiptir. İlk enerji bileşeni 1 mikro saniye kadar süren başlangıçtaki şok dalgasıdır ve patlamanın görüşe mesafesi içerisindeki her elektronik cihazın devrelerine aşırı yükleme yapabilen oldukça yoğun statik elektriğe benzer bir yapıdadır. Yıldırım çarpmasına benzer bir karakteristiğe sahip ikinci enerji bileşeni ise daha sonra ulaşır. Kendi başına bu ikinci enerji bileşeni eğer yıldırımdan korunma önlemleri alınmışsa bazı kritik altyapı donanımı için sorun olmayabilir. Fakat ilk bileşenin yükselme zamanı çok hızlı ve yoğun olması birçok koruyucu önlemi yok edebilir bu da ikinci bileşene uzaktaki elektronik donanımı bozmasına imkan verir. Üçüncü enerji bileşeni ise daha uzun devam eden bir magnetohidrodinamik (MHD) sinyaldir ve yaklaşık 1 mikro saniyeden 1-2 saniyeye kadar sürer. Bu uzun süreli darbe veya geometrik sinyal, öncelikle uzun hatlı elektronik donanımlarda zarar verici bir etkiye sebep olur.

Bu üçüncü uzun süreli enerji darbesi için, uzmanların “patlama” ve “atma” (“blast” ve “heave”) olarak isimlendirdiği 2 bileşen mevcuttur. “Patlama” tamamen iletken ateş topunun genişlemesiyle yeryüzünün manyetik alan hattının bozulmasından ileri

gelir. “Atma” yeryüzünün manyetik alanını bozan, iletken yapan ve aynı zamanda yükselen bombanın altında atmosferin doğrudan bir parça iyonize olması ve ısınmasından gelir. Bunların her ikisinde MHD sinyali ile düşünülür ve “yavaş etki” olarak adlandırılır çünkü ateş topunun genişlemesine veya bulutların hareketlerine bağlıdırlar.

Ateştopu genişlediği için, sınırlandırılmış manyetik etki yer üzerinde uzun iletim hatları boyunca kurulur ve telekominikasyon altyapısı ve elektrik şebekesine bağlı donanımda aşırı yüklenmeye sebep olabilir yani üretilen uzun süreli MHD ile güç kesintileri olur ve sonra hızlıca çöker. Bu uzun süre kalıcı etki başlangıç YEMD etkisine ilave edilebilir ve uzun hatlı güç sistemleri ve telekominikasyon sistemleri bu karma etkiden daha fazla zarar görebilir. Daha küçük yalıtılmış sistemler bu üçüncü enerji bileşenini çok fazla toplamazlar ve genellikle YEMD’in ilk enerji bileşeninden zarar görürler.

Üçüncü enerji bileşeni için şunu da söylemek gerekir ki, kalıcı süreli darbe nükleer patlamanın toplam enerjisine bağlıdır ve bunun için genellikle yüksek verimli nükleer silahlarla birleştirilir. Fakat, ilk enerji darbesi doyma sınırlama etkisidir ve düşük ve yüksek verimin her ikisi için de tüm nükleer silahlar tarafından üretilir [14].

2.2.1.2 YEMD’in bozucu etkisi

Yönlendirilmiş elektromanyetik enerjinin kullanımı ile ilgili çalışmalar çok sık yayınlanmıyor veya sınıflandırılmış kalıyor. Yine de, güçlü bir YEMD alanı ile dışarıya doğru yayılım yaptığından radyo frekans bağlantılarına engel olabilir ve nükleer patlamadan binlerce mil ötedeki elektronik cihazlara anlık zarar verici gerilim ve akım üretebilir. Anten gibi davranabilen herhangi bir metal ile elektronik cihazlar bağlanmışlar ise geçerliliği daha da artar. Çünkü bilgisayar altyapı sistemleri birbirlerine bağlanırlar. yaygın bir YEMD etkisi elektrik şebekesinde, yakıt dağıtımında, ulaşım sistemlerinde, yeme içme kaynaklarında, iletişimde, hastane donanımında, ilk cevap verici sistemlerde ve sivil altyapı için kullanılan askeri iletişim sistemlerinde muhtemel uzun süreli arızalara sebep olabilir [14].

YEMD’den korunmak için ise literatürde yer alan çeşitli korunma sistemleri mevcuttur. Bunlardan bazıları şöyledir; elektronik kesinti yakalayıcılar, kalkanlama, topraklama, elektriksel penetrasyon, geçici bastırma cihazları ve filtreler, elektromanyetik yalıtım, dielektrik yalıtım ve yalıtım anahtarlamadır [15].

2.2.2 Yüksek güç mikrodalga (YGM)

YGM'ler tek darbe veya bir dizi darbe aracılığı ile belirlenen süre boyunca, yüksek güçlü elektromanyetik güç ışıması yapmak üzere tasarlanırlar. YGM kaynakları tarafından üretilen elektromanyetik enerji, hedef alınan elektronik teçhizatın çalışmasını engellemesi, hatalı çalışmaya sevk etmesi ya da hasara uğratarak çalışamaz hale getirmesi amacı ile kullanılmaktadır. Bunun yanında, yüksek çözünürlüklü radar sistemleri, petrol ve atıklarının sulardan arındırılması gibi çevre problemleri, tıp, nükleer füsyon ve plazma üretimi gibi pek çok alanda uygulama bulmaktadır [16].

Bu bölümde daha çok elektromanyetik enerjinin yönlendirilmesi ile ilgili kullanılan YGM'ler ele alınacaktır. Dünyada bu konuda başta ABD olmak üzere Meksika, Rusya, Fransa gibi ülkelerde yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar ağırlıkla malzeme kalitesini geliştirerek ve gereken yüksek gücü sağlamak için ihtiyaç duyulan hantal olmayan taşınabilir, yüksek verimle çalışan ve maliyeti nispeten daha düşük olan kaynaklar üzerinde yoğunlaşmış durumdadır. Bu noktada şunu belirtmek lazım YGM'lerin bu şekilde kullanılmasının getirdiği birçok avantaj vardır bu avantajları yüksek güç sağlayan bir kaynak ile birleştirerek daha uzak hedef menzillerine ulaşmak için büyük uğraş verilmektedir. YGM'lerin bu şekilde kullanılmasının getirdiği avantajlar ve gereken yüksek gücü sağlayabilecek bir sistem ilerleyen bölümlerde tartışılmıştır.

Geçtiğimiz son çeyrek boyunca yüksek güç mikrodalga (YGM), parçacık hızlandırıcılar, kablosuz güç iletimi, kotrollü füzyon reaktörleri, plazma üretimi ve yüksek güç radar gibi çok geniş bir kullanım alanı bulurken, ulaştıkları GW'lar mertebesinde enerji seviyeleri ile birlikte askeri savunma sistemlerinde, saldırgan elektronik sistemleri bozmak yada yok etmek için elektromanyetik enerjinin yönlendirilmesi ile kullanılabilecekleri dikkati çekti. En yaygın kullanım alanlarından biri olarak yüksek çözünürlüklü radarlar akla gelmektedir. Burada en temel amaç mümkün olan en yüksek değerde güç üretirken en iyi verimi almaktır [16].

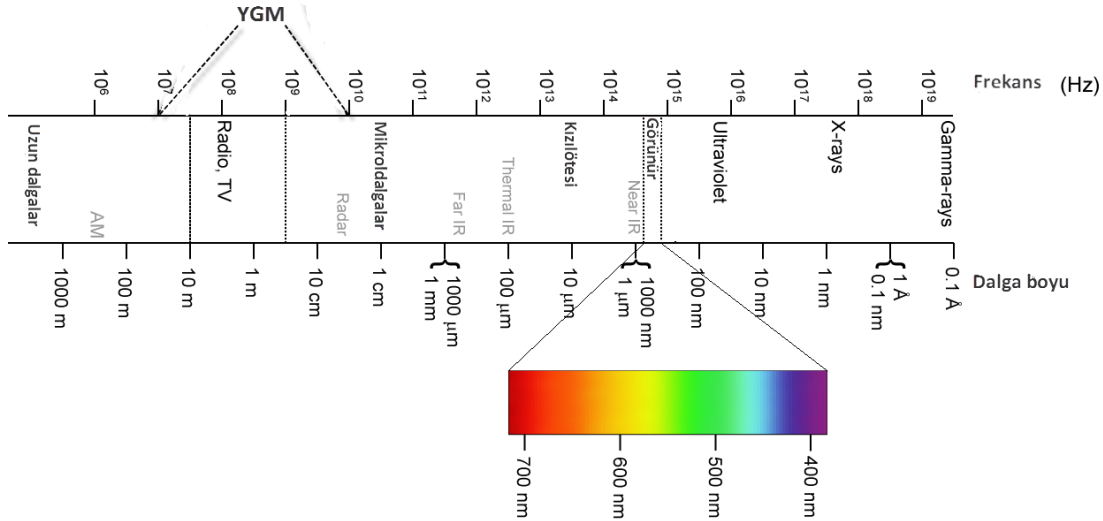
YGM'lere artan ilgi üç eğilim ile açıklanabilir. İlki güç kaynağı sağlayan teknolojilerdeki gelişmelerdir. Gelişmiş generatörler, bataryalar ve YGM kaynakları güç çıkışının daha küçük ve daha hafif bir formda olmasına izin verir. İkincisi, askeri

ve tüketici sistemlerindeki yeni elektronik parçaların RF sistemlerde daha fazla duyarlı olması. Bunun nedeni ise, bilgisayar çiplerinde kullanılan transistörlerin daha küçük ve daha yoğun kılıflarda olmasıdır. Üçüncüsü, birçok gelişmiş dünya ülkesinin bu elektronik parçalara bağımlı olmasıdır ki bu da askeri ekipmanın bu tip sistemler karşı savunmasız olduğunu gösterir [17]. Neden YGM'lerin diğerlerine göre tercih edildiğini ise şöyle açıklayabiliriz; Teknolojinin düşük güvenceli olan sistemlere bakışı, sivil kayıplardan kaçınmak gibi büyük kaygıların olduğu çeşitli görevlerde yüksek güç mikrodalga sistemlerini kullanışlı yaptığından tercih sebebi olmaktadır. [US Air Force]

2.2.2.1 YGM'lerin tanımlanması

Burada YGM ile neyin kastedildiği tartışmaya açık bir ifade olmakla birlikte, kısaca şöyle tanımlanabilir; YGM ürettiği elektrik alan şiddeti havanın kırılma (delinme) dayanımı civarında elektrik alan üretebilen kaynaklardır. Bu değer kabaca 2MV/m ile 3MV/m arasında değişmektedir. Ancak biliyoruz ki ortalama güç yoğunluğu 1.33GW.m^{-2} olması halinde havanın dayanım sınırı, istatistiksel olarak, 1MV.m^{-1} ile sınırlıdır. Bunun ötesindeki bir değeri taşıyamayacaktır. Tam bu noktada ortaya çıkan ilk problem bu değerin ne şekilde daha yüksek değerlere çıkarılabileceğidir [16].

YGM yayan bir elektromanyetik sistem, genellikle 200 MHz ile 100 GHz arasındaki RF spektrumunda elektromanyetik enerji yayılımı ile hedefe zarar vermek, bozmak veya yok etmek için tasarlanan bir cihazdır. Şekil 2.13'de elektromanyetik spektrum üzerinde YGM'lerin kullanıldığı aralık gösterilmektedir. Bir YGM sisteminin temel yapısı, bir güç kaynağı, bir mikrodalga kaynağı ve bir vericiden oluşmaktadır. Bunlar YGM ışınının yönünün karakteristiğini ve gücünü belirlerler [17]. Bu yapı ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 2.13 : Elektromanyetik spektrum.

YGM sistemler, gelen RF enerjisini geri çevirmek veya dağıtmak için iki yol kullanırlar ve bu yolla hedefin gücünü bastırıp hedefe zarar verir, bozar veya yok ederler. İlk yol, RF enerjisi, parçaların erime noktasında moleküler ısınmaya neden olabilir fakat bu uzun süreli yüksek güç gerektirir ve bunu başarmak kolay bir iş değildir. Bir saldırı için daha verimli ve birincil mekanizma hedef elektroniğin içinde elektriksel uyarma oluşturur. Bu, YGM'den RF enerjisi bir devreye girdiğinde oluşur ve kaçak akım ve gerilimler üretir. Hedef üzerindeki esas etki birkaç faktöre bağlıdır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz; ışın karakteristiği (aralık, frekans, güç seviyesi, darbe genişliği, vb.) ve hedef bileşimi (kullanılan madde, koruma kalkanı, elektronik tasarım, giriş noktaları vb.) [17].

YGM'ler anlık elektromanyetik darbe için oluşturulurlar, örneğin güçlü kimyasal bir patlama, özel bir bobin cihazla akı sıkıştırma generatörüne dönüştürüldüğünde “akı sıkıştırma generatörü” olarak adlandırılır. Tekrar kullanılabilen YGM sistemi oluşturmak için birleşik reaktif kimyasallar, EM darbesini üretmek için güçlü bataryalar ve kapasiteler veya farklı bir güç kaynağı gibi diğer yöntemler kullanılabilir. YGM enerjisi genellikle özel biçimli anten kullanılarak odaklanabilir.

2.2.2.2 YGM terminolojisi ve karakteristiği

Savunma sistemlerinin kurulumu ve yeni sistemlerin tasarımında kullanabilmek için YGM'lerin belirgin özelliklerini anlamak gereklidir. Çünkü YGM sistemler çarpıcı bir biçimde yeni bir savaş yöntemi getirdiğinden, bu belirgin özellikleri açıklama ve tanıma yeteneği bu teknoloji ile aşına olan bir savunma sisteminin kurulumuna ve

yirmibirinci yüzyıldaki askeri uygulamaları anlamak için yardımcı olacaktır [18]. Bu bölümde kısaca YGM’ler hakkında bir fikir sahibi olmak adına genel olarak terminoloji verilecek ve sonraki bölümlerde konu daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Giriş noktaları

Elektronik sistemlere nüfuz edebilen, mikrodalga emisyonun olduğu sayısız geçiş yolları ve giriş noktaları vardır. Eğer mikrodalga emisyonu hedefin kendi antenine, tepesine veya diğer açık sensörüne doğru yol alırsa, bu geçiş yolu genellikle “önkapı” olarak adlandırılır. Diğer yandan, eğer mikrodalga emisyonu çatlağa, bağlantı yerine, sürüklenen tele, metal kanala veya hedefin kapaklarına doğru yol alırsa, bu geçiş yolu da “arka kapı” olarak adlandırılır [18].

Burada “gürültü” ve “yanlış bilgi” kavramları “önkapı” etkisinin içerisinde değerlendirilir. Sivil elektronik sistemlerdeki hassas alıcılar, zor ayarlanabilen alıcı bantgenişliği içerisinde birkaç $\mu\text{V/m}$ gibi düşük seviyelerde elektrik alan ile çalışması için tasarlanırlar. Elektronik cihaz veya donanım kullancıları sadece ortam rahatsız ettiği sürece dayanan alıcı içerisindeki “gürültü”yü hissederler. Bu girişimin sonucu her zaman kritik olmayabilir. Fazla elektromanyetik kuvvetin sinyal seviyesinin üzerinde olması ile, beklenen elektromanyetik sinyal ile alıcıya giden sinyal “yanlış bilgi” içerebilir. Bunun sonuçları kritik olabilir [19].

“Geçici bozukluk” kavramı ise “arka kapı” etkisinin içerisinde ele alınır. Bir elektronik sistemin mantık durumuna etki etmek için harekete geçen sinyallerin birkaç voltunun gerektiği belirlenmiştir. 1GHz civarındaki frekanslarda 0.1 m’lik etkin eşleşme yüksekliği, açılmamış sistemler içindir. Darbe genişliği hedef sisteminkinden daha büyük olan tehdit ortamının Q kalite faktörü gibi olduğu kabul edilir. 1GHz nominal frekansında, yaklaşık olarak 100 döngü veya 100ns darbe süresi yeterli olabilir. Bu girişimin sonucu, tehdit ortamının tekrarı ve kurtarma için tasarlanan sisteme bağlıdır [19].

Mikrodalga etkileri

Elektronik hedefleri içten-dışa etkileyen mikrodalga emisyonunda gerçek, hedefin fiziksel olarak yok edilmediği şeklindedir. Mikrodalga emisyonu elektronik işgal yapar ve tek parçaları, tümleşik devreler de dahil olmak üzere, devre kartlarını ve röle anahtarlarını yok eder veya zarar verir. Mikrodalga sistemler, hedefe ulaşmış olan enerji miktarına bağlı olarak elektronik hedefler içerisinde artan etki üretme kabiliyetine sahiptirler. Burada “ulaşan enerji”den kasıt, alınan ve daha sonra hedefin

kendi içerisinde var olan devre geçiş yollarına doğru elektriğin daha derinine iletilen enerjidir [18].

Mikrodalganın yok ediciliği

Elektronik malzemeler, genellikle entegre devreler, mikroelektronik ve modern elektronik sistemlerinde bulunanlar, mikrodalga emisyonuna karşı oldukça hassastırlar. Elektronik etkilerin öldürücülüğü, sistemin derecesini küçültmek veya kilitlemek, zarar vermek, kısa devre yapmak veya yok etmek için bozmak veya sıkıştırmak anlamında çeşitli şekillerde olabilir. Hedefte alınan güç yoğunluğu, mikrodalga sistemi ile düşman hedefi arasındaki mesafeye bağlı olarak $\mu\text{V}/\text{cm}^2$ 'den ($10^{-6} \mu\text{V}/\text{cm}^2$) mV/cm^2 'ye kadar değişiklik gösterecektir. Etkiler sistem tarafından üretilen gücün miktarına, hedef ile cihaz arasındaki mesafeye, mikrodalga emisyonunun özelliklerine (frekans, patlama oranı, darbe süresi vb.) ve düşman hedefin savunmasızlığına bağlıdır [18].

“Önleme” terimi

Önleme terimi, sistem üzerinde vurucu zarar dışında çalışan düşman kabiliyetini azaltabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bir mikrodalga sistem, hedef düşman sisteminin içinde işleme devreleri ve belirli röle içerisinde işlev bozukluğuna neden olarak bu sonucu başarabilir. Örneğin, yüksek gerilim güç hatlarında ki statik ve distorsiyon etkileri, bir araba radyosu üzerinde araba bölgeyi terkettikten sonra radyo üzerinde uzun süren bir hasara neden olmaz. Böylece, “önleme” kapasitesi kalıcı değildir çünkü etkilenen sistemler kendi işletim koşullarına göre kolayca onarılabilir [18].

“Bozma” terimi

Bozma terimi düşmanın işletim kapasitesini kaldırmak ve potansiyel olarak elektronik donanım sistemleri üzerinde asgari zararı vermek içindir. Bunun örneği, sinyal bastırmayı ve eklemeyi içeren güç döngüsü ve sistemin kilitlenmesine neden olan bir kapasite içerir. Bu etkiler kalıcı değildir çünkü hedef sistem kullanılan sisteme göre değişiklik gösteren belirli bir zamanda normal çalışmasına dönecektir. Genellikle, hedef sistem kapatılmalı ve yeniden başlatılmalıdır ve tekrar normal çalışmasına dönmeden önce küçük tamir gerektirebilir [18].

“Zarar verme” terimi

Zarar verme terimi, düşman telekomünikasyon araç gereci, savunma sistemleri, ve donanım alt sistemleri üzerinde orta dereceli zarar vermek ve belirli bir zamanda düşmanı güçsüz duruma getirmek içindir. Masaüstü bilgisayarlardaki tek parçalara, devre kartlarına, veya ana kartlara zarar verici bir etkiyi içerir. Bu hareket, saldırının sertliğine ve teşhis etme, yer değiştirme veya onarmak için düşmanın yeteneğine bağlı olarak kalıcı bir etki oluşturabilir [18].

“Yok etme” terimi

Son olarak yok etme kavramı düşman fonksiyonlarında ve sistemleri üzerinde kalıcı zarara ve felakete neden olabilme yeteneğini gerektirir. Bu durumda düşman, eğer hareket başarı durumunu elde etmişse, giriş sistemlerini, tesislerini ve donanımını tamamen yer değiştirmesi gereklidir [18].

Harekat kabiliyeti

Bir YGM sistemin, kapsama alanı antenin görüş alanı, frekans ve hedefe uzaklık tarafından tanımlanan bir hareket kabiliyeti vardır. Çoğu antenin sahip olduğu görüş alanı onlarca dereceden fazla olabilir. Bir mikrodalga sistem kapsama alanı, toprak üzerindeki hedef için iki boyutlu bir yapıda veya hava ve uzaydaki hedefler için üç boyutlu konik hacimli bir yapıda olabilir. Bu kapsama alanı, YGM sistemin aynı anda birçok hedefe saldırabileceği anlamına gelir. Örneğin, birinci hedef düşmanın iletişimini sağlayan araç olurken, YGM sistemin konik kapsama alanı içerisinde olan hava kuvvetleri de etkilenecektir. YGM sistemin diğer bir avantajı ise antenin tek parçalı bir biçimde görünebilmesidir, fakat gerçekte çok sayıda evreden geçmiş düzenli vericilerden oluşmaktadır [18].

Hava durumundan etkilenmeme

Lazerler gibi YGM emisyonları da ışık hızında hareket ederler. Fakat, lazerlere nazaran mikrodalga frekansları hava durumundan etkilenmezler yani mikrodalga emisyonu kapalı, nemli, yağışlı ve tozlu havalarda yoluna devam eder. Bilinen bir örneği belirtmek gerekirse, hem radar hem de radyo ve televizyon istasyonları sis, kar veya şiddetli yağmurda bile iyi bir iletim yaparlar. Aslında bu etkilenmeme durumu, YGM sistemlerin her hava koşulunda faydalı olduğu anlamına gelir ve özellikle askeri operasyonlarda oldukça avantajlıdır çünkü askeri teçhizatlar içerisinde havanın her durumuna rağmen çalışabilen oldukça az sistem vardır [18].

Uzun menzil, ölçeklenebilen büyüklük

Mikrodalga yayılımı, ışık hızında hareket eder ve en hızlı roket mermisinden 40,000 kez daha hızlıdır. Mikrodalga iletişim sinyal için yaklaşık 4,000 km'lik bir mesafe 13-15 msn gibi bir sürede alınır [18]. Mevcut teknoloji ile geliştirilen günümüz mikrodalga sistemlerin menzili onlarca hatta yüzlerce km'ye kadar ulaşabilmektedir. Gelişen teknoloji ve yüksek güç kaynakları ile bu mesafe daha da artmaktadır. Aynı zamanda mikrodalga sistemlerin boyutu, hedefe, dağıtım uygulamasına ve beklenen etkiye bağlı olarak değişecektir ve bu yüzden mikrodalga sistemler gizli askeri operasyonlar için bir hayli uygundur. 4-5 kg'lık küçük sistemler kurularak elde taşınması gereken görevlerde de kullanılması düşünülebilir. Gerçekte, insan eliyle taşınabilen cihazlar 5-10 kg civarında, araçlara takılan cihazlar onlarca kg ağırlığında, uçaklarla taşınanlar ise yüzlerce kg ağırlığındadır. Mesele şu ki mikrodalga sistemler doğal olarak ölçeklenebilen esnek bir yapıdadırlar [18].

Mikrodalga kaynaklar ve antenler

YGM sistemler üzerinde yapılan son çalışmalar, farklı frekanslarda çalışacak YGM kaynaklar ve yüksek güç seviyelerinde yayılım yapan antenlerin gelişimine büyük katkı sağlamıştır. Bunların yanında, YGM kaynakların ve antenlerin boyutunu, ağırlığını ve hacmini küçültmek için ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir [18].

2.2.2.3 YGM'lerin amaçlarına göre sınıflandırılması

YGM sistemler amaçlarına göre şimdilik iki ana grup altında sınıflandırılabilir.

Elektronik sistemlere yönelik YGM

Frekans aralığı 200MHz'den 5GHz'e kadar olan yeteri kadar yoğun elektromanyetik sinyaller elektronik sistemleri bozabilir veya zarar verebilir. Bir elektronik sistemde indüklenen bu etki uluslar arası elektromanyetik girişim (IEMI)'de genellikle bahsedilmektedir [19].

YGM'ler genellikle düşman sistemlerinin çalışmasını durdurmak niyetiyle donanım, savaş gereçlerine ve elektronik sistemlere zarar vermek, bozmak veya yok etmek için tasarlanırlar [20].

Aynı zamanda iletişim hatları ve güç hatlarına bağlı elektronik ekipman için de potansiyel bir tehdittir. Pek çok modern yapıda, neredeyse her masada bir kişisel bilgisayar vardır ve bu bilgisayarlar genellikle onları YGM yayılımına zayıf yapan bir güç kaynağına, bir telefon kablosu veya yerel ağ bağlantısına bağlanır [20].

YGEM sebebiyle devrelerde meydana gelen sistem hasarı veya arızası serbest-uzay veya kısmen sönümlü elektromanyetik darbenin iletkenlerde indüklediği voltaj ve akım nedeniyle oluşur. Düşük direnç enerji harcayan yüksek Q kalite faktörlü devrelerde dar rezonans görülür. Harici iletkenler, yapılar veya dahili iletkenler alıcı anten veya kuplaj yolu gibi davranır. Bunlar, YGEM ile indüklenen akım ve voltajı, elektronik cihazlarda hassas elemanlara ulaştırır. Güç ve telefon hatları gibi bina-dışı uzun donanımlarda YGEM ile indüklenen akım binlerce amper kadar şiddetlenebilir. Genellikle yapılarda ve sıklıkla sistem mühendisliği kullanılmayan tesislerde dahili kablolarda oluşan akım yüzlerce ampere kadar yükselebilir. Harici voltaj geçişlerinin megavolt düzeyinde olabileceğine değinmek faydalıdır ve dahili etkileşimden binlerce volt seviyesinde gerilim beklemek normaldir.

YGEM ile indüklenen akımdan oluşabilecek hasara en duyarlı, küçük bir değişimin önemli olduğu pasif elemanlar düşük voltaj veya güç sınıflı hassas komponentlerdir. Şiddetli anlık akım yüzünden gerçekleşen direnç yanmalarının sebebi, enerjiyle oluşan yüksek ısı ve voltaja dayanamamalarıdır. Direnç dayanma eşik değerleri, direnç parametrelerinden ve deneysel olarak hesaplanırlar. Kapasitörlerin geçiş akımlarına maruz kalması ile kapasitör üzerinde zamanla artan voltaj birikir. Elektrolitik olmayan kapasitörlerde bu voltaj dielektrik kırılma seviyesine ulaşana dek yükselir. Bu seviye tipik olarak doğru akım gerilim derecesinin on katıdır. Elektrolitik kapasitörlerde, voltaj ilişkisi dielektriğin Zener seviyesine erişilene dek korunur. Bunun ardından, hasar meydana gelebilir. Elektrolitik kapasitörlerin pozitif yöndeki hasar eşik değerleri DC gerilim değerinin 3-10 katıdır. Negatif yönde, bu, pozitif hasar geriliminin yarısı kadardır. Yalıtımın gerilim üzerine kırılması nedeniyle oluşan YGEM indüklenmiş akımlar, transformatör ve bobin hasarlarına yol açar. Anlık gerilim kırılma değeri tipik olarak güç kaynağı transformatörlerinde 5500V ve küçük sinyal transformatörlerinde 2750V'tur.

Biyolojik hedeflere yönelik YGM

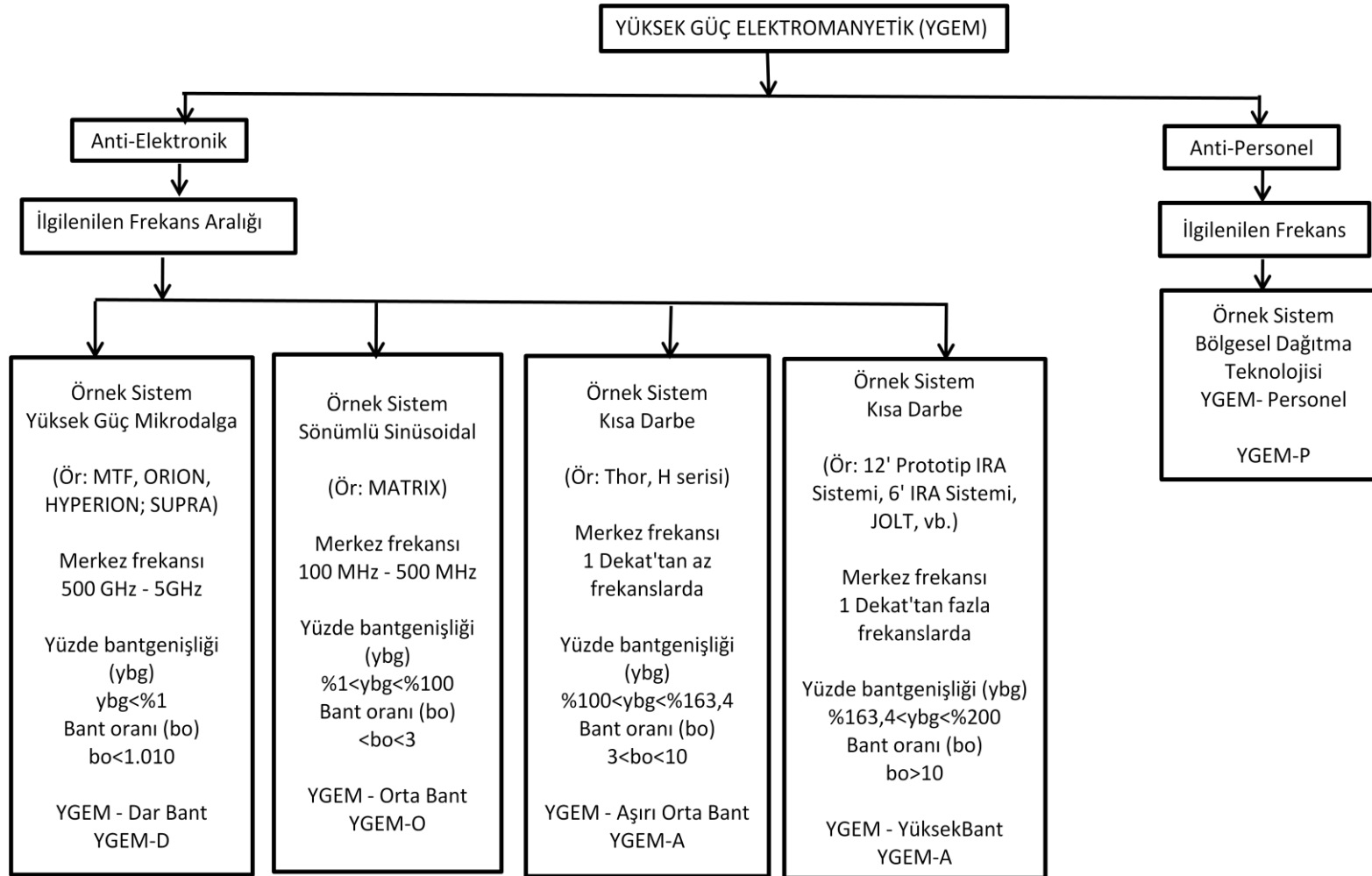
Anti-personel olan YGM'ler, ciddi fiziksel zararlara sebep olmadan insanların etkisini zayıflatmak ve kalabalıkların kontrolü için tasarlanırlar [20].

Bu sınıflandırma ve çeşitli alt sınıflandırmalar Şekil 2.14'te detaylı olarak gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi YGM'leri sınıflandırmanın bir diğer yolu da "dar bant", "orta bant", "yüksek orta bant" ve "aşırı yüksek bant" gibi spektral yoğunluklardaki frekans içeriğine göredir. Bunları tanımlamak için EM spektrumun

bant oranını hesaba katılır $b_o = (f_h/f_l)$. Görünen EM alan üretim teknolojileri ile uygun bir manada “bantoranı, b_o ”nın doğal özelliklerini kullanarak, Çizelge 2.1’de biçimlendirilmiş bant genişliği sınıflandırması verilmektedir [20].

Çizelge 2.1 : Bant genişliğine bağlı sınıflandırma [19,20]

Bant tipi	Yüzde Bant Genişliği (ybg)	Bant Oranı (bo)
Dar (Hypo)	$ybg = 200 \left(\frac{b_o - 1}{b_o + 1} \right) (\%) < 1\%$	< 1.01
Orta (Meso)	$1\% \leq ybg < 100\%$	$1.01 < bo < 3$
Aşırı orta	$100\% \leq ybg < 163.64 \%$	$3 < bo < 10$
Yüksek	$163.64\% \leq ybg < 200\%$	$bo \geq 10$



Şekil 2.14 : YGEM sınıflandırılması

Dar bant sistemler (ybg< %1)

Çeşitli ülkelerde, onlarca veya yüzlerce Hz tekrar oranı ile çalıştırılan YGM kaynaklar (>100 MW) geliştirilmeye devam ediyor. Bu teknoloji GW mertebelerindeki güçlere ulaşıyor ve uygun frekanslardadır. Bu kaynaklar, hedef sisteme bağlanabildiği ve elektronik zarar ve bozuma yol açabildiği 500 MHz – 3 GHz aralığında yoğun EM alan oluşturmak için kullanılabilir. Çeşitli ülkeler YGM sistemlerini geliştirmeye ve yaymaya ilgi duymuyor olsa da, kendi askeri varlıklarını bu potansiyel tehdite karşı korumak için bu sistemleri anlamak mecburiyetinde kalacaklardır. 0.7 GHz – 3 GHz aralığındaki çeşitli YGM araç gereçleri mevcuttur. Çizelge 2.2’de bunlara örnekler gösterilmiştir [20].

Çizelge 2.2 : Yüksek güç dar bant sistem örneği [20]

Özellik	MTF İsveç	ORION UK	Hyperion Fransa	Supra Almanya
RF Kaynak	Geleneksel Tüpler	Relativistik Magnetronlar	Relativistik Magnetron ve Reltronlar	Reltronlar
Frekans	1.3, 2.86, 5.71, 9.30 ve 15 GHz	1 – 3 GHz	1.3 – 1.8 GHz (Magnetron) 2.4 – 3 GHz (Magnetron) 0.72- 1.44 GHz (Reltron)	0.675 – 1.44 GHz
Max. Güç	Fonksiyon frekansı olarak 25, 20, 5, 1, 0, 25 MW	350 MW mikroldalga gücü; 5 GW darbe gücü 500 kV, 50 Ohm	---	400 MW – 200 MW
Max. PRF	1000, 1000, 1000, 1000 ve 2100 Hz	100 Hz Tek atış	--- (Magnetron) 1 Hz (Reltron)	10 Hz
Max. Darbe Süresi	5,5,5,3,8 & 0.53 μ s	500 ns	100ns Magnetron 200 ns Reltron	>300 ns
Alan Seviyesi	---	---	40 kV/m (Reltron ile) 60 kV/m (Magnetron ile)	

Darband IEMI üretimi için, “Phaser” olarak tanımlanan yayıcı bir sistem kullanılabilir. “Phaser” ifadesi “Darbeli Yüksek Genlikli Sinüzoidal Elektromanyetik Yayılım” üreten bir cihazı tanımlamaktadır. Phaser tasarımına bir örnek olarak gücü 10^n GW kaynak tarafından tanımlanan Mark N Phaser verilebilir. Aşağıdaki özellikleri içeren ticari olarak mevcut bir bağlı magnetron kaynağı iyi bir örnektir [19].

- Frekans: 1.1 GHz
- Tepe güç: 1.8 GW (ortalama güç = 0.9 W)
- Darbe genişliği: 60 ns

Bu değerlere sahip bir örnek, ticari olarak mevcut olan kaynak 1GW ortalama güç üretmek üzere kolayca modifiye edilebilir.

Orta bant sistemler ($1 \% < ybg < \% 100$)

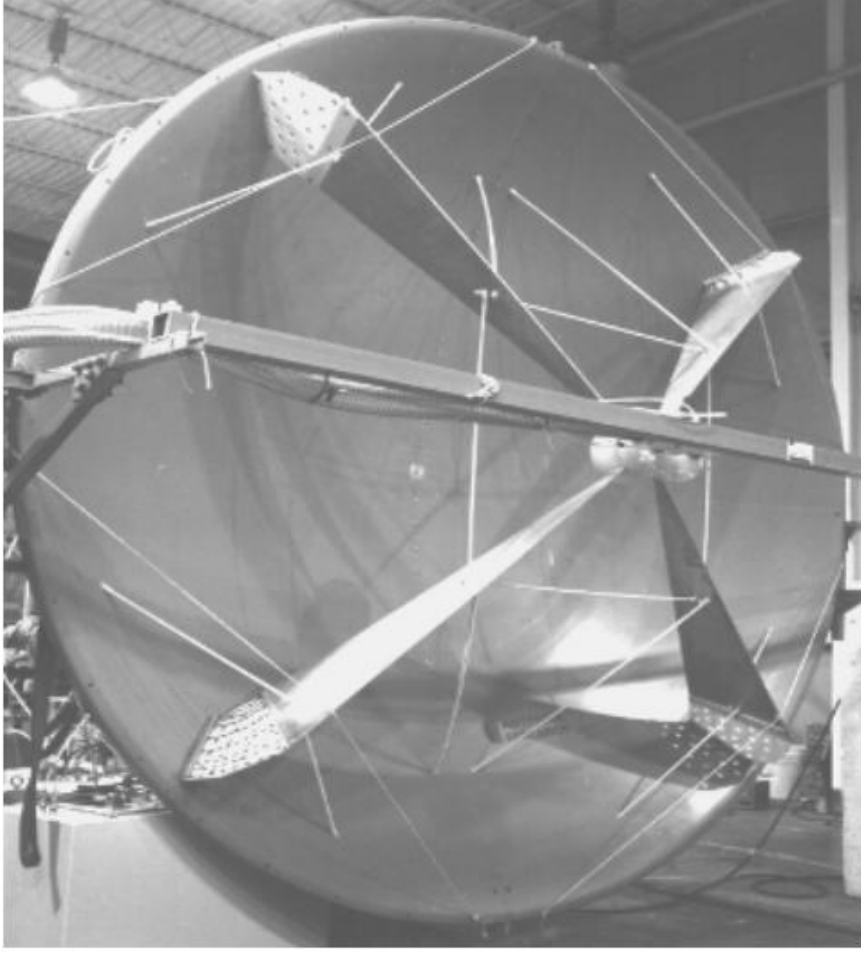
Orta bant sistemler (kaynak ve anten) 100 MHz ile 700 MHz aralığında kurulmuşlardır ve “Dispatcher” olarak isimlendirilirler. “Dispatcher” terimi “Sönümlü Yoğun Sinüzoidal Darbeli Anten” anlamına gelir. Baum [21-23] anten sistemine bağlanan belirli bir osilatör sistemi tanımlamıştır. Örnek olarak, yüksek empedanslı bir anteni besleyen düşük empedanslı çeyrek dalga iletim hattı ve yüksek empedanslı bir anteni besleyen düşük empedanslı yarı dalga iletim hattı verilebilir. İletim hattı osilatörü, yüksek voltajlı bir kaynaktan yüklenen iletim hattının çeyrek veya yarı dalga kısmından oluşmuştur.

Aşırı orta bant sistemler ($100 \% < ybg < 163.64 \%$) veya ($3 < bo < 10$)

Bu bant için en iyi örnek, Kirtland hava kuvvetleri araştırma laboratuvarında yapılan bazı H-serisi (örneğin H-2) sistemlerdir. H-2 sistemine bakacak olursak, 300 kV/250 ps/ 2ns lik darbeyi 10 metrelik mesafede 43 kV/m lik bir darbe olarak yayan TEM horn beslemeli bir sistemdir. İkinci örnek olarak ise, 10 m’de 68 kV/m pik elektrik alan üreten 1 MV darbeleri THOR sistemidir. Bant genişliği 200 MHz’ den 1GHz’e kadar veya $bo=5$ ve $ybg= \%133$ ’tür [19,24].

Yüksek bant sistemler ($163.64 \% < ybg < 200 \%$) veya ($bo > 10$)

Parabolik TEM iletim hattı beslemeli reflektörler 1989 da ilk önerildiğinde [25], esas ilgi çekici noktası, aşırı derecede geniş bant genişliği olmasından dolayı çok dikkat çekmişti. Bu tip sistemler Darbe Yayan Anten (DYA) sistemi olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.16’da örnek bir DYA gösterilmektedir [19,24].



Şekil 2.15 : Prototip bir DYA sisteminin fotoğrafı [20].

Aşırı bant sistemler, reflektör DYA'ların yanında TEM horn ve lens DYA gibi birçok formda kurulabilirler [26,27]. Ayrıca aşağıdaki gibi yararlı uygulama alanları da vardır [20].

- Disrupter (geçici elektromanyetik radyasyon yayan aşırı güç)
- Yeraltı cisimlerini görüntüleme, mayın temizleme vb.
- Düşman hedeflerini belirleme ve tanımlama
- Uzay çöplerinin tesbiti
- Periskop tesbiti
- Transfer fonksiyonu üzerinden saldırı için kaynak çalışması
- Yüksek güç, aşırı geniş bant sinyal kesiciler

- Kanunsal yaptırımlar için uygulamalar (görünmez duvarlar vb.)
- Maddelerin elektriksel karakteristiği (beton taş gibi dalga yayılımı ölçümleri vb.)
- Endüstriyel uygulamalar (sızıntı veya zarar görmüş boruyu belirleme)
- Deprem enkazında canlı varlığının tesbiti
- Heyelan mağdurları için arama çalışmaları
- Ağır silah uygulamaları

2.2.2.4 Sistem elemanları

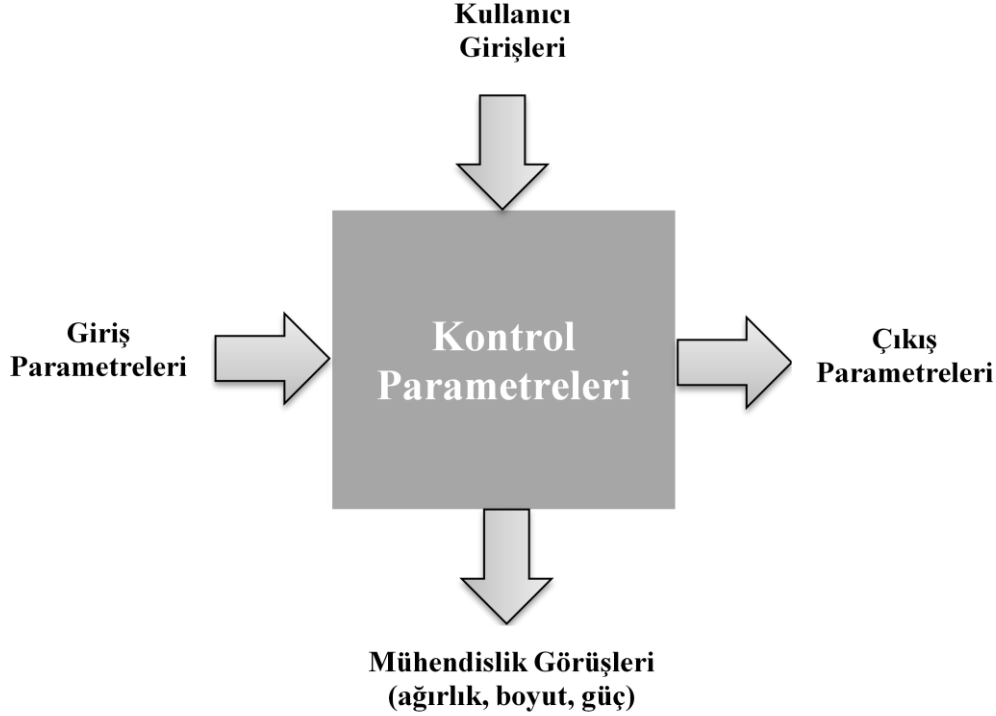
Pratik olarak gerçekleştirilebilen bir YGM, yüksek gerilim güç kaynağı, yüksek güç elektron tabancası, yüksek güç RF devresi, uygun RF vakum penceresi ve elektron demeti toplayıcıyı içeren bir dizi farklı teknolojiyi kapsamalıdır. Eğer sistemin bir parçasıysa, yüksek güç dalga klavuzlarına, yüklere, dağıtıcılara ve antenlere de dikkat edilecektir. Fakat, belirtmek gerekir ki bir yüksek güç mikrodalga sistem özellikle elektron tabancasının türü ve güç kaynağı çalışması için elektron demeti üretimini kullanarak çalışmaya başlar. Burada tartışılan kavramlar şöyledir; tekrarlı darbe durumu, yüksek ortalama güç ve tek atış, yüksek pik güç cihazlarıdır [28].

Aşırı geniş bant sistemler 4 ana grupta incelenirler; ilk güç, yüksek gerilim üretici, darbe üretim sistemi ve antendir. Herbir bileşen için birkaç muhtemel çözümün dışında bir teknoloji seçilmelidir ve diğer grupların teknolojisi ile işletilmelidir [28].

Kavramsal olarak, karmaşık bir iç yapısı olsa da, alt sistemleri biraraya getiren bütün bir sistem olarak verildiğinde gereken şey tüm sistemin ne olduğunu bilmektir. Sistemin blok yapısı Şekil 2.17’de verilmiştir. Giriş parametreleri, bir sonraki alt sistemin giriş parametreleri olan çıkış parametrelerini üretmek için alt sistemlerin özellikleri ile birleşir. Çıkış parametreleri temel giriş bilgilerini sağlamak için bir sonraki alt sisteme gider. Toplam ağırlık, toplam boyut ve toplam elektrik enerjisi tüketimi gibi sistem özellikleri herbir altsistem için miktarların toplanması ile hesaplanabilir [29].

Herbir altsistem birçok parametreye sahiptir. Bu altsistemler, boy ve ağırlık gibi temel fiziksel parametrelerden, akım, gerilim ve empedans gibi elektriksel parametrelere, frekans, bant genişliği ve dalga klavuzu modu gibi mikrodalga parametrelerine kadar farklılık gösterir. Bileşenleri bir sistem içine toplamak için, bir

dizi parametre seçimi yapılmalıdır. Bu bölümde giriş çıkış parametrelerini nasıl kurulacağını gösteren bağlantı parametre kurulumu ve onları nasıl kavramsal sistem tasarımlarında kullanacağımız anlatılmaktadır [29].

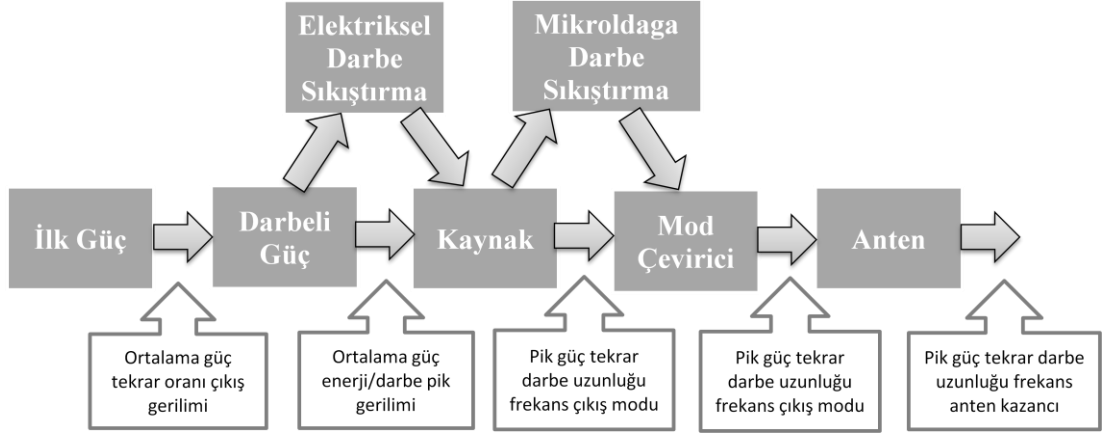


Şekil 2.16 : Arayüz parametreleri bileşenleri birbirine bağlar [29].

Bileşenleri tanımlamak için bağımsız değerler gibi bazı parametrelerin seçimi, bağımsız parametrelerden elde edilmiş olan diğer parametrelerin daha sonra bağımlı olduğu anlamına gelir (bağımsız değerlerin seçimi tüm sistemler için aynı olmayabilir; bu seçim sistem tasarımının bir parçasıdır). Ana parametreler açısından bileşenlerin birini elde etmek için, her bir bileşen sınıfına kendi özel karakteristiğine sahip darbeli güç bileşenleri gibi özel bağlantı parametreleri kurulur. Literatürde test edilip kurulan bir sistem Şekil 2.18’de verilmektedir. Diğer bileşen sınıfları ile çalışması için bileşen sınıflarına sürekli olarak bağlama faydalı bir yoldur. Şekilde gösterilen enerji akış yönüdür. Fakat, sistem tasarımının başarısı için, bilgi değişimleri veya alt sistemler arasındaki parametreler için kendine has bir akış yönü yoktur. Bileşen sınıfları arasındaki nicelikler sisteme bağlantı için gereklidirler. Ek bir elektrik darbe sıkıştırma aşaması ve üretimlerinden sonar mikrodalga darbe sıkıştırması (ör. Marx’dan -DBH’a) için opsiyonel kollar mevcuttur [29].

Şunu da söylemek gerekir ki, genellikle elektriksel darbe sıkıştırmanın birkaç evresi mevcuttur, bu da güç şartı olarak adlandırılır. Mikrodalga darbesinin ek bir aşama

kullanarak sıkıştırılması pek yaygın değildir. Mikrodalga güç sıkıştırmasının geleneksel radar sistemlerinde kullanılması oldukça yaygın olmasına rağmen, YGM sistemlerinde bu kullanım pek yaygın değildir. Mikrodalga darbe sıkıştırmanın avantajı düşük güç kullanımına ve bu yüzden düşük gerilime, darbeli güç bileşenlerine izin vermesidir [29].



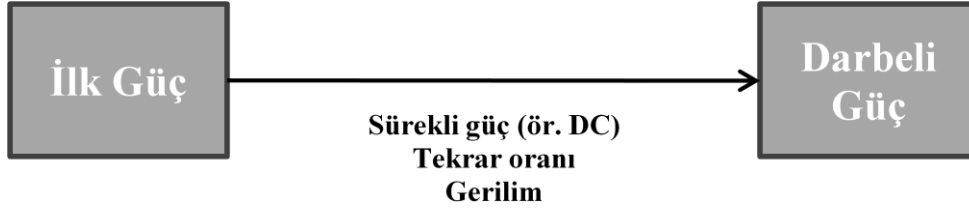
Şekil 2.17 : Bir YGM sisteminde bileşen sınıfları arasındaki enerji akışı [29]

Diğer teknolojilerin alt sistemlerinin eşleşip eşleşmediğinin göstergesi olan “uyum parametresi”, sistem içindeki bağlantı elemanları için önemlidir. Uyumun dışında bağlantı alt sistemlerinde tipik olarak pratik en iyi tasarım tercih edilendir. Örneğin, her bir mikrodalga kaynağı özel bir dalga klavuzu modunda radyasyon üretir. Bu mod, hangi mikrodalga kaynağının çalışabilir sorusu ile anten tipine etki edecektir. Mevcut donanım modu, ya ticari uygunluk üzerinden idare edebilir, ya da tasarım tercihi için kolay üretime etki eder. Bundan dolayı, hangi modda bir kaynak üretilecekse, kabul edilebilir anten modu için ele alınır [29].

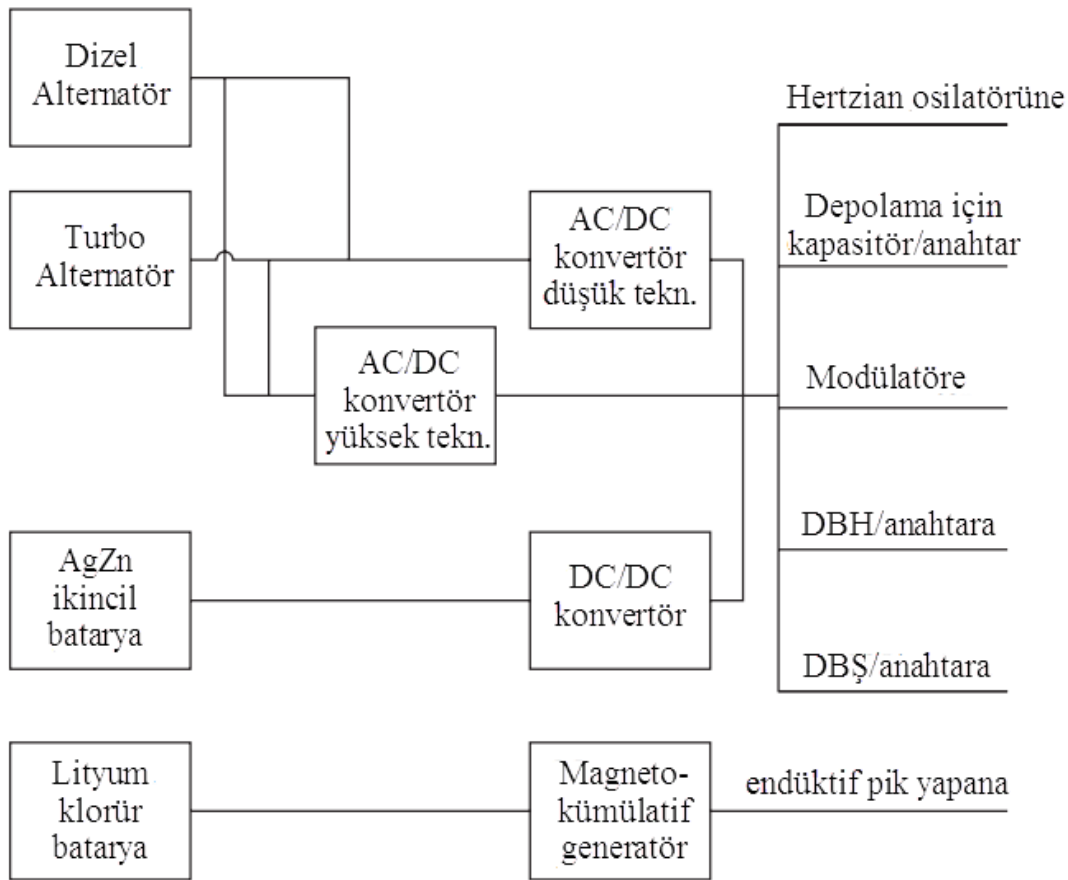
İlk güç

Darbeli güce bağlayıcı ilk güç için (Şekil 2.19), önemli parametreler ortalama güçtür, tekrar oranı ise darbe başına enerji ve çıkış gerilimini birlikte tanımlar. İlk güç için birçok teknoloji tercihi mevcuttur. Şekil 2.20’de şeklin sağında bahsedilen birtakım darbeli güç seçeneklerinde sürekli ilk güç çıkışını sağlamak için çalıştırılabilen bir dizi seçenek gösterilmiştir. Bizim sürekli kullandığımız terim oldukça tedbirlidir çünkü patlayıcı olarak magneto-kümülatif generatörleri içeren şeklin alt kısmındaki alt sistemler sadece tek atış alt sistemleridir. Birçok sistem için yaygın bir çözüm, dizel alternatör veya turbo alternatör gibi içten yanmalı bir motor tarafından çalıştırılan generatör kullanmak olur fakat uzun süreler sistemi sürmek için

bataryalar kullanmakda mümkündür. Her iki durumda da, alt sistem seçeneklerinin ortak özelliği ya bir alternati akım (AC) içten yanmalı motor ya da uzun darbe veya sürekli güç sağlayan doğru akım (DC) bataryası olmasıdır [29].



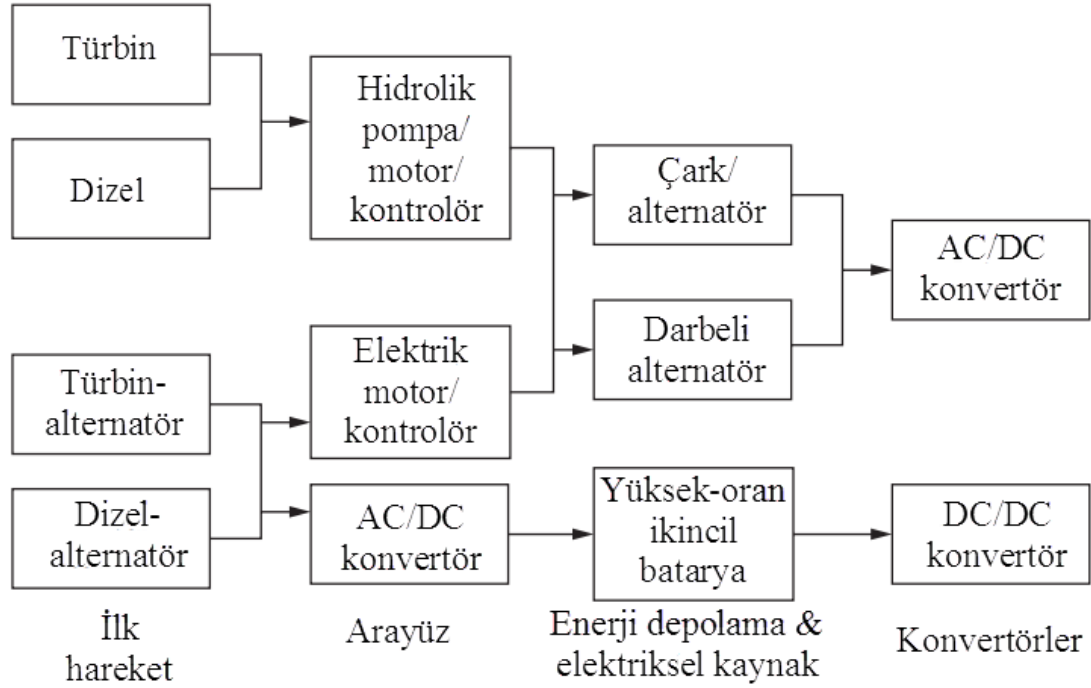
Şekil 2.18 : Darbeli güce bağlı ilk güç için bağlantı parametreleri [29].



Şekil 2.19 : Sürekli güç için muhtemel ilk güç bileşeninin bağlantıları [29]

Bir darbe patlamasının ateşleme yönü üzerinde tüketilen ve daha sonra patlamalar arasında doldurulan depolanmış enerji olduğundan, tekli moddaki ateşleme sistemi için Şekil 2.21’de gösterildiği gibi birçok alternatif mevcuttur. Dikkat etmek gerekir ki bu alt sistem seçeneklerinin ayarlanması için herbirinin dört bileşeni vardır; içten yanmalı ana kuvvet üreten bir AC çıkış; AC-DC her ikisinde de çalışan seçeneğe bağlı olan bir enerji deposu ve elektrik kaynağı tarafından takip edilen bileşen

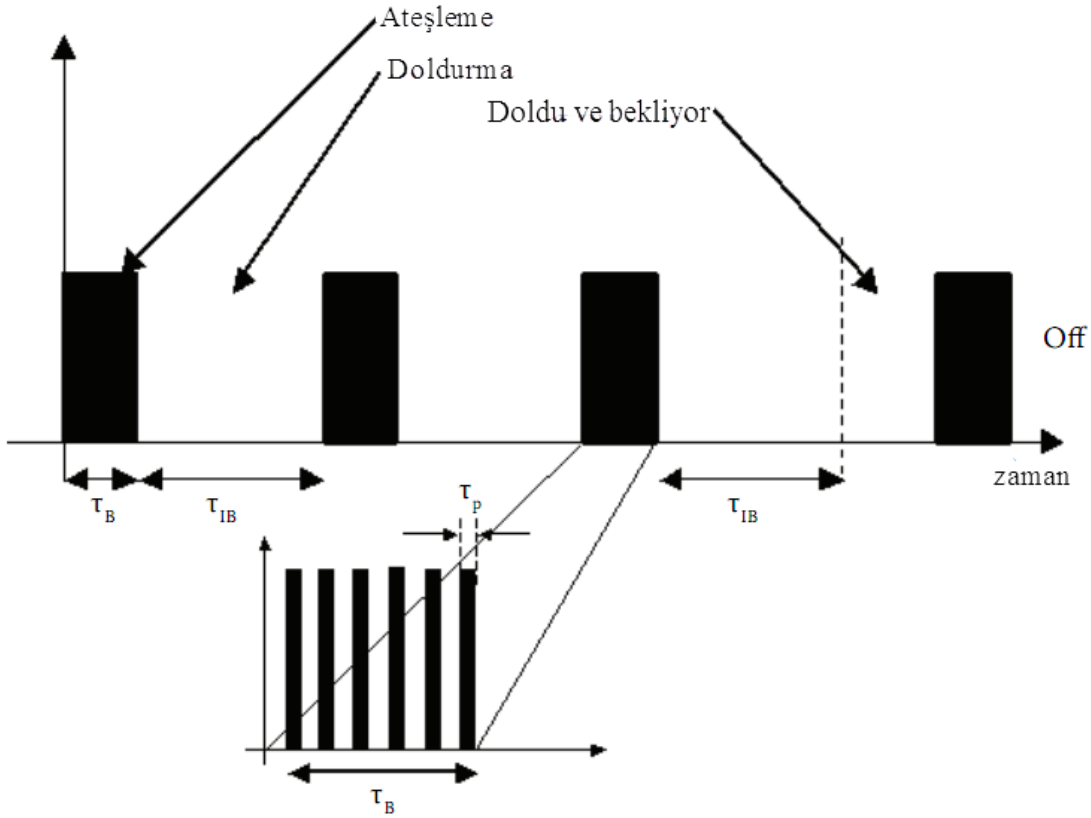
arayüzü ve bir konvertör, darbeli güç için seri anahatarlanmış DC darbe sağlayan çıkıştır. Yüksek teknoloji dönüştürücüler, modern katı-hal ve dijital teknolojileri kullanır, düşük teknoloji çeviriciler ise daha eski transformatör/ doğrultucu teknolojisi kullanır [29].



Şekil 2.20 : Patlamalı mod güç için muhtemel ilk güç bileşeni bağlantıları [29]

Çalışma sisteminin daha iyi anlaşılması için, Şekil 2.22'deki zamanlama grafiği dikkate alınır. Üstteki çizim, darbeli güç sisteminin girişi için patlama modunda güç kaynağı tarafından ulaştırılan güç darbelerini gösterir. Burada, darbe gücü süresi τ_B patlamalar arası periyot uzunluğu τ_{IB} tarafından ayrılmıştır. Aşağıda τ_B periyodu esnasında darbeli güç tarafından ulaştırılan özel τ_p darbe süresi için zamanlama görülmektedir. Ana kuvvet bileşeni enerji deposuna ve patlamalar arası periyod üzerinde depolanan elektrik kaynağına sürekli olarak güç ulaştırır ve sonra patlamanın yönü üzerinde yüksek güçte ulaştırır. Örneğin, çark ve darbeli alternatör içinde enerji depolamak mümkündür ve daha sonra AC veya DC'a dönüştürülür.

Böylece, sürekli ve patlamalı mod sistemler arasındaki ana fark daha sonra eklenen depolanan enerjidir. Ortalama güç sürekli modda daha yüksektir, bu yüzden ısı yönetim büyük bir sorun olmaktadır. Patlamalı modda, sistem dört işletimsel adıma sahiptir: ateşleme, şarj etme, şarj edilmiş ve bekleme veya kapalı durumdur [29].



Şekil 2.21 : Patlamalı mod çalışmasının dört adımı [29]

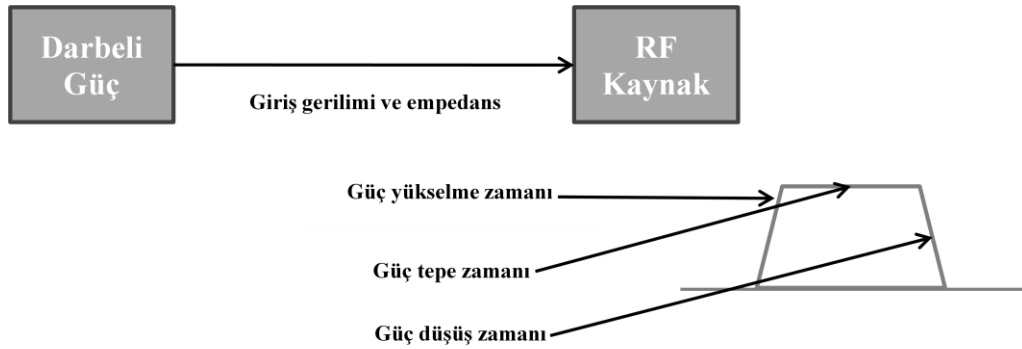
Pik güçler için tekrar oranı sistem için mevcut bulunan anahtarlama teknolojilerini tercih eder. Örneğin, darbeli güç tekrar oranı 150 Hz'in üzerinde kıvılcım aralığı, manyetik, veya katı hal anahtarlama için bir seçenek önerir. Hava tabanlı sistemlerde boyut ve ağırlığı sınırlamak için gereken zorunluluklardan en önemlisi ilk güç bileşenidir çünkü en ağır kısımdır. Toprak tabanlı sistemler içten yanmalı motorlar gibi daha fazla geleneksel ilk güç kullanabilirler. Hava sistemlerinin tasarımcısı genellikle başka bir içten yanmalı motor eklemekten kaçınmayı dener. Bu yüzden sistem gücünü arttırmayı tercih edecektir [29].

Darbeli güç

Darbeli güç, plazma ısıtıcısı ve sürekli güç ışımasının olduğu ana istisnalar ile birçok uygulamada kullanılır. Mevcut darbeli güç çeşitleri, anahtarların açılması ile kombinasyon halinde olan modülatörler, marx generatörleri, darbe biçimleme hatları (DBH), darbe biçimlendirme şebekeleri (DBS) ve endüktif enerji depolama birimleridir. Giriş gerilimi ile ortalama güç ve tekrar oranı ilk güçten alınır, darbeli güç bileşenlerinin çıkışı üç tür muhtemel akış elemanı tarafından karakterize

edilebilir: (1) ilerleyen darbe sıkıştırması için başka bir güç bileşeni, (2) doğrudan mikrodalga kaynağına veya (3) empedans ve gerilim dönüştürücüsüne. Son durumda, darbeli güç bileşeni, gerilim veya empedans dışında, doğru darbe uzunluğunu, gerilim toplayıcıyı (doğrusal indüksiyon hızlandırıcı [DİH]) veya empedans dönüştürmenin bir diğer türü olan konik iletim hattını üretebilir [29].

En tipik durum, bir dizi darbeli güç bileşenlerini bağlar. Marx generatörü gibi bir bileşen DBH gibi ileriki elektriksel darbe sıkıştırma evresi için giriş sağlar. Daha az rastlanan diğer bir durum ise, ilk darbeli güç bileşeninin çıkışı bir mikrodalga kaynağına bağlanır, Marx'ın doğrudan bir anteni sürmesi gibi. Her iki durumda da belirlenmesi gereken çıkış kalitesi, çıkış gerilimi, empedans (o nedenle akım, empedans gerilim oranında dahil) ve darbe uzunluğudur (Şekil 2.23). Aynı zamanda yükselme ve düşme zamanlarının da belirlemek de önemlidir. Bunun sebebi ise mikrodalga üretimine kaynak için yerine getirilmesi gereken rezonans şartlarıdır. Elektrik enerjisi, en sonunda soğutma sistemi tarafından ele alınması gereken, kaynağına doğru kullanılmayan ve yararsız enerji geçişi ile yerine gelen rezonans durumundan önce ve sonra kaynağına gönderir [29].

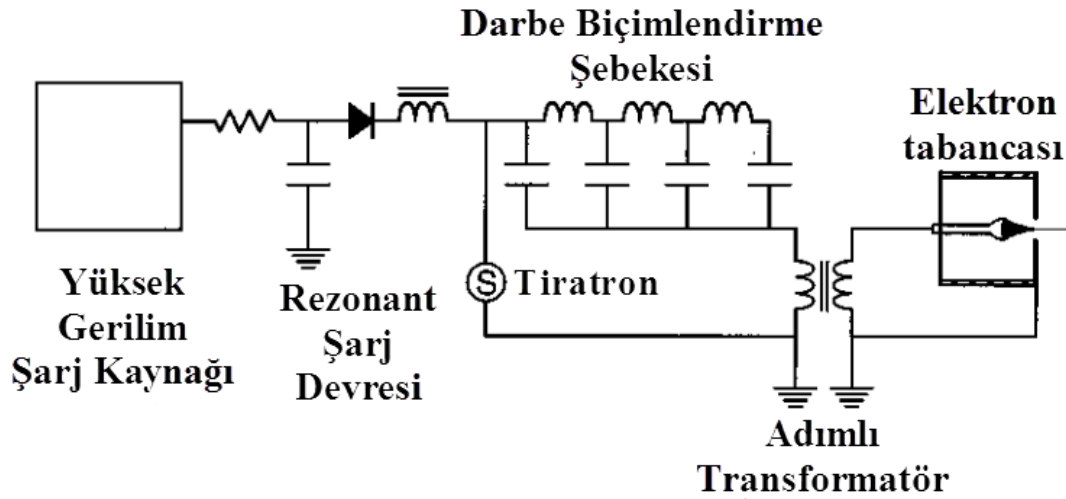


Şekil 2.22 : Mikrodalga kaynağına bağlanan darbeli güç için bağlantı parametreleri

Darbeli güçteki karmaşık bir konu ise şöyledir; mikrodalga kaynak arayüzü mikrodalga kaynağın dinamik empedansından gelir, empedans eşleme işlemi yapmak ise ciddi bir tasarım işidir. Kaynak empedansı neredeyse her zaman zamanla değişendir ve gerilime bağlıdır [29].

Yüksek çalışma faktörü için güç kaynakları ve tekrarlamalı darbe tüpleri genellikle modülatör olarak adlandırılmaktadır. Hat modülatörleri ve katı-tüp modülatörler iki temel modülatör tipidir. En yüksek gücü sağlayabilen modülatörler genellikle hat modülatörleridir ve pratik olarak yapılan cihazlarda 1 MV'lık çıkış gerilimine kadar

kurulmuşlardır. Tipik bir hat modülatör düzeni Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Böyle bir modülatör, yüksek gerilim güç kaynağına, DBŞ'ye, anahtarlama tüpüne (genellikle gazla dolu tiratron) ve elektron tabancasına darbeyi uygulamak için yüksek gerilim yükseltici transformatöre bağlı olarak oluşur. İletime başladığı zaman tiratron kapatılamadığı için, hat modülatöründen darbe şekli, DBŞ ve yük empedansı tarafından kontrol edilebilir. Katı-tüp modülatörler elektron tabancasına yüksek gerilim anahtarlama için bölmelenmiş vakum tüpleri kullanırlar. Tüp şebeke kontrollü olduğundan, darbe biçimi DBŞ kullanım gereksinimi olmadan doğrudan kontrol edilebilir. Darbe biçimi DBŞ ayarı olmadan çeşitlenebildiği için, katı-tüp modülatörler daha esnektirler. Fakat, bölmelenmiş tüpler tiratronlardan daha az akım çekebilirler (binlerce ampere karşı yüzlerce) dolayısıyla katı tüp modülatör yapımı birçok yüksek güç uygulamaları için nispeten daha az uygundur [28].



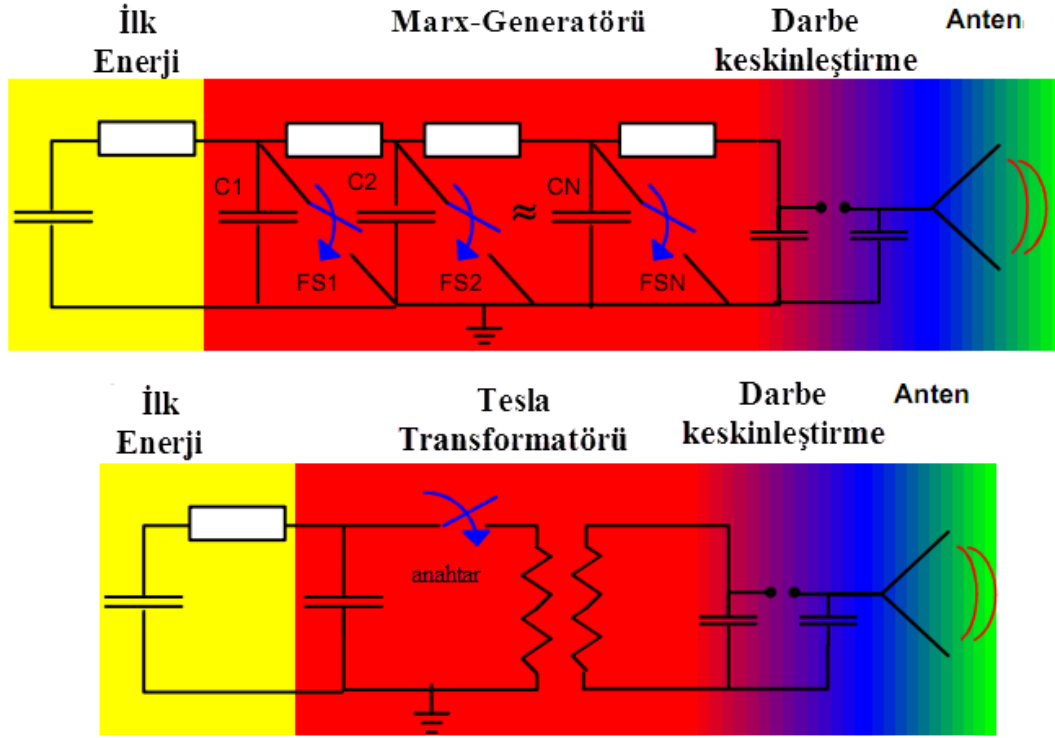
Şekil 2.23 : Hat modülatörünün şematik gösterimi [28].

Sisteme ilişkin karşımıza çıkan en önemli mekanizma anahtarlama mekanizmasıdır. Farklı anahtarlama düzeneklerine ilişkin akım gerilim özellikleri ve karşılaştırılması Çizelge 2.3 ile verilmektedir. Bu tip anahtarlama mekanizmaları, çok yüksek akım ve gerilim sürebilmeleri ayrıca oldukça hızlı cevap verebilmeleri nedeni ile tercih edilirler. Oluşan arklar yüzünden ömürleri nispeten kısa olan bu anahtarların içerisinde; hava, N₂, H₂, SF₆ ile su ve sıvı nitrojen kullanılabilir. Anahtar içerisindeki gaz basıncı ayarlanarak 1MV dan daha büyük bir potansiyel ile toplam 100 Coulomb'dan fazla bir yük taşınabilirken, ticari olarak elde edilebilen modeller ile 50-75kA taşımak mümkündür [16].

Çizelge 2.3 : Darbeli güç uygulamalarında kullanılan anahtarların özellikleri [30].

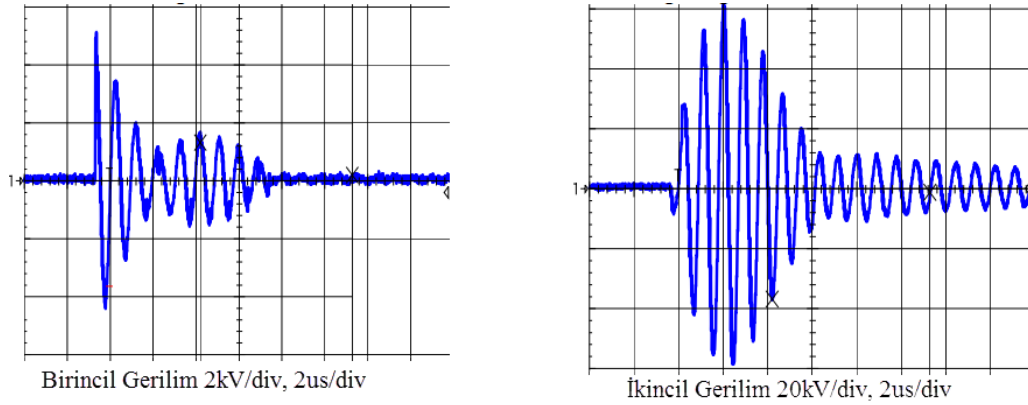
Anahtar Tipi	Gerilim Dayanımı (kV)	Tepe Akımı (kA)
Kıvılcım Aralıklı	100	10 – 1000
Tiratron	30	1 – 10
Pseudo kıvılcım	35	5 – 100
Tristör	1-5	1 – 50
IGBT	1	1
Vakum Tüpü	200	0.25

Birkaç 100 kV'luk gerilim genliği ile yüksek gerilim darbesi üretmek için daha öncede adları geçen iki ana teknoloji mevcuttu bunlar; Marx generatörü ve Tesla transformatörüdür. Bu iki yüksek gerilim generatörü arasındaki fark Şekil 2.25'de gösterilmiştir. 150 kV'luk bir çıkış gerilimi için karşılaştırma yaparsak, Tesla transformatörü Marx generatörüne göre, kompakt boyutu, birinci taraftaki düşük giriş gerilimi, darbe için düşük enerji gereksinimi, yüksek tekrar oranlarında kolay çalışabilmesi ve sadece tek bir anahtar olması gibi özellikleri nedeniyle tercih sebebi olabilir. Yükselme zamanı <500ps ve darbe genişliği <1ns ile aşırı geniş bant darbe üretimi için özellikle düşük darbe enerji gereksiniminde Tesla transformatörü, Marx generatörüne göre avantaj sağlar [31].



Şekil 2.24 : Tesla transformatörü ve Marx generatörü arasındaki farka bakış [31]

2 kV'luk giriş geriliminden yaklaşık 100 kV'luk bir çıkış gerilimi üreten örnek bir Tesla transformatörünün birinci ve ikinci tarafının gerilim dalga şekilleri Şekil 2.26'da gösterilmektedir [31].



Şekil 2.25 : Tesla trafosunun birincil ve ikincil taraftaki gerilim dalga şekilleri

Tipik tesla transformatörü ilkesi şudur, birinci ve ikinci tarafın endüktivitelerinin arasındaki düşük eşleşmeden dolayı ilk enerji parça parça ikinci tarafa transfer edilir. İkinci tarafın üzerinde gerilim genliğinin arttığı görülebilir. Tesla transformatörünün en iyi performansı için birinci ve ikinci tarafın rezonans frekansı çok yakın olmalıdır, bunun için tüm kaçak kapasite ve edüktiviteler sistem tasarımında dikkate alınmalıdır [31].

Bu bölümde önemli olduğundan Marx jeneratöründen de kısaca bahsetmekte fayda görüyorum.

Marx jeneratörü

Bu birim sistemin önemli yapıtaşlarından birisidir. YGEM sisteminde yüksek güçlü elektromanyetik üreticinin ihtiyaç duyduğu çok yüksek voltajı anlık olarak sağlayabilir. Bilindiği üzere Marx jeneratörünün temel çalışma prensibi çok sayıda yüksek voltajlı kapasitörün paralel olarak şarj edilmesi ve voltajlarının seri olarak bağlanarak kullanılmasıdır. Sistemin en önemli iki yapıtaşı:

- Yüksek gerilimli kapasitörler
- Kıvılcım aralığı anahtarlarıdır.

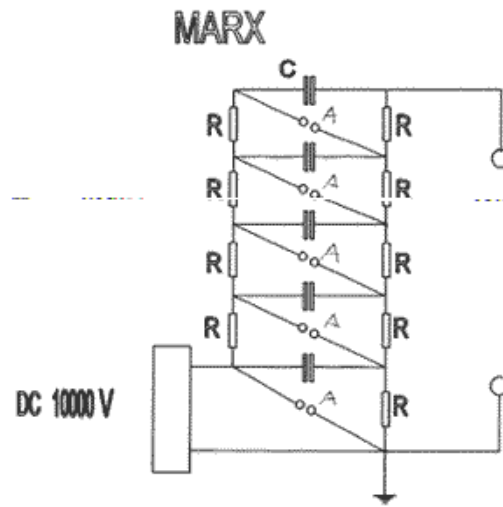
Sistemde kullanılmaya uygun çok yüksek gerilimli kapasitörlerin yegane kullanım alanı askeri YGEM ve Lazer silah uygulamaları olduğu için teminlerinde (export licence) ihracat izni sıkıntıları ve kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu amaçla ülkemizde bu birimlerin teminine alternatif olarak yerli geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Marx jeneratörünün diğer önemli yapıtaşını oluşturan kıvılcım aralığı anahtarlarında ise en önemli parametre kontrol edilebilir bir zaman, gerilim ve sıklıkta anahtarlanabilme özellikleridir.

Marx jeneratörünün elektriksel özellikleri aşağıdaki gibi başlıklar halinde sıralanabilir.

- Bölüm sayısı
- Maksimum gerilim değeri
- Maksimum yüklenme voltajı
- Her darbe için maksimum enerji değeri
- Her bölüm için kapasite
- Dolu kapasite
- Seri indüktans
- Kaynak empedansı
- Nominal giriş voltajı
- Maksimum/minimum çıkış darbe genişliği

- Enerji depolama değeri
- Maksimum darbeli çalışma darbe frekansı
- Soğutma sistem ihtiyaçları
- Yüksek gerilim izolasyon sistemi ihtiyaçları

Marx jeneratörü çalışma prensibine bakacak olursak, bu tip jeneratörler çok yüksek-gerilim değerlerini anlık olarak üretmek için kullanılmaktadır. Seri olarak kıvılcım aralığı anahtarlarına bağlı olan kapasiteler paralel olarak belli bir gerilime kadar şarj edilir. Daha sonra bu anahtarların kapanmasıyla çok yüksek gerilimler elde edilebilir.



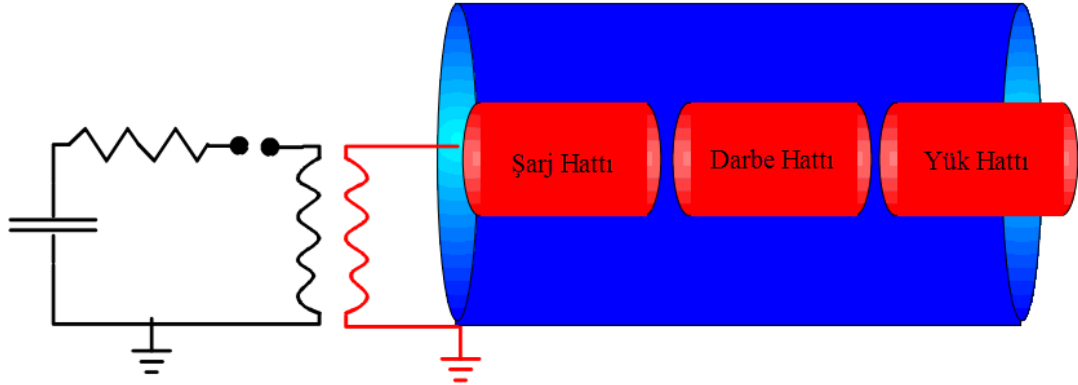
Şekil 2.26 : Marx jeneratörünün şematik gösterimi

Şekil 2.27’de gösterilen örnekteki, Marx jeneratöründe kondansatörler DC gerilim kaynağıyla R dirençleri üzerinden paralel bir şekilde doldurulur. Her bir kondansatör 10000V ile dolduğunda A ark kürecikleri arasında ark oluşmasına neden olurlar. Dolu sırasında paralel bağlı olan kondansatörler arkın oluşmasıyla seri bağlantı pozisyonuna geçerek çok yüksek gerilimlerin oluşmasına ve en uç noktalara bağlı olan ark küreleri arasında elektrik boşalmalarına neden olur.

Darbe keskinleştirme sistemi

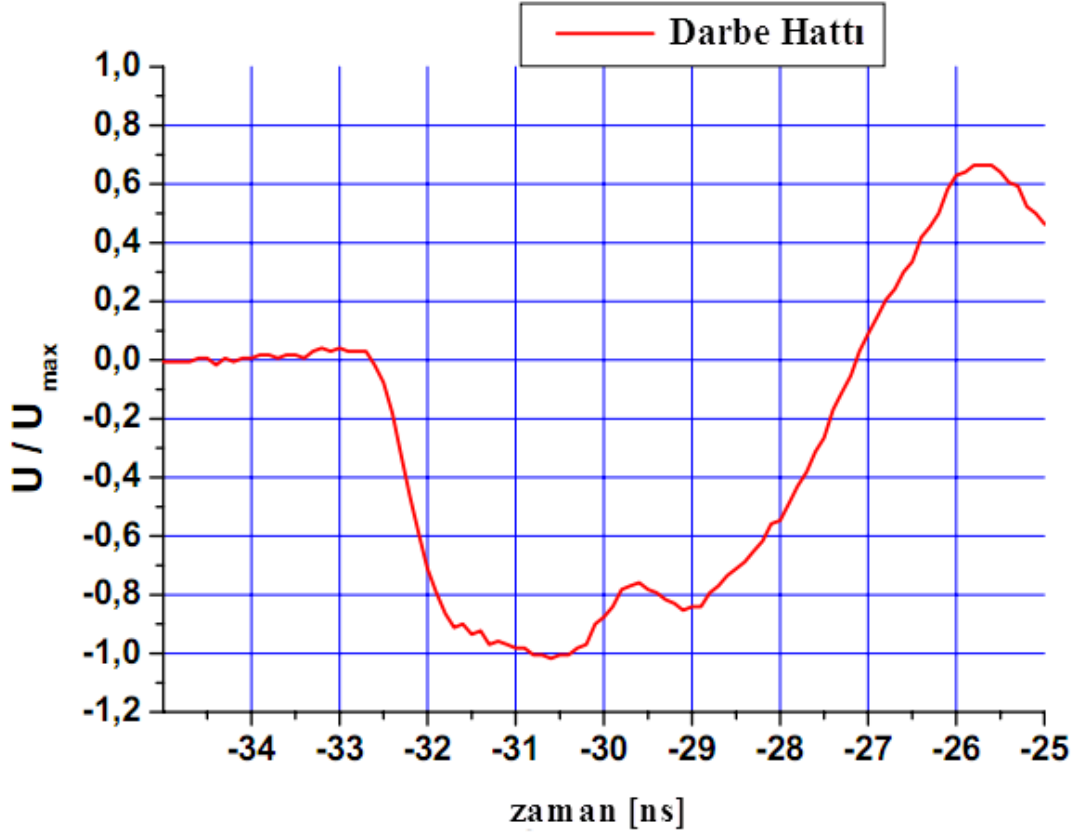
Gaz veya yağ deşarjı ile darbe genliği 100 kV civarındaki darbe yükselme zamanı <500ps ‘den az üretim normal olarak hızlı kıvılcım aralığı yükleme ile yapılır. Aralık düşük yükleme oranından daha çok yüksek gerilimleri görecektir, bu da aralıklar arasında daha yüksek elektrik alan kuvvetine neden olur. Birkaç aralığın seri olarak yerleştirilmesi ile, darbenin önde gelen kenarı keskinleştirilebilir [32].

Darbe keskinleştirme sistemi üç aşamadan oluşmaktadır; yükleme hattı, darbe hattı, ve yük hattı (Şekil 2.28'e bakınız). Herbir hat deşarj aralığı tarafından birbirinden ayrılmıştır. En sondaki aralıkta elektrodlar arasındaki elektrik alan şiddeti anahtarlama öncesi 1 MV/cm civarındadır. Herbir hat belirli uzunlukta 50 Ω 'luk darbe hattı gibi tasarlanır. Her bir hattın içi, her hat boyunca gerilimi ölçmek için bir kapasitif gerilim probudur. Tüm sistem 20 bar'lık dış basınç altında çalışmak üzere tasarlanır [31].



Şekil 2.27 : Tesla transformatörü ve darbe keskinleştirme sistemi [31]

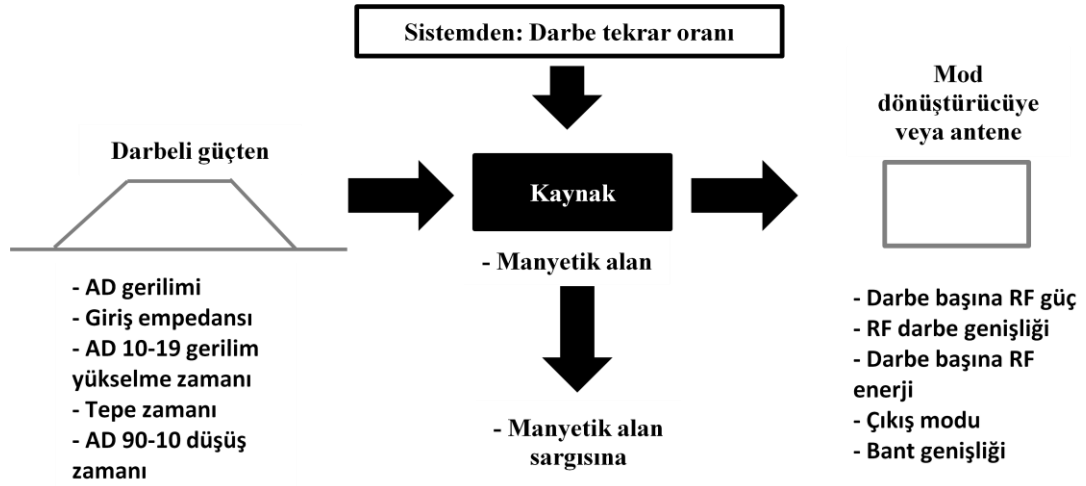
Şekil 2.29 örnek sistem için darbe hattının ortasındaki gerilim dalga şeklini göstermektedir, bu örnekte yaklaşık olarak yükselme zamanı 500 ps'dir. Elektrod aralığının ve basıncın değişmesi ile 300 ps'den az minimum gerilim yükselme zamanı 100 kV civarı bir giriş gerilimine ulaşabilir [31].



Şekil 2.28 : Darbe hattında gerilim dalga şekli [31]

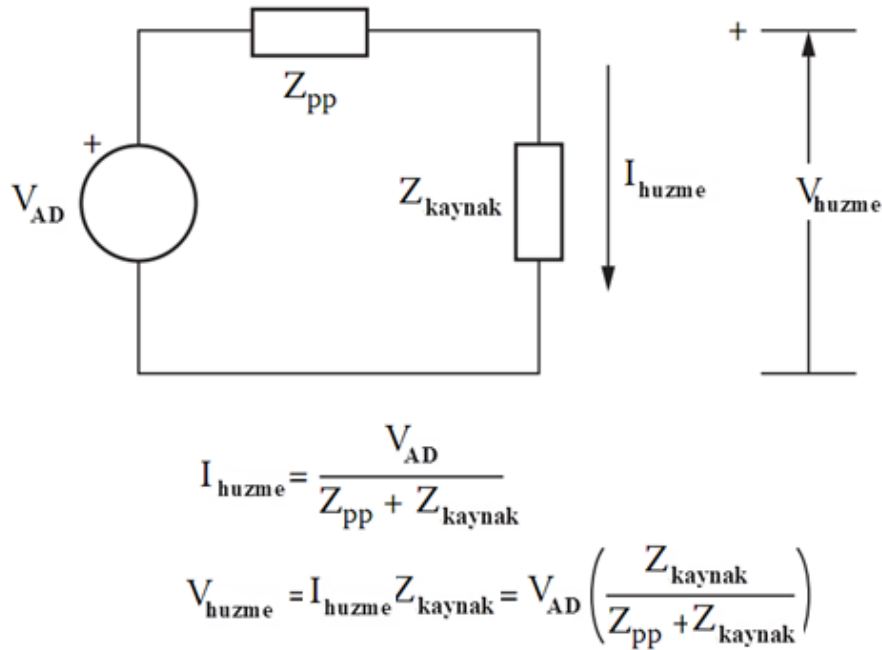
Mikrodalga kaynaklar

Mikrodalga kaynaklar Şekil 2.30’da gösterildiği gibi genellikle sistemin en karmaşık elemanlarıdır. Şekilden de görüldüğü gibi kaynak, vakum pompası ve soğutma gibi yardımcı elemanlara sahip olacaktır ve ana osilatör yükseltme için gerekecektir. Akış elemanlarının bağlantı amacı için (genellikle antene doğrudan bağlanır) basit bir hamle ile kaynağın gerekli özellikleri, pik mikrodalga güç, frekans, darbe uzunluğu ve çıkış dalga klavuzu modu gibi alınabilir. Bant genişliği de akış elemanlarının tercihini etkileyebilir. Kaynaklar da sağlam destekleyici araç gereçlere sahiptir; vakum pompası, birçok durumda mıknatıs, soğutma sistemi (diğer altsistemler gibi yapılır) ve kollektör veya ısımayı yakalamak için depo gibi. Eğer kaynak bir yükselteç ise, ana osilatör olabilir. Kaynağın gücü, frekansı, darbe süresi ve darbe genişliği bu osilatörü tanımlar. Manyetik alan, kaynağın fiziği tarafından belirlenecektir. Bu işlemler yapılırken, personeli korumak için x-ray kalkanına ihtiyaç olabilir [29].



Şekil 2.29 : Darbeli gücün mikrodalga kaynağa ve anten üzerine bağlanması için bağlantı parametreleri. AD=açık devre [29]

YGM sisteminde en önemli arayüz belkide darbeli güç ve mikrodalga kaynak arasındadır. Elektriksel olarak, mikrodalga kaynak Z_{KAYNAK} empedansı tarafından karakterize edilirken, darbeli gücün özel açık devre gerilimi, V_{AD} (darbeli güç tarafından açık devrede üretilen gerilim) ve darbeli gücün çıkış empedansı tarafından temsil edildiğinden Şekil 2.31'deki gibi karakterize edilebilir.



Şekil 2.30 : Kritik darbeli güç mikrodalga kaynağın arayüzü için verilen devre. Empedans bileşimi elektriksel girişi kaynağa tanımlar.

Bu arayüzün önemi darbeli güç ve mikrodalga kaynağın empedansının uygun olması veya ciddi enerji ve güç verim kayıpları olacak olmasının getirdiği ihtiyaçtan

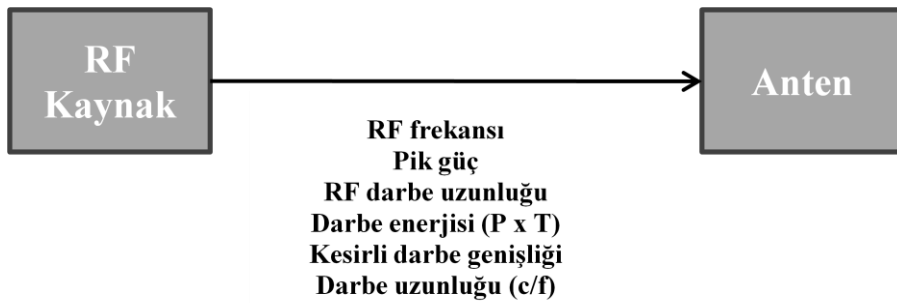
kaynaklanmaktadır. Bu, sırasıyla sistemin boyutunu ağırlığını ve fiyatını etkilemektedir. Empedans eşleme, kaynak empedansının zamanla değişmesinden dolayı karmaşık olur. Işın üreten diyotta aralık kapanmasından dolayı genellikle başlangıç değerinden düşer. Birçok kaynağın sahip olduğu, Child–Langmuir ve foil-less diyotları için empedans anod katot aralığı (d) ile farklılık gösterir, fakat gerilim ile zayıf bir şekilde farklılık gösterir. Child–Langmuir diyotları için denklem şöyledir;

$$Z_{kaynak} \sim \frac{d^2}{V^{1/2}} \quad (2.6)$$

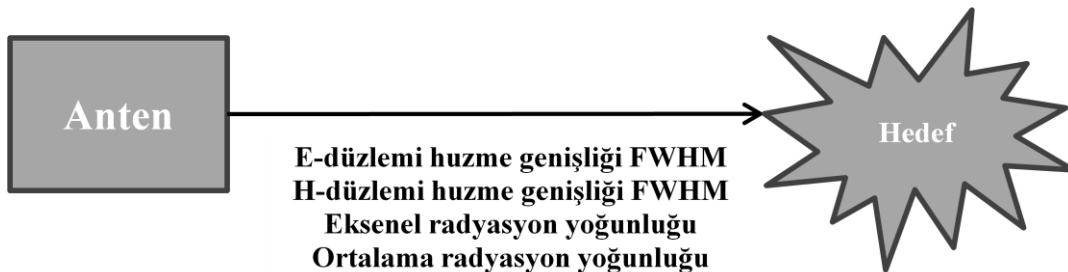
bu yüzden plazma katotda veya anotta üretilir ve aralığı kapatmak için taşıma empedansı durmadan değiştirebilir. Bundan dolayı, pik mikrodalga gücün olduğu an (mikrodalga rezonansa ulaşır) empedans eşlemenin olması için en iyi zamandır.

Mod çevirici ve anten

Kaynağın çıkış parametreleri antene bağlantıyı tanımlar (Şekil 2.32). En can alıcı faktör, istenen anten ile uyumlu yapılması gereken dalga klavuzu modudur. Anten çıkışının karakteristik özelliklerini, güç, frekans ve anten kazancı veya açısız huzme genişliği belirler. Bunlar çıkış huzme yayılımının karakteristiğini belirlerler (Şekil 2.33) [29].



Şekil 2.31 : Mikrodalga kaynağı anten bağlamak için bağlantı parametreleri.



Şekil 2.32 : Anten çıkış parametreleri mikrodalga huzmesinin ayrımını belirler.

YGM sistemler için kullanılan antenler, yaptığımız anten tasarımı, özellikleri ve konuyla ilgili detaylı bilgi 4. ve 5. bölümlerde tartışılacağı için bu bölümde kısaca bilgi verdik. (FWHM= Yarı güç demet genişliği)

2.2.2.5 Sistem sorunları

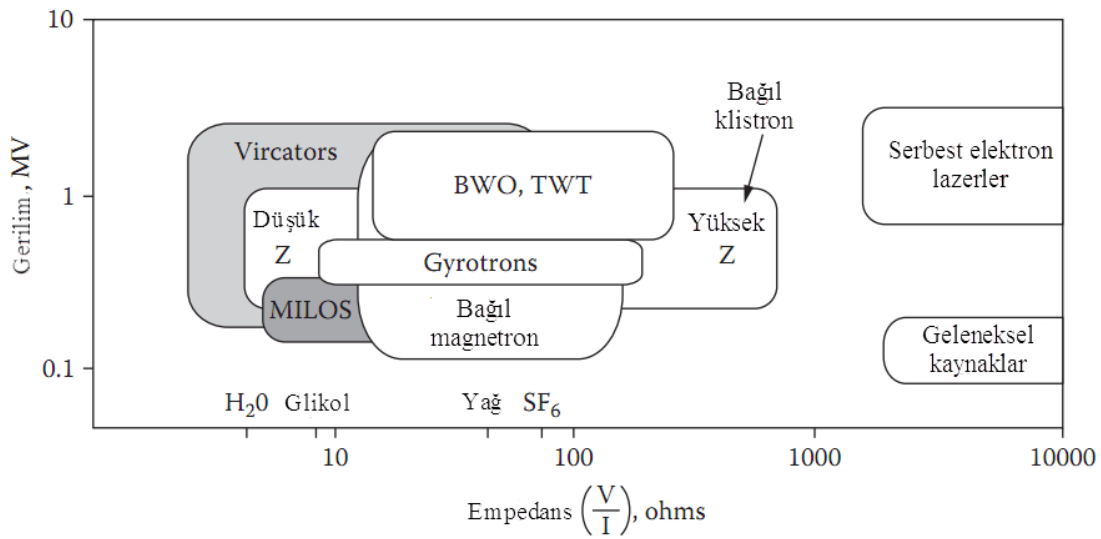
Kaynaklar için bileşen seçimi, elektrik enerjisinden mikrodalgaya verimli enerji transferi, sıkça düşünülen bir çalıştırma faktördür. Bu bir neden iken, aslında gerçekten önemli faktörler için bir bahanedir. Çeşitli uygulamalar farklı çalıştırma faktörlerine sahiptirler. Geçmişte, pik güç bir çalıştırma faktörüydü. Fakat günümüz sistemlerinde, kaynaklarla diğer elemanların uyumu daha önemli hale geldi. Bunların yanında güvenilirlik, karmaşıklık, korunabilirlik ve hareketlilik gibi diğer faktörler de vardır [29].

Hareketli bir sistem gerektiren askeri uygulamalarda, sistem için çalıştırma parametresi genellikle hacim ve sistemin yerleşik ortalama güç gereksinimidir. Mantığa ters gelsede ağırlık daha az önemlidir. Örneğin, hava kuvvetleri genellikle hafif ağırlık talep eder. Bir YGM sistem genellikle önceden diğer sistemler için ayrılmış boşlukta var olan bir platformun üzerine oturtulur. Böyle bu tip sistemler genellikle YGM cihazlardan daha yoğundurlar. Örneğin, eğer bir YGM sistemi vakum hacmi ile birlikte yüksek yoğunluklu patlayıcı bir savaş başlığının yerine geçerse, ağırlık gerçekten düşer. Bu yüzden, çoğu kez gerçek kısıtlama hacimdir [29].

Güç yayan uygulamalar genellikle ya verici tarafta ya da alıcı tarafta bulunan anten tarafından sınırlanır. Diğer yandan, parçacık hızlandırıcılar için esas çalıştırma faktörünün biri kaynak maliyetidir. Ömür, ortalama güç ve darbe başına enerji üzerindeki çok sıkı performans gereksinimlerinden dolayı bu doğrudur. Bir diğeri ise sistemin karmaşıklığından gelen güvenilirliktir; pek çok mikrodalga kaynağı olduğu zaman, sık bozulmalara dayanılmaz. Bu gereksinim daha geleneksel teknoloji seçiminin yanında tartışılır [29].

Sistem bileşenlerinin elektriksel parametrelerinin anahtar ayırt edicisi akım, gerilim ve onların oranıdır (empedans). Bileşen geometrisi ve yerel elektrik ve manyetik alan (E/B)'ye orantılı olan kaynaktaki parçacık sürüklenmesinden uygun E ve B bileşenlerine de bağlı olduğundan, empedans oldukça genel bir seviyededir. Empedans, kompleks empedans heriki reel bölümü içeren, reel ve imajiner bölümler

ve reaktans içinden antenlerle de ilişkilidir. Anten tasarımında empedans uyumu reaktif bileşenlerin azaltılmasıyla daha kolay yapılır. YGM kaynak teknolojilerinin içeren gerilim-empedans parametre uzayı Şekil 2.34'te gösterilmektedir. Yaygın kullanılan darbe hattı izolatörleri (su, glikol, yağ, SF₆) için en iyi empedanslar gösterilmiştir. 100 kV'dan küçük gerilimler ve 1 kΩ'dan büyük empedanslar ile geleneksel mikrodalga uygulamaları (radar, elektronik karşı tedbirler, iletişim) düşük güçlerde kalır (güç= V^2/Z). Çoğu, fakat hepsi değil, günümüzün YGM cihazları 10-100 Ω arasında yoğunlaşmıştır. Gerilimler genellikle 0.1 ile 1 MV aralığında yayılmıştır, fakat bazı kaynaklar birkaç megavoltlara kadar çalıştırılmaktadır.



Şekil 2.33 : YGM ve darbeli geleneksel kaynaklar için gerilim ve empedans parametre uzayı [29].

Gerçek şudur ki, empedansın geniş aralıkta yayılan elektrik enerjisinin mikrodalga kaynaklara verimli transferi, benzer şekilde sağlam empedans aralığında yayılan darbeli güç teknolojileri gerektirecektir. Yan yana devre elemanları aynı empedansa sahip olmadığı zaman, gerilim, akım ve akış elemanına transfer edilen enerji çok farklı olabilir. Eğer empedans uyumsuzluğu olursa, özellikle akış elemanı devrenin onu çalıştırmamasından daha düşük bir empedansa sahipse, verimli enerji transferi zarar görür. Bununla birlikte, istisnalar da vardır: daha yüksek yük empedansında artan uyumsuzluk, bazen artan yük geriliminin etkisiz bir aracı olarak kullanılır [29].

3. YÖNLENDİRİLMİŞ EM ENERJİ İÇİN TORYUM REAKTÖRLER

Önceki bölümde anlatılan sistemler için hayati önem taşıyan konu enerji başlığıdır. Çünkü ihtiyaç duyulan enerji hem oldukça yüksek seviyelerde olmalı hem de enerji kaynağı boyut olarak uygun ve taşınabilir olması gerekmektedir. Bunu geleneksel enerji depolayan sistemler ve kaynaklarla çözme fikri bize ekstra bir avantaj sağlamaz. Çünkü burada amaç en uzak noktaya en verimli şekilde mümkün olan en yüksek enerji ulaştırmaktır. Bunu da ancak istediğimiz şartları sağlayabilen, birçok avantaja sahip dördüncü nesil reaktör çalışmalarından biri olan Likit Florid Toryum Reaktörler ile başarabiliriz. Bu sebeple bu bölümde LFTR'ler ile ilgili genel bir bilgilendirmenin yanında çalışma yapısı ve sağladığı avantajları gibi konulara değinilmektedir.

Likit yakıtlı nükleer reaktör fikri yeni değildir. Chicago üniversitesinde uranyum bloklar ve grafit yığını içinde 1942'deki ilk nükleer reaktörün mucidi Enrico Fermi, iki yıl sonra 1944'de dünyanın ilk suda çözünen uranyum sülfat yakıt kullanan likit yakıtlı reaktör çalışmasını başlatmıştır. Tüm nükleer zincir reaksiyonlarında, bölünebilir maddeler bir nötronu içine çeker, daha sonra atom bölünmesi ile çok büyük enerji ve ilave nötronlar yayılır. Işık hızının %10'una yakın bir hızda hareket ederek yayılan nötronlar, saniyede birkaç kilometrelik hızlara sert bir şekilde düşmeselerde, Fermi'nin Chicago Pile-1 gibi bir reaktörde çok olası olmayan ilerleyen bölünmeye neden oluyordu. Fermi'nin cihazı, uranyum yakıt topunun arasındaki grafit blokları nötronları yavaşlatır. Fermi reaktörünün kontrol sistemi, üzerine ekleme ile nötronları yakalayan, nötron üretimini azaltarak zincir reaksiyonu söndüren kadmiyum kaplı çubuklardan oluşmaktadır. Nötron tutumunu düzenleme ile zincir reaksiyonun kontrolü ve nötron yavaşlatmanın benzer ilkeleri nükleer reaktör tasarımının merkezi olmaya devam ediyor [33].

Fermi'nin başlattığı çalışmaların akabinde, 1950'lerin başlarından 1970'lerin sonlarına doğru, Tenn'deki "Oak Ridge National Laboratory"nın aktif araştırma geliştirme çalışmaları, büyük miktarda temiz ve güvenli enerji üretmek için toryumu kullanmak için umut verici bir yol ortaya koydular. Bu yol, katı yakıt yerine likit

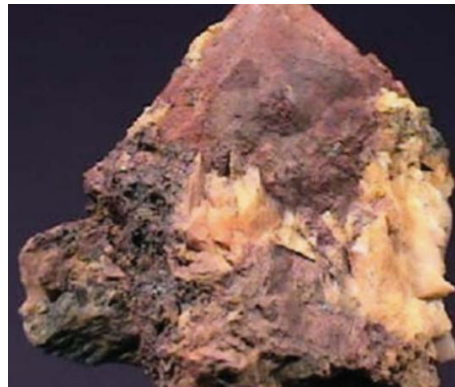
yakıt kullanan devrim niteliğinde bir nükleer reaktöre dayandırılıyordu. Likit yakıtın, işletmede, kontrolde ve katı yakıt prosesi üzerinde teorik olarak büyük avantajlara sahip olduğu belirlenmişti. Fakat çalışıp çalışmayacağı bilinmiyordu [34].

Bu maksatla Oak Ridge mühendisleri dört tane likit yakıtlı reaktör inşa ettiler. İkisi su bazlı likit, diğer ikiside likit florit tuz bazlı idi. Su bazlı reaktörlerin, ekonomik güç üretimi için gereken sıcaklığı üretmesi ancak yüksek basınçta çalıştırılması ile mümkün olmaktadır. Ayrıca, su bazlı reaktörler için (gerçekte katı yakıtlı versiyonları için) karmaşık olan yakıt yeniden işlemesi yapan, toryum içermeyen uranyum bileşenlerinin çözünmesini sağlamalıdır [34].

Florit reaktörler bu engellerin hiç birine sahip değildi. Basınç altında tutmaya gerek kalmadan yüksek sıcaklıklarda çalışabiliyorlardı. Ayrıca toryum ve uranyumun her ikisinin de, kendi florit- tuz karışımlarının içinde çözünmesini sağlıyordu ve karışımlar kendi iyonik bağları nedeniyle radyasyon hasarlarına karşı da dayanıklıydı. Bundan dolayı Oak Ridge mühendisleri gelecekteki arge faaliyetleri için teknik olarak daha üstün olan likit-florit tuz yaklaşımında karar kıldılar [34].

3.1 Toryum Elementi

1828 yılında Jöns Jacob Berzelius tarafından keşfedilen ve periyodik tabloda aktinit serisinin ikinci üyesi olan toryum, yer kabuğunun %0,0007'lik kısmını oluşturmaktadır. Toryum, uranyum gibi doğada serbest halde bulunmayıp 60 civarında mineralin yapısı içinde yer almaktadır. Bunlardan sadece monazit ((Ce, La, Nd, Th, Y)PO₄) ve torit ((Th, U) SiO₄) toryum üretiminde kullanılmaktadır. Bu mineraller de genellikle nadir toprak elementleri (NTE) ile birlikte bulunmaktadır. Şekil 3.1'de torit kristali gösterilmektedir [35].



Şekil 3.1 : Torit kristali [34].

Toryum gümüzde genellikle, yüksek sıcaklıklarda magnezyumun direncini artırmak amacıyla alaşımlarda, elektronik cihazlarda ve aydınlatmada tungsten filamanların kaplanmasıda, yüksek ısıya dayanıklı potaların yapımıda, yüksek kaliteli kamera merceklerinde ve nükleer teknolojiye kullanılmaktadır [35].

Atom numarası 90, atom ağırlığı 232,038, erime noktası 1730 °C, kaynama noktası 3850 °C ve özgül ağırlığı 11,71 gr/cm³'tür. Toryumun Th-233'ten Th-235'e varan on üç tane radyoaktif izotopu vardır. Doğal halde bulunan tek izotopu Th-232 olup, bunun yarılanma ömrü 1,39.10¹⁰ senedir. Toryumun en çok kullanılan bileşiği ThO₂'dir. Toryum oksit tüm oksitler arasında erime noktası en yüksek olandır (3300 °C) [36].

Toryum yer kabuğundaki teneke, volfram, civa veya gümüş gibi birçok elementten daha yaygın olarak bulunmaktadır. Yer kabuğunun ortalama bir metre karesinden çıkan miktar, yaklaşık 40 gr veya 4 küp şekere eşdeğerde toryumdur. Eğer bu miktarda toryum komple bölünerek enerjisini yayarsa, bir kişinin 10-15 yıllık enerjisini karşılamak için yeterlidir [34].

Toryumun dünyada ve ülkemizdeki bulunan ve tahmin edilen rezervlerini gösteren Çizelge 3.1'i incelediğimizde konunun ciddiyetini daha iyi anlamış oluruz. Çünkü dünya toryum rezervleri arasında Türkiye'nin payı oldukça yüksektir. Türkiye'nin sahip olduğu bu rezervler, stratejik bir maden olan toryumun önemini daha da arttırmaktadır.

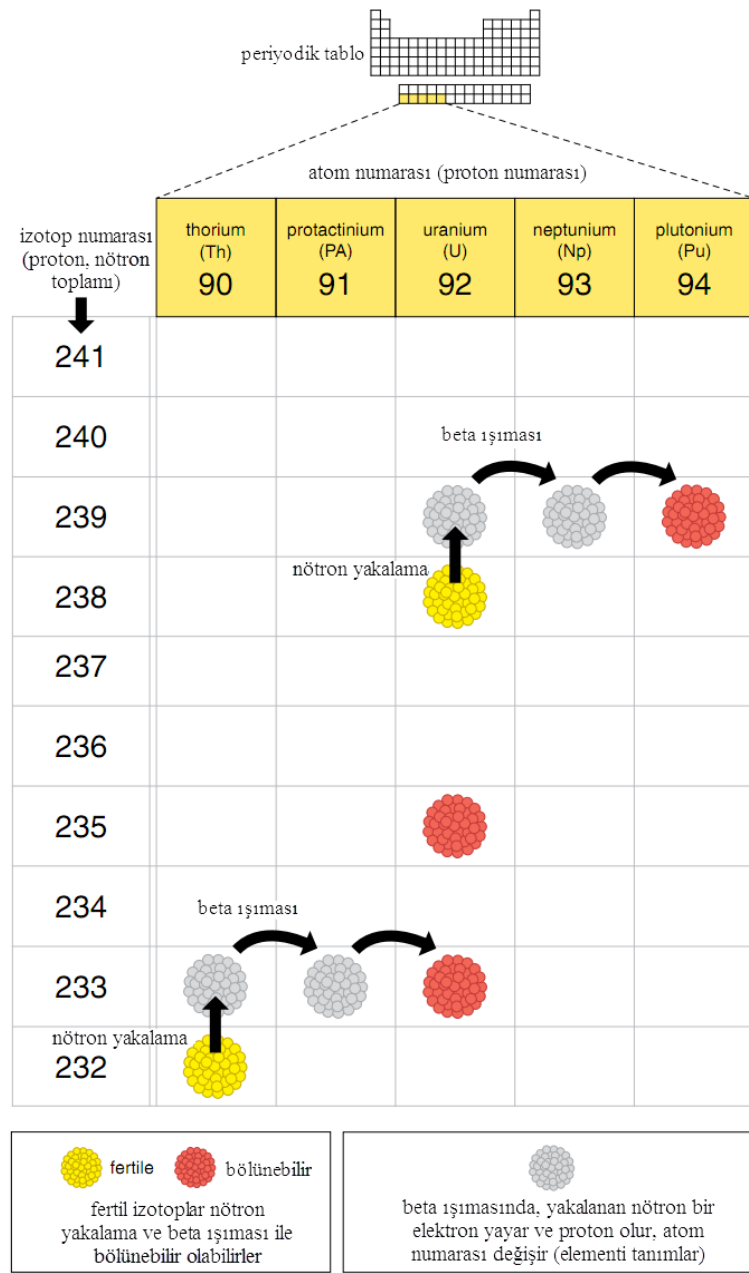
Ülkemizde toryumun nerelerde bulunduğuna bakacak olursak, toryum ihtiva eden Eskişehir-Sivrihisar cevheri yatağındaki, Yaylabası ve Kocayayla sektörlerinde yeterli sayıda sondaj yapılamadığından kesin rezerv belli olmamakla birlikte 344 bin ton civarında olduğu sanılmaktadır. Bu bölgelerle birlikte Malatya-Hekimhan-Kuluncak gibi diğer bölgelerde de çalışmaların yapılması durumunda rezervin iki katına çıkması ihtimali vardır. Ancak bu konuyla ilgili kesin sonuca götürecek bir çalışma yapılmamıştır [35,36].

Çizelge 3.1 : Dünyadaki ve Türkiye'deki toryum rezervleri [37-39]

Ülkeler	Toplam Belirlenmiş Toryum Miktarı < USD 80/kg Th		Toplam Tahmin Edilen Toryum Miktarı < USD 80/kg Th		Tahmin Edilen + Belirlenmiş Toryum Miktarları Toplamı < USD 80/kg Th	
	1000 t Th	%	1000 t Th	%	1000 t Th	%
Avusturya	489	18,7	NA	0	489	10,9
Birleşik Devletler	400	15,3	274	14,6	674	15,0
Türkiye	344	13,2	500	26,5	844	18,8
Hindistan	319	12,2	NA	0	319	7,1
Brezilya	302	11,6	330	17,4	632	14,1
Venezuela	300	11,5	NA	0	300	6,7
Norveç	132	5,1	132	7	264	5,9
Mısır	100	3,8	280	14,8	380	8,5
Rusya	75	2,9	NA	0	75	1,7
Grönland	54	2,1	32	1,7	86	1,9
Kanada	44	1,7	128	6,7	172	3,8
Güney Afrika	18	0,7	130	6,9	148	3,3
Diğerleri	33	1,3	81	4,4	114	2,5
TOPLAM	2610	100.1	1887	100	4497	100

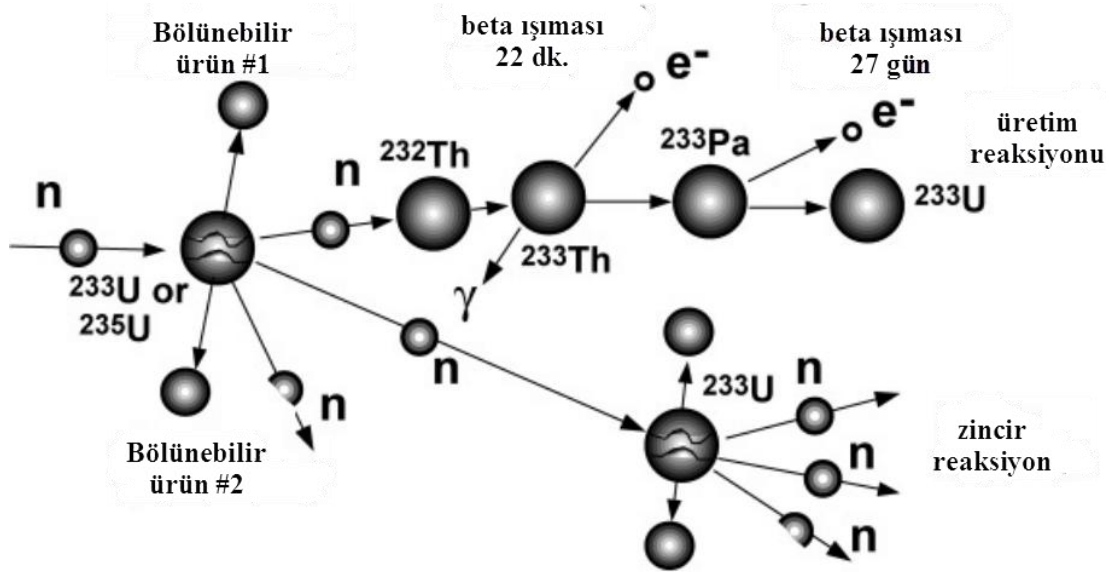
3.2 Nükleer Yakıt Olarak Toryum

Nükleer yakıt olarak kullanılabilen üç tane muhtemel bölünebilir yakıt mevcuttur. Bunlar, U-233, U-235 ve Pu-239'dur. U-235 kripton ve baryum'a bölünerek enerji yayılımı (yaklaşık 166 MeV) yapar. U-238 nötron yakaladığı zaman bölünebilir plütonyum-239 maddesine dönüşür. Toryum-232 ise nötron yakalayarak bölünebilir U-233 maddesini oluşturur. U-238 ve Th-232 bölünebilir yakıt ürettikleri için fertil (üretken) olarak adlandırılırlar. Bütün bu anlatılanlar Şekil 3.2'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

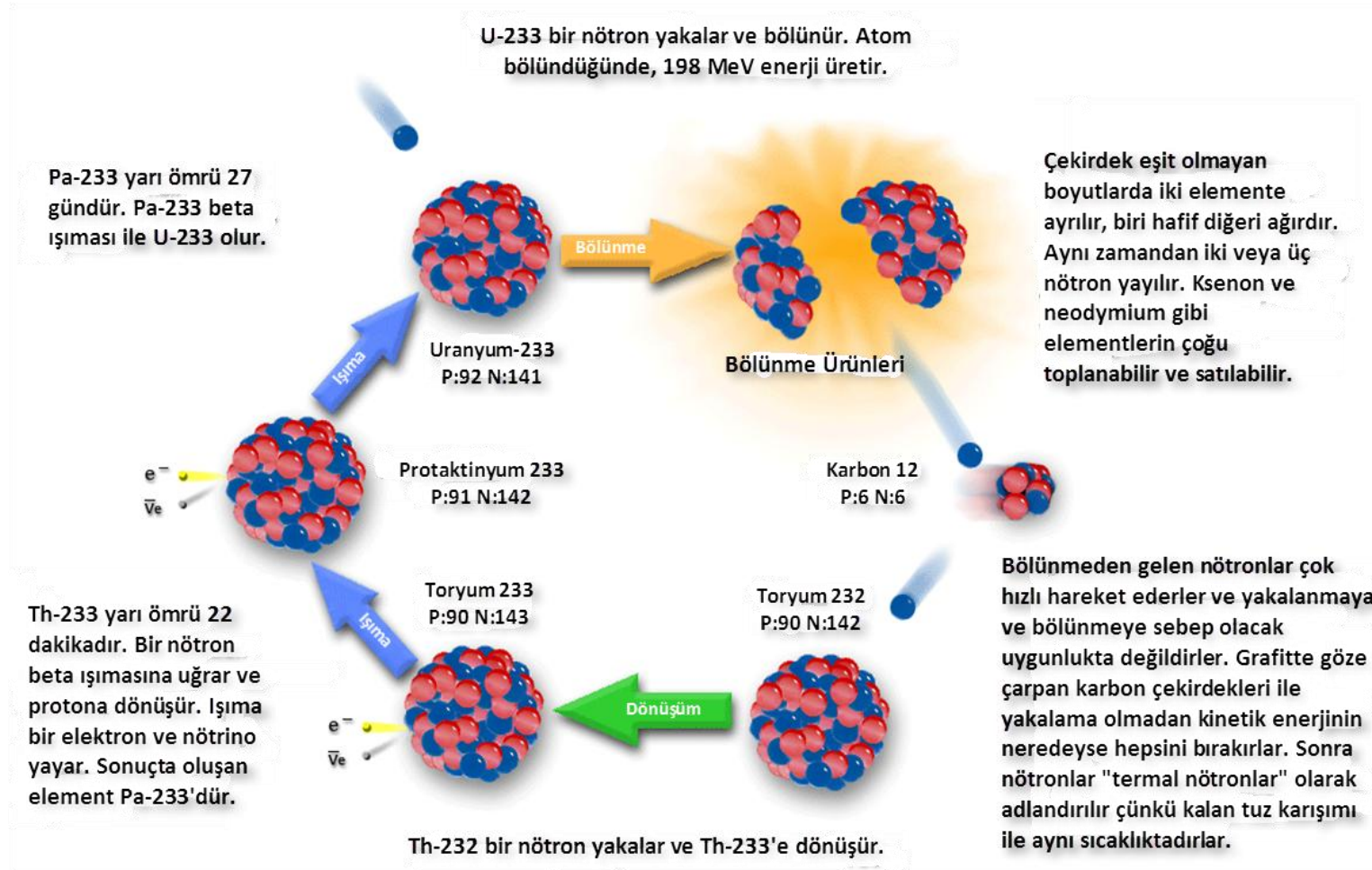


Şekil 3.2 : Bölünebilir madde oluşumunun döngüsü [33]

Toryum doğal olarak var olan biraz radyoaktif ve nispeten daha bol bulunan bir elementtir. Toryum tek başına nükleer yakıt olarak kullanılamaz. Toryumun reaktörlerde yakıt olarak kullanılması, bir nötron içine alarak uranyumun suni izotopu olan U-233'e çevrilme süreci sonunda olur. Th-232'nin düşük enerjili nötronlarla tepkimesi (nötron yakalama) sonucunda ilk önce daha az kararlı olan Th-233 oluşmaktadır. Th-233 ise, 22 dakika içinde, bir beta parçacığı yayarak Pa-233'e (protaktinyum) dönüşmektedir. Pa-233, 27 gün içinde, yarılanma süresi 163.000 yıl olan fisil U-233'e dönüşmektedir. Böylece Şekil 3.3'de görüldüğü gibi Th-232, U-233 veya Pu-233 gibi başka bir bölünebilir maddeyle üretkenlik döngüsüne başlamaktadır [35]. Genellikle toryum bir nötron içine aldığı zaman atom çekirdeği parçalanır (fizyon), sonucunda iki veya üç nötron açığa çıkar ve eşdeğer miktarda fosil yakıtın yakılmasından elde edilecek enerjiden bir milyon kez daha fazla bir enerji yayılır [34]. Daha ayrıntılı anlatım için Şekil 3.4'teki şematik gösterime bakabiliriz. Şekilde, herbir reaksiyon iki veya üç nötron ürettiğinden, ortalama olarak 2.5 nötron kabul edilmiştir ve yarım nötron olarak gösterilmiştir.

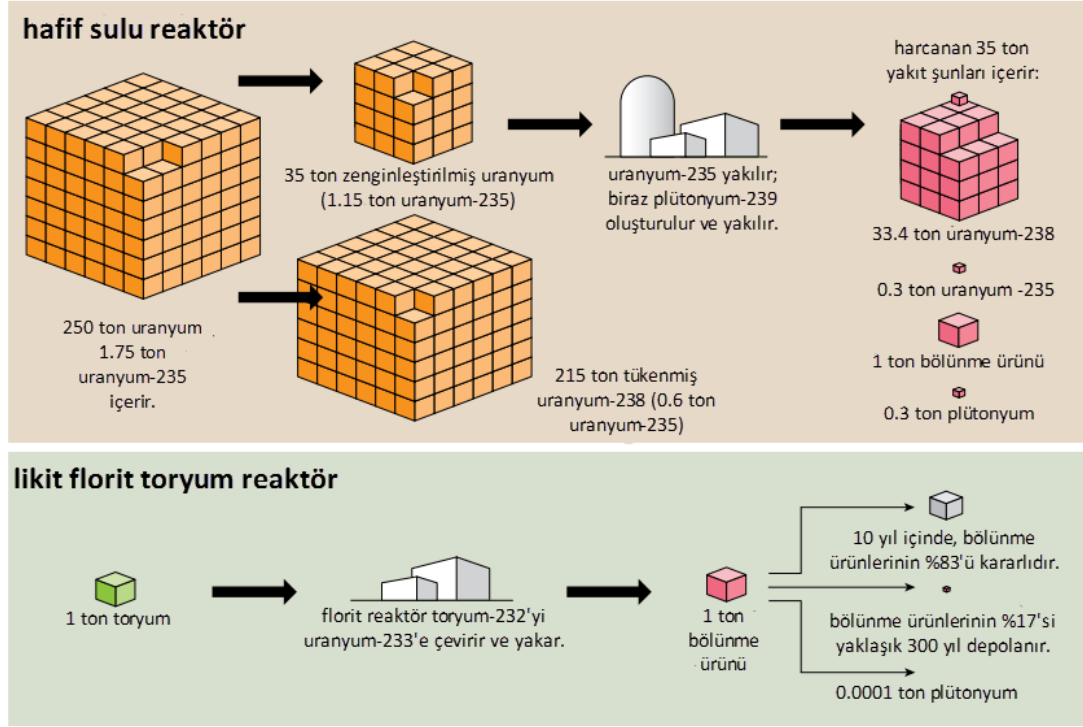


Şekil 3.3 : Zincir reaksiyonun bir parçası olarak, Th 232 nötron yakalamasından, yeni yakıt (Th 233) üretme ve çoğaltma süreçlerinin yer aldığı gösterimdir [40].



Şekil 3.4 : Toryum yakıt döngüsü [41]

Toryum yakıtlı reaktörler, geleneksel tip uranyum yakıtlı reaktörlerle karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Likit florit toryum yakıtlı reaktörlerin sağladığı avantajlara birazdan değinilecek ancak önce yıllık 1000 MW'lık enerji üretimi için toryum ve uranyum yakıt çevrimlerinin karşılaştırılmasına bakalım (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Toryum ve uranyum yakıt çevrimlerinin karşılaştırılması

Toryumun yararlı enerjisinin %100 çıkarılabilirken, uranyumda bu oran %0.7'de kalmıştır. Bu yüzden bu örnek gösterimde olduğu gibi, toryum kullanana göre uranyum kullanan bir sistem daha fazla hammadde gerektirir ve bir yılda 1000MW elektrik üretmek için çok daha fazla tehlikeli atık madde bırakır [34].

3.3 Likit Florit Toryum Reaktör

Geleneksel uranyum yakıtlı reaktörlere göre birçok avantaja sahip olması ve uranyum elementine göre doğada daha yaygın olması nedeniyle son günlerdeki çalışmalar Likit Florit Toryum Reaktör üzerine yoğunlaşmış durumdadır (LFTR veya LiFTeR olarak da adlandırılabilir). LFTR’de, reaktör kazanı iki tip likit florit tuz içermektedir. Nükleer reaksiyona maruz kalan bölünebilir yakıtı (U-233) tutan yakıt-tuz bunlardan biridir. Diğeri ise bölünmede açığa çıkan nötronların yaklaşık yarısını tutan yeteri kadar toryuma sahip ve daha fazla U-233 üreten üzerini örten (kaplayan) tuzdur [34].

Etrafını örten tuz, reaktör kazanını nötron hasarından ve gama ışınlarından korur. Örten kısımdaki toryum U-233’e dönüştüğü için, fiziksel olarak bölünmenin yanında nötron ve ısı yayılımının da olduğu yakıt-tuza transfer edilir. Isı, elektrik üretmek için, soğutucu tuzu sonra da kapalı çevrim gaz türbini motorunun çalışma sıvısını çekirdeğin dışına hareket ettirir. Atık ısı, soğutma suyunun bulunma durumuna göre hava ya da su ile geri çevrilebilir. Atık ısı ayrıca, içilebilir su üretme amacıyla deniz suyunu tuzdan arıtmak için de kullanılabilir [34].

3.3.1 LFTR’nin çalışma şekli

Yakıt tuz ve örten tuz için mutlaka olması gereken bazı anahtar gereksinimler vardır. Bunlar;

- Kimyasal olarak kararlı olma
- Radyasyondan etkilenme
- Nötron yakalamak için az isteğe sahip olma
- Büyük miktarlarda uranyum, toryumu ve bölünebilir ürünü çözebilme
- Asgari erime sıcaklığına sahip olma
- Yüksek ısı kapasitesine sahip olma

olarak sıralanabilir [34].

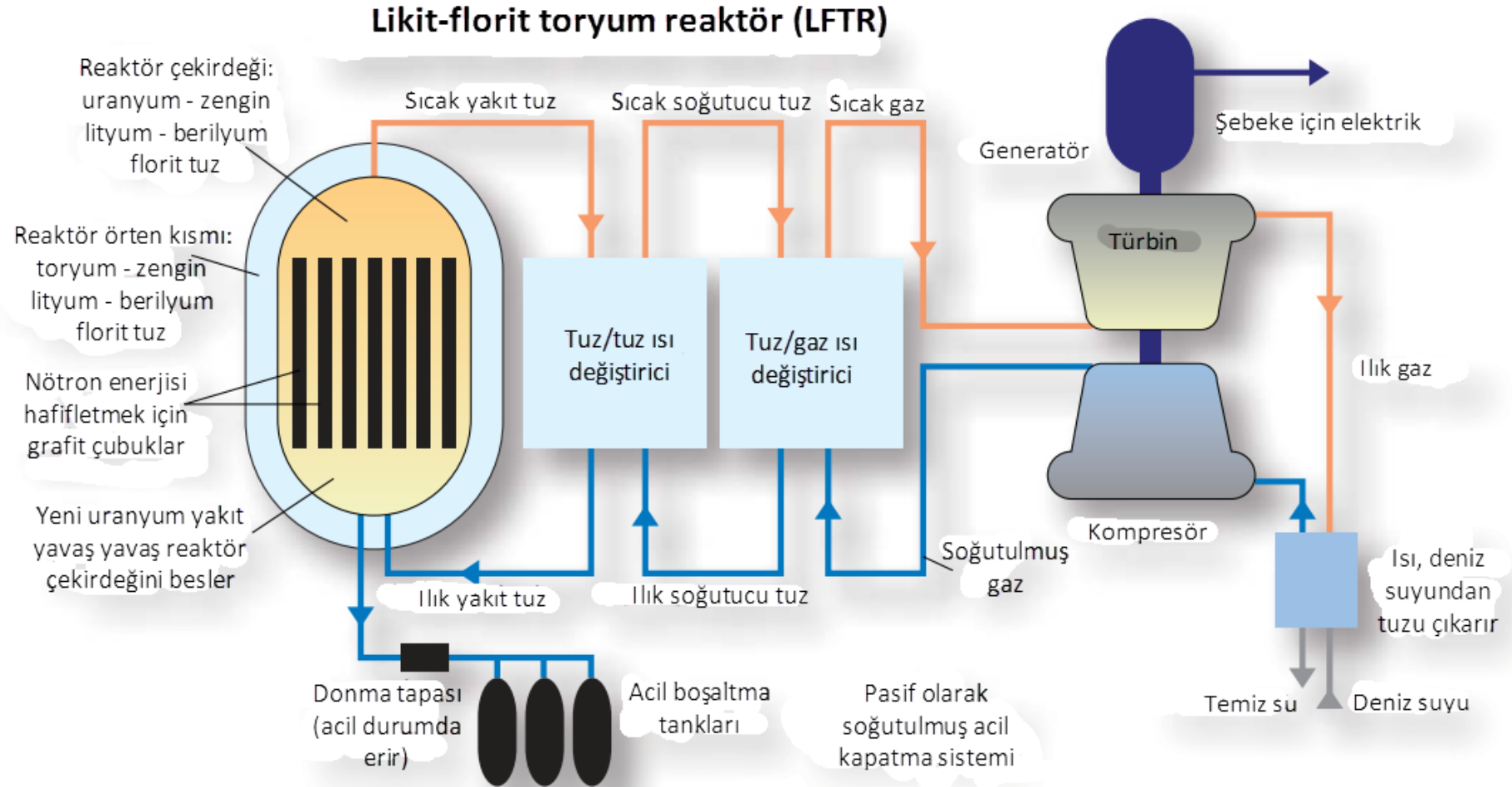
LFTR’de kullanılan yakıt tuz ve örten tuz için ihtiyacımız olan lityum berilyum florit tuz yapıları çok önceden kimyagerler tarafından bulunmuştu. Ana bileşenlerden biri Lityum-7 içerisinde yüksek derecede zenginleştirilmiş Lityum-florit (LiF)’dir. Bu izotop doğal lityumun %90 nını oluşturur ve hemen hemen hiç nötron yakalama

eğilimi yoktur. Diğer bileşen berilyum diflorit dir (BeF_2). Zehirlidir ve çok dikkatli kullanılmalıdır fakat bu berilyum üreticileri tarafından çok iyi bilinmektedir. (bu karışım, lityum-florit ve berilyum-florit ($\text{LiF}-\text{BeF}_2$) bazen “FLiBe” olarak da adlandırılabilir) [34].

Toyum tetrafluoride (ThF_4) örten tuzun içinde çözünürken, Uranyum tetrafluoride (UF_4) FLiBe yakıt tuzunda çözünür. Her iki karışımda su ile (veya likit sodyum ile dört kez, helyum ile 2000 kez) karşılaştırılabilir hacimsel ısı kapasitesine sahiptir. Bunun anlamı, reaktörler aynı çıkış gücüne sahip geleneksel reaktörlerden daha küçük olmasıdır [34].

Soğutma tuzu farklı karışımların çeşitleri olabilir fakat günümüzde başlıca kullanılan türleri, lityum florit, sodyum florit ve potasyum florit (LiF , NaF , KF) dir, bazen “FLiNaK” olarak da adlandırılır. Birincil ısı eşanjörüne doğru pomplanan soğutma tuzu ısıyı yakıt tuzun dışına çeker, daha sonra gaz ısıtıcısındaki gazlı işleme sıvısını ısıtmaktan vazgeçer [34].

Şekil 3.6 kullanılan tuzların konumunda içeren bir LFTR reaktörünün şematik gösterimini vermektedir. Bu şema reaktörün güvenlik sistemini göstermektedir. Donmuş maddenin tapası reaktör çekirdeğindeki tuzu tutar. Eğer güç kaybedilirse, tapa açılır ve pasif olarak soğutulmuş, nükleer reaksiyonun olduğu dolum kabına akan tuz, herhangi bir radyoaktif maddenin yayılımını önler ve durdurur [34].



Şekil 3.6 : Likit Florit Toryum Reaktör'ün şematik gösterimi [34]

Kapalı çevrim gaz türbini farklı türlerde saf gaz veya gaz karışımlarından oluşabilir. Diğer gaz türbinlerinden farkı, nükleer reaktörler için tasarlanmasıdır, çünkü türbininin içindeki gaz nükleer yakıtı asla direkt olarak kendisi soğutmaz. Bu, çakıl-yataklı ve gaz-soğutmalı katı-yakıtlı reaktörler için tasarlanmış olan direkt (doğrudan) gaz türbin döngüsü yerine indirekt (doğrudan olmayan) olarak isimlendirilir [34].

İndirekt gaz türbinleri direkt olanlara göre birçok avantaja sahiptir. Örneğin, gaz asla reaktörün zararlı nötronik çevresine dayanmak zorunda değildir. Çakıl-yataklı reaktörler gibi nükleer gaz türbininin çalışmasını da etkileyen kirlilik sorunu, gazın reaktör yakıtının dışında tutulmasıyla neredeyse bertaraf edilir. İndirekt türbinler, gaz döngüsü yüksek basınçta olmasına rağmen çekirdeğin ortam basıncında çalışmasına da izin verir. Gaz ve yakıt tuzlarını ayıran soğutma tuzu, emniyet valfinin atması ile soğutucu içine gaz sızıntısı olması halinde yakıt tuzun basınç altında kalmasını önler [34].

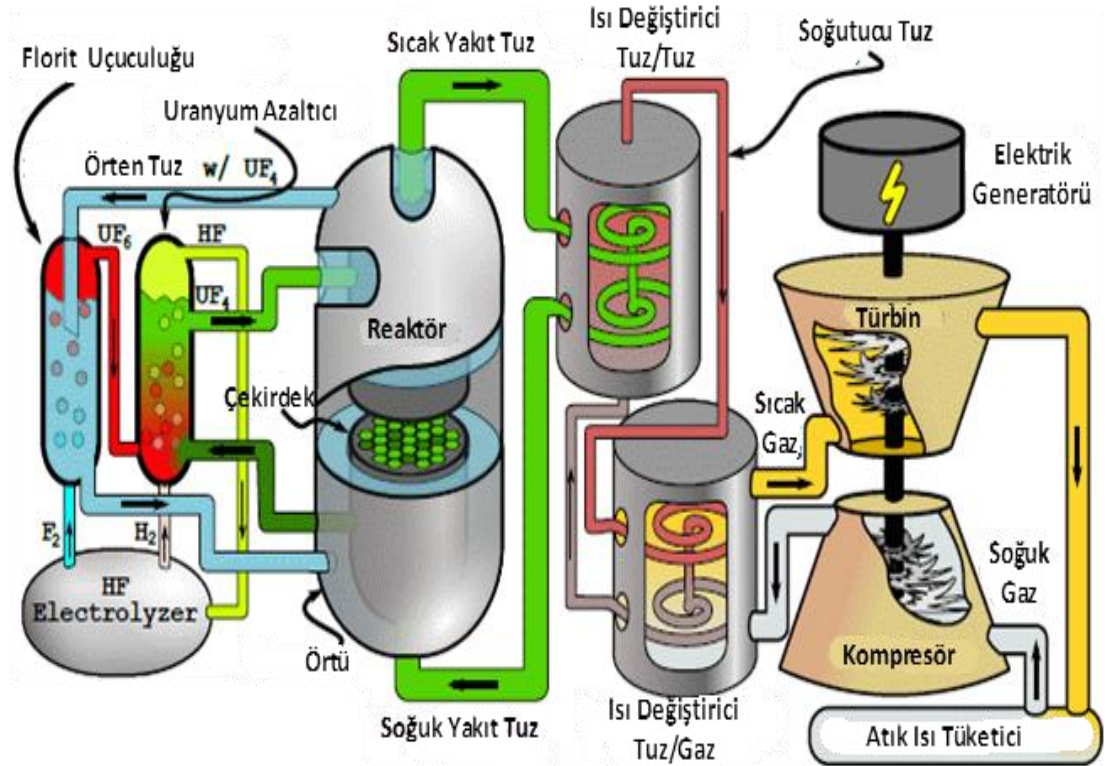
LFTR için gaz türbini yaklaşımı, tasarım için aslında havayla aynı olan çalışma sıvısı olarak azot kullanılabilir. Kapalı çevrim gaz türbini yaklaşımında, gaz haricen ısıtılmalı ve soğutulmalıdır. Isıtma, reaktörün soğutucu tuzundan gelir. Diğer yandan soğutma, bir soğutucu olarak hava ya da su ile gelecektir. Eğer hava kullanılırsa, gaz-gaz arası ısı değiştiriciler büyük olacaktır, fakat reaktör bölgesel soğutma suyuna ihtiyaç duymayacaktır. Bu sayede LFTR'ler, kuru bölgelerde ve yetersiz su kaynaklarından dolayı geleneksel nükleer santrallerin kurulamadığı diğer bölgelerde de inşaa edilebilecektir [34].

Eğer türbinde gazı su soğutuyorsa, ısı değiştiriciler (ve ana maliyet) çok daha küçük olacaktır. Soğutucu olarak deniz suyu kullanılması da gelecek imkanların önünü açmaktadır. Günümüzde güç çevrimi için buhar kullanan enerji santralleri, izotermal (eş ısı) olarak (sabit sıcaklıkta) santralin yoğunlaştırıcısının içerisinden ısıyı geri çevirmek zorundadır. Bu yüzden bu santrallerin verimini arttırmak için, yoğunlaştırma atmosfer basıncının çok altındaki bir basınçta yapılması gerekir. Bu da daha büyük malzeme, daha fazla yatırım maliyeti ve çok fazla soğutma suyu gereksinimine neden olmaktadır [34].

Diğer yandan bir LFTR'nin gaz soğutması, yaklaşık olarak 100C° den 30C°'nin altına kadar ısıyı geri çevirir. Uygun bir şekilde inşaa edilmiş ısı

dönüştürücülerindeki atık ısı, deniz suyunu damıtarak tatlı suya çevirmek için kullanılabilir. Farklı basınçlardaki çok aşamalı damıtma ile bu atık ısının daha temiz bir su elde etmek için defalarca tekrar kullanılması bile sağlanabilir. Bu yüzden kıyı bölgelerde kurulan bir LFTR santrali, yerel müşterilerine hem elektrik hem de temiz su gönderebilir [34].

Şekil 3.6’da verilen LFTR’nin şematik olarak gösterimi Şekil 3.7’de üç boyutlu ve biraz daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Likit Florit Toryum Reaktör’ün üç boyutlu şematik gösterimi [42].

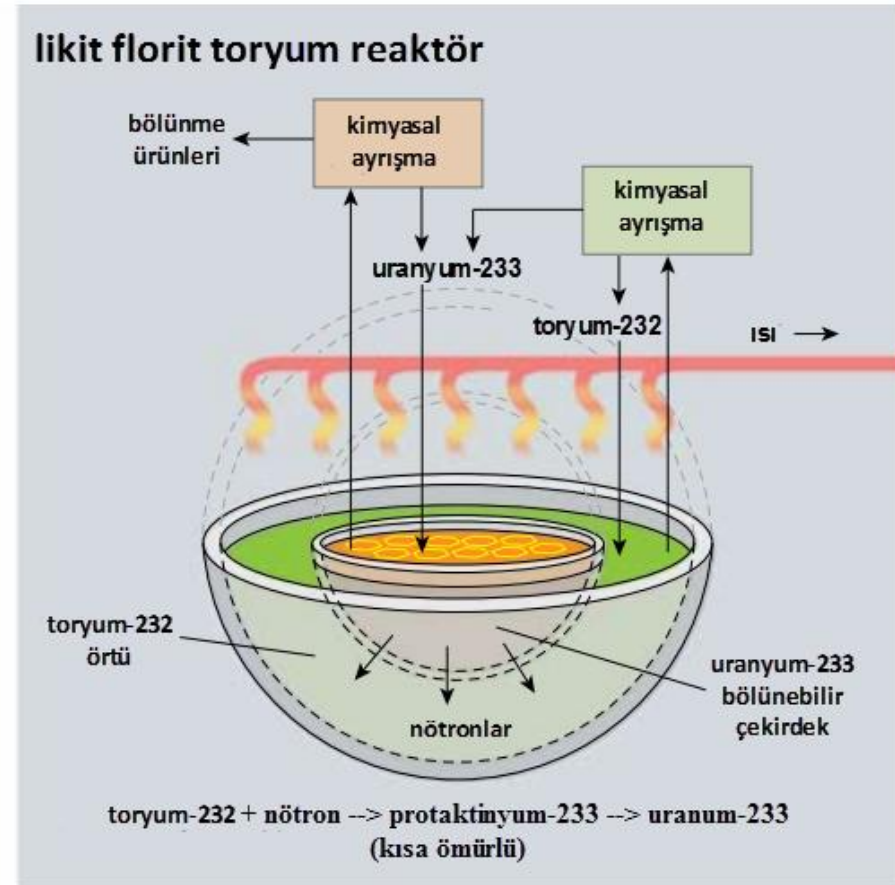
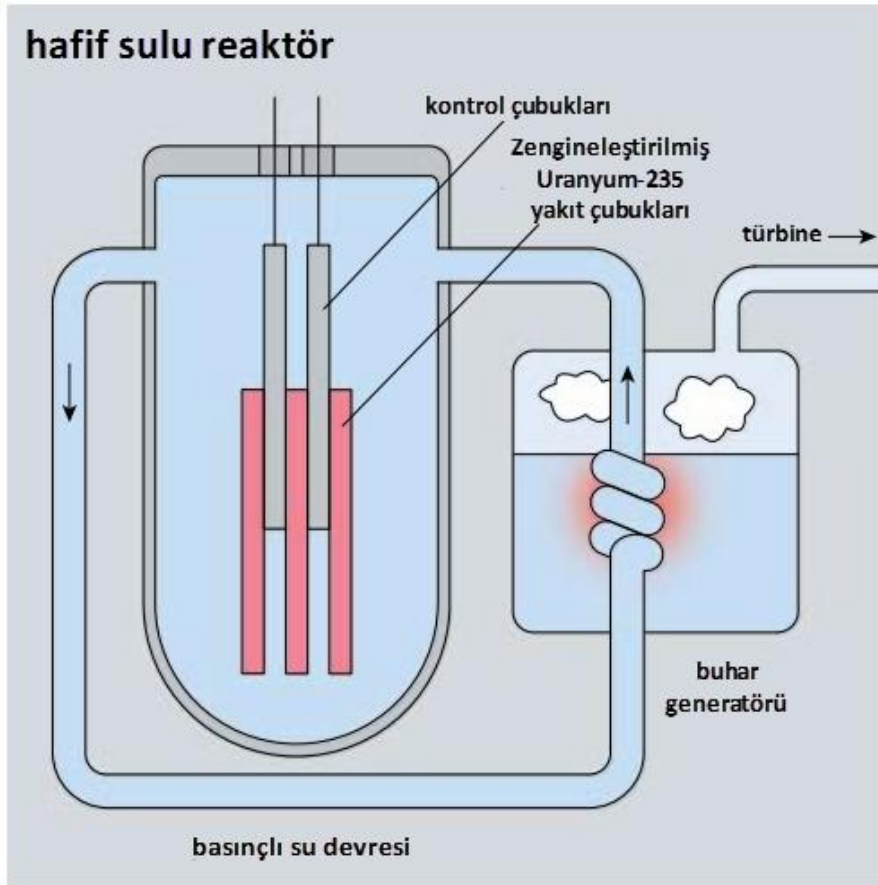
3.3.2 LFTR’nin avantajları

Likit yakıtlı toryum reaktörler, geleneksel düzene sahip nükleer reaktörler göre tasarım, işletme, güvenlik, atık yönetimi, maliyet ve çoğalma direnci gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Aynı ayrı her bir avantaj ilgi çekicidir. Bu avantajlar genel başlıkları halinde bu bölümde verilecektir.

Katı nükleer yakıtlardan farklı olarak, likit florit tuzlar radyasyon zararına karşı dayanıklıdır yani radyasyonu geçirmez. Geleneksel reaktörlerde kullanılan yakıt çubukları yapısal olarak nükleer yanmanın getirdiği radyasyon ve sıcaklıktan zarar görürler. Yakıt çubuklarını yerine koymak veya değiştirmek santralin her 18 ayda bir kapatılmasını gerektirir ki bu pahalı bir süreçtir. Yeni yakıt tehlikeli değildir fakat

harcanan yakıt yoğun bir şekilde radyoaktif ve ekipmanın çalışması uzaktan idare edilmelidir. Aşırı radyoaktif bölünme sonucu ortaya çıkan ürünün su altında stabil olarak yarılanmasının mümkün olmasından birkaç yıl sonra, yakıt çubukları kuru fiçı depolamasına güvenli bir şekilde transfer edilebilmektedir. Likit florit yakıt, katı yakıtın yapısal stresine bağlı değildir, ve oldukça yüksek olan yakıt malzemelerinin üretim maliyetlerini ve yine yüksek olan periyodik yakıt değiştirmenin neden olduğu kapatıp açma maliyetlerini azaltırken iyonik bağları nedeniyle radyasyon zararını sınırsız derecede tolere edebilir [33].

Pek çok şematik gösterimde uranyum yakıtlı hafif sulu reaktörler, yakıt çubukları, kontrol çubukları ve su moderatör ile soğutmasından meydana gelmektedir. Likit florit toryum reaktör ise çözünmüş florit tuz içerisinde bölünebilir Uranyum-233 içeren kritik bir çekirdek ve Toryum-232 içeren çözünmüş florit tuz ile etrafını çevreleyen bir örtüden oluşmaktadır. Çekirdekte bölünme ile üretilen fazlalık nötronlar örtü içerisindeki Toryum-232 tarafından yakalanır ve hal değiştirerek Uranyum-233 üretilir. Uranyum-233 ve diğer bölünüm ürünleri kimyasal ayrışım ile geri kazanılır ve sonra yeniden çoğalan ve geri kazanılan Uranyum-233 zincir reaksiyonun meydana geldiği çekirdeğe doğrudan yöneltir. Şekil 3.8’de hafif sulu reaktör ile LFTR şematik olarak karşılaştırılmıştır [33].



Şekil 3.8 : Hafif sulu uranyum yakıtlı reaktör ile Likit Florit Toryum Reaktör'ün şematik karşılaştırması [33]

3.3.2.1 Tamamen tükenmesi

LFTR'lerin güç çevrim sistemlerine izin verdikleri çalışma sıcaklıklarında (700-800C°) verim seviyesi neredeyse %50 yi bulur, sadece %35 i bulan geleneksel enerji santralleriyle kıyaslandığında bu oldukça iyidir. Toryumu ısıya çeviren bir LFTR'de verimlilik, bir kilogram toryumdan, bir kilogram uranyumdan elde edilebilene göre 200-300 kez daha daha faydalı enerji elde edilebilmesi ile sağladığı avantajı gösterir [34].

Mevcut uranyum yakıtlı reaktörler, radyasyondan çok kötü bir zarar görmeden ve bölünebilir içerik bitmeden önce uranyumun potansiyel enerjisinin sadece küçük bir miktarını çıkarabilir. Günümüzde, bu işin uzmanları harcanan ve zarar gören uranyumu kaldırıyor ve en son elden çıkarılana kadar depoluyorlar. Yakıt ise yeni yakıt elementlerini tekrar üretmek ve bölünebilir materyalleri ortadan kaldırmak için uranyum-plütonyum çıkarımı gibi geleneksel metotları kullanarak tekrar işlenebiliyor. Fakat bu teknikler pahalıdır ve enerji ücretini ancak yüzde birkaç iyileştirebilir. Uranyum yakıtındaki bütün enerjiye erişmek için ücreti geleneksel uranyum reaktörlerden ciddi miktarda daha fazla olan hızlı üretken reaktörler gerekir [34].

Diğer yandan LFTR'ler, toryumun tüm enerjisini karmaşık tekrar işlemler ve aşırı yatırım maliyetleri olmadan kazançlı bir şekilde çıkarabilir. Bunun nedeni yakıt tipi ve yakıt süreçlerini basitleştirmek için özel seçilmiş reaktör biçimi olabilir. LFTR'nin örten kısmında uranyum-233 yakıt oluşurken, dış florinasyon sütununda flor gazı ile dağıtım tarafından kolayca kaldırılabilir. Bu, uranyum tetraflorit'i (UF₄) çözelti içinde gazlı uranyum hexaflorit'e çevirir (UF₆). UF₆ örten kısmın dışına süzülür ve indirgeme kolonundaki hidrojen gazı tarafından geri UF₄'e indirgendiği yakıt tuza yöneltilir. İndirgeme esnasında oluşan HF, yeni baştan sürece tepki vermesini sağlamak için elektrolitik olarak H₂ ve F₂ ye ayrılır [34].

Yakıt tuzun içinde xenon gibi gazlı bölünebilir ürünler, “zehirli” bölünme süreci ve oldukça zor halde değişen güç ayarlarını yapan süreç esnasında yayılır. Tüm yüksek güçlü sivil reaktörler, güç seviyesi değişimi esnasındaki zehirli xenon ile savaşmak zorundadır ve özellikle şebeke kesilmeleri sıkıntılıdır. Eğer geleneksel bir nükleer reaktör kesilmeden dolayı birkaç saatten fazla kapanırsa, tekrar başlatılabilmeden

önce yeterli xenon azalmasına izin vermek için yaklaşık bir gün boyunca kapalı kalmalıdır [34].

LFTR’lerde xenonun kolayca kaldırılmasına ve tam anlamıyla zararsız hale gelmesine izin veren yakıt tuzu, pompalanırken çözeltinin dışına gelir. Bu, güç şebekesindeki değişimler ve güç ayarlarını değiştirmek için reaktörün hızlı ve etkin cevap vermesine izin verir.

LFTR ayrıca yapılan bölünme ürünlerinin probleminin yerini belirler. LiF-BeF₂-UF₄ yakıt tuz, yaklaşık olarak her yıl geri kazanılması gereken bölünme (filyon) ürünlerini biriktirir. Bu, florinasyon ile tuzdan değerli uranyum-233 ün geri kazanılması ile yapılabilir, daha önce bahsedildiği gibi, filyon ürünleri ve “yalın” FLiBe tuzun ayrılması. Daha sonra yüksek sıcaklıktaki damıtmada, LiF ve BeF₂ buharlaşır ve kalan filyon ürünlerinden ayrılır. Daha sonra LiF, BeF₂ ve UF₄ yeniden reaktörün içinde sokulan yakıt tuzu düzeltmek için yeniden birleştirilir. Kalan filyon ürünleri ayrışabilen ve ticari olarak kullanılabilen neodymium, lanthanum, ve praseodymium gibi değerli sağlam mineraller içerir [34].

Ve LFTR nin en büyük faydalarından biri toryumu tamamen “bitirmesi” ve oldukça az nükleer atık olmasıdır.

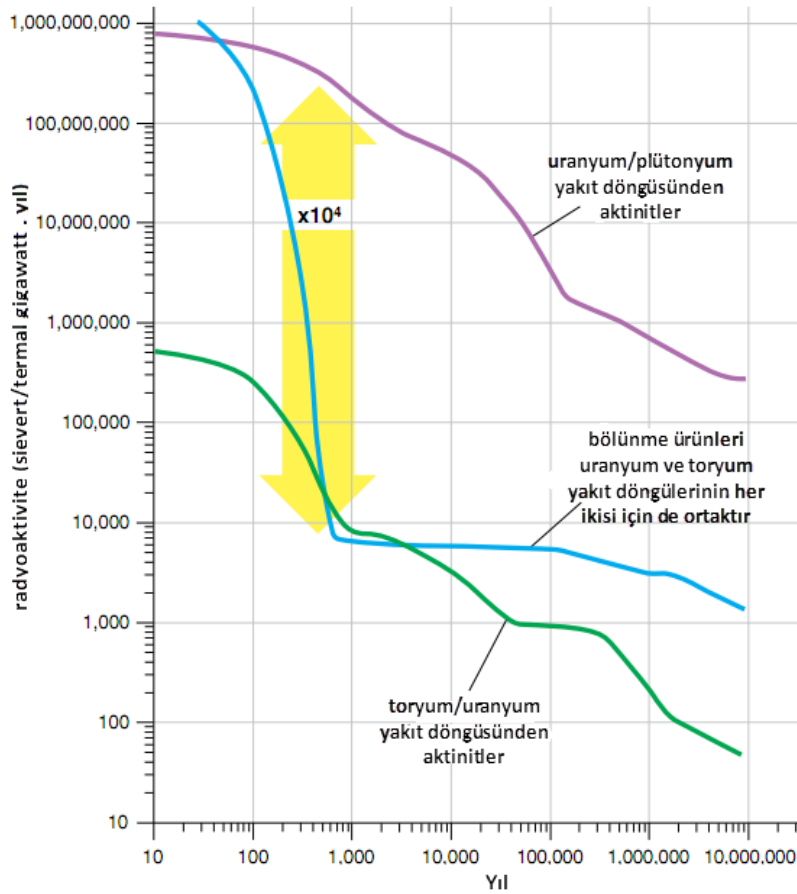
Yakıt seçimi, reaktör biçimi, ve LFTR nin güç çevrim sisteminin hepsi gerçekte toryumdan etkin enerji yapmak için seçilmiştir. Artık insanlar da bunu görüyor ve yavaş yavaş güvenli enerjinin peşine düşüyorlar [34].

3.3.2.2 Atık konusu

LFTR tasarımının çok dikkat çekici özelliklerinden biri de atık profilidir. Geleneksel reaktör tipleriyle karşılaştırıldığında çok az bir atık çıkarmaktadır. Günümüzde uranyum yakıtlı reaktörlerden üretilen nükleer atıklar en büyük problemlerden birini teşkil etmektedir. Bu atıkların azaltılması için her ne kadar uğraş verilse de uranyum yakıtlı reaktörlerde hala en önemli problemidir.

Toryum ve uranyum reaktörler aslında aynı bölünebilir ürünleri üretirler, fakat oldukça farklı bir aktinit spektrumu üretirler (periyodik tabloda aktinyumun altındaki elementler nötron yakalama ve dönüşümü ile reaktörlerde üretilirler). Bu elementlerin çeşitli izotopları, nükleer atıkların uzun dönem radyoaktif zehirlerine ana katkıda bulunanlardır [33].

LFTR'lere geçiş nükleer yakıtları depolama problemini büyük ölçüde çözecektir. Diğerlerine nazaran az miktarda nükleer atık üreten LFTR'lerde atıkların izolasyonu için gereken birkaç yüzyıllık süre, uranyum/plütonyum yakıt dönüğü sonucundan üretilen atık için gereken birkaç yüzbin yıllık süre ile karşılaştırıldığında oldukça azdır. Toryum ve uranyum yakıtlı reaktörlerin ürettikleri radyoaktif olarak zehirli atıklar, radyasyon miktarının zamanla değişimini gösteren Şekil 3,9'da mavi ile gösterilmiştir. Mor hat, bir hafif sulu reaktördeki aktinit atıktır ve yeşil hat, bir LFTR'den çıkan aktinit atıktır. Toryum yakıt döğü atığının radyoaktif zehiri, uranyum/plütonyum yakıt döğü atığı ile karşılaştırıldığında 300 yıl sonunda 10,000 kez daha azdır. LFTR'nin yapısı, toryum/uranyum yakıt üretiminin başlangıcı için hafif sulu reaktör atığından elde edilen bölünebilir ürünü de tüketebilir [33].



Şekil 3.9 : Radyoaktif atık zaman grafiği [33]

3.3.2.3 Maliyet durumu

Kurulum maliyeti açısından baktığımızda geleneksel nükleer reaktörler, fosil yakıtlı reaktörlere göre daha yüksek bir maliyete sahiptir fakat yakıt maliyeteri daha düşüktür. Kurulum maliyetlerinin yüksek olmasının nedeni nükleer reaktörlerde

yüksek standartlı yapı malzemeleri gereksinimi ve yüksek güvenlik önlemi ihtiyacıdır. Dünyaca bilinen ve çok başvurulan bir kaynağa göre kömür santralinin kurulum maliyetleri 2.30\$/watt iken hafif sulu reaktörlerde 4\$/watt'dır. LFTR'nin bu kurulum maliyetlerini düşürebilmesi için iki geçerli sebebi vardır, ilki atmosfer basıncında çalışabilmesi, diğeri ise basınçlı su gereksinimi olmamasıdır.

Uygun maliyet yapısına katkıda bulunan diğerk faktörler, basit yakıt işleme, daha küçük bileşenler, önemli derecede düşük yakıt maliyetleri ve yüksek enerji verimliliğidir. LFTR'ler ısıyı elektrik enerjisine çevirmede termal olarak uygun ve 800 °C'ler civarında çalışan yüksek sıcaklık reaktörleridir. Çevrim verimlilikleri muhtemelen %45 civarındadır bu da %33 verime sahip tipik kömür ve eski nükleer santrallere göre iyidir. Yüksek ısı, hidrojen üretimi gibi termal enerji için diğerk kazançlı kullanımlarında önünü açmaktadır. Yani konumuna göre bir LFTR, evlere ve işyerlerine ısı bile sağlayabilir.

3.3.2.4 Tehlikeli nükleer kullanımını önleme

Maliyet rekabetçiliği nükleer gücün gelişimi için çok önemli bir konudur, ancak atık yönetimi, güvenlik ve nükleer silahların yayılmasını önleme biraz daha farklı bir düzeyde bulunmaktadır. Nükleer gücün dünyada artan rolü, yasadışı nükleer maddelerin kararlı bir şekilde yok edilmesini sağlama almalıdır [33].

Uranyum'daki çoğalma reaksiyonu nükleer silahlar açısından çok kötüdür, çünkü çok miktarda plutonyum üretimi gerçekleştirir. Onun yerine toryumun kullanıldığında bu tip zararlı maddelerin oluşumunun olmadığını görüyoruz. Toryumdan kimyasal olarak ayrışabilen üç ana element çıkar bunlar, uranium-233, neptunium-237 ve plutonium-238'dir .bunlardan neptünyumda nötron verimi çok düşük olmakla beraber plütonyumda çok küçük miktarda üretilir [43,44].

3.3.2.5 Süreklilik

Toryum rezervleri uranyuma göre 3-5 kez daha çok olduğunu tahmin edilmektedir. Geleneksel reaktörlerde uranyumun yalnızca %0.7'si enerji olarak üretilebiliyorken, toryum tamamen uranyuma dönüşerek güç üretim döngüsü sağlanıyor. Bu sebeplerden dolayı toryum daha sürdürülebilir bir yakıttır [45,46].

3.3.3 Kullanım alanları

LFTR'ler beraberinde getirdiği birçok avantaj sayesinde yakın gelecekte birçok kullanım alanına sahip olacaklardır. LFTR'leri hem askeri hem de sivil uygulamalarda kullanmak mümkündür. Askeri olarak bakarsak, gelişmiş silahların ve sensörlerin gücünü sağlayabilirler. Bu sayede, gelişmiş yüksek enerjili lazerler, elektromanyetik fırlatıcılar, YGM sistemler ve sensörler oldukça uygun maliyetli balistik füze savunmasına ve uzay operasyonlarına imkan verecektir. Özellikle yönlendirilmiş elektromanyetik enerji sistemlerinde ilk enerji olarak kullanıldıklarında, ulaşabilecekleri menzil önemli ölçüde artacaktır. Örneğin, EM fırlatıcılarda LFTR'ler kullanıldığında vurma kapasitesi ve balistik füze savunması 2020 yılında 500+ km, 2030 yılında ise 3000+ km olacağı öngörülmektedir. [47] Bunların yanında LFTR'ler hava araçlarının gelişmiş konseptlerine güç sağlayabilir. Gelişmiş radarlar, uzun süre dayanabilen insansız hava araçları muhtemel diğer kullanım alanlarından bazılarıdır [47,48].

LFTR'ler donanmanın kullandığı mevcut reaktörlerden %30-50 kadar daha az maliyetli olduklarından tüm donanma deniz araçlarında uygun maliyetli olarak kullanılabilir. Bunun yanında, daha küçük, hafif, güvenli ve az maliyetli olduklarından geleceğin askeri araçlarında (hava,kara,deniz) kullanılabilirler. Küçük bir toryum reaktör (örneğin 100MW'lık) bir kamyon yardımı ile taşınabilecek boyutlardadır [47-49].

LFTR'lerin, basınç kabı gereksinimi olmaması, likit yakıtın pahalı yakıt üretimi ve özelliği gerektirmemesi, daha küçük güç çevrim sisteminin olması, buhar generatörü gereksiniminin olmaması, daha küçük koruma kabı gerektirmesi, daha kolay işletilebilir (kontrol çubukları ve tekrar yükleme için kapatmaya gerek yoktur) olması ve daha az ekip gerektirmesi gibi avantajlarla mevcut motor tasarım ve teknolojisini kendi yapısına uygun hale getirebilir, motor maliyet/programını önemli ölçüde azaltabilir [47,48].

4. YGM'LER İÇİN ANTEN SİSTEMLERİ VE EMD YAYILIMI

Bu bölümde amacımız, kısmen korunmuş dielektrik ortamda ultra genişbant orjinal bir TEM horn anten ortaya koymak için gerekli matematiksel altyapıyı vermektir. TEM horn geniş bantgenişliği, yönlü ışıma diyagramı ve düşük bozulma özelliklerinden dolayı seçilmiştir. Anten ultra genişbant aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Öncelikle anten temelleri başlığı altında antenlerin parametrik hesaplarına değilmekte, YGM'lerde anten sistemlerine TEM horn ve reflektör antenleri içerecek şekilde değinildikten sonra elektromanyetik dalganın yayılım hesaplamaları verilmektedir.

YGM kaynak tarafından üretilen IEME tanımı için diğer bir yaklaşım, kaynaktan belli bir mesafede, kaynağın frekans sıklığı, darbeli kaynağın süresi ve tekrarlama oranı ve patlama uzunluğunu gözönüne alarak elektromanyetik kuvvetin incelenmesidir. 200 MHz'den 5GHz'e kadar olan IEME frekanslarında (λ değeri 150 cm'den 6 cm'e) ışıma sistemleri için genellikle besleme ve anten yapısı elektromanyetik horn ve reflektördür. Bundan dolayı, anten açıklığı teorisi ışıyan EM alan davranışı hakkında bazı bilgiler vermektedir [19].

4.1 Anten Temelleri

4.1.1 Anten parametreleri

Genel olarak YGM sistem performansı anten parametrelerine bağlıdır, Bunlar; antenin çalışma frekans aralığı, kazanç karakteristikleri (maksimum kazanç, yayılma diyagramı, ışıma band genişliği), empedans uygunlaştırma (VSWR veya geri dönüş kaybı) ve polarizasyondur.

RF enerji üreteç sisteminde, tüm anten karakteristikleri, ışıma frekansları ve kanal özellikleri çok iyi tanımlanmalıdır. Alıcı antende elektrik alan şiddetinin maksimum olabilmesi için maksimum EIRP (Equivalent isotropically radiated power, (Etkin izotropik yayılım gücü)) yollayabilen yüksek kazanç sağlayan yönlü antenler

kullanılır. Verici ve alıcı antenler arasındaki iyi izolasyon zayıf alıcı sinyallerinin seçilme ve çözülmesinde çok önemli rol oynar. Alıcının hassasiyeti vericiden akan iletilmiş sinyal tarafından tanımlanır.

4.1.1.1 Anten kazancı

Antenlerin yönelme özelliklerinin bir başka ölçüsü ise anten kazancıdır. Bu değeri bulmak için anten, yarım dalga anteni ile karşılaştırılır. Kazancı aranan antenin belli bir besleme gerilimi ile maksimumu yönünde ve belli bir uzaklıkta yarattığı alan genliği ölçülür. Eşit uzaklıktan bir yarım dalga dipolünün eşit gerilimle yine kendi maksimumu yönünde yarattığı alan genliği saptanır. Anten kaç kat daha çok genlikli alan yaratıyorsa, o sayı "kazanç" olarak bulunmuş olur. Kazanç oranı dBi (desibel) olarak verilir. Anten kazanç ölçümleri özel bir ölçme alanında ve belirli koşullar altında yapılmalıdır.

Alıcı anten ışıma açıklığında yüksek gerilim elde etmek için anten kazancının ve güç yoğunluğunun yüksek değerinde, kablo ve konektör kayıplarının düşük sevide olması gerekmektedir. Havada yayınım yapan elektromanyetik dalgalardan yüksek verimde enerji transfer etmek için ışıma güç yoğunluğunun değeri, verici gücüne, verici anten kazancına ve uzaklığa bağlıdır. Yüksek verimde enerji transfer etmede alıcı anten kazancı çok önemli bir faktördür. Anten kazancı denklemi (4.1) de verilmektedir. η : Verimlilik A : Antenin ışıma açıklığı alanı λ : Işıma frekansındaki dalga boyunu göstermektedir.

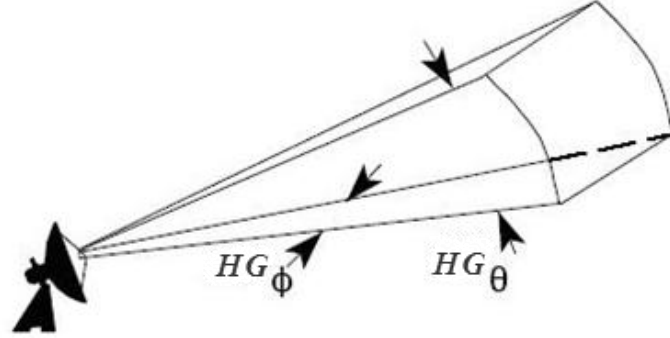
$$G = \eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

4.1.1.2 Anten ışıma yönelticiliği

Bir antenin kazancı veya yönelticiliği, yayınım yaptığı doğrultudaki ışıma yoğunluğunun aynı güçle beslenen kayıpsız izotropik antenin ışıma yoğunluğuna oranıdır. Genellikle yönelticiliği ve kazanç birbirleri yerine kullanılsada arada farklılıklar vardır. Yönelticilik dielektrik anten kayıplarını yok sayar. Bu kayıplar oldukça küçük olduğundan kazanç ve yönelticiliği genellikle aynı sonuçları verirler. Anten yönelticiliği aşağıdaki denklemde verilmektedir [50].

$$D(\theta, \phi) = 10 \log \left[\frac{4\pi P_{mak}(\theta, \phi)}{\iint P_{mak}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \right] \quad (4.2)$$

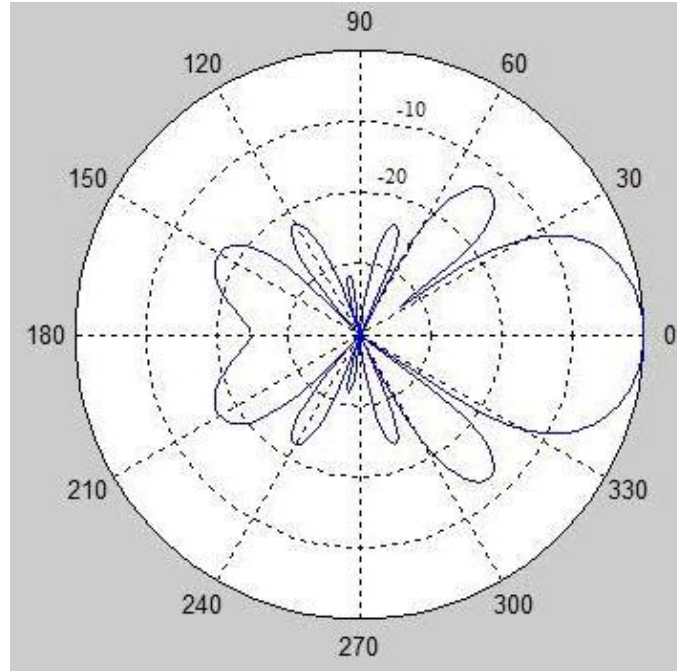
denklemdede $D(\theta, \phi)$ dB cinsinden yöneltililik, $P_{\text{mak}}(\theta, \phi)$ maksimum radyasyon yoğunluğudur. Yayılma açısı küçüldükçe antenin yöneltililik kazancı artar.



Şekil 4.1 : Yatay ve düşey ışıma genişliği [50]. (HG=Huzme genişliği)

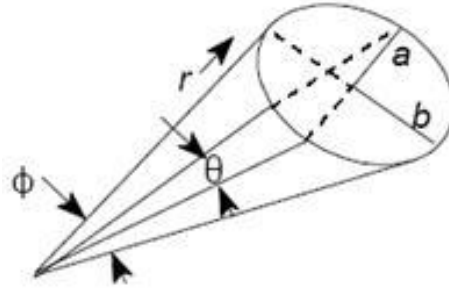
4.1.1.3 Anten ışıma diyagramı

Antenin çevresinde ölçmeler yapılacak olursa; en genlikli yayın yaptığı yön maksimum olarak belirlenir. Bu yöndeki genlik 1 olarak kabul edilerek diğer yönlerdeki genlikleri de 1 baz alınarak değerlendirilir. Bu değerler bir yön grafiği üzerinde işaretlenerek noktalar birleştirilir. Ortaya çıkan şekil anten diyagramıdır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Anten ışıma diyagram örneği

Eliptik alanlı anten ışıma diyagramı [50];



Şekil 4.3 : Eliptik alanlı anten ışıma diyagram örneği

Burada $\theta = HG_\theta$, $\phi = HG_\phi$ ve $a = (r \sin \theta) / 2$, $b = (r \sin \phi) / 2$ dir.

Elips alanı [50]:

$$\frac{\pi ab}{4} = \pi [(r \sin \theta) / 2] [(r \sin \phi) / 2] = (\pi r^2 \sin \theta \sin \phi) / 4 \quad (4.3)$$

Kazanç [50]:

$$G = \frac{\text{Küre alanı}}{\text{Anten diyagramı kesit alanı}} = (4\pi r^2) \left(\frac{4}{\pi r^2 \sin \theta \sin \phi} \right) = \frac{16}{\sin \theta \sin \phi} \quad (4.4)$$

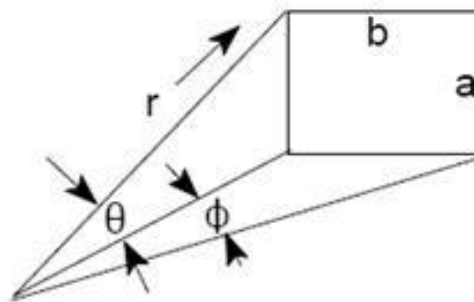
Küçük açılar için radyan cinsinden $\phi = \sin \phi$ eşit olur. Buradan kazancı hesaplırsak [50];

$$G = \frac{16}{\sin \theta \sin \phi} = \frac{16}{\theta \phi \text{ (radyan)}} = \frac{16}{\theta \phi \left(\frac{360}{2\pi} \frac{360}{2\pi} \right)} = \frac{52525}{\theta \phi \text{ (derece)}} \quad (4.5)$$

İdeal olarak kazanç burada $G=52525$ veya dB cinsinden;

$10 \log G = 10 \log 52525 = 47.2$ dB dir.

Dikdörtgen alanlı anten diyagramı [50];



Şekil 4.4 : Dikdörtgen alanlı anten ışıma diyagram örneği [50].

Burada $\theta = HG_\theta$, $\phi = HG_\phi$ ve $a = r \sin \theta$, $b = r \sin \phi$ dir.

$$ab = r^2 \sin \theta \sin \phi \quad (4.6)$$

Kazanç [50],

$$G = \frac{\text{Küre alanı}}{\text{Anten diyagramı kesit alanı}} = \left(\frac{4\pi r^2}{r^2 \sin \theta \sin \phi} \right) = \frac{4\pi}{\sin \theta \sin \phi} \quad (4.7)$$

Küçük açılar için radyan cinsinden $\phi = \sin \phi$ eşittir. Buradan kazancı hesaplırsak;

$$G = \frac{4\pi}{\sin \theta \sin \phi} = \frac{4\pi}{\theta \phi \text{ (radyan)}} = \frac{4\pi \left(\frac{360}{2\pi} \frac{360}{2\pi} \right)}{\theta \phi \text{ (derece)}} = \frac{41253}{\theta \phi \text{ (derece)}} \quad (4.8)$$

İdeal olarak kazanç burada $G=41253$ veya dB cinsinden [50];

$$10 \log G = 10 \log 41253 = 46.2 \text{ dB dir.}$$

4.1.1.4 Anten ışıma açıklığı verimliliği

Anten verimliliği, antenden yayılan gücün antene verilen güce oranıdır. Çeşitli kayıpların ve parametrelerin, verimlilik hesaplanırken hesaba katılması gerekmektedir.

Aydınlatma verimliliği: Karşılıklı verici ve alıcı antenin ışıma yönlerini oranına aydınlatma verimi denir.

Faz hata kaybı: Antenin ışıma yüzeyinin özelliklerinin değişiminden kaynaklanır.

Taşma kayıpları: Işımanın odaklanmaması durumudur. Odaklayıcı antenlerde antenin tipine göre gerçek anten ışımayı odaklayacak şekilde yerleştirilmelidir.

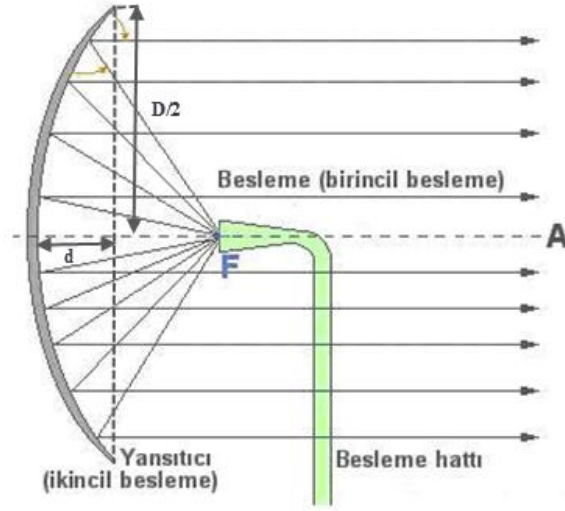
Uyumsuzluk (VSWR) kaybı: Antenin sürdüğü ve bağlandığı devre ile olan empedans uyumsuzluğudur.

RF kayıpları: Antenin besleme noktalarında empedans uyumsuzluğu geri dönüş kaybını artırır.

4.1.2 Parabolik antenler

Parabolik antenler radar tekniğinde kullanılan anten tipleri arasında en sık karşılaşılan anten biçimidir. Aynı zamanda özel amaçlar için daha yüksek seviyede güç elde etmek için parabolik antenler kullanılır. Şekil 4.5'te "normal" (simetrik) bir

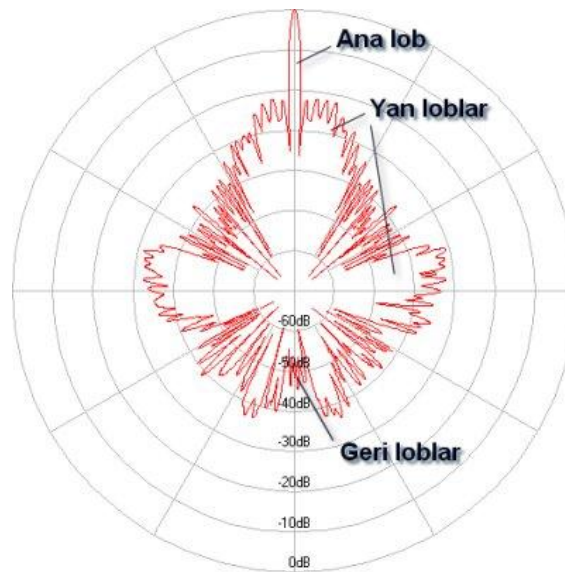
parabol anten ana hatlarıyla gösterilmiştir. Odak noktasında bulunan bir kaynaktan parabolik antene ışınlar gönderilir. Bu kaynağa “Birincil Besleme” ya da sadece “Besleme” denir.



Şekil 4.5 : Parabolik antenin yapısı.

Bir parabolidin kesiti olan, genellikle bir metal konstrüksiyon, ya da çoğu kez kafes ağla kaplı bir metal çerçeve şeklinde olan bu parçaya yansıtıcı (reflektör) denilir. Metal kafesteki elek boyutu $\lambda / 10$ dan küçük olmalıdır. Bu yansıtıcı, elektromanyetik dalgalar için bir ayna gibi çalışır.

Bir parabolik anten, yüksek kazançlı, ileri - geri oranı büyük, geniş ölçüde dönel simetrisi bulunan ve nispeten küçük yan demetleri bulunan bir anten diyagramına sahiptir.



Şekil 4.6 : Kutupsal koordinat sisteminde parabolik antenin ışıma diyagramı.

4.1.2.1 Parabolik anten tasarım formülleri

Parabol denkleminde f odak uzaklığının bir ifadesi olan a katsayısı ($a = 1/4f$) kullanılarak genel parabol denklemi şu şekilde yazılır;

$$y = ax^2 \quad (4.9)$$

Parabolik yansıtıcı derinliğini veren 4.10 numaralı denklemde D çapı göstermektedir.

$$d = \frac{D^2}{16f} \quad (4.10)$$

Anten beslemesinin hüzme genişliğini veren 4.11 denkleminde θ hüzme genişliğidir.

$$\frac{f}{D} = \frac{1}{4 \tan(\theta/4)} \quad (4.11)$$

Antenin hüzme genişliğini (HG) veren 4.12 de ise λ Dalga boyu, D anten çapıdır.

$$HG = \theta = \frac{70\lambda}{d} \quad (4.12)$$

Parabolik yansıtıcının kazancı denkleminde η verimlilik, λ Dalga boyu, D çaptır.

$$G = 10 \log_{10} \left(\eta \frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) \quad (4.13)$$

Burada;

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.14)$$

4.2 YGM'lerde Anten Sistemleri

YGEM sisteminin en önemli bileşenlerinden birisi de yüksek güçlü UWB işaretlerini hedefe yönlendiren antenlerdir. Tez kapsamında geliştirilecek olan antenler iki farklı senaryo göz önüne alınarak tasarlanacaktır. EM yayını yapan tehditlerinin elektronik sistemlerine hasar vermek yada etkisizleştirmek için 200 MHz ile 5 GHz frekanslarında yüksek güçlü elektromanyetik sinyaller gönderecektir. YGEM sistemlerinde antenler, frekansa bağlı olarak darbant, ortabant, ultrabant ve hiperbant olmak üzere gruplara ayrılır. Hüzme genişliklerine göre de darbe ışımalı dar ve geniş hüzmeli olmak üzere ikiye ayrılırlar.

4.2.1 Darbant antenler

YGM darbant antenler, çoğunlukla hava delinmesini önlemek için modifiye edilen geleneksel anten tiplerinin ekstrapolasyonu olmuştur. Anten dizileri, özellikle faz kilitli çoklu osilatörler veya yükseltici sistemlerin kullanımı için sadece gelişime katılıyor. Yüksek güç antenlerin, faz değiştirici ve ayırıcı gibi alt elemanlarına bu bölümde fazla yer verilmemiştir. Pratikte, darbant YGM olarak birkaç tip kullanılmıştır. Başlıca kullanılan antenler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. En yaygın türler ise horn, piramit, konik ve enine elektromanyetik (Transerve EM) ‘dir [29].

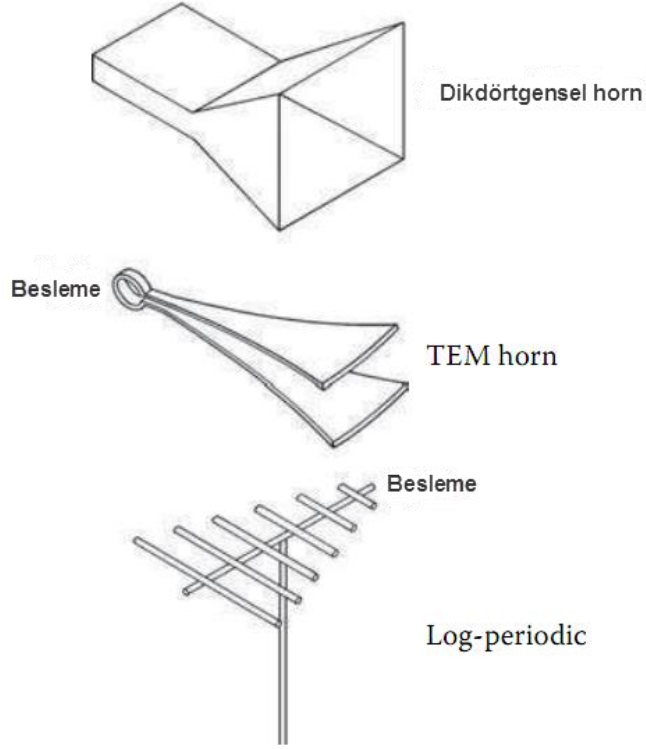
Çizelge 4.1 : Darbant YGM anten tiplerinin özellikleri [29]

Anten	Kazanç	Yorumlar
Piramit biçimli ve TEM horn	$2\pi ab\lambda^2$	Standart kazançlı horn için: $l_e = \frac{b^2}{2\lambda}, l_h = \frac{a^2}{3\lambda}$ kenarlar a,b; uzunluklar
Konik horn	$5 \frac{D^2}{\lambda^2}$	$l = D^2/3\lambda; D = \text{çap}$
Parabolik çanak	$5.18 \frac{D^2}{\lambda^2}$	
Vlasov	$6.36 \left[\frac{D^2}{\lambda^2} \right] / \cos\theta$	Eğik biçimli açı θ , $30 < \theta < 60$
Bikonik	$120[\cot\alpha/4]$	α bikonik açılış açısıdır.
Sarmal	$[148 N \frac{S}{\lambda}] \left[\frac{D^2}{\lambda^2} \right]$	N= dönüş sayısı; S=dönüşler arasındaki boşluk
Horn dizilişi	$9.4 \left[\frac{AB}{\lambda^2} \right]$	A,B dizi kenarları

4.2.2 Genişbant antenler

Yüksek kazançlı, düşük dağılımlı genişbant antenler önemli bir sorun ortaya koyarlar. Darbe süresi nano saniye mertebelerinde oluştuğunda, anten tasarımı çok daha fazla zor olmaktadır. Bir antenin “dolma süresi” çap boyunca birkaç hafif-geçiş kadardır. Eğer antene giren dalganın darbe uzunluğu dolma süresine göre kısa ise, dolu aralık kullanılmaz, kazanç azaltılır ve darbe yayılır. Bu etkiler tüm uygulamalar için önemlidir, fakat özellikle impulse radarlar için önemi daha büyüktür [29].

Enine elektromanyetik (TEM) horn antenler birçok impulse radar çalışmasında kullanılmıştır (Şekil 4.7). Basitçe açıklamak gerekirse, iki metal şeritin kabaca üssel bir şekilde ışıma yapmasıdır. 1nsn süreli darbeler bu tip hornlar ile ışıyabilir ve bant genişliği yaklaşık olarak 1GHz'dir. Kazanç, bantgenişliği arasında düzgün olmayan bir eğilimdedir, bu yüzden darbe bozulması uzak alan içerisinde oluşur [29].



Şekil 4.7 : Genişbant YGM antenler için kullanılan klasik anten tipleri

4.2.3 Ultra genişbant (UWB) antenler

Işıyan UWB geçici olaylar özel olarak dizayn edilmiş antenler gerektirir ve bu istenen uygulama için optimize edilir. Geçici dalgalı antenler için ana düşünce, frekans ve uzay dağılımının her ikisinde minimize edilmesidir. Sıradan antenler genellikle hızlı geçişleri iletemezler çünkü UWB geniş bir frekans aralığını içerirken, anten kazancının frekansın karesiyle değiştiği gerçeğini izleyen dağılım için doğrulanmamışlardır. Bu problemi çözmek için iki yaklaşım vardır: klasik antenlerin yeniden düzenlenmesi (genellikle TEM hornlar) ve yeni türlerin bulunması (Darbe Yayan Anten gibi).

Frekans dispersiyonu bazı geleneksel antenlerin yeniden düzenlenmesi ile azaltılabilir. Bu, TEM horn veya bikonik anten için çalışır, çünkü küresel dalga yüzü üreten frekansa bağlı yapıdadır. Bununla birlikte, onları süren yüksek gerilim anahtarların sınırlı boyutu nedeniyle, çoğu kez dalga yüzünü daha küresel yapmak için yapıya bazı düzeltici gerekli lensler eklenir.

4.2.4 Darbe ışımalı dar huzmeli antenler

YGM'ler için hem magnetron tabanlı hemde anahtarlama sistemleri geliştirilebilmektedir. UWB sistemler 1ns'den daha küçük yükselme zamanına sahip darbeleri ortama yayabilmeleri için özel anten yapılarına ihtiyaç duyarlar. Tez kapsamında tasarlanacak olan UWB-YGEM anten yapıları TEM horn anten şeklinde olacaktır. Ayrıca darbant uygulamaları için kullanılan yarı parabolik reflektörlü antenler UWB ışıması yapacak şekilde modifiye edileceklerdir. Bu şekilde darbe ışımalı anten sistemleri oluşturulacaktır. Diğer taraftan belirli bir hedefe yüksek güçlü elektromagnetik dalgaları yoğunlaştırabilmek için bu antenlerin ışıma diyagramlarının dar huzmeli olacak şekilde tasarlanması gerekir. Dar hüzmeyi oluşturabilmek için sadece reflektör tipi değil bi-konikal parabolik antenler de tasarlanabilmektedir [29].

Dar huzmeli antenler, kaynak tespit sistemi tarafından bulunmuş tehditleri uzaktan etkisiz hale getirilmesinde kullanılabilirler. Hedefin yeri bilindiği için yönlendirilmiş ve kazancı yüksek olan bu antenler kullanılarak hedef, daha uzaktan ve daha kesin bir şekilde etkisiz hale getirilebilir.

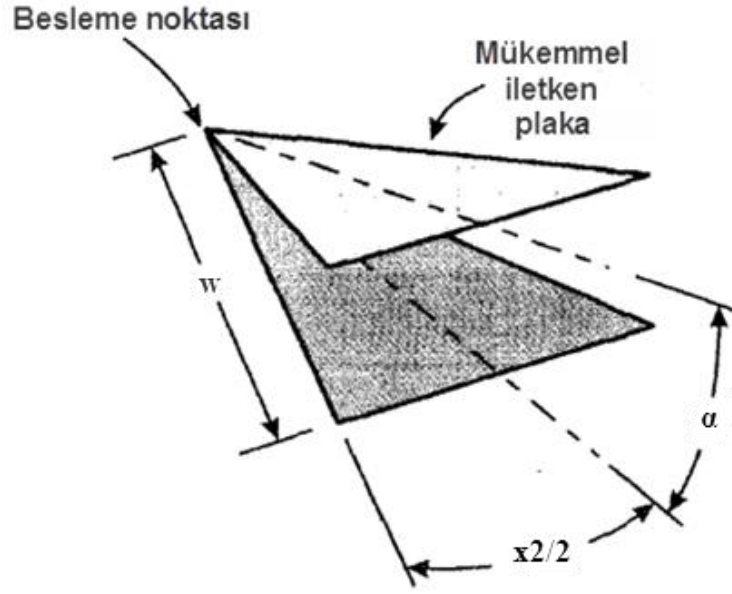
4.2.5 Geniş huzmeli antenler

Kaynak tespit sisteminin devrede olmadığı hallerde UWB elektromagnetik dalganın daha geniş bir alana yönlendirilmesi gerekir. Bu halde kullanılacak anten yapılarının yukarıda sözü edilen dar huzmeli antenlere göre daha geniş bir kapsama alanı olması gerekir. Bu kapsamda parabolik reflektör sistemleri entegre edilerek kullanılır.

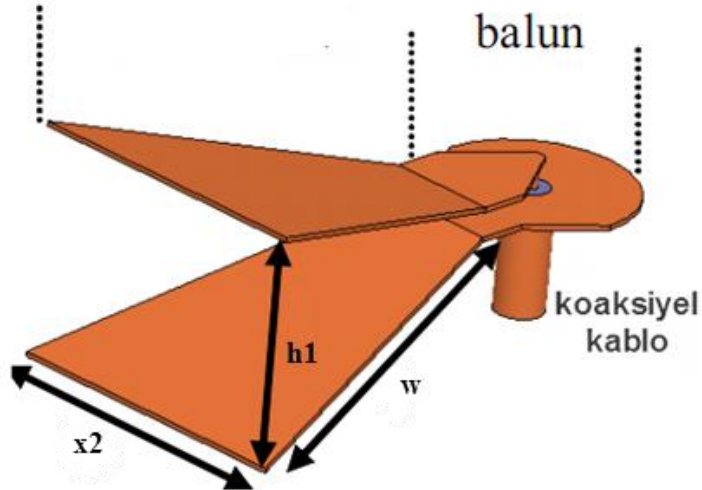
YGEM sistemlerinin en temel zorunluluğu yukarıda sözü edilen antenlerin yan ve geri hüzmelerinin sıfıra yakın olmasıdır. Tez kapsamında geliştirilecek olan antenler bu koşullara uygun olarak tasarlanacaktır.

4.2.6 TEM horn antenler

TEM horn anten popüler bir geniş bant antenidir. Antenin temel olarak, iki yamuk şeklinde dörtgen veya üçgen plakadan ve bir besleme yapısından oluşan basit bir tasarımı vardır. Bir an besleme yapısını düşünmezsek, horn tamamen sadece üç değerle tanımlanır: α , w , ve x_2 . Şekil 4.8’de gösterildiği gibi x_2 her bir plakanın açısal genişliği, α iki plaka arasındaki açısal ayırım ve w besleme noktasından plakanın köşesine kadar ölçülen uzunluktur [51-53].



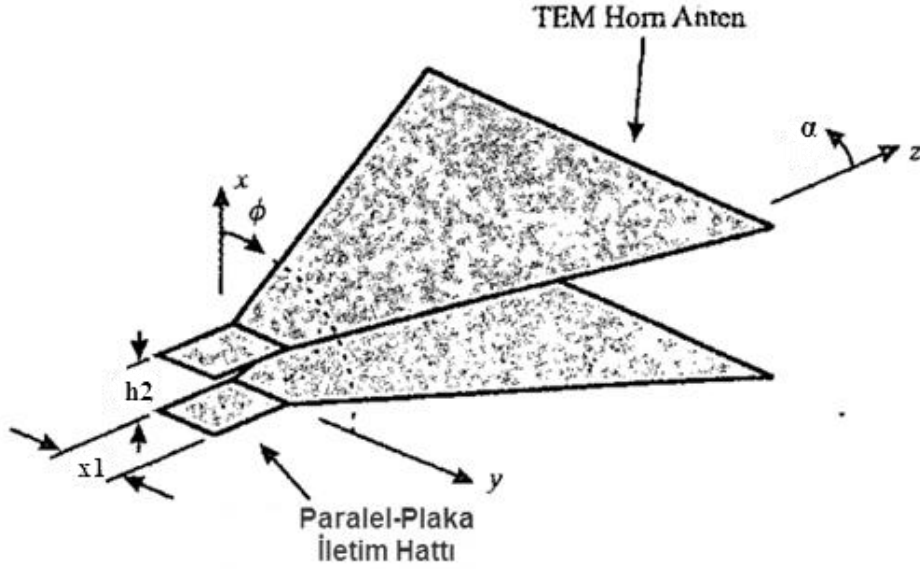
Şekil 4.8 : Temel TEM horn antenin geometrik yapısı [51]



Şekil 4.9 : TEM horn antenin geometrik yapısı (koaksiyel kablo ile) [54]

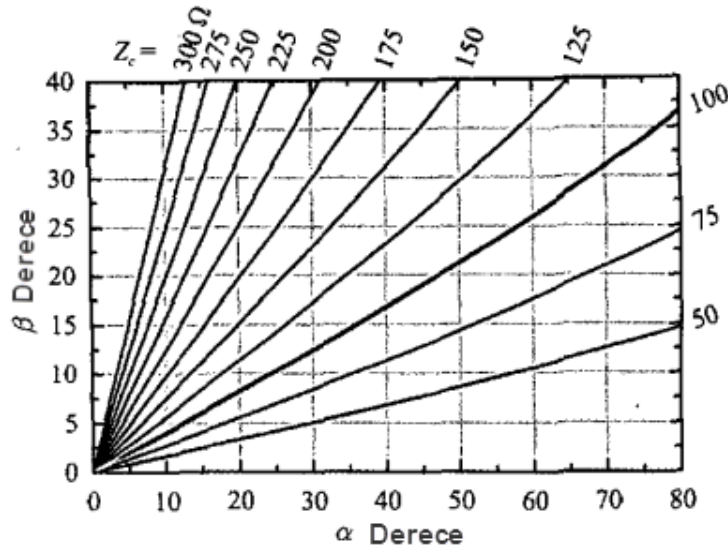
TEM horn antenin temel geometrisi için özel bir besleme metodu seçimi gerekmez. Bir olasılık paralel-plaka iletim hattı kullanmaktır ve plakalar anten dışına doğru ışıır.

Bu geometri Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Paralel-plaka iletim hattı ile beslenen TEM horn anten [51]

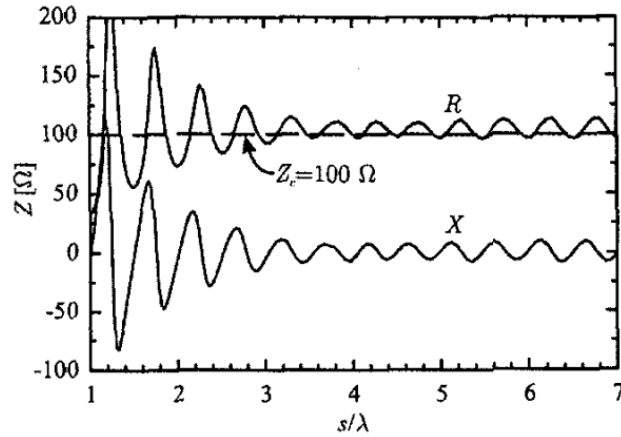
TEM horn antenin karakteristik empedansı α ve β ($\beta=x2$ olarak alınmıştır) açılarının bir fonksiyonudur. Şekil 4.11 bu açılar ve karakteristik empedans arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafikdir.



Şekil 4.11 : α ve β açılarının bir fonksiyonu olarak TEM horn antenin karakteristik empedansı Z_c [51]

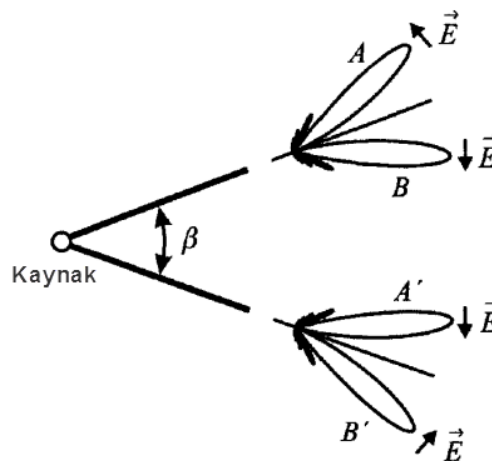
Sınırlı uzunluğu oldukça fazla olan bir anten için, antenin karakteristik empedansı antenin giriş empedansına yakın olur. Örnek olarak, $\alpha=47,30^\circ$ ve $\beta=20^\circ$ açıları ile $Z_c=100\Omega$ için antenin hesaplanan giriş empedansı elektriksel uzunluğun bir fonksiyonu olarak (s/λ) Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Giriş direnci R , 100Ω

civarında ve X reaktansı 0 civarında osilasyon yapmaktadır [51-53].

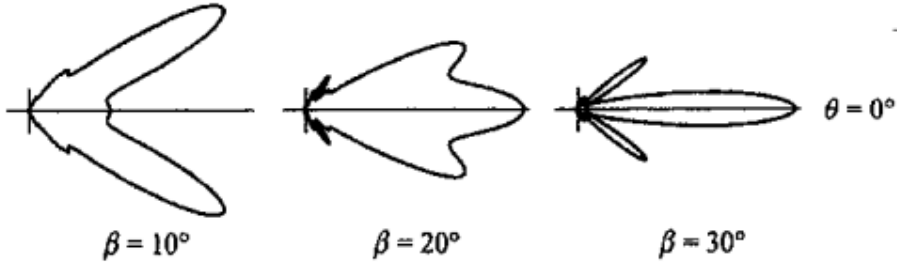


Şekil 4.12 : TEM horn antenin elektriksel uzunluğuna karşı giriş empedansı $Z=R+jX$. Örnek için $\alpha=47,30^\circ$, $\beta=20^\circ$ ve $Z_c=100\Omega$ 'dur [51].

TEM horn antenin ışıma diyagramını dikey düzlemde ($\Phi=0^\circ, 180^\circ$) tanımlamak için, horn, yürüyen dalgalı Vee anten ile kıyaslanabilir. Dikey düzlemde, Vee'nin her bir kolu Şekil 4.13'te gösterildiği gibi simetrik çift loblar ile ışıma diyagramını üretir. Herbir lob için ışıyan elektrik alanın yönü şekilde gösterilmektedir. Ayırma açısı küçük olduğu zaman (ör. $\beta=10^\circ$), loblar A ve A' kısmen üstüste biner ve alanları çıkarılır, aynısı B ve B' içinde geçerlidir. Bu, $\beta=10^\circ$ durumu için Şekil 4.14'de gösterildiği gibi eksen üzerinde boş bir bölünmüş huzme olan dikey düzlemde ışıma üretir. Geniş ayırma açıları için, loblar B ve A' üstüste biner ve alanları eklenir. Bu da, $\beta=20^\circ$ ve 30° durumları için şekilde gösterildiği gibi eksen üzerinde ki maksimum bir huzme olan dikey eksen üzerinde bir ışıma üretir [51-53].



Şekil 4.13 : $s/\lambda=5$ ile TEM horn antenin kazanç diyagramlarının değişimi için açıklamalar [51].



Şekil 4.14 : Çeşitli ayırma açıları için Şekil 4.13'teki diyagramların üstüste koyulması [51].

4.3 EMD Yayılımı

4.3.1 Tanımlama

Elektromanyetik güç transferi sistemlerinde verimliliği analiz edebilmek için elektromanyetik dalganın havada yayılımını ve elektrik alan şiddeti ile güç yoğunluğunun iyi analiz edilmesine ihtiyaç vardır. Elektrik alan şiddeti ölçümleri ve hesaplamalarının önemi mikrodalga alanında artmaktadır. Elektromanyetik dalgalar insan ve çevre sağlığının nasıl etkilendiğinin hesaplanması gerekmektedir. Radar veya füze sistemleri gibi pek çok elektronik sistemlerde santimetrede mikrovolt değerinde elektrik alan şiddetine ihtiyaç vardır. Elektrik alan şiddetinden (V/m) gerilime ve güce (mW/cm^2) ilişkin çeşitli birimlere dönüştürülmesi gereklidir. Bu başlık altında elektromanyetik yayılım yapan kaynağın verici gücünden, alıcı gücünden veya alıcı geriliminden elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılan denklemler tanımlanacaktır. Anten faktörü, anten kazancı ve kablo zayıflama parametreleri bilinirse verilen işaret frekansı için denklem dönüşümü yardımı ile verici antenden belirli uzaklıklarda elektrik alan şiddeti ve güç yoğunluğu belirlenir.

4.3.2 Temel alan denklemleri

Alan teorisinden, serbest uzayda Fraunhofer bölgesinde yani uzak alanda elektrik ve magnetik alan şiddetleri daima aynı fazdadır ve birbirlerine diktir. Gözlem noktasındaki Poyting vektörü aşağıdaki formülden elde edilir. Burada E volt/m cinsinden elektrik alan şiddeti H, amper/m cinsinden magnetik alan şiddetidir.

$$\vec{P} = \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \text{ Watt/Birim Alan} \quad (4.15)$$

Gözlem noktasındaki toplam güç, kürenin merkezindeki kaynaktan R yarıçaplı gözlem noktasına doğru küresel yüzey üzerinde güç yoğunluk fonksiyonun integrali ile aşağıda gösterildiği biçimde elde edilir [55].

$$\begin{aligned}
 P &= \iint \bar{p} \cdot d\bar{a} = \iint (\bar{E} \times \bar{H}^*). (R^2 \sin \theta d\theta d\phi) \bar{u} \\
 &= \frac{E^2}{\eta_0} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} R^2 \sin \theta d\theta d\phi \\
 &= \frac{E^2}{\eta_0} (4\pi R^2) \quad \text{Watt}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Elektrik alanda depolanan enerji [55],

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \iiint_v |E|^2 dv \quad \text{Joule} \tag{4.17}$$

İle tanımlanır. Burada $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$ F/m boşluk veya havanın dielektrik sabitidir, |E|, elektrik alan şiddetinin genliğidir. Magnetik alanda depolanan enerji ise [54];

$$W_m = \frac{\mu_0}{2} \iiint_v |H|^2 dv \quad \text{Joule} \tag{4.18}$$

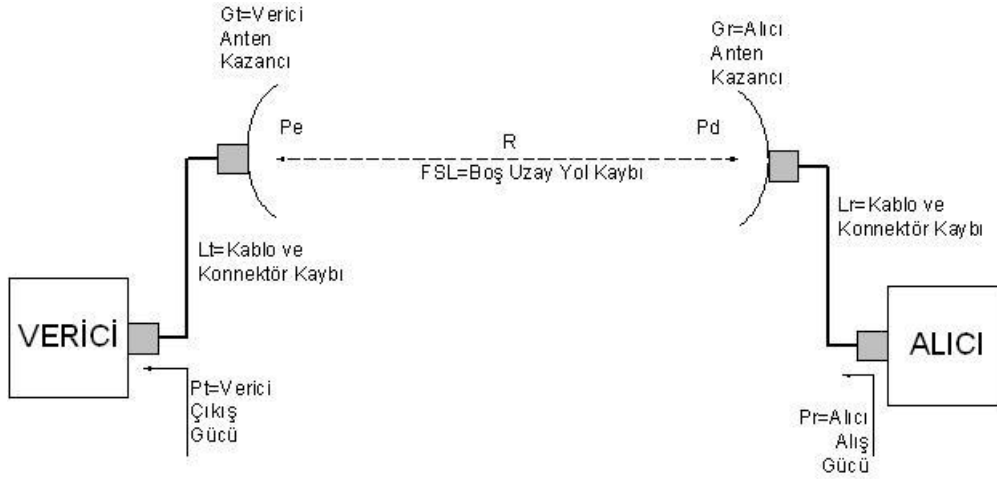
ile tanımlanır. Burada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m boşluk havanın endüktansı veya magnetik geçirgenliktir. |H|, magnetik alan şiddetinin genliğidir. Uzak alanda elektrik ve magnetik alan arasındaki ilişki;

$$\eta_0 = \frac{E}{H} \quad \Omega \tag{4.19}$$

olarak yazılır [55].

4.3.3 Serbest uzay yol kaybı

Serbest uzay yol kaybı, elektromanyetik dalgadan enerjiyi emen hava gibi bir ortamın yok edici zayıflamasından farklıdır. Bir küresel dalgadaki güç yoğunluğu yayılırken uzaklığa bağlı olarak zayıflar. Serbest uzay yol kaybı Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15 : Serbest uzaklık yol kaybı

P_r , alış gücü, antenin önündeki güç yoğunluğu ile alıcı antenin ışıma açıklığı, anten kazancı ve kablo kaybının çarpılmasıdır. Alıcı antenin önündeki güç yoğunluğu, verici gücü, anten kazancı ile kablo kaybının çarpılıp küresel yüzey alanına bölümüne eşittir. Alış gücü (4.20) nolu denklem ile tanımlanır ve bu denklem “Friis denklemi” olarak adlandırılır [55].

$$P_r = P_t G_t L_t G_r L_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \text{ Watt} \quad (4.20)$$

Burada;

P_r : Alış güç seviyesi, Watt,

P_d : Alış güç yoğunluğu, W/m²,

P_t : Verici çıkış gücü, Watt,

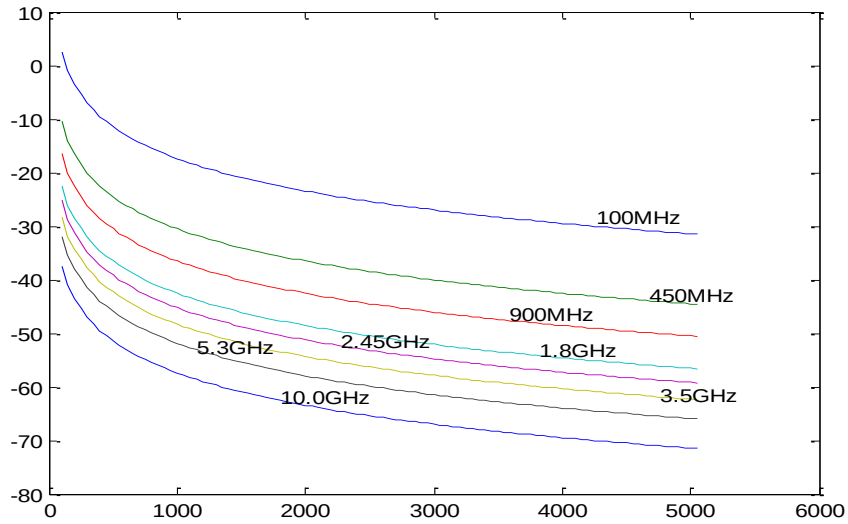
G_t : Verici anten kazancı, (sayısal),

L_t : Verici tarafta hat kaybı, (sayısal, <1),

G_r : Alıcı anten kazancı (sayısal),

L_r : Alıcı tarafta hat kaybı (sayısal, <1),

R : Alıcı verici antenler arasındaki uzaklık (metre),



Şekil 4.16 : Alış gücü (dikey eksen, dBW) – uzaklık ilişkisi (yatay eksen, m)

Verici gücü dBW, anten kazancı dBi, kablo kaybı dB olarak verilirse (4.20) nolu denklemdeki alıcı güç seviyesi (4.21) numaralı denklemde dBW olarak hesaplanır.

$$P_r = P_t + G_t + G_r + L_t + L_r - 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (4.21)$$

sondaki terim serbest uzay yol kaybı olarak adlandırılır. Bu terimin açıkça ifadesi denklem 4.22 de verilmiştir.

$$FSL = -20 \log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \text{ dB} \quad (4.22)$$

4.3.4 Verici gücünden elektrik alan şiddetinin hesaplanması

Verici antenden R metre uzaktaki güç yoğunluğu [55];

$$P_d = \frac{P_t G_t L_t}{4\pi R^2} \quad W/m^2 \quad (4.23)$$

Serbest uzaydaki uzak alanda elektromanyetik dalganın taşıdığı güç yoğunluğu (4.16) nolu denklemde verilen elektrik alan şiddetinden hesaplanır [55].

$$P_d = \frac{E^2}{\eta_0} = \frac{E^2}{120\pi} \quad W/m^2 \quad (4.24)$$

(4.23) ve (4.24) nolu denklemlerden elektrik alan şiddeti güç yoğunluğu ya da verici gücü cinsinden hesaplanabilir [55].

$$E = \sqrt{120 \pi P_d} = 19.4 \sqrt{P_d} = \frac{5.48}{R} \sqrt{\frac{P_t G_t}{L_t}} \quad V / m. \quad (4.25)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik olarak ifadesi (4.26) ve (4.27) denklemlerinde gösterildiği gibidir [55].

$$P_d = -11(dB) - 20 \log_{10}(R) + 10 \log_{10}(P_t) (dBW) + 10 \log_{10}(G_t) (dBi) + 10 \log_{10}(L_t) (dB) \quad dBW / m^2 \quad (4.26)$$

$$E = 7.4 (dB) - 10 \log_{10}(R) + 5 \log_{10}(P_t) (dBW) + 5 \log_{10}(G_t) (dBi) - 5 \log_{10}(L_t) (dB) \quad dBV / m \quad (4.27)$$

(4.27) nolu denklemden (4.26) nolu denklem çıkarılırsa dBW/m² cinsinden güç yoğunluğu dBV/m cinsinden yazılır [55].

$$E = 25.8 dB + P_d(dBW/m^2) \quad dBV/m \quad (4.28)$$

4.3.5 Alış gücünden elektrik alan şiddetinin hesaplanması

Alıcı antenin ışıma açıklığında güç yoğunluğu, alış gücünün anten kazancı, kablo kaybı ve anten ışıma açıklığına bölümüne eşittir [55].

$$P_d = \frac{4 \pi P_r}{\lambda^2 G_r L_r} \quad W / m^2 \quad (4.29)$$

(4.28) nolu denklemi (4.25) nolu denklemde yerine koyarsak elektrik alan şiddetini V/m cinsinden elde ederiz [55].

$$E = \frac{68.77}{\lambda} \left(\frac{P_r}{G_r L_r} \right)^{1/2} \quad V / m \quad (4.30)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik ifadesi (4.31) ve (4.32) nolu denklemlerde verilmiştir [55].

$$P_d = 11 (dB) - 20 \log_{10}(\lambda) + 10 \log_{10}(P_r) (dBW) - 10 \log_{10}(G_t) (dBi) - 10 \log_{10}(L_r) (dB) \quad dBW / m^2 \quad (4.31)$$

$$E = 18.3 \text{ (dB)} - 10 \text{ Log}_{10}(\lambda) + 5\text{Log}_{10}(P_r) \text{ (dBW)} - 5\text{Log}_{10}(G_r) \text{ (dBi)} - 5\text{Log}_{10}(L_r) \text{ (dB)} \text{ dBV / m} \quad (4.32)$$

4.3.6 Elektrik alan şiddetinin alıcı devrenin giriş gerilimi cinsinden ifadesi

Antenden gelen işaretin maksimum, kayıpsız ve yüksek verimde alıcı devreye aktarılması için giriş empedansının kompleks eşleniğinin antenin çıkış empedansına eşit olması gerekmektedir. Antenin çıkış empedansı 50 ohm, hattın karakteristik empedansı 50 ohm ve alıcı devrenin giriş empedansı 50 ohm ise alışı gücü (4.33) denklemi ile belirtildiği gibidir. Denklemden V gerilimi R direnci göstermektedir [55].

$$P_r = \frac{V^2}{R} \quad W \quad (4.33)$$

ışıma açıklığında güç yoğunluğu ise, R=50 Ω için şöyle yazılabilir [55];

$$P_d = \frac{0.251 V^2}{\lambda^2 G_r L_r} \quad W/m^2 \quad (4.34)$$

Elektrik alan şiddeti ise (4.25) nolu denklemden elde edilerek hesaplanırsa,

$$E = \frac{9.7V}{\lambda} \left(\frac{1}{G_r L_r} \right)^{1/2} \quad V/m \quad (4.35)$$

Güç yoğunluğu ve elektrik alan şiddetinin dB cinsinden logaritmik ifadesi ise;

$$P_d = -6 \text{ (dB)} - 20\text{Log}_{10}(\lambda) + 20\text{Log}_{10}(V) \text{ (dBV)} - 10\text{Log}_{10}(G_r) \text{ (dBi)} - 10\text{Log}_{10}(L_r) \text{ (dB)} \text{ dBW / m}^2 \quad (4.36)$$

$$E = 9.86 \text{ (dB)} - 10\text{Log}_{10}(\lambda) + 10\text{Log}_{10}(V) - 5\text{Log}_{10}(G_r) \text{ (dBi)} - 5\text{Log}_{10}(L_r) \text{ (dB)} \text{ dBV / m} \quad (4.37)$$

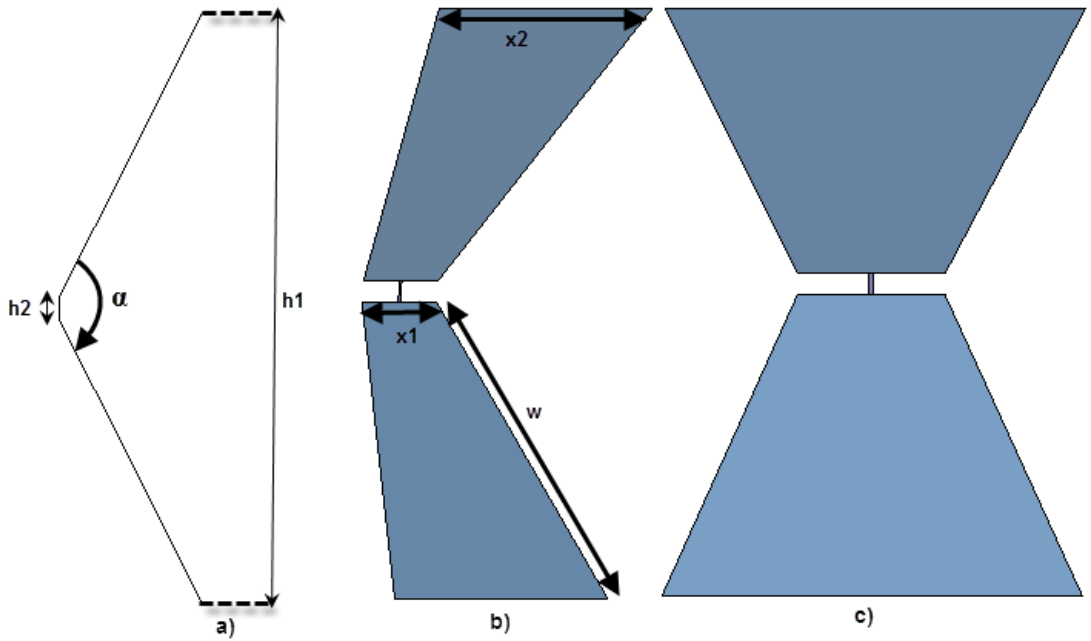
olarak yazılır. Üretici tarafından belirtilen antenin en önemli özelliklerinden biri de anten faktörüdür. Alıcı gücü ölçüldüğünde elektrik alan şiddeti ve giriş gerilimi bulunduğunda anten faktörü (4.38) nolu denklem ile hesaplanır [55].

$$AF = E/V = 9.86 - 10\text{Log}_{10}(\lambda) - 5\text{Log}_{10}(G_r) - 5\text{Log}_{10}(L_r) \quad dB \quad (4.38)$$

5. TEM HORN ANTEN TASARIMI, SİMULASYONU ve EMD HESAPLARI

5.1 Anten Tasarım

Daha önce yapısı açıklanan TEM horn anten, uygun boyutlarda ve istediğimiz frekans aralığında ışıma yapmak üzere tasarlanmıştır. Şekil 5.1’de tasarladığımız antenin genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 5.1 : Tasarlanan antenin a)yandan b)yandan açısıl olarak c) önden geometrik görünüşleri

Çizelge 5.1 : Tasarlanan antenin parametreleri

Parametre	Değer (mm)
x1	35
x2	100
h1	280
h2	5
w	150
α	27

Çizelge 5.1’de anten parametrelerinin değerleri mm cinsinden verilmektedir.

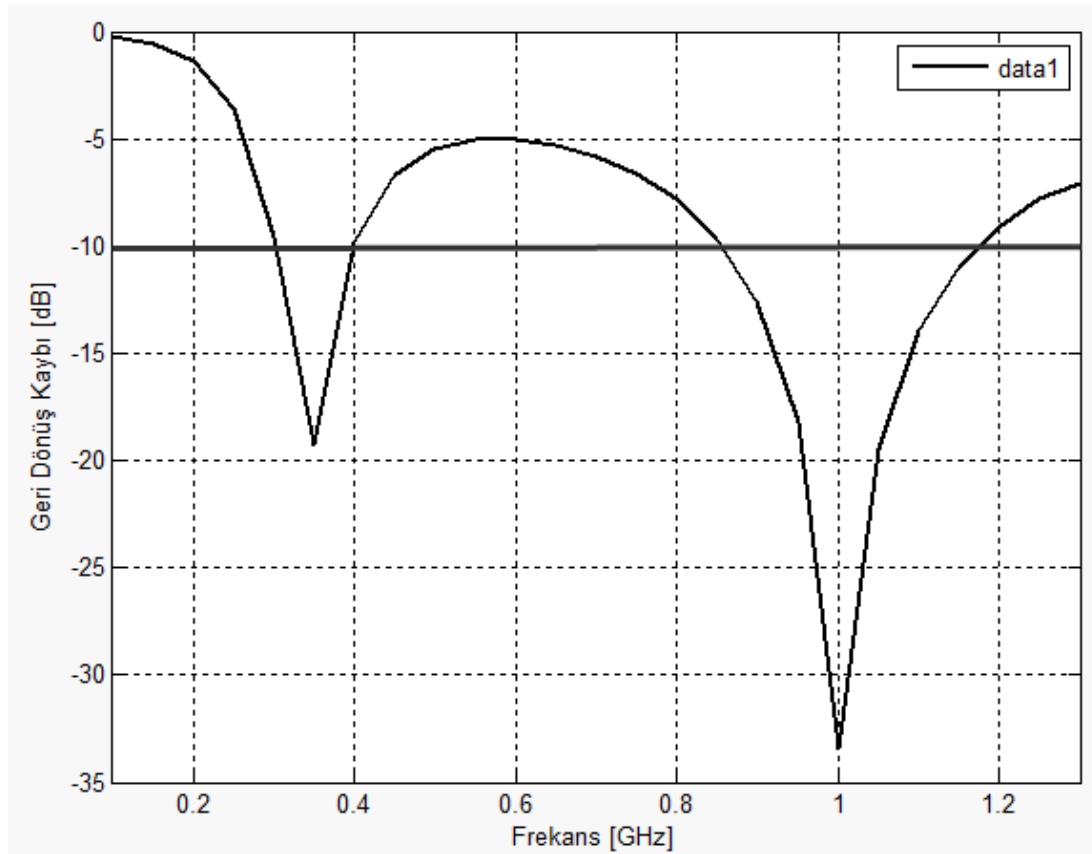
Anten parametrelerinin hesabı 1 GHz’de ışıma yapacak şekilde yapılmıştır. Antenin genel olarak boyutunu veren “w” parametresi, $\lambda=c/f$ formülünden hesaplanarak

bulunmuştur. ($\lambda=3.10^8/10^9=300\text{mm}$, $\lambda/2$ 'yi aldığımızda 150 mm'e tekabül etmektedir)

5.2 Simulasyon ve Sonuçlar

Uygun antenin seçiminden sonraki aşama, önceden tanımlanan frekanslarda antenin giriş empedasının ve ışıma diyagramının bulunmasıdır. Bunu gerçekleştirmek için bir anten tasarım yazılım paketi olan ANSOFT HFSS adındaki program seçildi. Bu program antenin simülasyonu ve geliştirilmesi için kullanılmıştır. HFSS programı FEM (Sonlu elemanlar yöntemi) tabanlı bir elektromanyetik dalga simülatörüdür [56].

5.2.1 Antenin geri dönüş kaybı (Return Loss)



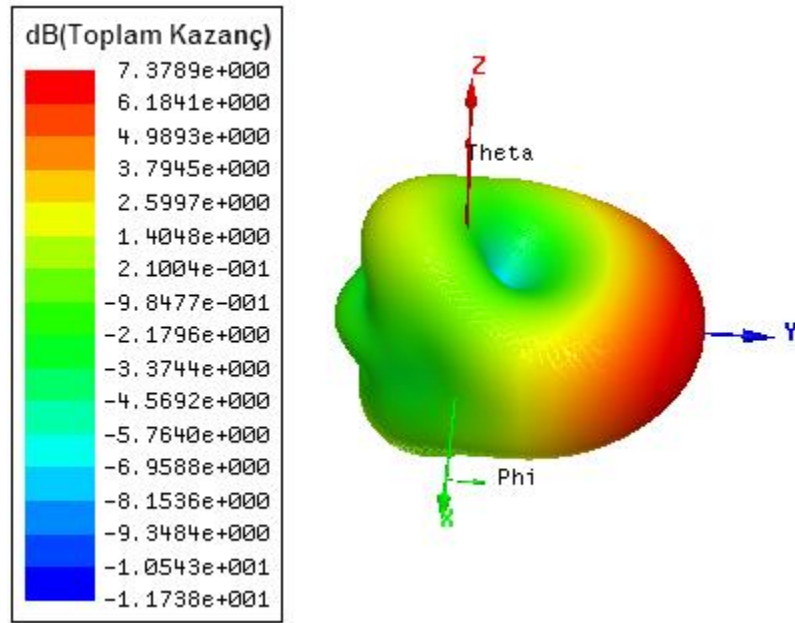
Şekil 5.2 : Tasarlanıp simülasyonu yapılan antenin geri dönüş kaybı

Antenin simülasyonu sonucunda -10dB'den daha az geri dönüş kaybı olan frekans aralığı 0.35GHz - 0.4GHz ve 0.85GHz – 1.2GHz olarak görülmektedir. Hesaplanan ve simülasyonla da elde edilen 1GHz rezonans frekansı YGM sistemler için

uygundur. Açıkça görülmektedir ki tasarlanan antenin arzu edilen frekans bandında istenilen empedans uygunluğuna veya geri dönüş kaybı seviyesine sahiptir.

5.2.2 Antenin üç boyutlu uzak alan ışıma diyagramı

Antenin performansını analiz ederken empedans uygunluğu (geri dönüş kaybı) önemli bir parametredir. Bunun yanında antenin diğer bir temel karakteristiği ise ışıma diyagramıdır. Aşağıda tasarlanan antenin 1GHz frekansındaki, üç boyutlu ışıma diyagramı verilmiştir.

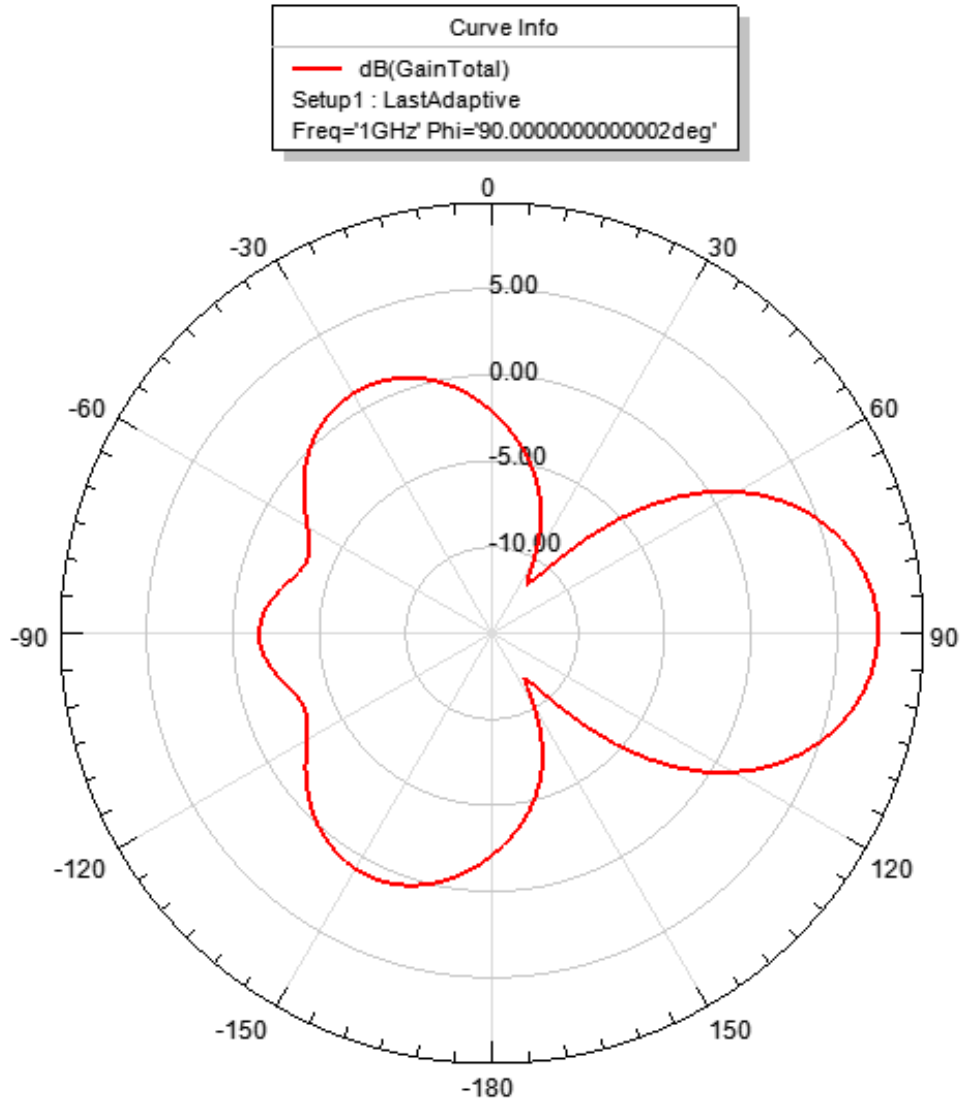


Şekil 5.3 : Tasarlanıp simülasyonu yapılan antenin üç boyutlu ışıma diyagramı.

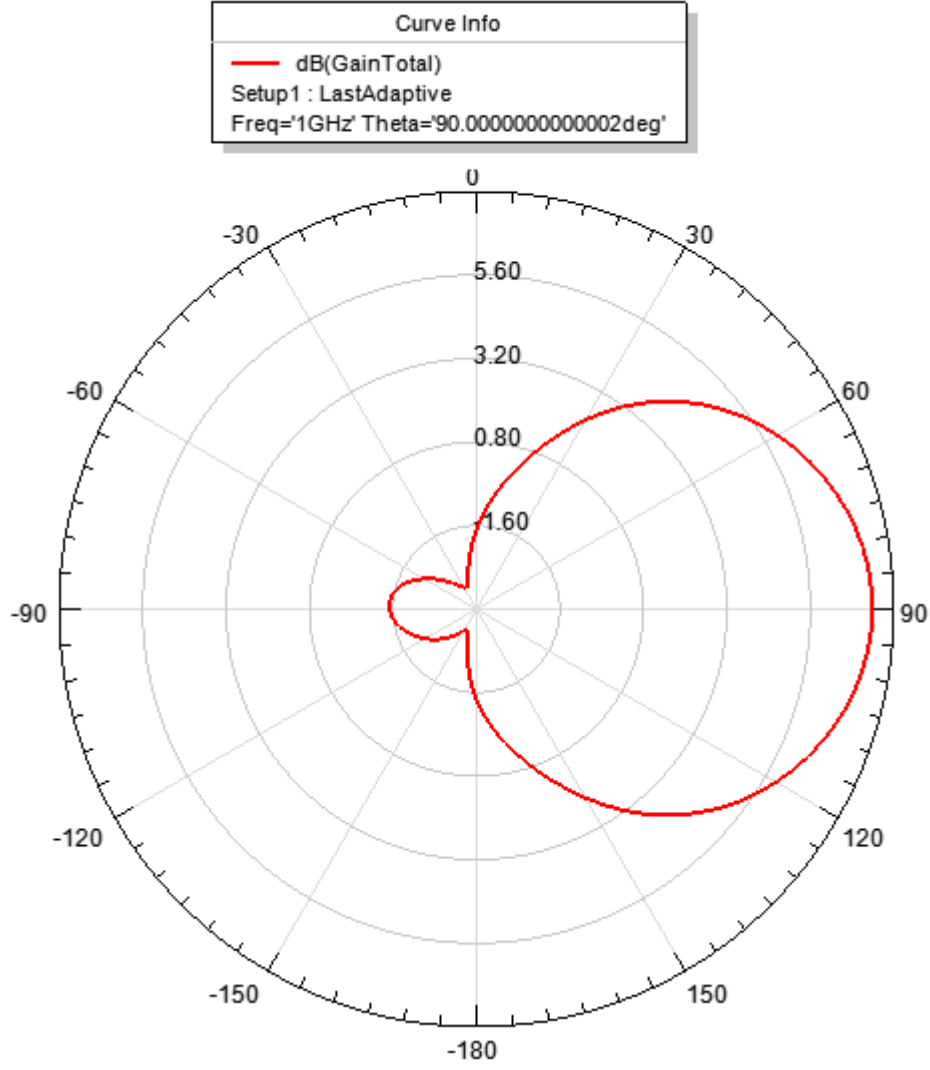
Şekilden görüldüğü gibi simülasyonu yapılan anten 1GHz’de +y yönünde 7.37 dB’lik kazanç ile ışıma yapmaktadır. Şekilde Theta +x eksenine doğru, Phi ise +y eksenine doğrudur.

5.2.3 Antenin iki boyutlu uzak alan ışıma diyagramı

Üç boyutlu ışıma diyagramları elektrik alanın antenden tüm yönlere yayılımını göstermektedir. Anten uygulamalarında alıcı veya verici durumundaki antenin tek bir polarizasyon durumundaki alan değişimini bilmek önemlidir. Bu yüzden antenin performansı her iki polarizasyon durumu için de simüle edilmiştir.



Şekil 5.4 : Antenin 1GHz'deki iki boyutlu yatay ışıma diyagramı



Şekil 5.5 : Antenin 1GHz'deki iki boyutlu dikey ışıma diyagramı

Yatay ve dikey polarizasyonda 90 dereceye denk gelen doğrultuda ışımanın baskın olduğu görülmektedir.

5.3 Parabolik Reflektör Tasarımı

YGM sistemlerde üretilen elektromanyetik dalgayı odaklayarak hedefe göndermek için parabolik reflektörler kullanılır. Ayrıca reflektör kullanımıyla kazanç artacağından daha uzak mesafelere de ulaşmak mümkün olmaktadır. Aşağıda bu bölüm içerisinde parabolik reflektör tasarımı ile ilgili verilen bilgiler kullanılarak tasarlanan antenlerin geometrik görünümü yer almaktadır. Verilen parabolik reflektörde, tasarlanan TEM horn antende geometrik olarak gösterilmektedir. Burada parabolik antene ilişkin boyut, odak ve kazanç hesapları verilecek ve şematik olarak gösterilecektir.

Parabol denklemleri kullanılarak X, Y ve Z eksenlerine ilişkin, tasarımda kullanılan formülleri HFSS programından,

$$U(-50mm, 50mm), \quad V(-550mm, 550mm)$$

aralıklarında tanımlanan U, V parametrelerini kullanarak,

$$X = 19U$$

$$Y = 2V$$

$$Z = \frac{U^2}{5} + 480 - \frac{V^2}{430}$$

bu şekilde alabiliriz.

Parabolik reflektörün odak noktasını ise HFSS [56] programından ölçüm yardımıyla aldığımız sonuç olan $1800mm = 1,8m$ olarak verebiliriz. Tasarladığımız TEM Horn anteni bu noktaya yerleştirdik.

Denklem 4.13 ve 4.14'ü kullanarak genel kazanç formülünü şu şekilde yazabiliriz [55];

$$G = 10 \log \left(\eta \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2} \right)$$

Verimlilik faktörü tipik parabolik reflektörlerde 0,55-0,7 aralığında olduğundan, denklemde $\eta=0,55$ alınarak hesap yapılmıştır [57]. λ ise 1 GHz frekansına göre;

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^9} = 0,3 \text{ m}$$

olarak elde edildikten sonra kazanç formülünde kullanılır.

D, ap uzunluğu ise 1,8 metre olarak alınmıştır. Bu değerlere göre hesaplanan kazanç;

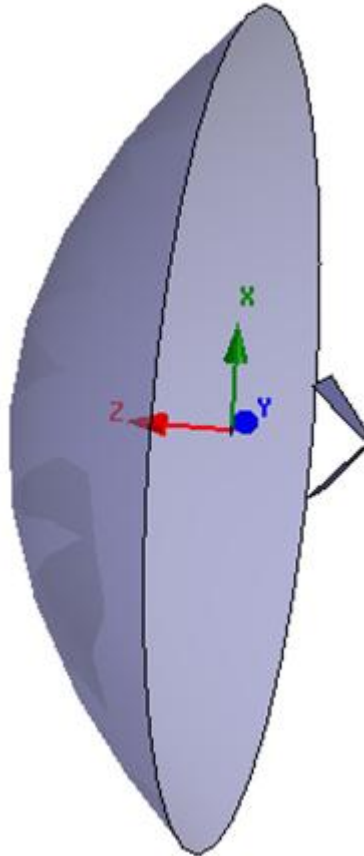
$$G = 22,91 \text{ dBi}$$

olarak bulunur. Çapın farklı uzunluklarına göre kazancın değişimini ise aşağıdaki çizelgeden görebiliriz.

Çizelge 5.2 : Kazancın farklı çap uzunluklarında değişimi.

D (ap, m)	G (Kazanç, dBi)	D (ap, m)	G (Kazanç, dBi)
1	17,80	2,2	24,65
1,2	19,39	2,4	25,41
1,4	20,73	2,6	26,10
1,6	21,89	2,8	26,75
1,8	22,91	3	27,35
2	23,82	4	29,85

Hesaplanan bu değerlere göre tasarlanan reflektör anten şekil 5.6'da verilmiştir.



şekil 5.6 : Tasarlanan parabolik reflektörün geometrik gösterimi

5.4 EMD Yayılım Hesapları

YGM'lerin etkileri inanılmaz boyutlarda olabilir. Bunlardan ilki 1967 yılında Vietnam savaşı sırasında, dikkatsiz bağlanmış bir füze kablosu üzerinden alınan radar ışınlarının ortaya çıkardığı felakettir. Ayrıca mikrodalga kaynakların dielektrik malzemeleri ısıttığı bilinmekte ve endüstride kullanılmaktadır. Aynı şekilde, farklı dielektrik değerlerine sahip parçaların birlikteliğinden meydana gelen biyolojik yapılar üzerinde de doğal bir etki bırakmaktadır. Burada daha ilgi çeken ise, bir mikrodalga enerjisinin hedefe ulaşması halinde, hedefin dış yüzeyi boyunca harekete geçerek içindeki elektronik elemanlara kadar uzanan bir sızma ve yayılma işlemi meydana gelmektedir. Bu ise adı geçen cihazın işlevsizleştirilmesi anlamına gelmektedir. Literatürde [58-60], pek çok elektronik elemanın $1\mu\text{J}$ 'den daha büyük bir enerjiye maruz kalması halinde yandığı not edilmektedir [16].

Denklem 4.20 ve sonrasında verilen Friis denklemleri kullanılarak ve yüksek güç sağlayacak kaynaktan elde edilen 10kW, 100kW, 1MW ve 1GW güçler için artan mesafeye göre ve kayıpların (L_r ve L_t) sıfır olarak kabul edildiği durumda hesaplanan güç değerleri Çizelge 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da ayrı ayrı verilmektedir. Hesaplanan güç değeri için insanları etkileyebilecek mesafe sarı ile gösterilmektedir. Bir biyolojik hedefin etkilendiği min. güç 50 mW/cm'dir.

Çizelge 5.3 : 10 kW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı

f (Hz)	Lamda(m)	R(m)	Pt(watt)	Gt	pi	Pd(W/m ²)	Gr	Pr (w)	Pr(dBw)
1.000.000.000,00	0,30	10	10.000,00	100,00	3,14	795,77471130	20,00	379,95443469	25,80
1.000.000.000,00	0,30	20	10.000,00	100,00	3,14	198,94367783	20,00	94,98860867	19,78
1.000.000.000,00	0,30	30	10.000,00	100,00	3,14	88,41941237	20,00	42,21715941	16,25
1.000.000.000,00	0,30	40	10.000,00	100,00	3,14	49,73591946	20,00	23,74715217	13,76
1.000.000.000,00	0,30	50	10.000,00	100,00	3,14	31,83098845	20,00	15,19817739	11,82
1.000.000.000,00	0,30	60	10.000,00	100,00	3,14	22,10485309	20,00	10,55428985	10,23
1.000.000.000,00	0,30	70	10.000,00	100,00	3,14	16,24030023	20,00	7,75417214	8,90
1.000.000.000,00	0,30	80	10.000,00	100,00	3,14	12,43397986	20,00	5,93678804	7,74
1.000.000.000,00	0,30	90	10.000,00	100,00	3,14	9,82437915	20,00	4,69079549	6,71
1.000.000.000,00	0,30	100	10.000,00	100,00	3,14	7,95774711	20,00	3,79954435	5,80
1.000.000.000,00	0,30	200	10.000,00	100,00	3,14	1,98943678	20,00	0,94988609	-0,22
1.000.000.000,00	0,30	300	10.000,00	100,00	3,14	0,88419412	20,00	0,42217159	-3,75
1.000.000.000,00	0,30	400	10.000,00	100,00	3,14	0,49735919	20,00	0,23747152	-6,24
1.000.000.000,00	0,30	500	10.000,00	100,00	3,14	0,31830988	20,00	0,15198177	-8,18
1.000.000.000,00	0,30	600	10.000,00	100,00	3,14	0,22104853	20,00	0,10554290	-9,77
1.000.000.000,00	0,30	700	10.000,00	100,00	3,14	0,16240300	20,00	0,07754172	-11,10
1.000.000.000,00	0,30	800	10.000,00	100,00	3,14	0,12433980	20,00	0,05936788	-12,26
1.000.000.000,00	0,30	900	10.000,00	100,00	3,14	0,09824379	20,00	0,04690795	-13,29
1.000.000.000,00	0,30	1.000	10.000,00	100,00	3,14	0,07957747	20,00	0,03799544	-14,20
1.000.000.000,00	0,30	2.000	10.000,00	100,00	3,14	0,01989437	20,00	0,00949886	-20,22
1.000.000.000,00	0,30	3.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00884194	20,00	0,00422172	-23,75
1.000.000.000,00	0,30	4.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00497359	20,00	0,00237472	-26,24
1.000.000.000,00	0,30	5.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00318310	20,00	0,00151982	-28,18
1.000.000.000,00	0,30	6.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00221049	20,00	0,00105543	-29,77
1.000.000.000,00	0,30	7.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00162403	20,00	0,00077542	-31,10
1.000.000.000,00	0,30	8.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00124340	20,00	0,00059368	-32,26
1.000.000.000,00	0,30	9.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00098244	20,00	0,00046908	-33,29
1.000.000.000,00	0,30	10.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00079577	20,00	0,00037995	-34,20
1.000.000.000,00	0,30	20.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00019894	20,00	0,00009499	-40,22
1.000.000.000,00	0,30	30.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00008842	20,00	0,00004222	-43,75
1.000.000.000,00	0,30	40.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00004974	20,00	0,00002375	-46,24
1.000.000.000,00	0,30	50.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00003183	20,00	0,00001520	-48,18
1.000.000.000,00	0,30	60.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00002210	20,00	0,00001055	-49,77
1.000.000.000,00	0,30	70.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00001624	20,00	0,00000775	-51,10
1.000.000.000,00	0,30	80.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00001243	20,00	0,00000594	-52,26
1.000.000.000,00	0,30	90.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00000982	20,00	0,00000469	-53,29
1.000.000.000,00	0,30	100.000	10.000,00	100,00	3,14	0,00000796	21,00	0,00000399	-53,99

10 kW güç için 1500-2000 metre mesafedeki bir biyolojik hedefin etkilenebileceği güç yayılır.

Çizelge 5.4 : 100 kW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı

f (Hz)	Lamda(m)	R(m)	Pt(watt)	Gt	pi	Pd(W/m ²)	Gr	Pr (w)	Pr(dBw)
1.000.000.000	0,30	10,00	100.000,00	100,00	3,14	7.957,74711	20,00	3.799,54435	35,80
1.000.000.000	0,30	20,00	100.000,00	100,00	3,14	1.989,43678	20,00	949,88609	29,78
1.000.000.000	0,30	30,00	100.000,00	100,00	3,14	884,19412	20,00	422,17159	26,25
1.000.000.000	0,30	40,00	100.000,00	100,00	3,14	497,35919	20,00	237,47152	23,76
1.000.000.000	0,30	50,00	100.000,00	100,00	3,14	318,30988	20,00	151,98177	21,82
1.000.000.000	0,30	60,00	100.000,00	100,00	3,14	221,04853	20,00	105,54290	20,23
1.000.000.000	0,30	70,00	100.000,00	100,00	3,14	162,40300	20,00	77,54172	18,90
1.000.000.000	0,30	80,00	100.000,00	100,00	3,14	124,33980	20,00	59,36788	17,74
1.000.000.000	0,30	90,00	100.000,00	100,00	3,14	98,24379	20,00	46,90795	16,71
1.000.000.000	0,30	100,00	100.000,00	100,00	3,14	79,57747	20,00	37,99544	15,80
1.000.000.000	0,30	200,00	100.000,00	100,00	3,14	19,89437	20,00	9,49886	9,78
1.000.000.000	0,30	300,00	100.000,00	100,00	3,14	8,84194	20,00	4,22172	6,25
1.000.000.000	0,30	400,00	100.000,00	100,00	3,14	4,97359	20,00	2,37472	3,76
1.000.000.000	0,30	500,00	100.000,00	100,00	3,14	3,18310	20,00	1,51982	1,82
1.000.000.000	0,30	600,00	100.000,00	100,00	3,14	2,21049	20,00	1,05543	0,23
1.000.000.000	0,30	700,00	100.000,00	100,00	3,14	1,62403	20,00	0,77542	-1,10
1.000.000.000	0,30	800,00	100.000,00	100,00	3,14	1,24340	20,00	0,59368	-2,26
1.000.000.000	0,30	900,00	100.000,00	100,00	3,14	0,98244	20,00	0,46908	-3,29
1.000.000.000	0,30	1.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,79577	20,00	0,37995	-4,20
1.000.000.000	0,30	2.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,19894	20,00	0,09499	-10,22
1.000.000.000	0,30	3.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,08842	20,00	0,04222	-13,75
1.000.000.000	0,30	4.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,04974	20,00	0,02375	-16,24
1.000.000.000	0,30	5.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,03183	20,00	0,01520	-18,18
1.000.000.000	0,30	6.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,02210	20,00	0,01055	-19,77
1.000.000.000	0,30	7.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,01624	20,00	0,00775	-21,10
1.000.000.000	0,30	8.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,01243	20,00	0,00594	-22,26
1.000.000.000	0,30	9.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00982	20,00	0,00469	-23,29
1.000.000.000	0,30	10.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00796	20,00	0,00380	-24,20
1.000.000.000	0,30	20.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00199	20,00	0,00095	-30,22
1.000.000.000	0,30	30.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00088	20,00	0,00042	-33,75
1.000.000.000	0,30	40.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00050	20,00	0,00024	-36,24
1.000.000.000	0,30	50.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00032	20,00	0,00015	-38,18
1.000.000.000	0,30	60.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00022	20,00	0,00011	-39,77
1.000.000.000	0,30	70.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00016	20,00	0,00008	-41,10
1.000.000.000	0,30	80.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00012	20,00	0,00006	-42,26
1.000.000.000	0,30	90.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00010	20,00	0,00005	-43,29
1.000.000.000	0,30	100.000,00	100.000,00	100,00	3,14	0,00008	21,00	0,00004	-43,99

100 kW güç için 4000 metre mesafedeki bir biyolojik hedefin etkilenebileceği güç yayılır.

Çizelge 5.5 : 1 MW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı

f (Hz)	Lamda(m)	R(m)	Pt(watt)	Gt	pi	Pd(W/m ²)	Gr	Pr (w)	Pr(dBw)
1.000.000.000,00	0,30	10,00	1.000.000,00	100,00	3,14	79.577,47	20,00	37.995,44	45,80
1.000.000.000,00	0,30	20,00	1.000.000,00	100,00	3,14	19.894,37	20,00	9.498,86	39,78
1.000.000.000,00	0,30	30,00	1.000.000,00	100,00	3,14	8.841,94	20,00	4.221,72	36,25
1.000.000.000,00	0,30	40,00	1.000.000,00	100,00	3,14	4.973,59	20,00	2.374,72	33,76
1.000.000.000,00	0,30	50,00	1.000.000,00	100,00	3,14	3.183,10	20,00	1.519,82	31,82
1.000.000.000,00	0,30	60,00	1.000.000,00	100,00	3,14	2.210,49	20,00	1.055,43	30,23
1.000.000.000,00	0,30	70,00	1.000.000,00	100,00	3,14	1.624,03	20,00	775,42	28,90
1.000.000.000,00	0,30	80,00	1.000.000,00	100,00	3,14	1.243,40	20,00	593,68	27,74
1.000.000.000,00	0,30	90,00	1.000.000,00	100,00	3,14	982,44	20,00	469,08	26,71
1.000.000.000,00	0,30	100,00	1.000.000,00	100,00	3,14	795,77	20,00	379,95	25,80
1.000.000.000,00	0,30	200,00	1.000.000,00	100,00	3,14	198,94	20,00	94,99	19,78
1.000.000.000,00	0,30	300,00	1.000.000,00	100,00	3,14	88,42	20,00	42,22	16,25
1.000.000.000,00	0,30	400,00	1.000.000,00	100,00	3,14	49,74	20,00	23,75	13,76
1.000.000.000,00	0,30	500,00	1.000.000,00	100,00	3,14	31,83	20,00	15,20	11,82
1.000.000.000,00	0,30	600,00	1.000.000,00	100,00	3,14	22,10	20,00	10,55	10,23
1.000.000.000,00	0,30	700,00	1.000.000,00	100,00	3,14	16,24	20,00	7,75	8,90
1.000.000.000,00	0,30	800,00	1.000.000,00	100,00	3,14	12,43	20,00	5,94	7,74
1.000.000.000,00	0,30	900,00	1.000.000,00	100,00	3,14	9,82	20,00	4,69	6,71
1.000.000.000,00	0,30	1.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	7,96	20,00	3,80	5,80
1.000.000.000,00	0,30	2.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	1,99	20,00	0,95	-0,22
1.000.000.000,00	0,30	3.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,88	20,00	0,42	-3,75
1.000.000.000,00	0,30	4.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,50	20,00	0,24	-6,24
1.000.000.000,00	0,30	5.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,32	20,00	0,15	-8,18
1.000.000.000,00	0,30	6.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,22	20,00	0,11	-9,77
1.000.000.000,00	0,30	7.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,16	20,00	0,08	-11,10
1.000.000.000,00	0,30	8.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,12	20,00	0,06	-12,26
1.000.000.000,00	0,30	9.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,10	20,00	0,05	-13,29
1.000.000.000,00	0,30	10.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,08	20,00	0,04	-14,20
1.000.000.000,00	0,30	20.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,02	20,00	0,01	-20,22
1.000.000.000,00	0,30	30.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,01	20,00	0,00	-23,75
1.000.000.000,00	0,30	40.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-26,24
1.000.000.000,00	0,30	50.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-28,18
1.000.000.000,00	0,30	60.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-29,77
1.000.000.000,00	0,30	70.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-31,10
1.000.000.000,00	0,30	80.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-32,26
1.000.000.000,00	0,30	90.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	20,00	0,00	-33,29
1.000.000.000,00	0,30	100.000,00	1.000.000,00	100,00	3,14	0,00	21,00	0,00	-33,99

1 MW güç için 15-20 kilometre mesafedeki bir biyolojik hedefin etkilenebileceği güç yayılır.

Çizelge 5.6 : 1 GW verici güç için Friis denklemine göre EMD yayılım hesabı

f (Hz)	Lamda(m)	R(m)	Pt(watt)	Gt	pi	Pd(W/m ²)	Gr	Pr (w)	Pr(dBw)
1.000.000.000	0,30	10	1.000.000.000	100	3,14	79.577.471,13	20	37.995.443,47	75,80
1.000.000.000	0,30	20	1.000.000.000	100	3,14	19.894.367,78	20	9.498.860,87	69,78
1.000.000.000	0,30	30	1.000.000.000	100	3,14	8.841.941,24	20	4.221.715,94	66,25
1.000.000.000	0,30	40	1.000.000.000	100	3,14	4.973.591,95	20	2.374.715,22	63,76
1.000.000.000	0,30	50	1.000.000.000	100	3,14	3.183.098,85	20	1.519.817,74	61,82
1.000.000.000	0,30	60	1.000.000.000	100	3,14	2.210.485,31	20	1.055.428,99	60,23
1.000.000.000	0,30	70	1.000.000.000	100	3,14	1.624.030,02	20	775.417,21	58,90
1.000.000.000	0,30	80	1.000.000.000	100	3,14	1.243.397,99	20	593.678,80	57,74
1.000.000.000	0,30	90	1.000.000.000	100	3,14	982.437,92	20	469.079,55	56,71
1.000.000.000	0,30	100	1.000.000.000	100	3,14	795.774,71	20	379.954,43	55,80
1.000.000.000	0,30	200	1.000.000.000	100	3,14	198.943,68	20	94.988,61	49,78
1.000.000.000	0,30	300	1.000.000.000	100	3,14	88.419,41	20	42.217,16	46,25
1.000.000.000	0,30	400	1.000.000.000	100	3,14	49.735,92	20	23.747,15	43,76
1.000.000.000	0,30	500	1.000.000.000	100	3,14	31.830,99	20	15.198,18	41,82
1.000.000.000	0,30	600	1.000.000.000	100	3,14	22.104,85	20	10.554,29	40,23
1.000.000.000	0,30	700	1.000.000.000	100	3,14	16.240,30	20	7.754,17	38,90
1.000.000.000	0,30	800	1.000.000.000	100	3,14	12.433,98	20	5.936,79	37,74
1.000.000.000	0,30	900	1.000.000.000	100	3,14	9.824,38	20	4.690,80	36,71
1.000.000.000	0,30	1.000	1.000.000.000	100	3,14	7.957,75	20	3.799,54	35,80
1.000.000.000	0,30	2.000	1.000.000.000	100	3,14	1.989,44	20	949,89	29,78
1.000.000.000	0,30	3.000	1.000.000.000	100	3,14	884,19	20	422,17	26,25
1.000.000.000	0,30	4.000	1.000.000.000	100	3,14	497,36	20	237,47	23,76
1.000.000.000	0,30	5.000	1.000.000.000	100	3,14	318,31	20	151,98	21,82
1.000.000.000	0,30	6.000	1.000.000.000	100	3,14	221,05	20	105,54	20,23
1.000.000.000	0,30	7.000	1.000.000.000	100	3,14	162,40	20	77,54	18,90
1.000.000.000	0,30	8.000	1.000.000.000	100	3,14	124,34	20	59,37	17,74
1.000.000.000	0,30	9.000	1.000.000.000	100	3,14	98,24	20	46,91	16,71
1.000.000.000	0,30	10.000	1.000.000.000	100	3,14	79,58	20	38,00	15,80
1.000.000.000	0,30	20.000	1.000.000.000	100	3,14	19,89	20	9,50	9,78
1.000.000.000	0,30	30.000	1.000.000.000	100	3,14	8,84	20	4,22	6,25
1.000.000.000	0,30	40.000	1.000.000.000	100	3,14	4,97	20	2,37	3,76
1.000.000.000	0,30	50.000	1.000.000.000	100	3,14	3,18	20	1,52	1,82
1.000.000.000	0,30	60.000	1.000.000.000	100	3,14	2,21	20	1,06	0,23
1.000.000.000	0,30	70.000	1.000.000.000	100	3,14	1,62	20	0,78	-1,10
1.000.000.000	0,30	80.000	1.000.000.000	100	3,14	1,24	20	0,59	-2,26
1.000.000.000	0,30	90.000	1.000.000.000	100	3,14	0,98	20	0,47	-3,29
1.000.000.000	0,30	100.000	1.000.000.000	100	3,14	0,80	21	0,40	-3,99

1 GW güç için 100 kilometre mesafedeki bir biyolojik hedefin etkilenebileceği güç yayılır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, yönlendirilmiş elektromanyetik enerji kavramı iki temel tür olan, raylı ve sargılı sistemler aracılığı ile oluşturulan elektromanyetik dalga kullanılarak bir cismin fırlatılması ve oluşturulan elektromanyetik dalgaların hedefe yönlendirilmesi üzerine kurulmuştur. Bu sistemler için yüksek güç gereksiniminden bahsedilmiş ve bu sebeple getirdiği avantajlar nedeniyle 4. nesil nükleer reaktör tasarımlarından olan likit toryum yakıtlı, LFTR (Likit Florit Toryum Reaktör)'ler önerilmiş ve çalışma yapısı anlatılmıştır. Tezin odak noktası olan yüksek güç mikrodalga sistemlerin daha uzaktaki hedefler, daha verimli olarak yönlenmesi için anten konusu ele alınmıştır. YGM sistemlerde kullanılan antenler anlatılmış, bir anteni tasarlamak için gereken matematiksel altyapı verilmiştir. Bütün bu birikim kullanılarak, YGM'lerde kullanılan anten türlerinden olan bir TEM Horn anten tasarlanmış ve simulasyonu yapılmıştır. Tasarlanan bu anten yaklaşık 8 dBi'lık verime sahip ve 1 GHz frekans civarında yoğun genlikli olmak üzere ışıma yapmaktadır. Tasarlanan antenin ışıma diyagramları ile dar huzmeli ve yönlü anten olduğu belirtilmiş ve kullanmak istediğimiz sistemde frekans, kazanç, boyut açısından tam uyum sağlamıştır. Anten kazancını artırılması ile hedef menzilini daha uzağa taşımak için bir parabolik reflektör anten tasarlanıp sisteme dahil edilmiştir. 1,8m'lik uzunluğa sahip bu anten yaklaşık 12 dBi'lık bir kazançla sahiptir. Yani bu iki antenin toplam kazancı yaklaşık 20 dBi olarak alınmıştır. Bu antenlerin tasarlanması elde edilen kazanç değerleri elektromanyetik dalganın yayılım hesaplarında kullanılmıştır. Öncesinde elektromanyetik dalgasının yayılımının matematiksel hesapları verilmiş daha sonra değişen uzaklığa ve ilk güç miktarına göre hesaplar yapılmıştır. Sonuç olarak yapılan hesaplarda yüksek güçlerde km'lerce uzaklıkta hedeflere etki edebilecek sistemlerin var olduğu ortaya konulmuştur.

Elektromanyetik gücün yönlendirilmesi ve hedefe iletilmesi hem ülke savunmaları hem de farklı kullanım alanları ile önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu önemli konudan hareketle oluşturulan bu tez, yeterli Türkçe kaynağın olmaması sebebiyle ilgili araştırmacılara da yararlı olacaktır.

Tezin ikinci bölümünde bahsedilen, elektromanyetik dalganın bir cisimi fırlatmak üzere oluşturulduğu elektromanyetik fırlatıcılar, ihtiyacı olan yüksek güçler sağlandığında ve verimi arttırılmış ileri teknoloji ile tasarlandığında ülke savunmaları açısından yakın gelecekte kullanımı artacaktır ve tartışılacaktır. Bu bağlamda ülkemizde de bu konuda uygulama için gerekli girişimlerin yapılması faydalı olacaktır.

Gelecekte ülke savunmaları açısından çok öncelikli olacak YGM'ler, tıp alanında da kullanılabileceklerdir. Savunma ihtiyaçlarının yanısıra, saldırı amaçlı da kullanılabilecek sistemlerin tasarımı pek çok araştırmacı ve bilim adamı ile pek çok araştırma merkezini birlikte çalışmaya zorlamaktadır. Sistemlerin tasarımı; teorisyenleri ve uygulamacıları içine alacak gruplar oluşturulmasını gerektirmektedir. Ülkemizde, konuya ilişkin olarak henüz literatüre geçmiş kapsamlı çalışmalar bulunmamaktadır [16]. YGM'lerde yine elektromanyetik fırlatıcılar gibi gereken yüksek güçleri sağlanabilir hale geldiğinde gelecekte adından çok söz ettirecektir. Bu konuda dünyada yapılan çalışmalar ileri bir seviyeye gelmiş olması ve ülkemizde de yeterli bir girişim olmaması nedeniyle, bu konuya ilgi çekilmesi ve girişimde bulunulma gerekliliği doğmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde anlatılan LFTR ise başlıbaşına bir araştırma konusu olabilecek önemli bir bölümdür. Elektromanyetik fırlatıcılar ve YGM'ler için gereken yüksek gücü sağlayabilecek en uygun ve en güncel teknoloji olarak karşımıza çıkan LFTR'ler, ülkemizin toryum madeni açısından zengin olması nedeniyle de ayrıca bir önem arz etmektedir. LFTR'ler sadece bu tezde anlatılan amaç için değil, ülkemizin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanıldığında enerji ithalatını durdurabilme kapasitesine sahiptir. Bu nedenlerle, henüz dünyada da güncel ve araştırılan LFTR'ler dikkatle incelenmeli ve en kısa zamanda toryum yakıtlı bir test reaktörü yapılması için çalışma başlatılmalıdır. Ülkemizin sahip olduğu toryum rezervine bakıldığında konunun hassasiyeti daha iyi anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S.**, 2008: Elektromanyetik fırlatıcılar, Fen ve mühendislik bilgisi dergisi, Fırat üniversitesi, Türkiye, 29 Ocak, sf. 117-126
- [2] **Harry Fair**, 2003: The Electromagnetic Launch Technology Revolution, University of Texas at Austin, USA,
- [3] **Url**, <<http://members.tm.net/lapointe/EMGuns.html>>, alındığı tarih 01.03.2011
- [4] **Ventura T.**, 1999: Railgun designs
- [5] **Url**, <<http://www.matthewmassey.com/RailgunTheory.pdf>>, alındığı tarih 10.03.2011
- [6] **Juston, J. M. ve Bauer D. P.**, 1997: A High Performance Railgun Launcher Design, IAP Research, Inc, OH, USA.
- [7] **Herbst, J. D.** 1997: 9 MJ Range Gun System 90 mm High L'Laminated Railgun, *IEEE Trans. on Plasma Magnetics*, Vol. **31**, No. 1. The University of Texas at Austin, TX, USA
- [8] **Zielinski, A. E. ve Werst, M. D.**, 1997: Cannon-Caliber Electromagnetic Launcher, TX, USA..
- [9] **Werst, M.D., Penney, C.E., Hotz, T.J., ve Kitzmiller J.R.** 1998: Continued Testing of The Cannon Caliber Electromagnetic Gun System (CCEMG), *9th EML Symposium, Edinburgh, Scotland*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 35, No. 1, January 1999, pp. 388-393.
- [10] **Tzeng J. T.**, 1993: Structural Mechanics for Electromagnetic Rail Guns, US Army Research Laboratory Weapons and Materials Research Directorate, Aberdeen MD.
- [11] **USA, Deparment of Defence**, 2004: Army Materials Research, Vol. **8**, Number 4, AMPTIAC, USA.
- [12] **Day, P. M.**, 1992: Operation of the Hera Railgun, MSc Thesis, Texas Tech University, TX, USA.
- [13] **Rolader G. E., Thornhill L. D., Batteh J. H. ve Scanlon J. J.**, 1993: Electromagnetic Gun Circuit Analysis Code (EGCAC), Florida ve Georgia.
- [14] **Wilson C.**, 2008: High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments, Technology and National Security Foreign Affairs.

- [15] **Department of The Army**, 2001: Maintenance of Mechanical and Electrical Equipment at Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities, Chapter 27 High Altitude Electro-magnetic Pulse (HEMP) Protection Systems, **TM 5-692-2**.
- [16] **Helhel S. ve Özen Ş.**, 2006: Yüksek Güç Mikrodalga Kaynaklar; Dünya'nın Yeni Silahları, UNM-ECE Albuquerque İncelemesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- [17] **Capozzella R. J.**, 2010: High Power Microwaves on the Future Battelfield Implications for US Defense, A Research Report Submitted to the Faculty Lieutenant Colonel, USAF.
- [18] **Walling, E. M.**, 2000: High Power Microwaves Strategic and Operational Implications for Warfare, Colonel, USAF.
- [19] **Giri, D. V. ve Tesche, F. M.**, 2003: Classification of Intentional Electromagnetic Environments (IEME), *IEEE Special Issue Paper Number B-1*.
- [20] **Giri, D. V., Tesche, F. M. ve Baum C. E.**, 2006: An Overview of High-Power Electromagnetic (HPEM) Radiating and Conducting Systems, *Circuit and Electromagnetic System Design Notes*, Note 50.
- [21] **C.E. Baum**, 2000: Switched Oscillators, Circuit and Electromagnetic System Design Note 45.
- [22] **C.E. Baum**, 2001: Antennas for Switched Oscillators, Sensor and Simulation Note 455..
- [23] **C.E. Baum**, 2004: Differential Switched Oscillators and Associated Antennas, Part 2, Air Force Research Laboratory, US.
- [24] **Giri, D. V., Tesche, F. M., Abdella M. D., Skipper M. C. ve Nyffeler M.** 2009: Switched Oscillators and Their Integration into Helical Antennas, Circuit and Electromagnetic System Design Notes, Note 58.
- [25] **C.E. Baum**, 1989: Radiation of Impulse-Like Transient Fields, Sensor and Simulation Notes, Note 321, Weapons Laboratory, USA.
- [26] **Farr, E. G., C.E. Baum ve Buchenauer C. J.** 1989: Impulse Radiating Antennas, Part 2, USA.

- [27] **Farr, E. G., C.E. Baum ve Buchenauer C. J.** 1994: Off-Boresight Field of a Lens IRA, *Sensor and Simulation Notes*, Note 370, USA..
- [28] **Gold, S. H. ve Nusinovich G. S.** 1997: Review of high-power microwave source research, *review article*.
- [29] **Benford, J., Swengle J. A. ve Schamiloglu, E.** 2007: High Power Microwaves, Second Edition, Rev. Sci. Instrum. 68, USA.
- [30] **Schamiloglu, E. ve Barker, R. J.** 2004: Special Issue on Pulsed Power: Technology and Applications, Proceedings of the IEEE, Vol. **92**, No. 7.
- [31] **Benford, J., Weise Th. H. G. G., Braunsberger, U. ve Sabath, F.** 2001: High Power Compact UWB-Systems, *International Conference on Pulsed Power Applications Gelsenkirchen*, Germany, Mart 29-30
- [32] **Mesyats, G. A., Rukin, S. N., Shpak, V. G. ve Yalandin, M. I.** 1999: Generation of High Power Subnanosecond Pulses, Institute of Electrophysics Russian Acedemy of Sciences, Russia.
- [33] **Hargraves R. ve Moir R.** 2010: Liquid Fluoride Thorium Reactors, *American Scientist*, Vol. **98**, pp. 304-313, Temmuz-Ağustos.
- [34] **Sorensen, K.** 2010: Thinking Nuclear? Think Thorium, Univ. of Tennessee, Mart 18.
- [35] **Url,** <<http://www.taek.gov.tr/bilgi-kosesi/nukleer-enerji-ve-reaktorler/84-nukleer-yakit-cevrimi/252-toryum.html>>, alındığı tarih 20.03.2011
- [36] **Ertuğrul E.** 2004: Bor ve Toryum Madenleri Sektörü, Sektörel Araştırmalar, Araştırma Müdürlüğü, Ankara, Mart.
- [37] **IAEA** 2005: Thorium fuel cycle – Potential benefits and challenges, IAEA-TECDOC-1450, pg.45, Mayıs.
- [38] **A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency** 2008: Uranium 2007: Resources, Production and Demand.
- [39] **A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency** 2010: Uranium 2009: Resources, Production and Demand.
- [40] **Moir R. W. ve Teller E.** 2004: Thorium-Fueled Underground Power Plant Based on Molten Salt Technology, Lawrence Livermore National Laboratory, California, USA.

- [41] **Url**, <<http://www.energyfromthorium.com/ppt/LFTRintroductorySlides.ppt>>, alındığı tarih 20.03.2011
- [42] **Johnson, K. L.** 2010: Sustainable Chemistry and Energy of Thorium, ChemInnovar, Slide Notes.
- [43] **Rubbia, C.:** Sub-critical Thorium reactors, CERN, Geneva, Switzerland.
- [44] **Rubbia, C.:** Report from the lecture presented by him, Further reading: <<http://library.cern.ch/archives/isad/isarubbia.html>>.
- [45] **Aker Solutions.** 2010: Designing a Gen4 Thorium Reactor, Temmuz – Ağustos.
- [46] **Johnson, K. L.** 2009: Life-Sustaining Energy from Thorium, Slides, ChemInnovar LLC.
- [47] **Howe, J. R.** 2009: A New Energy Age for Department of Defense of USA, Presented to 1st Thorium Energy Alliance Conference, The Future Thorium Energy Economy, Vision Centric Inc.
- [48] **Url**, <http://www.energyfromthorium.com/TEAC1/03_Hargraves_AimHigh.pdf>, alındığı tarih 20.03.2011
- [49] **Juhasz, A. J., Rarick, R. A. ve Rangarajan R.** 2009: High Efficiency Nuclear Power Plants Using Liquid Fluoride Thorium Reactor Technology, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Ohio, USA.
- [50] **Url**, <<http://www.kyes.com/antenna/navy/basics/antennas.htm>>, alındığı tarih 20.04.2011
- [51] **Lee, R. T. ve Smith, G. S.** 2004: A Design Study for the Basic TEM Horn Antenna, Georgia Institute of Technology, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. **46**, No. 1, pp. 86-92, Şubat.
- [52] **Yang, F. C. ve Lee, K. S. H.** 1976: Impedance of a Two-Conical-Plate Transmission Line, Sensor and Simulation Notes No. **221**, US Air Force Research Lab, Kirtland AFB, NM.
- [53] **Lee, R. T. ve Smith, G. S.** 2004: On the Characteristic Impedance of the TEM Horn Antenna, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. **52**, No. 1, pp. 315-318.
- [54] **Amineh, R. K., Trehan, A. and Nikolova, N. K.** 2009: Ultra-Wide Band TEM Horn Antenna for Microwave Imaging of the Breast, *13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting*, Canada.

- [55] **Liao, S.**, 1977. Measurements and Computation of Electric Field Intensity and Power Density, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. **IM-26**, no. 1, pp. 53-57.
- [56] **ANSYS, Inc.**: High Frequency Structure Simulator (HFSS) software.
- [57] **Anderson, H. R.** 2003: Fixed Broadband Wireless System Design, Wiley Books, pp. 205-208, USA
- [58] **Baum, C. E.** 2004: Compression of Sinusoidal Pulses for High-Power Microwaves, Circuit and Electromagnetic System Design Notes, Air Force Research Laboratory.
- [59] **Taylor, C. D. ve Giri, D.V.** 1994: High Power Microwave Systems and Effects, Taylor and Francis..
- [60] **Florig, K. H.** 1988: The future battlefield: a blast of gigawatts?, Carnegie Mellon University.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Sabahattin Cihad Yurt

Doğum Yeri ve Tarihi : Erzincan – 11/10/1987

Adres : İstanbul

Eposta adresi : cihadyurt@gmail.com

Eğitim Bilgileri

Lise : Erzincan Anadolu Lisesi, 2001-2005

Lisans : İstanbul Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği /
2005 - 2009

Yabancı dil : İngilizce

İş Tecrübesi

2009 Ekim - : Gençcell Teknoloji Ürünleri SAN. ve TİC. A.Ş. (General Mobile), Proje Yöneticisi