

# Haziran'16 June'16

Sayı/Number: 11 Cilt/Volume: 6  
Yıl/Year: 2016  
ISSN: 1309-5501

## Yayın Sahibi

TMMOB Elektrik Mühendisleri  
Odası adına  
Hüseyin YEŞİL

## Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Hüseyin ÖNDER

## Yayın İdare Merkezi

İhlamur Sokak No: 10 Kat: 3  
Kızılay/Ankara  
Tel: (0312) 425 32 72  
Faks: (0312) 417 38 18  
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>  
[bilimseldergi@emo.org.tr](mailto:bilimseldergi@emo.org.tr)  
EMO üyelerine parasız dağıtılır

## Teknik Editör

E. Orhan ÖRÜCÜ

## Teknik Sekreteryası

Oylum YILDIR

## Yayın Türü

Yerel süreli yayın  
6 ayda bir yayınlanır

## Basım Adedi

5000

## Basım Tarihi

Haziran 2016

## Sayfa Düzeni

PLAR

Planlama Yayıncılık Reklamcılık  
Turizm İnşaat Tic. Ltd. Şti.  
Yüksel Cad. No: 35/12 Yenışehir-Ankara  
Tel: (0.312) 432 01 83-93 Faks: (0.312) 432 54 22  
e-posta: plaritd@gmail.com

## Baskı Yeri

LOTUS MATBAACILIK  
Tel: (0.312) 433 23 10 (pbx)  
Faks: (0.312) 434 03 56  
[www.lotusajans.com](http://www.lotusajans.com)  
Sokullu Cd. Perçem Sk. No: 9 Çankaya/ANKARA

# EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal  
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and  
Biomedical Engineering

## YAYIN KURULU

### BAŞ EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. A. Hamit SERBEST  
Çukurova Üniversitesi

### EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Tayfun AKGÜL  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU  
Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR  
Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Güven ÖNBİLGİN  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

# EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal  
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer  
and Biomedical Engineering

## YAYIN KURULU

### BAŞ EDİTÖR/EDITOR IN CHIEF

**Prof. Dr. A. Hamit SERBEST**

*Çukurova Üniversitesi*

### EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

**Prof. Dr. Tayfun AKGÜL**

*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU**

*Ortadoğu Teknik Üniversitesi*

**Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR**

*Bilkent Üniversitesi*

**Prof. Dr. Güven ÖNBİLGİN**

*Ondokuz Mayıs Üniversitesi*

## DANIŞMA KURULU

Prof.Dr. Metin AKAY	Arizona State University	Prof.Dr. Oya KALIPSIZ	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof.Dr. Mehmet AKŞİT	Twente University	Prof.Dr. İrfan KARAGÖZ	Gazi Üniversitesi
Müjdat ALTAY	Netaş	Prof.Dr. Aydın KÖKSAL	Bilişim A.Ş.
Prof.Dr. Ayhan ALTINTAŞ	Bilkent Üniversitesi	Fikret KÜÇÜKDEVECİ	Kardinero
Prof.Dr. Volkan ATALAY	ODTÜ	Prof.Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU	ODTÜ
Serdar BOZKURT	SIEMENS	Turgay MALERİ	Gate Elektronik
Prof.Dr. Alinur BÜYÜKAKSOY	Okan Üniversitesi	Dr. Ahmet MEREV	TÜBİTAK UME
Prof.Dr. Işık ÇADIRCI	Hacettepe Üniversitesi	Prof.Dr. Banu ONARAL	Drexel Üniversitesi
Doç.Dr. Hakan ÇAĞLAR	Anel	Prof.Dr. Sermin ONAYGİL	İTÜ
Dr. Semih ÇETİN	Cybersoft	Prof.Dr. M. Bülent ÖRENCİK	İTÜ
Prof.Dr. İnci ÇİLESİZ	İTÜ	Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR	İTÜ
Bülent DAMAR	Pelka	Prof.Dr. Erdal PANAYIRCI	Kadir Has Üniversitesi
Prof.Dr. Oğuz DİKENELLİ	Ege Üniversitesi	Prof.Dr. Bülent SANKUR	Boğaziçi Üniversitesi
Doç.Dr. Ali Hikmet DOĞRU	ODTÜ	Tarkan TEKCAN	Vestel
Dr. Hakan ERDOĞMUŞ	ODTÜ	Dr. Erkan TEKMAN	
Prof.Dr. Muammer ERMİŞ	ODTÜ	Prof.Dr. Belgin TÜRKAY	İTÜ
Prof.Dr. Osman EROĞUL	ODTÜ	Ahmet Tarık UZUNKAYA	Entes A.Ş.
Prof.Dr. H. Bülent ERTAN	ODTÜ	Prof.Dr. Yekta ÜLGEN	Boğaziçi Üniversitesi
Doç.Dr. H. Özcan GÜLÇÜR	Boğaziçi Üniversitesi		
Prof.Dr. Yusuf Ziya İDER	Bilkent Üniversitesi		
Prof.Dr. Yorgo İSTEFANAPULOS	Işık Üniversitesi		

## İÇERİK/CONTENTS

### Önsöz

*A. Hamit Serbest*

### **Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri..... 1** ***Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles***

*Ali Pashaei, Emrullah Aydın, Mehmet Polat, Emin Yıldırım, M. Timur Aydemir*

### **Rüzgar Türbinleri İçin Topraklama Ağı Tasarımı..... 13** ***Grounding Grid Design for Wind Turbines***

*Aytuğ Font, Özcan Kalenderli, Semih Günden*

### **Tanım Uzayı Değişkeni İle Değişen Bazı Sıradan Doğrusal Sistemler İçin Analitik Çözüm Yöntemi..... 21**

***An Analytical Solution of Certain Classes of Ordinary Linear Domain Varying Systems***

*Veysi Gökhan, Hasan Güneyle, Arif Nacaroglu*

### **Binalar Arası Elektromanyetik Dalga Yayılımının Nümerik Modellenmesi..... 25** ***Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Propagation Between Buildings***

*Özlem Özgün*



## ÖNSÖZ

EMO Bilimsel Dergi'nin on birinci sayısı ile sizlerle buluşmanın mutluluğunu yaşıyoruz. Bu sayıda Akademik veya teknolojik bilimsel makale türünde kaleme alınmış dört makale yer almaktadır. Makalelerin her biri Yayın Kurulu tarafından belirlenen konunun uzmanı en az iki bağımsız hakem tarafından incelenmiş ve yayınlanma kararı hakem görüşleri doğrultusunda yine Yayın Kurulu tarafından verilmiştir.

Yayımlanan makalelerin tam metinlerine elektronik ortamda, kopyalanabilir olarak pdf formatında internet sayfamızdan erişilebilmektedir. Düzenli olarak yılda iki sayı olarak çıkarılan EMO Bilimsel Dergi birleşik sayı yayımlamamaktadır.

EMO tarafından derginin yayın politikasının ve bilimsel içeriğinin belirlenme yetkisi bütünüyle Yayın Kurulu ve Danışma Kurulu'na bırakılmıştır. Danışma Kurulu üyelerinin akademisyenler, sanayiciler ve Ar-Ge çalışanları arasından, alanlarındaki uzmanlıkları özellikle dikkate alınarak oluşturulmasına özen gösterilmiştir. Akademisyenlerin belirlenmesinde ise olabildiğince farklı üniversiteden katkı alınmaya dikkat edilmiştir. Yayın Kurulu ve Danışma Kurulu üyeleri gönüllülük ilkesi ile hiçbir maddi gelir beklentisi olmaksızın çalışmalarımızı yürütmektedirler.

EMO Bilimsel Dergi, Kongre/Sempozyum gibi bilimsel toplantılarda sunulan tebliğleri, EMO Bilimsel Dergisi'nin yazım kurallarına uygun olarak yeniden düzenlenmesi ve hakem değerlendirmesinin olumlu olması kaydıyla basılmaktadır. Halen, bu kapsamda mutabık kalınmış, iki bilimsel toplantı vardır: 1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi ve 9. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu. Makalelerinizi doğrudan gönderebileceğiniz gibi, toplantı düzenleme kurulu kararıyla göndermeniz tercih edilir.

Öncelikle Türkiye Atıf Dizini'ne ve devamında en kısa sürede Science Citation Index veri tabanına girmek için gerekli kriterleri sağlaması konusunda azami özen gösterilen EMO Bilimsel Dergi'ye değerli ilgi ve katkılarınız için teşekkür ediyor, artarak sürmesini bekliyoruz.

***Prof. Dr. A. Hamit SERBEST***  
***Yayın Kurulu Adına***



## Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri

### Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles

Ali Pashaei<sup>1</sup>, Emrullah Aydın<sup>1</sup>, Mehmet Polat<sup>2</sup>, Emin Yıldırım<sup>3</sup>, M. Timur Aydemir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

ali.pashaei@gazi.edu.tr

emrullahaydin@gazi.edu.tr

aydemirmt@gazi.edu.tr

<sup>2</sup>Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı (UGES)

ASELSAN A.Ş.

mpolat@aselsan.com.tr

<sup>3</sup>Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü

Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

eminyildirim@duzce.edu.tr

#### Özet

Elektrikli araçların, enerji darboğazı ve çevre kirliliği sorunlarına bir çözüm olarak görülmesi ile birlikte, bu araçların bataryalarının temassız sistemlerle şarj edilmesi düşüncesi yaygınlaşmaya başlamıştır. İlk olarak Nikola Tesla tarafından ortaya atılan temassız güç aktarımı düşüncesi, enerjinin, ortak bir çekirdek üzerinde bulunmayan iki sargı arasında, oldukça büyük bir hava aralığı üzerinden aktarılması ilkesine dayanmaktadır. Bu aktarımın verimli olabilmesi için her iki sargının da rezonans koşullarında çalışması gerekmektedir. Bu makalede, bu sistemlerin kısa bir tarihçesi verilmekte, çalışma ilkesi ve bileşenleri tanıtılmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Temassız Güç Aktarım Sistemleri, Endüktif Güç Aktarım Sistemleri, Kablosuz Güç Aktarım Sistemleri, Elektrikli Araçlar.

#### Abstract

Electric vehicles are seen as a solution to depletion of energy and air pollution. As a result of this vision the idea of contactless battery charging has been widespread. Contactless energy transfer idea was first proposed by Nikola Tesla. The concept is based on the transfer of energy between two coils which are not on a common core through a very large air gap. In order for this transfer to be efficient both coils have to work in resonant mode. In this paper, a brief history of these system is given, the operation principles and system components are discussed.

**Keywords:** Contactless Energy Transfer Systems, Inductive Energy Transfer Systems; Wireless Energy Transfer Systems; Electric vehicles.

#### 1. Giriş

Elektrikli araçlarda, araç bataryasının şarj edilmesi için gerekli elektriksel güç, kablolu ya da kablosuz (temassız) olarak bataryaya aktarılabilir. Temassız güç aktarım (TGA) teknolojisinde güç, araç dışındaki primer kısımdan araç üzerindeki sekonder kısma, hava aralığı üzerinden, elektromanyetik endüksiyon yoluyla aktarılmaktadır. Arada bir temas olmaması nedeniyle temassız güç aktarım sistemleri; kullanım kolaylığı, yüksek emniyet, yüksek güvenilirlik, düşük bakım maliyeti ve uzun kullanım ömrü gibi avantajları beraberinde getirmektedir. Ayrıca meteorolojik ve çevresel etkenlerden bağımsız olarak kesintisiz güç sağlayabilen bu sistemler birçok ortamda güvenle çalıştırılabilmektedir. Bu üstünlüklerinden dolayı temassız güç aktarım sistemlerinin özellikle, elektrikli araç ve otobüs gibi uygulamalarda kullanılmaya başlandığı ve giderek yaygınlaştığı gözlenmektedir.

Elektrikli araçlarda TGA teknolojisinin kullanımı ile birlikte, çevredeki kablo karmaşası ve kirliliğinin azaltılması sağlanacak, kullanıcılar için zahmetli olan şarj işlemi, daha hızlı, zahmetsiz, çevre estetiğine uyumlu ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Teknik avantajları yanında hizmet kalitesinin artması sonucu elektrikli araç kullanıcısının yaşam standartları yükselecektir. Bu doğrultuda ülkemizde elektrikli araçların kullanımının artırılması, milli kaynaklarla geliştirilmesi ve kullanımının özendirilmesi sonucunda büyük kentlerdeki çevre kirliliğinin azalması da mümkün olacaktır.

Bu makalenin amacı, TGA sistemlerinin çalışma ilkesi ve bu sistemlerin bileşenleri hakkında bilgi vermektir. İlerleyen bölümlerde önce kısa bir tarihçe verilmekte, sonra çalışma ilkesi anlatılmakta ve ardından da, her bir bileşen tanıtılıp, bu bileşen-

lere yönelik olarak yapılan bilimsel çalışmalardan kısaca söz edilmektedir.

## 2. TGA Sistemlerinin Tarihiçesi

Elektrik enerjisinin kablosuz olarak aktarımı ilk kez Nikola Tesla tarafından 1891 yılında ortaya atılmış bir kavramdır. Tesla, elektrik enerjisinin dünyanın her yerine kablosuz olarak aktarılabilmesi hedefine yönelik olarak araştırmalar yapmıştır. Bu amaçla 1901 yılında Long Island Sound yakınlarında “Wardenclyffe” kulesinin yapımına başlamıştır. Projenin kaynakları tükendiği için kule hiçbir zaman çalışır hale gelememiştir.



Şekil 1. Tesla'nın Wardenclyffe kulesi [1, 2]

Tesla'nın, aşağıdaki buluşların ya öncüsü, ya da tek başına sahibi olduğu söylenmektedir [3].

- 1) Süren ve sürülen devreler arasında endüktif bağlaşım düşüncesi
- 2) Her iki devreyi de akortlamanın önemi; yani salınım yapan transformatör
- 3) Açık devre olan sekonder sargısını kondansatörle yüklemeye düşüncesi

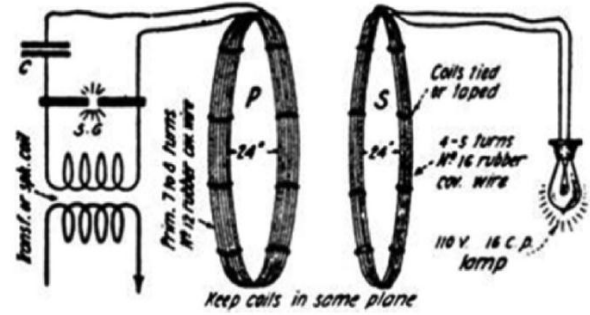
Bu üç kavram, ışımalı ve ışısız kablosuz iletimin temel ilkelerini oluşturmaktadır. Akort edilmiş devreleri salınlı transformatör olarak kullanma düşüncesi hem gönderici hem de alıcı tarafın rezonans modda çalışacak biçimde akort edilmesi anlamına gelir. Bu kavram, manyetik olarak bağlaşımli sargılar arasında manyetik rezonansın kullanımını işaret etmektedir.

Manyetik endüksiyonun, akortlu devrelerin ve rezonans frekansının birlikte kullanımı kablosuz güç aktarımının temelini oluşturmaktadır ve bu özellikler daha sonraki orta mesafeli güç aktarım çalışmaları “ışısız” veya “manyetoendüktif” veya “manyetik rezonans” olarak adlandırılmıştır [4].

Teknik olanakların yetersizliğine karşı Tesla, Şekil 2’de görülen sistemi geliştirmiş ve 10 – 20 kHz aralığında denemiştir [5]. Tesla, manyetik olarak bağlaşımli sargılar arasında verimli bir güç aktarımının gerçekleştirilebilmesi için manyetik rezonansın gerekli olduğunu göstermiştir.

Kablosuz güç aktarımı, onlarca yıl sonra, mikrodalga teknolojinin gelişmesiyle yeniden gündeme gelmiştir. İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemde, mikrodalga frekanslarında çalışabilen yüksek güçlü vakum tüplerinin geliştirilmesiyle, uzun mesafelere yüksek güçlü bir ışın gönderilmesi mümkün olabildiği.

1963 yılında William C. Brown, Raytheon’da ilk mikrodalga güç aktarımını gerçekleştirmiştir. 1969 yılında 50 ft yükseklikteki bir model helikoptere yerleştirilen alıcı anten ile 270W güç aktarımını başarmıştır [6]. 1970’li yıllardan sonra uzayda kurulu sistemler üzerinden kablosuz enerji aktarımı düşünceleri ortaya çıktı. Örneğin bir çölde konumlandırılan yüksek güçlü bir güneş enerjisi santralinde üretilen enerjinin iyi yönlendirilmiş ışınlarla uzaydaki bu sistem üzerinden yansıtılıp istenilen yere aktarılması ile yüksek gerilim hatlarının yarattığı manyetik alanın çevre üzerinde oluşturduğu zararlı etkileri ortadan kaldıracağı düşünüldü.

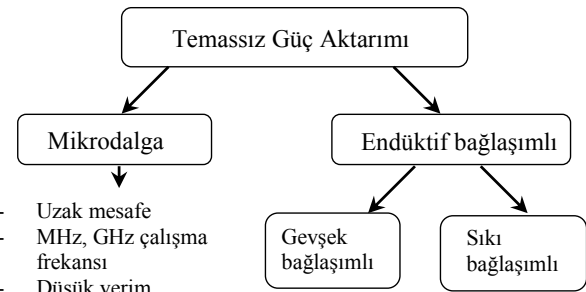


Şekil 2. Tesla tarafından geliştirilen ilk sistemin kendi elinden çizimi [5]

TGA sistemleri üzerine yapılan çalışmalar 2007 yılında MIT’de bir grup araştırmacının 2 m mesafeden 60 W gücünde bir ampulü yakan bir sistemi tanıtmalarıyla yeniden ilgi görmeye başlamıştır [7].

## 3. Endüktif Güç Aktarım Sistemlerinin Genel Yapısı

TGA sistemleri, enerjinin transfer edildiği hava aralığına, güç seviyesine, sistem verimliliğine ve çalışma frekansına göre sınıflandırılabilir (Şekil 3).



Şekil 3. TGA sınıflandırması

Günümüze kadar araştırmacılar farklı güçlerde ve mesafelerde mikrodalga TGA uygulamaları gerçekleştirmiştir [8, 9]. Bu teknik düşük güçlü algılayıcı ağlar gibi pek çok uygulama için uygundur. Bu uygulamalarda verim çok kritik olmayıp, mik-



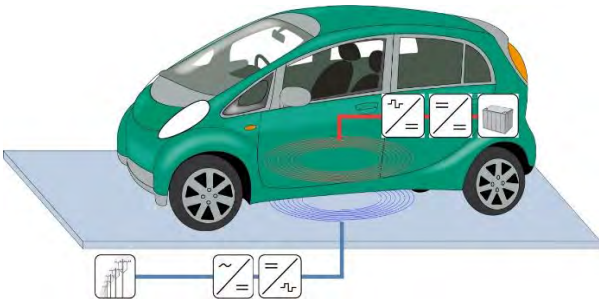
rodalga ışınımı güvenli sınırlar içinde tutulabilir. Yüksek güçlerde ise büyük anten yapıları ve bunun yanında maliyet artışı söz konusudur. Günlük yaşamımızda kullandığımız cihazların uzak alanlı mikrodalga sistemleri ile enerjilendirilmesi verim ve ışınım oranları açılarından uygun değildir. Mikrodalga sistemlerin bir başka zayıf yönü de aktarım için doğrudan görüş gerektirmesidir. Bu nedenle yakın alan yani endüktif güç aktarımı araştırmacıların daha çok dikkatini çekmiştir.

Asenkron motorlar endüktif güç aktarımı sistemi ilkesi ile çalışmaktadır. Bilindiği üzere asenkron motorlarda statora uygulanan güç, küçük bir hava aralığı ile rotora aktarılır. Hava aralığının küçük olması, sargılar arasındaki bağlaşımın (kuplaj) yüksek olmasına neden olur. Bu sistemler sıkı bağlaşımli sistem olarak adlandırılır. Sıkı bağlaşımli sistemlerde ortak endüktans değerleri kaçak endüktans değerlerine göre çok daha büyüktür ve doğal olarak güç oldukça yüksek bir verimle aktarılabilir.

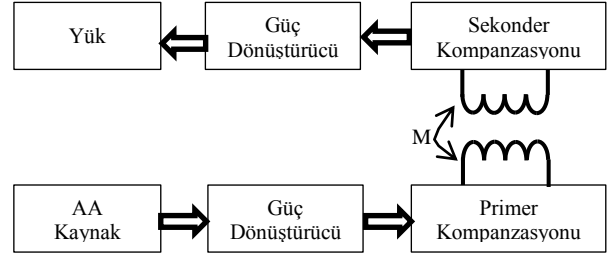
Sargılar arasındaki mesafenin büyük olduğu sistemlerde bağlaşım katsayısı düşük olur. Bu sistemler gevşek bağlaşımli sistem olarak adlandırılır. Gevşek bağlaşımli sistemlerde primer ve sekonder sargılarını üzerinde barındıran ortak bir çekirdek bulunmaz. Ancak her iki sargı da ayrı ayrı bir çekirdek üzerine sarılabilir. Bu yapı, sekonderin primere göre hareketli olmasına izin verdiğinden, elektrikli araçların batarya şarj uygulamaları için kullanışlıdır. Arada bir temas olmaması ve dolayısıyla galvanik yalıtımın sağlanmış olması nedeniyle güvenlik, güvenilirlik, düşük bakım maliyetleri ve uzun kullanım süresi gibi üstünlükleri beraberinde getirir [10].

Gevşek bağlaşımli sistemlerde kaçak endüktans değerleri çok büyük olur [11] ve doğal olarak güç aktarımı düşük verimlidir. Verimi yükseltebilmek için primer ve sekonder sargılara, rezonansa girmeleri ve güç katsayısını düzenlemek için kondansatörler bağlanır.

Endüktif bağlaşımli güç aktarımı durağan [12] veya hareket halinde olabilir [13, 14, 15]. Şekil 4'te durağan endüktif bağlaşımli güç sisteminin genel yapısı görülmektedir. Alternatif akım kaynağından alınan gerilim önce doğrultulmakta; doğrultulmuş gerilim, rezonans frekansında çalışan evirici tarafından anahtarlanarak elde edilen karesel gerilim kompanzasyon devresinden de geçirilerek yer platformunda bulunan primer sargısına uygulanmaktadır. Araç üzerine yerleştirilmiş sekonder sargısına primer sargısından yansıyan gerilim yeniden doğrultulmakta, doğrultulmuş gerilim bir başka güç dönüştürücü kullanılarak bataryanın şarjında kullanılmaktadır. Şekil 5'te ise bu sistem blok diyagram olarak gösterilmektedir.

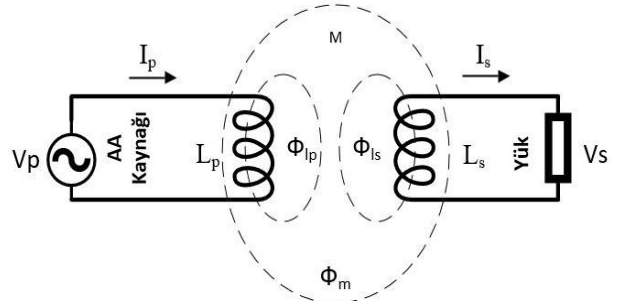


Şekil 4. Örnek bir durağan TGA sistemi [16]



Şekil 5. Durağan TGA sisteminin genel yapısı

Gevşek bağlaşımli sistemlerde, sıkı bağlaşımli sistemlerden farklı olarak primer ve sekonder kompanzasyon blokları yer almak zorundadır. Kompanzasyon devresi olmadan sargılar arasında güç aktarımının nasıl gerçekleştiği, Şekil 6'da basitçe gösterilmektedir [17].

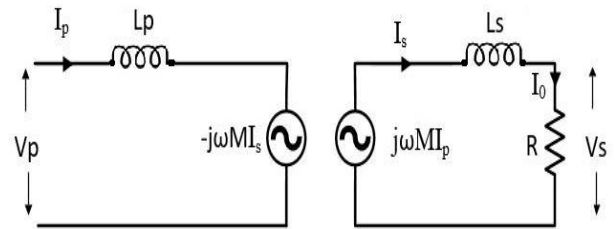


Şekil 6. Bağlaşımli sargılarda güç aktarımı

Sargılar arasındaki bağlaşımın kalitesi bağlaşım katsayısı ile gösterilir ve şu biçimde tanımlanır:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $L_s$  ve  $L_p$ , sekonder ve primer sargılarının endüktans değerlerini,  $M$  ise iki sargı arasındaki ortak endüktansı gösterir. Ortak endüktans, iki sargı arasındaki mesafeye ve bu sargıların birbirlerine göre nasıl yerleştirildiğine bağlı olarak değişir. Örneğin yol üzerine döşenmiş 100 m uzunlukta bir hattın üzerindeki aktif toplayıcının uzunluğu 30 cm ise, bağlaşım katsayısının olası en büyük değeri % 0.3 civarındadır [10]. Şekil 7'de bağlaşımli sargıların eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 7. Bağlaşımli sargıların eşdeğer devresi

Bir temassız güç aktarım sisteminin başarımı başlıca iki parametre ile belirlenir: (1) Primer (gönderici uç) akımı ( $I_p$ ) nedeniyle sekonderde (alıcı uç) endüklenen  $\omega$  frekanslı açık devre gerilimi  $V_{OC}$  (2) Bu gerilimin yarattığı kısa devre akımı  $I_{sc}$ . Bu akım, sargıdan akabilecek en büyük akımdır.

$$V_{OC} = j\omega M I_p \quad (2)$$

$$I_{sc} = \frac{j\omega M I_p}{j\omega L_s} \quad (3)$$

Kompanze edilmemiş sargıdan alınan güç şu bağıntı ile hesaplanır:

$$P = \frac{R V_{OC}^2}{R^2 + (\omega L_s)^2} \quad (4)$$

Bu aktif gücün en yüksek değeri, yük direnci, sargı empedansına eşitken elde edilir:

$$R = \omega L_s \quad (5)$$

Bu durumda, elde edilen gücün en yüksek değeri:

$$P_{max} = \frac{V_{OC}^2}{2\omega L_s} \quad (6)$$

Sargı gücü

$$P = \frac{|V_{oc}||I_{sc}|}{2} \quad (7)$$

biçiminde de ifade edilebildiğinden, maksimum güç için (2), (3) ve (5) kullanılarak

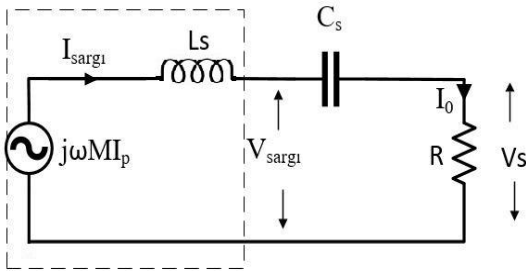
$$P_{max} = \frac{1}{2} \omega M I_p \frac{\omega M I_p}{\omega L_s} = \frac{1}{2} \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_s} \quad (8)$$

yazılabilir. Maksimum güç aktarımı teoremi gereği bu durumda verim %50 olmaktadır. Eğer bu değerden daha büyük bir gücün aktarılması isteniyorsa sargının kompanze edilmesi gerekmektedir.

Sekonder kompanzasyonunun güç aktarma kapasitesini nasıl yükselttiği Şekil 8'deki eşdeğer devre yardımıyla anlaşılabilir. Şekildeki devrede sekonder sargısı seri bağlı bir kondansatörle kompanze edilmiştir.

Sekonder sargısının maksimum güç aktarımı durumundaki VA değeri şu biçimde tanımlanır:

$$VA = V_{sargı} \times I_{sargı} \quad (9)$$



Şekil 8. Seri kompanzasyonlu sekonder

Eğer kondansatörün değeri uygun biçimde seçilirse, seri reaktif elemanlar birbirlerinin etkisini yok edeceğinden

$$I_{sargı} = \frac{j\omega M I_p}{R} \quad (10)$$

ve

$$V_{sargı} = (R + \frac{1}{j\omega_o C_s}) \frac{j\omega M I_p}{R} \quad (11)$$

olarak tanımlanır.

Şimdi, (2), (3), (10) ve (11) eşitlikleri (9) eşitliği içerisinde kullanılarak sargının VA değeri şu biçimde ifade edilebilir.

$$(VA)_{sargı} = |V_{oc}||I_{sc}| \frac{\omega_o L_s}{R_L} (1 - j \frac{\omega_o L_s}{R_L}) \quad (12)$$

Reaktif elemanların kalite katsayısı, elemanda depolanan enerjinin, elemanın aktif gücüne oranı olarak tanımlanır. Örneğin, iç direnci  $R_s$  olan bir endüktans için bu katsayının değeri

$$Q_s = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (13)$$

olur. Seri bağlı sekonder devresi için kalite katsayısı aynı biçimde tanımlanabilir. Sargının iç direncinin yük direnci yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu göz önüne alınırsa, sekonder sargısının kalite katsayısı ( $Q_s$ ) şu biçimde tanımlanır:

$$Q_s = \frac{\omega L_s}{R} \quad (14)$$

Seri kompanzasyonlu sekonder sargısı için VA değeri şimdi kalite katsayısı cinsinden ifade edilebilir:

$$(VA)_{sargı} = |V_{oc}||I_{sc}| Q_s (1 - j Q_s) \quad (15)$$

Bu eşitliğin gerçel bileşeni, yüke aktarılan maksimum aktif gücü verir:

$$P_{max} = |V_{oc}||I_{sc}| Q_s \quad (16)$$

Görüldüğü üzere, sargıdan alınabilecek aktif güç, kalite katsayısına bağlı olarak artabilmektedir. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımının değerleri yerine konulursa, seri kompanzasyonlu devre için maksimum güç ifadesi şu biçimde elde edilir:

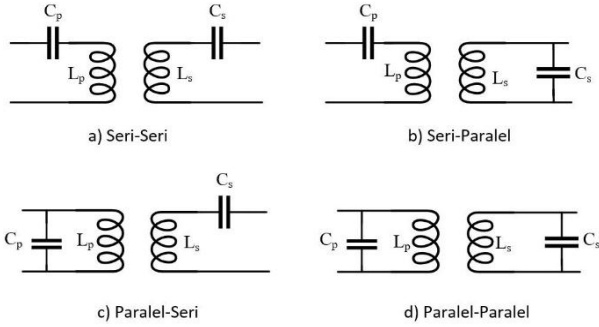
$$P_{max} = \frac{\omega M^2 Q_s I_p^2}{L_s} \quad (17)$$

Hareketsiz bir sistemde  $M$  ve  $L_s$  sabit olduğundan, aktarılan enerjiyi maksimize edebilmek için  $\omega I_p$  değerinin maksimize edilmesi gereklidir. Primer sargısını anma akımında çalıştırmak, sargının en yüksek düzeyde kullanımı anlamına geldiğinden hacim ve maliyeti de düşürecektir.

Sistemin maliyetini ve karmaşıklığını etkileyen diğer bir unsur da çalışılan frekanstır. Belli bir  $I_p$ ,  $M$  ve  $L_s$  değeri için güç aktarım kapasitesi doğrudan frekansa bağımlı olur. Günümüz güç elektroniği sistemlerinde kilowattlar düzeyindeki güçler için çalışma frekansı 10 kHz – 100 kHz aralığındadır. Bu frekans bölgesinde deri olayının ve yakınlık etkisinin dikkate alınması gereklidir. Her bir iletkeninin çapı dalma derinliğinden düşük olan Litz sargılar kullanılarak bu etkiler minimize edilir.

#### 4. Kompanzasyon Yapıları

TGA sistemi endüktif bir yapıdır. Çalışma frekansı da yüksek olduğundan, kaynak tarafındaki güç katsayısı çok düşük olur [18]. Bu durumun neden olduğu verim kaybını engellemek için sargılara seri veya paralel kondansatörler yerleştirilmelidir. Temel kompanzasyon yapıları [18, 19, 20] çalışmalarında incelenmiştir. Bu yapılar Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Temel kompanzasyon yapıları

Kompanzasyon devresi tasarımında ilk olarak sekonderdeki kapasite değeri seçilir. Çalışma frekansı değerinde sekonder sargısının öz endüktansını kompanze edecek bir kapasite değeri kullanılır. Tüm topolojiler için kompanzasyon kapasitesinin değeri şu biçimde hesaplanır:

$$C_S = \frac{1}{\omega_o L_s} \quad (18)$$

Bu eşitlikte  $\omega_o$  sistemin çalışma (rezonans) frekansdır. Benzer olarak primer kapasite değeri de giriş güç katsayısı bir olacak biçimde seçilir. Dört topoloji için yapılan hesaplamalar Tablo 1'de verilmektedir. Tabloda görülen primer ve sekonder kalite katsayıları ( $Q_p$ ,  $Q_s$ ) rezonans frekansında ( $\omega_o$ ) tanımlanmıştır.

Tablo 1. Farklı kompanzasyon topolojileri için primer kapasitesi hesabı

Topoloji	Primer Kapasitansı, $C_p$	Primer Kalite Katsayısı, $Q_p$	Sekonder Kalite Katsayısı, $Q_s$
Seri-Seri	$\frac{L_s C_s}{L_p}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_o M^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Seri-Paralel	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1}{(1-k^2)}$	$\frac{M^2 R_L}{\omega_o L_p L_s^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Paralel-Seri	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$	$\frac{R_L L_p}{\omega_o M^2}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$
Paralel-Paralel	$\frac{L_s C_s}{L_p} \frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2}$	$\frac{\omega_o L_p L_s^2}{M^2 R_L}$	$\frac{\omega_o L_s}{R_L}$

Primer sargısı, giriş güç katsayısını iyileştirmek için, sekonder sargısı da aktarılan gücü yükseltmek için kompanze edilir. Eğer primere yansıyan empedans, primerin öz endüktansının yanında ihmal edilebilir düzeyde ise yalnızca primer sargısını kompanze etmek yeterli olabilir [20].

Tablo 2'de, yükün direnç olması durumunda, kompanze edilmiş, seri kompanze edilmiş ve paralel kompanze edilmiş sekonder sargıları tarafından aktarılabilen maksimum aktif ve reaktif güç değerleri, kalite katsayısına bağlı olarak verilmektedir. Şekilde sargının yükü direnç artı kondansatör olduğu için reaktif gücün işareti eksi olmaktadır. Bu çizelgeden görüldüğü gibi, sargının kompanze edilmesi durumunda güç aktarım kapasitesi  $2Q_s$  katına, anma VA değeri ise  $2Q_s \sqrt{1+Q_s^2}$  katına çıkmaktadır.

Kompanzasyon topolojilerinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Hangi topolojinin kullanılacağı uygulamaya göre kararlaştırılır. Örneğin, batarya şarj uygulamalarında sabit akım ve sabit gerilim gerekli olduğundan, bunu sağlayabilecek topolojinin kullanılması gereklidir. Hareket halindeyken şarj gerektiren uygulamalarda primer sargısı uzun bir hat olarak

döşendiğinden, kaçak reaktans üzerindeki gerilim düşümü yüksektir ve kaynak geriliminin yeterince yüksek olması gereklidir. Bu uygulamalarda seri kompanzasyon daha caziptir. Böylece kaynak geriliminin uygun seviyelere düşürülmesi mümkün olabilmektedir. Sekonderde, yükte sabit bir gerilim sağlayabilmek için seri kompanzasyon, sabit akım sağlayabilmek için ise paralel kompanzasyon gereklidir. Primerde de seri kapasitör ile primer gerilimi düşürülürken, paralel kondansatörle de primer akımının yükseltilmesi sağlanır [18, 21, 22].

Tablo 2. Omik yük için sekonder sargısının maksimum güç aktarım değerleri [17]

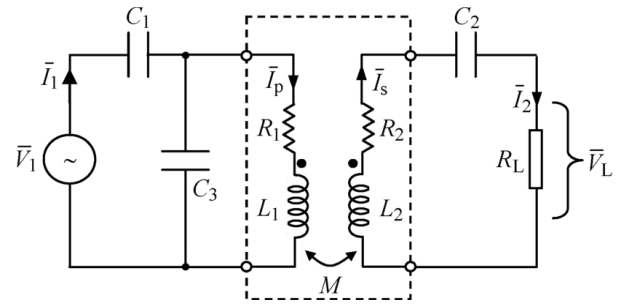
Sargı Parametreleri (Max. Değerler)	Kompanze edilmiş	Seri Kompanzasyon	Paralel Kompanzasyon
VA değeri	$\frac{ V_{oc}  I_{sc} }{2}$	$ V_{oc}  I_{sc} (1 - jQ_s)Q_s$	$ V_{oc}  I_{sc} (1 - jQ_s)Q_s$
Aktif güç	$\frac{ V_{oc}  I_{sc} }{2}$	$ V_{oc}  I_{sc} Q_s$	$ V_{oc}  I_{sc} Q_s$
Reaktif güç	0	$-j V_{oc}  I_{sc} Q_s^2$	$-j V_{oc}  I_{sc} Q_s^2$

Sekonder tarafı rezonans durumundayken primere yansıyan yük:

$$R_{r,ss} = R_{r,ps} = \frac{\omega_o M^2}{R_L} \quad (18)$$

$$R_{r,sp} = R_{r,pp} = \frac{M^2 R_L}{L_s^2} \quad (19)$$

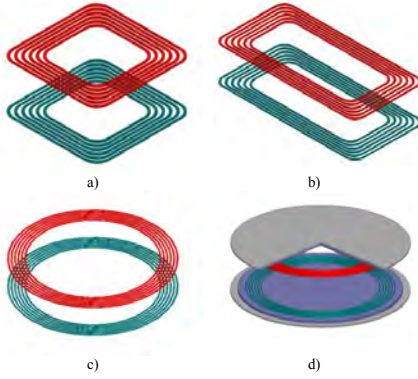
Primer ve sekonder sargı eşmerkezli olarak konumlandırıldığında bağlaşım en yüksek değerini alır. Bunun için bir yaklaşım sistemi oluşturulmalıdır. İdeal konumun yaklaşım sensörü ile sağlanması ise hem zaman kaybına hem de sistemin karmaşık olmasına neden olur. Primer ve sekonder sargıları eş merkezli olmadığında ise bağlaşım katsayısı ciddi oranda azalır. Bağlaşım azaldığında primere yansıyan direnç küçülür. Primer tarafında seri kompanzasyon varsa, giriş gerilim kaynağı olduğundan, bağlaşım düşünce yüke aktarılan güç artar. Primer tarafında paralel kompanzasyon varsa giriş akım kaynağı olmalıdır. Bu nedenle, bağlaşım azaldığında güç düşer. Çıkış gücünü sabit tutmak için farklı kompanzasyon topolojileri de önerilmiştir. Bunlardan bir tanesi de yüksek hizalama toleransı sağlayan SPS topolojisidir (Şekil 10). Geleneksel seri-seri topoloji ile karşılaştırıldığında eş merkezli hizalamada pratik verim %89'dan %92'e çıkartılmıştır. Ayrıca tek bir yönde (X doğrultusu) %25 oranında bir hizalama hatası olsa bile seri-seri topolojiden daha yüksek bir verim elde edilmiştir [23].



Şekil 10. SPS kompanzasyon topolojisi [23]

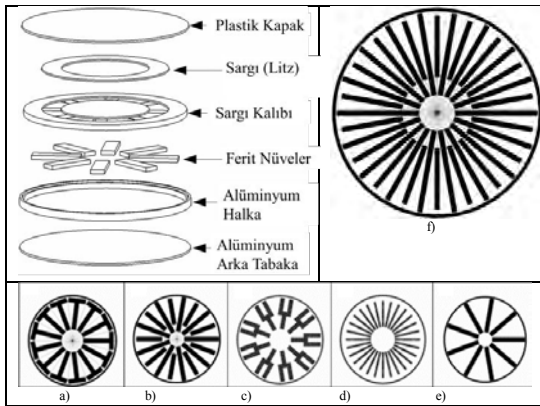
## 5. Sargı Yapıları

Gevşek bağlaşımlı güç aktarımında, sargı tasarımı önemli bir yer tutar. Düşük güçlü uygulamalarda MHz seviyesindeki frekanslar, güç düzeyi arttıkça 10-150 kHz aralığında olur. Bu frekanslarda sargılardaki deri ve yaklaşım etkilerini engellemek için yapılmış litz sargılar kullanılır. Sargı kesiti akım yoğunluğuna ve kompanzasyon yapısında dikkate alınan sargı direncine bağlıdır. Enerji transferinin yapıldığı primer ve sekonder sargı arasındaki mesafe, bağlaşım katsayısı için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle genelde Şekil 11'deki gibi sarmal sargı yapıları kullanılmıştır.



Şekil 11. Sarmal sargılar

Kaçak akıyı azaltmak ve bağlaşımı arttırmak için Şekil 11'deki gibi ferit nüveler ve ekranlayıcı alüminyum kullanılabilir [24]. Sargılar nüvenin içine gömülecek şekilde nüve yapısı da kullanılabilir [25, 26], ancak bu durumda kullanılan nüve miktarı ve maliyet artar. Elektrikli araçların şarjı için kullanılan TGA'da sekonder sargı aracın üzerine yerleştirilir. Bu nedenle sekonderin ağırlığı önem kazanır. Blok bir nüve kullanmak yerine ortak bağlaşımı destekleyen çok sayıda çubuk nüve kullanılarak ağırlık ve kalınlık azaltılabilir [27]. Şekil 12'de dairesel sargı kullanan TGA'da farklı nüve yapıları görülmektedir. En iyi akı yoğunluğu d) ve e) nüve yapısında görülürken, bu yapıların birleşimi ile elde edilen f)deki yapıda eş merkezli olmayan çalıs-malar için tolerans daha yüksektir.

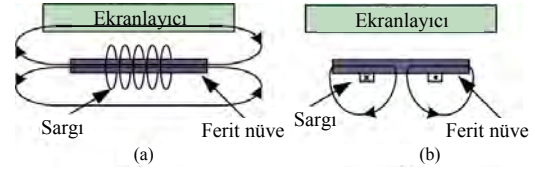


Şekil 12. Dairesel sargı kullanan farklı çubuk nüve yapıları

Sargı akımlarının oluşturduğu manyetik akı yollarına göre sargı yapıları Şekil 13'de görüldüğü gibi, tek taraf ve çift taraf bağlaşımli olarak sınıflandırılır [28]. Çift taraf bağlaşımli, sargının oluşturduğu manyetik akı nüvenin her iki tarafından da dolunur. Bu da kullanılacak faydalı akı miktarını azaltır ve ekranlamayı

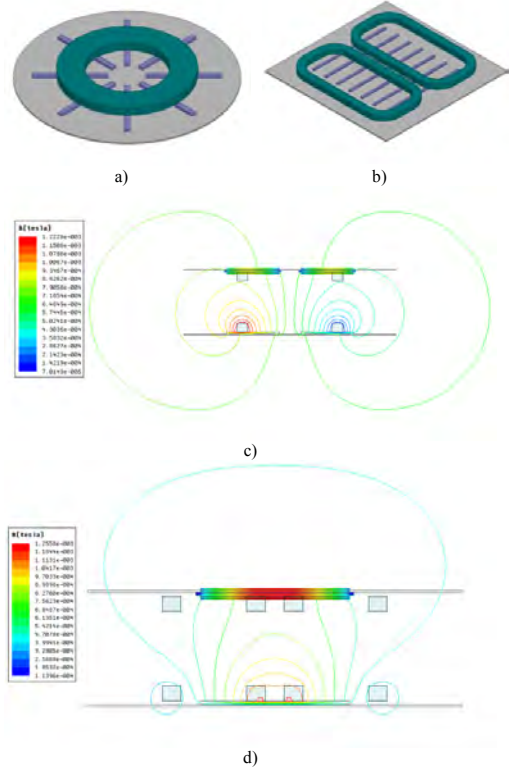
zorunlu kılar. Alüminyum şase de kayıpları %1-2 artırır [28, 29]. Tek taraf bağlaşımli, üretilen akının büyük bir kısmı tek tarafta toplanır. Kullanılacak ekranlayıcı alüminyum sadece kaçak akıları önlemeye yönelik olur.

Geleneksel tek yataklı tek taraftan bağlaşımli sargı yapısında [27], temel akının yüksekliği sargı çapının  $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Şekil 14'teki sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan magnetostatik analiz sonuçlarından görüldüğü gibi bu oran aynı boyutlarda, dikdörtgen şeklinde yan yana yerleştirilmiş iki sargı kullanan çift yataklı tek taraf bağlaşımli sargı yapısında ise (DD)  $\frac{1}{2}$ 'i kadardır [31] Bu da bağlaşımın daha yüksek olması ve daha yüksek güç aktarımı anlamına gelir. Literatürde DD yapısıyla %95.36 verime ulaşılmıştır [32].



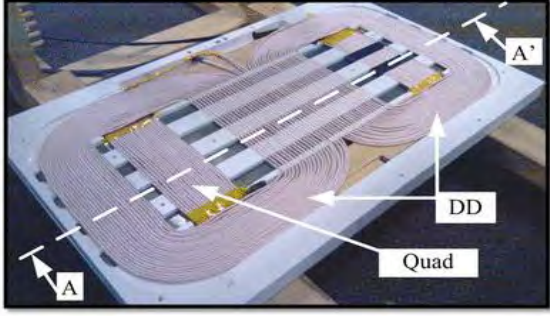
Şekil 13. Çift ve tek taraf bağlaşımli sargı yapıları

Tüm sargı yapılarında en iyi güç aktarım performansı, sargıların eş merkezli olarak konumlanmasında olur. Ancak sargı konumları eş merkezden uzak olsa bile, güç transferi belirli bir toleransla yapılabilir. DD sargı yapısında y eksenini boyunca bu tolerans iyidir ancak x eksenini boyunca bu tolerans zayıftır. Bu sorun, Şekil 15'te görüldüğü gibi, alıcı sargıya ilave bir karesel sargı yerleştirilerek çözülmüştür [31]. [33]'te DDQ yapısında kullanılan sargı miktarını azaltan bir başka tek taraf bağlaşımli sargı yapısı önerilmiştir.



Şekil 14. Tek taraf bağlaşımli sargı yapıları: a) tek yataklı, b) çift yataklı c) tek taraf bağlaşımli sargı için d) çift taraf bağlaşımli sargı için manyetik akı dağılımı



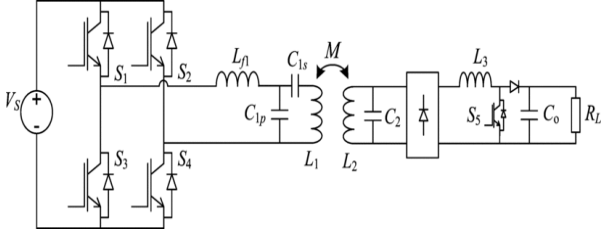


Şekil 15. DDQ sargı yapısı

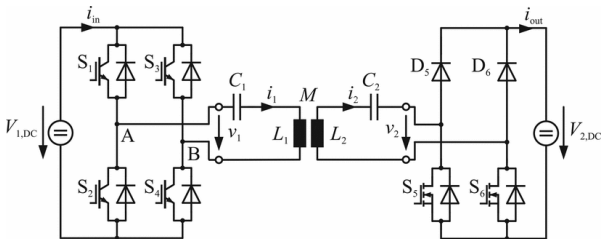
## 6. Güç Dönüştürücüler

TGA sistemlerinde primer taraftaki güç dönüştürücüsünün görevi, primer sargısında yüksek frekanslı akım üretmektir. Sekonderdeki dönüştürücü doğrultma amacıyla kullanılır. Evirici devre tarafından üretilen kare dalga gerilim kompanzasyon devresine uygulanır. TGA sistemleri yüksek frekanslarda çalıştığından, anahtarlama kayıplarını düşürmek için yumuşak anahtarlama tekniklerinden yararlanılabilir. Bu nedenle rezonanslı dönüştürücülerin kullanılması önerilmektedir. Güç kaynağı sabit veya değişken frekanslı olabilir [34].

Literatür incelendiğinde kullanılan dönüştürücü yapılarının ağırlıklı olarak Şekil 16'da gösterilen klasik yapı olduğu görülmektedir. Yaygın olarak kullanılmakta olan bir başka yapı da hem primerde hem de sekonderde denetime izin veren dönüştürücü devrelerdir [35]. Sekonderdeki doğrultucuda kullanılan iki anahtar, ikinci bir dönüştürücüye gerek duyulmadan güç akışının denetlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 16. TGA sisteminde kullanılan klasik güç dönüştürücü yapısı [28]



Şekil 17. Her iki yanda da denetime izin veren dönüştürücü yapısı [35]

## 7. Denetim

Seri-seri kompanzasyon topolojisinde primer kapasitansı ortak endüktans değerinden bağımsızdır. Dolayısıyla primere sekonderden gelen bir VAR yüklemesi yoktur. Bu durumda girişte sabit frekanslı bir kaynak kullanıp eviricinin çıkış gerilimi, geniş

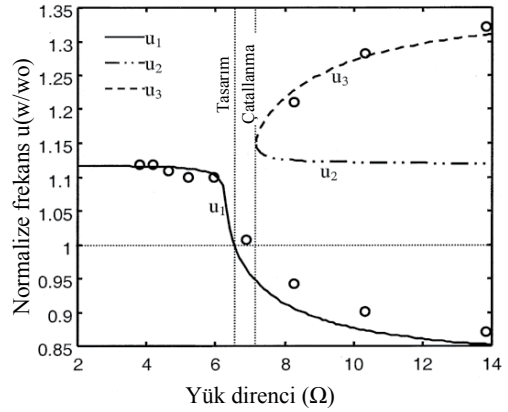
bir aralıkta yük akımını sabit tutacak biçimde değiştirilebilir [34]. Sabit frekanslı denetim daha basit ve kolay uygulanabilir. Ancak sıcaklıklardaki değişimden dolayı kapasitans değeri değişebilir. Bu durumda sistem rezonans frekansında çalışmayabilir. Bu da güç aktarım kapasitesini olumsuz etkiler.

Diğer üç topolojide primer kapasitans değeri ortak endüktansa ve yük direncine bağlıdır. Yük veya primer ve sekonder sargılarının birbirine göre konumu değiştiğinde ayardan sapma olur ve aktarılan güçte ciddi miktarda düşme olur. Bu nedenle bu uygulamalarda, ortak endüktanstaki değişimin algılanarak kaynak frekansının uygun biçimde değiştirilebilmesi istenir [10, 34]. Böylece sistemin her zaman birim güç katsayısı ile çalışması sağlanır.

Ancak analiz yapıldığında görülmektedir ki, bu durumda TGA sisteminin faz farkının sıfır olduğu en azından üç tane frekans değeri hesaplanabilmekte birlikte bunların yalnızca bir tanesi rezonans frekansıdır. Bu olgu çatallanma olarak adlandırılır [10, 18, 20, 34]. Değişken frekanslı denetleyici çatallanma bölgesindeki belirsizlikle baş edemezse güç kaynağının frekansı kayabilir ve kararsız bir çalışma durumu söz konusu olabilir. Bu durumda güç aktarımı ciddi biçimde düşer. Çatallanma durumu Şekil 18'de gösterilmektedir.

Çatallanma olgusu ile karşılaşmamak için primer tarafın kalite katsayısının sekonderin kalite katsayısından büyük olması istenir ( $Q_p > Q_s$ ).

Aktarılan gücü kontrol etmek için primer tarafında, sekonder tarafında veya her iki tarafta birden kontrol devresi kullanılabilir. Primer tarafında, frekans, doluluk oranı (duty cycle) veya iki kol arasındaki faz farkı değiştirilerek kontrol yapılabilir.



Şekil 18. Çatallanma olgusu [20]

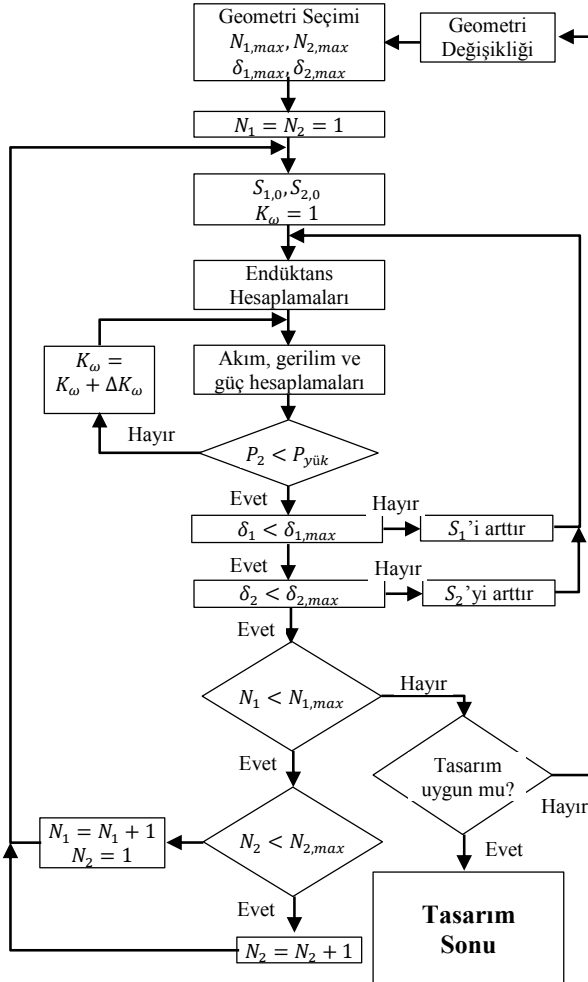
## 8. Sistem Tasarımı

TGA sistem tasarımı henüz standartlaşmış bir yöntemeye dayanmamaktadır. Primer ve sekonder rezonans devrelerinin etkileşiminden kaynaklanan karmaşıklık nedeniyle tasarım için deneyim ve deneysel doğrulama gereklidir.

Tasarım yöntemi için yapılan ilk önerilerden biri sistemin rezonans frekansında çalıştığı varsayımına dayanmaktadır [11]. Bu yöntemde yinelemeli bir süreç sonunda, belli bir çıkış gücü için hem sistemden elektromanyetik yapısı hem de primer akımının değeri belirlenebilmektedir.

TGA sistem tasarımı için literatürde önerilen ve başarılı olduğu düşünülen yöntemlerden biri [12]'de önerilmektedir. Yöntemin akış diyagramı Şekil 19'da verilmektedir.

Önerilen yöntemin başlangıcında bir geometri seçimi yapılır. Öncelikle sargı yapısının dikdörtgen şekilli mi yoksa dairesel yapı mı olduğu belirlenir. Primer ve sekonder sargıları için maksimum sarım sayısı ve kullanılacak iletkenler için maksimum akım yoğunluğu değerleri seçilir. Sargıların başlangıçta tek sarımlı olduğu varsayılarak işlem döngüsü başlatılır. İlk döngüde sargı kesiti için bir başlangıç değeri belirlenir ve frekans çarpanı değeri ( $K_\omega$ ) bir olarak alınır. Bu başlangıç değerleri sargı yapısı için geçerli öz endüktans ve ortak endüktans bağıntılarında kullanılır. Endüktans değerleri yardımıyla, seçilen kompozasyon topolojisi için geçerli bağıntılar kullanarak kondansatörlerin değerleri, sargı empedansları, akımlar, gerilimler ve güçler hesaplanır. Bu aşamada, sistemin rezonans frekansından olup olmadığı hesaplanan çıkış gücüne bakılarak kararlaştırılır.



Şekil 19. TGA sistem tasarımı için önerilen bir yöntemle ilişkin akış diyagramı [12]

Eğer frekans yeterince yüksek değilse, çıkış gücü yüksek olacaktır. Hesaplanan güç hedeflenenin üzerinde ise çalışma frekansı küçük adımlarla artırılır ve hesaplamalar bu frekans için yeniden yapılır. Bu döngünün sonunda hedef güç değerine inil-

diğinde, sargılar için belirlenen kesitlerin uygun olup olmadığı, akım yoğunluklarına bakılarak kararlaştırılır. Hesaplanan akım yoğunluğu yüksekse, sargı kesiti artırılarak endüktanslar ve güçler yeniden hesaplanır. Akım yoğunlukları uygun sınırlar içindeyse sarım sayılarının, belirlenen üst değerlere ulaşip ulaşmadığı kontrol edilir. Ulaşılmadıysa sarım sayıları birer birer artırılarak işlemler yinelenir. Birinci sargı için belirlenen üst sınıra ulaşıldığında bulunan çözüm kümesinin uygun bir çözüm kümesi olup olmadığına bakılır. Uygun bir çözüm kümesi, hem güç değeri, hem bataryaya uygulanacak gerilimi, hem akım yoğunluklarını hem de kararlı bir çalışma için gerekli kalite katsayısı koşulunu ( $Q_p > Q_c$ ) sağlayan çözümdür. Ancak bu tasarım sürecinin sonunda bulunan değerlerin, deneysel çalışma sırasında bir miktar değiştirilmesi söz konusu olabilir.

## 9. İnsan Sağlığına Etkiler

TGA sistemlerinin insan sağlığı üzerine olumsuz etki yapmaması için önlem almak gereklidir. Sargılar arasındaki hava aralığının büyük olmasından dolayı manyetik alanın çevreye saçılması söz konusu olduğundan saçılmayı sınırlayacak önlemler alınmalıdır. Sargıların bir çekirdek üzerine sarılması saçılmayı azaltacaktır. Ayrıca sargı altlarına yerleştirecek ekranlayıcı malzemeler sistem verimini bir miktar düşürseler de saçılan manyetik alanın sınırlandırmasına yardımcı olurlar.

Elektromanyetik dalgaların insan sağlığına olan etkileri ile ilgili bazı uluslararası standartlar mevcuttur.

1. IEEE. Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz. (Radyo Frekanslı Elektromanyetik Alanlara İnsanları Maruziyetine İlişkin Güvenlik Sınırları)
2. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz) (Zamanla Değişen Elektrik, Manyetik ve Elektromanyetik Alanlara Maruziyetin Sınırlanmasına İlişkin Kılavuz).
3. World Health Organization (WHO) Electromagnetic fields (300Hz to 300GHz) (Elektromanyetik Alanlar)

Her üç standartta da elektromanyetik alanın kansere sebep olduğu ile ilgili yeterli ve güçlü kanıtların olmadığı belirtilmektedir. Çok ciddi olmamakla birlikte uzun süreli maruz kalınması durumunda karşılaşılabilecek muhtemel problemler şunlardır:

- Dokularda yanma
- Sinir sistemi bozuklukları
- Kas kasılmaları
- Gözde (retina kısmında) bozukluklar.

100kHz üzeri için her üç standardın da özgül soğurma oranı (specific absorption rate-SAR) tanımı geliştirdiği görülmektedir. Bir insan, 30 dakika boyunca 1-4 W/kg seviyesinde elektromanyetik alana maruz kalırsa vücut sıcaklığı 1°C artmaktadır.

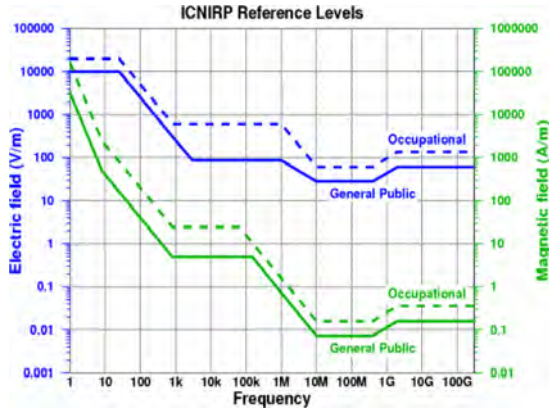
Şekil 20'de, ICNORP tarafından belirlenen sınırlar verilmektedir. Kesikli çizgiler işi gereği bu alanlara maruz kalan kişilere (örneğin sürücüler) ilişkin sınırlamaları, kalın çizgiler ise genelle yönelik (yolcular) sınırlamaları göstermektedir.

TGA sistemlerinde insanların maruz kalabilecekleri alan değerleri ile ilgili ayrıntılı bir çalışma [4]'te verilmektedir.

## 10. Yabancı Nesne Algılama, Canlı Nesne Algılama ve Hizalama Konuları

TGA sistemleri ile ilgili önemli bir husus da yabancı ve canlı nesnelerin algılanmasıdır.

Güç aktarımı sırasında bobinler arasında girebilecek  $2.5 \text{ cm}^2$ 'den büyük, iletkenliği yüksek olan metal nesnelere aşırı ısınmadan dolayı yangına yol açabilir. Yabancı nesne algılayıcı özelliği, 2 saniyeden fazla sürede böyle bir nesnenin tespit edilmediği durumda, güç aktarımının durdurulmasını sağlar.



Şekil 20. ICNIRP tarafından tanımlanan sınırlamalar [4]

Araç ile yol arasındaki boşluğa girebilecek bir canlı (örneğin bir kedi), araç bataryasının şarjı sırasında uzun süre manyetik alana maruz kalabilir ve bu alan bu canlının sağlığını olumsuz yönde etkileyebilir. Güç aktarımı sırasında bobinler arasında minimum insan eli/ayağı kadar küçük yapılar veya bu boyutlara sahip bir hayvanın girdiğinin ve 2 saniyeden daha fazla sürede kaldığının algılanması durumunda canlı nesne algılayıcı özelliği sayesinde güç aktarımı durdurulur.

Her iki özellik için de enerji transfer verimini azaltmayacak şekilde çeşitli sensör teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Kapasitif algılayıcılar, havayı dielektrik olarak kabul eden bir RC osilatörü vasıtasıyla kapasitif alan oluşturur. Bu kapasitif alanın içine giren metal veya metal olmayan cisimler, dielektrik seviyesinin değişimine sebep olur. Salınım frekansının değişimi sonucu algılama yapılır.

Dielektrik seviyesi (kapasite) değişikliğini etkileyen faktörler şunlardır:

1. Algılama yüzeyi önündeki cismin uzaklığı ve konumu
2. Cismin boyutları ve şekli
3. Cismin dielektrik katsayısı

Kapasitif sensör teknolojisi, yerel sinyal işleme ve gerçek zamanlı canlı nesne yakınlık tespiti ile entegre halde çalışmaktadır.

Canlı nesne algılayıcı sisteminin hatalı uyarı yapmaması gerekmektedir. Dielektrik seviyesi düşük olan tahta, kağıt veya plastik malzemelerin tespit edilmesi durumunda sistem enerji akışı durdurulmamalıdır.

Yabancı nesne algılayıcılar (YNA) genellikle primer sargıya entegre edilir. İki boyutlu yüksek hassasiyetli manyetik alan sensörleri ve yerel sinyal işleme ve kontrol devreleriyle birlikte sürekli olarak bobinler arasındaki manyetik alanı monitör ederler.

Belirli bir boyut ve iletkenliğe sahip metal parçanın primer sargı üzerine gelmesi durumunda oluşacak girdap akımı manyetik alanda bozulmaya sebep verecek ve bu bozulmalar YNA tarafından tespit edilecektir. Eğer tespit edilen metal nesne tehlike boyutlarında ise sistem enerji akışı durdurulmalıdır. Gerekirse kullanıcıya bu hata durumundan dolayı uyarı verilmelidir. Bu özellik için, enerji transferinin yapıldığı alana yoğunlaşılır. Diğer alanlarda yer alabilecek yabancı nesnelere yanlış alarm sebebiyet vermemelidir.

Batarya şarjı sırasında iki sargının birbirine aynı hızda olması manyetik bağlaşımın olası en iyi değerinde olması için önemlidir. Bu nedenle hizalamayı sağlayacak geribeslemeli bir denetim sistemi oluşturmak gerekmektedir. Bunun yanında, hızının tam olarak sağlanamaması durumunda da akı bağlaşımının göreceli olarak iyi olmasını sağlayabilecek sargı yapıları üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. 5. Bölüm'de anlatılan DDQ yapısı buna bir örnektir.

## 11. Ticari Uygulamalar

TGA sistemleri üzerinde dünyanın pek çok yerinde çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların sonucunda bazı ticari ürünler elde edilmiştir. Tablo 3'te bu ürünlere ilişkin temel bilgiler verilmektedir.

Tablo 3. Ticarileşmiş Uygulama Örnekleri (BY: Bilgi Yok)

Firma İsmi (Faaliyet yılı/yeri)	Frekans (kHz)	Güç (kW)	Hava Aralığı (cm)	Verim (%)
WITRICITY	85	3.3	10-20	90
QUALCOMM	85	3.3-6.6-7-20	13-18	80-9
EVATRAN	19.5	3.3	10	89
BOMBARDIE R-PRIMOVE	BY	22-200	BY	BY
CONDUCTIX-WAMPFLER	20	60-180	4	>90
MOMENTUM DYNAMICS	BY	3.3-10	61	92
FRAUNHOFER IWES	BY	0.4-3.6	20	93-95
FRAUNHOFER RISE	100	22	13	97.4
BRUSA	81.38 - 90	3.7	13	90
Fast In Charge Projesi	13 - 25	35	9	92

## 12. Üniversitelerde Yapılan Çalışmalar

Auckland Üniversitesinde 1991 yılında 10 kHz çalışma frekansına sahip ve elektrikli araçlar, elektrikli el aletleri gibi birçok alanda kullanılacak yeni bir TGA sistemi geliştirilmiş ve patenti alınmıştır [36]. Bu çalışma ile TGA yeni bir araştırma alanı olarak görülmüş ve özellikle MIT'de bir grup araştırmacının 2007 yılında gerçekleştirmiş olduğu TGA projesinin ardından üniversitelerde bu alana olan ilgi artmış ve yeni fikirler ışığında projeler geliştirilmiştir. Özellikle çalışma frekansının belirlenmesi ve geniş hava aralıklarında daha yüksek verim elde edilmesi bu projelerdeki önemli çalışma alanlarını oluşturmaktadır. Tablo 4'te bugüne kadar üniversitelerde yapılan bazı önemli projelerdeki TGA sistemlerin ayrıntılarına ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 4. Üniversitelerde Yapılmış Çalışma Örnekleri (BY: Bilgi Yok)

Üniversite İsmi	Frekansı (kHz)	Güç (kW)	Hava Aralığı (cm)	Verim (%)
KAIST (Kore İleri teknoloji ve Bilim Enstitüsü) [37]	20	3-52	1-20	71-83
Cheng Kung Üniversitesi [38]	25-35	1	0.04	88
UTAH Üniversitesi [39]	BY	25-50	15	>90
ORNL (Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı) [40]	BY	>4	25.4	92
Auckland Üniversitesi [41]	BY	1.5	4	BY
Setunan Üniversitesi [42]	$1.2 \cdot 10^6 - 2.45 \cdot 10^6$	BY	5-25	20-98
Tokohu Üniversitesi [43]	360	15-18	0-200	75
UTAH Üniversitesi [44]	BY	5	BY	90-97
Tokyo Üniversitesi [45,46,47]	$13.56 \cdot 10^6$	60	5-200	40-90
Saitama Üniversitesi [48]	30	1.5-3	7	94
Britanya Kolombiya Üniversitesi [49]	$150 \cdot 10^{-3}$	1.6	15	81
Zaragoza Üniversitesi [50]	15	5	20	95

Ülkemizde de son dönemlerde bu alana ilgi artmış olup, küçük-büyük bazı sanayi kuruluşlarının Ar-Ge çalışması başlattığı bilinmektedir. Ayrıca, üniversitelerimizde yüksek lisans düzeyinde bazı çalışmalar yapılmaktadır. Sonuçlandırılmış tez çalışmalarına bazı örnekler [51, 52, 53]'te bulunabilir.

### 13. Sonuç

Fosil yakıtların tükenmeye yüz tutmaları ve çevreye verdiği zararlar nedeniyle elektrikli araçlar önemli bir seçenek olarak tartışılmaktadır. Elektrikli araçların bataryalarının hızlı ve etkin doldurulması, bu araçların yaygınlaşmasının önündeki engellerden biridir. Temelleri 1800'lü yılların sonlarında Tesla tarafından kurulan temassız güç aktarım sistemleri, bu engeli aşmaya yönelik olarak yeniden araştırmacıların gündemine girmiştir. Bu makalede, TGA sistemleri hakkında genel bilgiler verilmektedir. Bir literatür incelemesi olarak hazırlanan bu makalenin, konuya ilgi duyan mühendisler ve öğretim elemanları için yararlı olacağı düşünülmektedir.

### 14. Kaynaklar

- [1] W. W. Massie and C. R. Underhill, "The future of the wireless art," *Wireless Telegraphy Telephony*, pp. 67-71, 1908.
- [2] J. Garnica, R. A. Chinga and J. Lin, "Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321-1331, June 2013.
- [3] Wheeler L. P., "II — Tesla's contribution to high frequency," in *Electrical Engineering*, vol. 62, no. 8, pp. 355-357, Aug. 1943.

[4] Hui S. Y. R., Zhong W. Ve Lee C. K., "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sept. 2014.

[5] Secor, H. W., "Tesla Apparatus and Experiments—How to Build Both Large and Small Tesla and Oudin Coils and How to Carry On Spectacular Experiments With Them," *Practical Electrics*, November 1921.

[6] Brown W. C., "Experiments Involving a Microwave Beam to Power and Position a Helicopter," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-5, no. 5, pp. 692-702, Sept. 1969.

[7] A.B. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.H. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, 317, pp. 83-86, (2007).

[8] Shinohara N., Niwa N., Takagi K., Hamamoto K., Ujigawa S., Ao J-P., et al. "Microwave building as an application of wireless power transfer". *Wireless Power Transfer Cambridge Journals*, 2014;1:1-9.

[9] Chen W., Chinga R. A., Yoshida S., Lin J., Chen C. and Lo W., "A 25.6 W 13.56 MHz wireless power transfer system with a 94% efficiency GaN Class-E power amplifier," *Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2012 IEEE MTT-S International, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3.

[10] Chwei-Sen Wang; Stielau, O.H.; Covic, G.A., "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.52, no.5, pp.1308,1314, Oct. 2005.

[11] Stielau, O.H.; Covic, G.A., "Design of loosely coupled inductive power transfer systems," *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*, vol.1, no., pp.85-90 vol.1, 2000.

[12] Sallan J., Villa J. L., Llombart A., ve Sanz J. F., "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge," in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149, June 2009.

[13] Kissin, M.L.G.; Boys, J.T.; Covic, G.A., "Interphase Mutual Inductance in Polyphase Inductive Power Transfer Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.56, no.7, pp.2393,2400, July 2009

[14] Pedder D. A. G., Brown A. D. Ve Skinner J. A., "A contactless electrical energy transmission system," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp. 23-30, Feb 1999.

[15] Boys J. T., Covic G. A. ve Green A. W., "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," in *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 147, no. 1, pp. 37-43, Jan 2000.

[16] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/cables-no-longer-needed>.

[17] Aditya K. ve Williamson S. S., "Design considerations for loosely coupled inductive power transfer (IPT) system for electric vehicle battery charging-A comprehensive review," *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2014 IEEE, Dearborn, MI, 2014, pp. 1-6.

[18] Chopra S., Bauer P., "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *proc. IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference*, Oct. 2011, pp.1-6.

[19] Wang C.S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "General stability criteria for zero phase angle controlled loosely coupled inductive power transfer systems," in *Proc. IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society*, Denver, CO, vol. 2, Nov. 2001, pp. 1049-1054.



- [20] Wang C. S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb. 2004.
- [21] Ho, T.C.Y.; Gomersall, B.; Li Ran, "Contactless charging for electric vehicles with a large air gap," *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, vol., no., pp.1,10, Aug. 30 2011-Sept. 1 2011.
- [22] Wang C. S., Stielau O. H., Covic G. A., "Load models and their application in the design of loosely coupled Inductive power transfer systems," in *proc. IEEE international conference on power system technology*, 2000, pp. 1053-1058.
- [23] Villa J. L., Sallan J., Sanz Osorio J. F. ve Llombart A., "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 945-951, Feb. 2012.
- [24] Valtchev S., Borges B., Brandisky K. ve Klaassens J. B., "Resonant Contactless Energy Transfer With Improved Efficiency," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 685-699, March 2009.
- [25] Sakamoto H., Harada K., Washimiya S., Takehara K., Matsuo Y. ve Nakao F., "Large air-gap coupler for inductive charger [for electric vehicles]," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 3526-3528, Sep 1999.
- [26] Kim J. ve arkadaşları., "Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1332-1342, June 2013.
- [27] Budhia M., Covic G. A. ve Boys J. T., "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, Nov. 2011.
- [28] Li S. ve Mi C. C., "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, March 2015.
- [29] Nagatsuka Y., Ehara N., Kaneko Y., Abe S. ve Yasuda T., "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, Sapporo, 2010, pp. 807-813.
- [30] Budhia M., Covic G. ve Boys J., "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, 2010, pp. 2487-2492.
- [31] Budhia M., Boys J. T., Covic G. A. ve Huang C. Y., "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013.
- [32] Zaheer A., Kacprzak D. ve Covic G. A., "A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, 2012, pp. 283-290.
- [33] Deng J., Li W., Nguyen T. D., Li S. ve Mi C. C., "Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6130-6140, Nov. 2015.
- [34] Covic G. A. ve Boys J. T., "Inductive power transfer," in *Proc. of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1-14, June 2013.
- [35] Diekhans, T.; De Doncker, R.W. "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 6320-6328 Volume: 30, Issue: 11, Nov. 2015.
- [36] John T. Boys ve Andrew W. Green, "Inductive power distribution system" U.S. Patent US5293308, 1991. H. Jin ve C. T. Rim, "KAIST wireless electric vehicles-OLEV," *SAE International*, vol. 1, pp. 1-10, 2011.
- [37] J. Lee, H. Shen ve C. Li, "Three-phase inductive coupled structures for contactless PHEV charging system", *International Journal of Electronics*, 2015.
- [38] M. Kesler ve P. Foy. "Utah to deploy electric bus that needs no plug", 2011.
- [39] M. B. Scudiere ve J. M. Miller, "Wireless Charging System for Electric Vehicles", 2011.
- [40] U. K. Madawala ve D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 4789-4796, 2011.
- [41] T. Horiuchi ve K. Kawashima, "Study on Planar Antennas for Wireless Power Transmission of Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 130, pp. 1371-1377, 2010.
- [42] F. Sato, J. Morita, T. Takura, T. Sato, ve H. Matsuki, "Research on Highly Efficient Contactless Power Station System using Meander Coil for Moving Electric Vehicle Model," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 36, pp. 249-252, 2012.
- [43] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, ve D. Bronson, "A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics* vol. 8, pp. 585-595, 2012.
- [44] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, ve M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, p. 83, 2007.
- [45] T. Imura, H. Okabe, ve Y. Hori, "Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for Electric Vehicles by using magnetic resonant couplings," presented at the *IEEE Vehicle Power & Propulsion Conference*, 2009.
- [46] T. Beh, M. Kato, T. Imura, ve Y. Hori, "Wireless power transfer system via magnetic resonant coupling at fixed resonance frequency. Power transfer system based on impedance matching," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 744-753, 2012.
- [47] M. Chigira, Y. Nagatsuka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, ve A. Suzuki, "Smallsize light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 260-266.
- [48] W. Li, "High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnetic coupling " *Master of Applied Science, The Faculty of Graduate Studies The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada*, 2007.
- [49] J. L. Villa, A. Llombart, J. F. Sanz and J. Sallan, "Practical Development of a 5 kW ICPT System SS Compensated with a Large Air gap," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, 2007*, pp. 1219-1223.
- [50] Uzun G., "Kablosuz Enerji Transferi", Y. Lisans Tezi, 19 Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2012.
- [51] Fincan B., "Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı", Y. Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
- [52] Ağçal, A., "Kablosuz Enerji Transferinde Farklı Hava Aralıkları Ve Karakteristik Empedanslara Göre Verim Analizi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2014.



### Ali Pashaei

1989 yılında Tebriz’de doğan Ali Pashaei, Lisans eğitimini 2012 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden Tebriz Azad Üniversitesi’nde tamamladı. 2014 yılında Yüksek Lisans derecesini Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümü’nde tamamlayarak aynı yıl Doktora eğitimine Gazi Üniversitesi’nde başlamıştır ve halen devam etmektedir. Güç elektroniği ve temassız güç aktarım sistemlerinde çalışmalarını devam ettirmektedir. Akademik kariyeri boyunca çeşitli San-Tez ve Tübitak projelerinde araştırmacı olarak görev yapmıştır. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında güç elektroniği, temassız güç aktarım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrik makineleri yer almaktadır.



### Emrullah Aydın

1986 yılında Elazığ’da doğan Emrullah Aydın, lisans eğitimini 2009 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine Gazi Üniversitesi’nde başlamıştır ve halen devam etmektedir. Elektrik makineleri ve temassız güç aktarım sistemlerinde çalışmalarını devam ettirmektedir. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında elektrik makineleri, temassız güç aktarım sistemleri, yenilenebilir enerji kaynakları ve güç elektroniği yer almaktadır.



### Mehmet Polat

ASELSAN A.Ş. Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı’nda (UGES) Ulaşım ve Enerji Sistemleri Sistem Mühendisi olarak görev yapmakta olan Mehmet Polat, lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi; yüksek lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde sırasıyla 2009 ve 2012 yıllarında tamamladı. Polat, 2009 yılından itibaren savunma projelerinde güç ve kontrol sistemleri alanında geliştirici olarak görev almıştır. 2014 yılında ASELSAN bünyesinde UGES Sektör Başkanlığı’nın kurulması ile birlikte ulaşım ve enerji alanlarında sistem mühendisliği yapmaya başlayan Polat, halen raylı araç, elektrikli araç, akıllı şebekeler ve yenilenebilir enerji projelerinde sistem mühendisliği faaliyetlerinde aktif olarak görev yapmaktadır.



### Emin Yıldırım

1981 Edirne doğumlu olan Emin Yıldırım, lisans eğitimini 2004 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi’nde aldı. 2005 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksekokulu’nda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2008 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve 2014 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü elektrik makineleri bilim dalından doktora derecesi aldı. 2015 yılından beri Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanlarından bazıları; düşük ve yüksek frekanslı elektromanyetik uygulamalar, sürekli mıknatıslı senkron makine tasarımı, analizi ve optimizasyonu, rüzgar türbinlerine yönelik sıradışı melez uyartımlı senkron makine tasarımıdır.



### M. Timur Aydemir

M. Timur Aydemir, 1962 Trabzon-Maçka doğumludur. Lisans ve yüksek lisans derecelerini 1983 ve 1985 yıllarında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden, doktora derecesini ise 1995 yılında University of Wisconsin-Madison, Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden almıştır. 1995 yılından beri Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde çalışmaktadır. Güç Elektroniği alanında çalışmalar yapmaktadır.

# Rüzgar Türbinleri İçin Topraklama Ağı Tasarımı

## Grounding Grid Design for Wind Turbines

Aytuğ Font<sup>1</sup>, Özcan Kalenderli<sup>1</sup>, Semih Günden<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

font@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr, semih.gunden@gmail.com

### Özet

*Bu çalışmada, CYMGRD yazılımı kullanılarak rüzgar türbini çiftlikleri için yapılan üç boyutlu topraklama ağı tasarımı açıklanmıştır. Yapılan tasarımın Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği ve IEEE 80-2000 standardına uygun olmasına dikkat edilmiştir. Topraklama ağı tasarımı yapılmadan önce farklı toprak modellerinin analizlere olan etkileri ortaya konmuştur. Daha sonra temel analizler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen toprak öz direnç değeri kullanılarak ilk önce tek bir türbin için iki farklı topraklama tasarımı yapılmıştır. Tekil sistem için uygun tasarım belirlendikten sonra bu tasarım, çok sayıda rüzgar türbininden oluşan bir rüzgar çiftliğine uygulanmış, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmıştır. Yapılan dört farklı tasarım karşılaştırılmış ve topraklama sistemindeki türbin sayısının topraklamaya olan etkisi incelenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Rüzgar türbini, Rüzgar türbini çiftliği, Topraklama, Topraklama direnci, CYMGRD

### Abstract

*In this study, 3-D grounding system design for wind turbine farms using computer program CYMGRD was presented. The Guide for Grounding of Electrical Power Systems and IEEE 80-2000 standard were considered during the design. Before the system design, pre simulations for different soil models were done in order to see the effect of soil model on the grounding system. Then main analysis were done firstly, two different designs were done for single wind turbine using the soil resistivity values obtained by experimental methods. The optimum design selected from the single wind turbine grounding system simulations were used to form combined grounding system for wind turbine farms and grounding resistance, step and touch voltages were calculated. Four different grounding designs were compared and the effect of turbine number on grounding quality was investigated.*

**Keywords:** Wind turbine, Wind turbine farm, Grounding, Grounding resistance, CYMGRD

### 1. Giriş

Artan dünya nüfusuyla birlikte elektrik enerjisi ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından da yararlanılmaktadır. Genellikle yüksek ve açık yerlere kurulan rüzgar türbin-

leri ve çiftliklerinin sayısı giderek artmaktadır. Yüksek yerlere kurulan rüzgar türbinlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri yıldırım çarpma riskidir. Rüzgar türbinlerine isabet eden yıldırım akımları kanatlar, rotor ve türbin kulesi üzerinden toprağa akmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arıza veya yıldırım darbesi sonucu oluşan tehlikeli gerilimlerin türbin bileşenleri ve canlılara zarar vermesini engellemek amacıyla topraklama sistemi tasarımları yapılır [1, 2].

Canlıları ve elektriksel donanımları tehlikeli gerilimlerden korumak için yapılan topraklama, elektriksel bakımdan iletken bir parçayı bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlamaktır. Başka bir deyişle, işletme için de topraklama yapılmakla birlikte, topraklama, elektrikli işletme araçlarının (generatör, transformator, motor, direk, vb.) normal işletmede gerilim altında olmayan metal kısımlarının bir iletkenle toprakla birleştirilmesidir [1]. Topraklamanın amacı, bir hata durumunda oluşacak adım ve dokunma gerilimlerinin insan hayatını tehlikeye sokacak mertebeğe ulaşmasını engellemektir.

Topraklama sistemi analizinde, topraklama direnci, adım ve dokunma gerilimlerinin hesabı öncelikli amaçtır. Ulusal topraklama yönetmeliği [3] ve IEEE 80-2000 standardına [4] göre topraklama tasarımında aranan koşullardan ikisi adım ve dokunma gerilimlerinin izin verilen değerlerden küçük olmasıdır. Topraklama direnci de yine standart ve yönetmeliklerde belirtilen değerlerden küçük olmalıdır. Böylece arıza akımı kolayca zararsız ve etkisiz kılınabilmelidir.

Topraklama sistemi tasarlanırken kullanılan deneyime dayalı (amprik) formüller doğruluk açısından yetersiz kalmaktadır. Günümüzde kullanılan kompleks yapıllı topraklama sistemlerinde bu yetersizlikleri gidermek için bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır [5-7]. Kullanılan bilgisayar yazılımları sayesinde gerçeğe uygun iki ve üç boyutlu modeller üzerinde çalışabilmektedir [8].

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan CYMGRD adlı topraklama hesaplama yazılımı kullanılmıştır [9]. Farklı öz direnç ve kalınlığa sahip tabakalı toprak modellerinde uygun toprak tabakası öz direnç ve kalınlıkları belirlenmiştir. Farklı geometrik şekilli topraklama sistemi tasarlanarak CYMGRD yazılımında topraklama dirençleri, toprak potansiyel yükselmesi, adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmıştır. Son olarak rüzgar türbinlerinin topraklama ağları birbirlerine bağlanarak rüzgar çiftliklerinin adım ve dokunma gerilimleri incelenmiştir.

## 2. Topraklama Hesabı

Şerit ve çubuk topraklayıcıların bir arada kullanıldığı topraklama sistemlerinde, topraklayıcıların gömülme derinliğine bağlı yayılma dirençleri Laurent formülü ile hesaplanmamaktadır. Bu tür durumlarda topraklama hesabı için Sverak ve Schwarz yöntemleri kullanılır.

Sverak yönteminde bir topraklama ağının yayılma direnci, şerit ve çubuk topraklama elektrotlarının bir arada düşünüldüğü denklem (1) ile hesaplanır.

$$R = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (1)$$

Bu denklemde,  $\rho$  toprağın öz direnci ( $\Omega.m$ ),  $L$  toprak altına gömülmüş çubuk ve şerit iletkenlerin toplam uzunluğu (m),  $A$  topraklama ağının kapladığı alan ( $m^2$ ) ve  $h$  iletken ağın gömüldüğü derinliktir (m).

Schwarz yönteminde ise çubuk ve şerit topraklayıcıların yayılma dirençleri ayrı ayrı hesaplanır. Ağın toplam yayılma direnci ise ayrıık yayılma dirençleri ile çubuk ve şerit iletkenler arasındaki karşılıklı dirençlerin birleşimi ile birlikte denklem (2)'de verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (2)$$

Bu denklemde  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_m$  sırasıyla şerit iletkenlerin oluşturduğu yayılma direnci, çubuk iletkenlerin yayılma direnci ve bu iki iletkenin birbirine göre direncidir.

Schwarz yöntemine göre bir topraklama ağını oluşturan şerit iletkenlerin yayılma direnci ( $R_1$ ), denklem (3) ile hesaplanır.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{a} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (3)$$

Burada  $\rho$  toprağın öz direnci ( $\Omega.m$ ),  $L_c$  ağdaki şerit iletkenlerin toplam uzunluğu (m),  $a$  iletken yarıçapı (m),  $h$  gömülme derinliği (m),  $A$  şerit iletkenlerden oluşan ağın kapladığı alan ( $m^2$ ) ve  $k_1$ ,  $k_2$  Schwarz katsayılarıdır.

Çubuk iletkenlerin yayılma dirençleri ( $R_2$ ) ise;  $L_R$  bir çubuğun boyu (m),  $b$  çubuk yarıçapı (m),  $n_R$  toplam çubuk sayısı ve  $k_1$  Schwarz katsayısı olmak üzere denklem (4) ile hesaplanır.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi L_R n_R} \left[ \ln \left( \frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4)$$

Çubuk ve şerit iletkenlerin karşılıklı dirençleri  $R_m$  de Schwarz denkleminde dikkate alınmaktadır. Bu direnç değeri denklem (5) ile hesaplanmaktadır.

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot L_c}{L_R} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (5)$$

Schwarz denklemlerindeki  $k_1$  ve  $k_2$  katsayıları, oluşturulan ağın boy/en oranı olan  $\alpha$ , gömülme derinliği  $h$  ve ağın kapladığı alan  $A$  ile ilişkili olarak değişir.  $k_1$  ve  $k_2$  katsayıları Çizelge 1 yardımıyla hesaplanır.

Çizelge 1: Schwarz formülü katsayıları

$h$	$k_1$	$k_2$
0	$-0,04\alpha + 1,41$	$0,15\alpha + 5,50$
$(1/10) \cdot \sqrt{A}$	$-0,05\alpha + 1,20$	$0,10\alpha + 4,68$
$(1/6) \cdot \sqrt{A}$	$-0,04\alpha + 1,13$	$-0,05\alpha + 4,40$

CYMGRD yazılımında, adım ve dokunma gerilimi güvenlik değerlendirmeleri IEEE 80-2000 standardında yer alan formüllere göre yapılmaktadır. Bu standarda göre 50 kg ve 70 kg vücut ağırlıkları için maksimum adım ve dokunma gerilimleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır [4]:

50 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-50} = \frac{(1000 + 1,5C_s \rho_s) \cdot 0,116}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-50} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0,116}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

70 kg vücut ağırlığı için dokunma gerilimi

$$E_{dokunma-70} = \frac{(1000 + 1,5C_s \rho_s) \cdot 0,157}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

ve adım gerilimi;

$$E_{adım-70} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0,157}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

Bu denklemlerde,  $t$  arıza süresi (s), yüzey malzemesinin öz direnci ( $\Omega.m$ ) ve  $C_s$  yüzey tabakasının azaltma katsayısıdır [4].  $C_s$  katsayısı;  $h_s$  kalınlığındaki ve öz direnci, yüksek dirençli yüzey malzemesinin altındaki toprak için denklem (10) ile hesaplanır:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \quad (10)$$

## 3. Rüzgar Türbinleri Topraklama Sisteminin Üç Boyutlu Tasarımı

Günümüzde bilişim teknolojisinin hızlı gelişimi sayesinde bilgisayar kullanımı hemen her alanda hızlı şekilde artmıştır. Mühendislik uygulamalarında da bilgisayar algoritmalarının kullanımı hızlı çözümler üretmekte, sonuçlar görsel olarak elde edilebilmektedir. Bu çerçevede topraklama sistemlerinin tasarımında birçok bilgisayar yazılımı mevcut olup kullanıcılar ihtiyaçlarına göre tasarımlarında bu programları kullanmaktadır. Topraklama sistemlerinin tasarımlarının doğru sonuçlar verilebilmesi için kullanılan yazılımlarda topraklamada kullanılan şerit ve çubuk topraklayıcıların ayrı olarak tanımlanabilmesi, toprağa akan toprak arıza akımının hesaplanabilmesi, ilgili alandaki istenen herhangi bir noktanın yüzey potansiyelinin hesaplanabilmesi gibi özelliklerin olması gerekmektedir.



CYMGRD yazılımı, mühendislere bina veya şalt sahalasının topraklama hesapları ile ilgili yardımcı olmak üzere tasarlanmış bir yazılımdır. Program, içerisindeki toprak analiz modülü, elektrot boyutlandırma, sistem analiz ve grafik modülleri ile herhangi bir sahanın toprak özdirenç hesaplamaları, topraklama şerit ve çubuklarının tasarımı, toprak potansiyelinin artışı, yüzey potansiyelindeki değişim, adım gerilimi hesabı gibi konularda kullanılabilir. Program yapılan hesaplamalar için IEEE 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding standardını esas almaktadır.

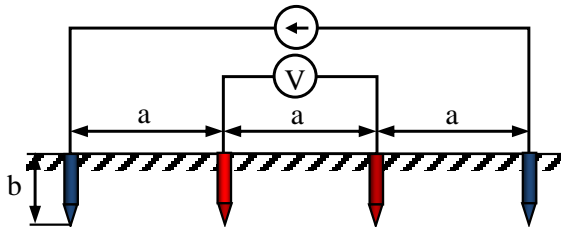
Bu bölümde CYMGRD yazılımı sayesinde rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Yazılım bir veya iki tabakadan oluşan topraklarda, topraklama ağlarının analizini yaparak IEEE 80-2000 standardına göre adım ve dokunma gerilimlerini hesaplar [4]. CYMGRD yazılımı [9] ile topraklama tasarımı yapılmadan önce M. I. Lorentzou ve diğerlerinin çalışması dikkate alınmıştır [1]. Bu çalışmaya göre tasarım yapılırken izlenecek metodoloji belirlenmiştir.

Bu metodolojiye göre ilk önce topraklama alanının özdirenci ölçümlerle hesaplanır. Daha sonra rüzgar türbini baralarında oluşabilecek tek fazlı kısa devre akımı hesaplanır ve bu akıma göre izin verilen maksimum adım ve dokunma gerilimleri bulunur. Tek bir rüzgar türbininin topraklama tasarımı yapılır ve topraklama direnci ile bir kişinin tehlikeye maruz kalabileceği adım ve dokunma gerilimleri hesaplanır.

### 3.1. Toprak Özdirenç Ölçümü ve Toprak Katmanlarının Modellenmesi

Topraklamanın yapıldığı toprak, bazen önemli derinliklere kadar aynı özelliklere sahip olabilirken bazen de değişkenlik gösterebilmektedir. Toprağın bu yapısını anlamak için son yıllarda önemli çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak toprak yapıları değerlendirilirken çok tabakalı sistemler olarak düşünülmektedir. Ancak CYMGRD yazılımı ile tek tabakalı ve iki tabakalı toprak sistemleri tanımlanabilmektedir.

İki tabakalı toprak sistemi, özdirençleri birbirinden farklı belirli bir derinlikteki (kalınlıktaki) üst tabaka ve sonsuz derinlikteki alt tabakadan oluşmaktadır. CYMGRD yazılımı topraklama özdirenç ölçümlerinde Wenner dört kazık yöntemini desteklemektedir. Bu çalışmada da buna uygun olarak topraklama alanının özdirenç ölçümleri Wenner dört kazık yöntemine göre yapılmıştır. Şekil 1'de Wenner yönteminin ilkesel açıklama şekli görülmektedir [3, 4].



Şekil 1: Wenner dört kazık yöntemi.

Özdirenci ölçülecek toprak üzerinde dört adet elektrot eşit aralıklarla istenilen derinliğe saplanır. En dıştaki elektrotlara akım uygulanır ve bir ampermetre ile bu akım ölçülür. İçteki elektrotlar arasında bu akımın yarattığı potansiyel farkı bir voltmetre

ile ölçülür. Bu ölçüm değerlerinden denklem (11) yardımıyla toprak özdirenci her derinlik için hesaplanır [3, 4].

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]} \quad (11)$$

Bu denklemde a elektrotlar arası uzaklık (m), b elektrotların boyu (gömülme derinliği) (m), I uygulanan akım (A) ve V oluşan gerilimdir (V). Bu denklem ile b = 2,5 m uzunluğunda elektrotlar kullanarak, 10 farklı a değeri için ölçülen V, I değerleriyle hesaplanan toprak özdirenç değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu değerler söz konusu programa girildiğinde istenen toprak modeline göre tabaka kalınlıkları ve bu tabakaların özdirençleri belirlenir. M. I. Lorentzou [1] çalışmasında da belirtildiği gibi gerçek toprak modeline en yakın kabul edilen model iki tabakalı toprak modeli olduğu için bu çalışmada da hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

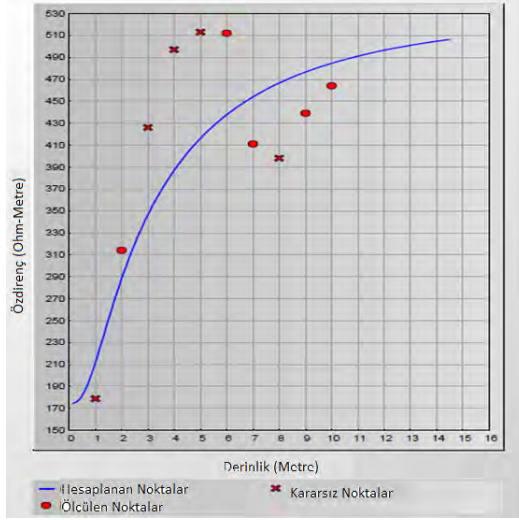
Çizelge 2: Hesaplanan toprak özdirenç değerleri

Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenç $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	1	178,7
2	2	314
3	3	426
4	4	497
5	5	513
6	6	512
7	7	411
8	8	398
9	9	439
10	10	464
Ortalama		415,27

Şahadan alınan toprak ölçümleri, kazıklar arası mesafe ile birlikte programa girilir. CYMGRD yazılımında toprak analiz butonuna basıldığında, yaklaşık olarak bir grafik çizdirilir. Bu grafiğe göre program, toprağı iki tabaka olarak değerlendirmektedir. Bunların yanında toprak modellenmesinde kullanıcı girişi ile de tasarım yapılabilir. Burada kullanıcı, her elektrotlar arası açıklık için belirlenmiş toprak özdirençlerini girmek yerine ortalama toprak özdirenç değerini girmek ve program tek bir toprak tipi olarak işlemleri yapmaktadır. Toprak analizi modülünde çıkan sonuçlar rapor kısmında görülmekte ve diğer modüllere otomatik olarak aktarılmaktadır.

Şekil 2'de farklı elektrotlar arası açıklıklar için hesaplanmış toprak özdirençlerinin topraklama yazılımına girilmiş hali görülmektedir. Yazılım bu değerlerden yanlış ölçüm nedeniyle oluşan kararsız noktaları atarak derinliğe bağlı toprak özdirenç değişimini kendi elde eder. Bu eğri yardımıyla da kullanılacak toprak modelini oluşturur.

Çizelge 1'deki değerler yardımıyla program iki tabakalı bir toprak modeli oluşturmuştur. Bu modele göre toprak, üst katmanı 1 m kalınlığında, 174,37  $\Omega \cdot m$  özdirence sahip ve alt katman 535,1  $\Omega \cdot m$  özdirence sahip olacak şekilde modellenmiştir. Yapılan benzetimlerde toprağın bu iki tabakalı modeli kullanılmıştır.



Şekil 2: Özdirençin elektrotlar arası açıklıkla değişimi.

### 3.2. Topraklama Ağı, Elektrotlar ve İletkenlerin Tasarımı

Tasarımın bu bölümünde sistemin tek fazlı kısa devre arıza akımı hesaplanmıştır. Arıza akımı olarak topraklama tasarımının yapılacağı tesisin kısa devre arıza akımı dikkate alınmıştır. Buna göre maksimum toprak arıza akımı 5 kA olarak, maksimum kısa devre süresi 0,5 saniye olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde maksimum ağ sıcaklığı (bakırın ergime sıcaklığı olan) 1083°C ve maksimum çevre sıcaklığı 40°C olarak belirtilmiştir. Bu koşullar dikkate alınarak rüzgar türbini temel topraklama elektrotları ve iletkenlerinin boyutları seçilirken yüksek arıza akımı ve mekanik zorlanmaya dayanım göz önünde tutulmuş ve Çizelge 3'deki değerler belirlenmiştir.

Çizelge 3: Topraklama elektrodunun özellikleri

Topraklama elektrodu çapı	16 mm
Topraklama iletkeni çapı	16 mm
Topraklama elektrodu uzunluğu	2.5 m
Temel boyutları (Yarıçap × Yükseklik)	2 m × 2 m
Topraklama ağı çevre uzunluğu	4 × 12 m = 48 m

Bu veriler kullanılarak dört farklı topraklama modeli oluşturulmuş ve standarda göre gerekli hesaplamalar bilgisayar ortamında yapılmıştır. İlk model, tekil rüzgar türbini için 1 m<sup>2</sup> gözler sahip ağ tasarımına sahiptir. İkinci modelde gözlerin alanı 0,25 m<sup>2</sup> olacak şekilde küçültülmüştür. Üçüncü modelde, ikinci modelde kullanılan topraklama yapısı dört rüzgar türbininden oluşan bir çiftlik için birlikte tasarlanmıştır. Son model ise üçüncü modeldeki türbin sayısının iki katı olması durumunu kapsamaktadır.

### 3.3. Toprak Katmanlarının Değişimini Gösteren Analizler

Yapılacak olan analizlerde kullanılacak toprak modelini (tek katmanlı veya iki katmanlı) belirleyebilmek için ön analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, daha önceden rüzgar santrali kuru-

lan bir alanın toprak ölçüm raporlarından yararlanılmıştır. Kullanılan raporlardaki toprak alanı özdirenç değerleri Wenner dört kazık yöntemi ile ölçülmüş ve Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4: Toprak özdirenç değerleri

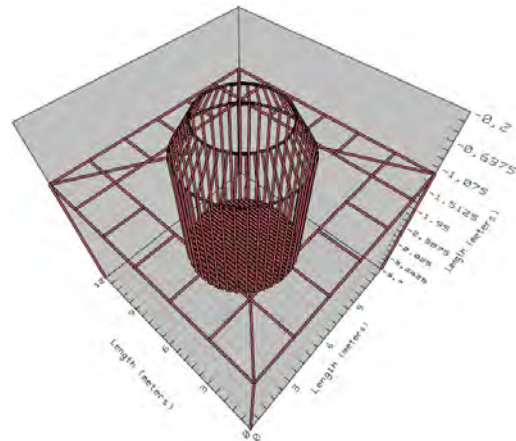
Ölçüm Sırası	Açıklık, a (m)	Özdirenç $\rho$ ( $\Omega$ .m)
1	1	168
2	2	297
3	3	264
4	4	245
5	5	227
6	6	233
7	7	236
8	8	249
9	9	298
10	10	309
ortalama		252,60

Bu ölçümler yazılım tarafından iki tabakalı toprak modelinde kullanılarak toprağın tabaka özdirençleri ve kalınlıkları hesaplanmıştır. Buna göre sonuçlar Çizelge 5'de gösterilmiştir.

Çizelge 5: Hesaplanan toprak verileri

Üst tabaka özdirenç	171,01 $\Omega$ .m
Üst tabaka kalınlığı	1 m
Alt tabaka özdirenç	271,38 $\Omega$ .m

Karşılaştırma analizleri için kullanılacak olan model Şekil 3'de görülmektedir. Topraklama ağının çevre uzunluğu 48 m olacak şekilde 2 m × 2 m gözler sahip bir tasarım kullanılmıştır. Kullanılan yapıda çubuk topraklayıcı kullanılmamıştır.



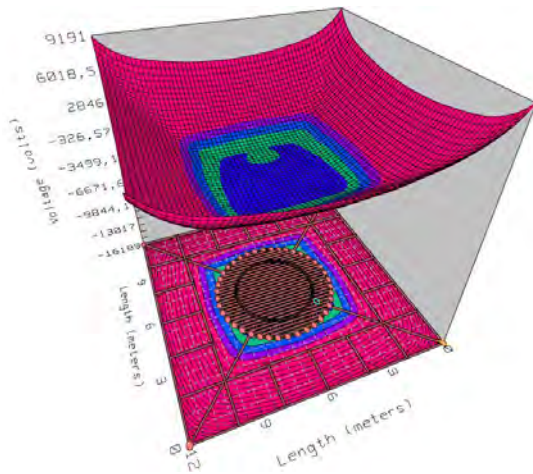
Şekil 3: Karşılaştırma için kullanılacak topraklama sistemi

Bu tasarım için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci 7,79068  $\Omega$ 'dur. IEC 61400 standardında da belirtildiği gibi bireysel rüzgar türbinleri için topraklama direnci 10  $\Omega$ 'un altında olmalıdır [2]. Yazılım tarafından hesaplanan toprak potansiyel yükselmesi ise 40142,9 V'tur.

Yapılan üç boyutlu topraklama tasarımında yazılım tarafından IEEE 80-2000 standardına göre ilk olarak potansiyel dağılımı daha sonra adım ve dokunma gerilimleri hesaplanmaktadır. Model için izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimleri sırasıyla 2982,63 V ve 912,18 V olarak hesaplanmıştır.

Yazılım tarafından hesaplanan üç boyutlu potansiyel dağılımı Şekil 4'deki gibidir. Programın grafik modülü, yüzey potansiyel analizinin sonuçlarını görmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar tasarımın iki ve üç boyutlu gösterimleri üzerinde, grafiksel olarak alınabilmektedir. Kullanıcı tasarlanan ağdaki çeşitli noktalarda oluşan tehlikeli noktaları görebilmektedir. Bir kez eşpotansiyel grafiği oluşturulduğunda yüzey ve dokunma potansiyeli birlikte incelenebilmektedir.

Oluşturulan eşpotansiyel eğrileri, toprak analizi modülünde elde edilen güvenlik sonuçlarına göre renk kodlamasıyla gösterilir. Burada her renk belirli bir potansiyel aralığını temsil etmektedir. İzin verilen düzeylerin aşıldığı alanlar belirlenen renklerle gösterilir. Seçilen alan üzerinde izin verilen gerilim değerlerine göre en kötü ve en iyi noktalar da görülebilmektedir [10].



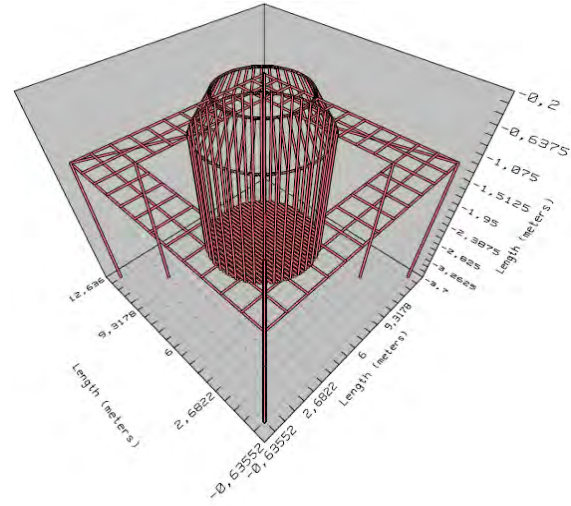
Şekil 4: Durum 1 için hesaplanan potansiyel dağılımı

Modelde kullanılan toprak özdirenç ölçümlerinin ortalama değeri yazılımın tek tabakalı toprak modelinde kullanılarak farklı toprak modellerinde topraklama direncinin, adım ve dokunma gerilimlerinin nasıl değiştiği karşılaştırılmıştır.

Tek tabakalı toprak modelinde toprak özdirenci 252,6  $\Omega$  alınarak hesaplama yapıldığında üst ve alt tabaka özdirençleri bu değerle aynı ve tabaka kalınlığı 200 m olarak bulunmuştur. Topraklama modeli olarak Şekil 3'deki tasarımın aynı kullanılmıştır. Tasarımın topraklama direnci 7,62781  $\Omega$  olarak hesaplanmıştır. İki tabakalı toprak modeline göre topraklama direncinde % 2.1 oranında bir azalma olmuştur. Tek tabakalı toprak modelinde toprak potansiyel yükselme değeri ise 39304,3 V'tur. Yazılım tarafından hesaplanan en yüksek adım ve dokunma gerilimleri ise sırasıyla 3002,59 V ve 917,17 V'tur. Adım ve dokunma gerilimlerinde ise iki tabakalı toprak modeline göre % 0,66 ve % 0,54 oranında bir artış olmuştur. Hesaplanan bu değerler sonucunda aynı toprak özdirenç değeri için tek ve iki tabakalı toprak modelleri arasında büyük farklılıklar olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle yapılan analizlerde iki tabakalı toprak modeli kullanılmıştır.

#### 4. Tek Bir Rüzgar Türbininin Topraklama Tasarımının Yapılması

Birinci modele göre tek bir rüzgar türbininin temel topraklaması Şekil 5'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Çevre topraklama ağının aralıkları 1 m  $\times$  1 m olan gözlerden oluşturulmuştur. Çevre topraklama ağının iç kısımlarının dört köşesine boyları 2,5 m olan çubuk topraklayıcılar yerleştirilmiştir.



Şekil 5: Tek bir rüzgar türbini için oluşturulmuş topraklama modeli I.

Bu şekilde oluşturulmuş modelde Çizelge 6'daki parametreler kullanılarak topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmesi (GPR: Ground Potential Rise) hesaplanmıştır. Benzetim sonucunda topraklama direnci 13,438  $\Omega$  ve potansiyel yükselmesi 69202,8 V olarak bulunmuştur. Hesaplanan topraklama direnci, 10  $\Omega$  değerini aştığı için tasarlanan topraklama ağı tek başına uygun değildir. Bu nedenle tasarım izin verilen değerleri aşmamacak şekilde yeniden tasarlanmıştır.

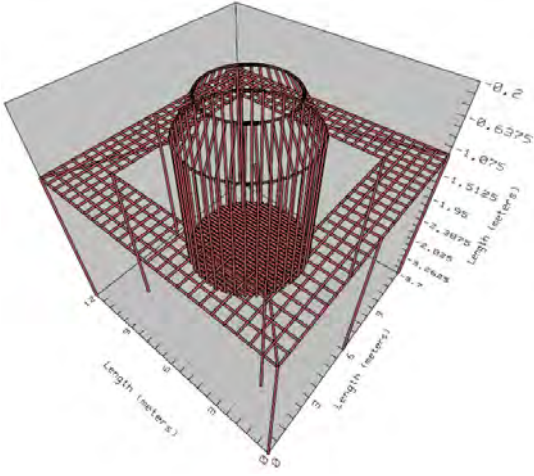
Çizelge 6: Topraklama hesabında kullanılan veriler

Vücut ağırlığı	70 kg
Vücut direnci	1000 $\Omega$
Yüzey tabakasının özdirenci	3000 $\Omega$ .m
Yüzey tabakasının kalınlığı	0,2 m
Arıza açma süresi, $t_s$	0,5 s

Topraklama direncinin değeri olması gereken değer üzerinde çıktığı için topraklama ağında tasarım değişikliğine gidilmiştir. Çevre topraklama ağı aralıkları 0,5 m  $\times$  0,5 m yapılarak ilk durumdaki tasarıma ek olarak eklenen topraklama çubuklarıyla beraber toplam 10 adet 2,5 m boyunda çubuk topraklayıcı kullanılarak Şekil 6'daki tasarım elde edilmiştir.

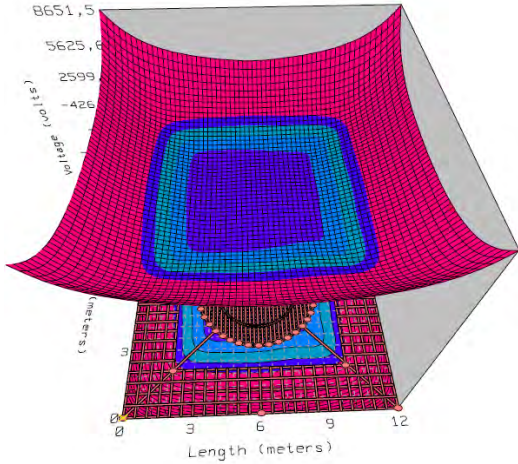
Yeni tasarım için yazılım tarafından Çizelge 3'e göre hesaplanan topraklama direnci 8,1309  $\Omega$ 'dur. Bu direnç değeri standartlara uygundur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise 43786,6 V'dur. Ayrıca IEEE 80-2000 standardına dayanılarak hesaplanan en yüksek adım ve dokunma gerilimleri sırasıyla 2983,45 V ve 912,39 V'dur.





Şekil 6: Tek bir rüzgar türbini için oluşturulmuş topraklama modeli II.

Şekil 7'de tasarlanan topraklama ağının üç boyutlu potansiyel dağılımı görülmektedir. Potansiyel dağılımında kırmızı ve tonları adım geriliminin izin verilen değerlerden yüksek olduğu yerleri, mavi ve tonları ise izin verilen sınırların altında olduğunu yerleri göstermektedir. Şekil 7'den de görüleceği gibi rüzgar türbini ve çevresinde izin verilen en yüksek adım ve dokunma gerilimi değerleri aşılmadığı için tasarım güvenli bir topraklama sistemidir.



Şekil 7: Model II için potansiyel dağılımı.

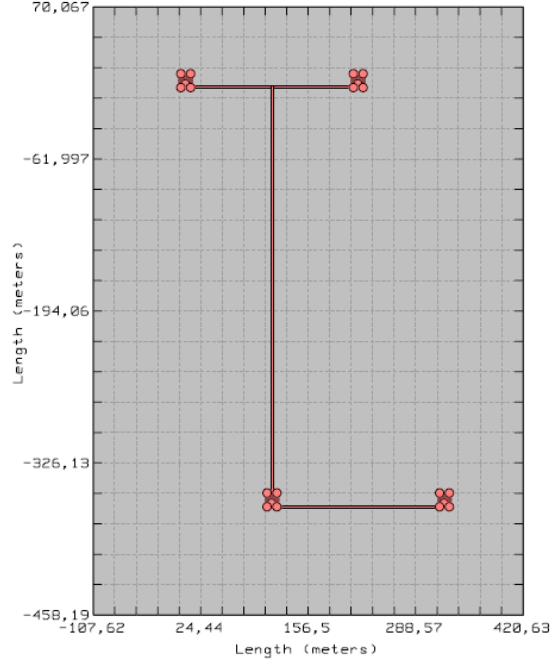
## 5. Rüzgar Çiftliğinin Topraklama Tasarımı

Bir rüzgar türbini için yapılan hesabın istenilen toprak direnci ve gerilim değerlerini sağladıktan sonra birbirine bağlı rüzgar türbinlerinin oluşturduğu rüzgar çiftlikleri için tümesik topraklama sistemleri tasarlanmış ve elde edilen değerler tekil topraklama tasarımı değerleri ile karşılaştırılarak çiftlikler için optimum topraklama tasarımı belirlenmiştir.

İlk olarak dört türbinden oluşan bir sistem için tasarım yapılmıştır. Rüzgar türbinleri rüzgardaki enerjiyi elektrik enerjisine çevirirken rüzgarı yavaşlattığından dolayı türbin yerleşim planında türbinler arasında yeteri kadar uzaklık bırakılmalıdır.

Bu plana göre türbinler arasında hakim rüzgar yönünde kanat çapının 5 veya 9 katı kadar, düşey yönde ise 3 veya 5 katı kadar

uzaklık bırakılır. Tasarımda ise kanat çapı 50 m olan Nordex N50 rüzgar türbini baz alınarak aynı sıradaki türbinler arasında kanat çapının 4 katı (200 m) sıralar arasında ise rotor çapının 7 katı (350 m) mesafe bırakılmıştır. Belirtilen açıklıklara sahip rüzgar çiftliği bölümü için tasarlanan topraklama sisteminin kuşbakışı görünüşü Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8: Dört türbinden oluşan sistemin topraklaması.

Burada her bir rüzgar türbini Şekil 6'daki topraklama tasarımına sadık kalınacak şekilde yapılmış ve birbirlerine bağlanmıştır. Bu şekilde yapılan sisteme ilişkin potansiyel dağılımı tek bir türbin için Şekil 9'da verilmiştir.

Şekil 8'deki yeni rüzgar çiftliği için yazılım tarafından hesaplanan topraklama direnci  $5,11017 \Omega$ 'dur. Rüzgar türbini sayısının artması topraklama direncinin değerini azaltmıştır. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi değeri ise  $26338,1 V$ 'tur. Rüzgar türbini ve çevresinde adım ve dokunma gerilimi değerleri sırasıyla  $3185,47 V$  ve  $962,89 V$  olarak hesaplanmıştır.

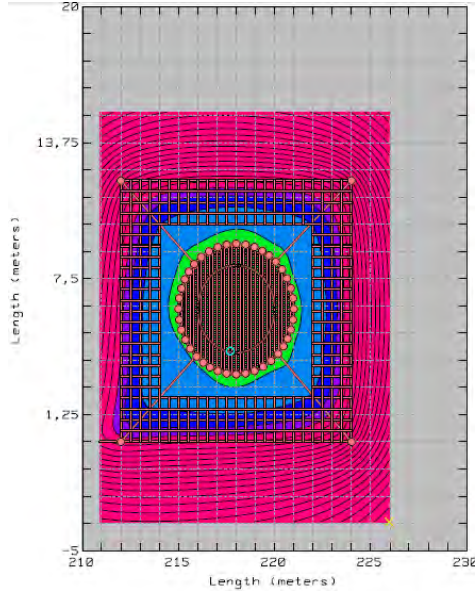
İncelenen son tasarımda rüzgar çiftliğindeki türbin sayısı iki katına çıkartılarak sekiz türbin için topraklama modeli tasarlanmıştır. Türbinler arası uzaklıklar önceki sistemle aynı alınmıştır.

Tek türbin için kullanılacak topraklama modeli üzerinde değişiklik yapılmadan Şekil 10'da görülen sistem için topraklama sistemi tasarlanmıştır. Bu durumda elde edilen topraklama direnci  $3,03138 \Omega$ 'dur. Tasarımın toprak potansiyel yükselmesi ise  $15627,2 V$ 'tur.

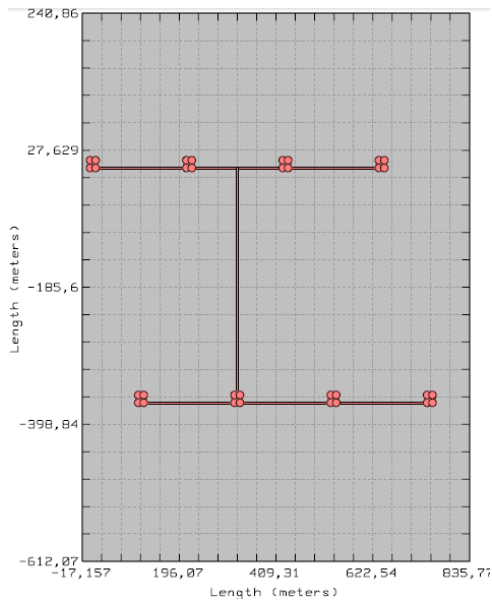
Çizelge 7'de topraklama tasarımı yapılan dört farklı modelin sonuçları görülmektedir. Topraklama modellerinin sonuçlarının karşılaştırılması hesaplanan topraklama direnci ve toprak potansiyel yükselmelerine (GPR) göre yapılmıştır. Çizelge 7'den görüleceği gibi topraklama ağı oluşturulan gözler küçüldükçe daha fazla iletken kullanılmasından dolayı topraklama direnci ve buna bağlı olarak GPR değerleri azalmaktadır. Ayrıca topraklama sistemi genişletilip çok sayıda türbini içine alacak şek-



le getirildiğinde topraklama direncinde büyük ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu azalış topraklama sistemine dahil edilen türbin sayısı ile orantılı olacak şekilde azalmaktadır.



Şekil 9: Dört rüzgar türbininden oluşan sistemde türbin çevresinde potansiyel dağılımı.



Şekil 10: Sekiz rüzgar türbininden oluşan sistemde türbinlerin yerleşimleri.

Çizelge 7: Topraklama modellerinin karşılaştırılması

Topraklama modeli	Topraklama direnci ( $\Omega$ )	Toprak potansiyel yükselmesi (GPR) (V)
1	13,438	69202,8
2	8,1309	43788,6
3	5,11017	26338,1
4	3,03138	15627,2

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dört farklı durum için rüzgar türbinleri topraklama tasarımı incelenmiştir. Türbin temel donatıları dikkate alınarak tasarlanan topraklama sisteminde toprak özdirenci değeri sabit tutulmuş ve iki tabakalı toprak modeli kullanılmıştır. Her bir durumda yapılan topraklama tasarımında topraklayıcı boyları ve topraklama ağı boyutları değiştirilerek standartlara [4] uygun topraklamalar oluşturulmuştur. Oluşturulan farklı durumlar topraklama analizi için kullanılan CYMGRD programı ile topraklama direnci, toprak potansiyel yükselmesi (GPR), adım ve dokunma gerilimleri ve yüzey potansiyelleri bakımından karşılaştırılmıştır. Tasarımda güvenlik ölçütleri olarak IEEE 80-2000 standardı sınır değerleri alınmıştır.

Analizlerde kullanılacak toprak modelini belirlemek amacıyla başka bir topraklama sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem üzerinde deneysel olarak elde edilen toprak ölçümlerinden sırasıyla bir ve iki tabakalı toprak modelleri oluşturulmuş ve bu modeller kullanılarak topraklama direnci ve toprak potansiyelleri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda bir veya iki tabakalı toprak modeli kullanmanın sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Yapılan benzetimler sonucunda tek başlarına kullanılan rüzgar türbinlerinin topraklama tasarımından temel donatılarının yanında ek topraklayıcı ve iletkenlerle topraklamayı iyileştirme gereği duyulmuştur. Ağ topraklama sisteminin göz büyüklükleri küçültülerek topraklama direnci ve GPR değeri azaltılmıştır. Topraklama direnci tek başına  $10 \Omega$ 'dan yüksek olan rüzgar türbini, uygun sayıda rüzgar türbini ile rüzgar çiftliği oluşturunca topraklama direnci değeri uygun güvenlik ölçütlerini sağlamıştır.

## 7. Kaynaklar

- [1] Lorentzou, I. M., Hatzigryriou, N. D., Manos, G. A. and Sietis, T., "Integrated Grounding System of Wind-Farms for Lightning and Fault Protection" *Proceedings of the Mediterranean Power Conference (Med Power)*, Lemesos, Cyprus, 14-17 November 2004.
- [2] Esmailian, A., Akmal, S. A. A. and Naderi, S. M., "Wind Farm Grounding Systems Design Regarding the Maximum Permissible Touch & Step Voltage", *Environment and Electrical Engineering International Conference (EEEIC)*, Tehran, Iran, 18-25 May 2012.
- [3] "Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği", *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, Ankara, 2001.
- [4] IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Standard Board*, New York, USA, 2000.
- [5] Yıldırım, H., Kalenderli, Ö., Türkay, B., Çelikyay, M., "Topraklama Ağlarının Bilgisayar Destekli Analizi", *Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Bursa, s. 130-133, 11-17 Eylül 1995.
- [6] Kalenderli, Ö., Şentürk, E., Öztürk, O. I., "Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi ile Hesabı", *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, s. 197-200, 18-21 Eylül 2003.
- [7] Öztürk, O. I., Kalenderli, Ö., «Bir Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımına Toprak Özelliklerinin Etkisi», *EVK 2005 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, s. 223-227, 17-18 Mayıs 2005.
- [8] Uzunlar, F. B., Kalenderli, Ö., "Topraklama Ağlarının Üç Boyutlu Tasarımı", *EVK 2009 Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, s. 307-312, 21-22 Mayıs 2009.
- [9] CYMGRD: Substation grounding grid design and analysis program, CYME International T&D Inc., Canada, <http://www.cyme.com/software/cymgrd/>



### **Aytuğ Font**

1986 yılında İstanbul'da doğdu. 2004 yılında İstanbul Dede Korkut Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisansı, 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını tamamlayıp doktora başlamıştır. 2011 yılından beri Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma konuları, yüksek gerilim tekniği, HVDC iletim sistemleri, DC korona, elektrostatik ve ısı analiz, yapay sinir ağları ve sınıflandırma algoritmalarıdır.



### **Özcan Kalenderli**

1956 yılında İstanbul'da doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Elektrik-Elektronik Fakültesi'nden 1979 yılında "Mühendis", 1981 yılında "Yüksek Mühendis" ve 1991 yılında "Doktor Mühendis" unvanlarını almıştır. Kalenderli, İTÜ Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda 1979-1991 arasında "Mühendis" olarak çalışmıştır. İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde 1991'de "Yardımcı Doçent", 1998'de "Doçent" ve 2010'da "Profesör" unvanını almış ve 1991 yılından beri aynı bölümde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Kalenderli, yüksek gerilim tekniği konuları içinde elektriksel boşalma olayları, aşırı gerilimler ve aşırı gerilimlere karşı koruma, yüksek gerilimlerin üretilmesi ve ölçülmesi, yüksek gerilim deney teknikleri başta olmak üzere sayısal elektromanyetik alan analizi, elektromanyetik alanların çevre etkileri, elektriksel yalıtkan maddeler ve elektriksel topraklama konularında çalışmaktadır.



### **Semih Günden**

1992 yılında Gaziantep'te doğdu. 2010 yılında Gaziantep Lisesi'nden, 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Mezuniyetinden bu yana elektrik enerji sektöründe elektrik mühendisi olarak çalışmaktadır. Rüzgar santralleri ve topraklama ilgi alanlarındandır.

## Tanım Uzayı Değişkeni İle Değişen Bazı Sıradan Doğrusal Sistemler İçin Analitik Çözüm Yöntemi

### An Analytical Solution of Certain Classes of Ordinary Linear Domain Varying Systems

Veysi Gökhan<sup>1</sup>, Hasan Güneyli<sup>1</sup>, Arif Nacaroğlu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi  
veysi.gokhan@gmail.com, guneylihasan@hotmail.com, arif1@gantep.edu.tr

#### Özet

Bu çalışmada tanım uzayı (domeyn) değişkeni ile değişen sıradan doğrusal sistemlerin analitik olarak çözülebilir olması için yeni bir sınıflandırma tanımı yapılmıştır. Önerilen yeni dinamik sistem sınıfı için uygun dönüşümlerin elde edilmesi ve çözülmesi yöntemi açıklanmıştır. Her ne kadar zamanla değişen birinci derece sıradan doğrusal sistemlere ait denklemlerin çözülebilirliği görece olası olsa da ikinci ve daha üst dereceli sistemlerde matematiksel modelin ancak belli ve sınırlı özelliklere sahip olması durumunda çözümleri bulunabilir. Bu tür sistemlerin çözülebilir olması, uygun dönüşümler uygulanarak sistemlerin tanım uzayı değişkeni ile değişmeyen sabit katsayılı sistemlere dönüşebiliyor olması ile ilişkilidir. Bu güne kadar yapılan çalışmalarda özdeğerleri belli özellikler taşıyan sistemlerin çözülebilir olduğu gösterilmiştir.

Dinamik sıradan sistemin analitik olarak çözülebilir olduğunun belirlenmesi sistemin özdeğerlerinin yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bütün bu tanımlar sıradan diferansiyel denklemlere dönüşebilen parçalı diferansiyel denklemler için de geçerlidir. Bu çalışmada, özdeğerlerden yola çıkılarak yeni bir çözülebilir grup tanımlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** tanım uzayı değişkeni ile değişen, zamanla değişen sistemler; sıradan doğrusal sistemler.

#### Abstract

In this study, the new solvable class of ordinary linear domain varying system is presented. The transformation method for proposed class of domain varying systems into domain independent systems is given. Although the solution of the first order linear or nonlinear ordinary dynamic systems is possible if they have some specific features, second or higher order ordinary domain varying linear differential equations can be solved if they have only very specific characteristics and conditions. Solvability of the domain varying systems are dependent on if the possible transformation matrices can be found to transform such systems into domain invariant form or not. In literature, only very limited form of the domain varying linear system solutions are presented. The solvability of ordinary dynamic systems depends on the eigenvalues of the systems. The method

presented here is also valid for the solution of the partial differential systems which can be transformed into ordinary form using separation of variable method.

In this study, a new class of solvable dynamic systems is presented owing to the eigenvalues of the system.

**Keywords:** domain varying systems, time varying systems, ordinary linear systems

#### 1. Giriş

Tanım kümesi değişkeni ile değişen veya değişmeyen n boyutlu sıradan doğrusal sistemler, giriş-çıkış ilişkisini veren n dereceli bir sıradan doğrusal diferansiyel denklem ile modellenmektedir. Diferansiyel modelin katsayılarının ve dolayısıyla özdeğerlerinin bazı özelliklere sahip olması, matematiksel modelin analitik olarak çözülebilir olması ile doğrudan ilişkilidir. Katsayıların sabit (tanım kümesinden bağımsız) olması sistemin belirli aralıkta çözülebilir olmasını (Laplace gibi yöntemlerle) sağlar. Ancak katsayıların tanım kümesi değişkenine bağlı olması, sistemin analitik çözümünün bulunabilir olmasının bazı ön şartlara bağlı olmasına sebep olur.

Sistem modellenmesinde giriş-çıkış ilişkisini veren n dereceli sıradan doğrusal denklem yerine, bazı durum değişkenleri üretilerek, birinci dereceli ve birbiri ile ilişkili n tane sıradan diferansiyel denklem tanımlanması sistem kullanımını çeşitlendirdiği için tercih edilmektedir. Bu tür sistemlerde çözüm her bir durum değişkeni için elde edilebildiğinden çıkış değerinin değişik durum değişkeni uçlarından alınmasıyla kullanım çeşitliliği sağlanabilmektedir. Bu nedenle, tanım kümesi değişkeni ile değişen (bu çalışmada bundan sonra tanım kümesi olarak zaman) n boyutlu birinci dereceli sıradan doğrusal sistemler

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = A(t) \begin{bmatrix} x \\ x \\ x \end{bmatrix} + B(t) \begin{bmatrix} u \\ u \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

eşitliği ile tanımlanabilir. Burada durum değişkenlerini, durum değişkeninin zamana göre türevini, nxn boyutlu A(t) ve nxm

boyutlu  $B(t)$  katsayı vektörlerini ifade etmektedir.  $A(t)$  ve  $B(t)$  vektörlerinin elemanları devre elemanları ile doğrudan ilişkilidir ve devre elemanlarının uç ilişkilerinin zamana bağlı olup olmamaları tüm sistemin zamana bağlı olup olmaması sonucunu ortaya çıkarır. Zamanla değişen kapasite, direnç, bobin, kazanç gibi değerler zamanla değişen sistem modelleri ile sonuçlanır. Zamanla değişmeyen (sabit katsayılı) sistemlerin kolay ve genel bir çözümü mevcuttur ve sisteme giriş uygulanmadığı ( $u(t)=0$  iken), yani homojen zamanla değişmeyen sistemler için  $A(t)=A$  olduğundan çözüm

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x(t_0) \quad (2)$$

olarak tanımlanır [1]. Ancak  $A$  matrisinin zamanla değişiyor olması durumunda eşitlik (2)'de verilen çözüm geçerli değildir. Bu durumda analitik çözümün var olması, sistemin zamanla değişmeyen sabit katsayılı sisteme dönüştürülebilir olması ile olasıdır. Zamanla değişen sistemlerin zamanla değişmeyen sistemlere dönüşümünü sağlayan genel bir dönüşüm yöntemi bu güne kadar ispatlanamamıştır ve yalnızca bazı özel durumlar için dönüşüm matrisleri tanımlanabilmektedir [2].

Eğer sistem matrisi  $A(t)$  sabit elemanlı olmamakla birlikte sabit özdeğerli bir matris ise zamanla değişen sistem sınıfı olarak tanımlanır ve

$$A_1A(t) - A(t)A_1 = dA(t)/dt \quad (3)$$

ilişikisini sağlayan matrisi [3] ile oluşan

$$T(t) = e^{A_1t} \quad (4)$$

dönüşüm matrisi

$$x(t) = T(t)z(t) \quad (5)$$

bağıntısı ile zamanla değişen  $\dot{x}(t) = A(t)x(t)$  sistemini zamanla değişmeyen

$$\dot{z}(t) = \bar{A}z(t) \quad (6)$$

sistemine dönüştürür ve dönüştürülmüş sistemin çözümü

$$z(t) = L^{-1}[sI - \bar{A}]^{-1} z(t_0) = e^{\bar{A}(t-t_0)}z(t_0) \quad (7)$$

olduğundan [4], bulunan  $z(t)$  çözümü aynı dönüşüm matrisi ( $T(t)$ ) ile  $x(t)$  sistemine geri dönüştürülür ve

$$x(t) = T(t)z(t) = e^{A_1t}e^{\bar{A}t}e^{A_1t_0}x(t_0) \quad (8)$$

olarak elde edilir.

Eğer  $\dot{x}(t) = A(t)x(t)$  sisteminin özdeğerleri sabit değil ise, özdeğerler arasında bulunabilecek başka ilişkiler dönüşüm matrisinin bulunmasına yardımcı olabilir. Örneğin, eğer  $A(t)$  matrisinin özdeğerleri herhangi bir sürekli zaman fonksiyonunun sabit katları ise bu tip sistemler için ( $A_h$  sınıfı)

$$A_1A(t) - A(t)A_1 = \frac{\dot{A}(t)}{h(t)} - \frac{\dot{h}(t)A(t)}{h^2(t)} \quad (9)$$

ilişikisini sağlayan sabit elemanlı matrisi bulmak mümkündür [2,3]. Bu ilişkide  $h(t)$  özdeğerlerin taban fonksiyonudur ve öz

değerler  $\mu_1 = c_1h(t) \dots \mu_n = c_nh(t)$  şeklindedir. Bu sınıfa giren sistemlerin dönüşüm matrisi

$$T(t) = e^{A_1 \int_{t_0}^t h(k)dk} \quad (10)$$

olarak tanımlanır.  $x(t) = T(t)z(t)$  dönüşümü sistemi zamanla değişmeyen sisteme dönüştüreceğinden çözüm  $A_1$  sınıfı sistemlerde olduğu gibi elde edilir.

Eğer zamanla değişen doğrusal sistemin özdeğerleri bu iki özelliği de (sabit veya bir fonksiyonun katı) taşıyorsa, o sistemin çözümünü sağlayacak dönüşüm matrisinin bulunmasını sağlayan genel bir yöntem olmadığından, en iyimser yaklaşım, şanslı bir deneme yanılma girişiminin

$$\bar{A} = T^{-1}(t)A(t)T(t) - T^{-1}(t)\dot{T}(t) \quad (11)$$

denklemini sağlaması beklenir [2].

## 2. Yeni Bir Çözülebilirlik Şartı

Zamanla değişen sistemlerin modellenmesinde kullanılan yaklaşım  $A(t)$  matrisinin yapısını değiştirebilir ancak sistemin özdeğerlerini değiştirmez.  $A(t)$ 'nin yapısını değiştiren kanonik gerçekleştirme yöntemleri ile aynı özdeğerler için  $A(t)$  değişik şekillerde yazılabilir [5,6].

Sistemimizin özdeğerleri  $A_1$  ve  $A_h$  sınıfları için gereken özellikleri taşıyor ancak

$$\mu_1 = t^{k-1} - 1 \text{ ve } \mu_2 = t^{k-1} + 1 \quad (12)$$

şeklinde ise bu özdeğerlere sahip ikinci derece sistemin durum-uzay denklemi

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^{k-1} - t & 1 \\ -t^2 + 1 & t^{k-1} + t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. Bu sistemdeki  $A(t)$  matrisinin girdileri  $k$ 'ncü dereceden polinomlar içermektedir. Ancak öz değerleri (12) denklemini sağlar. Bu sistemi (5)'te verilen dönüşüm ile zamanla değişmeyen sisteme dönüştüren dönüşüm matrisi

$$T(t) = e^{t^k/k} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

olarak önerilmektedir. Bu dönüşüm ile tanımlanan zamanla değişen sistemin her hangi bir  $k$  için ( $k=1,2,\dots$ )  $\bar{A}$  zamanla değişmeyen sisteme dönüştürmektedir ve her  $k$  için

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

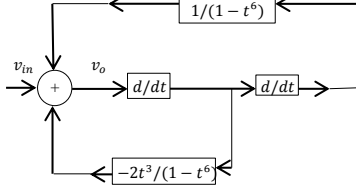
olarak elde edilmektedir. Bu dönüşüm uygulanarak elde edilen  $\dot{z}(t) = \bar{A}z(t)$  sisteminin çözümü ters dönüşüm uygulanarak, zamanla değişen sistemin çözümü

$$x(t) = T(t)e^{\bar{A}(t-t_0)}T^{-1}(t_0)x(t_0) \quad (15)$$

olarak elde edilir.

### 3. Örnek

İkinci derece zamanla değişen doğrusal sistemin işaret akış diyagramını Şekil.1'de gösterildiği şekilde ise,



Şekil 1: İkinci dereceden zamanla değişen sistem

sistemin giriş-çıkış ilişkisini veren ikinci derece diferansiyel denklem

$$\ddot{v}_o(t) - 2t^3\dot{v}_o(t) + (t^6 - 1)v_o = (t^6 - 1)v_{in} \quad (16)$$

şeklinde olur. Sistemin durum-uzay tanımının tek yapılı (homojen) karşılığı ise

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 - t & 1 \\ -t^2 + 1 & -t^2 + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

şeklinde yazılır. Sistemin özdeğerleri ve  $\mu_1 = t^3 - 1$  ve  $\mu_2 = t^3 + 1$ 'dir ve (12)'de verilen şartı sağlamaktadır. Zamanla değişen örnek sistemin sabit katsayılı sisteme dönüştürülmesi için

$$T(t) = e^{t^4/4} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t & 1 \end{bmatrix}$$

dönüşüm matrisi kullanılır ve dönüşen sistemin matematiksel modeli

$$\dot{z}(t) = \bar{A} z(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z(t)$$

ve  $z(t)$  için çözüm  $e^{\bar{A}(t-t_0)}z(t_0)$  olur. Bu çözüme ters dönüşüm uygulandığında, başlangıç anı  $t_0 = 0$  ve başlangıç değeri  $x(t_0) = x_0$  alındığında

$$x(t) = \varphi(t, 0)x_0 = T(t)e^{\bar{A}(t-0)}T(0)^{-1}x_0$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & t \\ t & t^2 + 1 \end{bmatrix} x_0$$

sonucu elde edilmektedir.

Sistemin girişi de hesaba katıldığında giriş ile çıkış arasındaki genel çözümü veren denklem

$$v_o(t) = C(t)\varphi(t, 0)x_0 + C(t) \int_0^t \varphi(t, \tau)B(\tau)v_{in}(\tau)d\tau + D(t)$$

şeklinde elde edilir. Burada C ve D, sırasıyla durum değişkenleri ve girdiyi çıkış ile ilişkilendiren matrislerdir.

### 4. Sonuç

Tanım kümesi değişkeni ile değişmeyen sıradan doğrusal sistemlerin tümü için analitik çözüm yöntemi mevcuttur. Ancak tanım kümesi değişkeni ile (genellikle zaman) değişen sıradan doğrusal sistemlerin tümü için geçerli olan genel bir analitik çözüm henüz tanımlanamamıştır. Bu nedenle, matematiksel model, oluşturulan her zamanla değişen sıradan doğrusal sistemler için farklı ve o sisteme özel dönüşüm matrisinin bulunması zorunluluğu vardır. Bulunan dönüşüm matrisi sistemi zamanla değişmeyen bir sisteme dönüştürebileceği gibi, analitik çözümü bilinen bir sınıfa da dönüştürebilir. Ancak ideal olan bu dönüşüm ile sistemin kolay çözülebilen sabit katsayılı bir sisteme dönüştürülebilmesidir.

Bu çalışmada özdeğerleri (12) numaralı denklemde verilen şekilde olan sistemler için uygun bir dönüşüm matrisi ve analitik bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Dönüşüm matrisi, sistemi, zamanla değişmeyen doğrusal bir sisteme dönüştürmektedir ve çözüm bilinen yöntemlerle kolaylıkla elde edilmektedir.

### 5. Kaynaklar

- [1] B. Kolman, D. R. Hill, *Elementary Linear Algebra*, Pearson Prentice Hall, (2004) 213-225.
- [2] M. Y. Wu, *Solution of certain classes of linear time varying systems*, Int. Journal of Control, 31(1) (1980)11-20.
- [3] M. Y. Wu, *Solution of certain classes of linear time varying systems*, Int. Journal of Control, 31(5) (1980) 937-945.
- [4] C. R. Wylie, L. C. Barrett, *Advanced Engineering Mathematics*, Mc Graw Hill, (1995) 857-914.
- [5] H. Güneylü, *A new solvable class linear time varying system*, M. Sc. Thesis, Gaziantep University, 2011.
- [6] İ. Dal, *Development of a solvable class of linear time varying systems*, M. Sc. Thesis, Gaziantep University, 2014.





### Veysi Gökhan

1990 yılında Ağrı’da doğdu. Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İngilizce) Bölümü’nden 2014 tarihinde mezun oldu.

Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı’nda “Görüntü İşleme Uygulamalarında Hızlı Gauss Filtre Tasarımı (Design of the Fast Gaussian Filters for Image Processing Applications)” konusunda yüksek lisans çalışmalarına devam ediyor. Eksim Holding bünyesinde faaliyet gösteren Dicle Elektrik Dağıtım Şirketi’nde Endeks Okuma Birimi bölge sorumlu mühendisi olarak çalışıyor. Ailenin en büyük çocuğudur ve bekarıdır. Şu anki ilgi alanları arasında Görüntü İşleme, Enerji Sistemleri, Programlama, Telekomünikasyon ve Elektrik Dağıtım alanları vardır. Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik İç Tesisat Hazırlama, Elektrik Tesislerinde Topraklama, C# ve Matlab eğitimlerini katılımda bulunmuştur.



### Hasan Güneşli

1981 yılında Diyarbakır’da doğdu. Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İngilizce) Bölümü’nden 2008 tarihinde mezun oldu.

Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Devreler ve Sistemler Anabilim Dalında “Zamanla Değişen Doğrusal Sistemlerde Çözülebilir Yeni Bir Sınıf (A New Solvable Class Linear Time Varying System)” konusunda yüksek lisans çalışmasını 2011 yılında tamamladı. Teknik Terimler Sözlüğü (Kürtçe-Türkçe-İngilizce), Matematik (Kürtçe, Orta öğretime yönelik) ve Fizik (Kürtçe, Liseye yönelik) kitaplarının yazarıdır. Eksim Holding bünyesinde faaliyet gösteren Dicle Elektrik Dağıtım AŞ’de Denetçi olarak çalışıyor. Ailenin 11 çocuğundan ortanca çocuğudur. Evli ve bir çocuk babasıdır. Elektrik Mühendisleri Odasında çeşitli görevler yürütmüştür.



### Arif Nacaroğlu

1958 yılında İstanbul Fatih’te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 1981 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Gaziantep Mühendislik Fakültesi’nden Elektrik Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Sırasıyla 1983 yılında yüksek lisans, 1989 yılında doktora çalışmalarını Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde bitirdi. Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı’nda 1993 yılında doçent ve 1999 yılında profesör unvanlarını aldı. Halen çalışmalarını analog ve sayısal devre analizi ve tasarımı, sinyal işleme, doğrusal, doğrusal olmayan, zamanla değişen sistemler, süzgeç tasarımları gibi konularda sürdürmektedir.

Halen Gaziantep Üniversitesi’nde öğretim üyesi olarak yaşamını sürdürmekte olan Arif Nacaroğlu iki dönem EMO Gaziantep Şube Başkanlığı görevinde bulundu. Nacaroğlu güncel görüşlerini Evrensel Gazetesi’nde haftalık yazılarıyla okuyucularla paylaşmaktadır.

# Binalar Arası Elektromanyetik Dalga Yayılımının Nümerik Modellenmesi

## Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Propagation Between Buildings

Özlem Özgün<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Hacettepe Üniversitesi, Ankara  
ozlem@ee.hacettepe.edu.tr

### Özet

Kablosuz cihazlara olan talebin artmasıyla birlikte, kentsel alanda radyo frekansı (RF) yayılımı ile ilgili çalışmalar daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Verici ile alıcı arasındaki sinyal gücü, birçok faktörden özellikle yayılım yolu boyunca binalardan ve nesnelere kaynaklanan yansıma, kırınım ve gölgeleme gibi faktörlerden oldukça etkilenir. Bu nedenle, modern kablosuz haberleşme sistemlerinin planlanmasında ve geliştirilmesinde kullanılabilen, farklı ortamlardaki sinyal gücünü tahmin edebilen etkin dalga yayılımı modellerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, kentsel alandaki karmaşık radyo dalga yayılımı problemlerinin çözümüne yönelik GO+UTD (geometrik optik+düzgün kırınım teorisi) ve iki-yönlü bölünmüş-adım parabolik denklem yaklaşımına dayanan PETOOL modelleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu modeller ayrıca, basit yayılım senaryolarında geçerli teorik bir model olan kırınım ekranlar modeli ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli nümerik simülasyon sonuçları sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Kentsel dalga yayılımı, geometrik optik (GO), düzgün kırınım teorisi (UTD), GO+UTD yazılımı, iki-yönlü bölünmüş-adım parabolik denklem, PETOOL yazılımı, kırınım ekranlar modeli, yol kaybı, yayılım faktörü.

### Abstract

With the increased demand for wireless devices, the study of radio frequency (RF) propagation in urban area has received much attention. The signal strength from transmitter to receiver is affected by many factors, especially reflection, diffraction, and shadowing due to buildings and objects along the path of propagation. Therefore, the planning and development of modern wireless communications systems requires effective propagation models to predict received signal strength in different environments. In this study, a comparative study of the GO+UTD (geometric optics + uniform theory of diffraction) tool and the PETOOL based on the two-way split-step parabolic equation are presented in the solution of complex radiowave propagation problems in urban area. These models are also compared with the diffracting screens model that is a theoretical model used in simple propagation scenarios. Various numerical simulations and conclusions are presented.

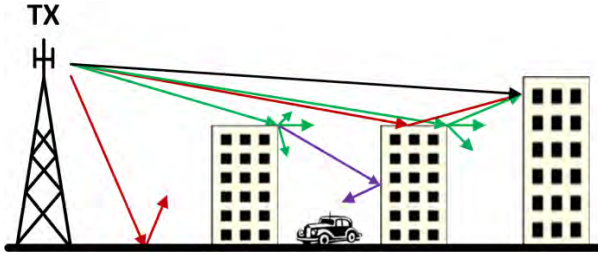
**Keywords:** Urban propagation, geometric optics (GO), uniform theory of diffraction (UTD), GO+UTD software, two-way split-step parabolic equation, PETOOL software, diffracting screens model, path loss, propagation factor.

### 1. Giriş

Kablosuz haberleşme sistemlerinin yaygınlaşması ve günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olması nedeniyle, elektromanyetik dalga yayılımının doğru ve hızlı bir şekilde modellenmesi ve şehir içindeki binalar arasındaki sinyal seviyelerinin tespiti önemli bir gerekliliktir. Radyo dalgaları yayılım modelleri genel olarak, bir elektromanyetik dalganın vericiden alıcıya ulaşmaya kadar yol boyunca uğradığı ve ortamdan kaynaklanan yansıma, kırılma, kırınım, vb. etkileri hesap ederek, *yol kaybı* veya *yayılım faktörü* parametrelerini hesaplar. Bu parametreler, radyo dalgalarının bir ortamda ilerlerken uğradığı kaybı ve serbest uzaydaki değerinden ne kadar farklılaştığını gösterirler ve bir haberleşme sistemindeki link bütçesi analizinin önemli bileşenleridirler. Radyo dalga yayılımı problemlerinde mesafeler dalga boyuna göre çok büyük olduğundan, momentler yöntemi, sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi iyi bilinen nümerik yöntemler (ayrıca HFSS, CST, vb. gibi bazı ticari yazılımlar) bilinmeyen sayısının çokluğu nedeniyle kullanılamaz. Geçmişte radyo dalga yayılımı modellemesi amacıyla, ölçüm sonuçlarına dayanan bazı ampirik modeller geliştirilmiştir [1,2]. Bunlar, gerçek ölçüm sonuçlarını bir eğriye uydurmaya çalışan ve fiziksel dayanağı olmayan modellerdir. Ayrıca, belirli parametreler ve ortamlar için geçerli olup, farklı yayılım senaryolarında geçerliliğini yitirmektedir. Ampirik modellerdeki zorlukların üstesinden gelmek için, binaların veya nesnelere bazı basit kanonik geometrilerle temsil edildiği teorik modeller önerilmiştir. Örneğin, Longley-Rice modeli [3], Bullington modeli [4], Lee modeli [5], ve Walfisch-Bertoni modeli [6,7] literatürde kullanılmış modeller arasındadır. Bu modeller hızlı olmasına karşın, karmaşık ortamlar için geçerliliğini yitirmektedir.

Elektromanyetik dalga yayılımı modellemesinde, yüksek frekans teknikleri olarak da adlandırılan, geometrik optik (GO) [8], geometrik kırınım teorisi (GTD) [9], düzgün kırınım teorisi

(UTD) [10], fiziksel optik (PO) [11] ve fiziksel kırınım teorisi (PTD) [12] gibi bazı asimptotik teknikler de geliştirilmiştir. Bu teknikler ışın temellidir ve yansıma, kırılma ve kırınım gibi yayılım mekanizmalarını doğru bir şekilde hesaba katabilirler. Şekil 1’de, bir dizi bina içeren tipik bir kentsel yayılım probleminde dalga ışınlarının yansıması ve kırınımı gösterilmektedir. Geometrik optik yöntemi, direk gelen ve yansıyan alanları hesaplar, ancak kırınım etkilerini dahil etmez. Keller, kırınım etkilerini hesaba katabilmek için, mükemmel iletken bir kama-ya ait Sommerfeld kırınım integralini asimptotik hesaplayarak bir kırınım katsayısı tanımlamış ve böylece geometrik kırınım teorisini geliştirmiştir. Ancak bu teknik, gelen ve yansıyan dalga gölge sınırlarında tekillik göstermektedir. Bu tekilliği aşmak ve gölge sınırları boyunca düzgün dalga davranışı elde etmek amacıyla düzgün kırınım teorisi geliştirilmiştir. Geometrik optik temelli bu yaklaşımlar dışında fiziksel optik temelli yaklaşımlar da mevcuttur. Fiziksel optik modeli, yüzeydeki alanı ve akımı tahmin eder ve yüzey akımının integralini olarak saçılan alanı hesaplar. Ancak bu model de kırınım etkilerini hesaba katmaz. Fiziksel kırınım teorisi ise, yüzey üzerinde düzensiz saçak (fringe) kenar akımlarını kullanarak kırınım etkilerini dahil eder. Yakın bir geçmişte, uzun mesafe radyo dalga yayılımını modellemek için MATLAB tabanlı GO+UTD isimli açık-kaynak bir yazılım yazarlar tarafından literatüre sunulmuştur [13,14]. Ayrıca, bir kama probleminin kırınım modellemesi için geliştirilen yazılımlar literatürde mevcuttur [15,16].



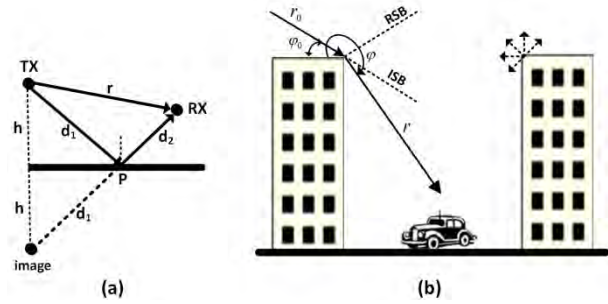
Şekil 1: Şehir içinde radyo dalgalarının yayılımı. (Siyah ışın: gelen dalga, kırmızı ışın: yansıyan dalga, yeşil ışın: kırınan dalga, mor ışın: kırınan/yansıyan dalga)

Uzun mesafe yayılım etkilerinin modellenmesi amacıyla yönelik en verimli yöntemlerden biri ise, rastgele kırılma etkilerinin ve karmaşık arazi profillerinin modellenmesine imkan sağlayan parabolik dalga denklemi modelidir [17]. Bu model, Helmholtz dalga denkleminin yaklaşık bir formuna dayanır ve menzil boyunca adımlama tipi bir algoritma ile hızlı ve doğru bir şekilde çözülebilir. Bununla birlikte, standart parabolik dalga denkleminin kısıtlarından birisi, yalnızca ileri doğru ilerleyen dalgaları dikkate almasıdır. Dolayısıyla, binalar, dik yamaçlı tepeler gibi engellerden geriye dönen dalgaları ve çoklu yansıma etkilerini hesaba katamaz. Geri dönen dalgaları da modelleyebilmek için iki-yönlü parabolik dalga denklemi modeli yazarlar tarafından geliştirilmiş ve MATLAB tabanlı açık-kaynak PETOOL yazılımı sayesinde hayata geçirilmiştir [18,19].

Bu çalışmada, binalar arası elektromanyetik dalga yayılımı problemi GO+UTD ve PETOOL modelleri kullanılarak ele alınacak, çeşitli senaryolar altında elde edilen simülasyon sonuçları sunulacaktır. Bu modeller ayrıca, basit yayılım senaryolarında kullanılabilen kırınım ekranlar modeli ile karşılaştırılacaktır. Bölüm 2’de modellerin teorik altyapısı özetlendikten sonra Bölüm 3’de nümerik sonuçlar sunulacaktır.

## 2. Teori

Bu bölümde sırasıyla GO+UTD, PETOOL ve kırınım ekranlar modellerinin teorik temelleri özetlenmiştir.



Şekil 2: GO+UTD modeli. (a) Geometrik optik (GO), (b) düzgün kırınım teorisi (UTD).

### 2.1. GO+UTD Modeli

GO+UTD yazılımı [13], binaları ve engelleri içeren araziye küçük parçalara böler ve her bir parça için farklı görüş hattı (line-of-sight) koşullarına göre geometrik optik (GO) ve düzgün kırınım teorisi (UTD) prensiplerini kullanarak çoklu yansıma ve kırınım etkilerini hesaplar. Tek bir alıcı noktası yerine ilgili bölgedeki tüm noktalarda alan değerlerini hesaplayarak verici antenin kapsama alanını oluşturur. İlk olarak, vericiden direkt gelen ışın aydınlatılmış tüm noktalar için hesaplanır. Bu sırada, verici antenin aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü (image) kaynakları belirlenir. Bu yüzeylerden yansıyan dalgalar bu görüntü kaynaklar kullanılarak hesaplanır. Daha sonra, bu yansıyan dalgaların aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü kaynakları bulunarak ikinci dereceden yansıyan dalgalar bulunur. Bu süreç, çoklu yansıma etkilerini hesaba katacak şekilde devam eder ve dalga sönümlenene veya hesaplama bölgesi dışına çıkıncaya kadar devam eder. Bununla birlikte, arazi üzerinde kırınım yolu açan sivri tepeler belirlenir ve hesaplama bölgesi içindeki kırınan dalgalar yine görüş hattı koşullarına göre hesaplanır. Sivri tepelerin ucu yeni kaynakmış gibi düşünülerek, yukarıdaki adımlara benzer şekilde bu kaynakların aydınlattığı yüzey parçaları ve bunlara ait görüntü kaynakları belirlenir. Böylece kırınımına uğradıktan sonra yüzeylerden yansıyan dalgalar hesaplanmış olur. Toplam alan, hesaplanan tüm alanların toplamı şeklinde ifade edilir.

GO yöntemi Şekil 2(a)’da gösterilmiştir. Düz bir yüzey üzerinde bulunan silindirik bir çizgi kaynaktan yayılan ve alıcı noktasına ulaşan ışınlar, direkt gelen ışın ve yüzeyden yansıyan ışındır. Bu noktadaki alan değeri, bu iki ışına ait alan değerlerinin toplamıdır. Yüzeyden yansıyan ışınlar, kaynağa ait görüntü kaynak kullanılarak hesaplanabilir. Aydınlatılmış bölgedeki toplam alan, aşağıda ifade edilen gelen ( $u^g$ ) ve yansıyan ( $u^y$ ) dalgaların toplamı şeklinde hesaplanır. ( $e^{j\omega t}$  zaman bağımlılığı kabul edilmiştir.)

$$u^g = u_0 e^{-jkr} / \sqrt{r} \quad (1)$$

$$u^y = u^g \Big|_P R_{y,d} \sqrt{\frac{d_1}{d_1 + d_2}} e^{-jkd_2} = u_0 R_{y,d} \frac{e^{-jk(d_1 + d_2)}}{\sqrt{d_1 + d_2}} \quad (2)$$



Burada  $u$ , sırasıyla yatay ve dikey polarizasyonda elektrik ve manyetik alanı ifade eder. Ayrıca,  $u_0$  gelen dalganın büyüklüğünü,  $k$  dalga numarasını,  $R_{y,d}$  ise yüzeyin yansımaya katsayısını ifade eder. Yatay polarizasyonda  $R_y = -1$  ve dikey polarizasyonda  $R_d = 1$ 'dir.

UTD yöntemi, kırınan alanları modellemek için kullanılır ve Şekil 2(b)'de gösterilmiştir. Binanın sivri köşelerinin verici anten veya yansıyan dalgalar tarafından aydınlatılması durumunda, her köşe için kırınan alanlar hesaplanır ve toplanır. Şekilde gösterilen tek bir köşeyi ele alalım. Köşeden kaynağa olan uzaklık ve kaynağa göre tanımlanan açı sırasıyla  $r_0$  ve  $\varphi_0$  ile gösterilsin. Benzer şekilde, köşeden alıcı noktasına olan uzaklık ve alıcı noktasına göre tanımlanan açı  $r$  ve  $\varphi$  ile gösterilsin. Dik açılı binayı modellemek için köşenin dış açısı  $\alpha = 3\pi/2$  alınır. Ancak, farklı açıdaki geometriler de benzer şekilde modellenebilir. UTD yönteminde kırınan alan aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{y,d}^k = u^g D_{y,d} e^{-jkr} / \sqrt{r} \quad (3)$$

Burada,  $u^g$  köşe noktasındaki gelen dalgayı ve  $D_{y,d}$  ise yatay ve dikey polarizasyondaki kırınım katsayısını ifade eder. Kırınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_{y,d} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \cot\left(\frac{\pi - \xi^-}{2n}\right) F(kLg^+ \xi^-) + \cot\left(\frac{\pi + \xi^-}{2n}\right) F(kLg^- \xi^-) \right\} \quad (4)$$

$$\mp \left\{ \cot\left(\frac{\pi - \xi^+}{2n}\right) F(kLg^+ \xi^+) + \cot\left(\frac{\pi + \xi^+}{2n}\right) F(kLg^- \xi^+) \right\}$$

Burada, (-) ve (+) sırasıyla yatay ve dikey polarizasyonda kullanılır. Ayrıca,  $n = \alpha/\pi$ ,  $\xi^{\pm} = \varphi \mp \varphi_0$ , ve  $F(X)$  is aşağıda verilen Fresnel integralidir.

$$F(X) = 2j\sqrt{X} e^{jX} \int_{\sqrt{X}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (5)$$

Ayrıca,  $L$  ve  $g^{\pm}$  aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{rr_0}{r+r_0}, \quad g^{\pm}(\xi) = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \xi}{2}\right) \quad (6)$$

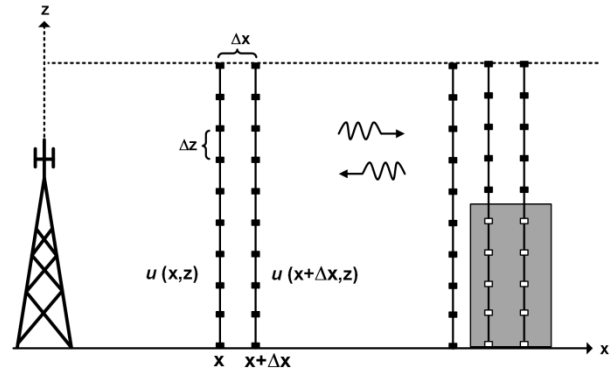
Burada  $N^{\pm} = (\pm\pi + \xi)/2n\pi$ , bu ifadeyi en yakın şekilde sağlayan tamsayıları ifade eder. Gölge sınırlarında, yani yansıyan dalga gölge sınırında (reflection shadow boundary RSB) ve gelen dalga gölge sınırında (incident shadow boundary ISB), cotanjant fonksiyonu tekillik içerdiği için, bu fonksiyonlar aşağıdaki yaklaşık ifadeyle yer değiştirebilir ( $\varepsilon \rightarrow 0$  için).

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) F(kLg^{\pm} \xi) \approx n \left[ \sqrt{2\pi kL} \operatorname{sgn}(\varepsilon) - 2kL\varepsilon e^{-j\pi/4} \right] e^{-j\pi/4} \quad (7)$$

Standart yüksek frekans teknikleri, çizgi kaynak aydınlatmasına dayanır. GO+UTD ise, çizgi kaynağa ek olarak pratik uygulamalarda kullanılan Gauss tipi antenden yayılan ışınmayı da modelleyebilir. Gauss kaynak tipine ait formülasyonlar [13]'de verilmiştir.

## 2.2. PETOOL Modeli

Standart parabolik dalga denklemi, radyo dalgalarının yataya yakın açılarda yavaş değiştiği varsayımına dayanır ve bu nedenle hızlı değişen faz terimini çözümden çıkararak Helmholtz denklemini yaklaşık olarak çözmeye çalışır. Bu sayede, problem bir başlangıç değer problemine (initial value problem) dönüştürülür ve Fourier bölünmüş-adım (Fourier split-step) tekniği sayesinde hızlı bir şekilde çözülebilir. Bu teknikte, antenin bulunduğu menzilden başlanır ve menzil boyunca adım adım ilerleyerek ve düz ve ters Fourier dönüşümleri uygulayarak dikey eksen boyunca alan değerleri hesaplanır (bknz. Şekil 3). Tek yönlü Fourier bölünmüş adım tekniğinde alan değeri aşağıdaki gibi hesaplanır. ( $e^{-i\omega t}$  zaman bağımlılığı kabul edilmiştir.)



Şekil 3: PETOOL modeli.

$$u(x + \Delta x, z) = \exp[ik(n-1)\Delta x] \times F^{-1} \left\{ \exp \left[ ik\Delta x \left( \sqrt{1 - \frac{p^2}{k^2}} - 1 \right) \right] F \{ u(x, z) \} \right\} \quad (8)$$

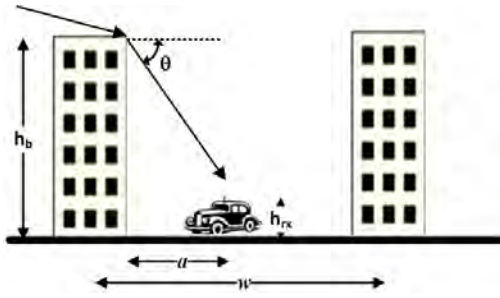
Burada,  $F$  Fourier dönüşümü,  $p = k \sin \theta$  dönüşüm dalga numarası,  $\theta$  yatayla yapılan açı ve  $n$  ise kırılma indisidir. Bu yaklaşımın bir avantajı, rastgele kırılma indisi profillerini rahatlıkla çözüme dahil edebilmesi, bu sayede dalganın kırılma (refraction) etkilerinin ve özellikle oluklama (ducting) etkilerinin kolayca modellenebilmesine imkan sağlamasıdır. Ayrıca, yataydaki adım boyutu dalga boyuna göre büyük seçilebildiğinden hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilmektedir.

Ancak, yukarıdaki standart parabolik dalga denklemi yöntemi tek yönde ilerler ve geriye dönen dalgaları hesaba katmaz. Engellerin olmadığı uzun mesafe dalga yayılımında bu yaklaşım doğru sonuçlar vermesine rağmen, engellerden dolayı çoklu yansımaya etkilerinin baskın olduğu problemlerde doğru sonuç vermez. Geri dönen dalgaları hesaba katmak için iki-yönlü parabolik dalga denklemi modeli ilk defa ileri-geri hareket eden bir algoritmayla yazarlar tarafından hayata geçirilmiş [18] ve MATLAB arayüzlü PETOOL yazılımı geliştirilmiştir [19]. Şekil 3'de gösterildiği gibi, dalga bir engele çarptığında ikiye ayrılmakta, engelin içine düşen değerleri sıfırlanarak ileri yönde yoluna devam etmekte, aynı zamanda engel üzerinde uygun sınır koşulları uygulayarak geriye doğru da hareketine devam etmektedir. İleri-geri hareket eden bu dalgalar her engele çarptığında aynı işlem yapılmakta ve hareket eden dalgalar toplanarak toplam alan hesaplanmaktadır. Bu süreç, hareket eden dalgalar sönmülmene veya hesaplama bölgesinden çıkana dek

devam eder. Bu teknikte, alt ve üst sınırların düzgün modellenmesi, kaynağa göre başlangıç alan değerinin hesaplanması, dikey yöndeki adım boyutu gibi meseleler önemlidir ve bunların detayları [19]'da mevcuttur.

### 2.3. Kırınımlı Ekranlar Modeli

Walfish ve Bertoni tarafından geliştirilen bu teorik modelde şehir içindeki binalar, aynı yükseklikteki soğuran kırınımlı ekranlar dizisi şeklinde modellenir [6,7] (bknz. Şekil 4). Ekranların köşelerinden alıcı noktasına doğru kırınım hesaplanarak ortalama bir alan değeri hesaplanır. Bu model, polarizasyondan bağımsızdır ve yayılım kaybını kabaca aşağıdaki gibi hesaplar.



Şekil 4: Kırınımlı ekranlar modeli.

$$L_{ds} = -L_{fs} - L_1 - L_2 - 18 \log \left[ \frac{17h_{rx} + d^2}{17h_{rx}} \right] \quad (9)$$

Burada,  $h_{rx}$  metre cinsinden verici antenin yüksekliğini ve  $d$  ise antenle bina arasındaki mesafeyi ifade eder. Ayrıca,  $F$  serbest uzay yayılım kaybıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_{fs} = 32.4479 + 20 \log(fd) \quad (10)$$

Burada,  $f$  MHz cinsinden frekansı temsil eder. Eşitlik (9)'daki  $L_1$  kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_1 = -10 \log \left[ \frac{G_{rx}(\theta)}{\pi k \sqrt{(h_b - h_{rx})^2 + a^2}} \left[ \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right]^2 \right] \quad (11)$$

Burada,  $h_b$  bina yüksekliğini,  $h_{rx}$  alıcı yüksekliğini,  $a$  bina ile alıcı arasındaki mesafeyi,  $G_{rx}(\theta)$  alıcı antenin köşe yönündeki kazancını,  $k$  dalga numarasını ve  $\theta = \tan^{-1}((h_b - h_{rx})/a)$  ise köşeden alıcıya giden ışının yatayla yaptığı açıyı ifade eder. Eşitlik (9)'daki  $L_2$  kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L_2 = -10 \log[G_{rx} Q^2] \quad (12)$$

Burada,  $G_{rx}$  verici antenin köşe yönündeki kazancıdır (genelde 1 kabul edilir).  $Q$  ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q = \begin{cases} \frac{w}{\sqrt{2\pi k \sqrt{(h_b - h_{rx})^2 + w^2}} \left[ \frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{2\pi + \theta_1} \right]}, & h_{rx} < h_b - 0.5\sqrt{\lambda w} \\ 2.35 \left[ \tan^{-1} \left( \frac{h_{rx}}{d \times 1000} \right) \sqrt{\frac{w}{\lambda}} \right]^{0.9}, & h_{rx} > h_b + \sqrt{\lambda w} \end{cases} \quad (13)$$

Burada,  $w$  metre cinsinden binalar arasındaki mesafe,  $\lambda$  dalga boyu ve  $\theta_1 = \tan^{-1}((h_b - h_{rx})/w)$ 'dir.

### 3. Nümerik Simülasyonlar

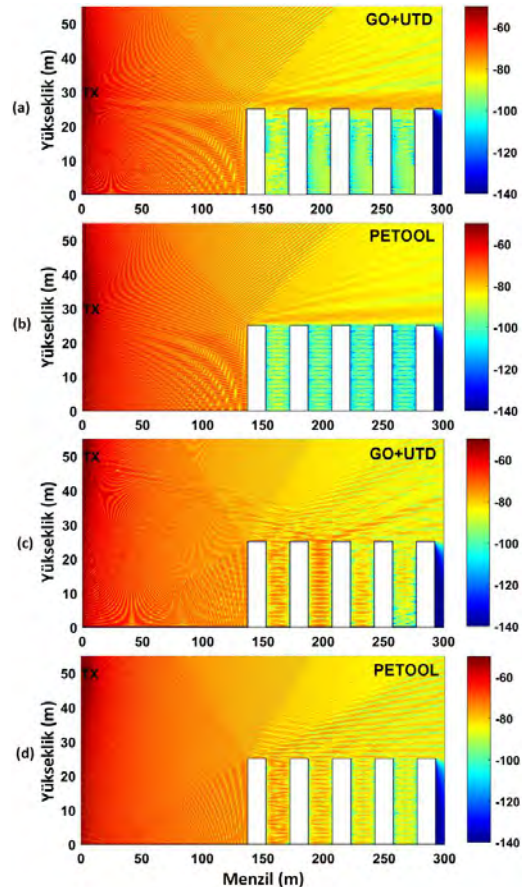
Bu bölümde yukarıda anlatılan üç yöntemle ait nümerik simülasyon sonuçları sunulacaktır. GO+UTD ve PETOOL modellerinde alan değerleri hesaplandıktan sonra yayılım faktörü (propagation factor) ve yol kaybı (path loss) hesaplanır. Yayılım faktörü, sözkonusu ortamda hesaplanan alan değerinin serbest uzaydaki değerine oranı şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$PF = 20 \log u + 10 \log x + 10 \log \lambda \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

Yol kaybı ise, verici antenden yayılan gücün alıcı noktasında hesaplanan güce oranı şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada,  $a_e$  dünyanın etkin yarıçapıdır.

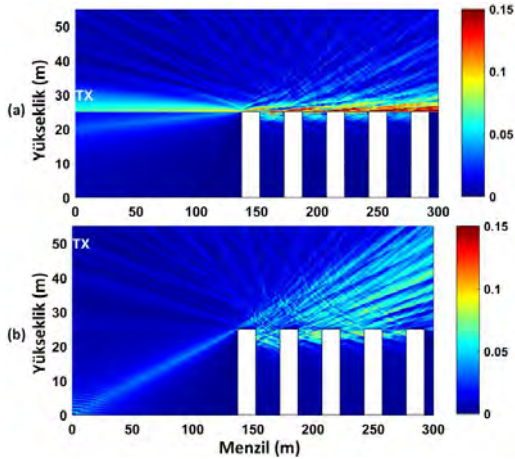
$$L = -20 \log u + 20 \log(4\pi) + 10 \log(a_e \sin(x/a_e)) - 30 \log \lambda \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

Öncelikle, eş yüksekliğe sahip binalar ele alınmıştır. Binaların yüksekliği  $h_b = 25\text{m}$  ve aralarındaki mesafe  $w = 35\text{m}$ 'dir. Antenle ilk bina arasındaki mesafe  $145\text{m}$ 'dir. Şekil 5'de, 900 MHz'de GO+UTD ve PETOOL ile elde edilen yol kaybı haritaları iki farklı anten yüksekliği ( $h_{rx} = 30\text{m}$  ve  $h_{rx} = 50\text{m}$ ) için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Polarizasyon yataydır ve omni anten kullanılmıştır. Menzil ve yükseklik adımları sırasıyla  $0.5\text{m}$  ve  $0.2\text{m}$  kabul edilmiştir. Şekil 6'da ise GO+UTD ile elde edilen kırınım alan haritaları sunulmuştur. Şekil 7'de ise yol kaybı haritaları  $1800\text{MHz}$ 'de  $30\text{m}$  anten yüksekliği için çizilmiştir. Şekil 5 ve 7'de görüleceği gibi,  $30\text{m}$  anten yüksekliğinde binalar arasındaki alan değerleri, daha

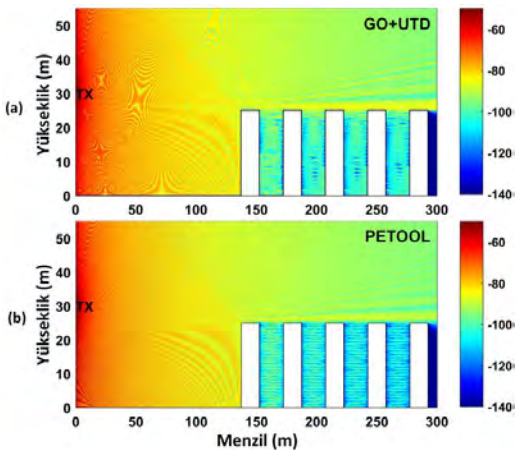


Şekil 5: 900 MHz'de yol kaybı haritaları. (a) GO+UTD,  $h_{rx} = 30\text{m}$ , (b) PETOOL,  $h_{rx} = 30\text{m}$ , (c) GO+UTD,  $h_{rx} = 50\text{m}$ , (d) PETOOL,  $h_{rx} = 50\text{m}$ .

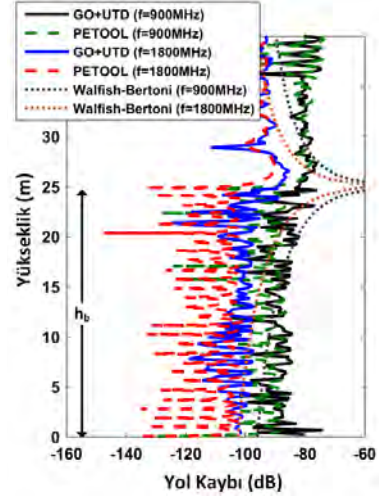
çok köşelerden kırınan dalgalardan ve az da olsa bina arasına girebilen yansıyan dalgalardan dolayıdır. Anten yükseldikçe binalar arasına girebilen dalgalar fazlaştığı için alan şiddeti artmakta ve çoklu yansıma etkilerinden dolayı girişim etkileri gözlenmektedir. Şekil 6(a)'daki kırınan alan haritasında, binaların köşeleri gölge sınırlarına denk geldiği için kırınan alanlarda düzensizlik görülebilmektedir. Şekil 5 ve 7 aynı anten yüksekliği için karşılaştırıldığında, frekans yükseldikçe binalar arasındaki yol kaybının arttığı gözlenmektedir. Yansıyan ve kırınan dalgaların şiddeti mesafeye daha hızlı azalmaktadır. Bu sonuçlardan GO+UTD ve PETOOL modellerinin beklenildiği gibi yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Şekil 8, 9 ve 10'da ise GO+UTD ve PETOOL modelleri Walfish ve Bertoni'nin kırınimli ekranlar modeliyle karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de anten yüksekliği 30m kabul edilmiştir ve 165m'deki (yani soldan birinci ve ikinci bina arasında) dikey yol kaybı profili iki farklı frekans için çizilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi frekans arttıkça yol kaybı artma eğilimindedir. Kırınimli ekranlar modelinin kaba bir tahmin olduğu ve özellikle çoklu yansıma etkilerini hesaba katabildiği gözükmemektedir. Şekil 9'da ise 900 MHz'da iki farklı anten yüksekliği için sonuçlar gösterilmektedir. Anten yüksekliği arttıkça yol kaybı azalma eğilimindedir. Şekil 10'da ise antenle binalar arasındaki mesafe iki katına çıkarılmıştır. Frekans 1800 MHz ve anten yüksekliği 50m'dir. Mesafe arttıkça yol kaybı artma eğilimindedir.



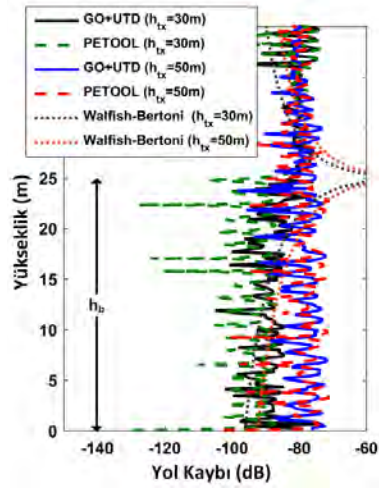
Şekil 6: GO+UTD ile hesaplanan 900 MHz'de kırınan alan haritaları. (a)  $h_{tx} = 30m$ , (b)  $h_{tx} = 50m$ .



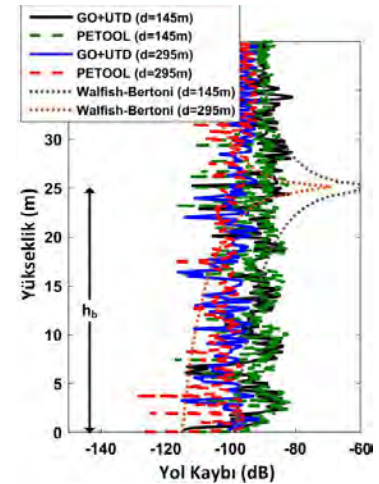
Şekil 7: 1800 MHz'de yol kaybı haritaları. (a) GO+UTD,  $h_{tx} = 30m$ , (b) PETOOL,  $h_{tx} = 30m$ .



Şekil 8: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $h_{tx} = 30m$ ).



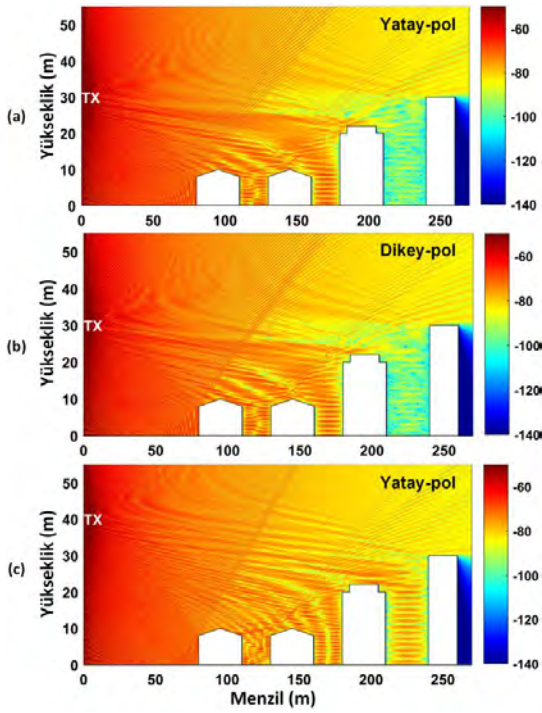
Şekil 9: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $f = 900 \text{ MHz}$ ).



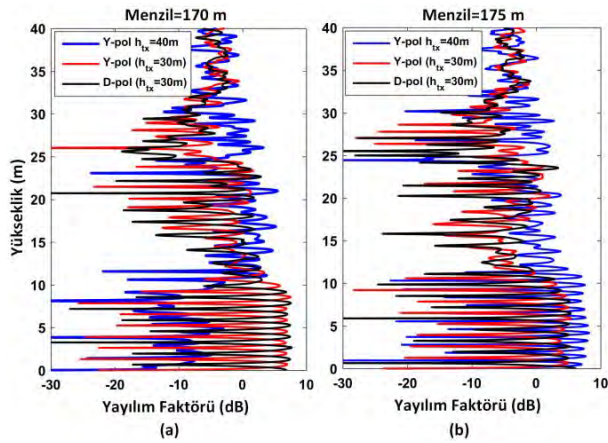
Şekil 10: Soldan birinci ve ikinci bina arasında dikey yol kaybı grafikleri ( $f = 1800 \text{ MHz}$ ,  $h_{tx} = 50m$ ) ( $d$ : antenle ilk bina arasındaki mesafe).



Şekil 11, 12 ve 13'de ise farklı geometrilere sahip binalardan oluşan bir şehir içi senaryosu PETOOL ile simüle edilmiştir. Şekil 11'de farklı polarizasyon ve farklı anten yükseklikleri için yayılım faktörü haritaları gösterilmiştir. Şekil 12'de ise bu haritaların 170m ve 175m mesafesinde elde edilen dikey grafikler çizilmiştir. Yatay ve dikey polarizasyonda dünya üzerindeki sınır koşullarındaki farklılık nedeniyle, yüzeye yakın yerlerdeki alan değerlerinin minimum ve maksimum değerleri yer değiştirmektedir. Ayrıca, anten yüksekliğine bağlı olarak girişim etkileri farklılaşacağından, birbirine yakın iki yerdeki sinyal şiddetinde büyük farklar oluşabilmektedir. Örneğin, Şekil 12(b)'de anten yüksekliği 40m'ye yükseltilince sinyal şiddeti artmasına rağmen Şekil 12(a)'da azalmaktadır. Girişim etkileri-

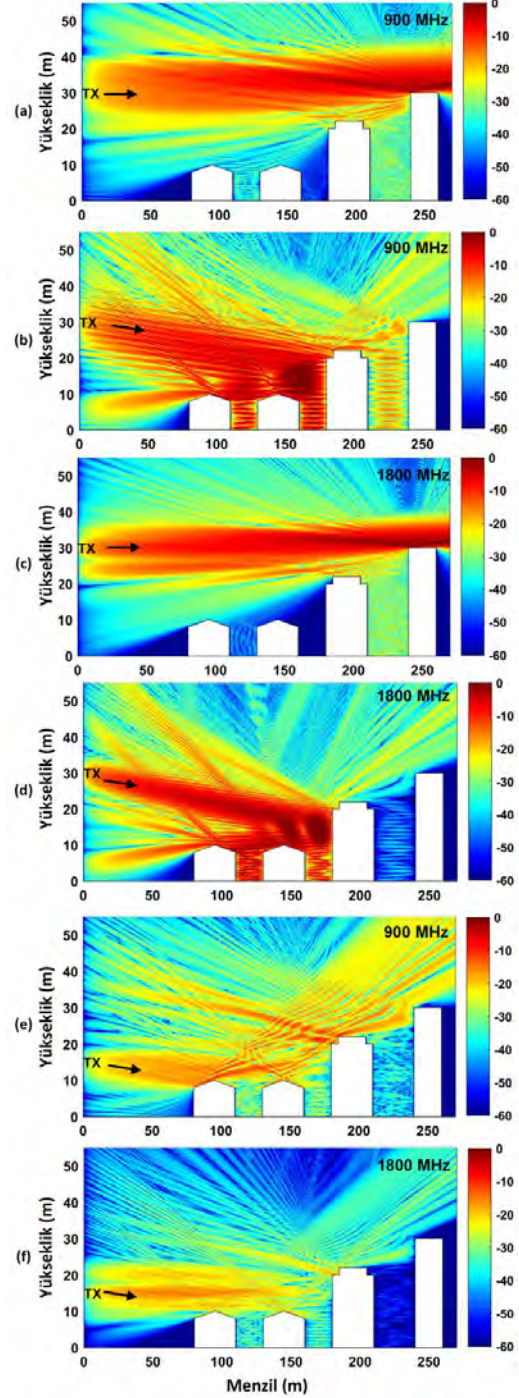


Şekil 11: PETOOL ile hesaplanan 900 MHz'de yayın yapan omni anten için yayılım faktörü haritaları. (a) Yatay polarizasyon,  $h_{tx} = 30m$ , (b) dikey polarizasyon,  $h_{tx} = 30m$ , (c) yatay polarizasyon,  $h_{tx} = 40m$ .

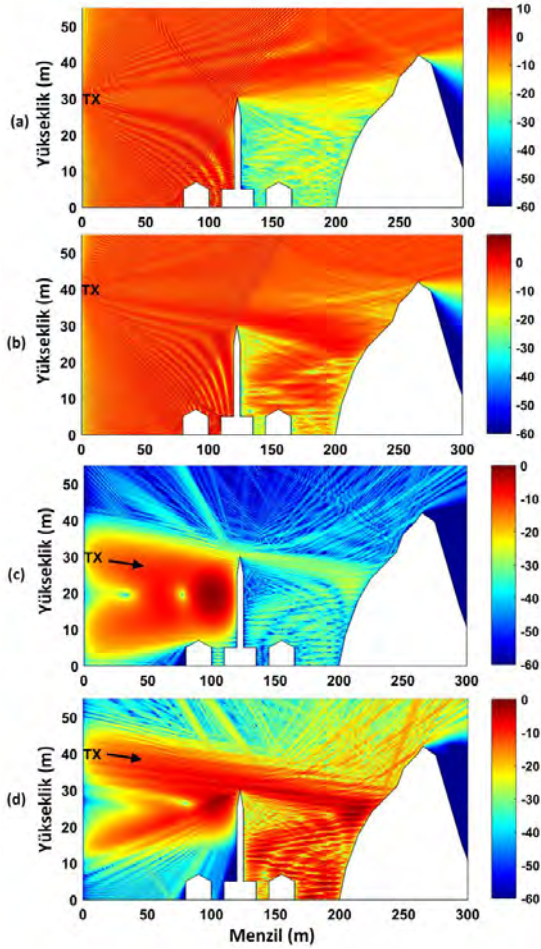


Şekil 12: Şekil 11'deki ikinci ve üçüncü bina arasında dikey yayılım faktörü grafikleri. (a) 170m menzil, (b) 175m menzil.

nin oluşturduğu bu durum Şekil 11(c)'de ikinci ve üçüncü bina arasındaki alan değerlerinden gözükmektedir. Şekil 13'de ise Gauss tipi bir antene ait yayılım faktörü farklı anten yükseklikleri ve frekanslar için gösterilmiştir. Son olarak, Şekil 14'de dağın yamacında yerleşmiş kırsal bir bölgedeki dalga yayılımı PETOOL ile simüle edilmiştir.



Şekil 13: PETOOL ile hesaplanan yatay polarizasyonda Gauss anten için yayılım faktörü haritaları. (a) 900 MHz,  $\theta_e = 0^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (b) 900 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (c) 1800 MHz,  $\theta_e = 0^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (d) 1800 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 30m$ , (e) 900 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 15m$ , (f) 1800 MHz,  $\theta_e = -5^\circ$ ,  $h_{tx} = 15m$ . ( $\theta_e$ : anten yükselti açısı)



Şekil 14: Kırsal bölgede PETOOL ile hesaplanan yatay polarizasyonda Gauss anten için yayılım faktörü haritaları. (a) Omni anten,  $h_{tx} = 30m$ , (b) omni anten,  $h_{tx} = 40m$ , (c) Gauss anten,  $h_{tx} = 30m$ , (d) Gauss anten,  $h_{tx} = 40m$ .

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, şehir içindeki binalar arasındaki dalga yayılımını modellemek amacıyla GO+UTD, PETOOL ve kırınımli ekranlar modelleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sunulan tüm örnekler, bir haberleşme sisteminde anten yüksekliğinin ve tipinin, frekansın, arazi üzerindeki binaların veya engellerin şeklinin ve konumunun oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Yol kaybının beklenildiği gibi frekansla ve mesafeyle arttığı gözlenmiştir. Anten yüksekliğine bağlı olarak binalar arasında girişim etkilerinin sinyal seviyesini etkileyebileceği gösterilmiştir. GO+UTD ve PETOOL modellerinin yakın sonuçlar verdiği, ancak kırınımli ekranlar modelinin kaba bir tahmin sağladığı sonucuna varılmıştır. PETOOL daha hızlı bir çözüm sağlaması nedeniyle bir avantaja sahipken, GO+UTD modeli ise kırınım ve yansıyan alanları tek başına gözleme şansını sağlaması nedeniyle avantajlıdır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., ve Fukua, K., "Field strength and its variability in UHF and VHF land-mobile radio service," *Rev. Elec. Commun. Lab.*, cilt. 16, no. 9, 1968.
- [2] Hata, M., "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, cilt. VT-29, no. 3, s. 317–325, 1980.
- [3] Longley, A.G., ve Rice, P.L., "Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain—A computer method," *ESSA Technical Report ERL*, 79-IOTS 67, 1968.
- [4] Bullington, K., "Radio propagation for vehicular communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, cilt. VT-26, no. 4, s. 295–308, 1977.
- [5] Lee, W.C.Y., *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1982.
- [6] Walfisch, J., ve Berton, H.L., "A theoretical model of UHF propagation in urban environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, cilt. 36, s. 1788–1796, 1988.
- [7] Siwiak, K., *Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications*, Artech House, 2007.
- [8] Kline, M., ve Kay, I., *Electromagnetic Theory and Geometrical Optics*, Wiley, Newyork, 1965.
- [9] Keller, J.B., "Geometrical theory of diffraction," *J. Opt. Soc. Amer.*, cilt. 52, s. 116-30, 1962.
- [10] Kouyoumjian, R.G., ve Pathak, P.H., "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc. IEEE*, cilt. 62, s. 1448-1461, 1974.
- [11] Bhattacharyya, A.K., *High Frequency Electromagnetic Techniques Recent Advances and Applications*, Wiley, 1995.
- [12] Ufimtsev, P.Ya., *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*, Tech Science Press, 2003.
- [13] Ozgun, O., "New software tool GO+UTD for visualization of wave propagation," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, cilt. 58, s. 91–103, 2016.
- [14] Ozgun, O., ve Sevgi, L., "Numerical techniques in modeling electromagnetic scattering from single and double knife-edge in 2D ground wave propagation problems," *ACES, Appl Comput Electrom.*, cilt. 27, no. 5, s. 376-388, 2012.
- [15] Hacivelioglu, F., Uslu, M.A., ve Sevgi, L., "A MATLAB-based virtual tool for the electromagnetic wave scattering from a perfectly reflecting wedge," *IEEE Antennas Propag Mag*, cilt. 53, s. 234-243, 2011.
- [16] Apaydin, G., ve Sevgi, L., "Penetrable wedge scattering problem and a MATLAB-based fringe wave calculator," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, cilt. 58, s. 86-93, 2016.
- [17] Levy, M.F., *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*, IEEE Electromagnetic Wave Series, London, 2000.
- [18] Ozgun, O., "Recursive two-way parabolic equation approach for modeling terrain effects in tropospheric propagation," *IEEE T Antenn. Propag.*, cilt. 57, no. 9, s. 2706-2714, 2009.
- [19] Ozgun, O., Apaydin, G., Kuzuoglu, M., ve Sevgi, L., "PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain," *Comput Phys Commun*, cilt. 182, no. 12, s. 2638–2654, 2011.



### Özlem Özgün

1998 yılında Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden lisans, 2000 yılında yine aynı Üniversite'den yüksek lisans, 2007 yılında ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden doktora derecelerini aldı. 1998-2000 yılları arasında Bilkent Üniversitesi'nde araştırma görevlisi, 2000-2004 yılları arasında TÜBİTAK-UEKAE'de araştırmacı, 2004-2005 yılları arasında ise ASELSAN'da uzman sistem mühendisi olarak çalıştı. 2007-2008 yılları arasında Pennsylvania State University, Electromagnetic Communication Lab'da TÜBİTAK desteğiyle doktora sonrası araştırmacı olarak bulundu. 2008-2012 yılları arasında ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü'nde yardımcı doçent, 2012-2015 yılları arasında TED Üniversitesi'nde doçent olarak çalıştıktan sonra, 2015 yılında Hacettepe Üniversitesi'ne doçent olarak katıldı. Dr. Özgün'ün araştırma alanları "sayısal hesaplamalı elektromanyetik, sonlu elemanlar yöntemi, bölge ayrışım tekniği, dönüşümlü elektromanyetik/optik, stokastik elektromanyetik problemler ve optimizasyon teknikleri"dir. Dr. Özgün'ün uluslararası ve ulusal kitap, dergi ve konferanslarda yayımlanmış 100 kadar eseri vardır. Dr. Özgün, 2007'de ODTÜ doktora tez ödülünü, 2009 yılında Leopold Felsen Vakfı elektromanyetikte üstün başarı ödülünü, 2014 yılında ise EMO Bilimsel Dergisi en iyi makale ödülünü almıştır.



**TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası**  
**EMO BİLİMSEL HAKEMLİ DERGİ YAZIM KURALLARI YÖNERGESİ**

“EMO Bilimsel Hakemli Dergi”, özgün bilimsel araştırmalar ile ilginç uygulama çalışmalarına yer veren ve bu niteliği ile hem araştırmacılara hem de uygulamadaki mühendislere seslenmeyi amaçlayan hakemli bir dergidir. İlgili alanı Elektrik Mühendisleri Odası’na kayıtlı tüm mühendislik disiplinleridir. Yayın dili Türkçe olup, dergide yayınlanacak makaleler ve kısa bildirimler ile ilgili yazım kuralları aşağıda verilmektedir.

Makalelerin basıma hazır tam metni, pdf dosyası olarak <http://edergiportal.emomerkez.net/sayilar> adresindeki derginin **Makale Yönetim Sistemi** üzerinden iletilmelidir. Makale dosyaları, ilk yazarın soyadına göre adlandırılmalı, aynı yazara ilişkin birden fazla bildiri iletilmesi durumunda verilen ada ek olarak numaralandırma da yapılmalıdır.

**Bilgisayar ortamında iletilmeyen makalelerin hakemlere gönderilmesi ve değerlendirilmesi olanağı bulunmamaktadır.**

**Makale yazım kuralları:**

- Makale sayfaları, A4 (210 mm x 297 mm) kağıt boyutunda hazırlanmalıdır.
- Sayfa kenar boşlukları:  
İlk sayfa için  
üst = 3 cm, alt = 3,7 cm, sol = 2 cm, sađ = 2 cm  
diğer sayfalar için  
üst = 2,5 cm, alt = 3,7 cm, sol = 2 cm, sađ = 2 cm.
- Makale herbiri 80 mm genişliğinde iki sütun halinde yazılmalıdır. Sütunlar arasında 10 mm aralık bırakılmalıdır.
- Makale, Times New Roman yazı tipi ile tek satır aralıklı, iki yana dayalı hizalı olarak yazılmalıdır.
- Makale başlığında, bildiri adı, yazar adları, yazarların çalıştıkları kurumların adları ve e-posta adresleri yer almalıdır.
- Başlıktan sonra dört satır boşluk bırakılarak yazılacak Türkçe özet ve İngilizce özet (abstract) kısımları en az 100, en çok 150 kelimedenden oluşmalıdır.
- Bölüm başlıkları, numaralandırılmalı, yalnızca baş harfleri büyük harflerle yazılmalı ve sütuna ortalanmalıdır.
- **Makalede kullanılacak yazı tipi boyut ve biçimleri:**

Başlık	14 <b>Kalın</b> Yalnızca baş harfleri büyük
Yazar adları	12 <i>İtalik</i>
Kurum adları	12
Özetler	9 <i>İtalik</i>
Alt ve üst simgeler	7
Başlıklar	11 <b>Kalın</b>
Metin	9

- Makale değerlendirme sonuçları, sisteme yüklendikten en geç 2 ay sonra e-posta ile yazarlara bildirilecektir. Aksi belirtilmedikçe yazışmalarda birinci yazarın adresi kullanılacaktır.

Tüm yazışmalar ve ilişkiler <http://bilimseldergi.emo.org.tr> web sayfasında açılacak olan alanda elektronik ortamda yapılacaktır.

Bu yazım kuralları, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu ile EMO Bilimsel Hakemli Dergi’nin yayın kurulunca yürütülür.







