

# Haziran'11

## June'11

Sayı/Number: 1 Cilt/Volume: 1  
Yıl/Year: 2011  
ISSN: 1309-5501

### Yayın Sahibi

TMMOB Elektrik Mühendisleri  
Odası adına  
Cengiz GÖLTAŞ

### Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Erdal APAÇIK

### Yayın İdare Merkezi

İhlamur Sokak No: 10 Kat: 4  
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

Emre METİN

### Yayın Türü

6 Aylık Süreli Yayın

### Basım Adedi

5000

### Basım Tarihi

Haziran 2011

### Sayfa Düzeni

PLAR

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

### Baskı Yeri

Mattek Matbaacılık  
Basım Yayın Tanıtım Tic. San. Ltd. Şti.  
Adakale Sokak No: 32/27 Kızılay/Ankara  
Tel: (0312) 433 23 10 • Faks: (0312) 434 03 56

# 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. Bahri ERCAN

Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU

Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR

Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan KUNTMAN

İstanbul Teknik 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 EDITÖR/EDITOR IN CHIEF

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

*Çukurova Üniversitesi*

### EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

**Prof. Dr. Bahri ERCAN**

*Hacettepe Üniversitesi*

**Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU**

*Ortadoğu Teknik Üniversitesi*

**Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR**

*Bilkent Üniversitesi*

**Prof. Dr. Hakan KUNTMAN**

*İstanbul Teknik 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 AŞ
Prof.Dr. Ayhan ALTINTAŞ	Bilkent Üniversitesi	Fikret KÜÇÜKDEVECİ	Tepa AŞ
Prof.Dr. Volkan ATALAY	ODTÜ	Prof.Dr. Duran LEBLEBİCİ	ODTÜ
Serdar BOZKURT	SIEMENS	Prof.Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU	Gate Elektronik
Prof.Dr. Alinur BÜYÜKAKSOY	GYTE	Turgay MALERİ	Tübitak UME
Prof.Dr. Işık ÇADIRCI	Hacettepe Üniversitesi	Dr. Ahmet MEREV	Drexel Üniversitesi
Doç.Dr. Hakan ÇAĞLAR	Anel	Prof.Dr. Banu ONARAL	İTÜ
Dr. Semih ÇETİN	Cybersoft	Prof.Dr. Sermin ONAYGİL	Tübitak MAM Bilişim Enstitüsü
Prof.Dr. İnci ÇİLESİZ	İTÜ	Prof.Dr. M. Bülent ÖRENCİK	İTÜ
Bülent DAMAR	Pelka	Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR	Kadir Has Üniversitesi
Prof.Dr. Oğuz DİKENELLİ	Ege Üniversitesi	Prof.Dr. Erdal PANAYIRCI	Boğaziçi Üniversitesi
Doç.Dr. Ali Hikmet DOĞRU	ODTÜ	Prof.Dr. Bülent SANKUR	Vestel
Dr. Hakan ERDOĞMUŞ	IEEE	Tarkan TEKCAN	Tübitak UEKAE
Prof.Dr. Muammer ERMİŞ	ODTÜ	Dr. Erkan TEKMAN	İTÜ
Prof.Dr. Osman EROĞUL	GATA	Doç.Dr. Belgin TÜRKAY	Ahmet Tanık UZUNKAYA
Prof.Dr. H. Bülent ERTAN	ODTÜ	Ahmet Tanık UZUNKAYA	Entes AŞ
Doç.Dr. H. Özcan GÜLÇÜR	Boğaziçi Üniversitesi	Prof.Dr. Yekta ÜLGEN	Boğaziçi
Prof.Dr. Yusuf Ziya İDER	Bilkent Üniversitesi	Davut YURTTAŞ	Inform AŞ
Prof.Dr. Yorgo İSTEFANAPULOS	Işık Üniversitesi		

## ÖNSÖZ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası'nın yasal sahibi olduğu "EMO Bilimsel Dergi"nin ilk sayısını sunmaktan büyük bir mutluluk duymaktayız.

Yayın dili Türkçe olan "EMO Bilimsel Dergi"de "Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği" alanlarında en az ulusal düzeyde bilimsel ve/veya teknolojik özgünlük içeren bilimsel makalelerin yayımlanması amaçlanmaktadır.

Elektrik Mühendisleri Odası 41. Dönem Yönetim Kurulu Başkanı Musa Çeçen ve E. Orhan Örücü'nün ısrarlı gayretleri ile Kasım 2009'da alınan bilimsel dergi yayınlama kararı başta Yönetim Kurulu Başkanı Cengiz GÖLTAŞ olmak üzere 42. Dönem Yönetim Kurulu'nun da destekleri ile hayata geçirilebilmiştir.

İlk yılında dergimizin iki sayı olarak yayınlanması kararlaştırılmıştır. Derginin izlenebilirliğini artırabilmek amacıyla her makale için kısa bir İngilizce özet verilmektedir. Özel durumlarda geniş Türkçe Özet olması koşuluyla İngilizce bildirimlerin de kabul edilmesi öngörülmüştür.

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.

Ülkemiz üniversitelerinde, sanayisinde ve diğer araştırma kurumlarında yürütülen bilimsel ve/veya teknolojik çalışmaların paylaşılacağı bir ortam yaratılması arzusu ile yola çıktık. Paylaşma konusunda araştırmacıların hassasiyetini de dikkate alarak zor bir işe kalkıştığımızın farkında olduğumuzu belirtmek isteriz. Amacımız; "IEEE gibi bir dergi" ya da "ikinci bir TÜBİTAK Elektrik Dergisi" olmak değil. En az ulusal düzeyde bilimsel ve/veya teknolojik özgünlük içeren çalışmaları Türkçe yayımlayarak akademik çalışmaları sanayiye ve sanayide yapılan çalışmaları da akademik ortama taşımayı hedefliyoruz. Bilginin çoğalmasını sağlamanın en iyi yolunun "paylaşma" olduğu gerçeğinden hareketle doğru bilginin doğru biçimde paylaşılmasını amaçlıyoruz. Derginin Türkçe olarak yayınlanmasının Türkçe'nin "bilim ve teknoloji dili" olarak gelişmesine de önemli katkılar sağlayacağına inanıyoruz.

Dergide (i) Akademik ve/veya Teknolojik Bilimsel Makale, (ii) Kısa Bilimsel Makale, (iii) Editöre Mektup (daha önce çıkmış yazılara ilişkin), (iv) Temalı Derleme Makale, (v) Özel Sayı Makalesi türünde makalelere yer verilecektir.

Dergiye yayımlanmak üzere gönderilen makaleler Yayın Kurulu tarafından belirlenen konunun uzmanı üç bağımsız hakem tarafından incelenmekte ve yayınlanma kararı hakem görüşleri doğrultusunda yine Yayın Kurulu tarafından verilmektedir.

Derginin yayın politikasında kaliteden ödün verilmeyecektir. Bu süreçte başta hakemlerin seçilmesi değerlendirmelerin izlenmesi konuları olmak üzere Yayın Kurulu ile Danışma Kurulu'na da önemli görevler düştüğünü biliyoruz. Derginin en kısa sürede "Engineering Index" daha sonra da Science Citation Index veri tabanına girmesine gayret edilecektir. Ayrıca, Üniversitelerimizde "Akademik Atama ve Yükseltme Kriterleri" arasında EMO Bilimsel Dergi'nin yer alması için çalışmalar yapılmaktadır. Derginin her sayısı başta Yükseköğretim Kurulu ve Üniversitelerarası Kurul olmak üzere üniversite rektörlerine, ilgili dekanlara ve bölüm başkanlarına iletilecektir.

Bilimsel makalelerin değerlendirilmesinde hakemlik görevi alan meslektaşlarımıza değerlendirdikleri her makale için TMMOB Bilirkişilik Yönetmeliği uyarınca 250.80 TL bilirkişilik bedeli ödenmektedir.

Ayrıca, yıl içinde yayımlanan “Akademik ve/veya Teknolojik Bilimsel Makale” türündeki makaleler arasından hakem değerlendirmesine göre en yüksek puanı alan makaleye o yılın “En İyi Makale Ödülü” verilecektir. Ödül alan makalenin yazarına bir yurtdışı bilimsel toplantıya bildiri sunmak üzere katılması durumunda yol, konaklama ve kayıt ücretlerini karşılamak üzere 3.000 TL’ye kadar destek verilecektir. Ödül verilen makalenin yazarının birden fazla olması halinde destek sadece yazarlardan birisine verilir ve hangi yazarın destekten yararlanacağını yazarlar kendi aralarında belirleyeceklerdir.

Derginin tüm teknik çalışmaları EMO Genel Merkezi’nde Teknik Editör E. Orhan Örucü ve Teknik Sekreter Emre Metin tarafından yürütülmektedir. Derginin internet üzerinden de yayınlanmasını sağlayan <http://bilimseldergi.emo.org.tr> adresindeki sanal dergi sayfası ve <http://bilimseldergi.emo.org.tr/yazar>, <http://bilimseldergi.emo.org.tr/hakem> ve <http://bilimseldergi.emo.org.tr/editor> adreslerinden erişilen makale yönetim sistemi Sayın Örucü ve Sayın Metin’in yardımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Yayın Kurulu’na her konuda yardımcı ve yol gösterici, çözüm üretici tutumlarıyla çok büyük destek olmuşlardır.

Derginin sürekliliğinin sağlanması konusunda kaliteden, özgünlükten ödün vermeden okuyucu ve yazar kitlesini tutabilmenin zorluğunu biliyoruz. Uluslararası saygınlığı olan dergiler halihazırda varken niçin EMO Bilimsel Dergi’de yayınlanmasını anlatabilmemiz gerek. Özgünlük konusunda bu düzeydeki dergilerle rekabete kalkışmayacağımızı baştan belirttik, o nedenle, özgünlük ve yenilik anlayışımızı “en az ulusal düzeyde” şeklinde belirledik. Zaman içinde bugün koyduğumuz çitayı daha yukarıya çekebileceğimize ve bu sürede sanayi kuruluşlarımız ile araştırmacılarımızın da Ar-Ge çalışmaları sonuçlarını yayınlama alışkanlığını kazanacağına inanıyoruz.

Ülkemiz ve EMO topluluğu adına büyük ümitlerle çıktığımız bu yolda desteklerini esirgemeyen Danışma Kurulu üyelerimize, 41nci ve 42nci Dönem EMO Başkanları ve Yönetim Kurulu üyeleriyle tüm çalışanlarına, yazarlarımıza ve hakemlik yapan araştırmacılarımıza gönülden teşekkürlerimizi ve saygılarımızı sunarız.

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

## BAŞLARKEN

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) olarak uzun dönemdir planladığımız bir yayının ilk sayısını çıkarmanın kıvancı içindeyiz. Üyelerimizin ve EMO alanındaki disiplinlerin gereksinimi olan hakemli bilimsel bir derginin Odamızca çıkarılması hep gündemimizde idi. Prof. Dr. A.Hamit Serbest hocamızın özverili çabaları, 41.Dönem Yönetim Kurulu Başkanı Musa Çeçen'in takipçiliği ve E.Orhan Örucü ile Emre Metin'in katkılarıyla uzun soluklu bir projenin ilk ürünü elinizde. Bu süreçte emeği geçen, başta yukarıda saydıklarım olmak üzere herkese teşekkür ederiz.

İlk sayısı Aralık 1956'da çıkan Elektrik Mühendisliği Dergisi'nin 442. sayısı Mayıs 2011'de yayımlanmıştır. Süreli yayınımız yanında düzenlediğimiz etkinlikleri kitap haline getirirken, meslek alanlarımıza giren teknik kitaplar da basıyoruz. Teknolojinin gelişimiyle giderek yaygınlaşan e-kitap olanağını da Odamız etkili bir şekilde kullanmakta olup, e-kitap yayınlarımız EMO İnternet sitesi üzerinden tüm kamuoyunun hizmetine açık olarak sunulmaktadır. Yaygın bir alanda, çok uzun yıllardan beri süren yayın hizmetimizde EMO Bilimsel Dergi'nin çok özel bir yeri olacaktır.

Bilimsel Dergi gereksinimi nereden çıktı? TÜBİTAK, üniversiteler ve hatta IEEE gibi kuruluşların yayınladığı uluslararası bilimsel ve hakemli dergiler dururken biz böyle bir çalışmaya neden gereksinim duyduk?

45 bine yaklaşan faal üyemiz bilindiği gibi çok farklı alanlarda mesleklerini yürütmektedirler. Oda çalışmalarını çerçevesinde bu geniş yelpazenin gereksinimlerini karşılamaya çalışırken, bilimsel ve akademik çalışma yürüten üyelerimizle kurduğumuz bağlarda eksikliklerimiz olduğunu düşündük. Her ne kadar 2 yıllık çalışma dönemi içinde sayıları nerede ise 30'u bulan kongre ve sempozyum etkinliklerimiz bu ilişkiyi amaçlasa da hakemli bir yayın ortamımız yoktu. Öncelikle böyle bir dergi ile bu açığı kapatmak istedik. Ülkemizdeki özgün bilimsel ve/veya teknolojik araştırma- geliştirme çalışmalarını EMO üyelerine ve kamuoyuna Türkçe olarak duyuracak, olabildiği kadar yüksek düzeyli bir dergiyi çıkarabileceğimizi yaptığımız ön görüşmeler sonucu anladık.

Meslek örgütü olarak her üyeye eşit mesafede bir yaklaşımda olmamız nedeni ile böyle bir derginin özellikle tarafsız olmasının güvencesi olduğumuzu düşündük. Ülkemizde benzeri dergiler, ne yazık ki güvenilirlik ve kapsayıcılık sorunları yaşamakta, biraz da zorlama ile çıkmakta. Yine bu dergilerin bir kısmı, çıkaran kurumun politikası gereği çok farklı disiplinleri kapsayabilmektedir. Elinizdeki dergi ise temel olarak; elektrik, elektronik, bilgisayar ve biyomedikal alanlarını kapsayacaktır. Uzak hedefimiz, saydığımız bu dört ana disiplinde de ayrı dergiler çıkarmaktır.

Bu dergide en önem verdiğimiz konu; derginin bilimsel kimliğini, saygınlığını ve sürekliliğini korumak üzere çalışmalarındaki bağımsız kimliği olacaktır. Yayın politikası sürdürülürken Editörler Kurulu'nun belirleyeceği yapısına her zaman özen gösterilecektir. Bu oluşuma Danışma Kurulu üyelerimiz ve katkı koyacağına inandığımız Hakemler de dahildir. Odamız bu çalışmada gereken altyapı desteğini her zaman verecek, derginin özgün kimliği ile yayını konusunda özgür bir ortamın güvencesi olacaktır.

Yine önem verdiğimiz bir husus da sayıları plansız bir biçimde arttırılan programlarda görev yapan, özellikle yeni ve genç öğretim üyelerinin gereksinimini karşılamaktır. ÖSYM 2009-2010 istatistiklerine göre, 98'i devlet 77'si vakıf olmak üzere 175 üniversitede EMO alanına giren programlarda toplam 47 bin 671 öğrenci eğitim görmektedir. Her sene bu programlara 11 bin 617 yeni kayıt olmakta ve her yıl 6 bin 541 mezun verilmektedir. Toplamda yaklaşık 48 bin öğrenciye, 2 bin 218 öğretim üyesi eğitim vermektedir. Rakamların çarpıcılığı ve diğer acil gereksinimler bir yana, öğretim kadrosu yetiştirilmesi de can alıcı bir sorun olarak gündemdedir. İşte dergimizin bu gündeme de yardımcı olacağını düşünmekteyiz. Özellikle, Science Citation Index (SCI) Dergileri'nde yabancı dilde yayın yapmakta zorlanan genç üyelerimiz için bu güçlüğü içermeyen bir olanak yaratacağımızı düşünmekteyiz.

Bu yardımcı olmanın bizce en önemli tarafı da Türkçe'nin bir bilim dili olarak gelişmesi ve önünün açılmasıdır. Bilgiye kolayca ulaşmanın ve paylaşmanın aracı olarak dergimizin en temel özelliği, dilinin "Türkçe" olmasıdır. Kısa veya genişletilmiş İngilizce özet kısmı olsa da dergi dilinin Türkçe olması vazgeçmeyeceğimiz en temel özelliklerin başında gelmektedir. Bu derginin Türkçe'nin bir bilim dili olarak gelişmesine ve zenginleşmesine hizmet edeceğini düşünüyoruz.

Ülkemizde eksiklik olarak gördüğümüz bir diğer önemli olay, arzu edilen düzeyde olmasa da yaygınlaşan Ar- Ge çalışmaları, teknopark oluşumları ve inovasyon ürünlerinin yazılı hale getirilememesi veya getirilse de basılacağı/yayınlanacağı bir ortam bulunmamasıdır. Dergimizin bir temel amacı da bu eksikliği kapatmak olacaktır.

Yılda iki sayı olarak yayınlamayı planladığımız Dergi'nin uluslararası indekslere girmesi, taranılır ve çok sayıda atıf alan bir dergi olması, amaçlarımızın gerçekleşmesi için önceliklerimiz arasında yer almaktadır. SCI ölçütlerini sağlayabilecek bir yayın olacağız. Türkiye'de yayınlanmakta olup da SCI tarafından taranan dergilere baktığımızda şunları görmekteyiz: Bugün itibarı ile Türkiye kaynaklı hiçbir dergi SCI çekirdek alanına girebilmiş değildir. Genişletilmiş SCI alanında ise 30 adet Türkiye kaynaklı dergi vardır. Bu 30 derginin 18 adedi tıp ve tıp ile ilişkili alanlardadır. Temel bilimlerin çeşitli dallarını kapsayan derginin yanı sıra 4 adette mühendislik (sırası ile makine, inşaat, tekstil ve elektrik mühendisliği) dergisi bulunmaktadır. 4 mühendislik dergisinden biri ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, biri EÜ Araştırma- Uygulama Merkezi, biri TÜBİTAK tarafından çıkarılırken, bunlardan yalnızca Teknik Dergi İnşaat Mühendisleri Odası (İMO) yayın organıdır. İlk sayısı Ocak 1990 yılında çıkan ve 21 yıldır süren bu yayın için İnşaat Mühendisleri Odamızı yürekten kutluyoruz. Bizim dergimizin de bu aşamaya geleceğine olan inancımız tamdır.

EMO Bilimsel Dergi için yola çıkarken yayınladığımız davet mektubu üzerinde anlaşılan mutabakat metnimiz temel yayın ilkelerimizdir. Dergi'nin başarıya ulaşması yayın ilkelerini özenle korumaya, özellikle özgünlükten ödün vermeden çıtayı olabildiğince yüksek tutmaya bağlıdır.

Davetimizi kabul eden başta dergimizin baş editörlüğünü üstlenen Prof. Dr. A. Hamit SERBEST olmak üzere, diğer editörlerimiz Prof. Dr. Hakan KUNTMAN, Prof. Dr. H. Altay GÜVENİR, Prof. Dr. Murat EYÜBOĞLU ve Prof. Dr. Bahri ERCAN'a bu zorlu ve keyifli olacağını umduğumuz çalışmayı kabul ettikleri için en derin şükranlarımızı sunuyoruz. Dergi gündeme geldiğinden bu yana ortaya koydukları, bizzat şahit olduğum inanılmaz ve anlatılamaz performansları için teşekkür ediyorum. Ayrıca özel bir teşekkür de Musa ÇEÇEN'e, E. Orhan ÖRÜCÜ'ye ve Emre METİN'e. Onlar olmasaydı bu kadar çabuk ve kolay mesafe kat edemedik herhalde.

Bir teşekkür de Odamızın bilimsel hakemli dergisi için çağrıda bulunduğumuz ve derginin Danışma Kurulu'nda yer almayı kabul eden değerli üyelerimize.

Son bir teşekkür; aslında bu derginin gizli kahramanları olacak, hakemlik yapan üyelerimize. Onlar olmasa dergimizi bu kadar çabuk ve kaliteli çıkaramazdık. Onca işleri arasında bu işe emek vermelerine müteşekkirimiz.

Saydıklarımın dışında bu çalışmada emeği geçen ve burada isimlerini sayamayacağımız kadar çok olan değerli dostlarımıza da özel sevgi ve saygılarımızı iletiyoruz.

Umarım bu dergi amacına hizmet eder, meslek alanımızda çok önemli görevleri yerine getirir ve bir kilometre taşı olur.

*Haziran 2011*  
*Cengiz GÖLTAŞ*  
*TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*  
*42. Dönem Yönetim Kurulu Başkanı*

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Kavramlar Arası Anlamsal İlişkilerin Türkçe Sözlük Tanımları Kullanılarak Otomatik Olarak Çıkarılması ..... 1**  
*Automatic Extraction of Semantic Relationships Using Turkish Dictionary Definitions*  
*Emre Yazıcı, M. Fatih Amasyalı*
- MIMO Sistemler için Gelişmiş Uzaysal Modülasyon Teknikleri ..... 15**  
*Advanced Spatial Modulation Techniques for MIMO Systems*  
*Ertuğrul Başar, Ümit Aygözü, Erdal Panayırıcı, H. Vincent Poor*
- HSA (Hücreyel Sinir Ağ)-Tabanlı Otonom Olmayan MLC Devresinin Donanımsal Gerçekleştirmeleri ..... 27**  
*Hardware Implementations for CNN (Cellular Neural Network)-Based Nonautonomous MLC Circuit*  
*Fatma Yıldırım Dalkıran, Enis Günay, Recai Kılıç*
- Elektrik Enerjisinin Bölgeler Arası Alışverişinin Optimizasyonu..... 31**  
*Optimization of Inter Area Transfer Capability on Power Systems*  
*Belgin Emre Türkay, Fatih Küçüktezcan, Alper Bulut*
- Bölgeler Arası Düşük Frekanslı Generatör Salınımlarını Sönümleyici Faktörler ve Türkiye ENTSO-E CESA Enterkonneksiyonu için Çözümler ..... 39**  
*Damping Measures Against Low Frequency Inter Area Oscillations and Solutions for Turkey ENTSO-E CESA Interconnection*  
*Cihangir Gençoğlu, Osman Bülent Tör, Nezih Güven*
- İç Silindiri Eksenel Doğrultuda Sonsuza Uzayan Dış İletkeni ise Yarı Sonsuz Eşeksenli Dairesel Dalga Kılavuzundan TEM Modunun Işınması ..... 45**  
*TEM Wave Radiation from a Semi-infinite Coaxial Waveguide with an Infinitely Extended Inner Cylinder*  
*İsmail H. Tayyar, Alinur Büyükkaksoy*
- Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi ..... 51**  
*Modeling and Investigation of Fault Ride Through Capability of Variable Speed Wind Turbines*  
*Erkan Koç, A. Nezih Güven*





# Kavramlar Arası Anlamsal İlişkilerin Türkçe Sözlük Tanımları Kullanılarak Otomatik Olarak Çıkarılması

## Automatic Extraction of Semantic Relationships Using Turkish Dictionary Definitions

Emre Yazıcı<sup>1</sup>, M. Fatih Amasyalı<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Elektronik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi

emre@yazici.info, mfatih@ce.yildiz.edu.tr

### Özet

Bilgisayarların doğal dil işleme alanındaki rolleri son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Otomatik özet çıkarımı, makine çevirisi, doğal dilde arama ve soru cevaplama gibi çalışma alanları; otomatik metin analizi ve yapay zeka uygulamalarını destekleyici anlamsal ilişki veritabanları oluşturma gerekliliğini doğurmuştur. Bu tür bir veritabanının oluşturulması zor ve zaman alıcı bir süreç olduğundan, böyle bir veritabanını elle oluşturmak arzu edilen bir iş olmayabilir. Bu belgede, Türkçe için iki farklı sözlük kullanılarak kavramlar arasındaki anlamsal ilişkileri bulmaya yönelik farklı otomatik yöntemler sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Doğal Dil İşleme, Örüntü Eşleme, Anlamsal Ağ, Bilgi Çıkarımı

### Abstract

In the recent years, the role of computers in the field of natural language processing has increased so much. Work areas such as automatic summarization, machine translation, natural language search and question answering have brought the need for semantic relation databases to support automatic text analysis and artificial intelligence applications. Since the development process is hard and time consuming, developing such databases manually may not be desirable. In this paper, we present different automatic methods to extract semantic relationships between concepts using two Turkish dictionaries.

Keywords: Natural Language Processing, Pattern Matching, Semantic Web, Information Extraction

### 1. Giriş

Bu çalışmanın amacı, sözcüklerin sözlükteki tanımlarından yola çıkarak bilgisayarlı sistemlerin kullanımına uygun anlamsal bilgi çıkarımının sağlanmasıdır. Sözlükler, barındırdıkları her bir kavram hakkında nitelikli anlamsal bilgi içermesine rağmen bu bilginin organizasyonu bilgisayar uygulamaları tarafından kullanıma elverişli değildir [1]. Bir dilde bulunan sözcükler arasındaki anlamsal ilişkilerin çıkarılmasıyla oluşturulan anlamsal bir veritabanı, bilgisayar uygulamalarının gündelik yaşamı ilgilendiren konularda daha etkin rol oynamalarını sağlayacaktır. Bundan başka, bilgisayar

destekli çeviri sistemlerinin eş sesli sözcüklerin varlığından kaynaklanan hatalı çevirilerinin en aza indirgenerek bu sistemlerin başarımlarının artırılması gibi konularda da kavramlar arasındaki anlamsal ilişkilerden faydalanılabilir. Bu amaca yönelik bir veritabanının çıkarılmasında üzerinde çalışılan dile ait sözlükten yola çıkmak, sözlüklerin dile ait sözcük hazinesinin önemli bir kısmını barındırması nedeniyle iyi bir başlangıç olacaktır.

Kapsamı Türkçe ile sınırlandırılan bu çalışmada Türk Dil Kurumu (TDK) tarafından hazırlanan Büyük Türkçe Sözlük [2] ile bir Wikimedia projesi olan Vikisözlük'ten [3] faydalanılmıştır. Vikisözlük'te yer alan Türkiye Türkçesi dışındaki maddeler değerlendirilmeye alınmamış olup Vikisözlük'teki Büyük Türkçe Sözlük kaynaklı sözcük tanımları sadece kategoriye dayalı anlamsal ilişki çıkarımında değerlendirilmeye alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan her bir sözlük ve barındırdıkları sözcük sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Kullanılan sözlükler ve barındırdıkları sözcük sayıları

Sözlük	Kavram Sayısı
TDK Büyük Türkçe Sözlük	98107
Vikisözlük	160049

Çalışma dahilinde sözlük verilerinden çıkarılması hedeflenen anlamsal ilişkiler seçilirken, sözlükte yer alan kavramlara ilişkin şu sorulara cevaplar bulabilmek hedeflenmiştir:

- Bu kavramla anlamdaş olan diğer kavramlar nelerdir?
- Bu kavramla karşıt anlamlı olan diğer kavramlar nelerdir?
- Bu kavram hangi bütünün bir parçasıdır?
- Bu kavram hangi alt ve üst kavramlara sahiptir?
- Bu kavram hangi madde veya bileşenlerden yapılmıştır?
- Bu kavram ne amaçla kullanılmaktadır?
- Bu kavram neye benzemektedir?
- Bu kavram nerelerde bulunabilmektedir?

- Eylem, hangi hedefe ulaşmak için yapılmaktadır?
- Bu kavram ne ya da kim tarafından oluşturulmuştur?

Bu sorular yardımıyla çıkartılan her bir ilişki türü ve bunlarla ilgili eşleşme kuralları Bölüm 3.1 altında incelenmiştir. İlişki türleri seçilirken literatürde var olan ilişkilerin yanında metin işlemede faydalı olabileceği düşünülen farklı ilişki türlerine de yer verilmiştir. Söz konusu ilişkilerin yapılacak çalışmalarda ne şekilde kullanılabilmesine dair örnekler de yine Bölüm 3.1 altında yer almaktadır.

## 2. Önceki Çalışmalar

Bilgisayarlı sistemlerin kullanımına yönelik anlamsal veritabanı oluşturma konusunda farklı ve benzer yaklaşımları benimseyen birçok çalışma yapılmıştır. Yaklaşımlardan ilki veritabanlarının insanlarca elle oluşturulmasıdır ki bunun en iyi bilinen örneği George A. Miller tarafından oluşturulmaya başlanmış WordNet projesidir [4]. İsim, fiil, sıfat ve zarf türü sözcük ya da sözcük gruplarına ilişkin eş anlam kümeleri (*synset*) ve bu kümeler arası bazı anlamsal ilişkileri barındıran WordNet, bu belgenin kaleme alındığı tarihteki son sürümü olan 3.0 sürümünde 117.659 eş anlam kümesi içinde organize edilen 155.287 farklı sözcük barındırmaktadır. WordNet'e ait veri tabanına <http://wordnetweb.princeton.edu/perl/webwn> adresinden erişilebilir. WordNet'in az sayıda uzman kişi tarafından elle oluşturulması nedeniyle bu büyüklüğe erişmesi 10 yıldan fazla zaman almıştır. Aynı yaklaşımı (veritabanını az sayıda kişi ile oluşturmak) benimseyen bir başka proje ise Cyc [5]'tir. Lenat tarafından 1990 yılında oluşturulmaya başlanmıştır. Günümüzde ticari bir kuruluş haline gelen Cyc'in içerisinde yüz binlerce kavramın milyonlarca ilişkisinin olduğu söylenmektedir. Geliştirme sürecinde veri tabanının bir kısmı halka açılmış, web kullanıcılarının da veri tabanına katkıda bulunmaları amaçlanmıştır. Sistemin veri tabanına <http://www.cycfoundation.org/concepts> adresinden erişilebilir. OpenMind [6] projesi ise yeni bir yaklaşım sergilemiştir. OpenMind veritabanı, az sayıda uzman kişi yerine çok fazla sayıda uzman olmayan insanın Internet üzerinden katılımıyla oluşturulmuştur. OpenMind veritabanına katılımcılar bilgileri basit cümle formunda girmektedir. Bu basit yaklaşım sayesinde 1 yıl içinde veritabanında 1 milyona yakın cümle biriktirilmiştir. Bu büyük veritabanı tahmin edilebileceği üzere oldukça fazla gürtültü ve tekrar içermektedir. Bu soruna odaklanan araştırmacılar basit şablonlar kullanarak OpenMind projesinde toplanan cümlelerden otomatik olarak oluşturulmuş yaklaşık 200 bin kavram içeren bir anlamsal ağ (ConceptNet [7]) oluşturmuşlardır. Kavramlar arası ilişkiler ve bu ilişkilerin işlenmemiş OpenMind veri tabanındaki frekanslarından elde edilen güvenilirlik ölçümleri ConceptNet veri tabanında yer almaktadır. Veritabanına <http://web.media.mit.edu/~hugo/conceptnet/> adresinden erişilebilmektedir.

Konuyla ilgili çalışmalar son zamanlarda ülkemizde de yaygınlık kazanmıştır. Balkanet projesi dahilinde geliştirilen otomatik Türkçe WordNet oluşturma çalışması [8] sonucunda 11.628 eş küme ve bunlar arası 17.550 ilişki içeren bir anlamsal veritabanı oluşturulmuştur. Orijinal WordNet'le karşılaştırıldığında veritabanının oldukça küçük olduğu görülmektedir ancak veritabanındaki bilgilerin güvenilirliği

oldukça yüksektir. Literatürde, sözlük tanımlarını kaynak olarak kullanan ve bu açıdan burada sunulan çalışmaya benzer olan iki çalışma daha mevcuttur. İlkinde [9] WordNet'teki ilişkilerin büyük bir kısmını oluşturan alt kavram – üst kavram (*is a*) ilişkisine sahip kavram ikililerinin kelimelerin aldıkları eklerle bakılarak otomatik olarak bulunması gerçekleştirilmiştir. Diğerinde [10] ise alt kavram – üst kavram ve eşanlam ilişkileri otomatik olarak çıkartılmıştır. Burada sunulan çalışmanın, mevcut çalışmalardan iki temel farkı bulunmaktadır. İlki, diğerlerine göre çok daha fazla türde anlamsal ilişkinin çıkartılması ve bu sayede daha kapsamlı bir anlamsal veritabanı elde edilmesidir. İkincisi ise kaynak olarak iki farklı sözlük üzerinde çalışılmış olmasıdır.

## 3. Yöntem

Bu çalışmada kavramlar arası ilişkilerin belirlenmesinde sözcüğün sözlükte yer alan tanımının yanında gerekli olduğu durumlarda sözcüğün ve sözcüğün ilişkili olduğu kavramın sözcük türü bilgisinden de faydalanılmıştır. Bu açıdan bakıldığında sözlükte yer alan terimlerin söz dizimsel ve biçim bilimsel analizinin yanında anlam bilimsel analizi de yapılmaktadır. İlişki aranan sözcüğün sözcük türü bilgisi kullanılmakta olan sözlüklerde yer alırken, olası ilişkili sözcüğün sözcük türü bilgisi Zemberek [11] uygulaması kullanılarak edinilmektedir.

İlişki aranan sözcüğün sözcük türü bilgisinin kullanılmakta olan sözlükte araştırılması yerine Zemberek kullanılarak elde edilmesinin nedeni, sözcük tanımında yer alan olası ilişkili sözcüklerin çoğunlukla yalın halde bulunmasıdır. Sözlüklerde bulunan sözcükler ise çoğunlukla çekim eki almamış yalın halleriyle yer almaktadır. Zemberek, verilen bir sözcüğü yalın halde olmasa bile eklerinden arındırarak türünü tespit edebilmektedir. Ayrıca sözcüğün sözlük tanımında yer alan ve ilişkili sözcük olarak tespit edilen her sözcük sözlükte yer almamaktadır, dolayısıyla bu gibi sözcüklerin tür bilgisine sözlük tarafından sağlanan veri yardımıyla ulaşmak mümkün değildir. Zemberek, sözlükte tanımları yer alan sözcüklerden sayıca daha fazla sözcüğün türünü tespit edebilmektedir.

Sözlükte yer alan kavramlar arasındaki anlamsal ilişkilerin araştırılmasında sözcüğün türü ve sözlük tanımının yanında sözlükte bulunduğu kategori ve yüzey biçimi bilgilerinden de faydalanılabilmektedir [10]. Bölüm 3.1 altında sözcüğün türü ve sözlük tanımından faydalanılan kurallar yardımıyla ilişki çıkarımı yöntemi incelenirken, sözcüğün sözlükteki kategorisinden faydalanılarak alt kavram – üst kavram ilişkilerinin araştırılması konusuna Bölüm 3.2 altında değinilmiştir.

### 3.1. Kurallar Yardımıyla Anlamsal İlişki Çıkartımı

Sözlük verisi kullanılarak çıkartılması hedeflenen anlamsal ilişki türleri ile bu ilişkilerin saptanmasında kullanılan kurallar, örnekleriyle birlikte bu bölümün devamında incelenecektir. Çıkarılan kurallar, geliştirilen bir uygulama yardımıyla çalışma kapsamında kullanılan sözlükler üzerinde uygulanmış olup her bir sözlükteki eşleşme sayısı Tablo 2 ile Tablo 21 arasında yer alan tablolar üzerinde örnekleriyle birlikte gösterilmiştir. Kuralların farklı sözlükler üzerinde farklı başarılar elde etmesinin altında, sözlüklerde yer alan verinin nitelik ve standart bakımından farklı özelliklere sahip

olması yatmaktadır. Bu konuya Bölüm 4 altında çalışmanın sonuçlarında ayrıca değinilecektir.

Bilgisayarla doğal dil işlemede pek çok farklı yöntem ve teknik kullanılmaktadır. Biçimsel diller ve özdevinirler kuramı (*automata theory*) üzerine inşa edilen düzenli ifadeler (*regular expressions*) de bu amaçla kullanılan tekniklerden biridir [12]. Birden fazla benzer kalıbı tek bir kuralda toplayabilmek ve uygulamada esnekliği sağlamak amacıyla bu çalışmada düzenli ifadelerden faydalanılmıştır.

Düzenli ifadelerin yazım biçimi dilden dile az da olsa farklılık gösterebilmektedir, bu belgede yer verilen kuralların tamamında Perl Uyumlu Düzenli İfadeler (*PCRE - Perl-compatible Regular Expressions*) [13] kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan düzenli ifade kalıplarının tamamı büyük küçük harf ayrımına duysuzdur.

Çıkarılan kurallar her bir sözcüğün sözlükteki tanımına uygulanmadan önce sözcük tanımı, [10]'da da başvurulduğu üzere ayırıcı olarak virgül karakteri kullanılarak parçalara bölünmüş ve her bir parçanın başında ya da sonunda bulunabilecek beyaz boşluklar temizlenmiştir. Kuralın uygulandığı bu parçalar bundan böyle “sözcük tanımı parçası” olarak anılacaktır.

Sözcük türü ve ilişkili sözcük türü bilgileri kuralların eşleşme doğruluklarını arttırmak amacıyla ve tek başına düzenli ifade kuralıyla yapılan bir ilişki tespitinin yeterli güvenilirlikte olmadığı durumlarda kullanılmıştır. Tablo 2 ile Tablo 21 arasında yer alan tablolar üzerindeki “Sözcük türü” ve “İlişkili sözcük türü” alanlarında sıfat, isim, isim fiil gibi sözcük türlerinin varlığı; incelenmekte olan sözcüğün veya aranan ilişkili sözcüğün türüne kısıt getirmekte, kısıda uyulmaması durumunda çok sayıda hatalı sonuç alınabileceğine işaret etmektedir. Örneğin Tablo 12’de karşıt anlamlılık ilişkisinin tespitine yönelik önerilen kuralda sözcük türünün sıfat, ilişkili sözcük türünün ise isim ya da sıfat olması istenmektedir. Sözlük verisinde “Zambiya” sözcüğünün tanımında yer alan sözcük tanımı parçalarından birisi şudur: “denize kıyısı olmayan ülke”. Tablo 12’deki kuralın sözcük türü kısıtları olmaksızın bu sözcük tanımı parçasına uygulanması “Zambiya” ile “kıyı” ya da “kıyısı” sözcüğünün zıt anlamlı olarak tespit edilmesine neden olacaktır ki bu da istenmeyen hatalı bir durumdur. Sözcük türünün sıfat, ilişkili sözcük türünü ise isim ya da sıfat olarak kısıtlamak aynı sebepten kaynaklanabilecek hataları büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır.

Öte yandan sözcük türünün veya ilişkili sözcük türünün “Tümü” olarak belirtilmesi ilgili kuralın çok sayıda farklı sözcük türü üzerinde uygulanabileceğini ya da kurala bir sözcük türü kısıtı getirmenin eşleşme üzerinde yeterli bir olumlu etki sağlamayacağını ifade etmektedir. Örneğin Tablo 15’te yer alan yapılmış olma ilişkisinin saptanmasına yönelik önerilen kuralda -den veya -dan ile biten bir sözcüğün ardından “yapılan” veya “yapılmış” sözcüklerinin gelmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu düzenli ifade kuralıyla saptanabilecek ilişkilerin tamamına yakınında sözcük türü ve ilişkili sözcük türü isim olmasına rağmen bu bilgi kural için bir kısıt olarak gösterilmemiştir. Zira sözcük türü ve ilişkili sözcük türü için isim türünü kısıt olarak göstermenin kuralın başarımına katkısı oldukça azdır. Öte yandan yeterli katkıyı

sağlıyor olmaksızın böyle bir kısıtı kurala getirmenin bazı olumsuz etkileri vardır. Bunların en önemlisi, sözcük türlerinin kesin bir doğrulukla saptanamayışından ötürü doğru olarak tespit edilen bir ilişkinin, kuralın sözcük türü kısıtı sağlanamamasından dolayı sonuca dahil edilmeyişidir. Yazımı aynı olduğu halde türü farklı olan sözcüklerin varlığı bu durum üzerindeki olumsuz etkiyi daha da arttırmaktadır.

### 3.1.1. Alt Kavram – Üst Kavram İlişkisi

Alt kavram – üst kavram ilişkisi bir varlığın hangi üst varlık kümesine ait olduğu bilgisini içerir. Bu ilişkinin saptanmasında varlığın sözlük anlamının yanında sözlükteki kategorisinden de faydalanılabilir.

İncelenen sözcük tanımı parçası “tümü” sözcüğü ile sonlanıyorsa “tümü” sözcüğünden önce gelen sözcüğün yalnız halde incelenen sözcüğün üst kavramı olarak alınabilir.

Tablo 2: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 1

Düzenli ifade	(?P<w>[^\ ]+)((ların lerin)[^\ ]*)? tümü\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Sakal: Bazı hayvanlarda çene altında bulunan kılların tümü	
	Sözcük	Sakal
	İlişkili sözcük	Kıl
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	124
	Vikisözlük	68

İncelenen sözcük tanımı parçası içerisinde “bir çeşit” ya da “bir tür” sözcük öbeklerinden sonra isim türü bir sözcük geliyorsa bu sözcük incelenen sözcüğün üst kavramı olarak alınabilir.

Tablo 3: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 2

Düzenli ifade	bir (çeşit tür) (?P<w>[^\ ]+)\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Barbunya: Taneleri yuvarlak, oval veya yassı, kırmızı benekli, bir tür fasulye	
	Sözcük	Barbunya
	İlişkili sözcük	Fasulye
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	473
	Vikisözlük	268

İncelenen sözcük tanımı parçası “iş” sözcüğü ile sonlanıyorsa incelenen sözcüğün üst kavramı “iş” olarak alınabilir.

Tablo 4: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 3

Düzenli ifade	(P<w>iş)İ\$	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Ağartma: Kuyumculukta gümüşü temizleme işi	
	Sözcük	Ağartma
	İlişkili sözcük	İş
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	5633
	Vikisözlük	1119

İncelenen sözcük tanımı parçası “bilimi” ile sonlanıyorsa bu sözcüğün üst kavramı “bilim” olarak belirlenir.

Tablo 5: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 4

Düzenli ifade	(P<w>bilim)İ\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Semiyojoloji: Gösterge bilimi	
	Sözcük	Semiyojoloji
	İlişkili sözcük	Bilim
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	130
	Vikisözlük	48

İncelenen sözcük tanımı parçası “yer” sözcüğü ile sonlanıyorsa incelenen sözcüğün üst kavramı “yer” olarak alınabilir.

Tablo 6: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 5

Düzenli ifade	(P<w>yer)İ\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Arpalık: Arpa konulan yer	
	Sözcük	Arpalık
	İlişkili sözcük	Yer
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	979
	Vikisözlük	399

İncelenen sözcük tanımı parçası “kimse” sözcüğü ile sonlanıyorsa incelenen sözcüğün üst kavramı “kişi” olarak alınabilir.

Tablo 7: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 6

Düzenli ifade	kimse\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Aşçı: Yemek pişirip satan kimse	
	Sözcük	Aşçı
	İlişkili sözcük	Kişi
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	3535
	Vikisözlük	1405

İncelenen sözcük tanımı içerisinde “bir isim türü” ya da “bir isim çeşidi” şeklinde bir yapı mevcutsa “isim” sözcüğü incelenmekte olan sözcüğün üst kavramı olarak alınabilir.

Tablo 8: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 7

Düzenli ifade	bir (P<w>[^ ]+?) (türü çeşidi)İ\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Hortum: Hava veya suyun hızla dönüp sütun biçiminde yükselmesiyle oluşan, alanı dar bir siklon çeşidi	
	Sözcük	Hortum
	İlişkili sözcük	Siklon
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	233
	Vikisözlük	1000

Sözcük tanımında yer alan “-giller” ekiyle biten sözcükler, genellikle hayvan ya da bitkilerin bilimsel sınıflandırmadaki ailesini (familya) göstermekte olup bu eki alan sözcüklerin varlığı, incelenen sözcük ile bu eki alan sözcük arasında bir alt kavram – üst kavram ilişkisi olduğuna işaret eder.

Tablo 9: Alt kavram – üst kavram ilişkisi - Kural 8

Düzenli ifade	(P<w>[^ ]+?)giller(den  familyasından  ailesinden)İ\$	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Puhu: Baykuşgillerden, orman, dağ ve kayalıklarda yaşayan, uzunluğu 65 cm, sırtı koyu kahverengi bir kuş türü	
	Sözcük	Puhu
	İlişkili sözcük	Baykuş
	İlişki türü	Alt kavram – üst kavram
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	833
	Vikisözlük	1475

Alt kavram – üst kavram ilişkisi WordNet ve WordNet’ten dallanarak oluşturulan diğer projelerde yer verilen ilişkiler arasındadır. Bu ilişki türünün tespiti başta metin sınıflandırma olmak üzere makine çevirisi ve makine öğrenmesi gibi çalışma alanlarında kolaylık sağlayacaktır. 1998 yılında makine öğrenmesi üzerine yapılan deneysel bir çalışma [14],

sadece alt kavram – üst kavram ilişkisinden faydalanılarak metin sınıflandırma işlemine örnek olarak gösterilebilir.

### 3.1.2. Eş Anlamlılık İlişkisi

Eş anlamlılık ya da anlamdaşlık ilişkisi bir dilde bulunan ve birbirleriyle aynı ya da çok yakın anlama gelen farklı sözcükler arasındaki ilişkiyi tanımlar. Eş anlamlı sözcükler, sözcüğün sözlük tanımında sıklıkla virgül karakteriyle birbirinden ayrılmış vaziyette bulunur. Virgül karakteri, sözcük tanımı parçalarını birbirinden ayıran karakter olduğundan, incelenen sözcük tanımı parçasının tek bir sözcükten oluşması, incelenen sözcük ile bu sözcük arasında bir eş anlamlılık ilişkisi olabileceği sonucunu doğurur. Tablo 10’da görülen ve Balkanet projesi dahilinde otomatik Türkçe WordNet oluşturma çalışmasında da kullanılan bu kural [8], sözcük tanımındaki her virgülle ayrılan sözcüğün incelenen sözcüğün eş anlamlısı olmaması nedeniyle çok sayıda hatalı çıktı (*false positive*) üretmeye elverişlidir. Tabloda yer alan örneklerin ilki kuralın beklenen biçimde çalışması durumunda ürettiği çıktıları gösterirken, ikinci örnek söz konusu nedenden ötürü kuralın ürettiği hatalı çıktıları göstermektedir. Birinci örnekte yer alan ilişkili sözcükler verilmek istenen anlama göre acı sözcüğü yerine kullanılabilirken ikinci örnekte yer alan ilişkili sözcükler ağlamak eyleminin nedenleri ya da etkenleri olup ağlamak eyleminin anlamdaşı sözcükler değildir.

Tablo 10: Eş anlamlılık ilişkisi - Kural 1

Düzenli ifade	^(?P<w>[^ ]+)\$		
Sözcük türü	Tümü		
İlişkili sözcük türü	Tümü		
Örnek	Acı: Kırıcı, üzücü, incitici, dokunaklı, korkunç		
	Sözcük	Acı	
	İlişkili sözcük	Kırıcı	
	İlişkili sözcük	Üzücü	
	İlişkili sözcük	İncitici	
	İlişkili sözcük	Dokunaklı	
	İlişkili sözcük	Korkunç	
	İlişki türü	Eş anlamlılık	
Örnek	Ağlamak: Üzüntü, acı, sevinç, pişmanlık, aldanma vb.'nin etkisiyle gözyaşı dökmek		
	Sözcük	Ağlamak	
	İlişkili sözcük	Üzüntü	
	İlişkili sözcük	Acı	
	İlişkili sözcük	Sevinç	
	İlişkili sözcük	Pişmanlık	
	İlişki türü	Eş anlamlılık	
	Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	46926
Vikisözlük		28593	

Sözcük tanımında yer alan, sözlükteki diğer kavramlara referanslar, çoğunlukla bu kavramın daha yaygın kullanılan şekline yönlendirmeler olup kavramlar arasındaki bir eş anlamlılık ilişkisine işaret eder.

Tablo 11: Eş anlamlılık ilişkisi - Kural 2

Düzenli ifade	^bk.(?P<w>.+)	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Tümsekli: bk. dışbükey	
	Sözcük	Tümsekli
	İlişkili sözcük	Dışbükey
	İlişki türü	Eş anlamlılık
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	1846
	Vikisözlük	64

Tablo 11’de görülen kuralın Vikisözlük’teki eşleşme sayısının TDK Sözlük ile karşılaştırıldığında düşük olması, Vikisözlük’ün çevrimiçi olması nedeniyle çoğunlukla “bk.” şeklinde referanslar kullanmak yerine doğrudan referans sözcüğe köprü içermesinden kaynaklanmaktadır.

Eş anlamlılık ilişkisi doğal dil işleme çalışmalarında sıkça faydalanılan bir ilişki türüdür. Otomatik çeviri ve sınıflandırmanın dışında sistem başarımını arttırmak amacıyla başvuru sorgu genişletme (*Query Expansion*) işleminde sözcükler arasındaki eş anlamlılık ilişkisinin tespiti özel bir önem arz etmektedir [15]. Ayrıca WordNet projesinde yer alan ilişkiler de eş anlam kümeleri (*synset*) olarak isimlendirilen mantıksal kümelerin etrafında organize edilmiştir [4].

### 3.1.3. Karşıt Anlamlılık İlişkisi

Sözcüğün sözlük tanımında yer alan isim ya da sıfat türü bir sözcükten sonra gelen “olmayan” anahtar sözcüğü aracılığıyla karşıt anlamlılık ilişkisi saptanabilir.

Tablo 12: Karşıt anlamlılık ilişkisi - Kural 1

Düzenli ifade	(?P<w>[^ ]+ olmayan)	
Sözcük türü	Sıfat	
İlişkili sözcük türü	İsim ya da sıfat	
Örnek	Denetimsiz: Denetlenmiş olmayan	
	Sözcük	Denetimsiz
	İlişkili sözcük	Denetlenmiş
	İlişki türü	Karşıt anlamlılık
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	698
	Vikisözlük	69

Sözcük tanımında yer alan “karşıtı” sözcüğünün varlığı incelenen sözcük ile “karşıtı” sözcüğünden önce gelen sözcük arasında bir karşıt anlamlılık ilişkisi olduğuna işaret eder.

Tablo 13: Karşıt anlamlılık ilişkisi - Kural 2

Düzenli ifade	(P<w>[^ ]+ karşıtı)	
Sözcük türü	Sıfat	
İlişkili sözcük türü	İsim ya da sıfat	
Örnek	Alçak: Yerden uzaklığı az olan, yüksek karşıtı	
	Sözcük	Alçak
	İlişkili sözcük	Yüksek
	İlişki türü	Karşıt anlamlılık
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	100
	Vikisözlük	34

Karşıt anlamlılık ilişkisi eş anlamlılık ilişkisiyle birlikte metin sınıflama ve makine çevirisi gibi Yapay Zeka uygulamalarının yanında belge erişim sistemlerindeki arama hatalarını en aza indirmek amacıyla da kullanılabilir. Yapay Zekadaki çerçeve probleminin bir alt türü olarak nitelendirilen anlamsal karşıtılık probleminin çözümünde de karşıt anlamlı sözcüklerden faydalanılabilmektedir [16].

### 3.1.4. Parça - Bütün İlişkisi

Parça – bütün ilişkisi bir varlığın bütününe hangi parça varlıklardan oluştuğu bilgisini barındırır. Parça – bütün ilişkisinin literatürde farklı tanım ve yorumları mevcuttur. Burada adı geçen parça – bütün ilişkisi Cruse'nin genişletilmiş tanımı [17] uyarınca üye – bütün ilişkisini de içine almaktadır.

İsmin ayrılma hal ekini (-den, -dan) barındıran isim türü bir sözcükten sonra gelen “oluşan” ve “oluşmuş” anahtar sözcükleri bu ilişkinin saptanmasında kullanılabilir. Aynı tanım içerisinde bir varlığı oluşturan birden fazla varlık “ve” ya da “veya” bağlaçlarıyla birbirinden ayrılmış vaziyette bulunabilir.

Tablo 14: Parça – bütün ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	^(([^ ]+)(lar ler)?(den dan tan ten)(ve veya) )?([^\ ]+)?(lar ler)?(den dan tan ten)(oluşan oluşmuş)	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Bölük: Takımlardan oluşan, üçü veya dördü bir tabur oluşturan ve öbür birliklerin temeli sayılan birlik	
	Sözcük	Bölük
	İlişkili sözcük	Takım
	İlişki türü	Parça - bütün
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	33
	Vikisözlük	10

Literatürde meronimi olarak da bilinen parça – bütün ilişkisi, yapılan anlamsal bir aramanın daha sığ bir sorguyla gerçekleşmesinde yardımcı olabilir. “A, B’yi içerir mi?” ya da “A nelerden oluşur?” gibi ontolojik sorulara cevaplar bulmaya yarayan parça – bütün ilişkisi; otomatik soru cevaplama ve bilgi çıkarımı sistemlerinde de kullanılabilir.

### 3.1.5. Yapılmış Olma İlişkisi

Yapılmış olma ilişkisi bir varlığın hangi varlık ya da varlıklardan yapıldığı bilgisini içerir. Bu ilişki parça – bütün ilişkisinin özel bir hali olup bir bütününe hangi öğelerden oluştuğunun yanında öğenin ya da öğelerin belli bir işleme tabi tutularak bütünü oluşturduğu bilgisine de gönderme yapar.

İsmin ayrılma hal ekini (-den, -dan) barındıran isim türü bir sözcükten sonra gelen “yapılan” ve “yapılmış” anahtar sözcükleri bu ilişkinin saptanmasında kullanılabilir. Aynı tanım içerisinde bir varlığın yapılmış olduğu birden fazla varlık “ve” ya da “veya” bağlaçlarıyla birbirinden ayrılmış vaziyette bulunabilir.

Tablo 15: Yapılmış olma ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	^(([^ ]+)(lar ler)?(den dan tan ten)(ve veya) )?([^\ ]+)?(lar ler)?(den dan tan ten)(yapılan yapılmış)	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Halat: Kenevirden yapılmış çok kalın ip	
	Sözcük	Halat
	İlişkili sözcük	Kenevir
	İlişki türü	Yapılmış olma
Örnek	Katma: Kıldan veya yünden yapılmış ip	
	Sözcük	Katma
	İlişkili sözcük	Kıl
	İlişkili sözcük	Yün
	İlişki türü	Yapılmış olma
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	163
	Vikisözlük	57

ConceptNet [7], yapılmış olma (*madeOf*) ilişkisini burada olduğu gibi parça – bütün ilişkisinden bağımsız olarak tanımlamaktadır. Uygulamada parça – bütün ilişkisiyle aynı amaca yönelik faydalanılabilecek bu ilişki türü daha fazla bilgiyi daha yüksek bir kesinlikte barındırması nedeniyle ayrı olarak değerlendirilmiştir.

### 3.1.6. Yapan – Yapılan İlişkisi

Bu ilişki, yapılan bir eylemin kimin tarafından yapıldığı ya da bir varlığın veya soyut bir kavramın kimin tarafından oluşturulduğu bilgisini içerir. Sözcüğün sözlük tanımında yer alan “tarafından” anahtar sözcüğü bu ilişkinin saptanmasında kullanılabilir.

Tablo 16: Yapan – yapılan ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	(?P<w>[^ ]+)(lerce larca  tarafından) (yapılan oluşturulan)	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Ekspertiz raporu: Ekspertler tarafından yapılan inceleme sonunda hazırlanan rapor	
	Sözcük	Ekspertiz raporu
	İlişkili sözcük	Ekspert
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	5
	Vikisözlük	3

Yapan – yapılan ilişkisi ConceptNet'te *CreatedBy* adıyla yer almaktadır.

### 3.1.7. Araç - Amaç İlişkisi

Araç – amaç ilişkisi bir varlığın hangi amaçla kullanıldığı bilgisini içerir. Sözlük tanımında bulunan “için” ve “amacıyla” sözcükleri bu ilişkinin tespit edilmesinde anahtar sözcük olarak kullanılabilir. Amaç rolünü üstlenen sözcüğün çoğunlukla isim fiil olması bu ilişkinin saptanmasında kullanılan bir başka veridir. Aynı tanım içerisinde bir varlığın birden fazla kullanım amacı “ve” ya da “veya” bağlaçlarıyla birbirinden ayrılmış vaziyette bulunabilir.

Tablo 17: Araç – amaç ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	(([^ ]+(mek mak me ma)) (ve veya) ?)([^ ]+(mek mak me ma)) (için amacıyla) yapılan	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	İsim fiil	
Örnek	Anma: Ölmüş bir insanı hatırlamak için yapılan tören	
	Sözcük	Anma
	İlişkili sözcük	Hatırlamak
Örnek	Rampa: Özellikle istasyonlarda, vagonlara eşya yüklemek veya boşaltmak için yapılan, ambarın önünde bulunan set	
	Sözcük	Rampa
	İlişkili sözcük	Yüklemek
	İlişkili sözcük	Boşaltmak
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	137
	Vikisözlük	60

### 3.1.8. Bulunma İlişkisi

Bulunma ilişkisi, bir varlığın nerede bulunduğu konusunda bilgi verir. İsmi bulunma hal ekini (-de, -da) barındıran isim türü bir sözcükten sonra gelen “bulunan” anahtar sözcüğü, bulunma ilişkisinin sözcük anlamından tespit edilebilmesinde kullanılabilir.

Tablo 18: Bulunma ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	^(?P<w>[^ ]+)(ler lar)?(de da te ta) bulunan	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim	
Örnek	Granül: Stoplâzma bulunan küçük tanecikler	
	Sözcük	Granül
	İlişkili sözcük	Stoplâzma
Örnek	Derbent: Sınırlarda bulunan küçük kale	
	Sözcük	Derbent
	İlişkili sözcük	Sınır
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	79
	Vikisözlük	53

Burada bahsi geçen bulunma ilişkisi WordNet'te parça – bütün ilişkisi dahilinde değerlendirilmektedir. ConceptNet ise bulunma ilişkisine *LocationOf* adı altında parça – bütün ilişkisinden bağımsız olarak yer vermiştir. Bu ilişki 3.1.4 altında incelenen parça – bütün ilişkisine göre daha zayıf olup bir varlığa ilişkin “Nerede bulunur?” sorusuna cevap bilgisini taşır.

### 3.1.9. Kullanılma İlişkisi

Kullanılma ilişkisi bir varlığın hangi amaçla kullanıldığı konusunda bilgi verir. Sözcüğün sözlük tanımında yer alan “için kullanılan” ve “amacıyla kullanılan” sözcük öbekleri bu ilişkinin saptanmasında kullanılabilir. Bu ilişkinin araç – amaç ilişkisindeki farkı, araç – amaç ilişkisinde bir oluş söz konusuken bu ilişkide bir amaç uğruna başka bir varlıktan faydalanma söz konusudur. Araç – amaç ilişkisindeki benzer biçimde bu ilişkide de faydalanılan varlığın tanım içerisinde çoğunlukla isim fiil olarak yer alması bu ilişkinin tespitinde kullanılan bir veridir.

Tablo 19: Kullanılma ilişkisi - Kural 1

Düzenli ifade	(?P<w>[^ ]+?(mek mak me ma)) (için amacıyla) kullanılan	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	İsim fiil	
Örnek	Çıkış: Bir yerden çıkmak için kullanılan yer	
	Sözcük	Çıkış
	İlişkili sözcük	Çıkmak
Örnek	Sprey: Püskürtme amacıyla kullanılan araç	
	Sözcük	Sprey
	İlişkili sözcük	Püskürtme
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	367
	Vikisözlük	233

İsmi yönelme hal ekini (-e, -a) barındıran isim türü bir sözcükten sonra gelen “yarayan” sözcüğü, kullanıma ilişkisinin saptanmasında faydalanılan bir başka kuraldır.

Tablo 20: Kullanılma ilişkisi - Kural 2

Düzenli ifade	(P<w>[^ ]+?(me ma))(ye ya) yarayan	
Sözcük türü	Tümü	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Kimlik: Herhangi bir nesneyi belirlemeye yarayan özelliklerin bütünü	
	Sözcük	Kimlik
	İlişkili sözcük	Belirleme
	İlişki türü	Kullanılma
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	639
	Vikisözlük	304

Kullanılma ilişkisi ConceptNet’in yer verdiği ilişkiler arasındadır.

### 3.1.10. Benzerlik İlişkisi

Benzerlik ilişkisi bir varlığın başka hangi varlıklara benzediği konusunda bilgi verir. Buradaki benzerlikten kasıt çoğunlukla biçimsel benzerliktir.

İsmi yönelme hal ekini (-e, -a) barındıran isim türü bir sözcükten sonra gelen “benzeyen” anahtar sözcüğü, benzerlik ilişkisinin çıkarılmasında kullanılabilir.

Tablo 21: Benzerlik ilişkisi kuralı

Düzenli ifade	(P<w>[^ ]+?)y?(a)e benzeyen	
Sözcük türü	İsim	
İlişkili sözcük türü	Tümü	
Örnek	Halka: Su gibi sıvıların içine katı bir nesnenin düşmesiyle oluşan, gittikçe büyüyen açılan çembere benzeyen biçim	
	Sözcük	Halka
	İlişkili sözcük	Çember
	İlişki türü	Benzerlik
Eşleşme sayısı	TDK Sözlük	185
	Vikisözlük	123

Benzerlik ilişkisinin ilk aklı gelen kullanım alanı kavram sınıflandırma ve kümelemedir. Herhangi bir amaca yönelik sınıflama ya da kümeleme yaparken aralarında fiziksel benzerlik bulunan varlıkları aynı kümeye ya da sınıfa yerleştirmek çoğunlukla istenilen bir durumdur. Böyle bir durum arzu edildiğinde benzerlik ölçütü olarak burada geçen benzerlik ilişkisine başvurulabilir. Benzerlik ilişkisi WordNet’te de yer almakla birlikte WordNet’teki tanımı daha ziyade anlamsal benzerlik üzerinedir.

### 3.2. Sözlük Kategorisine Dayalı Anlamsal İlişki Çıkartımı

Sözcüğün sözlük tanımı ve türü dışında sözcüğün kategori bilgisi de o sözcüğe ait alt kavram – üst kavram ilişkilerinin çıkartımında kullanılabilir. Türk Dil Kurumu’na ait Türkçe sözlükte yer alan kategoriler “zooloji”, “botanik” ve “tarih” gibi sözcüğün terim olarak kullanıldığı alanı (*context*) ifade ederken; Wikisözlük’te bu tür bir bölümlendirmenin yanında “kuş”, “balık” ve “organ” gibi sözcüğün doğrudan üst kavramını ifade eden kategorilerin yer alması yeni üst kavramların çıkartılabilmesine olanak sağlamaktadır. Tablo 22’de Wikisözlük’te yer alan bu veriden faydalanılarak çıkartılan üst kavramlar görülmektedir. Tablodaki verilere sadece 10 ve daha fazla sözcük içeren kategoriler dahil edilmiştir.

Tablo 22: Wikisözlük’teki kategorilerden faydalanılarak çıkartılan üst kavramlar

Üst Kavram	Adet
köy	17831
belediye	2687
belde	1932
kuş	1290
ilçe	880
ülke	361
memeli	187
yemek	149
renk	119
balık	110
ağaç	84
il	81
organ	81
hastalık	58
silah	56
meyve	55
böcek	54
içecek	52
fırtına	47
akrabalık	42
sebze	37
çiçek	36
şehir	33
ada	33
siyasi parti	31
element	30
deniz	27
oyun	26
ölçü birimi	24
baharat	23
mahalle	21
bilim dalı	18
sürüngen	14
dağ	12
semt	10
makam	10
<b>Toplam</b>	<b>26630</b>

Tabloda üst kavram olarak yer verilen kavramlardan bazıları diğerlerinden farklı olarak alt kavram olarak özel isimleri barındırmaktadır. Köy, ilçe, belde ve mahalle gibi yerleşim



birimi türleri; ada, deniz ve dağ gibi coğrafi oluşumlar ile siyasi parti üst kavram türleri alt kavram olarak özel isimleri barındırmaktadır.

Kategorilerden faydalanılarak alt kavram – üst kavram ilişkisi çıkartma işlemi sadece Wikisözlük üzerinde uygulanmış olup TDK sözlüğünde sözcüğün kullanım alanı dışında bir kategori ayırımının mevcut olmamasından ötürü TDK sözlüğü üzerinde böyle bir çalışma yapılmamıştır.

### 3.3. Sözlük Tarafından Sağlanan Anlamsal İlişkiler

Vikisözlük, sözcük tanımı ve sözcük türü gibi pek çok faydalı bilginin yanında bu belgenin konusu olan kavramlar arası anlamsal ilişkilere de yer vermektedir. Wikisözlük'te yer alan girdilerin çözümlenmesi (*parsing*) sırasında edinilen kavramlar arası anlamsal ilişkilere ait veri Tablo 23'te gösterilmiştir.

Tablo 23: Wikisözlük'te yer alan kavramlar arası anlamsal ilişkiler

İlişki Türü	Adet
Eş anlamlılık	7271
Bilimsel adı	1885
Sözcük birliktelikleri	1868
Alt kavram	1306
Yan kavram	1165
Üst kavram	1025
Karşıt anlamlılık	259
Benzer sözcük	120
<b>Toplam</b>	<b>14899</b>

Vikisözlük, sözlük verisini ilişkisel yapıda saklamıyor olmasından ötürü ilişkiler arası simetriklik ve geçişlilik gibi özelliklerden faydalanamamaktadır. Bunun bir sonucu olarak alt kavram – üst kavram ilişkisinde olduğu gibi bir varlığın hangi varlığın alt kavramı olduğu bilinirken, üst kavram olarak bilinen varlığa ilişkin sözlük verisinde bu varlığın hangi varlık ya da varlıkların üst kavramı olduğu bilgisinin yer almadığı durumlar olabilmektedir. Tablo 23'te verilen ilişki türü sayıları sözlükte doğrudan bulunan ilişki sayılarıdır. Anlamsal ilişki türleri arasındaki geçişlilik ve yansıma özelliklerinden faydalanılarak ilişki sayılarını arttırmak mümkündür. Yazarlar, bu işlemin uygulama ihtiyacına göre çalışma anında yapılabılır olduğu kanaatini taşıdıklarından elde edilen ilişkileri bu işleme tabi tutmamıştır.

Vikisözlük, literatürde yaygın kullanılan anlamsal ilişkilerin yanında “Bilimsel adı”, “Yan kavram” ve “Sözcük birliktelikleri” olmak üzere üç farklı ilişki türüne de yer vermektedir. “Bilimsel adı”, çoğunlukla canlı varlıklar için var olup canlının bilimsel sınıflandırmadaki adını içermektedir. Örnekleme gerekirse Wikisözlük'te *Kedi* sözcüğünün bilimsel adına bakıldığında *Felis catus* ve *Felis domesticus* olduğu görülmektedir. Yan kavram ise Wikisözlük tarafından şu şekilde tanımlanmaktadır: “Sözcüklerin anlamsal sınıflandırılmasında yan kavram (yani aynı düzeyde yer alan kavramlar) olarak görülen sözcükler burada yer alır.” [18]. *Otomobil* sözcüğünün yan kavramlarına örnek olarak *kamyon*, *TIR* ve *traktör* sözcükleri gösterilmiştir. Sözcük birliktelikleri ise Türkçede istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde birlikte görülme sıklıkları yüksek olan sözcükleri ifade etmektedir.

Örneğin *empati* sözcüğü için *empati kurmak* sözcük öbeği sözcük birlikteliği olarak gösterilirken *beyaz* sözcüğü için *beyaz perde* sözcük birlikteliği olarak gösterilen sözcük öbekleri arasındadır. Sözcük birliktelikleri birer anlamsal ilişki olmamakla birlikte başta anlam belirsizliklerinden (*Word Sense Disambiguation*) kaynaklanan sorunları istatistiksel yöntemler kullanarak en aza indirmek üzere doğal dil işleme uygulamalarında sözcük birlikteliklerinden yararlanılması mümkündür.

## 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada iki farklı sözlük kullanılarak bilgisayar uygulamalarının kullanımına yönelik anlamsal ilişki çıkarımıyla ilgili farklı otomatik yöntemler ve bu yöntemlerin uygulamaları ele alınmıştır. Her bir yöntemin uygulanması sonucu çıkartılan anlamsal ilişki türü ve sayıları ilgili yöntemin incelendiği bölüm altında verilmiştir. Çalışma kapsamında çıkartılan toplam ilişki sayıları ise Tablo 24'te görülmektedir. Tabloda yer alan “Toplam” sütünü iki sözlükten çıkartılan ilişkilerin birleşiminin sayısını göstermekte olup tekrarlı ilişkilerin sayısı bu sütündeki veriye dahil edilmemiştir. Tablodaki veriler Bölüm 3.1 altında incelenen ve bu belgede esas olarak üzerinde durulan kurala dayalı ilişki çıkarımı sonucu elde edilen verilerdir. Tablo 22'de ve Tablo 23'te yer alan diğer yöntemlere ait veriler bu tablodaki verilere dahil edilmemiştir, dahil edilmeyen bu verilerle birlikte toplam çıkartılan ilişki sayısı 127.203 adettir. Bu ilişkileri barındıran veritabanına [http://www.kemik.yildiz.edu.tr/data/File/TKD\\_viki.rar](http://www.kemik.yildiz.edu.tr/data/File/TKD_viki.rar) adresinden erişilebilir.

Tablo 24: Çalışma kapsamında, kurala dayalı ilişki çıkartımı yöntemiyle çıkartılan anlamsal ilişki sayıları

İlişki Türü	İlişki Sayısı		
	TDK Sözlük	Vikisözlük	Toplam
Alt – üst kavram	11754	6354	16405
Eş anlamlılık	47196	28185	66531
Karşıt anlamlılık	109	106	190
Yapılmış olma	160	56	199
Parça - bütün	32	10	38
Yapan – yapılan	229	241	422
Araç - amaç	135	57	166
Bulunma	79	53	123
Kullanılma	1000	530	1331
Benzerlik	184	123	269
<b>Toplam</b>	<b>60878</b>	<b>35715</b>	<b>85674</b>

Çıkartılan ilişkilerin doğruluğu, kullanılan yöntemlere göre farklılık göstermektedir. Sözlük tarafından sağlanan anlamsal ilişkiler insan eliyle girildiğinden bu ilişkilerin güvenilirliklerinin bir hayli yüksek olduğu kabul edilmektedir. Sözlükteki kategori verisinin de insan eliyle girilmiş olması nedeniyle benzer bir çıkarım sözcüğün sözlükteki kategorisine dayanılarak çıkartılan anlamsal ilişkiler için de yapılabılır. Kurala dayalı çıkartılan anlamsal ilişkilerin güvenilirliği ise sözlük verisinin niteliği ve uygulanan kuralın niteliğine göre değişiklik göstermektedir. Burada geçen sözlük verisinin niteliğinden kasıt sözlük verisinin bilgisayarlarca otomatik olarak işlenmeye elverişli olup olmadığıdır.

Sözlük verisinin niteliğinin başlıca ölçütünün sözlüğün yazımında belli ortak standartların izlenip izlenmemesi olduğu söylenebilir. Bölüm 3.1 altında sunulan kurallara ilişkin eşleşme sayıları incelendiğinde TDK sözlüğünün toplamda Vikisözlük'ten daha az sayıda kavram barındırmasına rağmen pek çok kural için Vikisözlük'ten sayıca daha fazla eşleşme yaptığı görülür. TDK sözlüğünün belli bir kurul tarafından hazırlandığı, Vikisözlük'ün ise imce yöntemiyle hazırlandığı [3] verileri dikkate alınır, sözlük yazımında belli standartlara uyulmasının sözlük verisinin niteliğini olumlu yönde etkilediği yargısının yanlış olmadığı sonucuna ulaşılır.

Uygulanan kuralların niteliği çıkartılan ilişkilerin doğruluğuna etki eden bir başka unsurdur. Kuralların kapsadığı eşleşme sayısı arttıkça eşleşme sonuçlarındaki doğruluğun azaldığı gözlemlenmiştir. Kuralların gerçekleşmesinde kullanılan düzenli ifadeler, çıkartılan ilişki sayısı ve niteliği arasında bir denge kuracak sıklıkta seçilmiştir. Tablo 10'da verilen ve [10]'da da önerilen eş anlamlılık ilişkisi çıkarma kuralı bu duruma istisnadır. Daha önce de değinildiği üzere bu kural, sözcüğün sözlük tanımında yer alan virgülle ayrılmış her sözcüğü bu sözcüğün eş anlamlısı olarak kabul etmektedir; oysa söz konusu sözcüğün eş anlamlısı olmadığı halde sözcük tanımında virgülle ayrılmış ve yalnız başına bulunan çok sayıda sözcük olabilmektedir. Sözcüğün sözlük tanımının yanında sözcüğün ve ilişkili sözcüğün türü verileri de gerek görüldüğü durumlarda elde edilen anlamsal ilişkilerin doğruluğunu artırıcı unsurlar olarak kullanılmıştır.

Elde edilen verilerin doğruluklarını kontrol etmek için tüm veri kümesinin indirgenmiş alt kümeleri üzerinde eğitici uygulanan bir yöntemin yanında Türkçe WordNet'te yer alan eş kümeler arası ilişkiler ile çıkartılan ilişkilerin otomatik olarak karşılaştırılması da yapılmıştır.

Veri kümesinin büyüklüğü göz önüne alındığında veri kümesinin tamamı üzerinde elle doğruluk kontrolü yapmanın oldukça zahmetli bir işlem olduğu görülmektedir. Bu sebeple tüm veri kümesinin doğruluğunun kontrol edilmesi yerine her ilişki türü için veri kümesinden bir alt küme seçilmiş ve ilişkiler elle doğru ve yanlış olarak işaretlenmişlerdir. Tablo 25'te bu işlemin sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlara bakılarak yapılan otomatik bilgi çıkarımı işleminin doğruluk oranı hakkında tam olmasa da genel bir yargıya varılabilir.

Tablo 25: Çalışma kapsamında, kurala dayalı ilişki çıkartımı yöntemiyle çıkartılan anlamsal ilişki sayıları

İlişki Türü	Toplam İlişki Sayısı	İncelenen İlişki Sayısı	Doğruluk Oranı
Alt – üst kavram	16405	246	0,94
Eş anlamlılık	66531	206	0,88
Karşıt anlamlılık	190	49	0,94
Yapılmış olma	199	61	0,48
Parça – bütün	38	20	0,55
Yapan – yapılan	422	128	0,36
Araç – amaç	166	113	0,55
Bulunma	123	47	0,34
Kullanılma	1331	92	0,73
Benzerlik	269	96	0,54

Tablo 25 incelendiğinde, genelde çok sayıda ilişkinin bulunduğu ilişki türlerindeki başarı oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin incelenen 246 alt kavram – üst kavram ilişkisinin %94'ü, 206 eş anlamlılık ilişkisinin ise %88'i doğru ilişkilidir.

Her ne kadar elle yapılan doğruluk kontrolü güvenilirlik bakımından tatmin edici olsa da kapsam bakımından yeterli görülmeyebilir. Bundan dolayı çıkartılan ilişkilerin doğru olduğu bilinen bir anlamsal ilişki kümesiyle değişik ölçütler kullanılarak otomatik olarak karşılaştırılması, ilişkilerin güvenilirliği hakkında okuyucuya daha fazla fikir vermesi bakımından faydalı olabilir. Türkçedeki bütün anlamsal ilişkileri barındıran eksiksiz ya da en azından kapsamlı bir anlamsal ilişki veritabanı olmasa da, Türkçe WordNet, barındırdığı ilişki sayısı ve niteliği göz önünde bulundurulduğunda karşılaştırma amacıyla kullanılabilir diğer kaynaklar arasında avantajlı sayılabilir.

Çıkartılan ilişkileri Türkçe WordNet'te yer alan ilişkilerle karşılaştırmadan önce veri kümeleri arasındaki yapısal ve anlamsal farklılardan kaynaklanabilecek hataları en aza indirmek için veri kümelerini bazı ön işlemlere tabi tutmak ihtiyacı duyulmuştur.

Bahsi geçen yapısal farklılık, Türkçe WordNet'te yer alan ilişkiler ile otomatik çıkartılan ilişkilerin farklı biçimlerde temsil ediliyor olmasıdır. 2. Bölüm altında değinildiği üzere WordNet'te anlamsal ilişkiler eş anlam kümeleri arasındadır. Başka bir deyişle anlamsal ilişkiler (*eş küme A, ilişki türü, eş küme B*) üçlüleriyle temsil edilmektedir. Eş kümeler ise aralarında eş anlamlılık ilişkisi bulunan sözcüklerden oluşmaktadır. Bu çalışmaya konu olan anlamsal ilişkiler ise WordNet'ten farklı olarak (*sözcük A, ilişki türü, sözcük B*) üçlüleriyle temsil edilmektedir. Bu farklılığı ortadan kaldırmak için Türkçe WordNet'te yer alan ilişkiler açılarak çıkartılan ilişkilerle aynı biçimde temsil edilir duruma getirilmiştir.

Türkçe WordNet ile çıkartılan ilişkiler arasındaki anlamsal farklılık ise ilişki türlerindeki farklılık ya da ilişkilerin tanımlarındaki yorumsal farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Örneğin ConceptNet anlamsal veritabanı bu çalışmada konu olan yapılmış olma ilişkisine yer verirken bu ilişki türü WordNet'te yer almamaktadır. Benzer durum kullanılma ilişkisi için de geçerlidir. Bulunma ve benzerlik ilişkileri ise incelendikleri alt başlıklarda da değinildiği üzere WordNet'te benzer isimlendirilen ilişki türlerine göre farklı olarak tanımlanmaktadır. Bunların dışındaki ilişkilerden alt kavram – üst kavram, eş anlamlılık ve karşıt anlamlılık türleri haricindekiler; ya çalışma kapsamında çıkartılan ilişki türlerinde ya da Türkçe WordNet'te karşılık buldukları ilişki türlerinde sayısal olarak söz konusu üç ilişki türüne göre oldukça azdır. Tüm bu nedenlerin yanında literatürdeki yaygın kullanımları da göz önünde bulundurularak karşılaştırmada sadece bu üç ilişki türüne yer verilmiştir.

Çıkartılan ilişkiler ile Türkçe WordNet arasında yapılacak bir karşılaştırmanın isabetli sonuç vermesinin önünde olabilecek engeller bunlarla da sınırlı değildir. WordNet ile yapılacak bir karşılaştırmanın doğruluğunun önünde olabilecek bir başka engel de çıkartılan ilişkilerin barındırdıkları dolaylı bilgidir kaynaklanabilecektir. Çalışma kapsamında uygulanan diğer

yöntemlerde olduğu gibi Tablo 25’te sonuçları verilen kuralla dayalı ilişki çıkartımı yönteminde de sadece doğrudan elde edilen anlamsal ilişkiler sonuç verisine yansıtılmıştır. Anlamsal ilişki türlerinin tanımları gereği simetriklik ve geçişlilik gibi özelliklerinden faydalanılarak gerçekte sonuç verisinde saklı olan anlamsal ilişkilere dair daha fazla bilgi çıkarılabilir. Örneğin eş anlamlılık ve karşıt anlamlılık simetri özelliğine sahip birer ilişki türüken alt kavram – üst kavram ilişki türü eş anlamlı sözcük kümeleri üzerinde geçişlilik özelliğine sahiptir [19]. WordNet, yapısal organizasyonunun doğası gereği ilişki türlerinin bu özelliklerinden faydalanmaktadır. Yapılacak bir karşılaştırmalı değerlendirmenin doğru sonuç verebilmesi bakımından otomatik çıkartılan ilişkiler için de bu özelliklerden faydalanılması yerinde olacaktır.

Türkçe WordNet’te yer alan ilişkilerin (*sözcük A, ilişki türü, sözcük B*) biçimine dönüştürülmesi ve ilişki türlerinin özelliklerinden faydalanılarak dolaylı ilişkilerin açığa çıkarılması ön işlemleri sonrasında seçilen üç ilişki türü için ilişki kümelerinde yer alan ilişki sayıları Tablo 26’da verilmiştir. Tablonun birinci sütununda otomatik çıkartılan ilişki (OÇİ) sayıları, ikinci sütununda Türkçe WordNet’te (TWN) yer alan ilişki sayıları, son sütunda ise her iki kümede de ortak olarak yer alan ilişki sayıları görülmektedir.

Tablo 26: Uygulanan ön işlemler sonrasında Türkçe WordNet’te yer alan ve otomatik çıkartılan ilişkilerin güncel sayıları

İlişki Türü	İlişki Sayıları		
	OÇİ	TWN	Ortak
Alt – üst kavram	411718	21917	248
Eş anlamlılık	772621	14230	3094
Karşıt anlamlılık	15592	3035	40
Toplam	1199931	39182	3382

Tablodan anlaşılacağı üzere karşılaştırma için referans alınan veri kümesi (Türkçe WordNet) ile “hesaplanan” ya da “öngörülen” değer olarak işleme alınacak otomatik çıkartılan ilişkiler kümesi boyut itibarıyla birbirinden oldukça farklıdır. Dahası, hem Türkçe WordNet hem de otomatik olarak çıkartılan ilişkiler kümesi Türkçedeki tüm sözcükler arasındaki tüm anlamsal ilişkileri barındıran uzayın büyüklüğü göz önünde bulundurulduğunda oldukça az sayıda ilişki içermektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak WordNet’te yer aldığı halde otomatik ilişki çıkartma işleminde kullanılan sözlüklerde yer almayan çok sayıda sözcük olduğu gibi, kaynak sözlüklerde yer aldığı halde WordNet’te yer almayan çok sayıda sözcük de mevcuttur. Bu nedenle doğruluk, isabetlilik ve geri getirim gibi ölçütler kullanarak anlamsal ilişkileri barındıran veri kümelerini değerlendirirken sadece her iki kümede de ortak olarak yer alan sözcükler arasındaki anlamsal ilişkileri değerlendirmeye almak yerinde olacaktır. Değerlendirmede referans alınacak veri kümesi olan Türkçe WordNet’te 15.590, değerlendirmeye tabi tutulacak otomatik çıkartılan ilişki kümesinde ise 57.918 adet farklı sözcük olduğu görülmüştür. Her iki kümede ortak olarak bulunan sözcüklerin sayısı ise 6.037 olarak tespit edilmiştir. Tablo 27’de, sadece bahsi geçen ortak sözcükler arasındaki anlamsal ilişkilerin kümeler bazında sayısı ile bu kümelerde ortak olarak yer alan anlamsal ilişkilerin sayısı verilmiştir.

Tablo 27: Karşılaştırmaya hazır anlamsal ilişki kümelerindeki ortak sözcükler arasındaki ilişki sayıları

İlişki Türü	İlişki Sayıları		
	OÇİ	TWN	Ortak
Alt – üst kavram	10505	9713	248
Eş anlamlılık	22869	7494	3094
Karşıt anlamlılık	769	1817	40
Toplam	34143	19024	3382

Her iki ilişki kümesinde ortak olarak yer alan sözcükler arasındaki ilişkiler üzerinden değerlendirme yapmak, bu ayrımı gözetmeksizin yapılan bir değerlendirmeye göre daha anlamlı olsa da bütünüyle sağlıklı sayılmaz. Değerlendirmede referans olarak alınan Türkçe WordNet alt kümesinin barındırdığı bütün sözcüklerin aralarında bulunabilecek bütün anlamsal ilişkilerin Türkçe WordNet’te yer aldığından söz etmek mümkün değildir. Örneğin “beceri” ve “hüner” sözcüklerinin her ikisi de karşılaştırılan her iki sözcük kümesinde ortak olarak bulunmasına rağmen, otomatik çıkartılan ilişkiler arasında (*beceri, eş anlamlılık, hüner*) anlamsal ilişkisi yer alırken Türkçe WordNet gerçekte var olan [2, 3] bu ilişkiye yer vermemiştir. Aralarında anlamsal ilişki olduğu bilinen iki sözcük için ilişki türünün doğru belirlenip belirlenmediğine dair yapılacak bir değerlendirme, bu gibi durumlardan kaynaklanabilecek yanlışları ortadan kaldıracaktır. Bu amaçla karşılaştırmaya konu olan (*sözcük A, ilişki türü, sözcük B*) biçimindeki ilişkilerden, (*sözcük A, sözcük B*) ikililerinin her iki kümede de ortak olmaları tespit edilmiş ve elde edilen yeni ilişki sayıları Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28: Ortak sözcük ikilileri için anlamsal ilişki sayıları

İlişki Türü	İlişki Sayıları		
	OÇİ	TWN	Ortak
Alt – üst kavram	292	796	248
Eş anlamlılık	3342	3136	3094
Karşıt anlamlılık	48	56	40
Toplam	3682	3988	3382

Tablo 28’de yer alan veriye göre otomatik çıkartılan ilişkiler (OÇİ) kümesindeki 3.682 ilişkide bulunan (*sözcük A, sözcük B*) biçimindeki sözcük ikilisi aynı zamanda Türkçe WordNet’te (TWN) de yer almaktadır. Benzer biçimde TWN’de yer alan anlamsal ilişkilerin 3.988 adetinde yer alan sözcük ikilileri OÇİ’de de ortak olarak yer almaktadır. Ortak sözcük ikililerini barındıran anlamsal ilişki sayıları arasındaki bu farkın nedeni TWN’nin aynı sözcük ikilileri arasında yer alabilecek birden fazla anlamsal ilişkiye izin vermesidir. Seçilen bu ortak sözcük ikilileri arasında yapılan karşılaştırmada ilişki türü de ortak olan ikililerin sayısı ise 3.382 olarak tespit edilmiştir. Bu sayı aynı zamanda iki kümenin (OÇİ ve TWN) bütününde ortak olarak yer alan (*sözcük A, ilişki türü, sözcük B*) üçlülerinin sayısıdır.

Türkçe WordNet’te yer alan ilişkiler (TWN) altın standardında kabul edilip referans alınarak otomatik çıkartılan ilişkiler (OÇİ) değerlendirilecek olursa, Tablo 28’de verilen ortak sözcük ikilileri arasındaki ilişkilere dair karışıklık matrisi (*confusion matrix*) Tablo 29’daki gibi olur.

Tablo 29: Türkçe WordNet'te yer alan ilişkiler referans alınarak oluşturulan karışıklık matrisi

		Öngörülen İlişki (OÇİ)			Toplam (TWN)
		Alt – üst kavram	Eş anlamlılık	Karşıt anlamlılık	
<b>Doğru İlişki (TWN)</b>	Alt – üst kavram	<b>248</b>	234	0	482
	Eş anlamlılık	42	<b>3094</b>	8	3144
	Karşıt anlamlılık	2	14	<b>40</b>	56
<b>Toplam (OÇİ)</b>		292	3342	48	

Tablo 29'da sunulan karışıklık matrisi oluşturulurken belli bir sözcük ikilisi arasında yalnızca bir tür ilişki bulunabileceği varsayılmıştır. Oysa karşılaştırmada referans olarak alınan TWN ilişki kümesinde aynı sözcük ikilisi arasında birden fazla ilişki yer alabilmektedir. Bu durumun karışıklık matrisine yansıyan en önemli sonucu Tablo 29'daki doğru ilişkilerin toplamını gösteren sütun ile Tablo 28'deki TWN sütununun uyumsuz olmasıdır. Eş anlamlılık ve karşıt anlamlılık ilişki türleri için belirgin olmasa da alt – üst kavram ilişki türü için belirgin bir sayısal fark olduğu göze çarpmaktadır. Bu durumun özünde yatan neden, TWN ilişki kümesinde eş anlamlılık ve alt – üst kavram ilişki türleri arasında sıkı bir ayrıma gidilmemiş olmasıdır. Ortak sözcük ikilileri arasındaki ilişki sayılarının gösterildiği Tablo 28'de 796 olarak verilen TWN kümesindeki alt – üst kavram ilişkilerinin 340 tanesi TWN tarafından aynı zamanda eş anlamlılık ilişkisi olarak da gösterilmiştir.

TWN ilişki kümesinde kimi ilişkiler arasında sıkı bir ayrıma gidilmemiş olmasının Tablo 29'daki karışıklık matrisi üzerindeki bir başka yanıltıcı sonucu da referans kümede (TWN) alt – üst kavram ilişkisi olarak gösterildiği halde OÇİ kümesini oluşturan modelce eş anlamlılık ilişkisi olarak öngörülen ilişki sayılarındaki fazlalıktır. Öngörülen model tarafından doğru sınıflandırılan alt – üst kavram türündeki ilişkilerin sayısı 248 iken referans kümede alt – üst kavram olarak belirtildiği halde model tarafından eş anlamlılık olarak sınıflandırılan ilişkilerin sayısı 234'tür. Durum böyle olmasının altında yatan temel nedenler yine karışıklık matrisi oluşturulurken referans kümede bir sözcük ikilisi arasında tek bir ilişki türü olabileceği varsayımı ile alt – üst kavram ve eş anlamlılık ilişki türleri arasında referans küme tarafından sıkı bir ayrıma gidilmemiş olmasıdır. Öngörülen ilişki kümesinde anlam ayrımlarının (*disambiguation*) dikkate alınmaması bu duruma katkıda bulursa da sayılan nedenlerin dışında TWN kümesinin önemli bir kısmının İngilizce dilinden çeviri olması [8] ve insan hatası gibi unsurların da bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Örneğin değerlendirmede kullanılan TWN veritabanında *{besin, gıda}* eş kümesi tekrarlı olarak yer almakta olup eş kümelerden birinin diğerinin üst kavramı olduğu bilgisine yer verilmiştir. Bu durum, *{besin, eş anlamlılık, gıda}* ve *{gıda, eş anlamlılık, besin}* üçlüleriyle temsil edilen ilişkilerin referans kümede tekrarlı olarak yer almasından başka gerçekte var olmayan ilişkilerin de referans kümede yer almasına neden olmuştur. Alt kavram – üst

kavram ilişki türü  $\delta$  ile ifade edilmek üzere *{besin,  $\delta$ , gıda}*, *{besin,  $\delta$ , besin}*, *{gıda,  $\delta$ , gıda}* ve *{gıda,  $\delta$ , besin}* üçlüleriyle temsil edilen ilişkiler söz konusu örnek eş küme için bu hatalı ilişkilere örnektir.

Sözlük verisinden faydalanılarak tamamen otomatik yöntemlerle belli ilişki türleri için anlamsal bilginin çıkarılabilir olduğunu göstermek, bu çalışmanın hedeflenen sonuçları arasındadır. Çalışma sonuçları farklı açılardan değerlendirilmiş ve Türkçe WordNet ilişki kümesiyle mukayese edilmiştir. Çalışmanın başlıca eksik yanı, kurallar yardımıyla anlamsal ilişki çıkarımında sözcük birlikteliklerinin ve anlam ayrımlarının dikkate alınmamasıdır. Farklı sözlükler için farklı kurallar çıkarma gerekliliği de bu yöntemin uygulanmasını zorlaştıran bir dezavantaj olarak sayılabilir.

Gelecekte hedeflenen çalışmalar arasında, kurallar yardımıyla anlamsal ilişki çıkarımında sözcük birlikteliklerinin ve anlam ayrımlarının dikkate alınması ile çıkartılan anlamsal ilişkilerin sayı ve güvenilirliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar sayılabilir.

Yapılan çalışma temelde şu anda sürdürülen Türkçe Hayat Bilgisi Veritabanı oluşturulması projesinin [20] destekleyici parçalarından birisidir. Bu çalışmada elde edilen ilişkiler ve güvenilirlik sayıları Hayat Bilgisi veri tabanının güncellenmesinde kullanılacaktır. Hayat Bilgisi veri tabanının arayüzüne <http://www.kemikoyun.yildiz.edu.tr/commonsense/> adresinden erişilebilir.

## Kaynaklar

- [1] Chodorow, M. S. ve Byrd, R. J., "Extracting Semantic Hierarchies from a Large On-line Dictionary", *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 1984, 299-304.
- [2] <http://www.tdkterim.gov.tr/bts/>
- [3] <http://tr.wiktionary.org/>
- [4] Miller, G. A., Beckwith, R., Fellbaum, C., Gross, D. ve Miller, K., "Introduction to WordNet: An On-line Lexical Database", 1993.
- [5] Lenat, D. B., "Cyc: A Large-Scale Investment in Knowledge Infrastructure", *The Communications of the ACM*, 38(11):33-38, 1995.
- [6] Singh P., Lin, T., Mueller, E. T., Lim, G., Perkins T. ve Zhu, W. L., "Open Mind Common Sense: Knowledge acquisition from the general public", *Proceedings of the First International Conference on Ontologies, Databases, and Applications of Semantics for Large Scale Information Systems*, Irvine, CA, 2002.
- [7] Liu, H. ve Singh, P., "ConceptNet: A Practical Commonsense Reasoning Toolkit", *BT Technology Journal*, (22), Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] Bilgin O., Çetinoğlu Ö. ve Oflazer K., "Building a Wordnet for Turkish", *Romanian Journal of Information Science and Technology*, cilt 7, 1-2, 2004.
- [9] Amasyalı M. F., "Türkçe Wordnet'in Otomatik Olarak Oluşturulması", *SIU 2005*, 2005.
- [10] Güngör, O. ve Güngör, T., "Türkçe için Bilgisayarla İşlenebilir Sözlük Kullanarak Kavramlar Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi", *Akademik Bilişim Konferansı*, 2007.

- [11] <https://zemberek.dev.java.net/>
- [12] Roche, E. ve Schabes Y., "Finite-State Language Processing", The MIT Press, Cambridge, 1997.
- [13] <http://www.pcre.org/pcre.txt>
- [14] Scott, S. ve Matwin, S., "Text Classification using WordNet Hypernyms", *Workshop on Usage of WordNet in Natural Language Processing Systems*, Canada, 1998.
- [15] Navigli, R. ve Velardi, P., "An analysis of ontology-based query expansion strategies", *Proceedings of the 14th European Conference on Machine Learning*, 2003.
- [16] Fong, S., "Semantic Opposition and WordNet", *Journal of Logic, Language and Information*, 13:159–171, 2004.
- [17] Croft, W. ve Cruse, D. A., "Cognitive linguistics", Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [18] [http://tr.wiktionary.org/wiki/Yardıml:Madde\\_şablonu](http://tr.wiktionary.org/wiki/Yardıml:Madde_şablonu)
- [19] Miller, G. A., "WordNet: A Lexical Database for English", *Communications of ACM(11)*, cilt 38, 39-41, 1995.
- [20] Amasyalı, M. F., İnak, B. ve Ersen, M. Z., "Türkçe Hayat Bilgisi Veri Tabanının Oluşturulması", *Akademik Bilişim Konferansı*, 2010.



# MIMO Sistemler için Gelişmiş Uzaysal Modülasyon Teknikleri

## Advanced Spatial Modulation Techniques for MIMO Systems

Ertuğrul Başar<sup>1</sup>, Ümit Aygölü<sup>1</sup>, Erdal Panayırıcı<sup>2</sup>, H. Vincent Poor<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
basarer@itu.edu.tr, aygol@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Kadir Has Üniversitesi  
eepanay@khas.edu.tr

<sup>3</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Princeton Üniversitesi  
poor@princeton.edu

### Özet

Uzaysal modülasyon (SM), geleneksel işaret kümelerine ek olarak anten indisleriyle de bilgi iletmek temeline dayanan, yakın zamanda önerilmiş umut verici bir çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletim tekniğidir. Bu bilgilendirici makalenin temel amacı, telsiz iletişim alanında çalışan araştırmacılara bu güncel ve yeni konuyu tanıtmak, SM konusunda yakın zamanda yapılan çalışmaları gözden geçirmek ve SM sistemlerinin hata başarımını iyileştirmek için literatürde önerdiğimiz iki yeni ve özgün MIMO iletim sistemini okurların dikkatine sunmaktır [12-16]. Uzay-zaman blok kodlamalı uzaysal modülasyon (STBC-SM) olarak adlandırılan ilk sistemde SM, uzay-zaman blok kodlama (STBC) ile birleştirilmiştir. Dolayısıyla bu sistemde, bilgi simgeleri sadece uzay ve zaman bölgelerine değil aynı zaman anten bölgesine de dağıtılmıştır. STBC-SM için genel bir tasarım yöntemi verilmiş ve en büyük olabirlikli (ML) kod çözücü incelenmiştir. Bilgisayar benzetimleri yardımıyla STBC-SM yapılarının klasik SM ve V-BLAST yapılarına göre oldukça iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir. İncelenen ikinci sistemde ise, ek kodlama kazançları elde etmek için, SM ile kafes kodlama birleştirilerek kafes kodlamalı uzaysal modülasyon (TC-SM) olarak adlandırılan bir MIMO iletim sistemi sunulmuştur. Bir kafes kodlayıcı ile SM eşleyicinin birlikte tasarlandığı bu sistemin çiftsel hata olasılığı (PEP), ilişkisiz Rayleigh sönümlemeli kanallar için hesaplanarak kod tasarım ölçütleri verilmiştir. Ardından bu ölçütler 4, 8 ve 16-durumlu TC-SM sistemlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bilgisayar benzetimleri sonucu incelenen TC-SM yapılarının klasik uzay-zaman kafes kodlara göre daha düşük kod çözme karmaşıklığı ile daha iyi hata başarımları sağladığı gösterilmiştir.

### Abstract

Spatial modulation (SM), which has recently been proposed and is based on the use of the antenna indices to transmit information in addition to the conventional signal constellations, is a promising multiple-input multiple-output (MIMO) transmission technique. The main objective of this tutorial paper is to introduce the researcher working in wireless communication the recent developments and results in the area of the SM as well as the two new and novel MIMO transmission schemes, which have been proposed in the literature quite recently, to improve the error perfor-

mance of the SM system [12-16]. In the first scheme called space-time block coded spatial modulation (STBC-SM), SM is combined with space-time block coding (STBC). Therefore, in this scheme, information symbols are expanded not only to the space and time domains but also to the antenna domain. A general design technique is given and maximum likelihood (ML) decoder is investigated for STBC-SM. It is shown by computer simulations that the STBC-SM systems achieve significantly better error performance than classical SM and V-BLAST systems. In the second reviewed scheme, to obtain additional coding gains, a new MIMO communication scheme called trellis coded spatial modulation (TC-SM) is presented by combining SM with trellis coding. For uncorrelated Rayleigh fading channels, code design criteria are given by deriving pairwise error probability (PEP) of this system, in which a trellis encoder and SM mapper are jointly designed. These criteria are then used to obtain 4, 8 and 16-state TC-SM schemes. It is shown via computer simulations that the investigated TC-SM schemes achieve better error performance than the classical space-time trellis codes, at reduced decoder complexity.

### 1. Giriş

Gelecek nesil telsiz iletişim sistemleri, tek verici ve tek alıcı antenli sistemlere göre kanal sığasında ve hata başarımında önemli iyileşmeler sağlayan çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletim tekniklerine dayanmaktadır [1]. Dolayısıyla geçen on yıl içerisinde MIMO iletim teknikleri üzerine oldukça yoğun araştırmalar yapılmış ve iki genel iletim tekniği, uzaysal çoğullama ve uzay-zaman blok kodlama (STBC<sup>§</sup>) önerilmiştir. Vertical-Bell Lab layered space-time (V-BLAST) [2] gibi uzaysal çoğullama sistemlerinde gelen bilgi bitleri tüm verici antenlere dağıtılarak oldukça yüksek band verimliliklerine ulaşmak mümkündür. Ancak böyle bir sistemin alıcısı tüm antenler aynı anda iletimde olduğu için kanallar arası girişimden dolayı oldukça karmaşıktır. Diğer yandan STBC'ler düşük alıcı karmaşıklığı ve yüksek çeşitleme kazançları sağlamaktadırlar [3],[4]. Ancak simge tabanlı çözülebilen STBC'ler için iletim hızı 3/4 simge/kanal kullanımı ile sınırlıdır. Literatürde daha yüksek iletim hızına sahip birçok STBC önerilmiştir [5],[6]. Ancak bu kodların alıcı karmaşıklıkları kullanılan işaret kümesinin eleman sayısına göre üstel olarak ar-

<sup>§</sup>STBC kısaltması metin içerisindeki konumuna göre uzay-zaman blok kodlama/kod için kullanılmaktadır.

tarak gerçekleştirmelerini pahılaştırmakta ve zorlaştırmaktadır.

Uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM), MIMO sistemler için literatürde varolan yöntemlere seçenек olarak önerilmiş umut verici, yeni bir yaklaşımdır [7]. SM'in temel ilkesi, bilgi bitlerinin iki boyutlu geleneksel  $M$ 'li faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) ya da dik genlik modülasyonu (QAM) işaret kümelerinin elemanlarıyla birlikte anten indislerine de eşlenmesine dayanmaktadır. Dolayısıyla bilgi sadece taşıyıcının genlik/faz değerleriyle değil aynı zamanda anten indisleriyle de taşınmaktadır. Alıcı tarafta ise optimum kod çözücü, bu sistem için hem işaret kümesini hem de kullanılabilir antenleri göz önünde bulundurarak ortak bir karar vermektedir [8]. SM'in V-BLAST sistemine göre daha basit bir yapıyla daha iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir [8]. Son zamanlarda sadece anten indislerini kullanarak bilgi ileten ve SM'in özel bir şekli olan uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) olarak adlandırılan yeni bir sistem de önerilmiştir [9]. SM ve SSK sistemlerinde çoklu verici antenler sadece bilgi iletmek amacıyla kullanılmış, ancak MIMO sistemlerin verici çeşitleme potansiyeli düşünülmemiştir. Bu makalede, bu iki sistemin yukarıda sözü geçen dezavantajın giderilmesi amacıyla önerdiğimiz yeni bir sistem incelenecektir. En yeni çalışmalarda ise kafes kodlamalı modülasyonun (TCM) [10] temel ilkesi SM'e uygulanarak bir kafes kodlamalı sistem önerilmiştir [11]. Bu sistemde, bir grup bilgi biti önce iki diziyeye ayrılmakta, ikinci dizi doğrudan SM eşleyiciye verilirken, ilk dizi bir kafes kodlayıcıdan ve ardından SM eşleyici ise kodlanmış bitlere göre etkin anteni seçip bu anten üzerinden kodlanmamış bitler tarafından belirlenen modülasyonlu simgeyi iletmektedir. Sadece ilişkin anten indisini belirleyen bitlerin kodlandığı bu optimum olmayan sistemin ilişkisiz kanallarda klasik SM'e göre hiçbir iyileşme sağlamadığı, ancak ilişkili kanallarda hata başarımında iyileşmeler sağladığı gösterilmiştir. Bu makalede, bu sisteme seçenек olarak hem ilişkisiz hem de ilişkili kanallarda kafes kodlama ile ek kodlama kazançları elde etmek için önerilmiş yeni bir yöntem de incelenecektir.

Bu bilgilendirici (tutorial) makalede oldukça güncel ve ilginç bir konu olan SM alanında yapılan çalışmaların sonuçlarının ve bizim literatüre yaptığımız özgün katkıların bu alana ilgi duyan ve duyacak araştırmacılara sunulması hedeflenmektedir. Bu amaçla geleneksel SM sistemine göre hata başarımında önemli iyileşmeler sağlayan iki yeni MIMO iletim sistemi gözden geçirilmiştir. İlk olarak, SM ile STBC birleştirilerek tasarlanan ve STBC-SM adıyla [12] ve [13]'te yakın zamanda önerdiğimiz yeni bir teknik sunulmaktadır. Bu sistemde bilgi, ilişkin MIMO sistemin antenlerinin değişik kombinasyonları üzerinden iletilen bir STBC matrisi ile taşınmaktadır. Alamouti kodunun [3] kullanıldığı bu sistemde bilgi sadece Alamouti kodu içerisindeki iki karmaşık simge ile değil aynı zamanda Alamouti kodunun iletiminde kullanılan iki verici antenin indisleri tarafından da taşınmaktadır. Herhangi sayıda verici anten için STBC-SM sisteminin tasarımı ve optimizasyonuna ait teknikler verilmiş, çeşitleme ve kodlama kazançlarının analizi yapılmıştır. Bu sistem için hem iletilen sigmelere hem de kullanılan antenlerin indislerine karar veren en büyük olasılıklı (ML) alıcı oluşturulmuştur. Bilgisayar benzetimleri sonucu STBC-SM yapısının SM'e göre oldukça iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir. Sunulan ikinci yapı ise, STBC-SM yapısını bir aşama daha ilerleterek, çeşitleme kazancının yanı sıra ek kodlama kazançları da elde etmek için

SM ile kafes kodlamayı doğrudan birleştiren ve kafes kodlamalı uzaysal modülasyon (TC-SM) olarak adlandırılan yeni bir sistemdir [14-16]. Bu MIMO iletim sisteminde TCM tekniğinden esinlenerek kafes kodlayıcı ve SM eşleyici birlikte tasarlanmıştır. Bu yapının MIMO sistemin verici antenleri arasında anahtarlama bir çeşit sanal serpiştirme etkisi oluşturmakta ve bunun sonucunda serpiştirici kullanılmaksızın zaman çeşitlemesi elde edilebilmektedir. TC-SM yapısının öncelikle koşullu çiftsel hata olasılığı (CPEP) çıkartılmış, ardından çeşitli durumlar için koşulsuz çiftsel hata olasılığı (UPEP) değerleri ilişkisiz Rayleigh sönümlemeli kanallar için hesaplanmıştır. Bunun sonucunda TC-SM yapısı için tasarım ölçütleri verilmiş ve bu ölçütlere göre 2 ve 3 bit/s/Hz band verimlilikleri için 4, 8 ve 16-durumlu TC-SM sistemleri sunulmuştur. Bilgisayar benzetimleri ile incelenen sistemlerin uzay-zaman kafes kodlardan (STTC) [17] ve [11]'de önerilen yapıdan daha iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir. TC-SM yapısının STTC'lerden daha düşük kod çözme karmaşıklığına sahip olduğu da gösterilmiştir.

Gösterim: Kalın büyük harfler matrisler için, kalın küçük harfler ise vektörler için kullanılmıştır.  $(\cdot)^*$ ,  $(\cdot)^T$  ve  $(\cdot)^H$  sırasıyla karmaşık eşleniği, evriği and Hermiyen eşleniği,  $\|\cdot\|$ ,  $\det(\cdot)$  ve  $\text{rank}(\cdot)$  sırasıyla bir matrisin Frobenious normunu, determinantını ve rankını,  $\mathbf{A}(p, q)$ ,  $\mathbf{A}$  matrisinin  $p$ . satır ve  $q$ . sütunundaki elemanını,  $\mathbf{0}_{m \times n}$ , tüm elemanları sıfır olan  $m \times n$  boyutlu bir matrisi,  $\Re\{x\}$ , karmaşık  $x$  değişkeninin gerçel kısmını,  $n(\eta)$ ,  $\eta$  kümesindeki elemanların sayısını,  $\xi$ ,  $M$  elemanlı karmaşık işaret uzayını ve  $\Pr(\cdot)$  ise bir olayın olasılığını göstermektedir. Bir  $X$  raslantı değişkeninin olasılık yoğunluk işlevi (p.d.f.)  $f(x)$  ile gösterilmiştir.  $\mathcal{N}(m_X, \sigma_X^2)$ ,  $m_X$  ortalama ve  $\sigma_X^2$  varyanslı Gauss dağılımını,  $\mathcal{CN}(0, \sigma_X^2)$  ise dairesel simetrik karmaşık Gauss dağılımını ve  $Q(\cdot)$  standart Gauss dağılımının kuyruk olasılığını göstermektedir.  $\binom{n}{k}$ ,  $[x]$  ve  $\lceil x \rceil$  sırasıyla binom katsayısını,  $x$ 'den küçük ya da eşit en büyük tamsayıyı ve  $x$ 'den büyük ya da eşit en küçük tamsayıyı göstermektedir.  $\lfloor x \rfloor_{2^p}$  ise  $x$ 'den küçük ya da eşit en ikinin kuvveti olan en büyük tamsayıyı göstermektedir.

## 2. Uzaysal Modülasyon (SM)

SM, aynı anda tüm antenlerin iletimde olduğu V-BLAST gibi sistemlere seçenек olarak önerilmiş umut verici yeni bir MIMO iletim tekniğidir. SM tekniğinin geleneksel MIMO iletim sistemlerine göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

1. SM'de kanallar arası girişim tamamen ortadan kaldırılmıştır. Dolayısıyla bu sistemin alıcısı, V-BLAST sisteminin alıcısına göre karmaşık girişim yok edici algoritmalara gereksinim duymayacağı için daha basittir.
2. Bu sistemde belli bir anda sadece tek bir antenin iletimde olması dolayısıyla vericide gerekli radyo frekans (RF) katlarının sayısı kuramsal olarak tektir ancak pratikte bazı problemlerle karşılaşılabılır [9].
3. SM sistemi için alıcı anten sayısında herhangi bir alt sınır yoktur.
4. SM sisteminde anten indisleriyle ek bilgi bitleri iletildiği için, artan verici anten sayısı ile birlikte SM sisteminin band verimliliği logaritmik olarak artmaktadır.

$n_T$  verici ve  $n_R$  alıcı antenden oluşan bir MIMO sistemi ele alacak olursak,  $\mathbf{u}$  ile gösterilen ikili bilgi dizisi şu şekilde SM



tekniki ile iletilmektedir. SM verici her iletim aralığında  $n = \log_2(Mn_T)$  bitin, ilk  $\log_2(n_T)$  bitini ilişkin anten indislerine, geriye kalan  $\log_2(M)$  biti de ilişkin  $M$ -PSK ya da  $M$ -QAM işaret kümelerinin elemanlarına eşleyerek sadece tek bir elemanı sıfırdan farklı olan  $1 \times n_T$ 'lik  $\mathbf{s} = [0 \ 0 \ \dots \ s \ 0 \ \dots \ 0]$  vektörünü  $s \in \xi$  olmak üzere iletmektedir. Alınan  $1 \times n_R$  işaret vektörü  $\mathbf{y} = \mathbf{s}\mathbf{H} + \mathbf{n}$  olmak üzere burada  $\mathbf{H}$  ve  $\mathbf{n}$ , sırasıyla elemanları  $\mathcal{CN}(0, 1)$  ve  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  dağılımına sahip bağımsız ve eş dağılımlı (i.i.d.) raslantı değişkenleri olan,  $n_T \times n_R$  boyutlu kanal matrisi ve  $1 \times n_R$  boyutlu toplamsal beyaz Gauss gürültü vektörüdür. SM'in ilk olarak önerildiği [7]'de, iletilen simge ile kullanılan anten indisine ayrı ayrı karar veren oldukça basit ancak optimum olmayan bir alıcı önerilmiştir. [8]'de ise hem ilişkin işaret kümesinin elemanlarını hem de kullanılabilir antenleri göz önüne alan optimum SM alıcısı sunulmuştur. ML sezim tekniğine göre çalışan bu alıcı, olası tüm antenleri ve  $\xi$  işaret kümesinin elemanlarını (tüm olası  $\mathbf{s}$  vektörlerini) tarayarak  $f(\mathbf{y} | \mathbf{s}, \mathbf{H}) = (\pi N_0)^{-n_R} \exp(-\|\mathbf{y} - \mathbf{s}\mathbf{H}\|^2 / N_0)$  olarak verilen  $\mathbf{y}$ 'nin koşullu p.d.f.'inin maksimum değerini veren bir  $\hat{\mathbf{s}}$  vektörünü bularak, kullanılan antene ve ilişkin simgeye karar vermektedir. SM için ML sezicinin optimum olmayan seziciye göre yaklaşık 4 dB'lik bir işaret-gürültü oranı (SNR) kazancı sağladığı gösterilmiştir [8]. Bu çalışmada yukarıda kısaca anlatılan SM sisteminin hata başarımını iyileştirebilmek amacıyla yakın zamanda önerilmiş iki farklı yöntem incelenmiştir.

### 3. Uzay-Zaman Blok Kodlamalı Uzaysal Modülasyon (STBC-SM)

STBC-SM yapısında hem STBC matrisi içerisindeki modülasyonlu simgeler hem de bu simgelerin iletiminde kullanılan antenlerin indisleri bilgi taşımaktadır. Basit sezimi ve yüksek hızı dolayısıyla çekirdek STBC olarak Alamouti kodu seçilmiştir. Alamouti kodu ile  $M$ -PSK ya da  $M$ -QAM gibi bir işaret kümesinden seçilen  $x_1$  ve  $x_2$  karmaşık bilgi simgeleri, iki iletim aralığında iki verici antenden şu şekilde iletilmektedir:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Burada sütunlar ve satırlar sırasıyla verici antenlere ve zaman aralıklarına denk düşmektedir. STBC-SM'de (1)'de verilen matris anten bölgesine genişletilmiştir. STBC-SM kavramını aşağıdaki basit örneklerle sunabiliriz.

*Örnek (Dört verici anten ve BPSK ile STBC-SM):* Alamouti kodunu aşağıda verilen dört kod sözcüğünden birini kullanarak ileten dört verici antenli bir MIMO sistemi göz önüne alalım:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \{\mathbf{X}_{11}, \mathbf{X}_{12}\} = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ -x_2^* & x_1^* & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \right\} \\ \chi_2 &= \{\mathbf{X}_{21}, \mathbf{X}_{22}\} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & -x_2^* & x_1^* & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_2 & 0 & 0 & x_1 \\ x_1^* & 0 & 0 & -x_2^* \end{pmatrix} \right\} e^{j\theta}. \end{aligned} \quad (2)$$

Burada  $\chi_i, i = 1, 2$  STBC-SM kodları olup her biri birbirleriyle örtüşmeyen sütunlara sahip ikişer STBC-SM kod sözcüğü  $\mathbf{X}_{ij}, j = 1, 2$  içermektedir. STBC-SM kod ailesi  $\chi = \bigcup_{i=1}^2 \chi_i$  ile gösterilmiştir. Bir STBC-SM kodunun kod sözcükleri her zaman örtüşmeyen sütunlara sahip olup  $\mathbf{X}_{ij} \mathbf{X}_{ik}^H = \mathbf{0}_{2 \times 2}, j, k = 1, 2, \dots, a, j \neq k$  eşitliği geçerlidir. (2)'deki  $\theta$

Tablo 1: 2 bit/s/Hz iletim için BPSK ve Alamouti kodu kullanan STBC-SM yapısının eşleme kuralı

	Giriş Bitleri	İletim Matrisleri		Giriş Bitleri	İletim Matrisleri
$\chi_1$	0000	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\chi_2$	1000	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0001	$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		1001	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0010	$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		1010	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0011	$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		1011	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0100	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$		1100	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0101	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$		1101	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0110	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$		1110	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
	0111	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$		1111	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$

ise verilen bir işaret kümesi için maksimum çeşitleme ve kodlama kazançları elde etmek için optimize edilmesi gereken bir dönme açısıdır.  $\theta$  göz önüne alınmadığında değişik kodlara ait kod sözcük çiftleri, örtüşen sütunları dolayısıyla çeşitleme derecesini bire düşüreceklerdir.  $(u_1, u_2, u_3, u_4)$  ile gösterilen dört adet bilgi bitinin iki ardışık zaman aralığında STBC-SM ile iletildiğini göz önüne alalım. 2 bit/s/Hz iletim hızı için eşleme kuralı (2)'deki kod sözcükleri ve BPSK modülasyonu için Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de ilk iki veri biti  $(u_1, u_2)$  anten çifti konumu  $\ell$ 'yi belirlerken, son iki veri biti  $(u_3, u_4)$  de BPSK simge çiftini belirlemektedir.

#### 3.1. STBC-SM Sistem Tasarımı ve Optimizasyonu

Bu alt bölümde, Alamouti kodu kullanan STBC-SM yapısı  $n_T$  verici antenli MIMO sistemler için genelleştirilecektir. Duruşumsuz Rayleigh sönümlenmeli kanallar için önemli bir tasarım parametresi olan iki STBC-SM kod sözcüğü (iletilen  $\mathbf{X}_{ij}$  ve hatalı çözülen  $\hat{\mathbf{X}}_{ij}$ ) arasındaki kodlama kazancı uzaklığı (CGD) [18] şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\delta_{\min}(\mathbf{X}_{ij}, \hat{\mathbf{X}}_{ij}) = \min_{\mathbf{x}_{ij}, \hat{\mathbf{x}}_{ij}} \det(\mathbf{X}_{ij} - \hat{\mathbf{X}}_{ij})(\mathbf{X}_{ij} - \hat{\mathbf{X}}_{ij})^H. \quad (3)$$

$\chi_i$  ve  $\chi_j$  gibi iki kod arasındaki CGD ise

$$\delta_{\min}(\chi_i, \chi_j) = \min_{k, l} \delta_{\min}(\mathbf{X}_{ik}, \mathbf{X}_{jl}) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmıştır. STBC-SM yapısının minimum CGD'si de

$$\delta_{\min}(\chi) = \min_{i, j, i \neq j} \delta_{\min}(\chi_i, \chi_j) \quad (5)$$

şeklinde dir. Aynı kodun içerisindeki birbirleriyle örtüşmeyen kod sözcükleri arasındaki CGD, (5)'in sağ tarafından her zaman büyük ya da eşit olacağı için (5)'de verilen  $\delta_{\min}(\chi)$ 'in maksimizasyonu minimum determinant ölçütüne özdeştir [18].

Klasik SM'in zıttına STBC-SM sisteminde verici antenlerin sayısının 2'nin tam katı olması gerekli değildir. Bunun nedeni

$n_T$  verici antenin değişik kombinasyonlarının kullanılmasdır. Aşağıda, STBC-SM sistemini tasarlamak için bir algoritma verilmiştir:

1. Verilen bir verici anten sayısı  $n_T$  için,  $p$  pozitif bir tam sayı olmak üzere  $c = \lfloor \frac{n_T}{2} \rfloor_{2^p}$  ile Alamouti kodunun iletimi için olurlu anten kombinasyonlarının (STBC-SM kod sözcüklerinin) toplam sayısı hesaplanır.
2. Her bir kod  $\chi_i, i = 1, 2, \dots, n-1$  içerisindeki kod sözcük sayısı  $a = \lfloor n_T/2 \rfloor$  ve toplam kod sayısı  $n = \lceil c/a \rceil$  ile hesaplanır. Dikkat edileceği üzere son kod  $\chi_n, a$  kod sözcüğü içermeyebilir. Bu kodun eleman sayısı  $a' = c - a(n-1)$ 'dir.
3. Birbirleriyle örtüşmeyen  $a$  kod sözcüğü içeren  $\chi_1$  kodunun oluşturulmasıyla işleme başlanır:

$$\chi_1 = \left\{ \begin{array}{l} (\mathbf{X} \mathbf{0}_{2 \times (n_T-2)}), \\ (\mathbf{0}_{2 \times 2} \mathbf{X} \mathbf{0}_{2 \times (n_T-4)}), \\ (\mathbf{0}_{2 \times 4} \mathbf{X} \mathbf{0}_{2 \times (n_T-6)}), \\ \vdots \\ (\mathbf{0}_{2 \times 2(a-1)} \mathbf{X} \mathbf{0}_{2 \times (n_T-2a)}) \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Buradaki  $\mathbf{X}$ , (1)'de tanımlanmıştır.

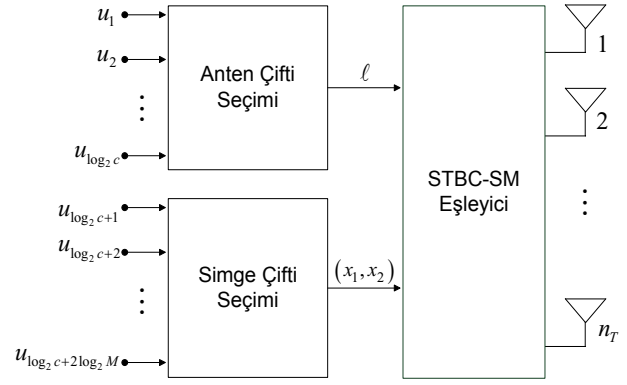
4. Benzer şekilde diğer kodlar  $\chi_i, 2 \leq i \leq n$ , aşağıdaki iki önemli nokta göz önüne alınarak oluşturulur:
  - Her kod  $n_T$  verici antenin kombinasyonlarından seçilen birbirleriyle örtüşmeyen kod sözcükleri içermelidir.
  - Bir koda kullanan bir anten kombinasyonu diğer kodlar için asla kullanılmamalıdır.
5. Verilen işaret kümesi ve anten sayısı göz önüne alınarak, her bir kod  $\chi_i, 2 \leq i \leq n$  için (5)'de verilen  $\delta_{\min}(\chi)$ 'i maksimize eden dönme açıları  $\theta_i$  belirlenir.

STBC-SM kod sözcükleri bu algoritma ile tasarlandığında, farklı şekillerde anten kombinasyonları seçilebilir ancak bu başarımlı açıdan farklılık oluşturmayacaktır.  $c$  adet anten kombinasyonu (STBC-SM kod sözcüğü) olduğu için, STBC-SM sisteminin band verimliliği

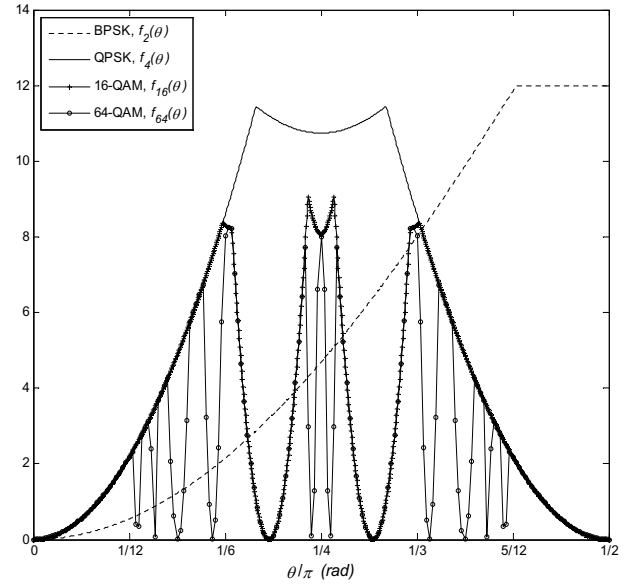
$$\eta = \frac{1}{2} \log_2 c + \log_2 M \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır. STBC-SM vericisinin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Her iki ardışık zaman aralığında  $2\eta$  bit  $u = (u_1, u_2, \dots, u_{\log_2 c}, u_{\log_2 c+1}, \dots, u_{\log_2 c+2\log_2 M})$  STBC-SM vericisine gelmekte, ilk  $\log_2 c$  bit ilişkin anten çift konumu  $\ell = u_1 2^{\log_2 c-1} + u_2 2^{\log_2 c-2} + \dots + u_{\log_2 c} 2^0$ 'i belirlerken, son  $2\log_2 M$  bit ise  $(x_1, x_2)$  simge çiftini belirlemektedir. Alamouti kodunun band verimliliği olan  $\log_2 M$  bit/s/Hz ile karşılaştırıldığında STBC-SM ile anten modülasyonu sayesinde  $\frac{1}{2} \log_2 c$  bit/s/Hz'lik bir artış yakalanmıştır. STBC-SM sisteminin optimizasyonu için iki farklı durum göz önüne alınmıştır.

**Durum 1** -  $n_T \leq 4$ : Bu durumda sadece iki kod  $\chi_1$  ile  $\chi_2$  ve tek bir dönme açısı  $\theta$  olup,  $\delta_{\min}(\chi_1, \chi_2)$  doğrudan birbirleriyle örtüşen herhangi iki kod sözcüğü düşünülerek hesaplanabilir. Örneğin  $\mathbf{X}_{1k} \in \chi_1$  iletilen ve  $\hat{\mathbf{X}}_{1k} = \mathbf{X}_{2l} \in \chi_2$  hatalı çözülen



Şekil 1: STBC-SM ML vericisinin blok şeması



Şekil 2: (9)'da verilen  $\delta_{\min}(\chi)$ 'in BPSK, QPSK, 16-QAM ve 64-QAM için değişimi ( $f_2(\theta)$ ,  $f_4(\theta)$ ,  $f_{16}(\theta)$  and  $f_{64}(\theta)$ )

kod sözcüğü olmak üzere,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{1k} &= (\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0}_{2 \times (n_T-2)}) \\ \mathbf{X}_{2l} &= (\mathbf{0}_{2 \times 1} \ \hat{\mathbf{x}}_1 \ \hat{\mathbf{x}}_2 \ \mathbf{0}_{2 \times (n_T-3)}) e^{j\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

seçildiğinde,  $\mathbf{X}_{1k}$  ve  $\hat{\mathbf{X}}_{1k}$  arasındaki minimum CGD, (3) ile

$$\begin{aligned} \delta_{\min}(\mathbf{X}_{1k}, \hat{\mathbf{X}}_{1k}) &= \min_{\mathbf{x}_{1k}, \hat{\mathbf{x}}_{1k}} \left\{ \left( \kappa - 2\Re \left\{ \hat{x}_1^* x_2 e^{-j\theta} \right\} \right) \left( \kappa + 2\Re \left\{ x_1 \hat{x}_2^* e^{j\theta} \right\} \right) \right. \\ &\quad \left. - |x_1|^2 |\hat{x}_1|^2 - |x_2|^2 |\hat{x}_2|^2 + 2\Re \left\{ x_1 \hat{x}_1^* x_2 \hat{x}_2^* e^{j2\theta} \right\} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $\kappa = \sum_{i=1}^2 (|x_i|^2 + |\hat{x}_i|^2)$  şeklindedir. Şekil 2'de bilgisayar aramaları ile  $\delta_{\min}(\mathbf{X}_{1k}, \hat{\mathbf{X}}_{1k})$  değerleri  $\theta \in [0, \pi/2]$ 'nin bir işlevi olarak BPSK, QPSK, 16-QAM ve 64-QAM işaret kümeleri için hesaplanmıştır. Şekil 2'deki bu eğriler sırasıyla  $M = 2, 4, 16$  ve  $64$  için  $f_M(\theta)$  ile gösterilmiştir. Bu işlevleri maksimize eden  $\theta$  değerleri Şekil 2'den

Tablo 2: STBC-SM sisteminin temel parametreleri

$n_T$	$c$	$a$	$n$	$\delta_{\min}(\chi)$		
				$M=2$	$M=4$	$M=16$
3	2	1	2	12	11.45	9.05
4	4	2	2	12	11.45	9.05
5	8	2	4	4.69	4.87	4.87
6	8	3	3	8.00	8.57	8.31
7	16	3	6	2.14	2.18	2.18
8	16	4	4	4.69	4.87	4.87

şu şekilde belirlenmiştir:

$$\max_{\theta} \delta_{\min}(\chi) = \begin{cases} \max_{\theta} f_2(\theta) = 12, & \text{eğer } \theta = 1.57 \text{ rad} \\ \max_{\theta} f_4(\theta) = 11.45, & \text{eğer } \theta = 0.61 \text{ rad} \\ \max_{\theta} f_{16}(\theta) = 9.05, & \text{eğer } \theta = 0.75 \text{ rad} \\ \max_{\theta} f_{64}(\theta) = 8.23, & \text{eğer } \theta = 0.54 \text{ rad.} \end{cases}$$

**Durum 2** -  $n_T > 4$ : Bu durumda,  $n > 2$  olup optimize edilecek dönme açıları artan sırada  $\theta_1 = 0 < \theta_2 < \theta_3 < \dots < \theta_n < p\pi/2$  şeklindedir. Burada BPSK için  $p = 2$ , QPSK içinse  $p = 1$  dir. BPSK ve QPSK için  $\theta_k, k = 1, \dots, n$  açılarının eşit aralıklı seçilmesinin STBC-SM için minimum CGD'yi maksimize ettiği deneyler sonucu görülmüştür:

$$\theta_k = \begin{cases} \frac{(k-1)\pi}{n}, & \text{BPSK için} \\ \frac{(k-1)\pi}{2n}, & \text{QPSK için.} \end{cases} \quad (10)$$

Buna göre BPSK ve QPSK işaret kümeleri için maksimum  $\delta_{\min}(\chi)$  değerleri sırasıyla  $f_2(\pi/n)$  ve  $f_4(\pi/2n)$  olarak hesaplanmıştır. BPSK ve QPSK işaret kümeleri için optimum açıların belirlenmesindeki bu kolaylıkta  $f_2(\theta)$  ve  $f_4(\theta)$  işlevlerinin doğrusala yakın davranışları etkili olmuştur. Diğer taraftan 16-QAM ve 64-QAM işaret kümeleri için  $f_{16}(\theta)$  ve  $f_{64}(\theta)$ 'nin doğrusal olmayan ve değişik değerlerde sıfırlanan doğası nedeniyle optimum açıların  $\pi/2n$ 'nin tam katları olmaları garanti değildir. Ancak bilgisayar aramaları sonucu 16-QAM için  $n \leq 6$  olması durumunda  $\theta_k = (k-1)\pi/2n, 1 \leq k \leq n$  şeklinde seçilen açıların optimum olduğu görülmüştür. Diğer durumlarda ise optimum açıları bilgisayar araması ile bulunmalıdır.

Tablo 2'de STBC-SM yapısının  $3 \leq n_T \leq 8$  için temel parametreleri verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere anten sayısı ile birlikte STBC-SM sisteminin kod sözcük sayısı (band verimliliği) artmaktadır. Ancak bu da daha çok açının optimizasyonuna ve minimum CGD'de düşüşe neden olmaktadır.

Aşağıda bu bölümde sunulan STBC-SM tasarım algoritmasına  $n_T = 8$  için bir örnek verilmiştir.

*Örnek:* Tablo 2'den  $n_T = 8$  için  $c = 16, a = n = 4$  olup optimize açılar BPSK için  $\theta_2 = \pi/4, \theta_3 = \pi/2, \theta_4 = 3\pi/4$ , QPSK ve 16-QAM içinse  $\theta_2 = \pi/8, \theta_3 = \pi/4, \theta_4 = 3\pi/8$  şeklindedir.  $\max \delta_{\min}(\chi)$  BPSK, QPSK ve 16-QAM işaret kümeleri için şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\max_{\theta} \delta_{\min}(\chi) = \begin{cases} f_2(\pi/4) = 4.69, & \text{BPSK} \\ f_{4/16}(\pi/8) = 4.87, & \text{QPSK ve 16-QAM.} \end{cases}$$

Tasarım algoritmasına göre, STBC-SM kod sözcükleri şu şekilde

oluşturulabilir:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \{(\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), \\ &\quad (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2)\} \\ \chi_2 &= \{(\mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), \\ &\quad (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1)\} e^{j\theta_2} \\ \chi_3 &= \{(\mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), \\ &\quad (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2)\} e^{j\theta_3} \\ \chi_4 &= \{(\mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}), \\ &\quad (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2 \ \mathbf{0}), (\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_1 \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{x}_2)\} e^{j\theta_4}. \end{aligned}$$

Burada  $\mathbf{0}$ ,  $2 \times 1$  tüm sıfır vektördür. Yukarıda  $\binom{8}{2} = 28$  anten kombinasyonundan 16'sı seçilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta yukarıda verilen kod sözcüklerinin STBC-SM yapısının sekiz verici anten için sadece tek bir gerçekleşmesi olmasıdır. Ancak algoritmaya dayalı diğer seçimler  $\delta_{\min}(\chi)$  değerini değiştirmeyecektir.

### 3.2. STBC-SM Sistemi için Optimum Kod Çözücü

Bu alt bölümde STBC-SM sistemi için ML kod çözme yöntemi verilecektir. Duruşumsuz ve düz Rayleigh sönmülemeli bir MIMO kanal için  $2 \times n_R$  alınan işaret matrisi  $\mathbf{Y}$ ,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}_\chi \mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (11)$$

şeklinde olup burada  $\mathbf{X}_\chi \in \chi$ , iki zamanda iletilen  $2 \times n_T$  STBC-SM iletim matrisi,  $\mathbf{H}$  ve  $\mathbf{N}$  ise sırasıyla elemanları  $\mathcal{CN}(0, 1)$  ve  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  dağılımlı i.i.d. rastlantı değişkenleri olan  $n_T \times n_R$  kanal matrisi ve  $2 \times n_R$  gürültü matrisidir.  $\mathbf{H}$ 'nin bir kod sözcüğünün iletimi sırasında sabit kaldığı, her kod sözcüğü için bağımsız değerler aldığı ve alıcıda bilindiği varsayılmıştır.  $n_T$  verici anten için  $c$  adet kod sözcüğüne sahip STBC-SM sisteminde  $cM^2$  farklı iletim matrisi kullanılabilir. Dolayısıyla, bir ML kod çözümü tüm  $cM^2$  olurlu matrisler üzerinden bir arama yaparak aşağıdaki metriği minimize eden matrisi karar vermelidir:

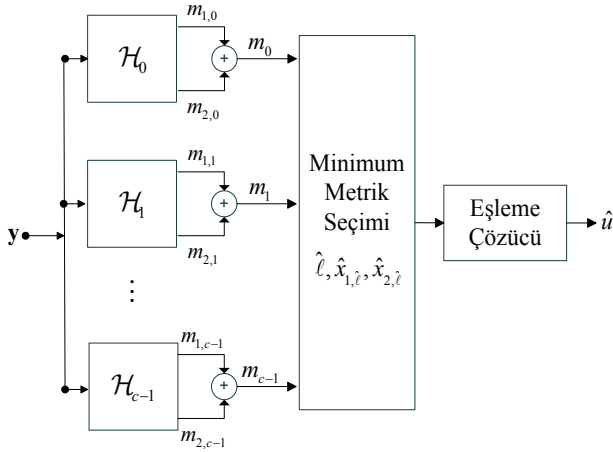
$$\hat{\mathbf{X}}_\chi = \arg \min_{\mathbf{X}_\chi \in \chi} \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}_\chi \mathbf{H}\|^2. \quad (12)$$

(12)'deki minimizasyon Alamouti kodunun dikliği sayesinde basitleştirilebilir. Alıcı, (11)'i düzenleyerek şu şekilde bir eşdeğer kanal modeli elde edebilir:

$$\mathbf{y} = \mathcal{H}_\chi \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n}. \quad (13)$$

Burada  $\mathcal{H}_\chi$ , Alamouti kodlamalı SM yapısına ait  $2n_R \times 2$  eşdeğer kanal matrisidir [19] ve STBC-SM kod sözcüklerine göre  $c$  farklı gerçekleşmesi vardır. (13)'de  $\mathbf{y}$  ve  $\mathbf{n}$  ise sırasıyla  $2n_R \times 1$  eşdeğer alınan işaret ve gürültü vektörleridir. Alamouti kodunun dikliği sayesinde  $\mathcal{H}_\chi$ 'nin iki sütunu tüm durumlarda birbirine diktir ve bu da simge tabanlı basit bir kod çözmeye olanak vermektedir.  $\mathcal{H}_\ell, 0 \leq \ell \leq c-1$ ,  $c$  adet anten kombinasyonu için eşdeğer kanal matrislerini göstermek üzere,  $\ell$ . kombinasyon için alıcı,  $x_1$  ve  $x_2$  simgelerine ait ML kestirimlerini  $\mathbf{h}_{\ell,1}$  ve  $\mathbf{h}_{\ell,2}$ 'nin dikliğinden yararlanarak şu şekilde elde eder:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{1,\ell} &= \arg \min_{x_1 \in \xi} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_{\ell,1} x_1\|^2 \\ \hat{x}_{2,\ell} &= \arg \min_{x_2 \in \xi} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_{\ell,2} x_2\|^2. \end{aligned} \quad (14)$$



Şekil 3: STBC-SM ML alıcısının blok şeması

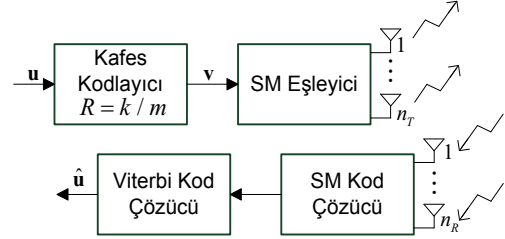
Burada  $\mathcal{H}_\ell = [\mathbf{h}_{\ell,1} \ \mathbf{h}_{\ell,2}]$ ,  $0 \leq \ell \leq c-1$  ve  $\mathbf{h}_{\ell,j}$ ,  $j = 1, 2$ , de  $2n_R \times 1$  sütun vektörüdür.  $x_1$  ve  $x_2$  için ilişkin ML metrikleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} m_{1,\ell} &= \min_{x_1 \in \xi} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_{\ell,1} x_1\|^2 \\ m_{2,\ell} &= \min_{x_2 \in \xi} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_{\ell,2} x_2\|^2 \end{aligned} \quad (15)$$

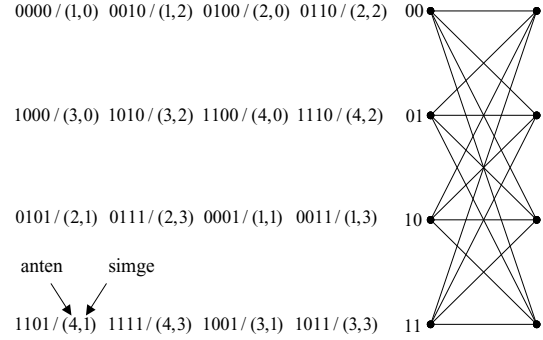
şeklinde.  $m_{1,\ell}$  ve  $m_{2,\ell}$ ,  $\ell$ . kombinasyon için ML alıcı tarafından hesaplandığından, toplamları olan  $m_\ell = m_{1,\ell} + m_{2,\ell}$ ,  $0 \leq \ell \leq c-1$ ,  $\ell$ . kombinasyon için toplam ML metriğini vermektedir. Ardından optimum alıcı,  $\hat{\ell} = \arg \min_{\ell} m_\ell$  ile minimum anten kombinasyon metriğinden yararlanarak  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = (\hat{x}_{1,\hat{\ell}}, \hat{x}_{2,\hat{\ell}})$  şeklinde kararlar vermektedir. Bu yöntem sayesinde (12)'de verilen  $cM^2$  üstel karmaşıklığa sahip minimizasyon, alıcının optimum doğası bozulmadan  $2cM$ 'lik doğrusal bir kod çözme karmaşıklığına indirgenmiştir. Kod çözmenin son aşamasında ise vericide kullanılan eşleme tablosu kullanılarak belirlenen anten kombinasyonu  $\hat{\ell}$  ile veri simgeleri  $\hat{x}_1$  ve  $\hat{x}_2$ 'dan bilgi bitlerine ait bir  $\hat{u}$  kararı verilmektedir. Yukarıda anlatılan ML kod çözücü Şekil 3'de gösterilmiştir.

#### 4. Kafes Kodlamalı Uzaysal Modülasyon (TC-SM)

Bu bölümde, bir önceki bölümde incelenen STBC-SM yapısı bir aşama daha ileriye taşınarak, ek kodlama kazançları da elde etmek için TC-SM olarak adlandırılan kafes kodlamalı bir SM yapısı incelenecektir. Ele alınan TC-SM sistem modeli Şekil 4'de verilmiştir. i.i.d. ikili bit dizisi  $\mathbf{u}$ ,  $R = k/m$  oranlı bir kafes kodlayıcıdan geçirilerek elde edilen çıkış dizisi  $\mathbf{v}$ , SM eşleyiciye verilmektedir. SM eşleyici kafes kod ile birlikte tasarlanmış olup,  $M$ -PSK ya da  $M$ -QAM gibi bir işaret uzayı ile  $n_T$  verici anten kullanarak bir iletim aralığında  $m = \log_2(Mn_T)$  kodlanmış biti iletmektedir. SM eşleyici kodlanmış dizinin ilk  $\log_2 n_T$  bitiyle verici antenin indisini belirlerken kalan  $\log_2 M$  biti ise ilgili işaret uzayına eşlemektedir. Kafes kodlama dolayısıyla tüm sistemin band verimliliği  $k$  bit/s/Hz olmaktadır. SM tarafından oluşturulan işaret  $x = (i, s)$  olup burada  $s \in \xi$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, n_T\}$  indisli anten üzerinden gönderilen veri simgesidir. Bu sistem için  $\mathbf{H}$ 'nin bir çerçevesinin iletimi boyunca sabit kaldığı ve alıcıda bilindiği varsayılmıştır. İletilen işaret  $n_R$  boyutlu,  $N_0$  varyanslı karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültü vektöründen etkilen-



Şekil 4: TC-SM Sistem Modeli

Şekil 5:  $R = 2/4$  katlamalı kodlayıcı, dört verici anten ve QPSK için TC-SM sisteminin kafes diyagramı

mektedir. Alıcıda ise optimum SM kod çözücü tarafından hesaplanan metrikleri kullanan bir Viterbi kod çözücü kullanılmaktadır. TC-SM sistemini 4 verici anten ve  $k = 2$  bit/s/Hz için şu örnekle sunabiliriz:  $\begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$  (soldan tanımlı oktal) üreteç matrisi ile verilen bir  $R = 2/4$  oranlı katlamalı kod ile seri bağlanmış bir SM eşleyiciyi düşünelim. Her kodlama adımında ilk iki bit, son iki bit tarafından belirlenen QPSK simgesinin hangi anten üzerinden iletileceğini belirlesin. Sözü geçen bu sistemin kafes diyagramı Şekil 5'te verilmiş olup burada her dal, ilişkin çıkış bitleri ve SM simgeleri  $(i, s)$ ,  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$  ve  $s \in \{0, 1, 2, 3\}$  ile işaretlenmiştir. Bu sistem [11]'deki kafes kodlamalı sistemden tüm giriş bitlerinin kodlanması, serpiştirici kullanılmaması ve yumuşak kararlı Viterbi algoritması kullanılması dolayısıyla oldukça farklıdır. Dolayısıyla TC-SM sisteminin Ungerboeck'in [10] TCM yapısından daha çok esinlendiği düşünülebilir.

##### 4.1. TC-SM Sisteminin Hata Analizi

Bu alt bölümde öncelikle TC-SM sistemi için CPEP ifadesi elde edilmiş, ardından duruğumsu Rayleigh sönümleneli kanallar için sönümlenme değışkenleri üzerinden ortalama alınarak UPEP değerleri iki uzunluklu hata olayları için verilmiştir. Basitlik açısından bir alıcı anten kabul edilmiştir ancak tüm sonuçlar daha çok alıcı anten için kolayca genelleştirilebilir.  $x_n = (i_n, s_n)$  ve  $s_n \in \xi$   $i_n$ . antenden ( $1 \leq i_n \leq n_T$ )  $n$ . iletim aralığında iletilen simge olmak üzere iletilecek SM simge dizisi  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  ile gösterilsin. Alınan işaret  $y_n = \alpha_n s_n + w_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , olup burada  $\alpha_n$ ,  $i_n$ . verici antenden alıcıya  $n$ . iletim aralığındaki sönümlenme katsayısı,  $w_n$  ise  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  dağılımlı gürültü terimidir. Bir  $\mathbf{x}$  dizisi iletilip, Viterbi kod çözücü bir  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N)$  dizisine karar verdiğinde  $N$  uzunluklu bir çiftsel hata olayı gerçekleşmektedir ( $x_n \neq \hat{x}_n$ , her  $n$ ,  $1 \leq n \leq N$ ).  $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$  ve  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$  sırasıyla iletilen  $\mathbf{x}$  ve hatalı çözülen  $\hat{\mathbf{x}}$  SM simge dizilerine ait sönümlenme katsayısı dizilerini göstermek üzere bu hata olayı için CPEP şu

şekilde verilir:

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = \Pr\{m(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{x}}; \boldsymbol{\beta}) \geq m(\mathbf{y}, \mathbf{x}; \boldsymbol{\alpha}) | \mathbf{x}\}. \quad (16)$$

Burada  $m(\mathbf{y}, \mathbf{x}; \boldsymbol{\alpha}) = \sum_{n=1}^N m(y_n, s_n; \alpha_n) = -\sum_{n=1}^N |y_n - \alpha_n s_n|^2$ ,  $\mathbf{x}$  için karar metriğidir. (16), basit düzenlenmelerden sonra

$$\begin{aligned} & \Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) \\ &= \Pr\left\{ \sum_{n=1}^N |y_n - \alpha_n s_n|^2 \geq \sum_{n=1}^N |y_n - \beta_n \hat{s}_n|^2 \middle| \mathbf{x} \right\} \quad (17) \\ &= \Pr\left\{ \sum_{n=1}^N -|\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2 + 2\Re\{\tilde{w}_n\} \geq 0 \middle| \mathbf{x} \right\} \end{aligned}$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\tilde{w}_n = w_n(\beta_n^* \hat{s}_n^* - \alpha_n^* s_n^*)$  şeklindedir. (17)'de sıfır eşliğiyle karşılaştırılan toplam biçiminde verilmiş karar değişkeni  $d$  ile gösterilirse,  $\tilde{w}_n \sim \mathcal{CN}(0, N_0 |\beta_n^* \hat{s}_n^* - \alpha_n^* s_n^*|^2)$  olduğu göz önünde bulundularak  $d$ 'nin dağılımının  $m_d = -\sum_{n=1}^N |\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2$  ve  $\sigma_d^2 = 2N_0 \sum_{n=1}^N |\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2$  olmak üzere  $\mathcal{N}(m_d, \sigma_d^2)$  şeklinde olduğu basitçe gösterilebilir. Buna göre,  $A_n = |\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2$  olmak üzere TC-SM için CPEP ifadesi şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) = Q\left(\frac{-m_d}{\sigma_d}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N A_n}{2N_0}}\right). \quad (18)$$

$Q(x) \leq \frac{1}{2}e^{-x^2/2}$  sınırlaması ile TC-SM sisteminin CPEP üst sınırı şu şekilde hesaplanır:

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) \leq \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{4} \sum_{n=1}^N |\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2\right). \quad (19)$$

Burada  $\gamma = E_s/N_0 = 1/N_0$  alıcısındaki SNR'dır. Dikkat edileceği üzere her  $n$ ,  $1 \leq n \leq N$  için  $\alpha_n = \beta_n$  olması durumunda (19)'daki toplam  $|\alpha_n|^2 |s_n - \hat{s}_n|^2$  şekline dönüşmektedir ki bu da klasik TCM yapısının CPEP ifadesidir. Duruğumsu sönmülemeli bir kanalı hızlı sönmülemeli bir kanala çeviren sınırsız uzunluklu bir serpiştirici kullanılması durumunda TCM için UPEP,  $|\alpha_n|^2$ 'nin p.d.f.'i üzerinden ortalama alınarak basitçe bulunabilir. Ancak serpiştirici kullanılmayan TC-SM yapısı için UPEP hesabı  $\boldsymbol{\alpha}$  ve  $\boldsymbol{\beta}$  dizileri arasındaki değişken bağımlılık dolayısıyla oldukça karmaşıktır. TC-SM sistemi için (19)'da verilen CPEP ifadesi matris biçiminde de yazılabilir:

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) \leq \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{4} \mathbf{h}^H \mathbf{S} \mathbf{h}\right). \quad (20)$$

Burada  $\mathbf{h} = [h_1 h_2 \dots h_{n_T}]^T$ ,  $n_T \times 1$  kanal vektörü olup  $h_i, i = 1, 2, \dots, n_T$ ,  $i$ . verici antenden alıcıya olan ve hata yolu boyunca sabit kaldığı kabul edilen kanal sönmüleme katsayısıdır.  $\mathbf{S} = \sum_{n=1}^N \mathbf{S}_n$  olmak üzere  $\mathbf{S}_n$ ,  $n_T \times n_T$  Hermisyen bir matris olup kanal katsayılarına  $\alpha_n = h_{i_n}$ ,  $\beta_n = h_{j_n}$ ,  $i_n$  ve  $j_n \in \{1, 2, \dots, n_T\}$  şeklinde bağlı olan  $\alpha_n$  ve  $\beta_n$ 'lerin bir gerçekleşmesini göstermektedir.  $\mathbf{S}_n, n = 1, 2, \dots, N$  matrisinin elemanları  $i_n = j_n$  için şu şekilde verilirken:

$$\mathbf{S}_n(p, q) = \begin{cases} d_{E_n}^2, & p = q = i_n \text{ ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (21)$$

$i_n \neq j_n$  içinse

$$\mathbf{S}_n(p, q) = \begin{cases} |s_n|^2, & p = q = i_n \text{ ise} \\ |\hat{s}_n|^2, & p = q = j_n \text{ ise} \\ -s_n^* \hat{s}_n, & p = i_n, q = j_n \text{ ise} \\ -s_n \hat{s}_n^*, & p = j_n, q = i_n \text{ ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (22)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $d_{E_n}^2 = |s_n - \hat{s}_n|^2$  şeklindedir. Örneğin  $n_T = 4$ ,  $\alpha_n = h_1$  ve  $\beta_n = h_3$  ( $i_n = 1$  ve  $j_n = 3$ ) için  $\mathbf{S}_n$  şu şekildedir:

$$\mathbf{S}_n = \begin{bmatrix} |s_n|^2 & 0 & -s_n^* \hat{s}_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s_n \hat{s}_n^* & 0 & |\hat{s}_n|^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

TC-SM sisteminin UPEP ifadesini elde etmek için (20) ifadesinin,  $\mathbf{h}$ 'nin  $f(\mathbf{h}) = (1/\pi^{n_T}) e^{-\mathbf{h}^H \mathbf{h}}$  şeklinde olan çok boyutlu karmaşık Gauss p.d.f.'i üzerinden ortalaması alınmalıdır [20]. Böylece UPEP ifadesi,

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) &\leq \frac{1}{2} \int_{\mathbf{h}} \pi^{-n_T} \exp\left(-\frac{\gamma}{4} \mathbf{h}^H \mathbf{S} \mathbf{h}\right) \exp\left(-\mathbf{h}^H \mathbf{h}\right) d\mathbf{h} \\ &= \frac{1}{2} \int_{\mathbf{h}} \pi^{-n_T} \exp\left(-\mathbf{h}^H \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{h}\right) d\mathbf{h} \quad (24) \end{aligned}$$

şeklinde olup  $\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = [\frac{\gamma}{4} \mathbf{S} + \mathbf{I}]$  ve  $\mathbf{I}$  da  $n_T \times n_T$  birim matristir.  $\boldsymbol{\Sigma}$  pozitif tanımlı karmaşık Hermisyen kovaryans matrisi olduğundan, (24)'deki integralin sonucu

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq \frac{1}{2} \det(\boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{2 \det(\frac{\gamma}{4} \mathbf{S} + \mathbf{I})} \quad (25)$$

şeklinde hesaplanabilir [20]. Basit cebirsel işlemlerle (25),  $\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq \left(2 \left(\frac{\gamma}{4}\right)^b \prod_{i=1}^b \lambda_i^{\mathbf{S}}\right)^{-1}$  şeklinde de yazılabilir. Burada  $\lambda_i^{\mathbf{S}}$ ,  $\mathbf{S}$ 'in  $i$ . özdeğeri ve  $b = \text{rank}(\mathbf{S})$ 'dir. (25) denklemi ile TC-SM sisteminin UPEP üst sınırı kapalı biçimde oldukça etkin bir şekilde hesaplanabilir. Bununla beraber  $N$  uzunluklu bir hata yolu için  $\mathbf{S}$  matrisinin tüm olası iletilen ve hatalı çözülen anten indislerini göz önünde bulunduran  $(n_T)^{2N}$  olurlu gerçekleşmesi vardır. Ancak  $\mathbf{S}$  matrisinin özel yapısı sayesinde bu  $(n_T)^{2N}$  gerçekleşmenin hata yolunun serbestlik derecesine (DOF) bağlı olarak az sayıda farklı UPEP türlerine ayrıştırılabileceği görülmüştür.  $N$  uzunluklu bir hata yolu için DOF,  $\boldsymbol{\alpha}$  ve  $\boldsymbol{\beta}$  dizilerinin içerisindeki birbirinden farklı kanal sönmüleme katsayılarının toplam sayısı olarak tanımlanmıştır. Örneğin,  $N = 2$  için  $\alpha_1 = \beta_1 \neq \alpha_2 \neq \beta_2$  ise DOF = 3'tür. DOF'un dışında (25)'in sonucunu belirleyen başka bir etki daha vardır.  $\eta$  ve  $\tilde{\eta}$  sırasıyla  $\alpha_n = \beta_n$  ve  $\alpha_n \neq \beta_n$ 'i sağlayan tüm  $n$ 'lerin kümeleri olmak üzere  $n(\eta) + n(\tilde{\eta}) = N$  olup (19) şu şekilde de yazılabilir:

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) &\leq \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\gamma}{4} \left[ \sum_{\eta} |\alpha_n|^2 |s_n - \hat{s}_n|^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{\tilde{\eta}} |\alpha_n s_n - \beta_n \hat{s}_n|^2 \right] \right). \quad (26) \end{aligned}$$

(26)'daki ilk terim TCM terimi iken ikinci terim SM terimidir. Bazı durumlarda aynı DOF değeri farklı  $n(\eta)$  ve  $n(\tilde{\eta})$  değerleri

Tablo 3: İki uzunluklu hata olayları ( $N = 2$ ) için UPEP değerleri

Type	PEP
$n(\eta) = 2, \text{DOF} = 1$	$\frac{2}{4+\gamma(d_{E_1}^2+d_{E_2}^2)}$
$n(\eta) = 2, \text{DOF} = 2$	$\frac{8}{(4+\gamma d_{E_1}^2)(4+\gamma d_{E_2}^2)}$
$n(\eta) = 1, \text{DOF} = 2$	$\frac{8}{16+4(2+d_{E_1}^2)\gamma+d_{E_1}^2\gamma^2}$
$n(\eta) = 1, \text{DOF} = 3$	$\frac{4}{8+2(2+d_{E_1}^2)\gamma+d_{E_1}^2\gamma^2}$
$n(\eta) = 0, \text{DOF} = 2$	$\frac{4}{8+8\gamma+(1-\cos\theta)\gamma^2}$
$n(\eta) = 0, \text{DOF} = 3$	$\frac{8}{16+16\gamma+3\gamma^2}$
$n(\eta) = 0, \text{DOF} = 4$	$\frac{2}{4+4\gamma+\gamma^2}$

tarafından sağlanabilmekte ve bu da (25)'in sonucunu etkilememektedir.

Tablo 3'te yukarıda sözü geçen farklı türler için TC-SM sisteminin UPEP değerleri  $N = 2$  için hesaplanmıştır. Basitlik açısından sabit zarflı  $M$ -PSK işaret kümesi kullanılmıştır ancak tüm sonuçlar değişken zarflı kümelere de genelleştirilebilir. Burada  $\theta = \pm\Delta\theta_1 \pm \Delta\theta_2, \Delta\theta_n = \theta_n - \hat{\theta}_n, n = 1, 2$  ve  $s_1 = e^{j\theta_1}, \hat{s}_1 = e^{j\hat{\theta}_1}, s_2 = e^{j\theta_2}, \hat{s}_2 = e^{j\hat{\theta}_2}$  olup  $\theta_1, \hat{\theta}_1, \theta_2, \hat{\theta}_2 \in \left\{ \frac{2\pi r}{M}, r = 0, \dots, M-1 \right\}$  şeklindedir. Bu hesaplamalara ait çıkarımlar ve  $N = 3$  durumu için UPEP hesapları burada verilmemiştir. Tablo 3'ten görüldüğü üzere  $\text{DOF} \geq 2$  için UPEP  $\gamma^{-2}$  ile orantılıdır, diğer bir deyişle 2. dereceden verici çeşitlemesi elde edilmiştir. Aşağıda tanıtsız olarak verilen teorem bu olguyu genelleştirmektedir.

**Teorem:**  $N$  uzunluklu bir hata olayı için,  $N$ . dereceden çeşitleme derecesi ( $\gamma \gg 1$  için  $a/\gamma^N$  şeklinde bir UPEP üst sınırı) elde etmenin gerek koşulu  $\text{DOF} \geq N$ 'dir.

$\text{DOF} \geq N$  için  $\mathbf{S}$  matrisinin rankının  $N$ 'e eşit olduğunun gösterilmesiyle tanımlanabilen bu teorem TC-SM tasarım ölçütlerinin temelini oluşturmaktadır.

İlişkili kanallar için TC-SM sisteminin hata analizinde uzaysal ilişki (SC) modeli [21] göz önüne alınmıştır. Bu modelde  $\mathbf{R}_t = [r_{ij}]_{n_T \times n_T}$  ve  $\mathbf{R}_r = [r_{ij}]_{n_R \times n_R}$  sırasıyla alıcı ve vericideki SC matrisleri olmak üzere ilişkili kanal matrisi  $\mathbf{H}_{corr} = \mathbf{R}_t^{1/2} \mathbf{H} \mathbf{R}_r^{1/2}$  ile belirlenmektedir. Basitlik açısından  $r_{ij} = r_{ji}^* = r^{|j-i|}$  ile verilen üstel ilişki matris modeli kabul edilmiştir [22]. Burada  $|r| < 1$  olup  $r$  de ardışık iki antenin katsayıları arasındaki ilişki miktarıdır. TC-SM'nin UPEP ifadesi için, (24) ve (25)'teki çıkarımlara benzer şekilde, (20)'nin  $\mathbf{h}$ 'nin  $f(\mathbf{h}) = (\pi^{-n_T} / \det(\mathbf{K})) e^{-\mathbf{h}^H \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h}}$  şeklinde olan karmaşık Gauss dağılımı üzerinden ortalaması alınmalıdır. Burada  $\mathbf{K} = E \{ \mathbf{h} \mathbf{h}^H \}$  tam ranklı kanal ilişki matrisidir. Cebirsel işlemlerin ardından UPEP ifadesi

$$\Pr(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq \frac{1}{2 \det \left( \frac{\gamma}{4} \mathbf{K} \mathbf{S} + \mathbf{I} \right)} \quad (27)$$

şeklinde hesaplanmıştır.  $\mathbf{S}$  matrisinin tekil olmayan  $\mathbf{K}$  matrisiyle çarpılmasıyla rankının aynı kalacağı göz önünde bulundurularak (25) ve (27)'den uzaysal ilişkili kanallarda TC-SM sisteminin çeşitleme derecesinin değişmeyeceği sonucuna varmaktayız. Ancak SC,  $\mathbf{K} \mathbf{S}$  matrisinin özdeğerleri aracılığıyla TC-SM sisteminin asimptotik kodlama kazancını olumsuz yönde etkileyecektir.

Tablo 4: 2 ve 3 bit/s/Hz hızları için TC-SM üreteç matrisleri

Durum	$k = 2$ bit/s/Hz	$k = 3$ bit/s/Hz
4	$\begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$	-
8	$\begin{bmatrix} 0 & 2 & 4 & 2 \\ 3 & 4 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
16	$\begin{bmatrix} 5 & 1 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 4 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 5 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

## 4.2. TC-SM Tasarım Ölçütleri ve Tasarım Örnekleri

Önceki bölümdeki UPEP analizi ve sonuçları göz önünde bulundurularak TC-SM sistemi için aşağıdaki ölçütler elde edilmiştir:

1. **Çeşitleme kazancı ölçütü:** Minimum hata olayı uzunluğu  $N$  olan bir kod ile  $N$ . dereceden çeşitleme elde etmek için, tüm  $N$  uzunluklu ve daha uzun hata olayları için  $\text{DOF} \geq N$ 'den büyük ya da eşit olmalıdır.
2. **Kodlama kazancı ölçütü:** Maksimum çeşitleme kazancı garanti edildikten sonra TC-SM sisteminin UPEP spektrumu (25)'ten hesaplanan UPEP değerleri göz önünde bulundurularak optimize edilmelidir.

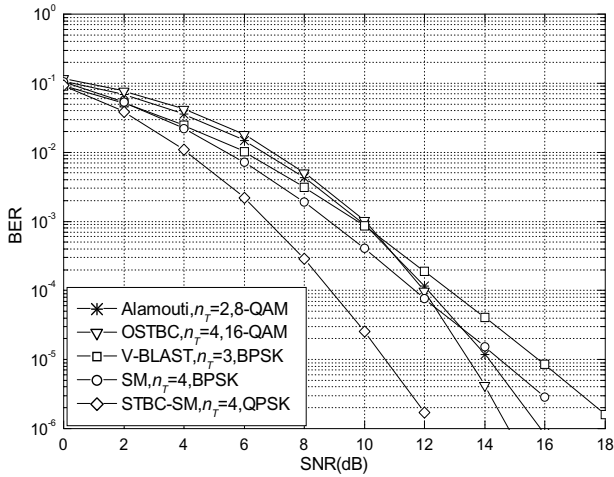
Tablo 4'te 2 ve 3 bit/s/Hz band verimlilikleri için yukarıdaki ölçütlere göre tasarlanan değişik durum sayılı TC-SM sistemlerinin üreteç matrisleri oktal biçimde verilmiştir. 2 bit/s/Hz iletim hızı için  $R = 2/4$  oranlı katlamalı kodlar ile dört verici anten ve QPSK modülasyonu kullanılırken, 3 bit/s/Hz iletim hızı için  $R = 3/6$  oranlı katlamalı kodlar ile sekiz verici anten ve 8-PSK modülasyonu kullanılmıştır. 2 bit/s/Hz için 4 ve 8-durumlu kodların UPEP spektrumları optimize edilmiştir. Diğer taraftan, 16-durumlu kod  $N \geq 3$  için  $\text{DOF} \geq 3$  olacak şekilde tasarlanmış olup bu da 3. dereceden çeşitleme sağlamaktadır. Benzer şekilde 3 bit/s/Hz için de ilgili kodların UPEP spektrumları optimize edilmiştir. Tüm tasarımlarda SM simgeleri kafesin dallarına yıkımlı bir koddan sakınılacak şekilde yerleştirilmiştir.

## 5. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde STBC-SM ve TC-SM sistemlerinin değişik parametreler için benzetim sonuçları verilmiş ve referans sistemlerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Tüm sistemlerin bit hata oranı (BER) başarımları alıcıda ortalama işaret-gürültü oranı (SNR) değerlerine göre Monte Carlo benzetimleri ile elde edilmiştir. İlişkili kanallar için yapılan benzetimlerde Bölüm 4.1'de verilen SC modeli kullanılmıştır.

### 5.1. STBC-SM için Benzetim Sonuçları

Bu alt bölümde STBC-SM sisteminin BER başarımları SM, V-BLAST, dört verici anten için 3/4-oranlı dik STBC (OSTBC) [18] ve Alamouti koduyla karşılaştırılmıştır. SM, Bölüm 2'de verilen optimum alıcıyı, V-BLAST ise sıralı ardışık girişim gidermeli (SIC) minimum ortalama karesel hata (MMSE) kod çözücüyü [23] kullanmaktadır. Tüm karşılaştırmalar  $10^{-5}$ 'lik BER değeri için yapılmıştır. Tüm benzetimlerde 4 alıcı anten kullanılmıştır.



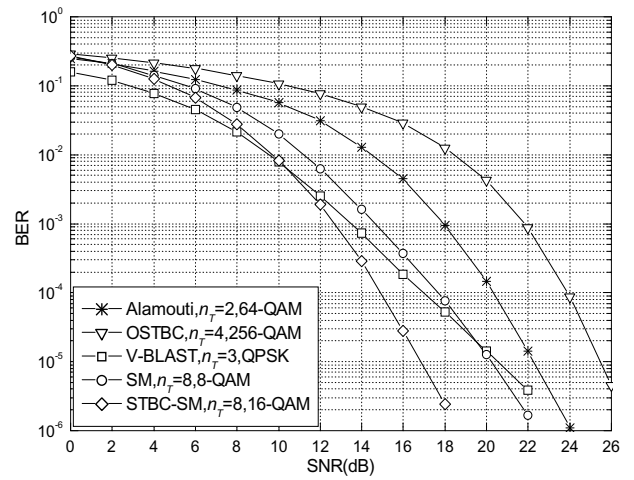
Şekil 6: 3 bit/s/Hz için BER başarımları

Şekil 6'da 3 bit/s/Hz band verimliliği için  $n_T = 4$  ve QPSK kullanan STBC-SM sisteminin,  $n_T = 4$  ve BPSK kullanan SM'in,  $n_T = 3$  ve BPSK kullanan V-BLAST yapısının, 16-QAM kullanan OSTBC'nin ve 8-QAM kullanan Alamouti kodunun BER eğrileri verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere STBC-SM, sırasıyla SM, V-BLAST, OSTBC ve Alamouti koduna göre 3.8, 5.1, 2.8 ve 3.4 dB'lik SNR kazançları sağlamaktadır. Şekil 7'de ise 6 bit/s/Hz iletim için  $n_T = 8$  ve 16-QAM kullanan STBC-SM sisteminin,  $n_T = 8$  ve 8-QAM kullanan SM'in,  $n_T = 3$  ve QPSK kullanan V-BLAST yapısının, 256-QAM kullanan Alamouti kodunun BER eğrileri verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere STBC-SM, sırasıyla SM, V-BLAST, OSTBC ve Alamouti koduna göre 3.4, 3.7, 8.6 ve 5.4 dB'lik SNR kazançları sağlamaktadır. Şekil 6 ve 7'den, sağladığı verici çeşitlenmesi dolayısıyla STBC-SM sistemi ile SM ve V-BLAST sistemleri arasındaki başarımların artan SNR ile birlikte arttığı görülmektedir. Ayrıca STBC-SM sisteminin anten modülasyonu sayesinde klasik Alamouti kodunun başarımlarını 3-5 dB iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

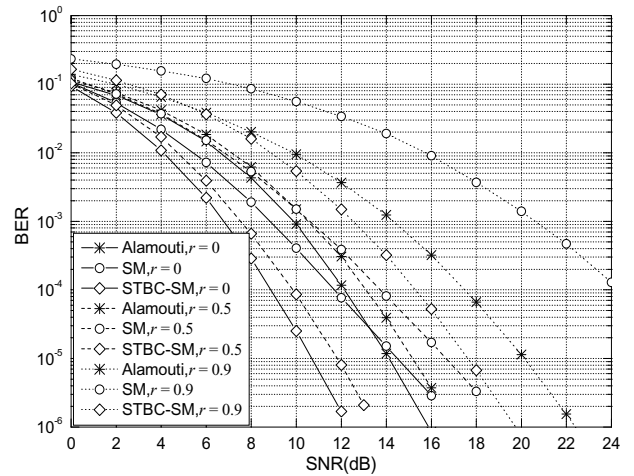
Şekil 8'de ise 3 bit/s/Hz iletim için STBC-SM, SM ve V-BLAST sistemlerinin ilişkili kanallarda ( $r = 0, 0.5$  ve  $0.9$  için) başarımları incelenmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere tüm sistemlerin başarımları ilişkili kanallarda kötüleşmektedir. Ancak Alamouti kodu ve STBC-SM için SNR'daki kayıp yakın değerlerdeyken, aynı durum SM için söz konusu değildir. Dolayısıyla, STBC-SM yapısının klasik SM yapısına göre uzaysal ilişkiye daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır.

## 5.2. TC-SM için Benzetim Sonuçları

Bu alt bölümde TC-SM sisteminin hata başarımları referans sistemlerle karşılaştırılmıştır. Tüm benzetimlerde, MIMO kanal katsayılarınının 20 ardışık iletim boyunca sabit kaldığı kabul edilmiştir. Bu değer  $k$  bit/s/Hz için  $20k$  bitlik bir çerçeve uzunluğuna denk düşmektedir. İki farklı kodlanmış V-BLAST sistemi göz önüne alınmıştır. kodlanmış V-BLAST-I olarak adlandırılan ilk sistem düşey kodlanmış V-BLAST'tır [24]. Bu sistem ve [11]'de önerilen sistem sert kararlı Viterbi kod çözme algoritması kullanılmaktadır. kodlanmış V-BLAST-II sisteminde ise TC-SM yapısındaki SM eşleyici yerine doğrudan bir V-BLAST kodlayıcı yerleştirilmiştir. [11]'deki sistem ve kodlanmış



Şekil 7: 6 bit/s/Hz için BER başarımları

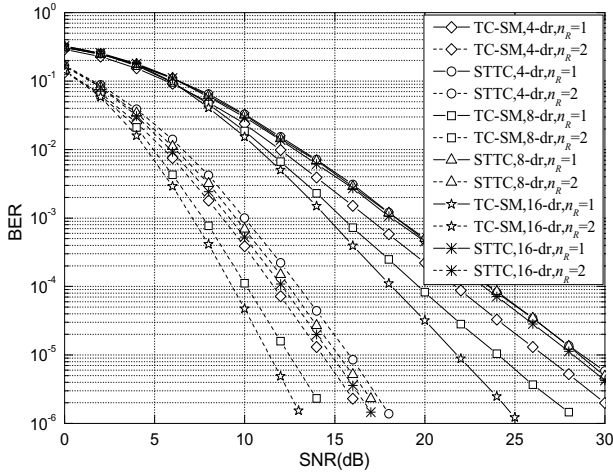


Şekil 8: 3 bit/s/Hz için  $r = 0, 0.5$  and  $0.9$  durumlarında BER başarımları

V-BLAST-I'de kullanılan  $R = 1/2$  oranlı kodlayıcıların üreteç dizileri sırasıyla [5, 2] ve [5, 7] seçilmiştir. Bölüm 4.2'de belirtildiği üzere TC-SM sistemi, 2 bit/s/Hz için dört verici anten ve QPSK, 3 bit/s/Hz için ise sekiz verici anten ve 8-PSK modülasyonunu kullanmaktadır.

Şekil 9'da 2 bit/s/Hz iletim için bir ve iki alıcı anten için benzetim sonuçları verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere 4, 8 ve 16-durumlu TC-SM sistemleri, iki verici antenli 4, 8 ve 16-durumlu optimum STTC'lere [17] göre hata başarımlarında önemli derecede iyileşme sağlamıştır. 16-durumlu TC-SM sistemi 3. dereceden çeşitlenme sağladığı için fark daha fazla olarak gözlemlenmiştir. Şekil 10'da ise benzetim sonuçları 3 bit/s/Hz için verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere 8 ve 16-durumlu TC-SM sistemleri, referans iki verici antenli 8 ve 16-durumlu STTC'lere göre oldukça iyi BER başarımları göstermiştir.

Şekil 11'de 3 bit/s/Hz için TC-SM,  $n_T = 4$  ve BPSK kullanan SM,  $n_T = 3$  ve QPSK kullanan kodlanmış V-BLAST-I ve -II sistemleri ile  $n_T = 4$  ve QPSK kullanan [11]'deki sistemin benzetim sonuçları dört alıcı anten için verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere TC-SM sistemi hem ilişkisiz ( $r = 0$ ) hem de ilişkili ( $r = 0.7$ ) kanallarda sağladığı yüksek çeşitlenme ve kodlama kazançları sayesinde en iyi hata başarımlarını vermektedir. (27)'nin bir sonucu olarak ilişkili kanallar, TC-SM sisteminin sa-



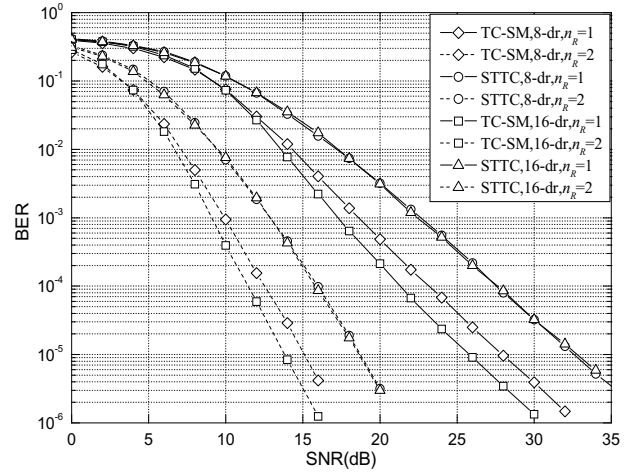
Şekil 9: 4, 8 ve 16-durumlu TC-SM ve STTC sistemleri için BER başarımları (2 bit/s/Hz)

dece asimptotik kodlama kazancını etkilemektedir. [11]'de belirtildiği gibi sözü geçen bu çalışmada önerilen yapı sadece ilişkili kanallarda SM ve kodlanmış V-BLAST-I yapılarına üstünlük sağlamaktadır. Son olarak TC-SM sistemin Şekil 11'de verilen BER başarımları ile STBC-SM sisteminin Şekil 8'de verilen BER başarımları aynı band verimliliğinde karşılaştırıldığında kafes kodlama sayesinde yaklaşık 3dB daha iyi hata başarımları elde edildiği gözlemlenmiştir.

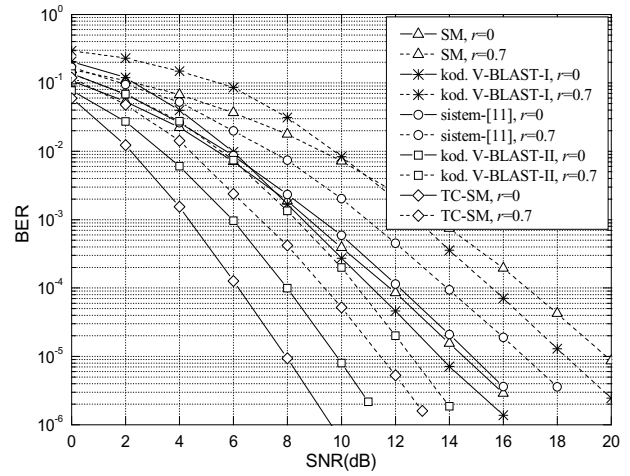
İncelenen yapılarda, belli bir zamanda iki antenin aynı anda iletimde olduğu aynı kafes yapısına sahip referans STTC'lerin zıttına sadece tek bir anten iletimde olduğu için, STTC kod çözümünün tek bir metrik hesabı için gerekli karmaşık çarpma ve toplamların sayısı sırasıyla üç ve iki iken, bu değerler TC-SM kod çözücü için sırasıyla iki ve bir olmaktadır. Bunun sonucunda 2 bit/s/Hz için STTC kod çözücüyü göre TC-SM kod çözümünün gerçel çarpma ve toplama sayılarında sırasıyla %25 ve %33'lük düşüşler sağladığı hesaplanmıştır. 3 bit/s/Hz içinse bu değerler %30 ve %37.5'a artmaktadır ki TC-SM sisteminin bu üstünlüğü kodlanmış V-BLAST-II sistemi göz önüne alındığında da aynen korunmaktadır. Diğer taraftan daha çok sayıda verici anten kullanılmasına rağmen TC-SM yapısının vericisinde sadece tek bir radyo frekans (RF) katı kullanmak yeterlidir ve antenler arası eşzamanlamaya gerek yoktur. Son olarak ele alınan TC-SM yapısının klasik STTC'lere göre kod çözme karmaşıklığı açısından hem daha basit hem de daha yüksek başarımlı olmasının artan verici sayısı ile sağlandığı belirtilmelidir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada, klasik SM sisteminin başarımlarını önemli oranlarda iyileştiren iki yeni MIMO iletim sistemi olan STBC-SM ve TC-SM teknikleri kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Ele alınan ilk sistemde STBC ile SM birleştirildiğinden SM yapısıyla verici çeşitlemesi elde etmek olanaklı duruma gelmiştir. Ele alınan ikinci sistemde ise kafes kodlama ile SM birleştirildiğinden, kafes kodlama ile hem zaman çeşitlemesi hem de yüksek kodlama kazançlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu iki sistem için kapsamlı tasarım ve optimizasyon işlemleri sunulmuştur. Bilgisayar benzetimleri sonucu, önerilen sistemlerin literatürde var olan eşdeğer yapılara göre oldukça iyi hata başarımları sağladıkları



Şekil 10: 8 ve 16-durumlu TC-SM ve STTC sistemleri için BER başarımları (3 bit/s/Hz)



Şekil 11: 3 bit/s/Hz için  $r = 0$  and  $0.7$  durumlarında BER başarımları

görülmektedir. Bu nedenle incelenen sistemlerin gelecek nesil LTE ve WiMAX sistemleri için kullanılabilirliği düşünülebilir.

## 7. Kaynaklar

- [1] Telatar, E., "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecommunication*, 10, 558-595, 1999.
- [2] Wolniansky, P., Foschini, G., Golden, G. ve Valenzuela, R., "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *International Symp. Signals, Systems, Electronics (ISSSE'98)*, Pisa, Italy, 1998, 295-300.
- [3] Alamouti, S. M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 16, 1451-1458, 1998.
- [4] Tarokh, V., Jafarkhani, H. ve Calderbank, A. R., "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inf. Theory*, 45, 1456-1467, 1999.
- [5] Biglieri, E., Hong, Y. ve Viterbo, E., "On fast-decodable space-time block codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, 55, 524-530, 2009.



- [6] Başar, E. ve Aygözü, Ü., "High-rate full-diversity space-time block codes for three and four transmit antennas," *IET Commun.*, 3, 1371-1378, 2009.
- [7] Mesleh, R., Haas, H., Sinanovic, S., Ahn, S. C. W. ve Yun, S., "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 57, 2228-2241, 2008.
- [8] Jeganathan, J., Ghrayeb, A., ve Szczecinski, L., "Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, 12, 545-547, 2008.
- [9] Jeganathan, J., Ghrayeb, A., Szczecinski, L. ve Ceron, A., "Space-shift keying modulation for MIMO channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 8, 3692-3703, 2009.
- [10] Ungerboeck, G., "Channel coding with multilevel/phase signals," *IEEE Trans. Inform. Theory*, 28, 55-67, 1982.
- [11] Mesleh, R., Renzo, M. D., Haas, H. ve Grant, P. M., "Trellis coded spatial modulation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 9, 2349-2361, 2010.
- [12] Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E. ve Poor, H. V., "Space-time block coded spatial modulation," *IEEE Trans. Commun.*, 59, 823-832, 2011.
- [13] Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E. ve Poor, H. V., "Space-time block coding for spatial modulation," *IEEE Symp. Pers. Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC 2010)*, İstanbul, Türkiye, 2010, 803-808.
- [14] Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E. ve Poor, H. V., "New trellis code design for spatial modulation", *IEEE Trans. on Wireless Commun. dergisinde yayımlanmak üzere kabul edildi*, 2011.
- [15] Başar, E., Aygözü, Ü. ve Panayırıcı, E., "Trellis code design for spatial modulation," *IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC 2011)*, Kyoto, Japonya, 2011.
- [16] Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E. ve Poor, H. V., "Uzaysal modülasyon için kafes kodlama," *Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Semp. (SIU 2011)*, Antalya, Türkiye, 2011.
- [17] Vucetic, B. ve Juan, J., *Space-Time Coding*, John & Wiley, New York, 2003.
- [18] Jafarkhani, H., *Space-Time Coding, Theory and Practice*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
- [19] Hassibi, B. ve Hochwald, B. M., "High-rate codes that are linear in space and time," *IEEE Trans. Inf. Theory*, 48, 1804-1824, 2002.
- [20] Goodman, N. R., "Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution (an introduction)," *Ann. Math. Stat.*, 34, 152-177, 1963.
- [21] Paulraj, A., Nabar, R. ve Gore, D., *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press, New York, 2003.
- [22] Loyka, S. L., "Channel capacity of MIMO architecture using the exponential correlation matrix," *IEEE Commun. Lett.*, 5, 369-371, 2001.
- [23] Böhnke, R., Wübben, D., Kühn, V. ve Kammeyer, K. D., "Reduced complexity MMSE detection for BLAST architectures," *IEEE Global Commun. Conf.*, San Francisco, CA, USA, 2003, 2258-2262.
- [24] Sellathurai, M. ve Haykin, S., *Space-Time Layered Information Processing for Wireless Communications*, John & Wiley, New York, 2009.



# HSA (Hücreyel Sinir Ağı)-Tabanlı Otonom Olmayan MLC Devresinin Donanımsal Gerçekleştirimleri Hardware Implementations for CNN (Cellular Neural Network)- Based Nonautonomous MLC Circuit

Fatma Yıldırım Dalkıran<sup>1</sup>, Enis Günay<sup>2</sup>, Recai Kılıç<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sivil Havacılık Yüksekokulu  
Erciyes Üniversitesi  
fatmay@erciyes.edu.tr

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Erciyes Üniversitesi  
egunay@erciyes.edu.tr, kilic@erciyes.edu.tr

## Özet

Hücreyel Sinir Ağı (HSA)-tabanlı kaos üreteçleri, büyük bir ilgi uyandırmış ve bu üreteçlerle ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma literatüre sunulmuştur. Alternatif donanım çözümleri, HSA-tabanlı kaos üreteçlerinin tasarımı ve gerçekleştirimi için önemlidir. Bu çalışmada, HSA-tabanlı otonom olmayan MLC sistemi tanıtılmış ve bu sistem için iki farklı donanımsal gerçekleştirimi sunulmuştur. Birinci donanım çözümü, klasik analog devre tasarımı şeklinde iken ikincisi programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir tümdevre tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yapılan tasarımı ve gerçekleştirimi doğrulamaktadır.

## Abstract

Cellular Neural Network (CNN)-based chaos generators have attracted considerable interest, and many theoretical and experimental studies related to these generators have been presented in the literature. Alternative hardware solutions are important for design and implementation of CNN-based chaos generators. In this paper, CNN-based nonautonomous MLC system, is introduced and two different hardware implementations are proposed for this system. While the first hardware solution use the classical analog circuitry design, the other one consists of programmable and reconfigurable IC technique. Experimental results verify the design and implementation issues.

## 1. Giriş

Doğrusal olmayan osilatörler arasında otonom kaotik osilatörler, minimum üç adet doğrusal olmayan diferansiyel denklemden oluşan bir sisteme gereksinim duyarken otonom olmayan kaotik osilatörlerdeki kaotik değişimler, uyarım olarak bilinen ve zamana bağlı periyodik işaretlerle sürülen ikinci dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden gözlemlenebilir. Sinüzoidal uyarım tabanlı otonom olmayan kaotik devrelerde sinüs işaretinin hem genliği hem de frekansı, kaotik dinamiklerin karakteristiklerinde rol oynamaktadır. Otonom olmayan kaotik

devreler üzerine yapılan çalışmalar arasında Murali-Lakshmanan-Chua devresi (MLC), büyük ilgi görmüştür [1].

Diğer taraftan Hücreyel Sinir Ağı (HSA), doğrusal olmayan sistemlerin uygulama alanlarından birisidir [2] ve HSA' lar ile ilgili literatürde birçok teorik ve deneysel çalışma bulunmaktadır [3]. Bu çalışmalardan birinde Arena ve arkadaşları, üç adet genelleştirilmiş HSA hücresinin uygun bir bağlantı ile Chua devresinin dinamiklerini üretebileceğini rapor etmişlerdir [4]. Daha sonraları bu HSA-tabanlı devre, HSA-tabanlı güvenilir haberleşme uygulamalarında kaos üretici olarak kullanılmıştır [5-7].

Bu çalışmada HSA-tabanlı otonom olmayan MLC sistemi tanıtılmış ve bu sistem için iki farklı donanım gerçekleştirimi sunulmuştur. Hazırlanan bu çalışma aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır: 2. bölümde HSA-tabanlı MLC devre modeli tanıtılmaktadır. Sunulan devrenin klasik analog devre tasarımı ve programlanabilir donanım gerçekleştirimi, deneysel sonuçlar ile beraber Bölüm 3' de verilmektedir. Son olarak Bölüm 4' de elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

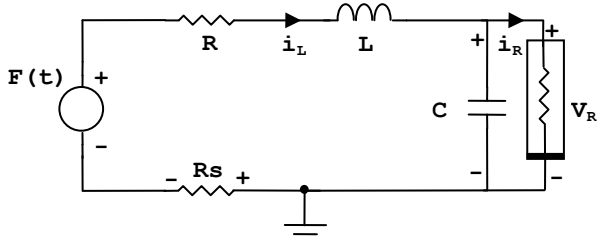
## 2. HSA-Tabanlı Otonom Olmayan MLC Devresi

MLC devresinin devre şeması, Şekil 1' de verilmiştir. Şekil 1' den görüldüğü gibi MLC devresi, bir adet doğrusal dirençten, 1 adet doğrusal indüktörden, 1 adet doğrusal kapasitörden, bir adet sinüzoidal voltaj kaynağından ve bir adet doğrusal olmayan dirençten oluşmaktadır. Bu doğrusal olmayan direnç, Chua devresindeki doğrusal olmayan direncin üç bölgesi parçalı doğrusal karakteristiğine sahiptir. MLC devresinin iki adet birinci dereceden otonom olmayan diferansiyel denklemleri ise Denklem 1' de verilmektedir. [8].

$$C \frac{dv_R}{dt} = i_L - f(v_R)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -Ri_L - R_s i_L - v_R + F \sin(\Omega t) \quad (1)$$

$$f(v_R) = G_b v_R + 0.5(G_a - G_b) x(|v_R + B_p| - |v_R - B_p|)$$



Şekil 1: MLC devresi.

Burada  $G_a$  ve  $G_b$ , sırasıyla iç ve dış bölgelerdeki eğimlerdir ve  $\pm B_p$  ise, kırılma noktalarını sembolize etmektedir.  $F \sin(\Omega t)$ ' de,  $\Omega$ , açısal frekansı ve  $F$ , harici periyodik işaretin genliğini göstermektedir.  $v_R = x B_p$ ,  $i_L = G y B_p$ ,  $G = 1/R$ ,  $w = \Omega C/G$  ve  $t = \tau C/G$  eşitlikleri kullanıldığında ve  $\tau$   $t$  olarak yeniden tanımlandığında MLC devresinin boyutsuz formu aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - h(x) \\ \dot{y} &= -\beta y - \beta v y - \beta x + f \sin(\omega t) \\ h(x) &= bx + 0.5(a - b)[|x + 1| - |x - 1|] \end{aligned} \quad (2)$$

burada  $(\cdot = d/d\tau)$ ,  $\beta = C/LG^2$ ,  $v = GR_s$ ,  $f = F\beta/B_p$ ,  $a = G_a/G$ ,  $b = G_b/G$  dir.

Diğer taraftan DK-HSA (Durum Kontrollü Hücresel Sinir Ağı), aşağıdaki boyutsuz doğrusal olmayan durum denklemleri ile genelleştirilebilir [4]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_j &= -x_j + a_j y_j + G_0 + G_s + i_j \\ y_j &= 0.5 \times (|x_j + 1| - |x_j - 1|) \end{aligned} \quad (3)$$

Denklem 3' deki  $j$ , hücre indeksi,  $x_j$  ve  $y_j$ , sırasıyla durum değişkeni ve hücre çıkışıdır.  $a_j$ , Denklem 3' deki sabit bir parametreyi gösterirken  $i_j$ , eşik değeridir. Denklem 3' deki  $G_0$ , çıkışlar olup  $G_s$ , birbirine bağlanan hücrelerin durum değişkenleridir. Denklem 3' e göre iki adet genelleştirilmiş HSA hücresinin dinamik modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + a_1 y_1 + a_{12} y_2 + \sum_{k=1}^2 s_{1k} x_k + i_1 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + a_2 y_1 + a_2 y_2 + \sum_{k=1}^2 s_{2k} x_k + i_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem 2 ile tanımlanan MLC devresi, aşağıdaki varsayımlar yapılarak Denklem 4' ten türetilebilir:

$$\begin{aligned} x &= x_1; \quad y = x_2; \quad a_1 = b - a; \quad a_{12} = a_{21} = a_2 = 0; \quad s_{11} = 1 - b; \\ s_{12} &= 1; \quad s_{21} = -\beta; \quad s_{22} = 1 - \beta(1 + v); \quad f \sin(\omega t) = f \sin(\omega t) \end{aligned}$$

Yukarıdaki varsayımlarla birlikte Denklem 4 kullanılarak DK-HSA tabanlı MLC modeli aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

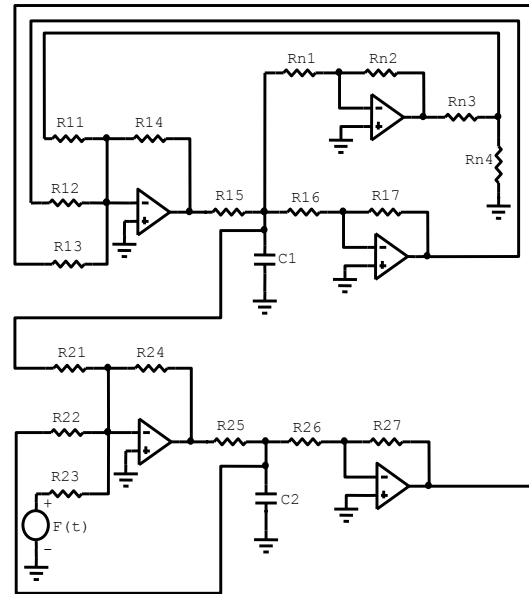
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + a_1 y_1 + s_{11} x_1 + s_{12} x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + s_{21} x_1 + s_{22} x_2 + f \sin(\omega t) \\ y_1 &= 0.5 \times (|x_1 + 1| - |x_1 - 1|) \end{aligned} \quad (5)$$

MLC modelin deneysel devre parametreleri,  $\beta=1$ ,  $v=0.015$ ,  $a=-1.02$ ,  $b=-0.55$  ve  $w=0.75$  olarak seçilmiştir [1]. Bu parametre değerleri için DK-HSA parametreleri,  $a_1=0.47$ ,  $s_{11}=1.55$ ,  $s_{12}=1$ ,  $s_{21}=-1$ ,  $s_{22}=-0.015$  seçilmiştir.

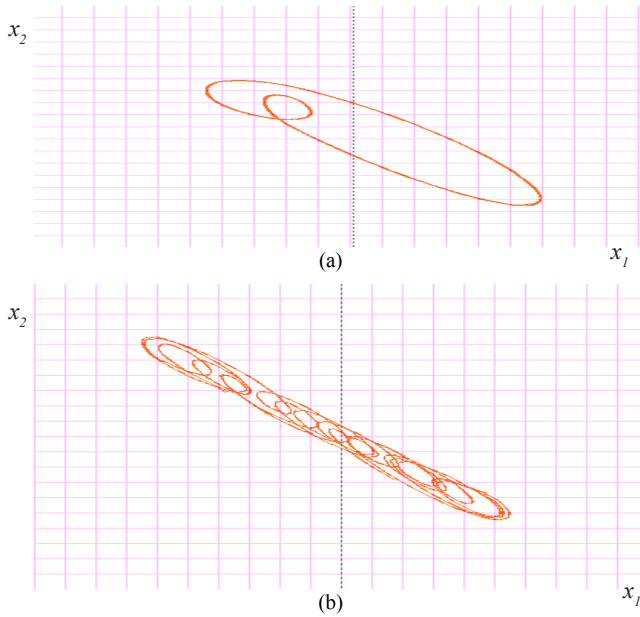
### 3. HSA-Tabanlı MLC Devresinin Donanım Gerçekleştirmeleri

Bu bölümde önceki bölümde tanımlanan HSA-tabanlı MLC devre modelinin iki farklı donanım gerçekleştirimi incelenmiştir. Birinci gerçekleştirim, klasik analog devre tasarımından oluşmaktadır. Bu tasarımın devre gerçekleştirimi Şekil 2' de gösterilmiş olup hücre elemanlarının değerleri:  $R_{11}=207K\Omega$ ;  $R_{12}=66K\Omega$ ;  $R_{13}=100K\Omega$ ;  $R_{14}=100K\Omega$ ;  $R_{15}=1K\Omega$ ;  $R_{16}=100K\Omega$ ;  $R_{17}=100K\Omega$ ;  $R_{N1}=220K\Omega$ ;  $R_{N2}=3M\Omega$ ;  $R_{N3}=180K\Omega$ ;  $R_{N4}=16K\Omega$ ;  $R_{21}=100K\Omega$ ;  $R_{22}=6666.6K\Omega$ ;  $R_{23}=100K\Omega$ ;  $R_{24}=100K\Omega$ ;  $R_{25}=1K\Omega$ ;  $R_{26}=100K\Omega$ ;  $R_{27}=100K\Omega$ ;  $C_1=10nF$ ;  $C_2=10nF$  dir; ve bu tasarımda aktif eleman olarak  $\pm 15V$  kutuplamalı AD712 tipi voltaj modlu op-amp kullanılmıştır. Harici uygulanan işaretin  $f$  genliği, HSA-tabanlı modelin dinamiklerini elde etmek için kullanılmıştır.  $f$  genliği sıfırdan üst sınıra kadar artırıldığında dallanma dizisi, periyodik işareten kaosa kadar uzanan bir davranış sergiler. Harici işaretin frekansı, 8890Hz' de sabittir. Sunulan devrenin dallanma ve çift bantlı kaos davranışı Şekil 3' de gösterilmiştir.

İkinci donanım gerçekleştirimi, FPAA (Field Programmable Analog Array)-tabanlı yeniden yapılandırılabilir tasarım yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. FPAA, programlanabilir bir tümdevredir ve yeniden yapılandırma özelliği sayesinde analog fonksiyonları içeren çeşitli sistemler, kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bunun anlamı, yeni bir tasarım veya var olan tasarım üzerinde bir modifikasyon, FPAA' ya kolayca gönderilebilir. Bunlara ek olarak FPAA' lar, analog sistem tasarımı için artan güvenilirlikle birlikte daha küçük bir kırkım alanında daha etkili ve ekonomik çözümler sunar [9-11].



Şekil 2: HSA-tabanlı MLC devresi.



Şekil 3: HSA-tabanlı MLC devresinin  $x_1$ - $x_2$  düzlemindeki doğrusal olmayan davranışı, (a)  $f=0.050V$ , periyot-2, (b)  $f=0.100V$ , çift bantlı kaos.

FPAA' da kullanılarak tasarlanan bir sistem, FPAA üzerinde gerçekleştirilmeden önce numerik analiz yapılarak, test edilir. FPAA elemanı,  $\pm 2V$  saturasyon seviyesine sahip olduğu için numerik analiz sonucuna göre sistem, ölçeklendirme işlemine tabii tutulabilir. Ölçeklendirme işleminden sonra sistem modellenir ve seri port aracılığıyla FPAA uygulama kartına gönderilir. FPAA uygulama kartından alınan deneysel sonuçlar, numerik analiz sonuçları ile karşılaştırılır. Eğer bu sonuçlar birbirlerine uyarsa gerçekleştirim tamamlanmış olur. Eğer uymazsa FPAA üzerindeki model, sonuçlar uyuşana kadar modifiye edilir [12].

Denklem 5 ile tanımlanan HSA-tabanlı MLC devre modelinin, FPAA-tabanlı gerçekleştiriminden önce SIMULINK gibi numerik analiz programı ile test işlemi yapılmıştır ve MLC devresinin orijinal kaotik dinamiklerini elde etmek için Denklem 5' deki devre parametreleri, numerik analiz sonuçlarına göre modifiye edilmiştir. Modifiye edilen devre modeli, aşağıdaki durum denklemleri ile tanımlanmıştır:

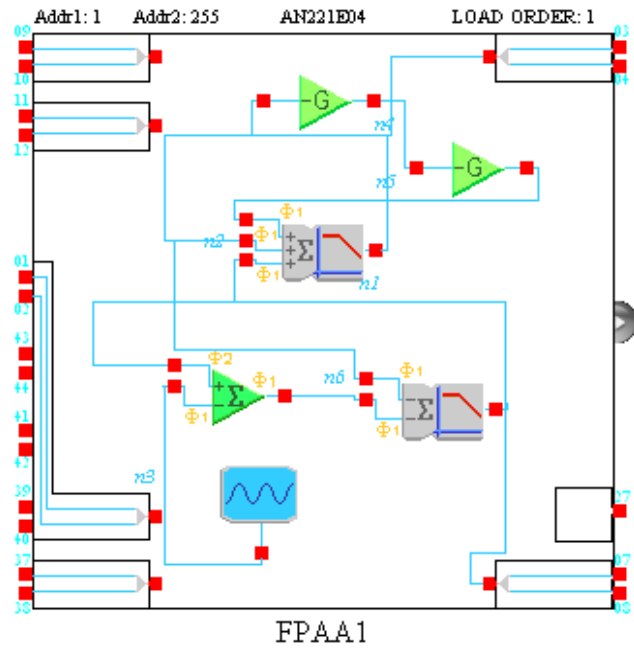
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + 0.47y_1 + 1.55x_1 + x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 - x_1 + \alpha(-0.0935x_2 + f \sin(\omega t)) \\ y_1 &= 0.5 \times (|x_1 + 1| - |x_1 - 1|) \end{aligned} \quad (6)$$

burada  $f$  ve  $\omega$ , 0.15 ve 0.6 olarak belirlenmiştir.

HSA-tabanlı MLC devresinin FPAA gerçekleştirim şeması Şekil 4' de gösterilmiştir.  $x_1$  ve  $x_2$  durum değişkenleri,

*SUMFILTER* [ ] blokların çıkışlarından elde edilmiştir. Devre kazançları, *SUMFILTER* blokların ve

*SUMDIFF* [ ] bloğun blok kazançları ayarlanarak



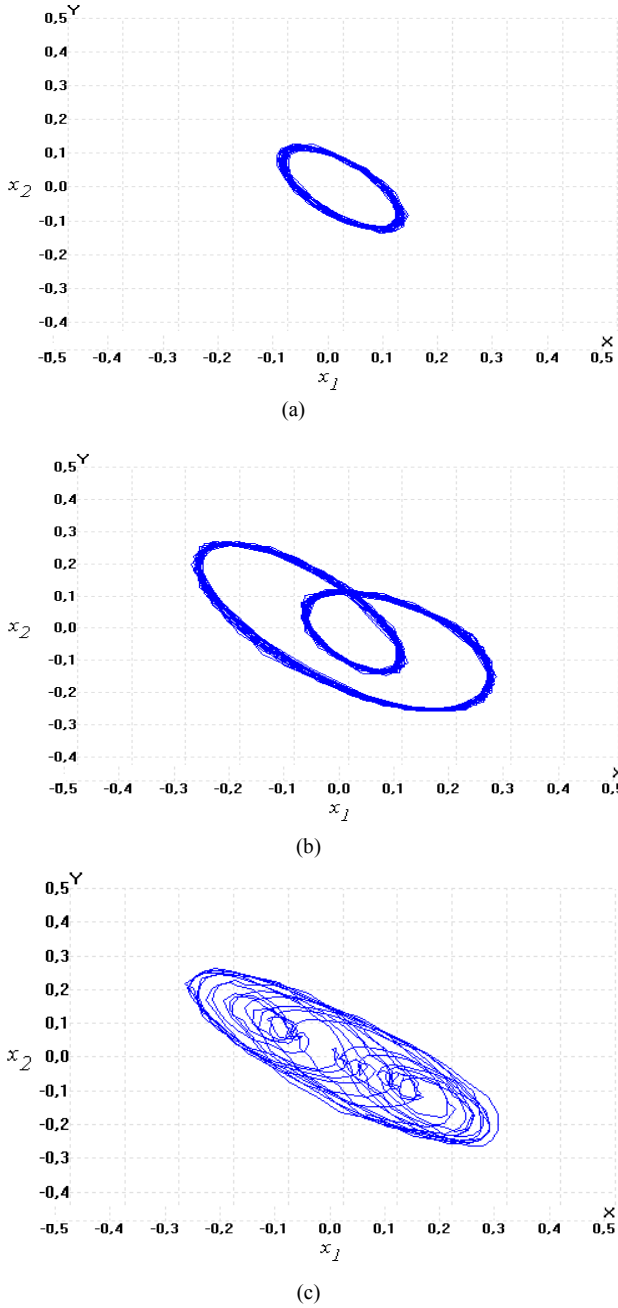
Şekil 4: HSA-tabanlı MLC devresinin FPAA gerçekleştirim şeması.

sağlanmıştır. *OSCILLATORSINE* [ ] bloğu, sinüs dalga işaret kaynağı olarak kullanılmıştır. FPAA-tabanlı MLC devre modelinin gerçekleştiriminde *INVERTING GAIN STAGES* [ ] blokları, doğrusal olmayan çıkış fonksiyonu  $y_1 = f(x_1)$  gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Bu blok, eviren bir kazanç katı oluşturur.

FPAA' nın yazılım aracında devre gerçekleştirimi modellendikten sonra bu model, Şekil 5' de gösterildiği gibi FPAA uygulama kartına gönderilmiştir. Deneysel ölçümler, FPAA uygulama kartının giriş/çıkış terminalleri kullanılarak yapılmıştır. Zaman domeninde ve X-Y modunda kaotik dinamikleri görüntülemek için sanal ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, herhangi bir elektronik devreden alınan elektriksel işaretlerin bilgisayar ekranında görüntülenmesine ve numerik değerler dizisi şeklinde kaydedilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 5: FPAA-tabanlı gerçekleştirim için deneysel kurulum. Bu kurulumda Anadigm firmasının AN221E04 tipi FPAA uygulama kartı kullanılmıştır [9].



Şekil 6: FPAA kullanılarak gerçekleştirilen HSA-tabanlı MLC devre modelinin ( $\alpha$ ) parametresinin farklı değerlerine göre deneylerden elde edilen çeker gösterimleri, (a) 2.7-periyot 1; (b) 1.7-periyot 2; (c) 1.0-çift bantlı kaotik davranış.

Sunulan HSA-tabanlı MLC devresinin FPAA gerçekleştirilmesinde ( $\alpha$ ) parametresinin farklı değerleri için deneysel çalışmalardan elde edilen kaotik çeker gösterimleri, Şekil 6' da gösterilmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada HSA-tabanlı otonom olmayan MLC devresinin farklı donanım gerçekleştirmeleri tanıtılmıştır. Bu gerçekleştirmeler, RC tabanlı devre tasarımı ve programlanabilir analog tasarım tekniği ile beraber indüktörsüz gerçekleştirmeler sunmaktadır. Özellikle FPAA

elemanından yararlanılarak gerçekleştirilen programlanabilir donanım çözümleri, bazı avantajlara sahiptir. Sunulan sistemin sistem kontrolleri ve ayarlamaları, FPAA elemanının programlanabilme özelliği sayesinde esnek şekilde yapılabilmektedir. Programlanabilir tasarım yaklaşımı, HSA-tabanlı diğer otonom ve otonom olmayan kaos üreteçlerinin tasarımlarında çok kullanışlı olabilir. Ayrıca bu gerçekleştirmenin kaotik kontrol ve kaotik haberleşme sistem tasarımında kullanılması avantajlı olacaktır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Lakshmanan, M., ve Murali, K., *Chaos in Nonlinear Oscillators, Controlling and Synchronization*, World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A- Vol. 13, 1996.
- [2] Chua, L.O., ve Yang, L., "Cellular Neural Networks: Theory", *IEEE Trans. Circuits&Syst.*, 35, pp.732-745, 1998.
- [3] Chua, L.O., *CNN: A Paradigm for Complexity*, World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A- Vol. 31, 1998.
- [4] Arena, P., Baglio, S., Fortuna, L., ve Manganaro, G., "Chua's Circuit Can Be Generated by CNN Cells", *IEEE Trans. Circuits&Syst. -I*, Vol. 42, (2), pp.123-125, 1995.
- [5] Caponetto, R., Lavorgna, M., ve Occhipinti, L., "Cellular Neural Networks in Secure Transmission Applications", *Proc. of CNNA'96*, pp. 411-416, 1996.
- [6] Kılıç, R., Alçı, M., ve Günay, E., "A SC-CNN-Based Chaotic Masking System with Feedback", *Int. Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.14, No.1, p.245-256, 2004.
- [7] Günay, E., ve Alçı, M., "n -Double Scrolls In SC-CNN Circuit via Diode-Based Pwl Function", *Int. J. Bifurcation & Chaos*, Vol. 16, No. 4, 2006.
- [8] Chua, L.O., Wu, C.W., Huang, A., ve Zhong, G.A., "Universal Circuit for Studying and Generating Chaos", *IEEE Trans. Circuits&Syst.*, CAS-40, (10), pp.732-745, 1993.
- [9] Anadigm: [www.anadigm.com](http://www.anadigm.com)
- [10] Caponetto, R., Mauro, A.D., Fortuna, L., ve Frasca, M., "Field Programmable Analog Array to Implement a Programmable Chua's Circuit", *Int. Journal of Bifurcation and Chaos*, 15, pp.1829-1836, 2005.
- [11] Kılıç, R., ve Dalkıran, F.Y., "Reconfigurable Implementations of Chua's Circuit", *Int. Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.19, No.4, pp.1339-1350, 2009.
- [12] Kılıç, R., *A Practical Guide for Studying Chua's Circuits*, World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A-Vol.71, 2010.

# Elektrik Enerjisinin Bölgeler Arası Alışverişinin Optimizasyonu Optimization of Inter Area Transfer Capability on Power Systems

Belgin Emre Türkay<sup>1</sup>, Fatih Küçüktezcan<sup>1</sup>, Alper Bulut<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
turkayb@itu.edu.tr, kucuktezca@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Enerji Sektörü İletim ve Dağıtım Hizmetleri, Güç Teknolojileri Uzmanlık Merkezi  
SIEMENS A.Ş.  
alper.bulut@siemens.com

## Özet

Güç sistemlerinin büyük boyutlara ulaşması ve uluslararası elektrik enerjisi ticaretinin artmasıyla birlikte, bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi de önem kazanmıştır. Duyarlılık faktörleri ile, farklı çalışma noktaları için tekrar bir güç akışı analizi yapmadan, iletim hatları ve diğer sistem elemanlarının parametreleri hakkında geniş bilgi edinilebilir. Bu durumda, iletim hattı kapasiteleri ve üretim gruplarının sınır değerleri hesaba katılarak bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişinin sağlanması bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Bu çalışmada, güç iletim dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan güç sisteminde, üretim değerleri optimize edilerek, bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi maksimize edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kullanılabilir iletim kapasitesi, güç iletim dağılım faktörü, optimizasyon, genetik algoritma

## Abstract

Since size of the power systems and demand for electric energy trading increases, inter area transfer capability becomes an important issue. By using sensitivity factors, large amount of information about different operating points of power systems, can be obtained without power flow analysis. Providing maximum power transfer between areas of power systems while considering capacities of transmission lines and generation limits, can be thought as an optimization problem. In this study, power transfer distribution factor (PTDF) and different optimization methods are used to optimize generation values for providing maximum power transfer between areas of power system consists of four areas, eleven busses and eighteen transmission lines.

**Keywords:** Available transfer capability, power transfer distribution factor, optimization, genetic algorithm

## 1. Giriş

Ekonomik, teknik ve çevresel etkenler sebebiyle, günümüz güç sistemlerinin yüklenebilirlik sınırlarında çalışmasıyla beraber bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi kavramı önem kazanmaya başlamıştır. Sistemin, geniş bir çalışma aralığında ekonomik ve güvenli olarak işletilebilmesi için, yeterli derecede iletim kapasitesi garanti edilmelidir. Hatların termal sınırları, bara gerilim sınırları, geçici hal ve gerilim kararlılık sınırları hesaba katıldığında, sisteme ilişkin maksimum iletim kapasitesine kullanılabilir iletim kapasitesi (Available Transfer Capability, ATC) adı verilir. Literatürde, kullanılabilir iletim kapasitesinin hesaplanması ve iyileştirilmesine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Klasik P-V, Q-V eğrileri ile yapılan hesaplamalar, eğrilerin oluşturulması için birden çok güç akışı analizine ihtiyaç duyduğundan, çevrimdışı uygulamalarda kullanılmaktadır [1]. Çeşitli çalışmalarda, L indeksi, enerji fonksiyonları, bifürkasyon teorisi, modal analiz vb. yöntemler ile iletim kapasitesi hesaplanırsa da, yöntemler işlem yükünü de beraberinde getirmekte ya da yük değişimlerinin sistemi kararlılık sınırlarına ne kadar yaklaştırdığını belirleyememektedir [2-4].

Senkronize fazor ölçüm teknolojisinin gelişmesiyle, ölçüm tabanlı yöntemler ile maksimum iletim kapasitesinin çevrimiçi olarak belirlenmesi ilgi görmeye başlamıştır [5-7]. Greene, Dobson, ve Alvarado, sistem parametrelerin değişimlerine karşı iletim kapasitesinin duyarlılığı, analitik bir formül ile ifade etmişlerdir [8]. Youjie, McCalley ve Vittal, dahili nokta algoritması ile, güç sistemine ilişkin maksimum yüklenebilirlik ve kullanılabilir iletim kapasitesi gibi optimizasyon problemlerini basitleştirmişlerdir [9]. Mello, Melo, ve Granville'nin çalışmasında ise, dahili nokta algoritmasını Monte Carlo yöntemi ile beraber kullanılarak maksimum iletim kapasitesi belirlenmiştir [10].

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS) ile de güç sisteminin kullanılabilir iletim kapasitesi artırılabilir [11]. Orfanogianni ve Bacher, FACTS cihazlarının sistem içinde konumlandırılması bir optimizasyon problemi olarak ele

olarak, sistemin kullanılabilir iletim kapasitesi optimize etmişlerdir [12]. Bettiol, Wehenkel ve Pavella'nın çalışmasında, toplam tüketimi üretim birimlerine paylaştırılıp ve sınır koşul olarak geçici hal kararlılığı ele alıp, sistemin yüklenebilirliği optimize edilmiştir [13]. Benzer bir çalışmada ise, üretim birimlerinin azaltılmasına dayalı bir optimizasyon yöntemi ile yine geçici hal kararlılığı sınır koşulu altında, kullanılabilir iletim kapasitesi artırılmıştır [14]. Leonidaki, Georgiadis ve Hatzargyriou'nun çalışmasında, karar ağaçları ile FACTS cihazlarının sistem içindeki optimal yerleri tayin edilerek, sistemin maksimum yüklenebilirliği hesaplanmıştır [15]. Pandey, Tapaswi ve Srivastava, yapay sinir ağları tabanlı bir yöntem ile sistemin güvenlik sınırları aşılmadan, kullanılabilir iletim kapasitesi optimize etmişlerdir [16].

Duyarlılık faktörleri, iletim hatlarının yeterliliğinin hesaplanmasında, farklı senaryo analizlerinde, enerji iletiminin sistem birimleri üzerindeki elektriksel etkilerinin ortaya konmasında, herhangi bir iletim hattının veya herhangi bir üretim biriminin devre dışı kalmasının, şebekenin diğer elemanlarını hangi oranda etkilediğinin belirlemede kullanılan araçlardır. Bu faktörlerden, güç iletimi dağılım faktörü (Power Transfer Distribution Factor, PTDF), normal işletme koşulları altında, üretim bölgeden tüketim bölgeye iletebilecek elektrik enerjinin artmasına bağlı olarak, iletim hatlarının ek yüklenme miktarının hesaplanması için kullanılmaktadırlar.

Literatürde, güç iletimi dağılım faktörleri, FACTS cihazları ile iletim kapasitesinin optimizasyonu gerçekleştirilirken de kullanılmıştır [17,18]. Chong Vittal Kolluri ve Mandal'ın çalışmasında, güç iletimi dağılım faktörü tabanlı bir yöntem ile güç sisteminin yeniden yapılandırılması gerçekleştirilmiştir [19]. Smieja, Lombardi, Styczynski ve Loppen'in çalışmasında, iletim kapasitelerine bağlı bölgesel sistem planlaması esnasında iletim hatları üzerindeki güç akışları, güç iletimi dağılım faktörleri ile hesaplanmıştır [20]. Patel ve Girgis, kullanılabilir iletim kapasitesinin hesaplanmasında güç iletimi dağılım faktörlerinin avantaj ve dezavantajları değerlendirmişlerdir [21].

Evrimsel algoritmalar, doğadaki biyolojik evrimi taklid eden rastlantısal arama yöntemleridir [22]. Bu yöntemlerden, günümüz mühendislik problemlerine yaygın olarak uygulananlardan biri de Genetik Algoritmalar'dır (GA) [23]. Klasik optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, çözüm uzayının bir çok noktasında arama yapması sebebiyle, GA'lar çok parametrelili, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için tercih edilen yöntemlerdendir.

İletim hattı kapasiteleri ve üretim gruplarının sınır değerleri hesaba katılarak bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişinin sağlanması bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir

Yapılan çalışmada, güç iletimi dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri yardımıyla, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan güç sistemi modeli üzerinde [24], bölgelerin üretim değerleri optimize edilerek, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişisi sağlanmıştır. Genetik algoritma, benzetimli tavlama ve tepe tırmanma yöntemleri ile elde edilen sonuçlar Powerworld güç akışı programında gerçekleştirilen simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Teorik Altyapı

### 2.1. Güç İletimi Dağılım Faktörü

Doğrusal duyarlılık faktörleri, iletim hatlarının yeterliliğinin hesaplanmasında, farklı senaryo analizlerinde, enerji iletiminin sistem birimleri üzerindeki elektriksel etkilerinin ortaya konmasında, herhangi bir iletim hattının veya herhangi bir üretim biriminin devre dışı kalmasının, şebekenin diğer elemanlarını hangi oranda etkilediğini belirlemek için kullanılan araçlardır.

PTDF, iki bölge arasında gerçekleşen yük iletiminin, sistem içindeki iletim hatlarına nasıl dağılacakını ifade eden bir göstergedir. PTDF kullanılarak, bir bölgeden, başka bir bölgeye ilave güç alışverişi gerçekleştiğinde, enterkonnekte yapıya bağlı herhangi bir bölge içindeki veya bölgeleri bağlayan iletim hatlarının, güç artışı hangi oranda üstleneceğini belirlemek mümkündür. Doğal olarak, güç sisteminin herhangi bir bölgesinde meydana gelen bir üretim artışı ancak başka bir bölgedeki tüketim artışı ile karşılanarak, sistem üzerindeki arz-talep dengesi sağlanmış olur.

Bu koşullar altında, PTDF'nin hesaplanabilmesi için, üretim ve tüketimin değiştiği baralardaki açıların, belirtilen iletim hattı üzerindeki güç akışına etkisi ortaya konmalıdır.

$m$  ile  $n$  bölgeleri arası bir iletim söz konusu olduğunda,  $i$  ile  $j$  baraları arasındaki  $l$  iletim hattına ilişkin güç dağılım faktörü aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [24].

$$PTDF_{ij,mn} = \frac{\partial P_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_l}{\partial P_n} = \frac{\partial}{\partial P_m} \left[ \frac{1}{x_l} (\theta_i - \theta_j) \right] + \frac{\partial}{\partial P_n} \left[ \frac{1}{x_l} (\theta_i - \theta_j) \right] \quad (1)$$

$X_l$ :  $i$  ile  $j$  baralarını bağlayan iletim hattının reaktansı [pu],  
 $\partial P_l$ :  $l$  iletim hattındaki aktif güç akışı değişimi,  
 $\partial \theta_i$ :  $i$  barasındaki açı değişimi,  
 $\partial \theta_j$ :  $j$  barasındaki açı değişimi,  
 $\partial P_m$ :  $m$  bölgesindeki aktif güç üretimindeki değişim,  
 $\partial P_n$ :  $n$  bölgesindeki aktif güç üretimindeki değişimidir.

Bara reaktans matrisi olarak tanımlanan  $X$  matrisi, doğrusal güç akışı analizinde, bara gerilim açıları ile aktif güç iletimleri arasındaki bağıntıyı veren matristir.

$$\theta = [X] P \quad (2)$$

Bu durumda,  $m$  bölgesindeki aktif güç değişimi +P iken,  $n$  bölgesindeki aktif güç değişimi -P olacağından, PTDF aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [24].

$$PTDF_{ij,mn} = \frac{X_{im} - X_{jm} - X_{in} + X_{jn}}{x_l} \quad (3)$$

Burada  $X_{im}$ ,  $X_{jm}$ ,  $X_{in}$  ve  $X_{jn}$ , bara reaktans matrisi  $X$ 'in  $i$ . ve  $j$ . satır,  $m$ . ve  $n$ . sütunundaki elemanlardır. Sisteme enjekte edilen ek aktif güce bağlı olarak  $i$  ile  $j$  baraları arasında bulunan  $l$  iletim hattındaki aktif güç akışı değişimi aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır [24].

$$\Delta P_{ij} = PTDF_{ij,mn} \cdot P_{mn}^{ek} \quad (4)$$



Burada  $P_{mm}^{ek}$ , sisteme eklenen aktif güç miktarı,  $i$  ile  $j$  izlenen bir iletim hattının başındaki ve sonundaki bara numaraları,  $m$  ile  $n$  de artan üretim/tüketimin, giriş ve çıkış bölge numaralarıdır.

## 2.2. Tepe Tırmanma

Tepe tırmanma (TT) yöntemi, basit yapısı ve hızı sebebiyle sıkça kullanılan stokastik bir yerel arama yöntemidir. Her zaman mevcut çözümü en fazla geliştiren yönde ilerleme prensibine dayanır ve hafıza gereksinimi oldukça düşüktür. Şekil 1'de TT yöntemine ait akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1: Tepe tırmanma yöntemine ait akış diyagramı [25].

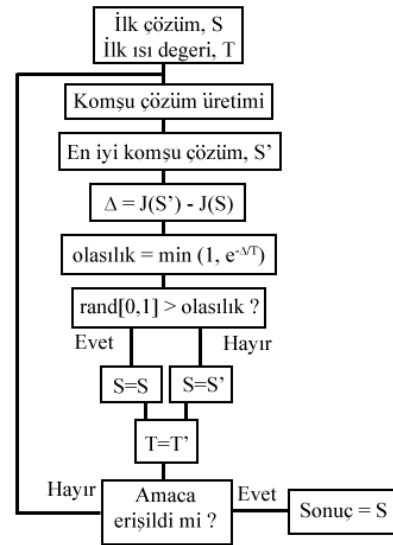
İlk adımda rastlantısal olarak veya probleme uygun bir başlangıç çözümü üretilir. Bir komşu üretme algoritması ile mevcut çözüme benzer belirli sayıda rasgele komşu çözüm üretilir. Bu çözümlerden uygunluk değeri en yüksek komşu çözüm seçilir. Bu çözüm mevcut çözümden daha iyi bir çözüm ise mevcut çözümün yerini alır ve bir sonraki iterasyona geçilir. Önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına, uygunluk değerine veya uygunluk değerinin iterasyona bağlı değişimine ulaşıldığında algoritma sonlandırılır. Algoritmanın basit yapısı sebebiyle oldukça hızlıdır ancak yapısı gereği optimizasyon sonuçları ilk çözüme bağlıdır ve yerel en iyi çözümlere takılma olasılığı mevcuttur.

## 2.3. Benzetimli Tavlama

Benzetimli Tavlama (BT) yöntemi, katıların fiziksel tavlama sürecinden esinlenilerek ortaya çıkmış ve ayrık optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar veren bir optimizasyon yöntemidir.

BT yöntemine ilişkin akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Yapısal olarak tepe tırmanma yönteminin modifiye edilmiş hali olarak düşünülebilir. Bir ilk çözüm ve ilk ısı değeri atandıktan sonra belirlenen amaca erişilene kadar algoritma bir döngü içine girer. TT yönteminde olduğu gibi bir komşu çözüm kümesi üretilir ve aralarından en iyi komşu seçilir. Tepe tırmanma yönteminden farklı olarak, bu çözüm mevcut çözümden daha kötü bir uygunluk değerine sahip olsa dahi mevcut çözümün yerine geçme olasılığı vardır. Saklanan mevcut çözümün uygunluk değeri düşse bile, yeni çözüm küresel en iyi çözüme komşu bir çözüm olabilir. Bu yaklaşım ile, yöntemin yerel bir en iyi çözüme takılması engellenebilir. Her iterasyonda,  $T$  sıcaklığı belli bir oranda azalır. Bu durum, ilerleyen iterasyonlarda mevcut çözümden daha kötü çözümlerin, mevcut çözümün yerini alma olasılığını düşürecektir. Belirlenen bir iterasyon sayısı veya minimum  $T$

sıcaklığına ulaşıldığında algoritma sonlanır. Bu yöntemde karşılaşılabilecek en önemli sorun, ilerleyen iterasyonlarda sürekli azalan bir olasılıkla da olsa daha kötü bir çözüme yakınsayabilmesidir.

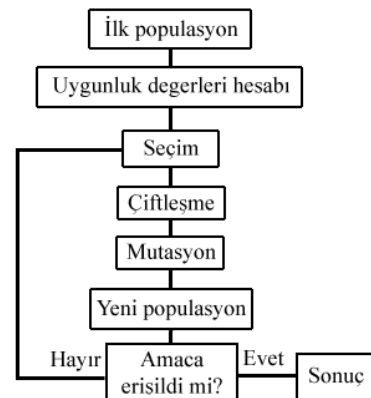


Şekil 2: Benzetimli tavlama yöntemine ait akış diyagramı [26].

## 2.4. Genetik Algoritmalar

Doğal hayatta güçlü olanın hayatta kalması, hayatta kalan güçlü bireylerin genlerini sonraki nesillere aktarması, bazı genlerin zaman içerisinde değişime uğraması, GA'ların seçim, çifleşme ve mutasyon operatörleri ile modellenir. Bu operatörler, potansiyel çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu üzerine uygulanmaya başlanır. Popülasyona ait her yeni jenerasyonda, evrimleşen bireyler daha iyi potansiyel çözümlere dönüşür [22].

Ele alınan probleme bağlı olarak, farklı operatörler tipleri kullanan birçok GA oluşturulabilir ancak genel olarak GA'lara ait akış diyagramı Şekil 3'deki gibidir.



Şekil 3: Genetik algoritmalara ait akış diyagramı [22].

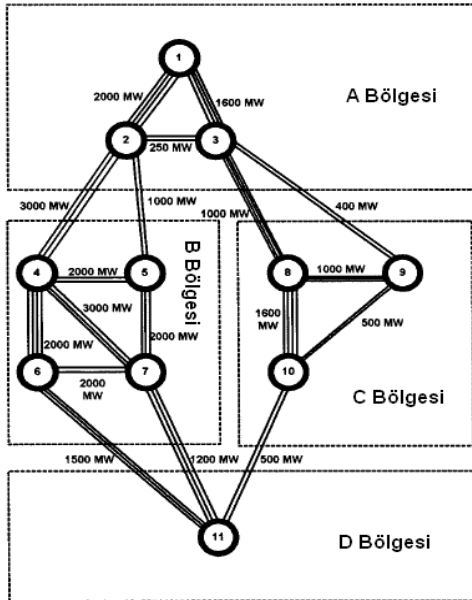
GA'lar genellikle rastlantısal olarak atanan olası bir çözüm kümesi ile ilk popülasyonu oluşturur. Popülasyon içerisindeki her bir birey (potansiyel çözüm), GA'da *kromozom* yapısındaki genetik kod ile temsil edilir. Her bir çözümün seçilen amaç fonksiyonuna bağlı bir uygunluk değeri

mevcuttur. İlk popülasyonu oluşturmadan önce, probleme uygun amaç fonksiyonu ve genetik kodlama yöntemlerinin seçimi yapılır. Genetik kodlama yöntemine göre oluşturulan ilk popülasyonun, amaç fonksiyonuna bağlı uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra GA bir döngü içine girer ve belirlenen sonlandırma kriteri sağlanana kadar yeni jenerasyonlar oluşturmaya devam eder. Bu döngü içerisinde öncelikle, bireylerin uygunluk değerlerine bağlı bir seçim operatörü, çiftleşerek çocukları (yeni potansiyel çözümler) oluşturacak bireyleri seçer. Çiftleşme operatörü ile oluşan çocuklar, bir sonraki jenerasyonda yer alır. Mutasyon operatörü, popülasyon içerisinde rastgele bir bireyin genetik kodunda meydana gelebilecek olası değişimi temsil eder. Bu operatörün amacı, GA'nın yerel en iyi çözümlere yakınsamasını engellemektir. Mutasyon operatörü ve oluşan çocukların uygunluk değerlerinin hesabının ardından yeni popülasyon elde edilmiş olur. Algoritma sonlandırma kriteri sağlanıyorsa algoritma sonlanır ve uygunluk değeri en büyük birey çözüm olarak elde edilir, aksi halde seçim operatörü ile başlayan döngüye geri dönlür. Algoritma sonlandırma kriteri genellikle belli bir jenerasyon sayısı veya popülasyonun ortalama uygunluk değerinin jenerasyona bağlı değişimi olarak seçilebilir.

### 3. Örnek Uygulama

#### 3.1. Güç İletimi Dağılım Faktörü

Bu çalışmada, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan örnek güç sistemi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir [24]. İncelenen sistemin topolojisi Şekil 4'de, iletim hatlarına ilişkin değerler ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4: 4 bölgeci güç sistemi modeli [24]

Richard D. Christie, Bruce F. Wollenberg ve Ivar Wangestein tarafından gerçekleştirilen çalışmada [24], örnek güç sistemindeki tek üretim bölgesi olan A bölgesinden D bölgesine gerçekleştirilecek 1000 MW elektrik enerjisi alışverişinde, sistemde bulunan iletim hatlarının hangi

oranlarda yükleneceği, bir güç akışı analizi yapılmaksızın, yalnızca PTDF faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: İletim hattı verileri [24]

Hat no.	Baralar arası	Hat sayısı	Hat reaktansı (Ω)	Hat kapasitesi (MW)
1	1-2	4	0.02	2000
2	1-3	4	0.025	1600
3	2-3	2	0.08	250
4	2-4	3	0.01	3000
5	2-5	2	0.02	1000
6	3-8	4	0.04	1000
7	3-9	2	0.05	400
8	4-5	2	0.01	2000
9	4-6	4	0.02	2000
10	4-7	3	0.01	3000
11	5-7	3	0.0015	2000
12	6-7	2	0.01	2000
13	8-10	4	0.025	1600
14	8-9	3	0.03	1000
15	9-10	2	0.04	500
16	6-11	3	0.02	1500
17	7-11	3	0.025	1200
18	10-11	2	0.04	500

Bu çalışmada ise, toplam üretim tek bölge yerine farklı birden çok bölgeye yayılmış, ayrıca güç iletimi dağılım faktörleri ve çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılarak, üretim (A, B ve C) bölgelerinden tüketim (D) bölgesine maksimum elektrik enerjisi iletimi gerçekleştirilebilmesi için sağlanmaya çalışılmıştır. A, B ve C bölgelerine paylaştırılan üretim değerleri, hatların taşıma kapasitelerini ve üretim birimlerinin sınır değerlerini hesaba katarak optimize edilmişlerdir.

Optimizasyon sonucunda ulaşılan üretim değerleri, güç akışı programındaki sistem modeline uygulanarak, iletim hatları yüklenmeleri izlenmiştir, optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Örnek sistemdeki bölgeler için, (3) numaralı denklem ile hesaplanan PTDF değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada ise, B ve C bölgelerindeki üretim kapasiteleri sınırlandırılmıştır, ayrıca D bölgesinde olduğu gibi diğer bölgelere de yük baraları tanımlanmıştır. A, B ve C bölgelerindeki tüketimlerin sabit olması koşulu altında, iletim hatları aktif güç taşıma kapasiteleri ve üretim birimleri sınırları izlenerek, bu bölgelerden, D bölgesine maksimum ek elektrik enerjisi alışverişinin gerçekleştirilebilmesi için, ek üretimin bölgeler arasında nasıl dağılması gerektiği, başlangıç durum güç akışı bilgileri, PTDF faktörleri ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak saptanmıştır.

Tablo 2: Hesaplanan PTDF Değerleri

Hat no.	$PTDF_{y,AD}$ [24]	$PTDF_{y,BD}$	$PTDF_{y,CD}$
1	0.7140	-0.0854	0.4019
2	0.2860	0.0854	-0.4019
3	-0.0446	0.0240	-0.1130
4	0.5692	-0.1275	0.3864
5	0.1894	0.0181	0.1286
6	0.1744	0.0791	-0.2414
7	0.0670	0.0304	-0.2735
8	-0.0007	0.1211	-0.0005
9	0.2880	0.3608	0.1955
10	0.2819	0.3905	0.1914
11	0.1887	0.1392	0.1281
12	-0.1001	-0.1005	-0.0679
13	0.1813	0.0822	0.2010
14	-0.0069	-0.0031	-0.4424
15	0.0601	0.0272	0.2840
16	0.3881	0.4613	0.2634
17	0.3705	0.4293	0.2515
18	0.2415	0.1094	0.4851

A bölgesindeki bir numaralı bara, B bölgesindeki dört numaralı bara ve C bölgesinde dokuz numaralı bara üretim baraları olarak seçilmiştir. A bölgesindeki üç numaralı bara, B bölgesindeki altı numaralı bara ve C bölgesinde sekiz numaralı bara üretim baraları olarak seçilmiştir. Başlangıç durumunda, bölgelere ilişkin üretim-tüketim değerleri ve üretim gruplarına ait sınırlar değerler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Bölgelere ilişkin üretim ve tüketim bilgileri

Bölge	Başlangıç Üretim (MW)	Başlangıç Tüketim (MW)	Üretim sınırları (MW)
A	2100	900	-
B	1000	1200	1000-2000
C	900	900	500-900
D	0	1000	-

Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu; D bölgesine iletilebilecek maksimum aktif güç miktarı olarak tanımlanmış olup (5) no’lu denklemdeki gibi formüle edilmiştir.

$$J = \sum P_{\bar{u}} - \sum P_t - n \cdot \sum \Delta P_{i,j,ihlal} - m \cdot \sum \Delta P_{\bar{u},ihlal} \quad (5)$$

Burada,

$m$ : Üretim sınırların dışında kalan üretim grubu sayısı,

$n$ : Aşırı yüklenen hat sayısı,

$\sum P_{\bar{u}}$ : A, B ve C bölgelerinin toplam üretim değeri,

$\sum P_t$ : A, B ve C bölgelerinin toplam tüketim değeri,

$\sum P_{i,j,ihlal}$ :  $i$  ile  $j$  baraları arasındaki hattın, kapasitesinin üzerindeki ek yüklenme değeri,

$\sum P_{\bar{u},ihlal}$ : Üretim gruplarının, sınırları dışındaki ek üretim değerleridir. Bu amaç fonksiyonuna göre, iletim hatlarında aşırı yüklenmeler veya üretim sınırlarının aşımına neden olan

bir olası çözümün yüksek bir uygunluk değeri alması engellenmiştir.

### 3.2. Çözüm İçin Kullanılan Optimizasyon Yöntemleri

Çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemlerinde, her potansiyel çözüm, sistemdeki toplam üretim barası sayısı ile aynı boyutta bir vektör ile, bu çözüm vektörlerinin her bir değeri ise ilgili baradan sisteme enjekte edilen aktif güç miktarı ile temsil edilir.

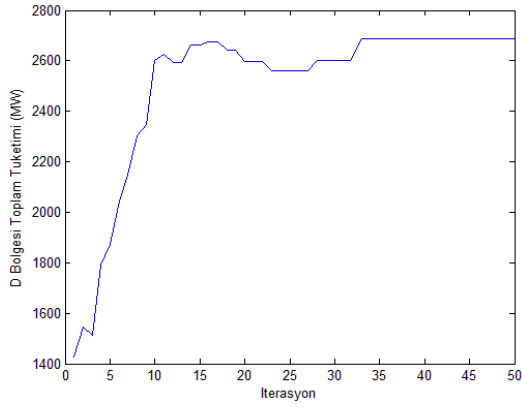
Her bir potansiyel çözümün uygunluk değerini bulmak için, (3) numaralı denklemde ile hesaplanmış PTDF faktörleri ve çözüm vektörlerde belirtilmiş aktif güç değerleri kullanılır. Çözüm vektörlerindeki aktif güç üretim değerleri, Tablo 3’de verilmiş başlangıç üretim değerlerinden çıkartılarak, sisteme o baradan enjekte edilen ek aktif güç değeri hesaplanır ( $P_{mn}^{ek}$ ). Üretilen ek aktif güç değerlerinin, sistemin hangi iletim hatlarındaki güç akışlarında ne kadar değişime sebep olduğunu hesaplamak için, (5) numaralı denklemde olduğu gibi, ilgili PTDF faktörü ile üretilen ek aktif güç değerleri çarpılır. Ek üretim değerlerinin, iletim hatlarındaki güç akışına etkisi ( $\Delta P_{ij}$ ) ile başlangıç durumunda hat üzerindeki güç akışı değerleri toplanarak, üretilen ek aktif güç değerleri sonucunda, hatlar üzerindeki yeni güç akışı değerleri hesaplanmış olur. Yeni güç akışı değerleri, hat kapasitelerinin üzerinde ise bu durum (5) numaralı denklemde olduğu gibi amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır ( $n \cdot \sum \Delta P_{i,j,ihlal}$ ). Benzer şekilde, üretim baralarına ilişkin herhangi bir sınır ihlali de amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır ( $m \cdot \sum \Delta P_{\bar{u},ihlal}$ ). Böylece sınır koşullarını sağlamayan sonuçlar verecek potansiyel çözümler düşük uygunluk değerlerine sahip olacak ve optimizasyonların ilerleyen iterasyonlarında eleneceklerdir. Böylece her optimizasyon sonucunda, sınır koşullarını sağlayan çözümler elde edilir ve çözümlerin amaç fonksiyonlarının değerleri, o çözüm için D bölgesine ne kadar aktif güç iletildiğini belirler.

Tepe tırmanma algoritmasında, her iterasyonda mevcut çözüme komşu 20 adet çözüm oluşturulmuştur. Komşu çözümler, mevcut çözüme ait üretim değerlerinin +/-%40 aralığında kalan bir uzaydan rastlantısal olarak seçilmişlerdir. Mevcut çözümün 30 iterasyon boyunca daha iyi bir çözüm ile yer değiştirmemesi, algoritma sonlandırma kriteri olarak belirlenmiştir.

BT yönteminde kullanılan komşu çözüm üretme algoritması ve parametreleri, TT yöntemindeki ile birebir aynıdır. İlerleyen iterasyonlarda, algoritmanın iyi bir çözüme yakınsamaya başlarken tekrar çok kötü bir çözüme dönmesini engellemek için T değeri her iterasyonda %10 oranında azaltılmıştır. Böylece yaklaşık 30 iterasyon içerisinde uygunluk değeri çok yüksek olmayan yeni çözümlerin mevcut çözümün yerine geçme olasılığı %10 değerinin altına inmektedir ancak yüksek uygunluk değerlerine sahip çözümlerin mevcut çözümün yerini alma olasılığının oldukça düşük değerlere inmesi için yaklaşık 20 iterasyon daha gerekmektedir. Bu durumdan sonra mevcut çözümde herhangi bir değişim meydana gelmediği için optimizasyon 50 iterasyon sonunda durmaktadır.

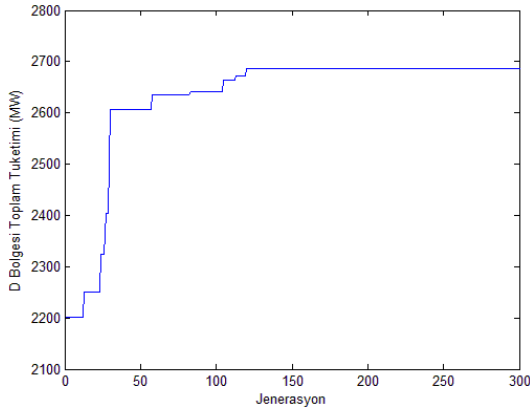
Bu çalışmada uygulanan GA’da, bireyler üç genden oluşan kromozomlar şeklinde kodlanmışlardır. Kromozomdaki genler A, B ve C bölgelerindeki üretim gruplarının, üretim değerlerini temsil etmektedir. Böylece ikili (binary) kodlama için harcanacak hesaplama zamanının önüne geçilmiştir.





Şekil 7: En iyi çözümün iterasyona bağlı değişimi (BT)

Bir başlangıç popülasyonu oluşturan GA, ilk itereasyonda diğer yöntemlere göre daha iyi bir çözüm yakalayabilmektedir (Şekil 8). Diğer iki yöntemle göre daha iyi bir sonuca ulaşmasına karşın, bu yöntemlerden daha büyük popülasyon sayısına ve iterasyon sayısına başka bir deyişle daha fazla hafıza gereksinimi ve işlem yüküne maruz kalmıştır.

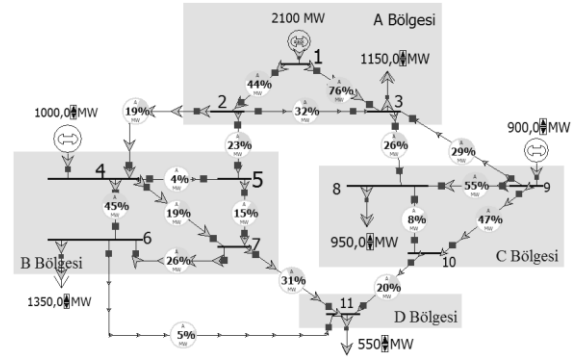


Şekil 8: En iyi çözümün iterasyona bağlı değişimi (GA)

Elde edilen sonuçların doğruluğunun tespiti için optimize edilmiş bölge üretim değerleri ve D bölgesindeki yük miktarı, Powerworld programında gerçekleştirilen güç akışı analizlerinde kullanılmıştır. GA sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen güç akışı analizi sonucunda, 2 ve 17 numaralı iletim hatlarının yüklenme oranlarının sınır değere ulaştığı, B ve C bölgelerindeki üretimin, belirlenmiş olan sınır değerler içinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Elektrik güç sistemleri dinamik olarak değişen aktif sistemlerdir. Güç sistemi üzerindeki bulunan yüklerin değişimi, iletim hatları üzerindeki güç akışlarını da etkileyecektir. Çalışmada ikinci bir senaryo olarak, tüketim baralarından çekilen aktif güç değerleri artırılarak sistem yeni bir çalışma noktasına taşınmıştır, bu duruma ilişkin yeni tüketim değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

İkinci senaryoda A, B ve C bölgelerindeki üretim değerleri sabit iken tüketim değerlerinin artışı, D bölgesine iletilen toplam güç miktarını azaltmıştır. Bu yeni duruma ilişkin iletim hattı yüklenme oranları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Yeni başlangıç durumuna ilişkin hat yüklenmeleri

Tablo 6: Bölgelere ilişkin üretim ve tüketim bilgileri

Bölge	Başlangıç Üretim (MW)	Başlangıç Tüketim (MW)	Üretim sınırları (MW)
A	2100	1150	-
B	1000	1350	1000-2000
C	900	950	500-900
D	0	550	-

İlk senaryoda olduğu gibi, belirlenen amaç fonksiyonuna göre, farklı optimizasyon yöntemleri ile optimize edilmiş bölge üretim değerleri ve bu değerlere ilişkin D bölgesi tüketim değerleri, Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7: İkinci senaryo için optimizasyon sonuçları

	Tepe Tırmanma	Benzetimli Tavlama	Genetik Algoritma
Üretim A (MW)	3165	3196	3173
Üretim B (MW)	1797	1774	1834
Üretim C (MW)	878	890	883
Tüketim D (MW)	2390	2410	2440
İterasyon	40	50	300

Sonuçlar, Tablo 5.'deki ilk senaryo için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, D bölgesine iletilen aktif güç miktarının daha sınırlı olduğu gözlenmiştir. Diğer bölgelerdeki tüketim değerlerinin artması, optimizasyonlar esnasında üretim değerleri artırılırken iletim hatlarının daha erken sınır değerlere ulaşmasına neden olarak, iletim hatları üzerinden D bölgesine iletilecek güç miktarını kısıtlamıştır.

PTDF faktörlerinin kullanılması, güç akışı analizine olan gereksinimi ortadan kaldırdığından, optimizasyonlar, Pentium Core 2 Duo 2GHz işlemci ve 2GB RAM'e sahip bir bilgisayar ile 10 sn'den kısa bir sürede sonuçlanmıştır.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, güç iletim dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak, çok bölgeli bir güç sistemi modeli üzerinde, üretim gruplarının aktif güç değerleri optimize edilerek, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişini sağlanmıştır.

Potansiyel çözümlerin uygunluk değerlerinin hesabında kullanılan iletim hattı yüklenmelerinin PTDF faktörleri ile hesaplanması, optimizasyon için ihtiyaç duyulan süreyi oldukça kısaltmıştır. Bu durum, çalışmada uygulanan yöntemlerin, gerçek zamanlı uygulanabilirliğini mümkün kılmaktadır.

Kullanılan optimizasyon tekniklerinden benzetimli tavlama ve genetik algoritmalar, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişini sağlamada her seferinde global sonuca ulaşırken tepe tırmanma yöntemi bazım durumlarda yerel en çözümlere takılmıştır.

Optimize edilmiş üretim değerlerinin kontrolü için güç akışı analizleri yapılmış ve elde edilen güç akışları, optimum çözümler için PDTF faktörleri ile hesaplanan hat yüklenmeleri ile örtüştüğünden, optimizasyonların yeterli doğrulukta çözümlere ulaştığı belirlenmiştir.

## 6. Kaynaklar

- [1] Chiang H., Flueck A., Shah K. ve Balu N., "CPFLOW, a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations", IEEE Trans. Power Syst., 10(2), 623-634, 1995.
- [2] Overbye, T. ve Demarco, C., "Improved techniques for power system voltage stability assessment using energy methods", IEEE Trans. Power Syst., 6(4), 1446-1452, 1991.
- [3] Gao B., Morison G. ve Kundur P., "Voltage stability evaluation using modal analysis", IEEE Trans. Power Syst., 7(4), 1529-1542, 1992.
- [4] Canizares C., "On bifurcations, voltage collapse and load modeling", IEEE Trans. Power Syst., 10(2), 512-518, 1995.
- [5] Haque M., "On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2003, 107-112.
- [6] Wang Y., Li W., Lu J., "A new node voltage stability index based on local voltage phasors", Electr. Power Syst. Res., 79(1), 265-271, 2009.
- [7] Corsi S., Taranto G., "A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements", IEEE Trans. Power Syst., 23(3), 1271-1279, 2008.
- [8] Greene, S., Dobson, I. ve Alvarado, F.L., "Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula", IEEE Trans. Power Syst., 17(1), 34-40, 2002.
- [9] Youjie D., McCalley, J.D. ve Vittal, V., "Simplification, expansion and enhancement of direct interior point algorithm for power system maximum loadability", IEEE Trans. Power Syst., 15(3), 1014-1021, 2000.
- [10] Mello, J.C.O., Melo, A.C.G. ve Granville, S., "Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and Monte Carlo simulation", IEEE Trans. Power Syst., 12(2), 736-742, 1997.
- [11] Ying X., Song, Y.H., Chen-Ching L. ve Sun, Y.Z., "Available transfer capability enhancement using FACTS devices", IEEE Trans. Power Syst., 18(1), 305-312, 2003.
- [12] Orfanogianni, T. ve Bacher, R., "Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices", IEEE Trans. Power Syst., 18(1), 19-26, 2003.
- [13] Bettiol, A.L., Wehenkel, L. ve Pavella, M., "Transient stability-constrained maximum allowable transfer", IEEE Trans. Power Syst., 14(2), 654-659, 1999.
- [14] Hakim, L., Kubokawa, J., Yue Yuan, Mitani, T., Zoka, Y., Yorino, N., Niwa, Y., Shimomura, K. ve Takeuchi, A., "A Study on the Effect of Generation Shedding to Total Transfer Capability by Means of Transient Stability Constrained Optimal Power Flow", IEEE Trans. Power Syst., 24(1), 347-355, 2009.
- [15] Leonidaki, E.A., Georgiadis, D.P. ve Hatziaargyriou, N.D., "Decision trees for determination of optimal location and rate of series compensation to increase power system loading margin", IEEE Trans. Power Syst., 21(3), 1303-1310, 2006.
- [16] Pandey, S.N., Pandey, N.K., Tapaswi, S. ve Srivastava, L., "Neural Network-Based Approach for ATC Estimation Using Distributed Computing", IEEE Trans. Power Syst., 25(3), 1291-1300, 2010.
- [17] Sookananta, B., Galloway, S.J., Burt, G.M. ve McDonald, J.R., "Employment of power transfer distribution factor for the optimal placement of FACTS devices", IPEC, International Power Engineering Conference, 2007, 569 - 573.
- [18] Naik, R.S., Vaisakh, K., ve Anand, K., "Application of TCSC for enhancement of ATC withPTDF in Power Transmission System", International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010, 1-6.
- [19] Chong W., Vittal, V., Kolluri, V.S. ve Mandal, S., "PTDF-based automatic restoration path selection", IEEE Trans. Power Syst., 25(3), 1686-1695, 2010.
- [20] Smieja, T., Lombardi, P., Styczynski, Z.A. ve Loppen, S., "Influence of inter area Transfer Capacity on the Regional Power System Planning", IEEE PowerTech Conference, 2009, 1-6.
- [21] Patel, M. ve Girgis, A.A., "Review of available transmission capability (ATC) calculation methods", PSC, Power Systems Conference, 2009, 1-9.
- [22] Goldberg D. E., "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison Wesley Longman, 1989.
- [23] Uyar A. Ş. ve Türkay B., "Evolutionary Algorithms for the Unit Commitment Problem", Turkish Journal of Electrical Engineering, 16(3), 239-255, 2008.
- [24] Christie, R.D., Wollenberg, B.F. ve Wangenstein, I., "Transmission management in the deregulated environment", Proceedings of the IEEE, 88(2), 170-195, 2000.
- [25] Levy, Norman M., "The Application of Hill-Climbing Methods to the Adaptive Control of Small-Scale Practical Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 24(1), 74-80, 1977.
- [26] Kurbel, K., Schneider, B. ve Singh, K., "Solving optimization problems by parallel recombinative simulated annealing on a parallel computer-an application to standard cell placement in VLSI design", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 28(3), 454-461, 1998.

# Bölgeler Arası Düşük Frekanslı Generatör Salınımlarını Sönümleyici Faktörler ve Türkiye ENTSO-E CESA Enterkonneksiyonu için Çözümler

## Damping Measures Against Low Frequency Inter Area Oscillations and Solutions for Turkey ENTSO-E CESA Interconnection

Cihangir Gençoğlu<sup>1</sup>, Osman Bülent Tör<sup>1</sup>, Nezih Güven<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TÜBİTAK-UZAY, Güç Sistemleri Bölümü, ODTÜ, Ankara  
cihangir.gencoglu@uzay.tubitak.gov.tr, osman.tor@uzay.tubitak.gov.tr

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
guven@metu.edu.tr

### Özet

Türkiye elektrik şebekesinin Avrupa şebekesine (ENTSO-E CESA) senkron paralel bağlantısı projesi son aşamalara gelmiştir. Bilgisayar simülasyonlarına dayalı fizibilite analizlerine göre, bağlantı sonrası enterkonnekte sistemde ~0.15 Hz frekanslı bölgeler arası salınımlar beklenmektedir. Bu salınımları sönümleyici tedbirler alınmazsa, salınımlar Türkiye şebekesinin Avrupa enterkonnekte sisteminden kopmasına yol açabilecek boyutlara ulaşabilir. Bu bildiriye bu salınımların tehlikeli boyutlara ulaşmasını önleyici tedbirler bilgisayar simülasyonları ile analiz edilmiştir. Bunlar: 1) Türkiye'deki büyük güçteki hidroelektrik santrallerin hız regülatörlerinin denetleyici parametrelerinin optimizasyonu; 2) Güç sistemi dengeleyicilerinin (Power System Stabilizer; PSS) denetleyici parametrelerinin optimizasyonu; 3) Doğrudan iletim sistemine bağlı büyük güçte ark ocaklarındaki Statik Var Kompansatörlerin kontrolcülerinin modifikasyonu; 4) STATCOM kullanımı; 5) Sönümleme dirençleri kullanımı. Çalışmada anılan her bir tedbirin salınımları sönümlendirmede ne seviyede olumlu katkı yaptığı ortaya koyulmuş ve sistem işletimine yönelik öneriler getirilmiştir.

### Abstract

The interconnection project between Turkish grid and the ENTSO-E CESA system is almost finished. According to feasibility analysis based on computer simulations, inter-area oscillations around ~0.15 Hz is expected once the interconnection is established. Unless countermeasures are taken, these oscillations could grow to dangerous amounts which will result in disconnection of Turkish grid from the interconnection. This paper analyzes the effect of such measures based on computer simulations. These measures are: 1) Parameter optimization of the governors of considerable size hydroelectric units in Turkey; 2) Parameter optimization of power system stabilizers (PSS), 3) Controller modification of static VAR compensators (SVC) existing in steel melting arc furnaces that are supplied directly from the transmission system, 4) Controller modification of ±50 MVAR STATCOM designed for voltage regulation, and 5) Application of breaking resistors. The results illustrate the positive contribution of each measure to the damping performance of the system. The study includes conclusive recommendations.

### I. Giriş

Türkiye iletim sisteminin Avrupa iletim şebekesine (ENTSO-E CESA, eski adıyla UCTE) senkron paralel bağlantısında son

aşamalara gelinmiştir. Bu çalışmalarda amaç, Türkiye iletim şebekesinin frekans kontrol performansını ve enterkonneksiyon sonrası oluşacak sistemin dinamik kararlılığını iyileştirmek, bu sayede iki sistemin güvenli bir şekilde senkron işletilmesini mümkün kılmak olarak özetlenebilir. Bu kapsamda TEİAŞ ile UCTE üye ülkelerinin iletim kurumları tarafından oluşturulan ve TÜBİTAK UZAY Güç Sistemleri Bölümünün TEİAŞ ile birlikte dahil olduğu projelerde gerçekleştirilen bilgisayar simülasyonlarına dayalı fizibilite analizlerine göre, bağlantı sonrası enterkonnekte sistemde ~0.15 Hz frekanslı bölgeler arası salınımlar beklenmektedir [1]. Bu salınımları sönümlendirici - en azından artmalarını önleyen - tedbirler alınmazsa, bu salınımlar Türkiye şebekesinin ENTSO-E CESA şebekesinden kopmasına yol açabilecek boyutlara ulaşabilir [4].

Bu bildiriye, beklenen bölgeler arası düşük frekanslı salınımların tehlikeli boyutlara ulaşmasını önleyici tedbirler değerlendirilmiş ve bilgisayar simülasyonları ile bu tedbirlerin göreceli etkileri analiz edilmiştir. Bu önlemler:

1. Büyük güçteki hidroelektrik santrallerin hız regülatörlerinin denetleyici parametrelerinin optimizasyonu;
2. Önemli santrallerin güç sistemi dengeleyicilerinin (Power System Stabilizer; PSS) denetleyici parametrelerinin yeniden ayarlanması;
3. Doğrudan iletim sistemine bağlı büyük güçte ark ocaklarındaki Statik Var Kompansatörlerin (SVC) kontrolcülerinin modifikasyonu;
4. Gerilim kontrolü amacıyla tasarlanan bir ±50 MVAR STATCOM'un, sistem salınımlarını sönümlendirmek amacıyla denetleyici modifikasyonu;
5. İletim şebekesinde sönümleme dirençlerinin kullanımı.

### 2. Bölgeler Arası Düşük Frekans Salınımlar

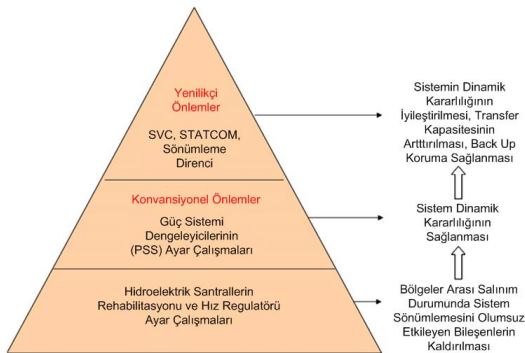
Türkiye sistemi ENTSO-E CESA sisteminden izole iken böyle bir problem görülmesi de, senkron paralel bağlantı sonrası şebeke frekansında ~7 sn periyotlu (~0.15 Hz) salınımların gözlenmesi beklenmektedir. Bahsedilen salınımların frekans ve genliği, sistem işletme şartlarına (yük akışı senaryosu) bağlı olmakla beraber, bilgisayar simülasyonlarına dayalı analizlerde gözlemlenen en düşük salınım frekansı ve bu frekansa karşılık gelen "mod şekli" (mode shape) Şekil 1'de gösterilmiştir [2]. "Mod şekli" grafiği, enterkonnekte sisteme bağlı generatörlerin rotor açısı ve rotor hızları için yapılan doğrusal (lineer) özdeğer (eigenvalue) analizleri sonucunda, sistemdeki herhangi bir "mod"a ait özvektörün (eigenvector) ilgili girdisinin (entry) fazör gösterimidir ve karşılık geldiği

“mod”un gözlelenebilirliğinin (*observability*) göstergesidir. Şekil 1’de de görüldüğü gibi, enterkonneksiyon sonrasında Türkiye iletim sistemi ve Doğu Avrupa’daki generatörlerin bir kısmının toplu halde (coherent) ENTSO-E CESA Sistemi’nin geri kalanı ile yaklaşık olarak zıt fazda salınması beklenmektedir. Ayrıca, özvektör büyüklükleri kıyaslandığında, bu salınımlara olası en fazla pozitif (ve negatif) sönümlenme etkisi, şebekenin uç noktasında bulunan Türkiye’deki santraller tarafından sağlanabilir.



Şekil 1. Enterkonneksiyon sonrası oluşması beklenen  $\sim 0.15$  Hz bölgeler arası salınının mod şekli dağılımı [2].

Gerekli sönümlenme önlemleri alınmadığı takdirde, bu durumun iki sistemin birbirinden ayrılmasıyla sonuçlanacak yük akışı dalgalanmalarına sebep olabileceği açıktır. Bu durumun önüne geçilmesi için bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önlemler, Şekil 2’de öncelik sırasına göre verilmiştir. Bir başka deyişle Şekil 2, enterkonneksiyon sonrası şebekenin dinamik kararlılığını iyileştirmek amacıyla yapılması gereken çalışmalar ve takip edilen yol haritasını özetlemektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, ilk önlem büyük ve uzun cebri borulu hidrolik santrallerin hız regülatörü kontrol sistemlerinin rehabilitasyonu ve denetleyici parametrelerinin optimizasyonudur [3]. Bu sonraki konvansiyonel çözüm; düşük frekans salınımlarının güç sistemi dengeleyicisi (power system stabilizer; PSS) ile, ikaz sisteminin otomatik gerilim regülatörü (Automatic Voltage Regulator, AVR) üzerinden, sönümlendirilmesidir [5], [6]. Bunları daha yeni çözümler olan SVC, STATCOM ve sönümlendirici direnç uygulamaları izler [5].



Şekil 2. Türkiye ENTSO/E CESA sisteminin enterkonneksiyonu sonrası sistemin dinamik kararlılığını artırmak için takip edilen yöntem.

### 3. Simülasyon Çalışmaları

#### 3.1. Modelleme ve Baz Senaryo

Türkiye iletim sistemi ve ENTSO-E CESA sistemlerinin enterkonneksiyon projesi kapsamında kullanılan ENTSO-E CESA sisteminin dinamik modeli (75 bara, 133 iletim hattı ve

eşdeğer generatörler ile indirgenmiş sistem modeli) ile TÜBİTAK UZAY Güç Sistemleri Bölümü ve TEİAŞ tarafından geliştirilen Türkiye iletim sistemi eşdeğer dinamik sistem modeli DIGSILENT PowerFactory™ yazılımında birleştirilmiştir [7]. Yapılan analizlerde, enterkonnekte sistemin dinamik kararlılık açısından en zayıf senaryosu olarak aşağıda belirtilen yüklenme koşulları ele alınmıştır.

#### Minimum Yüklenme Koşulları (bahar dönemi):

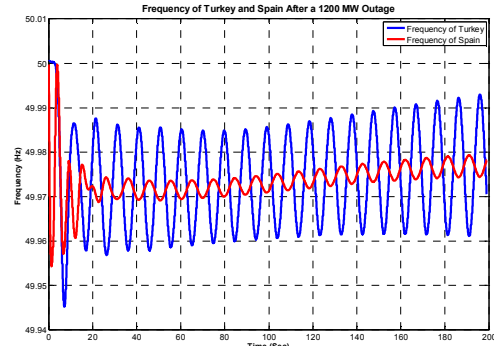
- ENTSO-E CESA Sistemi yükü: 235 GW,
- Türkiye iletim sistemi yükü: 19 GW,
- Türkiye’den ENTSO-E CESA Sistemi’ne 900 MW ihraç (küçük sistemden büyük sisteme ihraç)

Bu koşullarda, sistemde yapılan *doğrusal* (linear) özdeğer (eigenvalue) analizlerinin sonucu olarak, en az sönümlenme katsayısına (damping factor) sahip olan “mod”lar Tablo 1’de listelenmektedir. Tablo 1’den görüleceği üzere, sistemdeki kararsız modun frekansı  $\sim 0.122$  Hz olarak hesaplanmış olup, bu değer 0.15 Hz’e çok yakındır.

Tablo 1. En kötü sistem konfigürasyonunda rotor açısına ait özdeğerler.

	Reel Değer	İmajiner Değer	Sönümlenme Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı
Mod 1	-0,087	0,810	0,129	0,107
Mod 2	0,255	0,767	0,122	-0,315
Mod 3	-0,258	0,793	0,126	0,309
Mod 4	-0,200	0,600	0,095	0,316
...	...	...	...	...

*Doğrusal olmayan* nümerik simülasyonlar sonucunda ise, Minimum yüklenme koşullarında ENTSO-E CESA sisteminde 1200 MW üretim kaybı sonrasında (Baz Senaryo), sistem frekansı Şekil 3’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Baz Senaryo => Şebeke frekansı [5]. (Mavi: Türkiye şebeke frekansı, Kırmızı: İspanya şebeke frekansı.)

Şekil 3’te gösterilen simülasyon sonuçları, *doğrusal* özdeğer analizlerini destekler nitelikte olup, (n-1) kısıtlılık durumunda dinamik kararlılık bakımından sakıncalı durumlara işaret etmektedir.

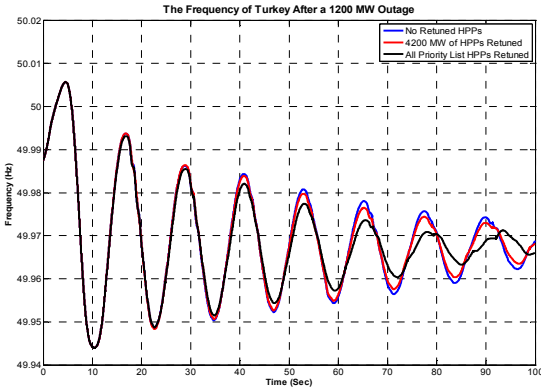
### 3.2. Konvansiyonel Çözümler

#### 3.2.1. Hidrolik Santrallerin Hız Regülatörlerinin Denetleyici Parametrelerinin Optimizasyonu

Türkiye elektrik sisteminde puant (maksimum) yüklenme koşullarında anlık talebin  $\sim 30\%$ ’u hidroelektrik santrallerden karşılanmaktadır. Dolayısıyla, Türkiye iletim sisteminin dinamik davranışı hidroelektrik santrallerin dinamik davranışı ile kuvvetle ilişkilidir. Özellikle su zaman sabiti yüksek hidroelektrik ünitelerin hız regülatörlerinin bahsedilen düşük



frekanslı (~0.15 Hz) bölgeler arası salınımlara olumsuz yönde (frekans yükselirken ünitenin çıkış gücünün de artması, frekans düşerken ünitenin çıkış gücünün de azalması) tepki vermesinin, salınımların genliğinin artmasına ve iki sistemin birbirinden ayrılmasıyla sonuçlanacak yük akışı dalgalanmalarına sebep olacağı, başka bir deyişle sistemin sönümleme performansını olumsuz etkileyeceği [4]'de detayları ile açıklanmıştır. Bu olumsuz tepkinin minimize edilmesi için Türkiye'deki tüm büyük hidroelektrik santrallerin hız regülatörü ayarları değerlendirilmiş ve gerekli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Böylece, hidrolik santrallerin hız regülatörünün ayar değerleri hem bölgeler arası salınımlara pozitif sönümlendirme sağlayacak hem de izole besleme koşullarında kararlı çalışacak şekilde revize edilmiştir [3],[5]. Yapılan bu çalışmanın pozitif etkisinin bilgisayar simülasyonları ile gösterimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Senaryo 1 => Sebeke frekansı [3].(Hidroelektrik santrallerin hız regülatörü ayarlarının optimizasyonunun etkisi.)

#### Maksimum Yükleme Koşulları:

- ENTSO-E CESA Sistemi yükü: 329 GW,
- Türkiye iletim sistemi yükü: 30 GW,
- Türkiye'den 1000 MW ihraç,
- ENTSO-E CESA sisteminde 1200 MW üretim kaybı (Senaryo 1).

Şekil 4'te:

- Mavi trend: hidroelektrik santrallerin tümünün mevcut hız regülatörü (revizyon öncesi) ayarlarıyla çalıştığı senaryo,
- Kırmızı trend: sadece Atatürk ve Karakaya Hidroelektrik Santralleri'ndeki ünitelerin (toplam 4200 MW kurulu güç; Türkiye'deki anlık puntanın ~%14'ü) hız regülatörü ayarlarının yeniden yapıldığı senaryo,
- Siyah trend: Türkiye'deki bütün büyük güçteki hidroelektrik santrallerin hız regülatörü ayarlarının revize edildiği senaryo.

#### 3.2.2. Güç Sistemi Dengeleyicilerinin (Power System Stabilizer; PSS) Parametrelerinin Optimizasyonu

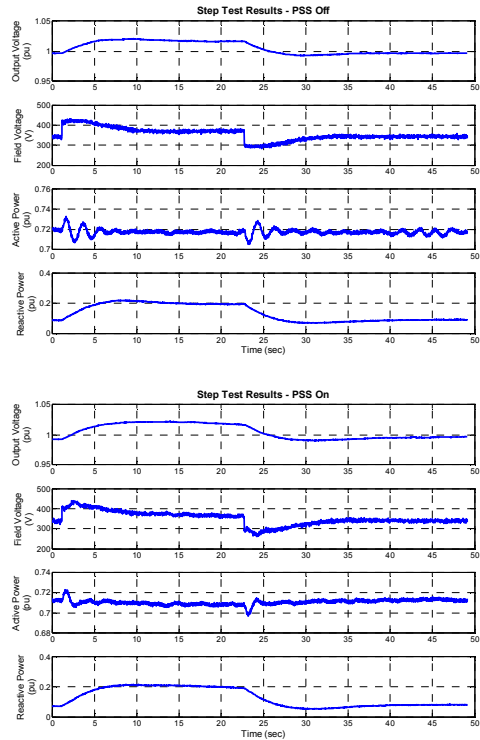
Şimdiye kadar Türkiye'de bölgeler arası salınım problemi söz konusu olmadığından, mevcut santrallerin kabul testleri sırasında PSS ayarları yapılırken sadece türbin-generatörlerin çebeke ile lokal salınımlarını (~1 Hz) sönümleyici ayar çalışmaları yapılmıştır. Diğer yandan, ENTSO-E CESA sistemi ile enterkonneksiyon projesi kapsamında gerçekleştirilen PSS ayar çalışmalarında esas olarak iki performans kriteri göz önüne alınmıştır:

- Bölgesel salınımların sönümlendirilmesi,

- Bölgeler arası salınımları *arttırıcı* tepki verilmemesi.

#### Bölgesel Salınımların Sönümlendirilmesi

Güç sistemine bağlı her generatör sistemin geri kalanına göre salınmaktadır. Bu salınımların sebebi hat açması, gerilim ayar değeri değişiklikleri, yüksek gerilim transformatör kademe değiştirmesi gibi olağan güç sistemi olaylarıdır [9]. Genellikle, generatörlerin bu salınımları sönümlendirme performansını analiz etmek amacıyla, AVR çevriminin girişine gerilim ayar değerinin ~%2'sine karşılık gelen adım değişiklik uygulanır (*step-response test*). Bu test PSS'in aktif olmadığı ve aktif olduğu durumlar için tekrarlanır ve iletim sistemine bağlı bir makine için lokal salınım frekans etrafında aktif güç salınımlarının PSS devrede iken daha iyi sönümlenmesi beklenir. Bu kapsamda Temelli DGKÇS'de gerçekleştirilen testlerin sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.

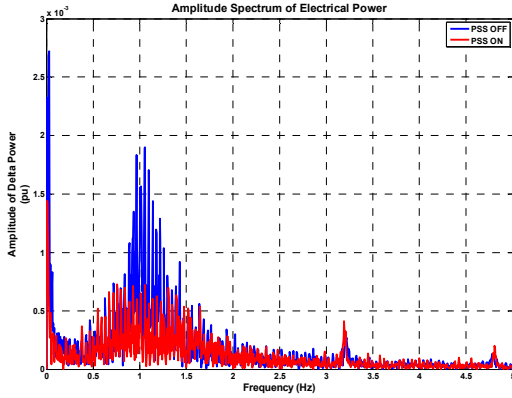


Şekil 5. PSS'in lokal salınımları sönümleyici etkisi [14].

#### Bölgeler Arası Salınımlara Arttırıcı Tepki Verilmemesi

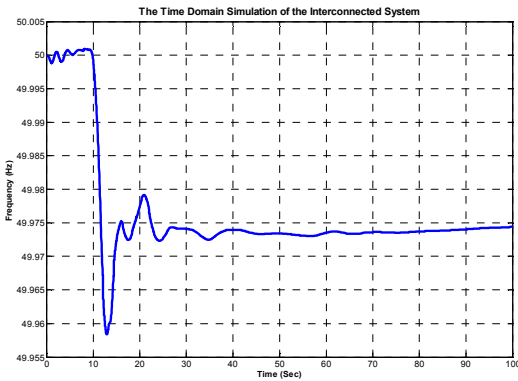
Yukarıda da belirtildiği gibi, ENTSO-E CESA sistemi ile senkronizasyon sonrası, frekansı ~0.1 Hz'e kadar düşebilen bölgeler arası salınım problemi muhtemeldir. Elektrik makinelerinin sönümleme karakteristiğinin damper sargılarının zaman sabitleriyle sıkı ilişkili olduğu düşünüldüğünde ve ~0.1 Hz'lik salınımların bu zaman sabitlerine göre göreceli uzun oldukları göz önüne alındığında, PSS'lerin bu denli düşük frekanslarda, bölgesel salınımlarda oldukları kadar aktif olmaları söz konusu değildir [6]. Ancak bu noktada temel beklenti, en azından PSS'in ikaz sistemi aracılığıyla, makinenin doğal sönümleme karakteristiğini olumsuz etkilememesidir. Bu durumun test edilmesi amacıyla, AVR çevriminin girişine çıkış gerilimini ~%2 civarında değiştirecek şiddette sinusoidal değişiklik uygulanır (frequency response test). Test sonuçları değerlendirilirken, 0.1 Hz ile 10 Hz arasındaki frekans spektrumundaki salınımlar analiz edilir ve 0.5 Hz'in üstündeki salınımlar için aktif güç sinyalindeki salınımların, 0.5Hz'in altındaki salınımlar için de terminal

gerilimi sinyalindeki salınımların PSS devrede iken daha iyi sönümlenmiş olması beklenmektedir. Böylece, bölgeler arası salınımlar için PSS’de yapılan parametre değişikliğinin, PSS’nin lokal salınımlardaki olumlu etkisine zarar vermediği gözlemlenir. Temelli DGKÇS’de gerçekleştirilen testlerin sonuçları Şekil 6’da gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, Fast Fourier Transform (FFT) analizi sonucunda geniş bir frekans bandında (0.1 Hz – 5 Hz) PSS’in olumlu etkisi görülmektedir.



Şekil 6. Tipik PSS performans test sonuçları –FFT analiz [14]

Baz Senaryoda yalnızca güç sistemi dengeleyicilerinin mevcut parametre değerlerinin [9]-[15]’te önerilen değerlerle değiştirilmesinin ardından yapılan simülasyonlar sonucunda, maksimum yüklenme koşullarında sistem frekansı Şekil 7’de gösterildiği gibi bulunmuştur (Senaryo 2). Şekil 7’de gösterilen durumdaki sistem frekansı Şekil 3 (Baz Senaryo) ve Şekil 4’de (Senaryo 1) gösterilenler ile kıyaslandığında, parametre optimizasyonu sonrası güç sistemi dengeleyicilerinin bölgeler arası salınımlar açısından çok önemli bir iyileştirme sağladığı gözlenmektedir.



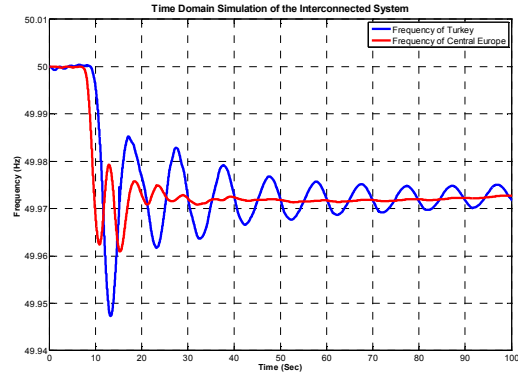
Şekil 7. Senaryo 2 => Sebeke frekansı [5]. (PSS ayarlarının optimizasyonunun sistem dinamik performansına olumlu etkisi.)

### 3.3. Yenilikçi Önlemler

#### 3.3.1. STATCOM Denetleyici Modifikasyonu

STATCOM’un çok hızlı reaktif güç verme/çekme özelliği dolayısıyla iletim şebekelerinde çok hızlı bir şekilde gerilim/reaktif güç regülasyonu sağladığı bilinmektedir [9]. Bu analizde Türkiye iletim şebekesi için TÜBİTAK UZAY Güç Elektronikliği Bölümü tarafından gerilim regülasyonu amacıyla modüler olarak geliştirilen  $\pm 50$  MVAR STATCOM’un kontrolcüsünde yapılacak modifikasyonların bölgeler arası salınımlara etkisi analiz edilmiştir.

Baz Senaryoda Sincan 380 kV barasına (kısaca devre gücü minimum yük koşullarında 19700 MVA) transformator ile bağlı  $\pm 50$  MVAR kapasitesindeki STATCOM’un denetleyici modifikasyonunun ardından yapılan simülasyonlar sonucunda, ENTSO-E CESA sisteminde 1200 MW üretim kaybı sonrasında, sistem frekansı Şekil 8’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır (Senaryo 3). Şekil 8’de gösterilen durumdaki sistem frekansı Baz Senaryonun sonucu ile kıyaslandığında, gerilim kontrollü STATCOM gibi statik güç sistemi elemanlarının sönümlendirme amacıyla kullanılmasının da sistem dinamik kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmektedir.



Şekil 8. Senaryo 3 => Sebeke frekansı [5] ( $\pm 50$  MVAR STATCOM’un denetleyici modifikasyonu sonrası sistem dinamik performansına etkisi).

#### 3.3.2. Statik VAR Kompansator (Static Var Compansator, SVC) Denetleyici Modifikasyonu

Şebekeye iletim seviyesinden bağlı olan darbeleri yüklerin (ark ocağları) reaktif güç kompanzasyonu için SVC kullandıkları bilinmektedir. Bu analizde SVC’lerin kontrolcülerinin bölgeler arası salınımları sönümlenici biçimde revize edilmesinin etkisi analiz edilmiştir.

Baz Senaryoda enterkonneksiyon projesi kapsamında SVC modifikasyonu yapılması öngörülen Türkiye’deki 4 büyük ark ocağından herhangi bir anda aşağıda özellikleri verilen 3 tanesinin aktif olduğu varsayılmıştır:

- SVC 1 - 310 MVAR kapasite - 3093 MVA busbar,
- SVC 2 - 300 MVAR kapasite - 4942 MVA busbar,
- SVC 3 - 330 MVAR kapasite - 7623 MVA busbar.

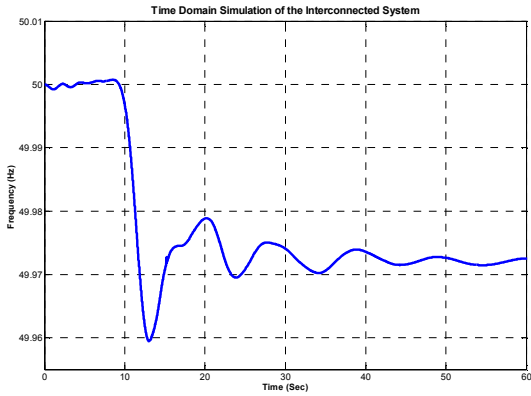
Yapılan simülasyonlar sonucunda, ENTSO-E CESA sisteminde 1200 MW üretim kaybı sonrasında, sistem frekansı Şekil 9’da gösterildiği gibi bulunmuştur (Senaryo 4). Şekil 9’da gösterilen durumdaki sistem frekansı Şekil 3 ile kıyaslandığında, SVC gibi statik güç sistemi elemanlarının sönümlendirme amacıyla kullanılmasının sistem dinamik kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmektedir.

#### 3.3.3. Sönümlenme Direnci Uygulanması

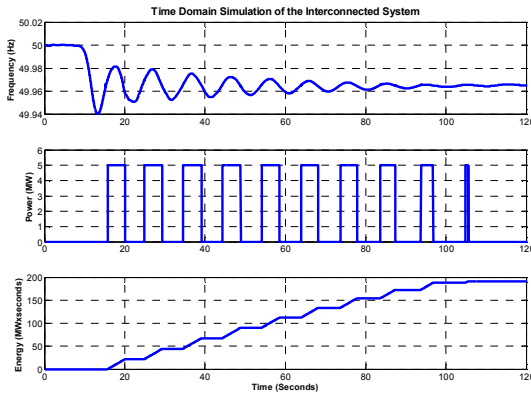
Son olarak, bölgeler arası salınımları sönümlendirmek için sadece salınım zamanı devreye girecek sönümlenme dirençlerinin etkisi analiz edilmiştir. Sönümlenme dirençleri Baz Senaryoda, Sincan barasına bağlı 5 MW kapasitesindeki sönümlenme direncinin, sistem salınımlarını sönümlendirmeyi amaçlayan bir denetleyici tarafından, salınım esnasında frekansın yükseldiği anlarda devreye alınıp frekansın düştüğü anlarda devreden çıkartılması şeklinde modellenmiştir. Simülasyonlar sonucunda, ENTSO-E CESA sisteminde 1200 MW üretim kaybı sonrasında, sistem frekansı ve sönümlenme

direnci tarafından çekilen güç Şekil 10'de gösterildiği gibi simüle edilmiştir (Senaryo 5). Şekil 10'da gösterilen durumdaki sistem frekansı Şekil 3 ile kıyaslandığında, genelde topraklama ya da deşarj amacıyla kullanılan direncin sistem salınımlarını sönümlendirme amacıyla kullanılmasının, beklendiği gibi sistem dinamik kararlılığını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmektedir.

Şekil 10'da, aynı olay için, sistem frekansı ile birlikte sönümleme direnci tarafından harcanan enerjinin zaman ekseninde değişimi görülmektedir. Sönümleme direncinin tipik bir olay başına yaklaşık olarak 0,056 MWhr enerji harcadığı hesaplanmıştır. Şekilde de görüldüğü üzere, sönümleme direnci sadece bölgeler arası salınım nedeniyle frekansın yükseldiği anlarda devreye girmek suretiyle sistemdeki generatörlerin ivmelenmelerini engellemektedir.



Şekil 9. Senaryo 4 => Sebeke frekansı [5] (SVC'lerin denetleyici modifikasyonlarının sistem dinamik performansına olumlu etkisi).



Şekil 10. Senaryo 5 => Sönümleme direnci tarafından çekilen güç ve enerji [5] (Sönümleme direncinin sistem dinamik performansına olumlu etkisi).

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bilgisayar simülasyonlarına dayalı analizlere göre, ENTSO-E CESA Sistemi ve Türkiye iletim sistemlerinin enterkonneksiyonu sonrası beklenen düşük frekanslı bölgeler arası salınımları sönümlendirmek için en etkili önlemin, santrallerin PSS parametre ayarlarının yeniden optimize edilmesi olduğu anlaşılmıştır. Diğer yandan, uzun cebri borulu hidrolik santrallerin bu salınımları artırıcı etkilerinin olabilmesi ve Türkiye'de bu tür hidrolik santrallerin ağırlığının görece fazla olması, hidrolik santrallerin hız regülatörü denetleyici

parametrelerinin optimize edilmesinin önemini göstermektedir.

Bu konvansiyonel önlemlerin yanı sıra, STATCOM, SVC ve sönümleme direnci gibi statik güç sistemi elemanlarının sistem salınımlarının sönümlendirilmesi amacıyla kullanılmasının, beklendiği üzere sistem sönümlendirme performansını iyileştireceği, dolayısıyla gerek sistem kararlılığını ve bağlantının sürekliliğini sağlamak, gerekse de iletim sistemleri arasındaki net transfer kapasitesini (başka bir deyişle elektrik ticaret hacmini) arttırmak için alternatif yöntemler olarak değerlendirilebileceği öngörülmüştür.

TEİAŞ ve TÜBİTAK UZAY Güç Sistemleri Bölümü önderliğinde büyük santrallerin hemen hepsi için her iki konvansiyonel yöntemin uygulanması tamamlanmıştır. Ayrıca, TÜBİTAK UZAY Güç Elektronikleri Bölümünün geliştirdiği STATCOM'un kontrolcüsü amaca yönelik modifiye edilmiştir. SVC denetleyici modifikasyonu çalışmaları devam etmekte olup, sönümlendirici direnç uygulaması için ilk önce enterkonneksiyon sonrası deneme sürecindeki salınımların gözlenmesi önerilmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- [1] "Preventive Measures for Effective Damping of Inter-area Oscillations after the Synchronous Interconnection of the Turkish Power System with the UCTE Power System", UCTE, Mayıs 2009.
- [2] H. Breulmann, E. Grebe, M. Lösing, et. al., "Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power system", in *CIGRE session 2000, 2000, paper 38-113*.
- [3] C. Gencoglu, "Assessment of the Effect of Hydroelectric Power Plants' Governor Settings on Low Frequency Inter Area Oscillations," Ms Thesis, Middle East Technical University, Tem. 2010.
- [4] "Complementary Studies for the Synchronization of the Turkish Power System with the UCTE Power System", UCTE, Mayıs 2007.
- [5] O. B. Tor, C. Gencoglu, O. Yilmaz, E. Cebeci, A.N. Guven, "Damping Measures against Prospective Inter Area Oscillations between Turkish Grid and ENTSO-E CESA System," (*IEEE PowerCON 2010 konferansında basılmak üzere kabul edilmiş tir*)
- [6] IEEE Tutorial Course, "Power System Stabilization via Excitation Control," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [7] DİGSILENT Company, <http://www.digsilent.de/>, [Erişim: 3 Eylül 2010].
- [8] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [9] J. Taborda, "Elbistan B AVR & PSS Settings Analysis," JT Systems, Nussbaumen, Switzerland, Aralık 2008.
- [10] J. Taborda, "Proposal for AVR and PSS Settings: Karakaya HPS," ABB, Zurich, Switzerland, Temmuz 2008.
- [11] F. Riegger, "Ataturk Unit 1 PSS Test Results," ABB, Zurich, Switzerland, Kasım 2008.
- [12] J. Taborda, "PSS Tuning and Testing Report: Oymapınar HPP," JT Systems, Nussbaumen, Switzerland, Ocak 2010.
- [13] J. Taborda, "PSS Testing Report: ENKA CCPP UN TS 21X (GT) and 21A (ST)," JT Systems, Nussbaumen, Switzerland, Nisan 2010.
- [14] C. Gencoglu, O. B. Tor, "PSS Retuning Site Tests for Gas Turbines of Ankara (Baymina) NGCCPP: Observer Report", TUBITAK UZAY Güç Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye, Nisan 2010.
- [15] C. Gencoglu, O. B. Tor, "PSS Retuning Site Tests for Gas & Steam Turbines of Izmir (Aliaga) NGCCPP: Observer Report", TUBITAK UZAY Güç Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye, Mayıs 2010.





$k$  boşluğun dalga sayısını göstermektedir. Bazı matematik işlemleri anlamlı kılabilmek için ortamın çok küçük de olsa bir iletkenliğinin olduğunu, yani  $k$ 'nin çok küçük bir sanal kısma sahip olduğunu düşüneceğiz. Kayıpsız duruma ilişkin sonuçlar ise analiz sonunda  $\text{Im}(k) \rightarrow 0$  yapılarak elde edilebilir.

Problemin simetrisinden dolayı bütün alan bileşenleri

$$H_\phi = u(\rho, z)$$

cinsinden

$$E_\rho = \frac{1}{i\omega\epsilon} \frac{\partial}{\partial z} u(\rho, z)$$

$$E_z = -\frac{1}{i\omega\epsilon} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho u(\rho, z))$$

biçiminde ifade edilebilir.

Analizin kolaylığı açısından toplam alanı  $u^T(\rho, z)$  aşağıdaki gibi ifade etmek uygun olacaktır:

$$u^T(\rho, z) = \begin{cases} u_1(\rho, z) & \rho > b & z \in (-\infty, \infty) \\ u_2(\rho, z) & \rho \in (a, b) & z > 0 \\ u^i(\rho, z) + u_3(\rho, z) & \rho \in (a, b) & z < 0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) denkleminde  $u^i(\rho, z)$  ve  $u_n(\rho, z)$  alanları aşağıda verilen Helmholtz denkleminin sağlar:

$$\left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 - \frac{1}{\rho^2} \right) u_n(\rho, z) = 0, \quad n = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$\rho > b$  bölgesinde  $u_1(\rho, z)$  saçılan alanı için (3) denkleminin  $z \in (-\infty, \infty)$  aralığında Fourier dönüşümünü alırsak

$$\left[ \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left( \rho \frac{d}{d\rho} \right) + (k^2 - \alpha^2) \right] F(\rho, \alpha) = 0. \quad (4a)$$

elde ederiz. Burada

$$F(\rho, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(\rho, z) e^{i\alpha z} dz. \quad (4b)$$

ile tanımlı  $F(\rho, \alpha)$  fonksiyonu  $u_1(\rho, z)$  nin Fourier dönüşümü,  $\alpha$  ise kompleks Fourier dönüşüm değişkenidir.

$\rho \rightarrow \infty$  daki radyasyon koşulunu da gözönüne alarak (4a) homojen diferansiyel denklemini çözersek,

$$F^-(\rho, \alpha) + F^+(\rho, \alpha) = A(\alpha) H_1^{(1)}[K(\alpha)\rho] \quad (5a)$$

bulunur. Burada,  $K(\alpha)$ ,  $\alpha = k$  dan  $\alpha = k + i\infty$  ya ve  $\alpha = -k$  dan  $\alpha = -k - i\infty$  ya kadar kesilmiş kompleks  $\alpha$ -düzleminde tanımlı karekök fonksiyonu

$$K(\alpha) = \sqrt{k^2 - \alpha^2} \quad (5b)$$

olup,  $K(0) = k$  dir.  $F^+(\rho, \alpha)$  ve  $F^-(\rho, \alpha)$  ise sırasıyla  $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$  (üst yarım- düzlem) ve  $\text{Im}(\alpha) < \text{Im}(k)$  (alt yarım-düzlem) bölgelerinde  $\alpha$  nın analitik fonksiyonları olup aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$F^\pm(\rho, \alpha) = \pm \int_0^{\pm\infty} u_1(\rho, z) e^{i\alpha z} dz \quad (5c)$$

(5a) denklemindeki  $A(\alpha)$  spektral katsayı olup aşağıdaki sınır ve süreklilik koşulları kullanılarak belirlenecektir.

$$u_1(b, z) + b \frac{\partial u_1(b, z)}{\partial \rho} = 0, \quad z < 0, \quad (6a)$$

$$u_3(b, z) + b \frac{\partial u_3(b, z)}{\partial \rho} = 0, \quad z < 0, \quad (6b)$$

$$u_3(a, z) + a \frac{\partial u_3(a, z)}{\partial \rho} = 0, \quad z < 0, \quad (6c)$$

$$(1 + ik\eta) u_2(a, z) + a \frac{\partial u_2(a, z)}{\partial \rho} = 0, \quad z > 0, \quad (6d)$$

$$u_2(b, z) = u_1(b, z), \quad z > 0, \quad (6e)$$

$$\frac{\partial u_2(b, z)}{\partial \rho} = \frac{\partial u_1(b, z)}{\partial \rho}, \quad z > 0, \quad (6f)$$

$$u^i(\rho, 0) + u_3(\rho, 0) = u_2(\rho, 0), \quad \rho \in (a, b), \quad (6g)$$

$$\frac{\partial u^i(\rho, 0)}{\partial z} + \frac{\partial u_3(\rho, 0)}{\partial z} = \frac{\partial u_2(\rho, 0)}{\partial z}, \quad \rho \in (a, b). \quad (6h)$$

(3) ve (6a-h) denklemleri ile verilen karma sınır değer probleminin çözümünü tek olarak elde etmek için aşağıdaki ayrıt ve radyasyon kuşullarının da göz önünde bulundurulması gerekir:

$$u^T(b, z) = \mathcal{O}(|z|^{1/2}), \quad |z| \rightarrow 0 \quad (7a)$$

$$u_1(\rho, z) = \mathcal{O}\left(\frac{e^{ik|\rho|}}{\rho}\right), \quad |\rho| \rightarrow \infty \quad (7b)$$

Şimdi saçılan alan  $u_2(\rho, z)$  nin Helmholtz denklemini sağladığı  $\rho \in (a, b)$  ve  $z > 0$  bölgesini ele alalım. Bu bölgede (3) denkleminin  $z \in (0, \infty)$  aralığında Fourier dönüşümünü alırsak

$$\left( \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left( \rho \frac{d}{d\rho} \right) + K^2(\alpha) - \frac{1}{\rho^2} \right) G^+(\rho, \alpha) = f(\rho) - i\alpha g(\rho) \quad (8a)$$

denklemini elde edilir. Buradaki  $G^+(\rho, \alpha)$   $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$  üst yarım-düzlemde  $\alpha$ 'nın analitik fonksiyonu olup aşağıdaki gibi tanımlıdır:

$$G^+(\rho, \alpha) = \int_0^{\infty} u_2(\rho, z) e^{i\alpha z} dz. \quad (8b)$$

(8a) denkleminde  $f(\rho)$  ve  $g(\rho)$

$$f(\rho) = \frac{\partial}{\partial z} u_2(\rho, 0), \quad g(\rho) = u_2(\rho, 0) \quad (8c)$$

olarak tanımlanmıştır. Sağ yanlı (8a) denkleminin çözümü Green fonksiyonu yöntemi ve (6d) denklemini ile verilen sınır koşulu yardımıyla

$$G^+(\rho, \alpha) = \frac{1}{M(\alpha)} \left[ \frac{J(\alpha)Y_1[K(\alpha)\rho] - Y(\alpha)J_1[K(\alpha)\rho]}{b} P^+(K) + \int_a^b [f(t) - i\alpha g(t)] Q(t, \rho, \alpha) dt \right] \quad (9a)$$

olarak bulunur. Burada

$$Q(t, \rho, \alpha) = \frac{\pi}{2} \begin{cases} \frac{K(\alpha)[J(\alpha)Y_1[K(\alpha)\rho] - Y(\alpha)J_1[K(\alpha)\rho]]}{[J_0[K(\alpha)b]Y_1[K(\alpha)t] - J_1[K(\alpha)t]Y_0[K(\alpha)b]], t < \rho} \\ \frac{K(\alpha)[J(\alpha)Y_1[K(\alpha)t] - Y(\alpha)J_1[K(\alpha)t]]}{[J_0[K(\alpha)b]Y_1[K(\alpha)\rho] - J_1[K(\alpha)\rho]Y_0[K(\alpha)b]], t > \rho} \end{cases}, \quad (9b)$$

$$J(\alpha) = ik\eta J_1[K(\alpha)a] + K(\alpha)J_0[K(\alpha)a], \quad (9c)$$

$$Y(\alpha) = ik\eta Y_1[K(\alpha)a] + K(\alpha)Y_0[K(\alpha)a], \quad (9d)$$

$$M(\alpha) = K(\alpha)[J(\alpha)Y_0[K(\alpha)b] - Y(\alpha)J_0[K(\alpha)b]] \quad (9e)$$

ve

$$P^+(\alpha) = G^+(b, \alpha) + bG^+(b, \alpha) = F^+(b, \alpha) + bF^+(b, \alpha) \quad (9f)$$

konmuştur. (9a) eşitliğinin sol tarafı  $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$  üst yarı-düzlemde regüler olduğundan sağ tarafı da ilgili bölgede regüler olmalıdır. Fakat (9a) eşitliğinin sağ tarafının regülerliği kompleks  $\alpha$ -düzleminin üst ( $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$ ) yarılarında oluşan basit kutupların, yani  $\alpha = \alpha_m$  noktalarının varlığı sebebiyle bozulabilir. Bu kutuplar (9e) denkleminde tanımlanan  $M(\alpha)$  fonksiyonunun basit sıfırlarını oluşturmaktadırlar ve

$$M(\alpha_m) = 0, \quad \Im m(\alpha_m) > \Im m(k), \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

ile ifade edilirler. Bu kutuplar rezidülerinin sıfır olmasını zorlamak suretiyle kaldırılabilirler:

$$P^+(\alpha_m) = -\frac{\pi}{2} K_m b [f_m - i\alpha_m g_m] \Delta_m, \quad (11a)$$

Burada

$$\begin{bmatrix} f_m \\ g_m \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_m} \int_a^b \begin{bmatrix} f(\rho) \\ g(\rho) \end{bmatrix} [J_0(K_m b)Y_1(K_m \rho) - J_1(K_m \rho)Y_0(K_m b)] \rho d\rho, \quad (11b)$$

$$\Delta_m = \frac{b^2}{2} \left( \frac{2}{\pi K_m b} \right)^2 - \frac{a^2}{2} \left[ 1 + \frac{ik\eta}{K_m^2 a} (2 + ik\eta a) \right] \tilde{L}_1^2, \quad (11c)$$

ve

$$\tilde{L}_1 = J_0(K_m b)Y_1(K_m a) - J_1(K_m a)Y_0(K_m b) \quad (11d)$$

dır. Şimdi Wiener-Hopf denklemini elde etmek için (6a) sınır koşulunun Fourier dönüşümünü alırsak

$$F^-(b, \alpha) + bF^-(b, \alpha) = 0 \quad (12a)$$

elde ederiz. Burada  $(\bullet)$ ,  $\rho$  ya göre alınan türevi göstermektedir. (5a) denkleminde (12a) sınır koşulu uygulandığında

$$A(\alpha) = \frac{P^+(\alpha)}{bK(\alpha)H_0^{(1)}[K(\alpha)b]} \quad (12b)$$

bulunur. Burada  $P^+(\alpha)$  (9f) ile tanımlanmıştır. (12b) ifadesini (5a) denkleminde yerine

koyarsak

$$F^-(\rho, \alpha) + F^+(\rho, \alpha) = \frac{P^+(\alpha)}{bK(\alpha)H_0^{(1)}[K(\alpha)b]} H_1^{(1)}[K(\alpha)\rho] \quad (12c)$$

yazılır. (12c) ifadesi (6e,f) denklemleri ile verilen süreklilik koşullarıyla birlikte düşünüldüğünde

$$\frac{1}{N(\alpha)M(\alpha)} P^+(\alpha) - \frac{F^-(b, \alpha)}{ik\eta} = -\frac{1}{M(\alpha)} \int_a^b [f(t) - iag(t)] [J(\alpha)Y_1(Kt) - Y(\alpha)J_1(Kt)] t dt \quad (13a)$$

elde edilir. Burada  $N(\alpha)$

$$N(\alpha) = \frac{H_0^{(1)}(Kb)}{H_1^{(1)}(Kb)M_0(\alpha) + H_0^{(1)}(Kb)M_1(\alpha)} \quad (13b)$$

ve

$$M_j(\alpha) = J(\alpha)Y_j(Kb) - Y(\alpha)J_j(Kb), \quad j = 0, 1 \quad (13c)$$

ile tanımlanmıştır. (11b) denkleminde görünen  $f(\rho)$  ve  $g(\rho)$  fonksiyonları Dini koşulunu sağlayan mutlak integrallenebilir fonksiyonlar olduklarından aşağıdaki gibi tam ortogonal fonksiyonlar kümesi cinsinden seriye açılabilirler[7]:

$$\begin{bmatrix} f(\rho) \\ g(\rho) \end{bmatrix} = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{bmatrix} f_m \\ g_m \end{bmatrix} [J_0(K_m b)Y_1(K_m \rho) - J_1(K_m \rho)Y_0(K_m b)] \quad (14)$$

(14) ifadesini (13a) denkleminde yerine koyup ortaya çıkan integral hesaplandığında  $\text{Im}(-k) < \text{Im}(\alpha) < \text{Im}(k)$  bandında geçerli olan aşağıdaki Wiener-Hopf denklemini elde ederiz:

$$\frac{1}{N(\alpha)M(\alpha)} P^+(\alpha) - \frac{F^-(b, \alpha)}{ik\eta} = -b \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[f_m - i\alpha g_m] [J_m Y_1(K_m b) - Y_m J_1(K_m b)]}{\alpha^2 - \alpha_m^2} \quad (15)$$

(15) ifadesinde  $Jm = J(am)$ ,  $Ym = Y(am)$  ve  $Km = K(am)$  olarak tanımlanmıştır.

### 3. Wiener-Hopf Denkleminin Çözümü

Bu aşamada amacımız (15) denkleminde  $P^+(\alpha)$  fonksiyonunu çözmektir. Bunun için atılacak ilk adım (9e) ve (13b)'de tanımlanan  $M(\alpha)$  ve  $N(\alpha)$  çekirdek fonksiyonlarının (+) ve (-) tipten iki fonksiyonun çarpımı şeklinde aşağıdaki gibi yazmaktır:

$$M(\alpha) = M^+(\alpha)M^-(\alpha) \quad (16a)$$

ve

$$N(\alpha) = N^+(\alpha)N^-(\alpha). \quad (16b)$$

Buradaki  $M^-(\alpha)$ ,  $N^-(\alpha)$  fonksiyonları  $\text{Im}(\alpha) < \text{Im}(k)$  alt yarı-düzlemde,  $M^+(\alpha)$ ,  $N^+(\alpha)$  fonksiyonları da  $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$  üst yarı-düzlemde regüler ve sıfırları olmayan fonksiyonlardır.

$M^+(\alpha)$  ve  $N^+(\alpha)$  fonksiyonlarının açık ifadeleri [8] de açıklanan yöntem uyarınca:

$$M^+(\alpha) = \sqrt{M(0)} \exp \left\{ \frac{i\alpha(b-a)}{\pi} \left[ 1 - C - \ln \left( \frac{|\alpha|(b-a)}{\pi} \right) + i\frac{\pi}{2} \right] \right\} \times \prod_{m=0}^{\infty} \left( 1 + \frac{\alpha}{\alpha_m} \right) \exp \left( \frac{i\alpha(b-a)}{m\pi} \right), \quad (17a)$$

$$N^+(\alpha) = \sqrt{N(\alpha)} \prod_{i=1}^L \left( \frac{\beta_i - \alpha}{\beta_i + \alpha} \right)^{1/2} \times \exp \left\{ \frac{i(b-a)\alpha}{\pi} \ln \left( \frac{2|\alpha|}{k} \right) \right\} \times \exp \left\{ \frac{K(\alpha)(b-a)}{\pi} \ln \left( \frac{\alpha + iK(\alpha)}{k} \right) + \frac{1}{2} i(b-a)K(\alpha) + q(\alpha) \right\}, \quad (17b)$$

$$q(\alpha) = \frac{1}{2} P \int_0^{\infty} K w(w) \ln \left[ \frac{\sqrt{k^2 - w^2} + \alpha}{\sqrt{k^2 - w^2} - \alpha} \right] dw, \quad (17c)$$

$$K w(w) = \frac{(b-a)}{\pi} + \frac{1}{2\pi i} [Bw(w) + Bw(we^{i\pi})], \quad (17d)$$

$$Bw(w) = \frac{bH_1^{(1)}(wb)}{H_0^{(1)}(wb)} + \frac{[H_1^{(1)}(wb) - H_0^{(1)}(wb)] \left[ \begin{matrix} T_{00}(w) & T_{01}(w) \\ T_{10}(w) & T_{11}(w) \end{matrix} \right] \left[ -\frac{ik\eta a}{w} + a \right]}{[H_1^{(1)}(wb) - H_0^{(1)}(wb)] \left[ \begin{matrix} T_{10}(w) & T_{11}(w) \\ T_{10}(w) & T_{11}(w) \end{matrix} \right] \left[ \frac{w}{ik\eta} \right]}, \quad (17e)$$

ve

$$T_{ij}(w) = Y_i(wb)J_j(wa) - Y_j(wa)J_i(wb), \quad i, j = 0, 1 \quad (17f)$$

olarak bulunur. (17a) denklemindeki  $C$  Euler sabiti olup değeri  $C = 0.57721\dots$  dir. (17b) denklemindeki  $\pm \beta_i$  ise  $N(\alpha)$  fonksiyonunun kökleridir. Ayrıca (17c) denkleminde  $P$  harfi ile tekil integralin Cauchy esas değerinin gözönüne alındığı belirtilmiştir.  $M^{\pm}(\alpha)$  and  $N^{\pm}(\alpha)$  fonksiyonlarının  $|\alpha| \rightarrow \infty$  için geçerli asimptotik ifadelerinin aşağıdaki gibi olduğu kolayca gösterilebilir:

$$M^{\pm}(\alpha) = |\alpha|^{1/2} e^{(b-a)|\alpha|}, \quad N^{\pm}(\alpha) = e^{-(b-a)|\alpha|}. \quad (17g)$$

Bu aşamada (15) denklemini  $M^-(\alpha)N^-(\alpha)$  ile çarparsak

$$\frac{P^+(\alpha)}{N^+(\alpha)M^+(\alpha)} - M^-(\alpha)N^-(\alpha) \frac{F^-(b, \alpha)}{ik\eta} = -bM^-(\alpha)N^-(\alpha) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[f_m - i\alpha g_m] [J_m Y_1(K_m b) - Y_m J_1(K_m b)]}{\alpha^2 - \alpha_m^2} \quad (18)$$

elde edilir. (18) ifadesinin sol tarafındaki ilk iki terim kompleks  $\alpha$ -düzleminin sırasıyla üst ( $\text{Im}(\alpha) > \text{Im}(-k)$ ) ve alt ( $\text{Im}(\alpha) < \text{Im}(k)$ ) yarılarında regüler fonksiyonlardır. Aynı denklemin

sağ tarafındaki terimin her iki yarım düzlemde de tekillikleri vardır. Bu durumda, önce sağ yandaki bu terime Wiener-Hopf ayrıştırması ve sonrasında (18) ifadesine Liouville teoreminin uygulanmasıyla

$$\frac{P^+(\alpha)}{N^+(\alpha)M^+(\alpha)} = b \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[f_m + i\alpha_m g_m][J_n Y_1(K_n b) - Y_n J_1(K_n b)] N^+(\alpha_m) M^+(\alpha_m)}{2\alpha_m (\alpha + \alpha_m)} \quad (19)$$

elde edilir.

#### 4. Açılım Katsayılarının Hesabı

$\rho \in (a, b)$ ,  $z < 0$  bölgesinde tanımlı olan  $u_3(\rho, z)$  fonksiyonunu dalga kılavuzu modları cinsinden

$$u_3(\rho, z) = c_0 \frac{e^{-ikz}}{\rho} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n [J_1(\xi_n \rho) Y_0(\xi_n b) - J_0(\xi_n b) Y_1(\xi_n \rho)] e^{-i\xi_n z} \quad (20a)$$

olarak yazabiliriz. Burada  $\xi_n$ 'ler aşağıdaki denklemin kökleri olup,

$$J_0(\xi_n b) Y_0(\xi_n a) - J_0(\xi_n a) Y_0(\xi_n b) = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (20b)$$

$\beta_n$ 'ler ise dalga kılavuzu modlarına ilişkin yayılma sabitleridir,

$$\beta_n = \sqrt{k^2 - \xi_n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (20c)$$

ve

$$\xi_0 = 0 \implies \beta_0 = k. \quad (20d)$$

(20a) denkleminin sağ yanındaki ilk terim kılavuz içerisinde gelen dalgaya ilişkin yansıyan alan ifadesidir. (6g,h) ile verilen süreklilik denklemleri (8c), (14) ve (20a) ile birlikte değerlendirildiğinde:

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{\infty} g_m [J_0(K_m b) Y_1(K_m \rho) - J_1(K_m \rho) Y_0(K_m b)] \\ = \frac{1}{\rho} + \frac{c_0}{\rho} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n [J_1(\xi_n \rho) Y_0(\xi_n b) - J_0(\xi_n b) Y_1(\xi_n \rho)] \end{aligned} \quad (21a)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{\infty} f_m [J_0(K_m b) Y_1(K_m \rho) - J_1(K_m \rho) Y_0(K_m b)] \\ = \frac{ik}{\rho} - ik \frac{c_0}{\rho} - \sum_{n=1}^{\infty} i\beta_n c_n [J_1(\xi_n \rho) Y_0(\xi_n b) - J_0(\xi_n b) Y_1(\xi_n \rho)] \end{aligned} \quad (21b)$$

elde edilir. (21a,b) denklemlerinin her iki yanını  $[J_0(K_\rho b) Y_1(K_\rho \rho) - J_1(K_\rho \rho) Y_0(K_\rho b)]$  ifadesi ile çarpılıp ilgili denklemler  $\rho$  ya göre  $\rho = a$  dan  $\rho = b$  ye integrali alırsa

$$\Delta_m g_m = (1 + c_0) I_m^{(1)} + I_m^{(2)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{\alpha_n^2 - \beta_n^2} I_n^{(3)}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (22a)$$

$$\Delta_m f_m = ik(1 - c_0) I_m^{(1)} - I_m^{(2)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i\beta_n c_n}{\alpha_n^2 - \beta_n^2} I_n^{(3)}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (22b)$$

elde edilir. Burada  $\Delta_m$  (11c,d) ile,  $I_m^{(1)}$ ,  $I_m^{(2)}$  ve  $I_n^{(3)}$  ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$I_m^{(1)} = \int_a^b [J_0(K_m b) Y_1(K_m \rho) - J_1(K_m \rho) Y_0(K_m b)] d\rho, \quad (23a)$$

$$I_m^{(2)} = K_m a [J_0(K_m a) Y_0(K_m b) - J_0(K_m b) Y_0(K_m a)], \quad (23b)$$

$$I_n^{(3)} = J_1(\xi_n a) Y_0(\xi_n b) - J_0(\xi_n b) Y_1(\xi_n a). \quad (23c)$$

(19) denkleminde  $\alpha = \alpha_m$  koyar ve (11a) ile birlikte değerlendirirsek:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi K_m b}{2} [f_m - i\alpha_m g_m] \Delta_m \\ = N^+(\alpha_m) M^+(\alpha_m) b \sum_{n=0}^{\infty} \frac{[f_n + i\alpha_n g_n] N^+(\alpha_n) M^+(\alpha_n)}{2\alpha_n (\alpha_m + \alpha_n)} I_n^{(4)}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (24a)$$

$$I_n^{(4)} = J_n Y_1(K_n b) - Y_n J_1(K_n b), \quad (24b)$$

elde ederiz. Burada  $J_n = J(\alpha_n)$  ve  $Y_n = Y(\alpha_n)$  olarak tanımlanmıştır. (22a,b) ve (24a) denklemleri  $f_m$ ,  $g_m$  ve  $c_n$  ( $m = 0, 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots$ ) bilinmeyen sabitlerini belirlemeye yarayan sonsuz lineer cebirsel denklemler sistemini verir. Bu sonsuz denklemler sistemi açılım serilerinin bir sayıda kesilmesiyle yaklaşık olarak çözülür.

#### 5. Saçılan Alanın Hesabı ve Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde  $\rho \in (a, b)$ ,  $z < 0$  bölgesinde dominant moda ilişkin yansıma katsayısı ve  $\rho > b$  bölgesindeki ışılan alan hesaplanarak kılavuz boyutları ve empedans gibi parametrelerin saçılan alana etkisi grafikler ile gösterilecektir. Öncelikle  $\rho > b$  bölgesinde  $F(\rho, \alpha)$  fonksiyonunun ters Fourier dönüşümü alınarak ışılan alanı elde edilir. (12c) ifadesinden

$$u_1(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathcal{C}} \frac{P^+(\alpha) H_0^{(1)}[K(\alpha)\rho] e^{-i\alpha z} d\alpha}{bK(\alpha) H_0^{(1)}[K(\alpha)b]} \quad (25)$$

bulunur. Burada  $L \text{Im}(-k) < \text{Im}(\alpha) < \text{Im}(k)$  şeridinde uzanan ve reel  $\alpha$ -eksenine paralel olan bir doğrudur.  $H_p^{(1)}[K(\alpha)\rho]$  fonksiyonunun  $k\rho \rightarrow \infty$  için asimptotik ifadesi

$$H_p^{(1)}[K(\alpha)\rho] = \sqrt{\frac{2}{\pi K(\alpha)\rho}} e^{i(K(\alpha)\rho - p\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}} \quad (26)$$

kullanılarak (25) denklemini yeniden düzenlenir ve integral endik iniş çizgisi yöntemi ile hesaplanır

$$u_1(r, \theta) = H(\theta) \frac{e^{ikr}}{kr}, \quad kr \gg 1 \quad (27)$$

$$H(\theta) = -\frac{1}{\pi b \sin \theta} \frac{P^+(-k \cos \theta)}{H_0^{(1)}[kb \sin \theta]} \quad (28)$$

elde edilir. Burada  $r$  ve  $\theta$  küresel koordinatları göstermektedir.

Son olarak (20a) ile verilen  $u_3(\rho, z)$  fonksiyonu,  $\rho \in (a, b)$ ,  $z < 0$  bölgesinde saçılan alan ifadesini göstermektedir. Bu ifadenin ilk terimi kılavuz içerisinde yayılan dominant TEM moduna ilişkin yansıyan alan terimidir ve  $c_0$  katsayısı yansıyan alanın genliğini göstermektedir.

Aşağıdaki grafikler eşeksenli dalga kılavuzunun iç ve dış iletkenin yarıçapları ve iç iletkenin dışa uzayan parçasının yüzey empedans değerinin yansıyan ve rasyasyon alanına etkilerini göstermektedir.

Şekil-2'de yansıyan alanın genliğinin,  $|c_0|$ , dalga sayısı ile değişim grafiği,  $b = 1.4$  ve  $\eta = 0.8i$  sabit alınıp  $a$ 'nın üç farklı değeri için verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi belli bir frekanstan önce gelen dalganın tamamı geriye yansırken ( $|c_0| = 1$ ), kesim frekansını aştıktan sonra yansıma katsayısı hızla azalmaya başlamaktadır.  $a$ 'nın değeri arttıkça kesim frekans değerinin de arttığı görülmektedir.

Şekil-3'te yansıyan alanın genliğinin,  $|c_0|$ , dalga sayısı ile değişim grafiği  $a = 0.7$  ve  $\eta = 0.8i$  sabit alınıp  $b$ 'nin üç farklı değeri için verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi belli bir frekanstan önce gelen dalganın tamamı geriye yansırken ( $|c_0| = 1$ ), kesim frekansını aştıktan sonra yansıma katsayısı hızla azalmaya başlamaktadır.  $b$ 'nin değeri ile kesim frekansının değerinin ters orantılı olduğu görülmektedir.

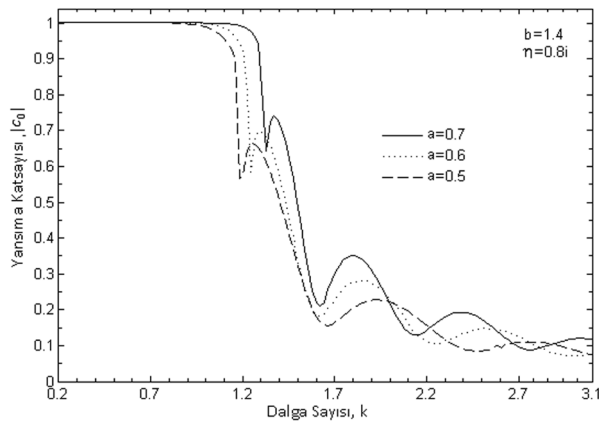


Şekil-4'te ise üç farklı  $\eta$  (yüzey empedansı) değeri için yansıyan alanın genliğinin,  $|c_0|$ , dalga sayısı ile değişim grafiği verilmiştir. Hesaplamalarda  $b = 1.7$  ve  $a = 0.7$  sabit alınmıştır. Grafikten görüldüğü gibi belli bir frekandan önce gelen dalga'nın tamamı geriye yansırken ( $|c_0| = 1$ ), kesim frekansını aştıktan sonra yansıma katsayısı hızla azalmaya başlamaktadır.  $\eta$ 'nin değeri arttıkça kesim frekans değerinin de arttığı görülmektedir.

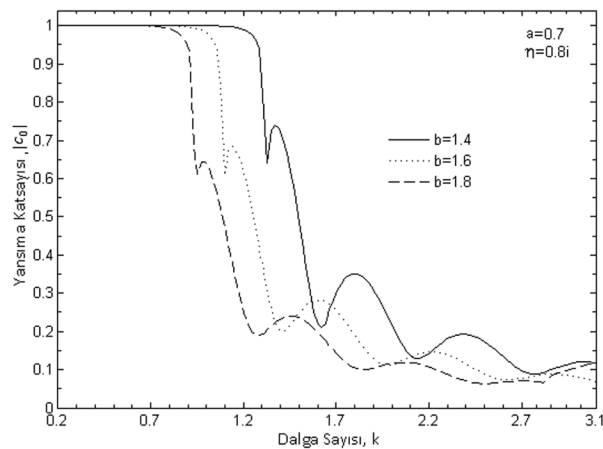
Şekil-5'te ışılan alanın (28) denklemi ile elde edilen asimptotik ifadesinin,  $20 \log |H(\theta)|$ , gözlem açısıyla değişimi üç farklı  $a$  (iç yarıçap) değeri için görülmektedir. Hesaplamalarda  $b = 1.4$ ,  $k = 2.0$  ve  $\eta = 1.0i$  sabit alınmıştır.  $a$ 'nın değeri arttıkça ışılan alanın genlik değerinin tüm gözlem açılarında azaldığı görülmüştür.

Şekil-6'da ise üç farklı  $b$  (dış yarıçap) değeri için ışılan alan genliğinin,  $20 \log |H(\theta)|$ , gözlem açısıyla değişim grafiği görülmektedir. Hesaplamalarda  $a = 0.7$ ,  $k = 2.0$  ve  $\eta = 1.0i$  sabit alınmıştır.  $b$ 'nin değeri arttıkça ışılan alanın değerinin gözlem açısı  $\theta \in (0^\circ - 60^\circ)$  bölgesinde artarken  $\theta \in (60^\circ - 180^\circ)$  aralığında azaldığı görülmüştür.

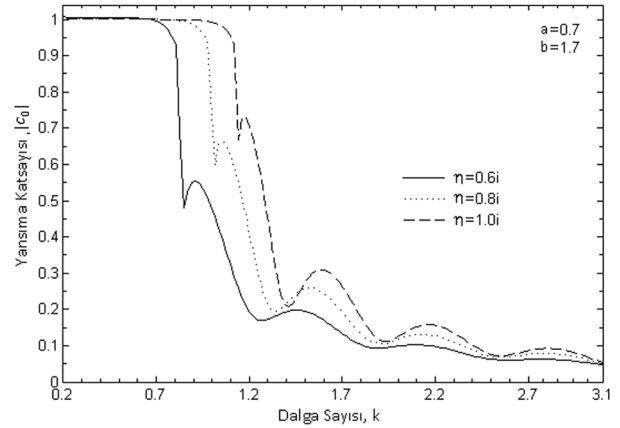
Şekil-7'de üç farklı  $\eta$  (yüzey empedansı) değeri için ışılan alan genliğinin,  $|H(\theta)|$ , gözlem açısıyla değişim grafiği kutupsal koordinat sisteminde verilmiştir. Hesaplamalarda  $a = 0.7$ ,  $b = 1.6$  ve  $k = 3.0$  sabit alınmıştır.  $\eta$ 'nin değeri arttıkça ışılan alanın maksimum olduğu açı değeri artarken genliğinin değerinin ise azaldığı gözlenmiştir.



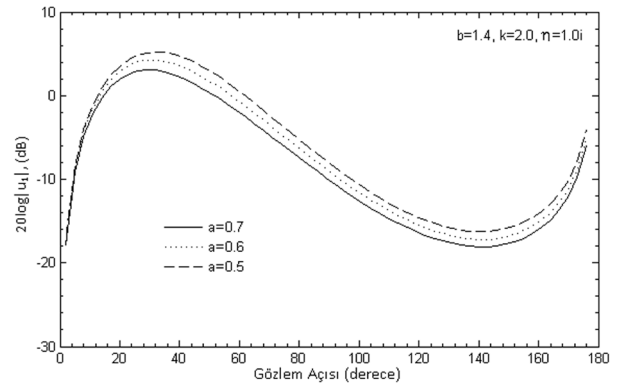
Şekil-2. İç iletkenin yarıçapının ( $a$ ), yansıma katsayısı  $|c_0|$ 'a etkisi



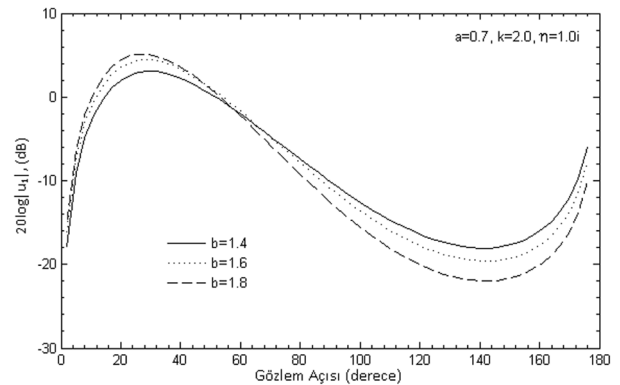
Şekil-3. Dış iletkenin yarıçapının ( $b$ ), yansıma katsayısı  $|c_0|$ 'a etkisi



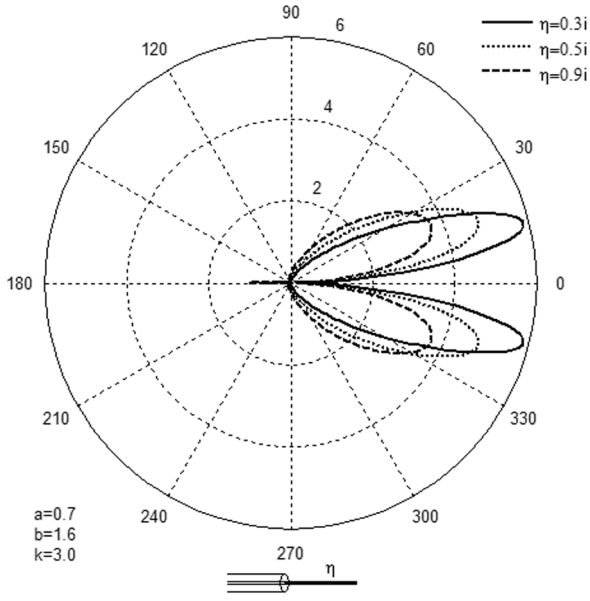
Şekil-4. Empedansın ( $\eta$ ), yansıma katsayısı  $|c_0|$ 'a etkisi



Şekil-5. İç iletkenin yarıçapının ( $a$ ), Radyasyon alanına etkisi



Şekil 6. Dış iletkenin yarıçapının ( $b$ ), Radyasyon alanına etkisi



Şekil 7. Empedansın ( $\eta$ ), Radyasyon alana etkisi.

## 6. Kaynaklar

- [1] Marcuvitz, N.: 'Waveguide Handbook' Sect. 4.15, New York, McGraw-Hill, 1951,
- [2] Papadopoulos, V.M.: 'Wave propagation in a coaxial system', Q. Appl. Math., 17, pp. 423-436, 1960
- [3] Wu, T.T.: 'Input admittance of infinitely long dipole antennas driven from coaxial lines', J. Math. Phys. 3, pp. 1298-1301, 1962
- [4] Andersen, J.B.: 'Metallic and Dielectric Antennas' Chap.2. Polyteknisk Forlag, Lyngby, Denmark, 1970
- [5] Bird, T.S.: 'TE<sub>11</sub> mode excitation of flanged circular coaxial waveguides with an extended centre conductor', IEEE Trans. Antennas and Propagat., AP 35, pp.1358 - 1366, 1987
- [6] Bird, T.S.: 'Exact solution of open-ended coaxial waveguide with centre conductor of infinite extent and applications', IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. H, No. 5, 1987
- [7] Sneddon, I. H., 'The Use of Integral Transforms', Mc Graw Hill, New York, 1972
- [8] Mitra, R., and S.W. Lee, 'Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves', McMillan, New York, 1971

## Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi

### Modeling and Investigation of Fault Ride Through Capability of Variable Speed Wind Turbines

Erkan Koç<sup>1</sup>, A. Nezh Güven<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TÜBİTAK-UZAY Enstitüsü  
erkan.koc@uzay.tubitak.gov.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
guven@metu.edu.tr

#### Özet

Son yıllarda rüzgar enerjisi sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve sağlanan devlet destekleri, rüzgar enerjisinin elektrik üretim profilindeki payını artırmaktadır. Bu artan pay sebebiyle iletim/dağıtım sistem operatörleri, şebeke yönetmeliklerini tekrar gözden geçirmek zorunda kalmışlardır. Ayrıca, sistemin kararlı işletimini sağlamak için, oluşan arızalarda rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlı kalması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışma, rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesine entegrasyonu çalışmalarına katkı sağlamak için değişken hızlı rüzgar türbinlerinin modellenmesini ve sistemde rüzgar santrallerine yakın bir yerde oluşabilecek bir arıza süresince ve arızanın temizlemesi sonrasında türbinlerin sisteme bağlı kalabilme (SBK) yeteneklerinin irdelenmesini kapsamaktadır.

#### Abstract

Recent technological improvements on wind energy systems and the incentives provided by the governments have increased the penetration level of wind power into the grid. This phenomenon force the transmission and distribution system operators to revise their grid codes. Moreover, these developments force the wind turbines stay connected to the grid during the disturbances in order to enhance system stability. This work is devoted to the modeling of variable speed wind turbines and the investigation of fault-ride through (FRT) capability of wind turbines for grid integration studies.

#### 1. Giriş

Fosil kaynaklı yakıtların fiyatlarının arttığı, ulaşılabilirliklerinin azaldığı ve daha önemlisi iklim değişiklikleri geri dönülmez bir noktaya ulaştığı için, yenilenebilir enerji sistemleri gittikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (biokütle,

güneş, jeotermal, rüzgar, küçük hidrolar) arasında öne çıkan seçeneklerden birisi de rüzgar enerjisidir. Son yıllarda rüzgar enerji sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve verilen devlet destekleri, rüzgar enerjisinin güç sistemi içindeki payını hızla arttırmaktadır. Rüzgar gücündeki bu hızlı büyüme, rüzgar enerjisinin güç sistemine dahil edilmesi ile ilgili olarak birçok çalışmayı ve araştırma konusunu da beraberinde getirmiştir.

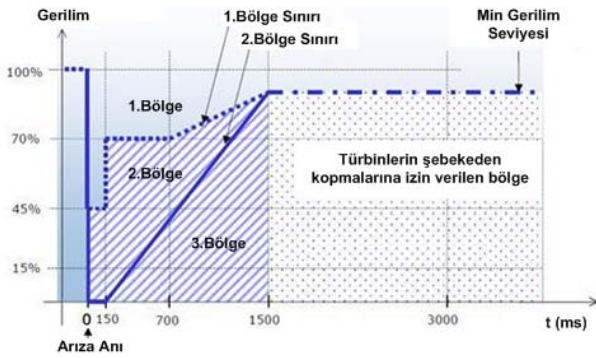
Rüzgar enerjisi yatırımlarındaki ilerleme, güç sistemi işletme kriterlerinin gözden geçirilmesini ve değiştirilmesini zorunlu kılmaya başlamıştır. Bu yüzden rüzgar gücünün getirileri ve gelecekteki kapasite artışı, ancak rüzgar çiftliklerinin, sistemin kararlılığı ve güvenilirliği için güç sistemi operatörlerince (GSO) tanımlanan düzenlemelere, şebeke yönetmeliklerine göre işletilmesiyle ulaşılabilir. Rüzgar gücünden elektrik üretimindeki bu hızlı büyümeden önce, rüzgar türbinleri orta ve alçak gerilim dağıtım sistemlerinde dağıtık enerji kaynağı olarak görülüyorlardı. Bu eski türbin teknolojileri, güç sistemindeki gerilim ve frekans değişikliklerine tepki verecek yeterliliğe sahip değildi [1]. Geçmişte, bir arıza durumundaki genel uygulama, rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısının kesilmesi ve arıza durumu ortadan kalkınca tekrar şebekeye bağlanmasıydı. Ancak, son yıllarda güç sistemi içinde rüzgar gücü payının yükselmesi, arıza anında sistem kararlılığının bozulmaması için, arıza süresince ve arıza sonrasında rüzgar türbinlerinin şebekeden kopmamasını zorunlu hale getirmiştir.

Bu çalışmada önce, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin nasıl modelleneceği anlatılmıştır. Daha sonra, rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlanabilmesi için gerekli şebeke yönetmeliği gereksinimleri irdelenmiştir. Son olarak, Bandırma çevresinde bulunan iletim sisteminin 4 baralı eşdeğer modeli oluşturularak, bu modelin üzerinde oluşturulan 3-faz kısa devre arızalarında, değişken hızlı rüzgar türbinlerinin arıza ve arıza sonrasındaki tepkileri incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



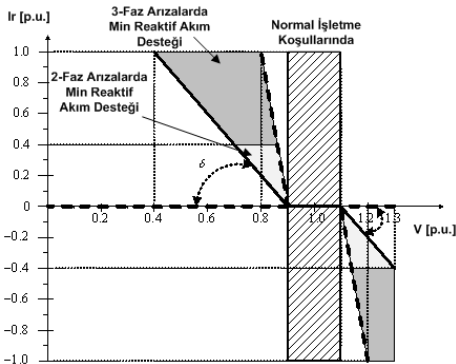
durum, sistemde kararsızlığa hatta tüm sistemin oturmasına bile sebep olabilir. Bu sorunların oluşmaması için şebeke yönetmelikleri, çok ciddi sistem arızalarında bile rüzgar santrallerinin sistemden bir müddet kopmamasını ve gerilimin hızla toparlanması için sisteme reaktif güç desteği vermesini bekler. Ayrıca arıza temizlendikten hemen sonra, aktif gücünü belli bir artış hızıyla arttırması beklenir. Şekil 3, rüzgar santrallerinin Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) arıza süresince ve arıza sonrasında vermeleri gereken tepkileri belirlemektedir. Şekil 3'te tanımlanan bölgeler şu şekilde açıklanabilir:

- Arıza anında ve arıza sonrasında, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümü 1. bölgede kaldığı süre boyunca, rüzgar santrallerinin şebekeye bağlı kalabilmesi gerekmektedir.
- 2. bölgede rüzgar santrallerinin iki farklı şekilde tepki vermesine izin verilir. Birinci durumda, rüzgar santrali arıza ve arıza sonrasında 1. bölgede olduğu gibi şebekeye bağlı kalır. İkinci durumda ise, eğer arıza anında rüzgar türbini kararsız hale gelirse, GSO ile yapılan anlaşmayla santralin kısa süreli şebekeden ayrılmasına izin verilebilir.
- 3. bölgede, rüzgar santralının her durumda sistemden kısa süreli ayrılmasına izin verilir. Eğer koruma sistemleri devreye girerse santral şebekeden tamamen ayrılabilir.



Şekil 3: Rüzgar Türbinlerinin Arıza ve Arıza Sonrasında Sağlaması Gereken Tepki

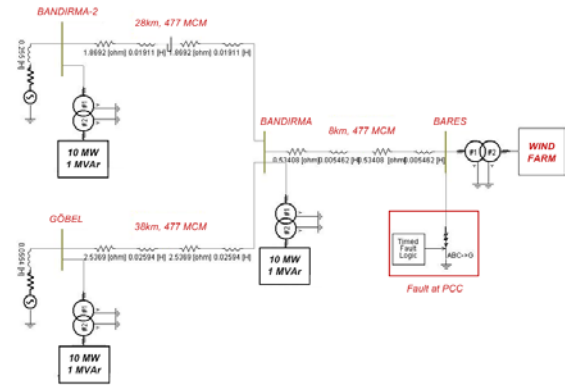
OBN'nda gerçekleşen arıza süresince ve arıza sonrasında, OBN'nın geriliminde meydana gelen düşümlerde yada yükselmelerde, rüzgar türbinlerinin vermeleri gereken reaktif akım desteği Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4: Gerilim Dalganmalarında Rüzgar Türbinlerinin Vermesi Gereken Reaktif Akım Tepkisi

#### 4. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin SBK Yeteneklerinin Karşılaştırılması

2. bölümde özetlenen modelleme yöntemleri kullanılarak, 15 adet 2 MW gücünde türbinlerin bulunduğu bir rüzgar santrali modellerinde kolaylık sağlaması açısından 30 MW gücünde tek bir türbin olarak PSCAD/EMTDC güç sistemleri analiz programında hem ÇBAG hemde SMSG tipi rüzgar türbinleri için modellenmiştir. Bu modeller Şekil 5'te gösterilen Bandırma çevresinde bulunan 154 kV iletim sisteminin 4 baralı eşdeğer sistem modeline entegre edilerek OBN'nda dengeli 3 faz arızalar oluşturularak SBK yetenekleri karşılaştırılmıştır.



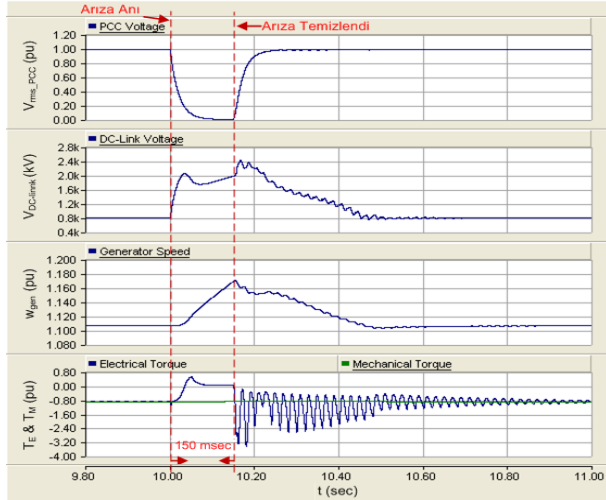
Şekil 5: Benzetimlerin Yapıldığı Yüksek Gerilim Şebeke Modeli

##### 4.1. ÇBAG Tipi Rüzgar Türbinlerinin SBK Yetenekleri

Şekil 5'te gösterilen şebeke modelinde, Bares barasında oluşturulan 3-faz arızalar sonrasında, eğer ÇBAG tipli rüzgar türbini SBK yeteneğine sahip değilse, Şekil 6'da görüldüğü gibi DA-link gerilimi ve generatör hızı kontrolsüz bir şekilde istenilmeyen noktalara kadar çıkabilir. Arıza yüzünden düşen generatörün terminal gerilimi, stator ve rotor akı değerlerinin de düşmesine sebep olur. Bu ise Şekil 6'da görüldüğü gibi generatörün elektromanyetik torkunun ve aktif gücünün düşmesine neden olur. Generatörde değişen bu akı ve gerilim değerleri stator ve rotor sargılarından yüksek anlık akımların geçmesine neden olur. Oluşan bu yüksek akımları önlemek için rotor çevirgeç kontrol mekanizması rotor gerilimini ve dolayısıyla rotordan DA-linke olan güç akışını arttırır. Diğer taraftan şebeke tarafındaki çevirgeç düşük stator gerilimi yüzünden bu gücü şebekeye aktaramaz ve DA-link kapasitörü dolmaya başlar. Bu, DA-link geriliminin, sınır değer olan anma geriliminin %25 fazlasını Şekil 6'daki gibi geçmesine sebep olur. Sonuç olarak rotor akımı ve DA-link gerilimi, çevirgeçteki güç elektroniği devrelerine ya da DA-link kapasitörüne zarar verebilecek çok yüksek anlık değerlere ulaşabilirler.

Bu problemleri gidermek için, crowbar, kanat açısı kontrol sistemi ve şebeke tarafı çevirgecini içine alan üçlü bir kontrol mekanizması uygulanmıştır [9]. Crowbar metodu ile rotor akımının yüksek olduğu veya DA-link geriliminin sınır değeri aştığı durumlarda, generatörün rotoru güç elektroniği anahtarları ile harici dirençler üzerinden kısa devre edilir. Bu yöntem, çevirgeç sistemini koruyup türbinin şebekeye bağlı

kalmasını desteklemesine rağmen, rotor tarafındaki çevirgeç devreden çıktığı için generatörün kontrol edilebilirliği geçici olarak kaybolur. *Crowbar* sisteminde kullanılan dirençler Şekil 7’de görüldüğü gibi arıza durumunda ÇBAG’nin reaktif güç ihtiyacını azaltarak SBK yeteneğini artırır. Fakat, küçük direnç değerleri arıza anında yüksek akımlara ve geçici tork salınımlarına neden olurken, büyük direnç değerleri, direnç devreden çıkarken aşırı rotor akımlarına ve kısa süreli aktif güç ve tork salınımlarına sebep olur. Be nedenlerle, dirençler seçilirken değerleri çok dikkatli hesaplanmalıdır.

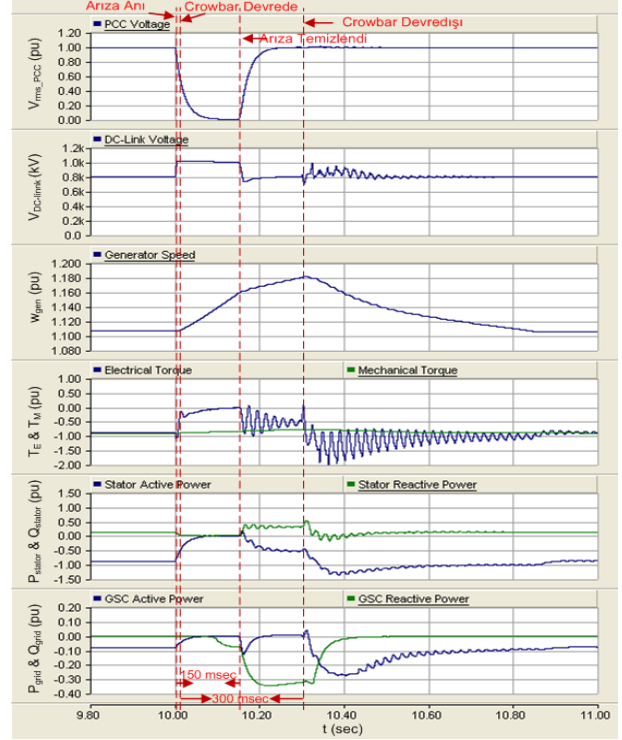


Şekil 6: OBN’nda Yapılan Bir Arızaya Gerekli SBK Yeteneği Olmadan ÇBAG Tipi Rüzgar Türbinlerinin Tepkisi

Generatörün kontrol edilebilirliğinin yeniden kazanılması için *crowbar* korumasının mümkün olduğunca çabuk devreden çıkarılması gerektiğinden, *crowbar* devrede kalma süresi de bu tasarımın bir başka önemli etkenidir. Eğer *crowbar* bağlantısı arıza giderildikten hemen sonra devreden çıkarılırsa, yüksek anlık akımlar yüzünden *crowbar* koruması tekrar tetiklenebilir. Ayrıca rotor tarafındaki kontrol mekanizmasının çevirgeçteki güç elektroniği anahtarlarının yeniden devreye alması için biraz zaman gereklidir. Anlık akımların ve gerilimlerin *crowbar* bağlantısını tekrar tetiklemesini önlemek için, Şekil 7’de görüldüğü gibi *crowbar* koruması arıza giderildikten 150 milisaniye sonra devreden çıkarılır. *Crowbar* korumasına ek olarak şebeke tarafındaki çevirgeç gerilim toparlamasına katkıda bulunmak için şebekeye reaktif güç desteği verir. Fakat şebeke gerilim değeri arıza süresince önemli ölçüde düştüğünden, şebeke tarafındaki çevirgeç yeterince reaktif güç desteği veremez.

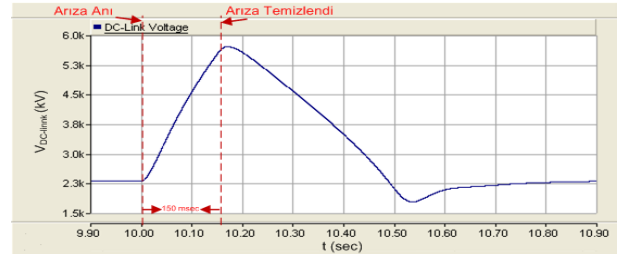
#### 4.2. MSG Tipi Rüzgar Türbinlerinin SBK Yetenekleri

Eğer Şekil 5’te verilen örnek şebekede, 150 milisaniye süren dengeli 3-faz-toprak arızası oluşturulursa ve MSG tipindeki rüzgar türbinlerinde SBK yeteneklerini sağlayacak gerekli ekipman ve kontrol methodu yoksa, çevirgeçler ve kapasitörler için en önemli parametrelerden biri olan DA-link gerilimi Şekil 8’deki gibi değişim gösterir. Oluşturulan bu arıza, OBN geriliminin sıfıra kadar düşmesine neden olduğu için, şebeke tarafındaki çevirgeç şebekeye güç aktaramaz. Diğer taraftan rüzgar türbini güç üretmeye devam ettiğinden, çevirgeç sisteminde güç dengesizliğine yol açar.



Şekil 7: DFIG Tipi Rüzgar Türbinlerinin OBN Noktasında Yapılan Bir Arızaya Tepkisi

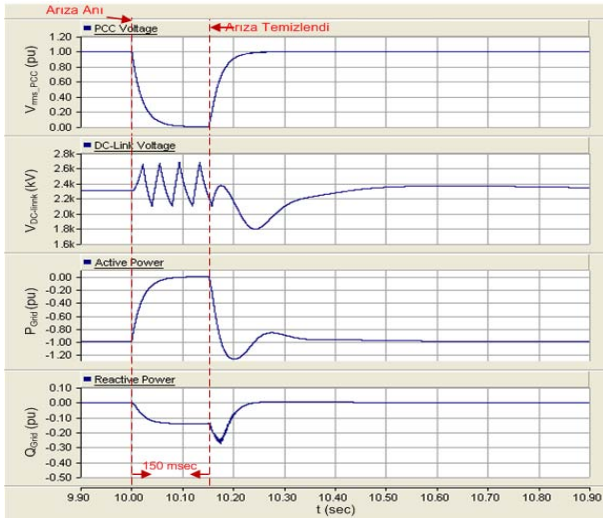
Generatör tarafındaki çevirgeç DA-link’e güç sağlamaya devam ederken, şebeke çevirgeci güç aktaramadığı için, aktarılamayan fazla güç DA-link kapasitörünün fazla yüklenmesine neden olur. Şekil 8’de görüldüğü gibi bu fazla yüklenme, DA-link geriliminin, çevirgeçlerin ve kapasitörün tolere edemeyeceği değerlere kadar çıkmasına sebep olur.



Şekil 8: Gerekli SBK Yeteneği Olmadan DFIG Tipi Türbinlerin DA-link Geriliminin Değişimi

Normal şartlarda, çevirgeçlere ve kapasitöre zarar vermemek için, DA-link geriliminin çevirgeç ve kapasitörün anma değerlerinin  $\pm 25$  bandında tutulması gerekir. Bu sebeple, DA-link kapasitörünün aşırı yüklenmesini önlemek için frenleme direnci kullanılabilir [10]. Bu sistem yarı iletken bir anahtar üzerinden DA-link kapasitörüne paralel bağlı bir dirençten oluşur. Bu yarı iletken direnç, DA-link gerilimi üst kritik değeri aştığında devreye alınır ve DA-link’teki fazla güç, DA-link’in gerilim seviyesi alt kritik değerlere inene kadar direnç üzerinde harcanır. Bu noktada anahtar açılır ve DA-link gerilimi yeniden artmaya başlar. Gerilim yeniden üst kritik değere ulaştığında anahtar tekrar kapanır ve bu durum Şekil 9’da görüldüğü gibi DA-link gerilimi durgun rejime

ulaşana kadar devam eder. DA-link gerilimine ek olarak, şebeke arızası durumunda şebeke tarafındaki çevirgeç Şekil 7’de görüldüğü gibi şebeke gerilimini desteklemek için gerekli reaktif gücü şebekeye sağlayabilir.



Şekil 9: MSG Tipi Rüzgar Türbinlerinin OBN Noktasında Oluşan Bir Arızaya Tepkisi

### 4.3. ÇBAG ve MSG Tipi Türbinlerin Karşılaştırılması

ÇBAG tipi rüzgar türbinlerinde kullanılan çevirgeçler, genel olarak generatörün anma gücünün yaklaşık %30’u kadar güçtedir. MSG tipi türbinlere göre daha düşük güçlü çevirgeç, daha az güç kayıpları ve daha az masraflı rüzgar türbini demektir. Bu avantajlarına rağmen, çevirgeç gücü düşük olmasından dolayı ÇBAG tipi rüzgar türbinlerinin üretebileceği reaktif güç, MSG tipi türbinlere göre daha azdır. Ayrıca, ÇBAG tipi rüzgar türbinlerin şebekeye doğrudan bağlı olmasından dolayı, şebeke etkilerinin generatör, çevirgeç ve türbin sistemi üzerinde görülmesidir. Bu sebepten dolayı, generatör hız ve tork değerlerinde oluşan sınımlar şebeke gerilimine de yansır.

MSG tipi türbinlerde çevirgeçler, generatör ve türbini şebekeden ayırdıkları için şebeke arızalarından daha az etkilenirler. Bu türbinler, türbin anma gücünde reaktif güç üretebildikleri ve aktif güçlerini belli bir artış hızıyla arttırabildikleri için şebeke yönetmeliğindeki gereklilikleri daha rahat sağlayabilirler. Bunun yanında, DC baradaki frenleme direncinin fazla enerjiyi harcayabilmesi sayesinde, OBN gerilim seviyesi çok düşük seviyelere inse bile yeterli SBK performansı gösterebilir. Bunlara ek olarak, MSG tipi türbinlerde dişli kutusu kullanılmayabilir, bu durum kurulum ve bakım maliyetlerini düşüren başka bir avantajdır.

## 5. Sonuçlar

Yazılı kaynaklardaki genel değerlerden alınan parametreler kullanılarak oluşturulan PSCAD modellerinde, OBN için üç faz kısa devre hatası benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarından şu sonuçlar çıkarılmıştır:

- ÇBAG tipi rüzgar türbinlerinin çevirgeç gücü düşük olduğundan, şebeke arızası boyunca reaktif güç üretimleri MSG tipi türbinlere göre daha azdır.

- ÇBAG tipi rüzgar türbinlerinde stator şebekeye doğrudan bağlı olduğu için türbin ve generatör şebeke arızalarından kolayca etkilenir; tork, güç, generatör hızı ve gerilimi MSG tipi rüzgar türbinine göre daha fazla salınır.
- ÇBAG tipi rüzgar türbinlerinde çevirgeç koruması için kullanılan *crowbar* koruması devreye girdiğinde generatör reaktif güç üretemez, tam tersine mıknatıslanma devresi için şebekeden reaktif güç çeker. Bu durum gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkiler.
- MSG tipi rüzgar türbinlerinde, çevirgeçler generatör ve türbini şebekeden izole ettiği için hem generatör hem de türbin, ÇBAG sistemlerine kıyasla, şebeke arızalarından daha az etkilenir.
- MSG tipi rüzgar türbinleri daha esnek kontrol sistemlerine sahip olduğu için, arıza sonrasında durağan durumuna daha çabuk ulaşır.

Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, MSG tipi rüzgar türbinleri, arıza esnasında ve sonrasında sistemin toparlanmasına ÇBAG tipi rüzgar türbinlerine göre daha çok yardımcı olur.

## 6. Kaynaklar

- [1] T. Ackermann, Ed., “Wind Power in Power Systems”, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] T. Sun, “Power Quality of Grid-Connected Wind Turbines with DFIG and Their Interaction with the Grid”, Ph.D. Tezi, Aalborg University, Danimarka, 2004.
- [3] M.G. Simoes ve F.A. Farret, “Alternative Energy Systems; Design and Analysis with Induction Generator”, Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [4] S.Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, England: John Wiley & Sons, 1998.
- [5] A. D. Hansen ve G. Michalke, “Modelling and Control of Variable speed Multi-pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine”, Wind Energy Wiley Interscience, pp. 537-554, Mayıs 2008.
- [6] S. Achilles ve M. Poller, “Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms”, 4th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind-Farms, Billund, Danimarka, 2003.
- [7] M. Tsili ve S. Papathanassiou, “A review of grid code technical requirements for wind farms”, IET Renewable Power Generation, Vol. 3, Iss. 3, pp. 308-332, 2009.
- [8] EWEA, “Generic Grid Code Format for Wind Power Plants”, The European Wind Energy Association EWEA, Brüksel, Belçika, Kasım 2009.
- [9] M. De Alegria, J.L Villate, J. Andreu, I. Gabiola ve P. Ibanez, “Grid Connection of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines: A Survey”, European Wind Energy Conference, Londra, UK, 2004.
- [10] J.F Conroy ve R.Watson, “Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator”, IET Renewable Power Generation, Vol. 1, No. 3, pp. 182-189, Eylül 2007.
- [11] E. Koç ve A. Nezih Güven, “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi”, ELECO’2010, No.1563, Aralık 2010.

**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 Odasına 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://bilimseldergi.emo.org.tr/index.php> 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, sağ = 2 cm  
diğer sayfalar için  
üst = 2,5 cm, alt = 3,7 cm, sol = 2 cm, sağ = 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 Derginin yayın kurulunca yürütülür.