

ANTEN TABANLI GİRİŞİM BASTIRMA YÖNTEMLERİ

ANTENNA BASED INTERFERENCE SUPPRESSION METHODS

ALPER OCAK

Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021

ÖZET

ANTEN TABANLI GİRİŞİM BASTIRMA YÖNTEMLERİ

Alper OCAK

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Aralık 2021, 94 sayfa

Elektromanyetik dalga haberleşmesinin kullanıldığı ilk günden beri elektromanyetik girişim problemleri görülmektedir. Elektromanyetik girişim sonucunda girişime uğrayan sistemin performansının düşmesi, hedef sinyalin alınamaması, hedef sinyalin başka sinyaller ile karışarak hatalı bilgiye veya bilgi kaybına yol açması, bu etkiler ile de girişime maruz kalan sistemin kullanılamaz/çalışamaz duruma gelmesi gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. Bu girişim problemleri, dış elektromanyetik dalga kaynaklarından kaynaklanabildiği gibi, sistemin alma alt sisteminin kendi gönderme alt sisteminden etkilenmesi ile de ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada, elektromanyetik girişim problemleri irdelenmiş ve üç tür girişim problemi için girişim bastırma yöntemleri önerilmiştir. İstenen sinyal yönünün bilindiği uydu haberleşme sistemlerinde elektromanyetik girişim bastırma için, hedef sinyal yönünü girdi olarak işleyebilen ve hedef sinyal yönünde maksimum kazanç ve tespit edilen girişim sinyali yönünde maksimum bastırma sağlamayı amaçlayan

MVDR algoritmasının kullanılabilirliği ele alınmıştır. Girişim sinyalinin sistemin kendi alt sistemlerinden kaynaklandığı elektromanyetik dahili/öz-girişimin bastırılması için, girişim sinyalinin yönünü girdi olarak işleyebilen ve hedef sinyal yönünde maksimum kazanç ve tespit edilen girişim sinyali yönünde maksimum bastırma sağlamayı amaçlayan LCMV algoritmasının kullanılabilirliği ele alınmıştır. İstlenen sinyalin belirli ve tek bir yönden gelmediği uydu navigasyon sistemlerinde dış kaynaklı elektromanyetik girişimin bastırılması için, hedef sinyal yönü bilgisinin olmadığı durumda, tespit edilen girişim sinyali yönünde maksimum bastırma sağlamayı amaçlayan PI algoritmasının kullanılabilirliği ele alınmıştır. Bu 3 girişim problemi ve girişim bastırma yöntemleri için benzetim çalışmaları gerçekteşirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Girişim, Karıştırma, Elektromanyetik Girişim Giderme, Elektromanyetik Girişim Bastırma, Karıştırma Bastırma, MVDR Algoritması, LCMV Algoritması, PI Algoritması

ABSTRACT

ANTENNA BASED INTERFERENCE SUPPRESSION METHODS

Alper OCAK

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Yakup ÖZKAZANÇ

December 2021, 94 pages

Electromagnetic interference problems have been seen since the first day of the use of electromagnetic wave communication. As a result of electromagnetic interference, undesirable situations may occur such as the performance of the system exposed to the interference decreases, the desired signal cannot be received, the desired signal is mixed with other signals, causing erroneous information or information loss, and with these effects, the system exposed to the interference becomes unusable/inoperable. These interference problems can arise from external electromagnetic wave sources as well as from the receiving subsystem of the system being affected by its own transmitting subsystem.

In this study, electromagnetic interference problems are examined and interference removal methods are proposed for three interference problems. For the suppression of electromagnetic interference in satellite communication systems where the desired signal direction is known, the usability of the MVDR algorithm, which can

process the desired signal direction as input and aim to provide maximum gain in the desired signal direction and maximum suppression in the detected interference signal direction, is discussed. For the suppression of electromagnetic internal/self-interference, where the interference signal originates from the system's own systems/subsystems, the usability of the LCMV algorithm, which can process the direction of the interference signal as input and aim to provide maximum gain in the desired signal direction and maximum suppression in the detected interference signal direction, is discussed. For the suppression of external electromagnetic interference in satellite navigation systems where the desired signal does not come from a certain and one direction, the usability of the PI algorithm, which aims to provide maximum suppression in the direction of the detected interference signal without desired signal direction information, is discussed. Simulation studies were carried out for these 3 interference problems and interference removal methods and the results were evaluated.

Keywords: Electromagnetic Interference, Jamming, Electromagnetic Interference Cancellation, Electromagnetic Interference Suppression, Jamming Suppression, MVDR Algorithm, LCMV Algorithm, PI Algorithm

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, hiçbir konuda desteğini esirgemeyen, engin bilgi birikimi ve geniş vizyonu ile her zaman yol göstericim olan değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yakup Özkazanç'a,

Beni her zaman destekleyen ve motive eden, ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, zor çalışma koşullarında yükümü hafifleten ve yol arkadaşım olan sevgili eşim Kübra Çelebi Ocak'a,

Yüksek lisans eğitimimde en büyük destekçim olan, ilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen, beni her zaman motive eden babam Remzi Ocak'a, annem Nezahat Ocak'a ve kardeşim Rasih Eren Ocak'a,

Yüksek lisans eğitimim boyunca ilgisini ve tecrübesini aktarmaktan hiçbir zaman kaçınmayan sevgili arkadaşım Sinem Deniz Yenen'e,

Ve desteklerini ve ilgilerini her zaman hissettiren sevgili ekip arkadaşlarım Deniz Görkem Dinç, İlker Ağca, Ömer Faruk Özbek ve saygıdeğer liderlerim Tolga Üstünova, Cengiz Çetinkaya, Utku Can Koç ve Metehan Çetin'e,

Teşekkürlerimi sunarım.

Alper Ocak

Aralık 2021, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xi
SÖZLÜKÇE	xiv
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM VE KARIŞTIRMA	5
2.1. Uydu Haberleşme Sistemlerinde Dış Kaynaklı Elektromanyetik Girişim....	7
2.2. Elektromanyetik Dahili/Öz-Girişim	10
2.3. Uydu Navigasyon Sistemlerinde Dış Kaynaklı Elektromanyetik Girişim ..	12
3. ANTEN DİZİSİ TABANLI GİRİŞİM BASTIRMA YÖNTEMLERİ.....	18
3.1. Ortam Sinyalinin Modellenmesi	18
3.2. Uyarlamalı Anten Dizileri	19
3.3. MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) Algoritması	21
3.4. LCMV (Linear Constraint Minimum Variance) Algoritması	23
3.5. PI (Power Inversion) Algoritması	25
4. GİRİŞİM BASTIRMA BENZETİM ÇALIŞMALARI	27
4.1. MVDR Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları	30
4.2. LCMV Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları.....	48
4.3. PI Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları	69
5. SONUÇLAR	89



ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Marconi'nin ilk Uzun Menzilli Elektromanyetik Dalga Haberleşmesi.....	1
Şekil 2.1. Elektromanyetik Girişim Ortamı Modeli [6]	6
Şekil 2.2. Yer-Uydu Bağı (Uplink) Girişim Geometrisi	9
Şekil 2.3. Uydu-Yer Bağı (Downlink) Girişim Geometrisi	9
Şekil 2.4. Dahili/Öz-Girişim Giderim Sistemi Modeli [9].....	11
Şekil 2.5. GNSS Sistemleri Yörünge Karşılaştırması [12]	13
Şekil 2.6. GNSS Girişimi [14]	15
Şekil 2.7. Sahte Sinyal (Spoofing) Uygulaması [15].....	15
Şekil 2.8. Uydu Sinyalinin Tekrarlanması ile Oluşturulan Şaşırtma Yayın (Meaconing) Tekniğinin Uygulaması [16]	16
Şekil 3.1. Uyarlamalı Anten Dizisi Mimarisi.....	20
Şekil 4.1 2'li Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizinin Anten Örüntüsü (sağ)	28
Şekil 4.2 4'lü Karesel Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizinin Anten Örüntüsü (sağ).....	28
Şekil 4.3. 8'li Dairesel Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizinin Anten Örüntüsü (sağ).....	28
Şekil 4.4. Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizinin Anten Örüntüsü (sağ)	29
Şekil 4.5. Benzetimlerde Anten Dizilerinin İstenen Sinyale Göre Konumlandırılması.....	29
Şekil 4.6. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile MVDR Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c- alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği	31
Şekil 4.7. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	33
Şekil 4.8. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	34
Şekil 4.9. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	36

Şekil 4.10. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	37
Şekil 4.11. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	39
Şekil 4.12. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	40
Şekil 4.13. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	42
Şekil 4.14. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	43
Şekil 4.15. İki Girişim Sinyali ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri.....	45
Şekil 4.16. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile LCMV Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c-alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği.....	50
Şekil 4.17. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	52
Şekil 4.18. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	53
Şekil 4.19. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	55
Şekil 4.20. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	56
Şekil 4.21. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	58
Şekil 4.22. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	59
Şekil 4.23. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	61
Şekil 4.24. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	62
Şekil 4.25. İkili Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri.....	64

Şekil 4.26. İkili Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri.....	66
Şekil 4.27. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile PI Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c-alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği	71
Şekil 4.28. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	73
Şekil 4.29. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	74
Şekil 4.30. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	76
Şekil 4.31. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	77
Şekil 4.32. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	79
Şekil 4.33. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)	80
Şekil 4.34. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	82
Şekil 4.35. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	83
Şekil 4.36. İki Girişim Sinyali ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)	85

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. GNSS Sistemlerinin Bilinen Frekans Kullanımları [13]	14
Çizelge 4.1. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	35
Çizelge 4.2. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	35
Çizelge 4.3. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	38
Çizelge 4.4. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	38
Çizelge 4.5. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	41
Çizelge 4.6. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	41
Çizelge 4.7. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	44
Çizelge 4.8. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	44
Çizelge 4.9. İki Girişim Sinyali ile MVDR Algoritması Benzetim Sonuçları	46
Çizelge 4.10. Kullanılan Anten Dizilerine Göre MVDR Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması	48
Çizelge 4.11. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	54
Çizelge 4.12. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	54
Çizelge 4.13. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	57
Çizelge 4.14. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	57

Çizelge 4.15. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	60
Çizelge 4.16. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	60
Çizelge 4.17. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	63
Çizelge 4.18. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	63
Çizelge 4.19. Yalnızca Birinin Yönü Bilinen İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetim Sonuçları.....	65
Çizelge 4.20. Yönleri Bilinen İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetim Sonuçları	67
Çizelge 4.21. Kullanılan Anten Dizilerine Göre LCMV Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması	69
Çizelge 4.22. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	75
Çizelge 4.23. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	75
Çizelge 4.24. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	78
Çizelge 4.25. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	78
Çizelge 4.26. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	81
Çizelge 4.27. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	81
Çizelge 4.28. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları	84
Çizelge 4.29. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları	84
Çizelge 4.30. İki Girişim Sinyali ile PI Algoritması Benzetim Sonuçları.....	86
Çizelge 4.31. Kullanılan Anten Dizilerine Göre PI Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması	87

Çizelge 4.32. Kullanılan Anten Dizilerine Göre PI Algoritması Girişim Yönünde Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması	88
--	----



SÖZLÜKÇE

Adaptive	Uyarlamalı
Antenna Pattern	Anten Örüntüsü
Array Antenna	Anten Dizisi
Boresight	Nişan Hattı
Cancellation	Giderim
Downlink	Uydu-Yer Bağı
Geostationary	Yer-sabit
Interference	Girişim
Internal/Self Interference	Dahili/Öz-Girişim
Jamming	Karıştırma
Mitigation	Azaltma
Nulling	Sıfırlama
Isotropic	Eşyönlü
Point-to-Point	Noktadan Noktaya
Receiver	Almaç
Self-Interference	Öz-Girişim
System of Systems	Sistemler Sistemi
Suppression	Baskılama
Transmitter	Göndermeç veya Verici
Uplink	Yer-Uydu Bağı

KISALTMALAR

BDS	BeiDou Navigation Satellite System
dB	Decibel
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FM	Frequency Modulation
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
Hz	Hertz
ITU	International Telecommunication Union
LCMV	Linear Constraint Minimum Variance
MMSE	Minimum Mean Square Error
MVDR	Minimum Variance Distortionless Response
PI	Power Inversion
PNT	Positioning, Navigation and Timing
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RF	Radio Frequency
RR	Radio Regulations
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TV	Television
UCA	Uniform Circular Array
ULA	Uniform Linear Array

UPA	Uniform Planar Array
USB	Universal Serial Bu
W	Watt



1. GİRİŞ

İnsanlığın en önemli ihtiyaçlarından biri olan iletişim, son yüzyıllarda teknolojinin gelişmesi ve ilk uzun mesafeli kablosuz haberleşmenin gerçekleştirilmesi ile yeni bir boyut kazanmıştır.

1901 yılında, radyo tekniğinin mucidi (1898) Marconi'nin [1] Birleşik Krallık'tan gönderdiği titreşimlerin Kanada'dan alınmasının sağlanması ile elektromanyetik dalga haberleşmesi ilk kez uzun menzilli olarak gerçekleştirilmiştir. Bu büyük başarı ile, o zamana kadar insanlığın haberleşme altyapısını kurmasını çok zorlaştıran okyanus, dağ, uzun mesafeler gibi coğrafi engellerin kablolu iletişime nazaran çok daha kolay yöntemler ile aşılabileceği kanıtlanmıştır. Bu öncü gelişmeden sonra elektromanyetik dalga haberleşmesinin üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elektromanyetik dalga haberleşmesi, yirminci yüzyılda en hızlı teknolojik ilerlemenin kaydedildiği alanlardan biri haline gelmiştir. Şekil 1.1'de, Marconi'nin ilk uzun menzilli elektromanyetik dalga haberleşmesini gerçekleştirdiği Newfoundland ve Cornwall'in harita üzerindeki gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.1. Marconi'nin ilk Uzun Menzilli Elektromanyetik Dalga Haberleşmesi

Bilim kurgu yazarı ve mucit Arthur C. Clarke [2], Şubat, 1945 tarihli Wireless World dergisindeki makalesinde, dünya yörüngesine yerleştirilecek 3 uydu ile küresel kapsama alanına sahip bir iletişim sistemi yapılması fikrini ortaya atmıştır. Clarke bu yazısında yer-sabit yörüngenin varlığını da hesaplamış ve bu 3 iletişim uydusunun

bu yörüngeye yerleştirilmesini önermiştir. 1957 yılına gelindiğinde, Sovyetler Birliği'nin Sputnik-1 isimli ilk insan yapımı uyduyu dünya yörüngesine göndermesi ile, küresel iletişim sistemlerinin ilk adımı atılmış ve elektromanyetik dalga haberleşmesi çağ atlamıştır. İlk uydunun gönderilmesini takiben, uzaya gönderilen uydu sayısı giderek artmış ve 1965 yılına gelindiğinde, birçok ticari uydu yörüngeye gönderilerek uyduların iletişim sistemi olarak kullanımları mümkün hale gelmiştir. Günümüzde elektromanyetik dalga haberleşmesi; sesli/görüntülü iletişim/yayın, konum/yön belirleme, yer gözlem, radyo-astronomi, RADAR, elektronik harp, telemetri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların yıllar içinde kullanımının artması, birtakım veri kaybetme, parazit ve güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Elektromanyetik dalga yayılımının kullanımının artması sonucunda, amaç sistemleri ortamda bulunan istenmeyen sinyallerden etkilenebilmektedir veya bilinçli karıştırmaya maruz kalabilmektedir. Bu etkiler elektromanyetik girişim olarak adlandırılır. Elektromanyetik girişim sonucunda girişime uğrayan sistemin performansının düşmesi, hedef sinyalin alınamaması, hedef sinyalin başka sinyaller ile karışarak hatalı bilgiye veya bilgi kaybına yol açması ve bu etkiler ile de girişime maruz kalan sistemin kullanılamaz/çalışamaz duruma gelmesi gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. Bu girişim problemleri, dış elektromanyetik dalga kaynaklarından kaynaklanabildiği gibi, sistemin amaç alt sisteminin kendi gönderme alt sisteminden etkilenmesi ile de ortaya çıkabilir.

Bu çalışma kapsamında girişim ve karıştırmaya problemleri üç kategoriye ayrılarak incelenmiştir:

Noktadan-noktaya (point-to-point) haberleşme sistemlerinde alıcı ünite tek bir vericiden gelen yayın sinyalini alacak şekilde yapılandırılır. Yüksek kazançlı antenler kullanılır ve alıcı anten verici yönüne doğru yönlendirilir. Mikrodalga linkler ve uydu yer istasyonları bu tür haberleşme sistemleridir. Bu tür sistemlerde girişim ve karıştırmaya tipik olarak antenin yan ve arka huzmelerinden gelen dışsal bir kaynaktır.

Girişim problemlerinin farklı bir türü, bir haberleşme sisteminin aynı bantta eş anlı olarak hem alma hem de gönderme işlevlerine yerine getirmesi ile ortaya çıkar. Öz-girişim (self-interference) olarak ifade edilen bu problem hücre sel haberleşmede “bağlı-tam-dupleks (in-bound-full-duplex)” senaryolarda ortaya çıkabildiği gibi, askeri haberleşmede bir karıştırma sisteminin karıştırdığı bantlarda haberleşme ihtiyacı nedeniyle de oluşabilmektedir. Bu durumda, alma için girişim yaratan unsur alma ile aynı yerde konuşlandırılmış olan verici olacaktır.

Üçüncü bir girişim/karıştırma türü ise, küresel uydu navigasyon sistemlerine (GNSS) yönelik karıştırma dır. GNSS senaryosunda alma tek bir uydudan gelen sinyalleri dinlememekte, yere göre sabit olmayan yörüngede dört ve üzeri uyduyu eş zamanlı olarak dinlemektedir. Günümüzde GNSS almaçlarının alt modelleri bile 12 ve üzeri kanallı olarak tasarlanmaktadır. GNSS alma antenleri düşük kazançlı (tipik olarak 3-dB) tasarlandığından dolayı, GNSS karıştırması tüm uydu sinyallerini birden etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında, bu üç tür girişim/karıştırma senaryosu aşağıdaki şekilde kategorize edilmiştir:

- a. uydu haberleşme sistemlerinde dış kaynaklı elektromanyetik girişim
- b. elektromanyetik dahili/öz-girişim
- c. uydu navigasyon sistemlerinde dış kaynaklı elektromanyetik girişim

Yine bu tez çalışmasında, bahsedilen her bir girişim/karıştırma problemi için sırasıyla üç girişim/karıştırma bastırma yöntemi çalışılmıştır:

- a. “Minimum Variance Distortionless Response (MVDR)”
- b. “Linear Constraint Minimum Variance (LCMV)”
- c. “Power Inversion (PI)”

Ele alınan yöntemler uyarlamalı anten dizisi teknikleri olup; bu yöntemlerin kullanımı ile çalışılan bandın bir veya birden fazla girişim/karıştırma sinyali etkisi altında olduğu durumda, girişim/karıştırma sinyali yönünde bastırma uygulanması, böylece hedef sinyal ile karıştırma/gürültü sinyali oranının artırılması amaçlanmaktadır.

Tez raporu şu şekilde yapılandırılmıştır: Elektromanyetik girişim ve karıştırma senaryoları ikinci bölümde sunulmuştur. Üçüncü bölümde tez kapsamında ele alınacak anten dizisi tabanlı girişim bastırma yöntemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde girişim/karıştırma senaryolarının ve girişim/karıştırma bastırma tekniklerinin benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.



2. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM VE KARIŞTIRMA

Elektromanyetik girişim, harici veya dahili bir kaynak tarafından üretilen; elektromanyetik indüksiyon, elektrostatik bağlantı veya iletim yoluyla bir elektrik devresini etkileyen bozulmadır. Bozulma devrenin performansını düşürebilir veya çalışmasını durdurabilir. Sayısal haberleşmede bu etkiler, hata oranında artışa yol açabilir veya verinin tamamının kaybına yol açabilir [3].

Elektromanyetik girişim, kabaca insan yapımı veya doğal elektromanyetik girişim olarak ikiye ayrılabilir:

İnsan yapımı elektromanyetik girişim, insan üretimi bir başka cihazdan kaynaklanan elektromanyetik girişimlerdir. Bu dış cihazlardan kaynaklanan sinyallerin etkilenen cihazın çalışma bandına düşmesi ile girişim etkisi meydana gelir. Haberleşme sinyalleri, radarlar, FM/TV sinyalleri, karıştırıcı cihazlar, insan yapımı elektromanyetik girişim kaynaklarına örnek olarak verilebilir.

Doğal elektromanyetik girişim, dünya veya uzay kaynaklı olan elektromanyetik dalgalardan kaynaklı olan elektromanyetik girişimdir. Örneğin; şimşekler, elektrik fırtınaları, güneş rüzgarları, süpernova patlamaları, kozmik radyasyon, atmosferik gürültüler doğal elektromanyetik girişim kaynaklarına örnek olarak verilebilir [4].

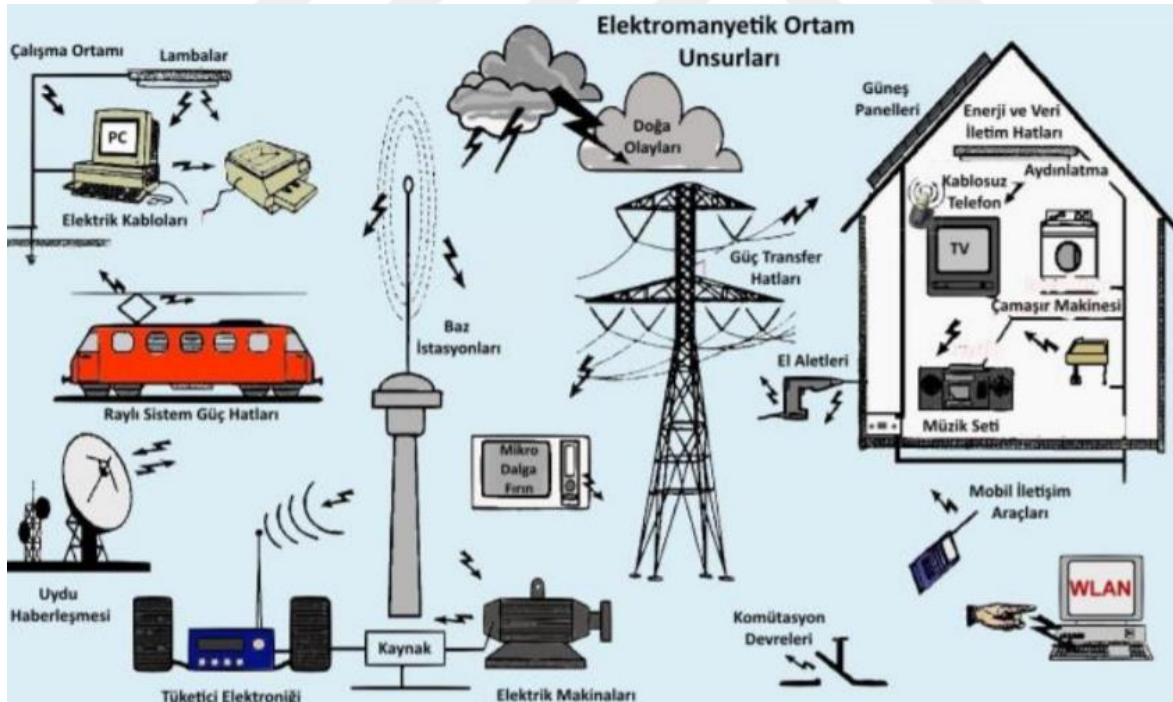
Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU – International Telecommunication Union) Radyo Düzenlemeleri'ne (RR – Radio Regulation) göre 3 tür elektromanyetik girişim vardır:

- a. *İzin verilebilir girişim (Permissible Interference)*: Nicel paylaşım kriterlerine uyan gözlemlenebilir/tahmin edilebilir girişim veya özel anlaşmalarda yer alan girişimler
- b. *Kabul edilmiş girişim (Accepted Interference)*: İzin verilebilir girişim olarak tanımlanan girişimlerden daha yüksek seviyede olan ve iki veya daha fazla kurum arasında kararlaştırılan (diğer kurumsal kullanıcılara zarar vermeyecek şekilde) girişimler

- c. *Zararlı girişim (Harmful Interference)*: Radyo-navigasyon sistemlerinin veya güvenlik sistemlerinin işleyişini tehlikeye atan veya radyo-iletişim sistemlerini ciddi şekilde bozan, engelleyen veya tekrar tekrar kesintiye uğratan girişimler

Zararlı girişim kaynakları aşağıdaki şekilde ikiye ayrılabilir:

- a. Yasadışı veya askeri karıştırma cihazları, yetkisiz frekanslara ayarlı radyolar veya belirli bir karıştırma amacına yönelik diğer çözümleri içeren kasıtlı girişim kaynakları
- b. Girişime neden olan düşük kaliteli USB şarj cihazları veya örneğin, bir ülkenin kamu güvenliğinde kullanılan frekanslarında yayın yapan yabancı üretilmiş RF cihazları, eski/kalitesiz/hatalı kurulmuş RF güçlendiriciler gibi kasıtlı olmayan girişim kaynakları ve güneş patlamaları gibi doğal girişim kaynakları [5]



Şekil 2.1. Elektromanyetik Girişim Ortamı Modeli [6]

Elektromanyetik girişimi, girişim tipine göre 3 kategoride incelemek mümkündür:

- a) Dahili/z-Girişim: Bir sistemin kasıtsız olarak, kendi alma sistemlerine müdahale edecek şekilde çalışmasıdır. Uygun olmayan kurulum, yetersiz alan, göndermeç ile almaç alt sistemlerinin yakın konumlanması, güçlü göndermeçlerin gönderme antenlerinin arka veya yan loblarından yaşanan girişim etkileri, göndermeçlerin arazi etkisi sonucu yansıma ile almaç alt sistemine iletilmesi, almalarda kullanılan mikser harmonikleri gibi etmenler dahili/öz-girişime neden olabilir.
- b) Dış Kaynaklı Girişim: Bir sistemin, çalıştığı RF bandında yapay bir kaynak tarafından yapılan yayın sonucu kasıtsız olarak girişim etkisinde kalması veya bir doğal elektromanyetik yayılım kaynağı tarafından girişim etkisinde kalmasıdır. Ortak kanal kullanımı (aynı kanalda iletişim kuran birden fazla verici), komşu kanal karışması (komşu bir frekansta çalışan bir vericinin gücünün komşu kanala yayılması) ve doğal kaynaklar dış kaynaklı girişime örnek olarak verilebilir.
- c) Kasıtlı Girişim: Bir sistemin, kasıtlı olarak başka bir sistemin iletişiminin kesilmesini, performansının düşmesini, hedef sinyali alamamasını, hatalı bilgi almasını veya bilgi kaybına uğramasını, kullanılamaz/çalışamaz duruma gelmesini sağlamaya çalışmasıdır. İletişim uydu sistemlerinin karıştırılması, telsiz sistemlerinin karıştırılması, radar sistemlerinin karıştırılması, GNSS almalarının karıştırılması kasıtlı girişime örnek olarak verilebilir. Kasıtlı girişim “karıştırma (jamming)” olarak da adlandırılmaktadır.

2.1. Uydu Haberleşme Sistemlerinde Dış Kaynaklı Elektromanyetik Girişim

Uydu haberleşme sistemleri, dünya yörüngesinde bulunan bir uydu alıcı verici sistem ile dünyada bulunan alıcı, verici veya alıcı-verici istasyonlardan oluşur. Uydu sistemi, üzerinde bulunan alıcı-vericisi ile kendisine gelen hedef sinyalleri glendirir

ve tekrar dünyaya iletir. B6ylece d6nya 6zerindeki birbirleri ile iletişim kuramayan uzak sistemler arasında bir iletişim kanalı oluşturur.

İletişim uyduları genellikle, ekvator dan yaklaşık 35.900 km y6kseklikteki yer-sabit (geostationary) ekvatorial y6r6ngede bulunur. Bu y6r6ngedeki uyduların d6n6ř hızları, gezegenin kendi etrafındaki d6n6ř hızına eşittir. Bu nedenle, uydu sistemleri yer istasyonları i7in her zaman aynı noktadadır. B6ylece, yer istasyonları genellikle antenlerinin nişan hattını doğruca hedef uydu sistemine doğrultabilir ve en verimli Şekilde uydu sinyalinini alabilir duruma gelebilir.

Uydu haberleşme sistemleri; radyo-televizyon yayını, telefon iletişimi, internet erişimi, amat6r radyoculuk, askeri g6revler (karıştırma, y6n bulma, elektronik destek, sinyal istihbaratı, metin/ses/g6r6nt6 haberleşme sistemleri) ve veri toplama (meteoroloji uyduları, radyosondalar gibi) işlevleri i7in kullanılabilir [7].

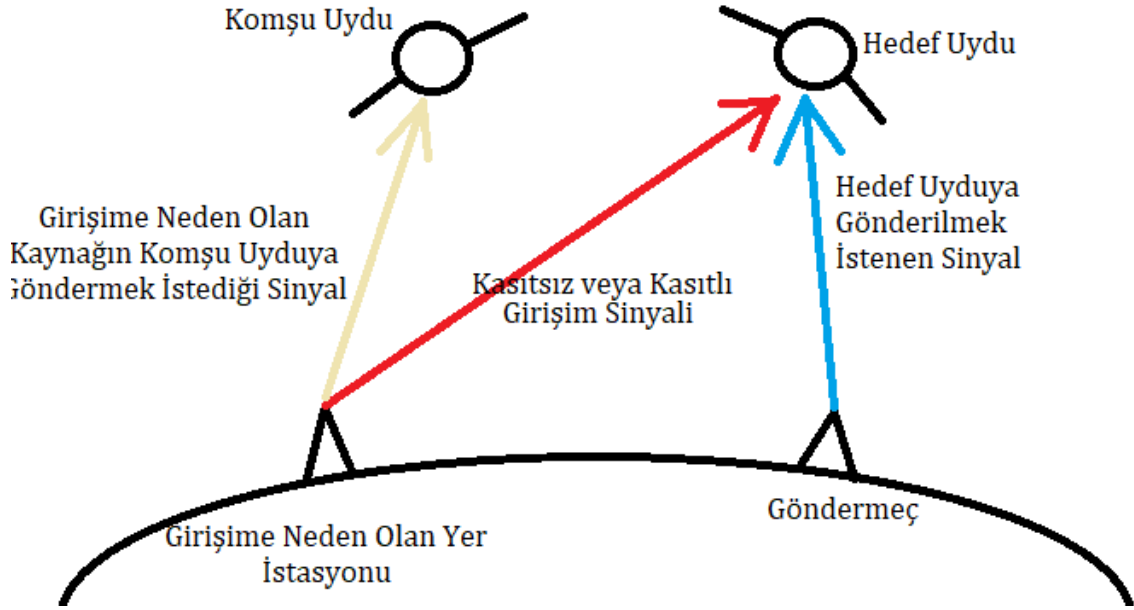
Uydu haberleşme konseptinde, yer istasyonundan uyduya g6nderilen sinyaller yer-uydu bağı (up-link) sinyali olarak adlandırılır. Uydudan yer istasyonuna g6nderilen sinyaller ise uydu-yer bağı (down-link) sinyali olarak adlandırılır.

Uydu sistemlerinde elektromanyetik girişim, yer-uydu bağı iletişiminde veya uydu-yer bağı iletişiminde g6r6lebilir. Bu girişim 7eşitleri, ortak kanal kullanımı veya komşu karışması (komşu bir frekansta 7alışan bir vericinin enerjisinin komşu kanala yayılması) Şeklinde g6r6lebilir.

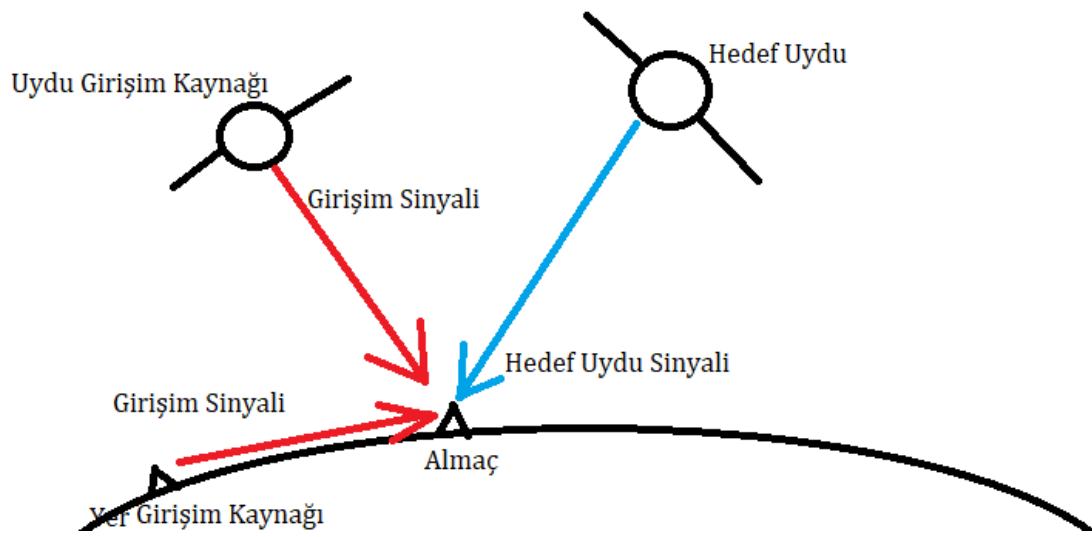
Yer-uydu bağı (uplink) iletişiminde girişim; bir yer istasyonunun kendi iletişim uydusuna veri g6nderirken kasıtsız olarak başka uydu sistemlerinin uydularını da etkilemesi ile meydana gelebildiği gibi, kasıtlı olarak bir uydu sisteminin alma hattının bir yer istasyonundan veya başka bir hava aracı/uydu tarafından karıştırılması ile de meydana gelebilir. Yer-uydu bağı girişimini g6steren temsili bir g6rsel Şekil 2.2'de verilmiştir.

Uydu-yer (downlink) bağı iletişiminde girişim; bir uydu sisteminin kendi iletişim istasyonlarına veri g6nderirken kasıtsız olarak başka yer istasyonlarını da etkilemesi Şeklinde olabildiği gibi, kasıtlı olarak bir yer istasyonunun alma hattının başka bir yer

istasyonundan veya başa bir hava aracı/uydu tarafından karıştırılması ile de meydana gelebilir. Ayrıca, bazı ortak frekans kanalı kullanımı durumlarında, yer istasyonları da kasıtsız olarak uydu sistemleriyle haberleşen diğer yer istasyonlarını etkileyebilir. Uydu-yer bağı girişimini gösteren temsili bir görsel Şekil 2.3'te verilmiştir [8].



Şekil 2.2. Yer-Uydu Bağı (Uplink) Girişim Geometrisi



Şekil 2.3. Uydu-Yer Bağı (Downlink) Girişim Geometrisi

Haberleşme uydu sistemleri konseptinde, yer-sabit yörüngede olan bir uydu sistemi için yer istasyonu her zaman aynı noktada olacaktır. Aynı şekilde, bir yer istasyonu için de yer-sabit yörüngede olan bir uydu sistemi her zaman aynı noktada olacaktır. Bu durumda, yer istasyonu veya uydu sistemi kendisine gelen hedef sinyalin yönünü bilmektedir. Uydu haberleşme sistemleri için, bu şekilde hedef sinyal yönünün bilindiği durumlarda, güçlü girişim sinyallerinin bastırılmasında MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) algoritması kullanımı uygun görünmektedir.

MVDR algoritması, uyarlamalı anten dizilerini kullanır. Algoritmaya hedef sinyal yönü ve ortam sinyali verilir, algoritma uyarlamalı anten dizisi elemanları için ağırlıklandırma vektörünü hesaplar. MVDR ağırlıklandırması, hedef sinyal yönünde maksimum kazanç sağlayacak şekilde anten örüntüsünü ayarlar ve girişim sinyali yönünü tespit ederek girişim yönünde bastırma uygular. Bu sayede, hedef sinyal yönünde maksimum kazanç ile çalışır ve girişim sinyalinin geldiği yönden minimum düzeyde sinyal almayı amaçlar. PI (Power Inversion) algoritması da girişim sinyali yönünde benzer şekilde bastırma uygulamaktadır. Ancak PI algoritmasında hedef sinyal yönü algoritmaya girdi olarak verilmez ve anten örüntüsünde hedef sinyal yönünde bir kazanç ençoklama uygulanmaz. Hatta hedef sinyale de hedef sinyalin gücüne bağlı olarak bastırma uygulanır.

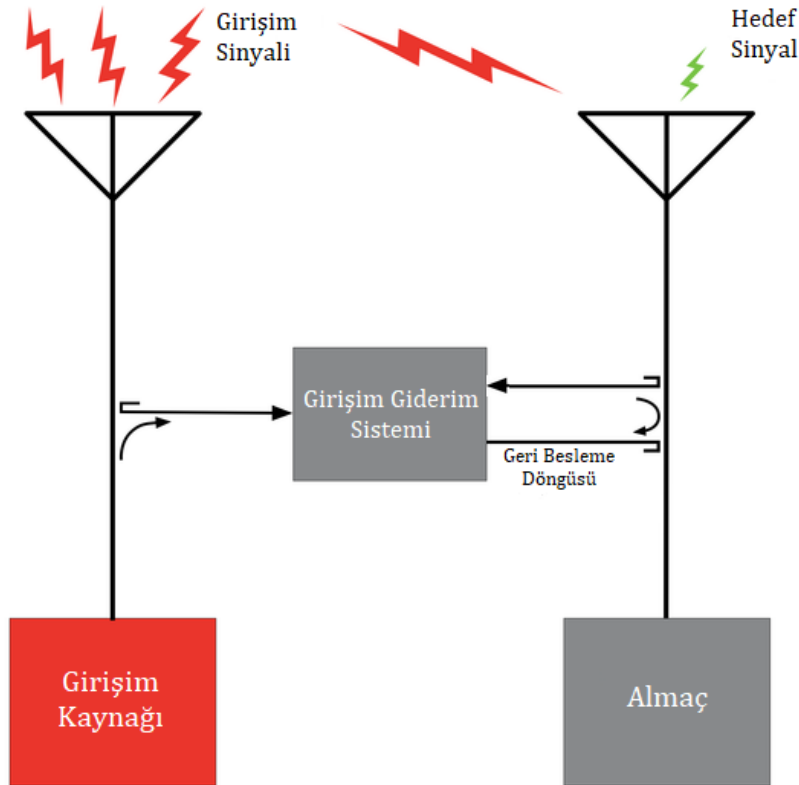
Dolayısı ile, bu tip uydu haberleşme sistemlerinde oluşabilecek girişim problemlerinde MVDR algoritmasının kullanımı hedef sinyalin girişim sinyali ile gürültü toplamına oranını PI algoritmasına göre daha yüksek seviyede arttıracaktır. Bu nedenle, bu tezde hedef sinyal yönünün bilindiği uydu haberleşme uygulamalarındaki girişim problemleri için MVDR tekniğinin kullanımı önerilmiş ve simüle edilerek sonuçları analiz edilmiştir.

2.2. Elektromanyetik Dahili/Öz-Girişim

Dahili/Öz Girişim, bir sistemin veya sistemler sisteminin (system of systems) kendi almaç alt sistemine zarar verecek şekilde çalışmasıdır. Bu girişim etkileri, sistemin iç elektroniğinden kaynaklı olabileceği gibi, sistemin veya sistemler sisteminin kendi göndermecinin kendi almaç alt sistemini etkilemesi şeklinde de olabilir. Uygun

olmayan kurulum, yetersiz alan, göndermeç ile almaç alt sistemlerinin yakın konumlanması, güçlü göndermeçlerin gönderme antenlerinin arka veya yan loblarından yaşanan girişim etkileri, göndermeçlerin arazi etkisi sonucu yansıma ile almaç alt sistemine iletilmesi, almaçlarda doğrusal olmayan mikser kullanımı dahili/öz girişim'e sebep olan etmenlerdendir.

Göndermeçler ile almaçları yakın konumlandırmak zorunda kalınan platformlarda veya gönderilen RF dalgaların doğrudan iletiminin veya güçlü yansımalarının almaç alt sistemine etkisinden kaçınılamayan sahalarda öz-girişim önemli bir problem konumundadır. İstenen sinyal yönünün bilindiği ve kendi sisteminin göndermecisi sebebiyle güçlü girişim etkisine sahip olan sistemler için LCMV (Linear Constraint Minimum Variance) algoritmasının kullanımı uygun olacaktır.



Şekil 2.4. Dahili/Öz-Girişim Giderim Sistemi Modeli [9]

LCMV algoritması, uyarlamalı anten dizileri kullanır. Algoritmaya hedef sinyal yönü, girişim sinyali yönü, ortam sinyali verilir ve uyarlamalı anten dizisi elemanları için

ağırlıklandırma vektörü elde edilir. Bu ağırlıklandırmalar, anten örüntüsünü hedef sinyal yönünde maksimum kazanç elde edilecek şekilde ayarlar ve girişim sinyali yönünde bastırma uygular. Bu sayede, hedef sinyal yönünde maksimum kazanç ile çalışır ve girişim sinyalinin geldiği yönden minimum düzeyde sinyal almayı amaçlar. MVDR algoritması da girişim sinyali yönünde benzer şekilde bastırma uygulamaktadır ve hedef sinyal yönünde maksimum kazanç elde edilecek şekilde anten örüntüsünü ayarlamaktadır. Ancak MVDR algoritmasında girişim sinyali yönü algoritmaya girdi olarak verilmez. Bu nedenle girişim sinyali yönündeki bastırma LCMV algoritmasındaki kadar yüksek seviyede olmaz. Şekil 2.4'te LCMV algoritması ile girişim bastırma uygulayan bir sistem modeli verilmiştir.

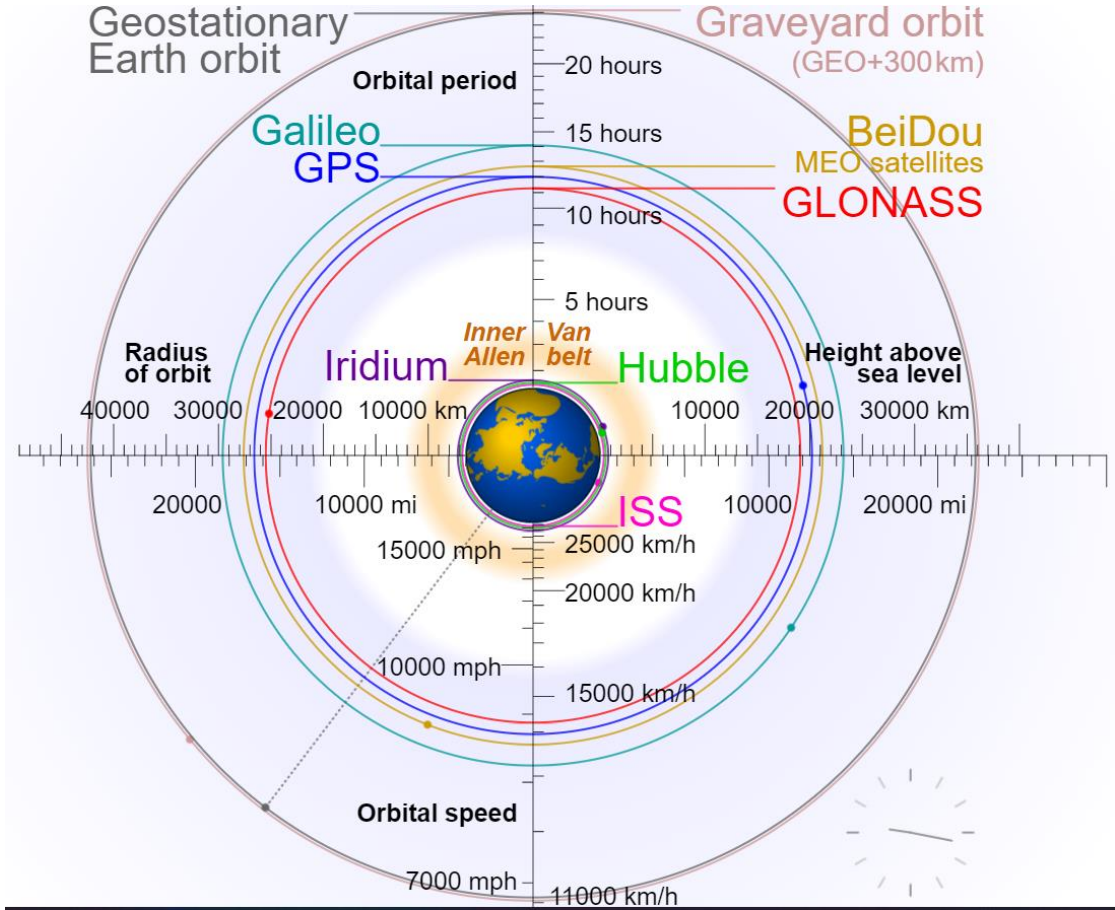
Sonuç olarak, hedef sinyal yönünün bilindiği sistemlerde oluşabilecek dahili/öz-girişim problemlerinde, girişim sinyali de aynı sistemden kaynaklandığından kolayca girişim sinyalinin yönü elde edilebilir. Girişim sinyalinin yönünün de girdi olarak kullanılmasıyla, LCMV algoritmasının kullanımı hedef sinyalin girişim sinyali ile gürültü toplamına oranını MVDR algoritmasına göre daha yüksek seviyede arttıracaktır. Bu nedenle, bu tezde hedef sinyal yönünün ve girişime neden olan sinyal yönünün bilindiği dahili/öz-girişim problemleri için LCMV tekniğinin kullanımı önerilmiş ve simüle edilerek sonuçları analiz edilmiştir.

2.3. Uydu Navigasyon Sistemlerinde Dış Kaynaklı Elektromanyetik Girişim

Uydu navigasyon sistemleri, dünyaya göre jeo-uzamsal (geo-spatial) konumlandırma sağlayan sistemlerdir. Uydulardan iletilen sinyaller aracılığı ile; kullanıcı sistemlerin kendi enlem, boylam, hız, yön, yükseklik ve yerel saat bilgilerini hesaplayabilmesi sağlanır. Bu kullanımlar, kısaca PNT (Positioning, Navigation and Timing) olarak anılmaktadır.

Küresel kapsamlı uydu navigasyon sistemleri GNSS (Global Navigation Satellite System) olarak adlandırılır. Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri'ne ait olan GPS (Global Positioning System), Rusya Federasyonu'na ait olan GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Çin Halk Cumhuriyeti'ne ait

olan BDS (BeiDou Navigation Satellite System) ve Avrupa Birliği'ne ait olan Galileo mevcut olan navigasyon uydu takımlarıdır. Her bir navigasyon uydu takımı onlarca uydudan oluşur. Bu uydular orta dünya yörüngesinde bulunurlar ve yaklaşık 20000 km yükseklikte ve yaklaşık 12 saatlik periyotlarla dünya etrafında dönerler [10] [11]. Şekil 2.5'te GNSS sistemlerinin yörüngeleri verilmiştir.



Şekil 2.5. GNSS Sistemleri Yörünge Karşılaştırması [12]

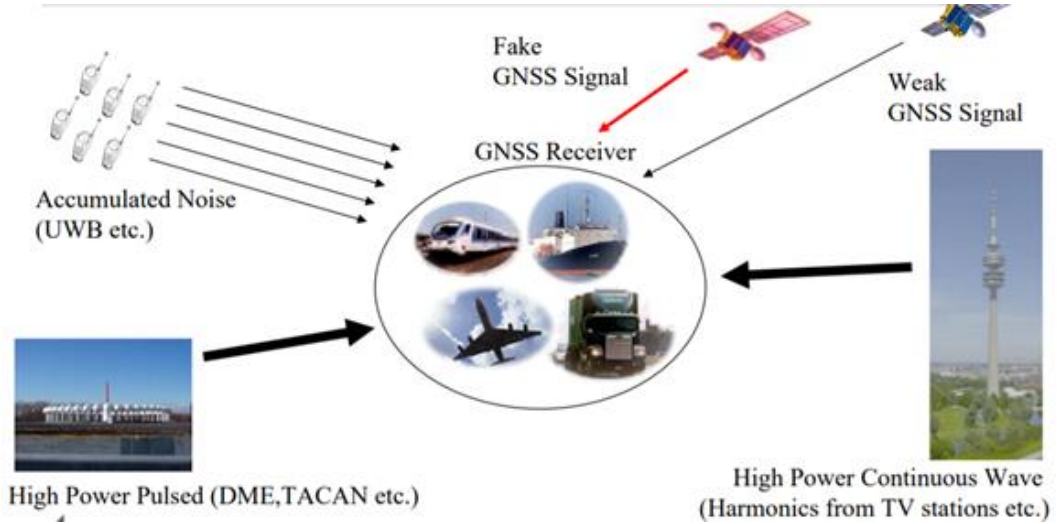
GNSS sistemleri, gönderdikleri uydu sinyallerinde, uydu konumunun hesaplanabileceği yörünge bilgilerini ve sinyalin gönderildiği zaman bilgisini gönderir. Sinyali alan sistem, en az dört uydudan gelen sinyalin gecikmesinin hesaplanması ile anlık koordinat ve zamanlama bilgilerini elde eder. Bunların haricinde, gelen sinyallerin zamana göre değişimine göre vektörel hız bilgisi de hesaplanabilir.

GNSS sistemlerinin bilinen frekans kullanımları aşağıdaki çizelgede verilmiştir:

Çizelge 2.1. GNSS Sistemlerinin Bilinen Frekans Kullanımları [13]

System	Signal	Frequency (MHz)
GPS	L1 C/A	1575.42
	L1C	1575.42
	L2 C	1227.6
	L2 P	1227.6
	L5	1176.45
GLONASS	L1 C/A	1598.0625-1609.3125
	L2 C	1242.9375-1251.6875
	L2 P	1242.9375-1251.6875
	L3 OC	1202.025
Galileo	E1	1575.42
	E5a	1176.45
	E5b	1207.14
	E5 AltBOC	1191.795
	E6	1278.75
BeiDou	B1I	1561.098
	B2I	1207.14
	B3I	1268.52
	B1C	1575.42
	B2a	1176.45
	B2b	1207.14

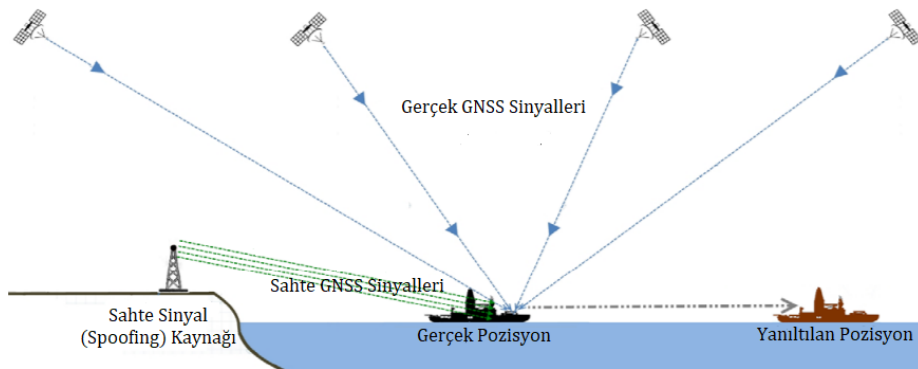
GNSS sinyalleri dünyada genellikle çok düşük güç seviyesinde alınır. Örneğin GPS sinyallerinin gücü -127 dBm seviyesindedir ve ortamdaki gürültü seviyesinin altında alınırlar. Bu zayıf sinyaller DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) tekniği kullanılarak gürültüden ayrıştırılırlar [14].



Şekil 2.6. GNSS Girişimi [15]

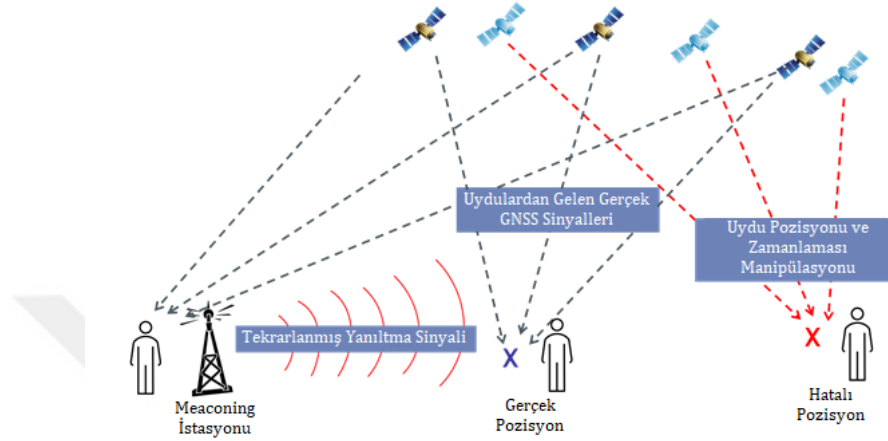
Navigasyon ölçümlerinde hatalar ve bozulmaların bir diğer sebebi de elektromanyetik girişimdir. Şekil 2.6'da GNSS girişim örnekleri gösterilmektedir. Uydu navigasyon sistemlerinde elektromanyetik girişim aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Kasıtsız girişim sinyalleri, uydu navigasyon verilerinin ayrıştırılmasını ve alınmasını engelleyebilir.
- Gürültü ile karıştırma uygulanması ile uydu sinyallerinin alınmasında kesintiler amaçlanabilir.
- Sahte sinyal uygulanması (Spoofing) ile GNSS alıcılarını yanıltmak için hatalı veriler içeren sahte GNSS sinyalleri gönderilerek gerçek GNSS sinyalleri taklit edilebilir. Şekil 2.7'de sahte sinyal (spoofing) uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Sahte Sinyal (Spoofing) Uygulaması [16]

- d. Şaşırtma yayın istasyonları (Meaconing Station) ile ortamdaki alınan radyo işaret sinyalleri aynı frekansta tekrar yayınlanabilir ve uçak ve yer istasyonlarına hatalı konum bilgisi iletilmesine neden olabilir [15]. Şekil 2.8’de şaşırtma yayın istasyonları (meaconing station)’nın çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Uydu Sinyalinin Tekrarlanması ile Oluşturulan Şaşırtma Yayın (Meaconing) Tekniğinin Uygulaması [17]

GNSS sinyal kaynaklarının (GNSS uydularının) anlık kesin pozisyonları, uydudan sinyal doğru bir şekilde alınıp demodüle edilmeden bilinmemektedir. Ayrıca, yansıma etkileri gelen sinyalin kaynağının yönünü tayin etmekte zorluklar oluşturmaktadır. Hem sinyal kaynağının fazlalığı, hem de yansımalar ile her yönden GNSS sinyalinin geldiği bir durum söz konusudur. Gelen sinyal kaynağının yönünün kesin olarak bilinmediği durumlarda girişimin bastırılması için PI (Power Inversion) algoritmasının kullanımı uygun olacaktır.

PI algoritması, uyarlanabilir anten dizileri kullanır. Algoritmaya yalnızca ortam sinyali verilir ve uyarlanabilir anten dizisi elemanları için ağırlıklandırma vektörü elde edilir. Bu ağırlıklandırmalar, girişim sinyali yönünü tespit ederek anten örüntüsünde girişim yönünde bastırma (sıfırlama/nulling) uygular. Bu sayede, girişim sinyalinin geldiği yönden minimum düzeyde sinyal almayı amaçlar. MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) ve LCMV (Linear Constraint Minimum Variance) algoritmaları da girişim sinyali yönünde benzer şekilde bastırma uygulamaktadır. Ancak PI algoritmasında hedef sinyal yönü veya girişim sinyali yönü algoritmaya

girdi olarak verilmez. Bu nedenle sinyal geliş kaynağının y6n6n6n kesin olarak bilinmediği girişim problemlerinde kullanım i7in uygundur.

Bu nedenle, bu tezde hedef sinyal y6n6n6n bilinmediği uydu navigasyon uygulamalarındaki girişim problemleri i7in PI tekniğinin kullanımı 6nerilmiş ve sim6le edilerek sonu7ları analiz edilmiştir.



3. ANTEN DİZİSİ TABANLI GİRİŞİM BASTIRMA YÖNTEMLERİ

3.1. Ortam Sinyalinin Modellenmesi

Ortamdaki toplam sinyalin $x(t)$ olduğunu varsayılırsa, bu sinyal 3 ayrı bileşen olarak ayrıştırılabilir: hedef sinyal, girişim sinyali ve gürültü. Bu durumda, $x(t)$ sinyali aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$x(t) = x_d(t) + x_i(t) + x_n(t) \quad (1)$$

($x_d(t)$: hedef sinyal, $x_i(t)$: girişim/karıştırma sinyali, $x_n(t)$: termal gürültü)

İstenen sinyal gürültüsüz ve tek yönlü haliyle aşağıdaki gibidir:

$$X_d(t) = A_0 C(t - \tau_0) e^{-j\phi_0} e^{j2\pi f_c \tau_0} \quad (2)$$

(A_0 : alınan genlik değeri, $C(t)$: gönderilen sinyalin karmaşık zarfı, τ_0 : yayılım gecikmesi, ϕ_0 : taşıyıcı sinyal fazı, f_c : taşıyıcı frekansı)

Girişim sinyalinin gürültüsüz ve çok yönlü hali ile aşağıdaki gibidir:

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^L (A_i C(t - \tau_i) e^{-j\phi_i} e^{j2\pi f_i \tau_i}) \quad (3)$$

(A_i : alınan genlik değeri, $C(t)$: gönderilen sinyalin kompleks zarfı, τ_i : yayılım gecikmesi, ϕ_i : taşıyıcı sinyal fazı, f_i : taşıyıcı frekansı)

İfade (1) gürültünün ihmal edildiği durumda aşağıdaki gibi yazılabilir:

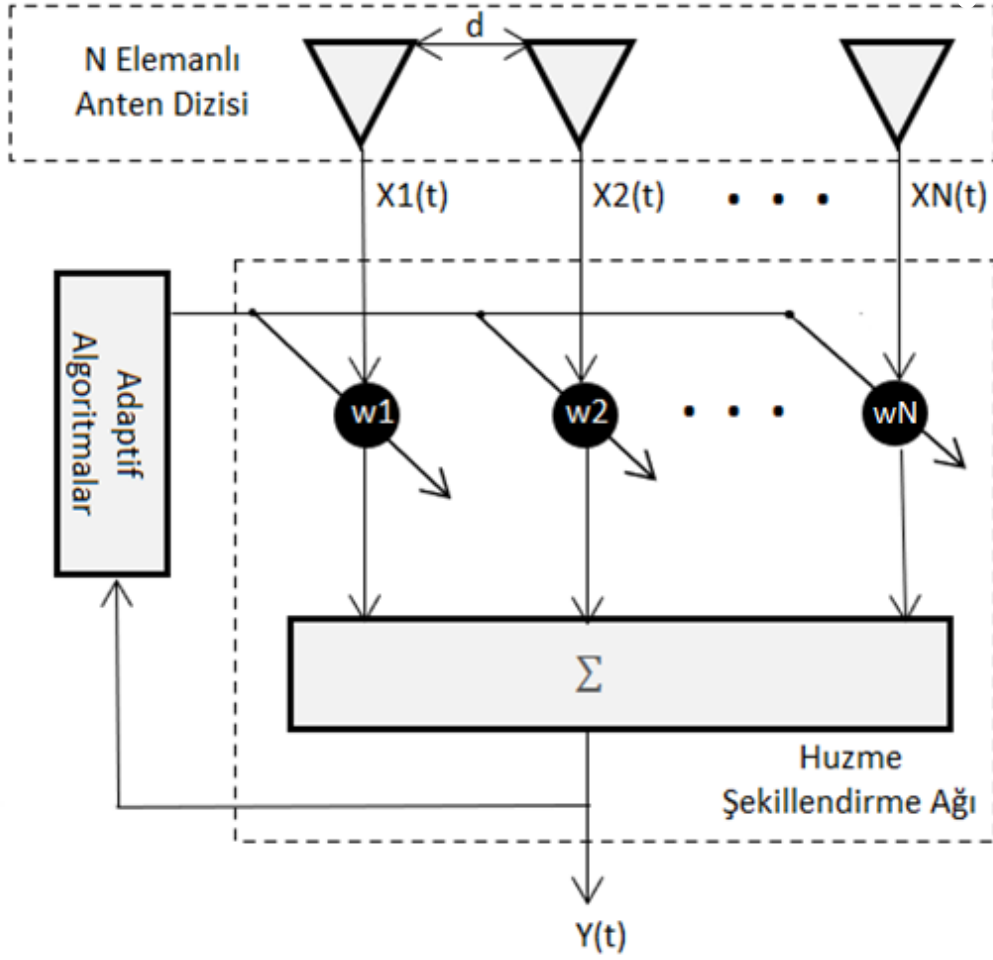
$$x(t) = A_0 e^{-j\phi_0} [C(t - \tau_0) + \sum_{i=1}^L (\tilde{A}_i e^{-j\tilde{\phi}_i} C(t - \tau_0 - \tilde{\tau}_i))] \quad (4)$$

(\tilde{A}_i : i sırasındaki girişim sinyali-hedef sinyal oranı, $\tilde{\tau}_i$: i sırasındaki çok yönlü sinyal dönüşünün bağıl gecikmesi, $\tilde{\phi}_i = \phi_i - \phi_0$: i sırasındaki çok yönlü sinyal dönüşünün bağıl taşıyıcı fazı) [18]

3.2. Uyarlamalı Anten Dizileri

Anten dizileri, hedef sinyalleri daha iyi alabilmek ve istenmeyen sinyalleri bastırabilmek için birleştirilen anten setleridir. Anten dizileri, tek bir antene göre; daha yüksek kazanç, daha dar huzme, değiştirilebilir huzme doğrultusu/yapısı ve daha yüksek SINR oranı sağlayabilir [19]. Bu avantajların sağlanması için, ortamda bulunan sinyallerin geliş yönlerinin tayin edilmesini, anten örüntüsünün hedef sinyal yönünde maksimum kazanç elde edilecek şekilde ayarlanmasını, istenmeyen girişim/karıştırma sinyallerinin boşluk yönlendirme (nulling) ile bastırılmasını veya bu işlevlerden birkaçının veya hepsinin aynı anda yerine getirilmesini sağlayan uyarlamalı huzme şekillendirme algoritmaları kullanılabilir.

Uyarlamalı anten dizileri; anten dizisi, analog dönüştürücü ve temel bant işleme bölümlerinden oluşur. Dizi yapısına göre; tekdüze doğrusal dizi (ULA), tekdüze düzlemsel dizi (UPA), tekdüze dairesel dizi (UCA), küresel dizi gibi dizi tiplerine bölünebilir. Uyarlamalı anten dizisi için esas alınacak mimari Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Uyarlamalı Anten Dizisi Mimarisi

x ; anten dizisi elemanları için alınan sinyali, w ; anten dizisi elemanları için ağırlıklandırılmaları, N ; anten dizisi eleman sayısını, d ; komşu elemanlar arası mesafeyi göstermektedir.

N elemanlı ve komşu elemanları arası mesafesi d olan bir tekdüze anten dizisi için, N yollu anten ağırlıkları ve sinyal verisi elde edilir. Bu veriler ile doğru ağırlıklandırmanın yapılmış olduğu bileşik çıkış verisi elde edilir. Alınan sinyal dizisi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$X(t) = AS(t) + N(t) \quad (5)$$

Burada, $X(t) = [X_1(t), \dots, X_N(t)]^T$; N elemanlı anten dizisinin veri vektörü, $N(t) = [N_1(t), \dots, N_N(t)]^T$; Gürültü vektörü, $S(t) = [S_1(t), \dots, S_M(t)]^T$; alınan sinyalin kompleks zarf vektörü, $S_p(t)$; p sırasındaki sinyal kaynağı zarfının kompleksi, $A = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_N)]$; yönlendirme matrisi, $a(\theta_p)$; p sırasındaki kaynağın yönlendirme vektörü ve,

$$a(\theta_p) = [1, e^{j\beta_p}, \dots, e^{(N-1)j\beta_p}], \quad (P=1,2, \dots, m) \quad (6)$$

$$\beta_p = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_p \quad 0 \quad (7)$$

d; komşu anten dizisi elemanları arası mesafe, θ_p ; p sırasındaki sinyalin geliş açısı olarak tanımlanır.

Dizi kovaryans matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$R_{xx} = E[X(t)X^H(t)] \quad (8)$$

Ağırlıklandırma vektörü aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$W = [W_1, \dots, W_N] \quad (9)$$

Son olarak dizi sinyali işlenmiş güç çıkışı sonrası aşağıdaki gibi ağırlıklandırılır [18] [20] [21] [22]:

$$P_{out} = E\{|y(n)|^2\} = E\{|W^H X|^2\} = W^H R_{xx} W \quad (10)$$

3.3. MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) Algoritması

MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) algoritması ilk olarak 1967 yılında Capon [23] tarafından geliştirilmiştir. Lineer minimum ölçüte göre, yani belirli kısıtlamalar altında, sinyal gücü minimize edilebilir.

MVDR algoritması, sinyal-(gürültü+girişim) oranını maksimize ederek huzmeleme ağırlıklarını belirler:

$$\frac{|W^H S|^2}{W^H R_{xx} W} = A^2 \frac{|W^H a(\theta_p)|^2}{W^H R_{xx} W} \quad (11)$$

W; huzmeleme ağırlıklarını, S; Antenlerdeki sinyal değerini, a(θ); Yönlendirme vektörünü, A²: Gücü, R_{xx}; dizi kovaryans matrisini ifade eder.

SNR oranı, ağırlıklara uygulanan herhangi bir ölçek faktörü altında değişmez olduğu için, bu kriterin eşdeğer bir formülasyonu, bir yön kısıtlamaya tabii olarak gürültü çıktısını en aza indirmektir:

$$W^H a(\theta_p) = 1 \quad \min_w P_{out} = E\{[y(n)]^2\} \quad (12)$$

Bu koşullu minimizasyon probleminin çözümü, MVDR optimal ağırlık vektörü olarak:

$$W_{MVDR} = \frac{R_{xx}^{-1} a(\theta_p)}{a^H(\theta_p) R_{xx}^{-1} a(\theta_p)} \quad (13)$$

şeklinde verilir.

Girişim bastırma işleminden sonraki sinyal aşağıdaki gibi ifade edilir [18] [24]:

$$S_{MVDR}(n) = W_{MVDR}^H a(\theta_p) s(n) \quad (14)$$

MVDR algoritması, ağırlık vektörlerinin hesaplanması için yalnızca hedef sinyalin yönüne ihtiyaç duyar. Bu girdi ile birlikte sistem hassasiyetini hedef sinyal yönünde artırır, girişim/karıştırma sinyalini toplam gürültüyü ve korelasyonsuz gürültüyü azaltır. [25]

MVDR huzme oluşturucularının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Gürültü ve paraziti optimal bir çözüm içinde ele alır.

- Girişim kaynaklarının doğrultusunda anten örüntüsünde boşluklar oluşturur ve o yönden gelen yayınları etkin bir şekilde bastırmayı amaçlar.
- Yan loblar daha küçük ve çıkıntısızdır [24].
- Sadece hedef sinyal yönünün bilinmesi yeterlidir.

MVDR huzme oluşturucuların dezavantajları olarak; dizi parametrelerindeki hatalara ve geliş yönündeki hatalı parametrelere karşı hassas olmaları, hedef sinyalin çok yönlü geldiği ve farklı yönlerde dağıldığı durumlarda hedef sinyalin sıfırlanmasına meyilli olmaları gösterilebilir [25]. MVDR algoritması, hedef sinyalin belirlenen yönden açısal olarak küçük sayılabilecek kadar farklı geldiği durumlarda, hedef sinyalin sıfırlanmasına meyillidir.

3.4. LCMV (Linear Constraint Minimum Variance) Algoritması

LCMV huzme oluşturucu; Windrow tarafından, otomatik ve basit bir şekilde dizi ağırlıklarının ayarlanabilmesi için “Minimum Ortalama Kare Hatası (MMSE)” temel alınarak geliştirilmiştir [26] [27].

Sinyalde bozulma yaratmadan, belirli bir yönden gelen girişim/karıştırma sinyalini bastırmak ve farklı yönlerden gelen sinyalleri geçirmek için anten ağırlıklarını ayarlar.

Dizi çıkışı (y) ve çıkış gücü (P_{out}) aşağıdaki gibi yazılır:

$$y = W^H X \quad (15)$$

$$P_{out} = \{E|y|^2\} = E\{W^H X X^H W\} = W^H R_{xx} W \quad (16)$$

MVDR algoritması başlığındaki yön kısıtlaması ters çevrilerek aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$a^H(\theta_p)W = 1 \quad (17)$$

Aynı formülasyonun aşağıdaki gibi 0'a eşit olması, girişim yönünün kısıtlandırılarak sıfırlanmasına imkân tanır:

$$a^H(\theta_p)W = 0 \quad (18)$$

17 ve 18 numaralı koşullu minimizasyon problemleri ile bir matris kısıtlaması ($CW = g$) kullanarak çoklu kısıtlamaların yapılması mümkün hale gelir.

C: Kısıtlama matrisini, $g = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$: yanıt vektörünü (hedef sinyal sayısı kadar 1, girişim sinyali sayısı kadar 0) ifade eder.

Kısıtlama matrisi aşağıdaki gibi açılabilir:

$$[C_d^H \ C_i^H]W = g \quad (19)$$

$C_d = [u(\theta_1) \ u(\theta_2) \ \dots \ u(\theta_q)]$: yönü bilinen kullanışlı sinyal vektörlerinin matris gösterimi ($N \times q$ matris) olarak ifade edilir.

$$u(\theta_i) = u_i(t)a(\theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (20)$$

$C_i = [J(\theta_{q+1}) \ J(\theta_{q+2}) \ \dots \ J(\theta_K)]$: yönü bilinen karıştırıcı vektörlerinin matris gösterimi ($N \times (K-q)$ matris) olarak ifade edilir.

$$J(\theta_k) = J_k(t)a(\theta_k), \quad k = q+1, q+2, \dots, K \quad (21)$$

K; Kısıtlandırma sayısını, $a(\theta_i)$; hedef sinyal için yönlendirme vektörünü, $a(\theta_k)$; girişim sinyali için yönlendirme vektörünü ifade eder.

LCMV algoritmasına sabit bir anten örüntüsü tanımlamak için aşağıdaki durum kullanılır:

$$\min_W W^H R_{xx} W$$

$$CW = g \quad (22)$$

En uygun ağırlıklandırmayı belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılır [24]:

$$W_{LCMV} = R_{xx}^{-1} C^H (C R_{xx}^{-1} C^H)^{-1} g \quad (23)$$

LCMV algoritmasında hem hedef sinyal yönü, hem de MVDR algoritmasından farklı olarak girişim sinyalinin yönü de algoritma girdisi olarak kullanılabilir. Böylece, girişim sinyalinin geldiği yönde mutlak bir bastırma uygulayabilir.

LCMV algoritmasında, hedef sinyalin geliş yönünün tayininde oluşabilecek hatalara karşı, hedef yön boyunca birden fazla kısıtlayıcı matris kullanılabilir. Böylece, hedef sinyalin belirlenen yönden küçük açısal farklar ile geldiği durumlarda sinyalin alınabilmesi için ana lobun huzme genişliği arttırılmış olur [28] [29] [30].

3.5. PI (Power Inversion) Algoritması

PI algoritması LCMV ölçütünü esas alır. Compton [31] tarafından 1970'li yılların sonunda geliştirilmiştir. PI algoritması, (19) numaralı denklemde; C, kısıtlama matrisinin ilk elemanının birim değer, diğer elemanlarının 0 değerinde olduğu özel bir durumunu ifade eder. g yanıt vektörü değeri ise 1'e eşit bir skalerdir [32].

$$C = [1, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (24)$$

$$g = 1 \quad (25)$$

Kısıtlandırma koşulu aşağıdaki gibidir:

$$W^H C = 1 \quad (26)$$

Ağırlıklandırma faktörünün ilk hattının kısıtlama faktörü her zaman 1 değerine eşit olarak alınır. Böylece çıkış gücü minimize edilmiş olunur. PI algoritmasının optimal ağırlıklandırma vektörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$W_{PI} = R_{xx}^{-1} C (C^H R_{xx}^{-1} C)^{-1} \quad (27)$$

Girişim bastırma işleminden sonraki sinyal aşağıdaki gibi ifade edilir [18]:

$$S_{PI}(n) = W_{PI}^H a(\theta_p) s(n) \quad (28)$$

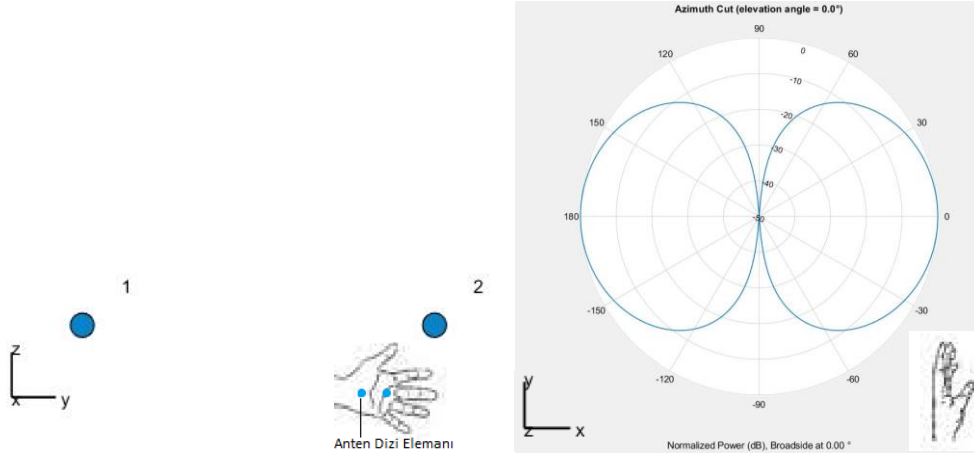
PI algoritması hedef sinyalin veya girişim/karıştırma sinyalinin yönünü girdi olarak kullanmaz. Bu sayede, hedef sinyalin veya girişim/karıştırma sinyalinin yönünün belirli olmadığı koşullarda kullanılabilir.

PI algoritması, hedef sinyalin girişim/karıştırma sinyaline olan güç oranına bağlı olarak, anten örüntüsünde girişim/karıştırma yönünde boşluklar oluşturur. Böylece girişim/karıştırma sinyalinin bastırılması amaçlanır. Ancak bu bastırma, MVDR ve LCMV algoritmalarındaki kadar güçlü değildir. Yine de girişim/karıştırma sinyalinin gücünün hedef sinyale oranla çok güçlü olduğu durumlarda iyi sonuçlar verir [33].

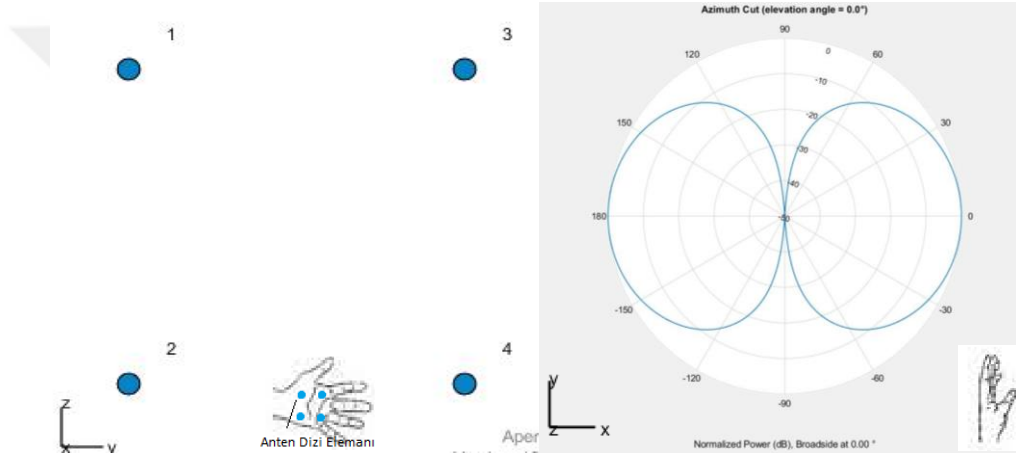
4. GİRİŞİM BASTIRMA BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölüm, MVDR, LCMV ve PI tekniklerinin; girişim/karıştırma sinyalinin tek/birden fazla kaynaktan geldiği durumlardaki performanslarının, ayrı ayrı ve karşılaştırılmalı benzetim sonuçlarını içermektedir.

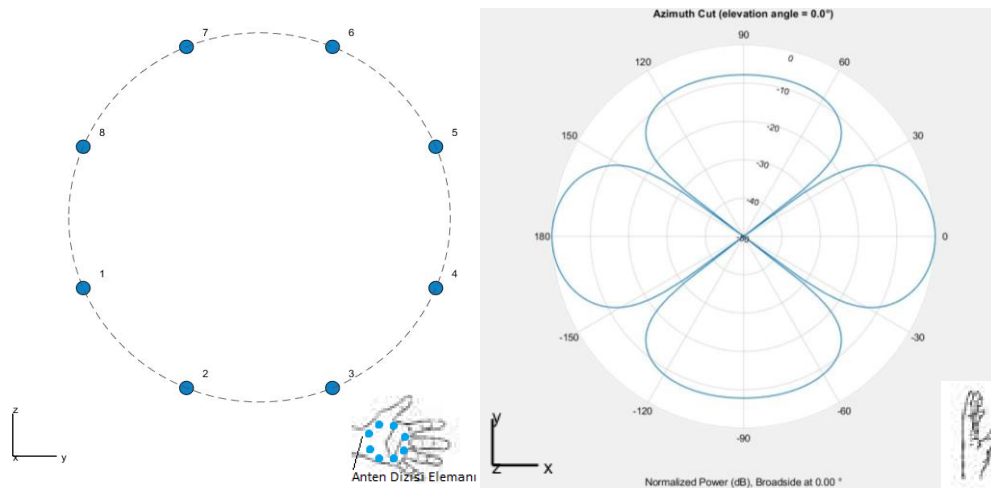
- Yorumlama kolaylığı için açılar yanca açısı olarak verilmiştir ve yükseliş açısı her zaman 0 derece olarak alınmıştır. Tüm benzetimlerde hedef sinyal yönü 0 derece olarak alınmıştır ve girişim sinyali hedef sinyalin 100 katı güçte seçilmiştir.
- Tüm benzetimlerde, hedef sinyal; darbe yükseliş zamanı 0,201. saniye, darbe düşüş zamanı 0,205. saniye olan darbeli bir sinyal olarak tanımlanmıştır.
- Anten dizilerinin diziliş şekilleri ve eleman sayılarının kullanılan yöntemlere etkilerini incelemek amacı ile 2 elemanlı, 4 elemanlı karesel; 8 elemanlı dairesel ve 8 elemanlı karesel eş anten dizileri kullanılmıştır.
- 2 elemanlı, 4 elemanlı karesel ve 8 elemanlı karesel anten dizilerinde yatay ve dikey ekseninde anten dizisi elemanları arası mesafe $\lambda/2$ değerinde alınmıştır. 8 elemanlı dairesel anten dizilerinde çember üzerindeki anten dizisi elemanları arası mesafe $\lambda/2$ değerinde alınmıştır. Anten dizisi elemanları eşyönlü (isotropic) anten olarak belirlenmiştir. Gelen dalganın düzlem dalga modelinde ve ışığın boşluktaki hızında geldiği varsayılmıştır ve frekansı 1500 MHz olarak alınmıştır.
- Benzetim çalışmalarında antenlerin nişan hattı (boresight) +x yönüne, hedef sinyalin geldiği yöne doğrultulmuştur. Hedef sinyal 0 derecelik yanca açısı ile gelirken, girişim sinyalleri x-y düzleminde farklı yanca açılarında ayarlanmıştır. Şekil 4.1'den Şekil 4.36'ya kadar görüleceği gibi, tüm benzetim çalışmalarında anten örüntüleri 0 derece yükseliş açısında yanca kesiti alınarak, iki boyutlu sunulmuştur. Benzetimlerde kullanılan 4 farklı anten dizisinin geometrileri ve girişim bastırma yöntemleri kullanılmadan önceki anten örüntüleri Şekil 4.1'den Şekil 4.4'e kadar verilmiştir. Anten geometrilerinin anlaşılabilmesi için, görsellerin altındaki el sembolü ile belirtildiği gibi anten geometrileri hedef kaynak yönünden (-x yönüne bakarak) görülecek şekilde sunulmuştur.



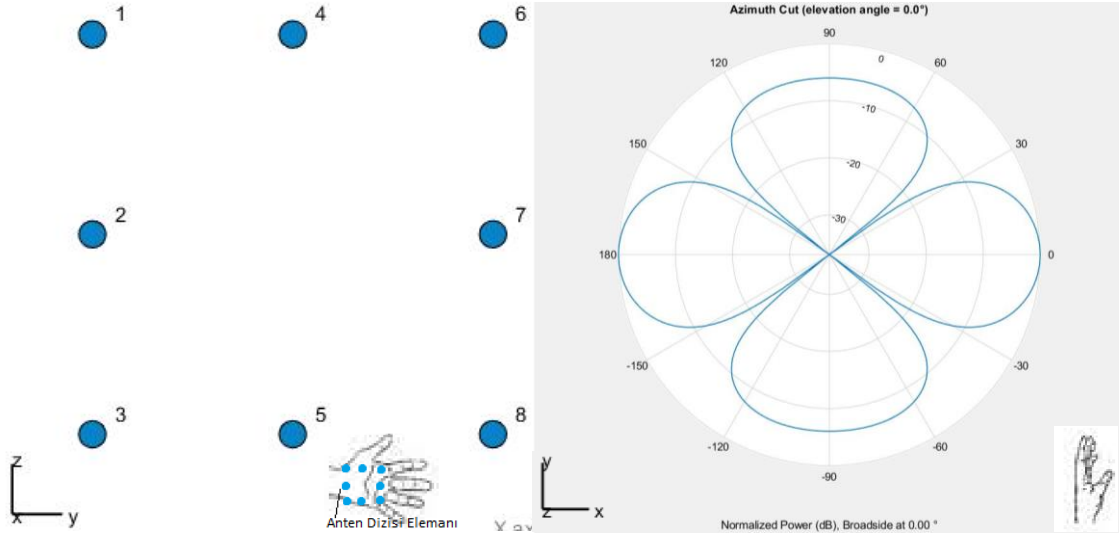
Şekil 4.1 2'li Anten Dizi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizisinin Anten Örüntüsü (sağ)



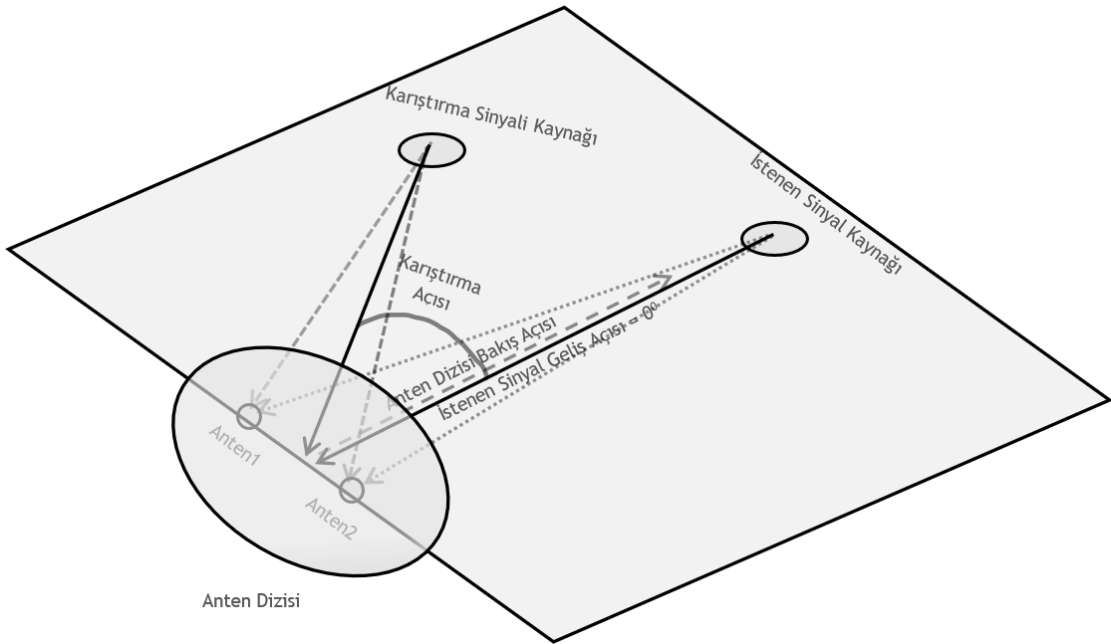
Şekil 4.2 4'lü Karesel Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizisinin Anten Örüntüsü (sağ)



Şekil 4.3. 8'li Dairesel Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizisinin Anten Örüntüsü (sağ)



Şekil 4.4. Anten Dizisi Elemanlarının Diziliş Geometrisi (sol) ve Anten Dizisinin Anten Örüntüsü (sağ)



Şekil 4.5. Benzetimlerde Anten Dizilerinin İstene Sinyale Göre Konumlandırılması

Tüm benzetimlerde, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi anten dizileri, nişan hatları hedef sinyal yönünde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Anten dizisi elemanları arasında belli bir mesafe olduğundan, her bir anten dizisi elemanına ulaşan sinyalin diğer anten dizisi elemanlarına ulaşan sinyaller ile aralarında olan genlik ve faz farkları anten ağırlıklandırılmalarının belirlenmesine olanak tanımıştır.

4.1. MVDR Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları

MVDR yönteminde hedef sinyal yönü bilinir, girişim sinyali yönü bilinmez. Bu nedenle, hedef sinyal yönünün bilindiği noktadan noktaya haberleşme sistemlerinde bilinmeyen bir yönden girişime maruz kalınan problemler için kullanımı uygundur. Benzetim çalışmalarında algoritmaya hedef sinyal yönü girdi yapılmıştır. Algoritma çıktısı olarak elde edilen ağırlıklandırma vektörleri ile, istenen sinyal yönünde anten dizisi kazancı maksimize edilirken, girişim sinyali/sinyalleri yönünde kazanç sınırlama (nulling) amaçlanır. Benzetim parametreleri aşağıdaki gibidir:

İstenen sinyal parametreleri:

Frekans: 1500 MHz, darbe modülasyonlu

Güç: 1 W

Gürültü: 0,5 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 3 dB

Sinyal geliş yönü: yanca açısı: 0 derece, yükseliş açısı: 0 derece

Baraj gürültü girişim sinyali parametreleri:

Frekans: 1500 MHz

Güç: 100 W

Gürültü: 10 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 10 dB

Girişim Sinyali geliş yönleri: Her Benzetim için değişmektedir. Değerler sonuçlar ile verilmiştir.

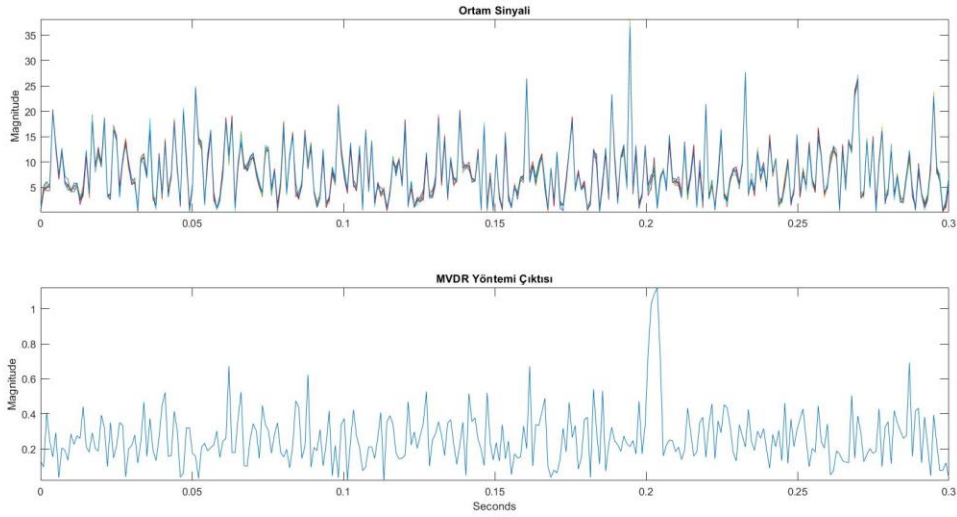
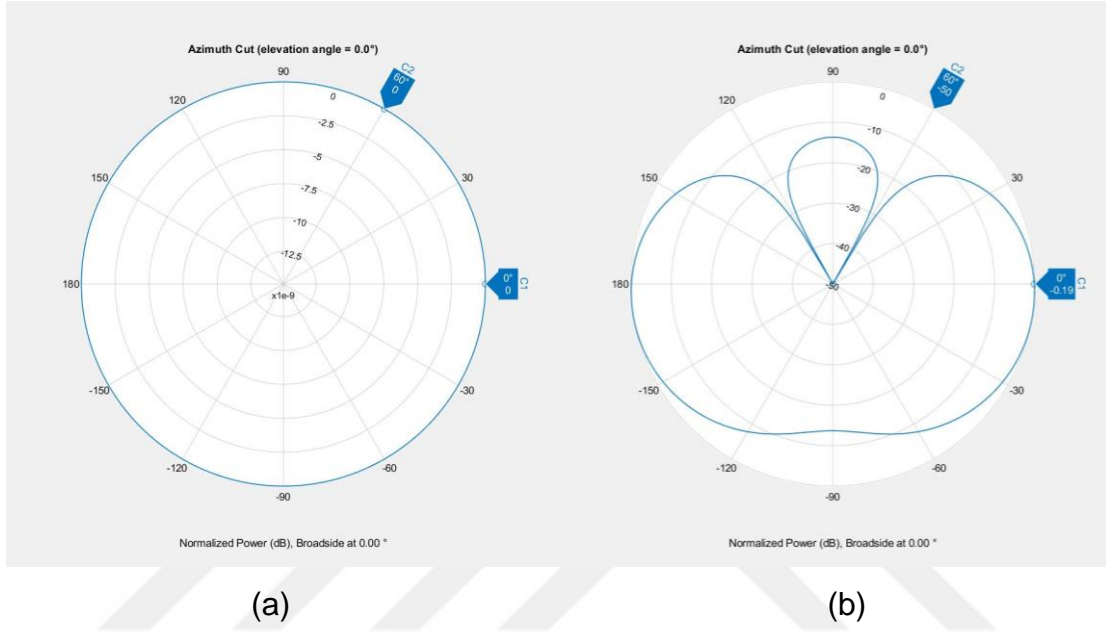
Anten parametreleri:

Frekans aralığı: 1300-1700 MHz

Komşu antenler arası boşluk: 0,1 m

Benzetim çalışmalarında, hedef sinyalin ve girişim sinyalinin anten dizisi önüne düzlem dalga olarak geldiği durum ele alınmıştır. Anten önüne gelen gürültü eklenmiş hedef sinyal ve gürültü eklenmiş girişim sinyali toplanarak anten dizisi

önündeki ortam sinyali elde edilmiştir. Anten dizisi parametreleri, frekans, hedef sinyal yönü ve ortam sinyali verileri MVDR algoritmasına girdi yapılarak MVDR ağırlıklandırmaları elde edilmiş ve ağırlıklandırılmış anten örüntüleri çizdirilmiştir. İstenen sinyal ve girişim sinyali yönündeki bastırma seviyeleri bulunmuş ve girişim/sinyal bastırma seviyeleri belirlenmiştir.

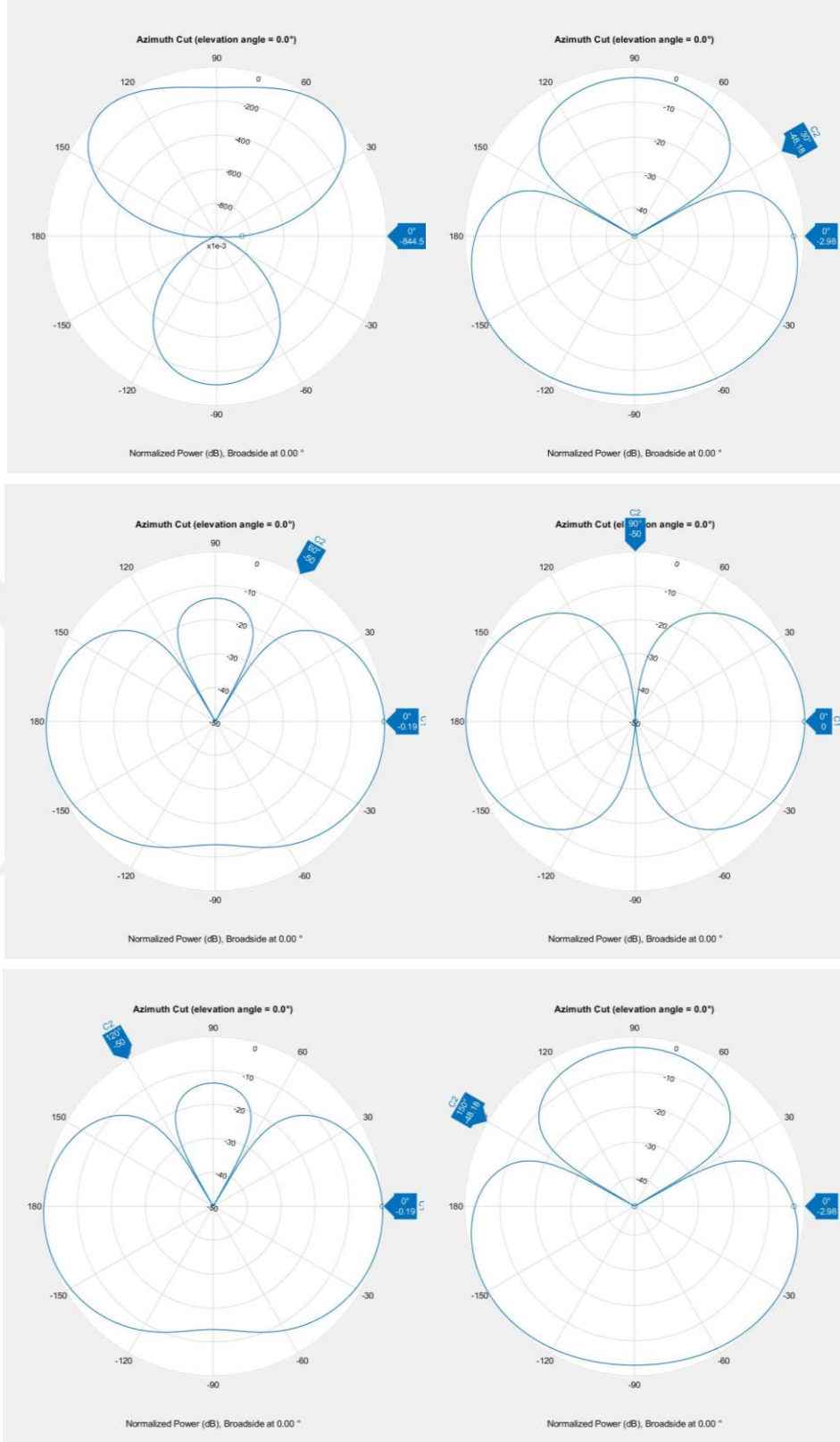


(c)

Şekil 4.6. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile MVDR Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c-alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği

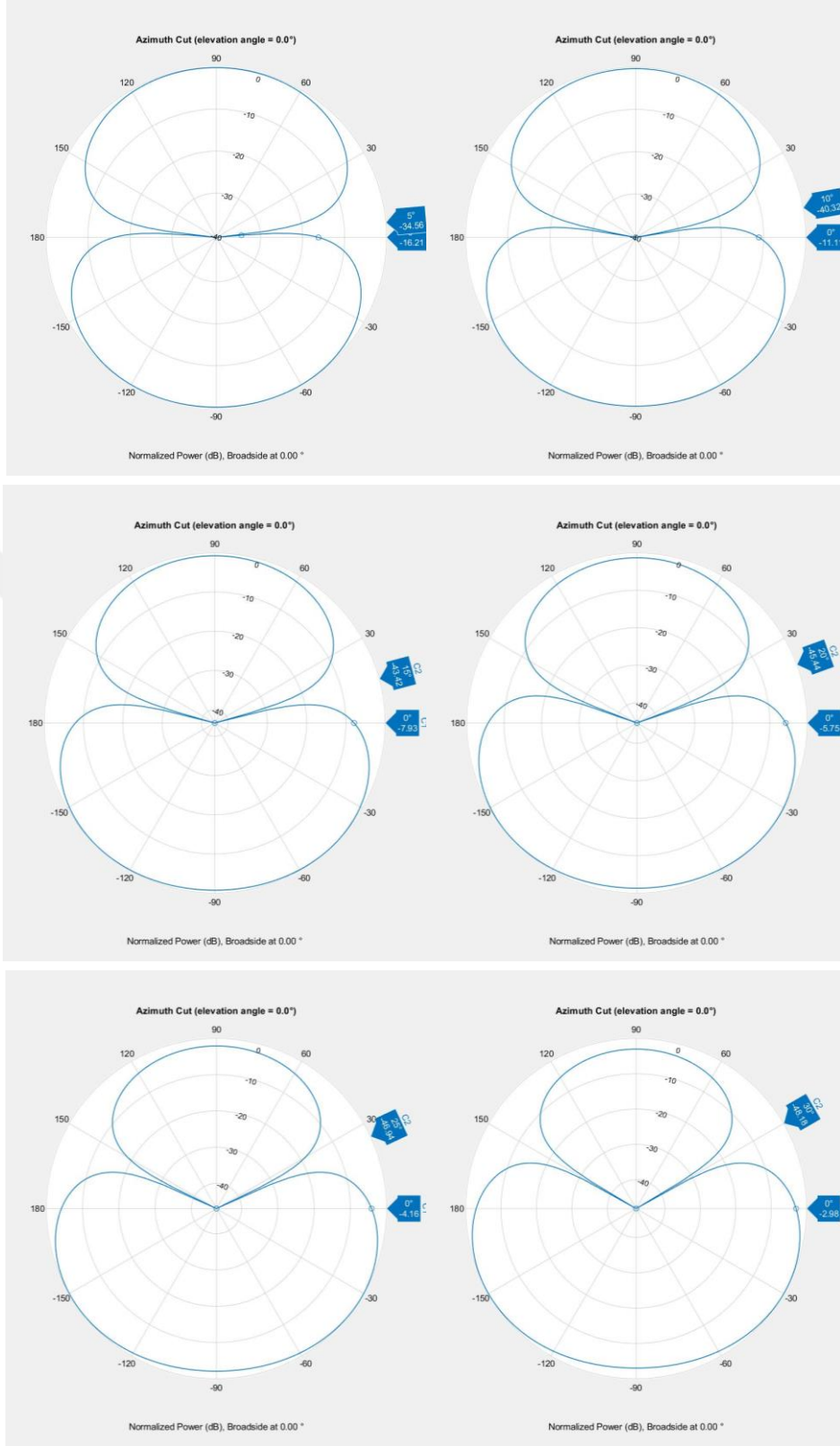
Uyarlamalı anten dizileri kullanılarak MVDR tekniğinin uygulanması ile anten örüntüsünde değişiklikler meydana getirilerek; Şekil 4.6-a ve Şekil 4.6-b'de görüldüğü gibi, tek bir eşyönlü anten ile oluşan girişim/sinyal seviyesine göre daha az girişim/sinyal seviyesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.6-c'de görülmektedir ki, üst grafikte, hedef sinyal MVDR yöntemi uygulanmadan önce baraj gürültü girişimi altında kalmaktadır. MVDR yöntemi uygulandıktan sonra, sinyal çıktısında baraj gürültü girişimi etkisinin bastırıldığı ve hedef sinyalin (yükseliş zamanı 0,2. saniyede olan darbe modülasyonlu sinyal) ve ölçülebilir duruma geldiği görülmektedir.

2'li anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda MVDR uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.7'de ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.8'de ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.7. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.8. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

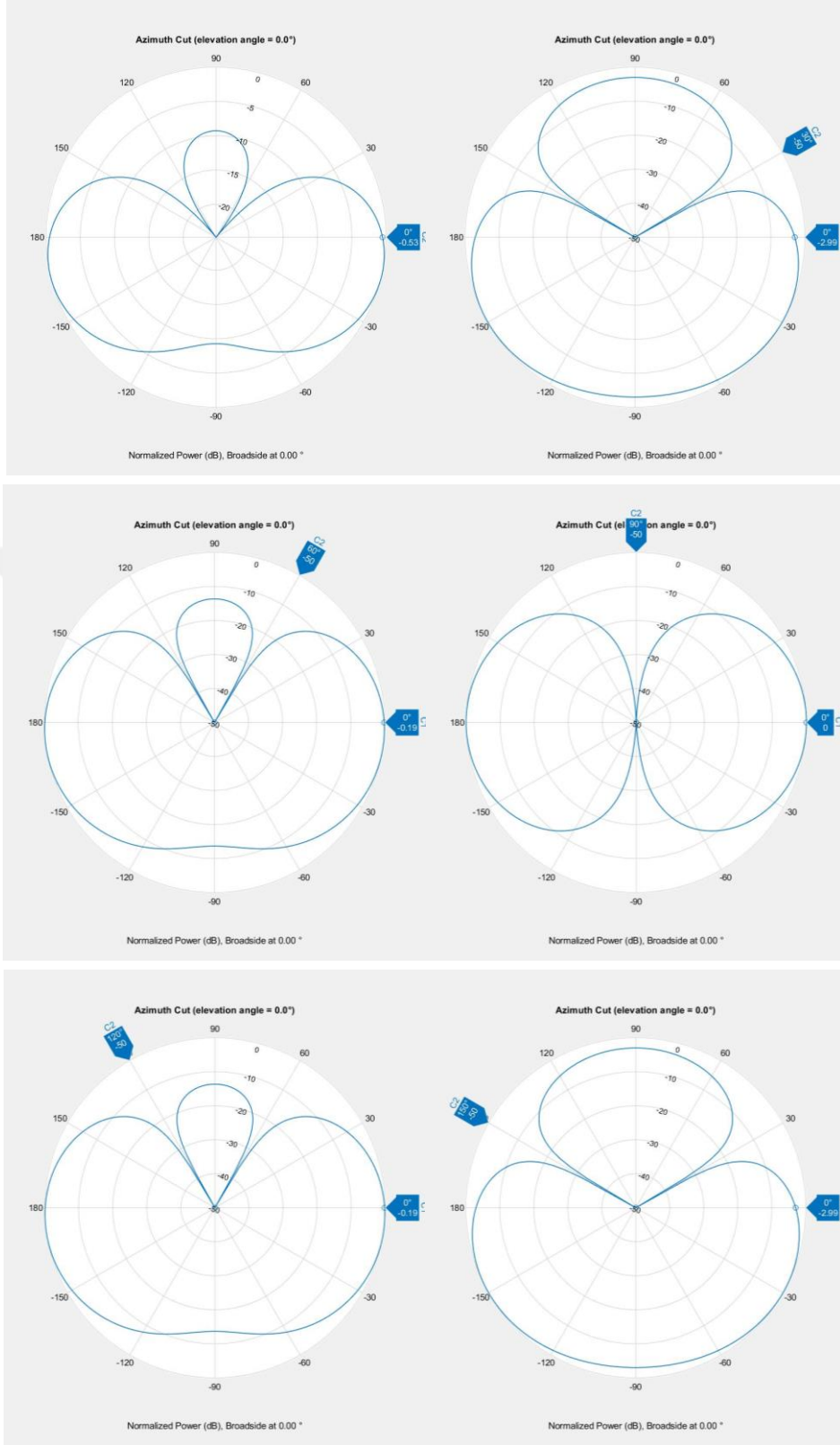
Çizelge 4.1. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-844,50	-844,50	0,00
30	-2,98	-48,18	45,23
60	-0,19	-50,00	49,81
90	0,00	-50,00	50,00
120	-0,19	-50,00	49,81
150	-2,98	-48,18	45,23
180	-844,50	-844,50	0,00

Çizelge 4.2. İkili Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

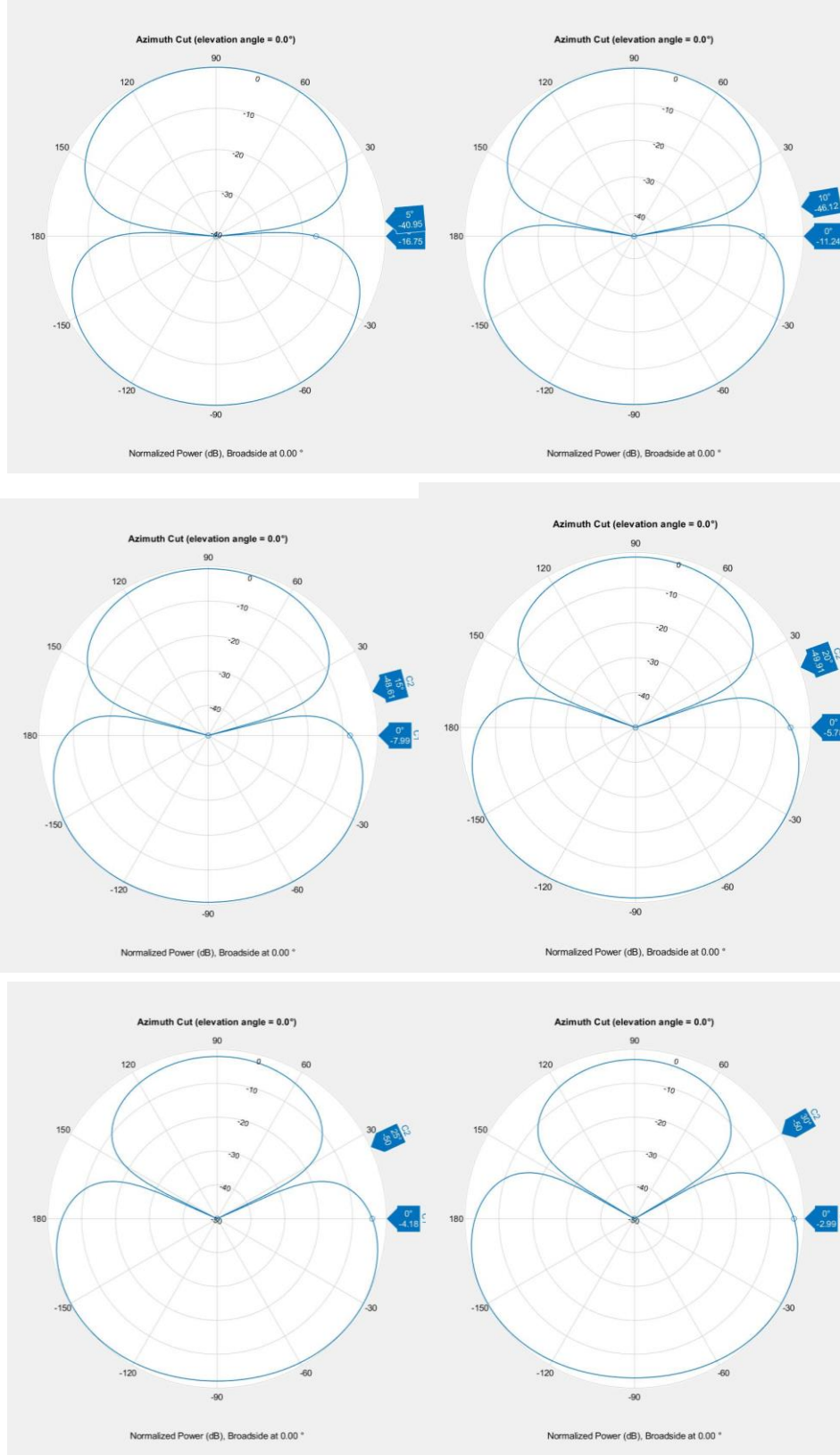
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-18,40	-20,61	2,21
2	-19,90	-26,63	6,73
3	-18,95	-30,16	11,21
5	-16,21	-34,56	18,35
10	-11,11	-40,32	29,21
15	-7,93	-43,42	35,49
20	-5,75	-45,44	39,69
25	-4,16	-46,94	42,78
30	-2,98	-48,18	45,23

4'lü karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda MVDR uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.9'da ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.10'da ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.9. Dörtlü Kareyel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.10. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

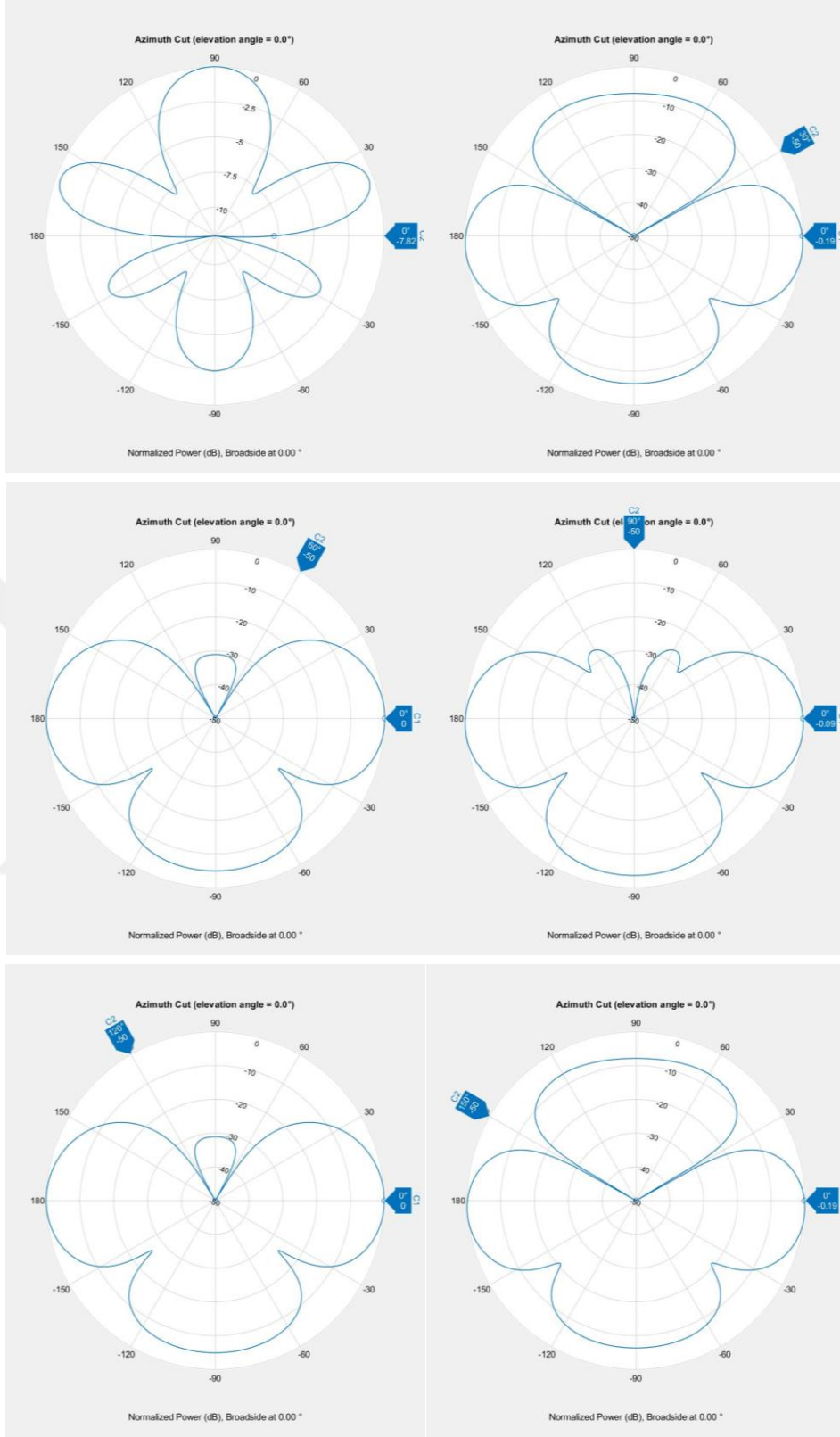
Çizelge 4.3. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Yönündeki (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-0,53		-0,53		0,00
30	-2,99		-50,00,		47,01
60	-0,19		-50,00		49,81
90	0,00		-50,00		50,00
120	-0,19		-50,00		49,81
150	-2,99		-48,18		45,19
180	-0,53		-0,53		0,00

Çizelge 4.4. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

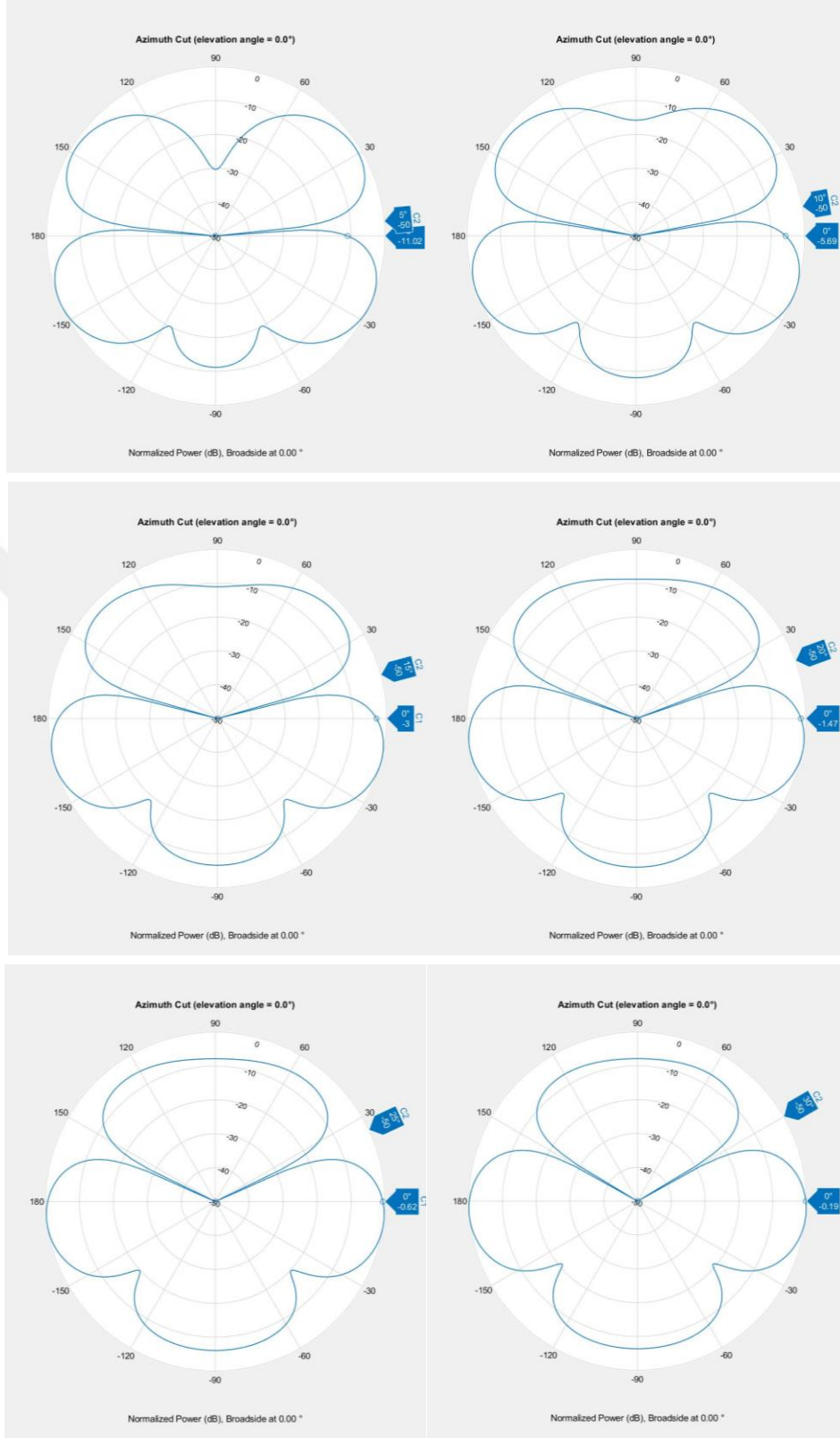
Girişim Yönü (derece)	İstenen Yönündeki (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-23,23		-27,62		4,39
2	-22,38		-33,45		11,07
3	-20,31		-36,82		16,51
5	-16,75		-40,95		24,20
10	-11,24		-46,12		34,88
15	-7,99		-48,61		40,62
20	-5,78		-49,91		44,13
25	-4,18		-50,00		45,82
30	-2,99		-50,00		47,01

8'li dairesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda MVDR uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.11'de ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.12'de ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.11. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.12. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

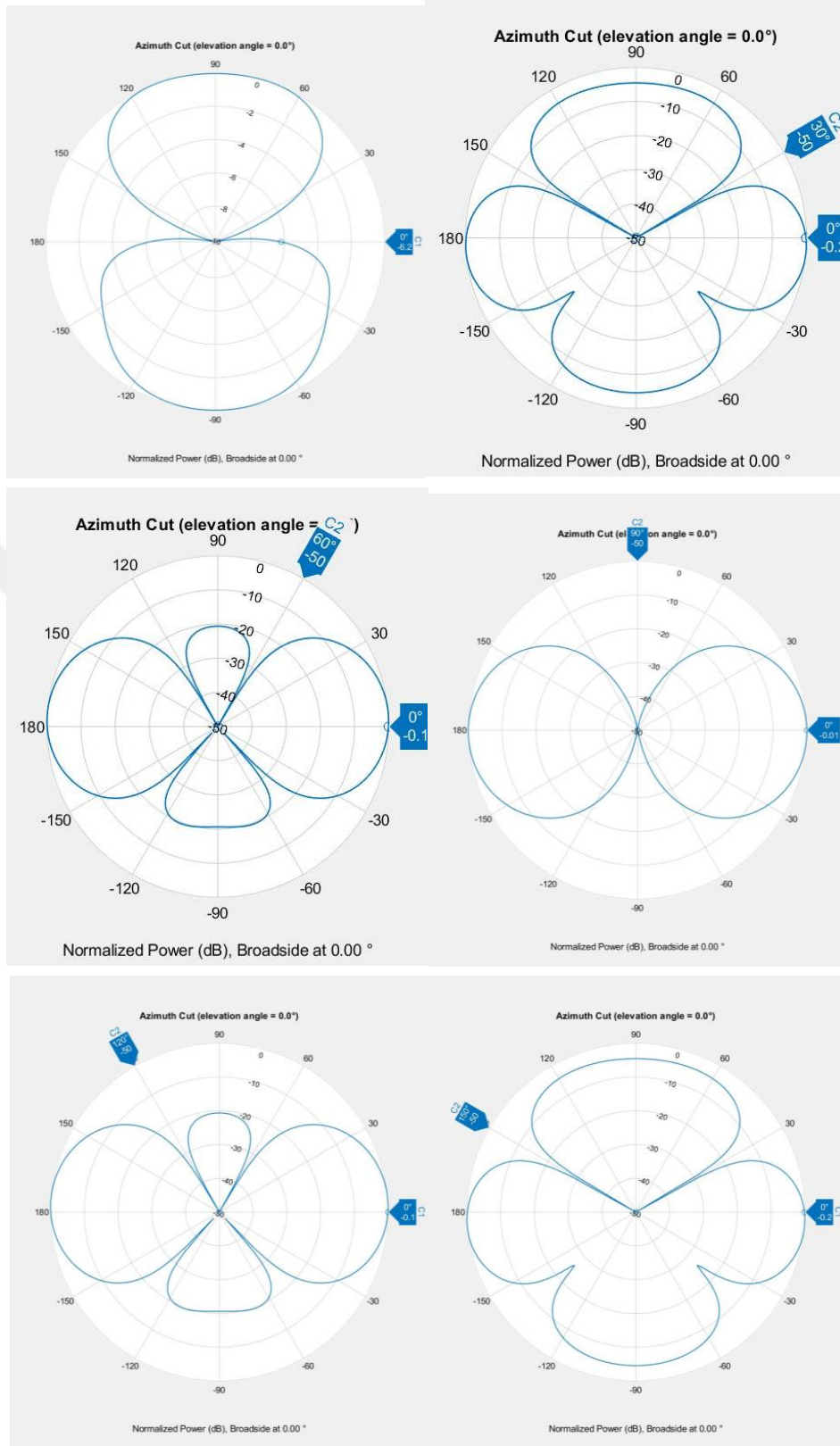
Çizelge 4.5. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-7,82	-7,82	0,00
30	-0,19	-50,00	49,81
60	0,00	-50,00	50,00
90	-0,09	-50,00	49,91
120	0,00	-50,00	50,00
150	-0,19	-50,00	49,81
180	-7,82	-7,82	0,00

Çizelge 4.6. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

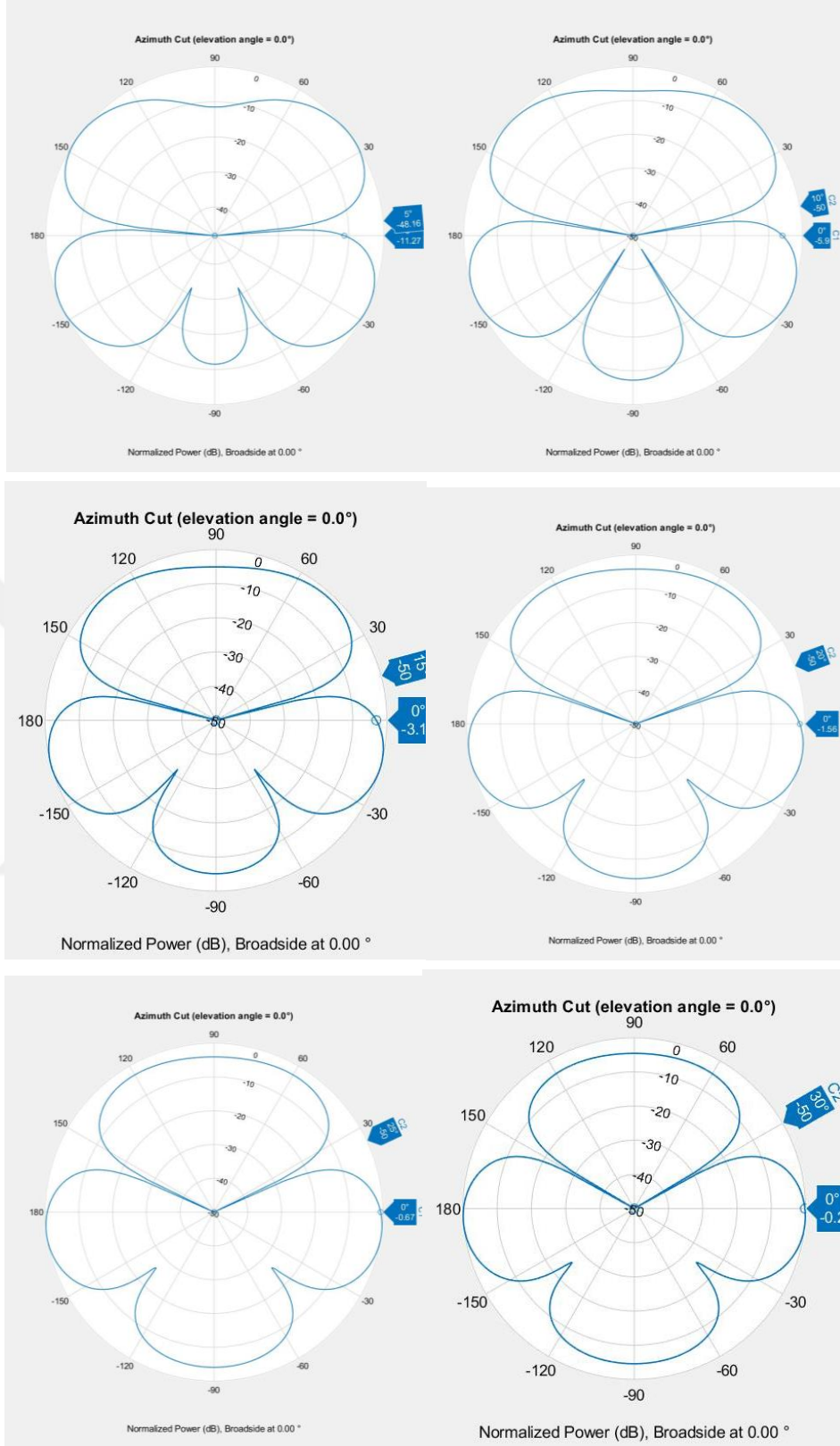
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-22,95	-37,47	14,52
2	-18,32	-44,49	26,17
3	-15,14	-48,80	33,66
5	-11,02	-50,00	38,98
10	-5,69	-50,00	44,31
15	-3,00	-50,00	47,00
20	-1,47	-50,00	48,53
25	-0,62	-50,00	49,38
30	-0,19	-50,00	49,81

8'li karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda MVDR uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.13'te ve Çizelge 4.7'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.14'te ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.13. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.14. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

Çizelge 4.7. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-6,20	-6,20	0,00
30	-0,20	-50,00	49,80
60	-0,10	-50,00	49,90
90	-0,01	-50,00	49,99
120	-0,10	-50,00	49,90
150	-0,20	-50,00	49,80
180	-6,20	-6,20	0,00

Çizelge 4.8. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile MVDR Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-22,94	-34,33	11,39
2	-18,63	-41,03	22,40
3	-15,46	-44,25	28,79
5	-11,27	-48,16	36,89
10	-5,90	-50,00	44,10
15	-3,10	-50,00	46,90
20	-1,56	-50,00	48,44
25	-0,67	-50,00	49,33
30	-0,20	-50,00	49,80

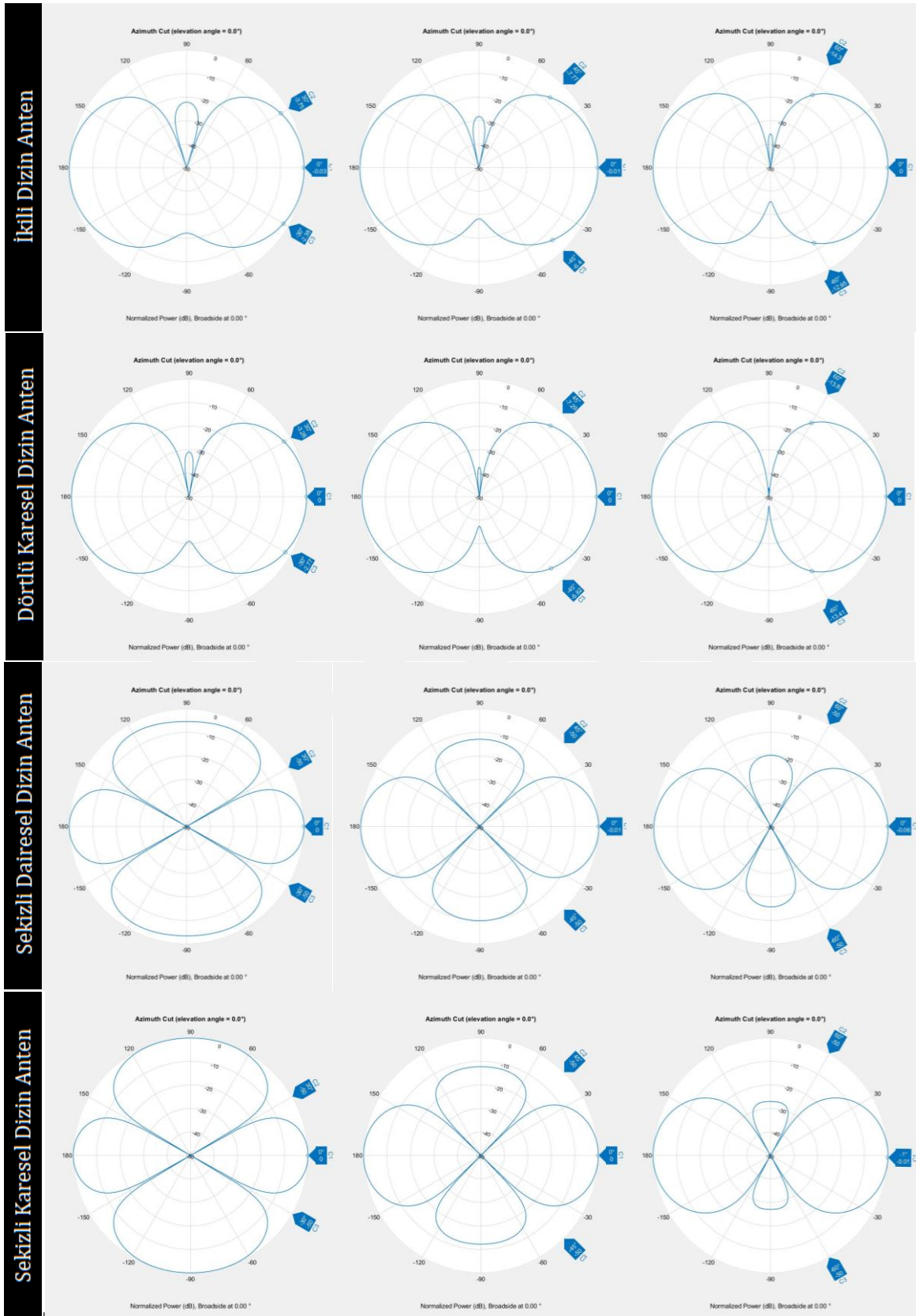
Tüm anten dizisi geometrileri için; girişim sinyalinin iki ayrı yönden geldiği durumda MVDR uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.15'te ve Çizelge 4.9'de verilmiştir.

Karıştırma
Yönleri
(derece)

(-30; 30)

(-45; 45)

(-60;60)



Şekil 4.15. İki Girişim Sinyali ile MVDR Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri

Çizelge 4.9. İki Girişim Sinyali ile MVDR Algoritması Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi			4'lü Karesel Anten Dizisi			8'li Dairesel Anten Dizisi			8'li Karesel Anten Dizisi		
	İstenen Sinyal Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim /Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim /Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim /Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü ndeki Bastırma (dB)	Girişim /Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
(-30, 30°)	-0,03	-2,38; -3,75	2,35; 3,72	0,00	-2,77; -3,26	2,77; 3,26	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-45, 45°)	-0,01	-6,40; -7,77	6,39; 7,76	0,00	-6,82; -7,29	6,82; 7,29	-0,01	-50,00; -50,00	49,99; 49,99	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-60, 60°)	0,00	-12,94; -14,30	12,94; 14,30	0,00	-13,41; -13,80	13,41; 13,80	-0,06	-50,00; -50,00	49,94; 49,94	-0,01	-50,00; -50,00	49,99; 49,99

Tüm sonuçlar incelendiğinde, hedef sinyalle girişim sinyalinin yakınlığına göre, olabildiğince hedef sinyal yönünde maksimum kazanç elde edilecek şekilde anten örüntüsünün ağırlıklandırıldığı görülmüştür. Girişim sinyalinin yönlerinin değişmesi ile, bastırma açısının da başarılı bir şekilde girişim sinyali yönünde değiştiği görülmektedir. Tüm sonuçlarda görülmektedir ki, MVDR algoritması girişim sinyali yönünde anten ağırlıklandırmalarında her açıda kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır.

Anten dizisindeki eleman sayısı azaldıkça, hedef sinyal ile girişim sinyali arasında görece küçük açılar olduğu durumlarda hedef sinyal yönündeki kazanç ve girişim sinyali yönündeki bastırma azalmaktadır. Bu nedenle hedef sinyal ile girişim sinyali arasındaki alınacak güç oranı da azalmaktadır. Çizelge 4.10'da görülmektedir ki, girişim sinyalinin hedef sinyalden 1-20 derece farkla geldiği durumlarda, 8'li anten dizileri kullanmak 2'li ve 4'lü anten dizileri kullanmaya göre daha yüksek bastırma oranları sağlamaktadır. Kaynakların geliş açıları arasındaki farkın 20 dereceden

büyük olduğu durumlarda ise anten sayısının bastırma oranları üzerinde belirgin bir avantajı görülmemektedir. Yine Çizelge 4.10'da görülmektedir ki, girişim sinyalinin hedef sinyalden 1-5 derece farkla geldiği durumlarda, 8'li dairesel anten dizisi yerleşimi 8'li karesel anten dizisi yerleşimine göre 2-3 dB daha fazla bastırma oranı sağlamaktadır.

Kaynaklar arasındaki fark 3 derece ve üzeri olduğunda, tüm örneklerde 10 dB'nin üzerinde girişim bastırma oranları elde edilmiştir. Bu bastırmanın yeterli olduğu kullanımlarda, anten dizisi eleman sayısı azaltılarak maliyet düşürülebilir.

İki girişim sinyali verilen benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre, iki girişim sinyalinin olduğu durumda 8'li anten dizilerinin 2'li ve 4'lü anten dizilerine göre belirgin bir avantajı olduğu görülmektedir. 8'li anten dizilerinde 2 girişim kaynağı olduğu durumda, tüm açı değerlerinde normalize değerlere göre mutlak bastırma sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 4.10. Kullanılan Anten Dizilerine Göre MVDR Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	4'lü Karesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Dairesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Karesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,21	4,39	14,52	11,39
2	6,73	11,07	26,17	22,40
3	11,21	16,51	33,66	28,79
5	18,35	24,20	38,98	36,89
10	29,21	34,88	44,31	44,10
15	35,49	40,62	47,00	46,90
20	39,69	44,13	48,53	48,44
25	42,78	45,82	49,38	49,33
30	45,23	47,01	49,81	49,80
60	49,81	49,81	50,00	49,90
90	50,00	50,00	49,91	49,99
120	49,81	49,81	50,00	49,90
150	45,23	45,19	49,81	49,80
180	0,00	0,00	0,00	0,00

4.2. LCMV Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları

LCMV yönteminde hedef sinyal yönü/yönlerinden ve girişim sinyali yönü/yönlerinden bir veya birkaçı bilinebilir. Bu nedenle, hedef sinyal yönünün bilindiği, girişim kaynaklarının aynı sistemdeki göndermeçler olduğu dahili/öz-girişim problemleri için kullanımı uygundur. Benzetim çalışmalarında algoritmaya hedef sinyal yönü en az bir girişim sinyali yönü girdi yapılmıştır. Algoritma çıktısı olarak elde edilen ağırlıklandırma vektörleri ile, istenen sinyal yönünde anten dizisi kazancı maksimize edilirken, girişim sinyali/sinyalleri yönünde kazanç sıfırlama (nulling) amaçlanır. Benzetim parametreleri aşağıdaki gibidir:

İstenen sinyal parametreleri:

Frekans: 1500 MHz, darbe modülasyonlu

Güç: 1 W

Gürültü: 0,5 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 3 dB

Sinyal geliş yönü: yanca açısı: 0 derece, yükseliş açısı: 0 derece

Baraj gürültü girişim sinyali parametreleri:

Frekans: 1500 MHz

Güç: 100 W

Gürültü: 10 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 10 dB

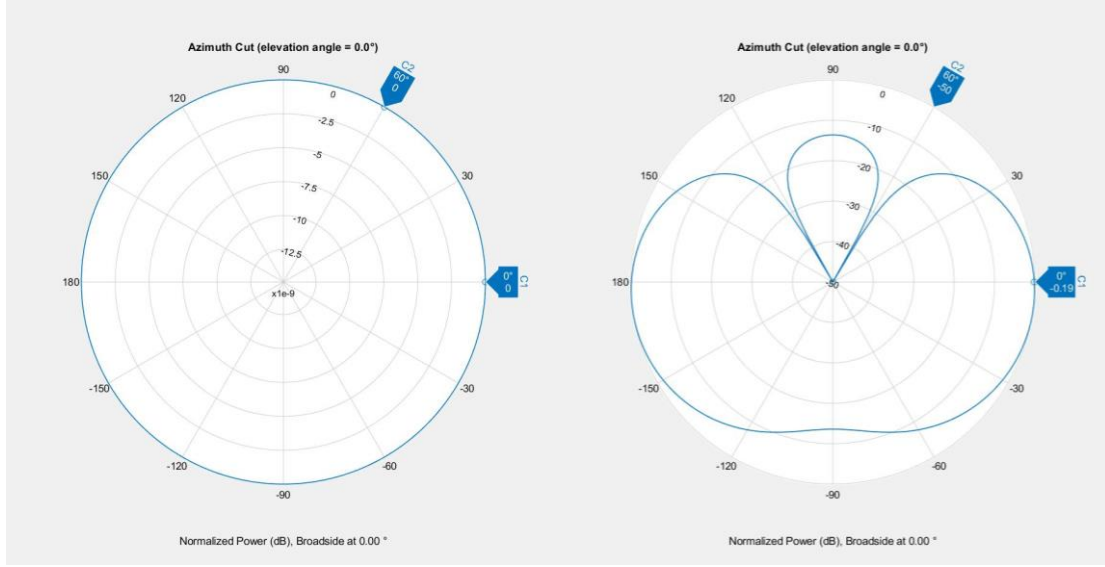
Sinyal geliş yönleri: Her benzetim için değişmektedir. Değerler sonuçlar ile verilmiştir.

Anten parametreleri:

Frekans aralığı: 1300-1700 MHz

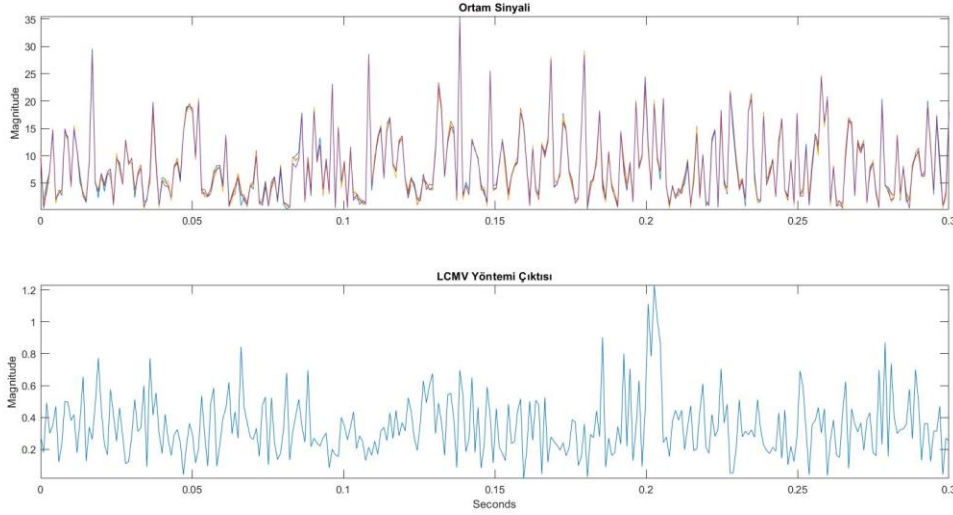
Komşu antenler arası boşluk: 0,1 m

Benzetim çalışmalarında, hedef sinyalin ve girişim sinyalinin anten dizisi önüne düzlem dalga olarak geldiği durum ele alınmıştır. Anten önüne gelen gürültü eklenmiş hedef sinyal ve gürültü eklenmiş girişim sinyali toplanarak anten dizisi önündeki ortam sinyali elde edilmiştir. İstenen sinyal ve girişim sinyali sayılarına göre yanıt vektörü ayarlanmıştır. Anten dizisi parametreleri, frekans, hedef sinyal yönü ve girişim yönü ile yönlendirme vektörü belirlenmiş ve kısıtlama vektörü hesaplanmıştır. Bu veriler ile ortam sinyali verileri LCMV algoritmasına girdi yapılarak LCMV ağırlıklandırmaları elde edilmiş ve ağırlıklandırılmış anten örüntüleri çizdirilmiştir. İstenen sinyal ve girişim sinyali yönündeki bastırma seviyeleri bulunmuş ve girişim/sinyal bastırma seviyeleri belirlenmiştir.



(a)

(b)



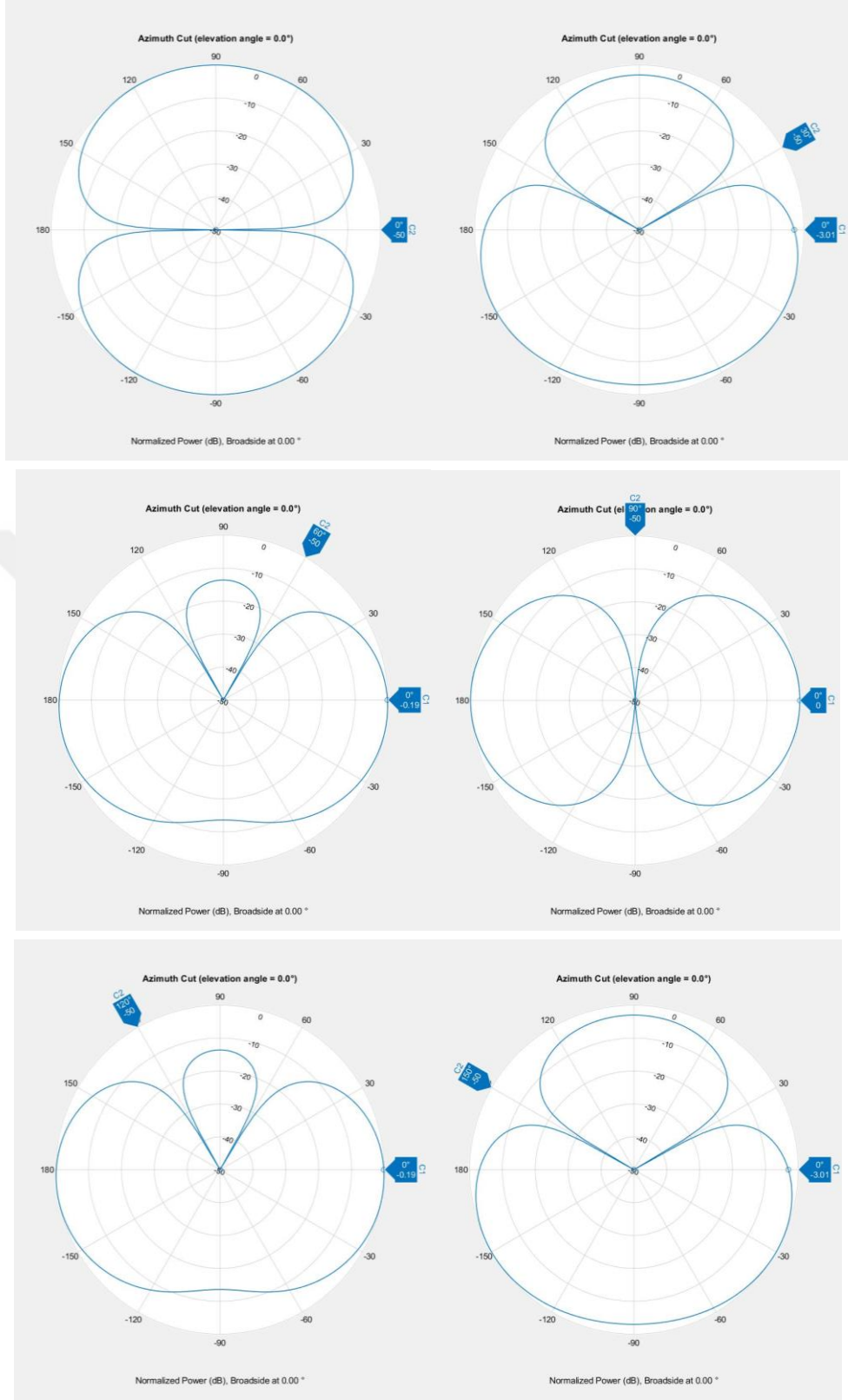
(c)

Şekil 4.16. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile LCMV Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c-alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği

Uyarlamalı anten dizileri kullanılarak LCMV tekniğinin uygulanması ile anten örüntüsünde değişiklikler meydana getirilerek; Şekil 4.16-a ve Şekil 4.16-b'de görüldüğü gibi, tek bir eşyönlü anten ile oluşan girişim/sinyal seviyesine göre daha az girişim/sinyal seviyesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.16-c'de görülmektedir ki, üst grafikte, hedef sinyal LCMV yöntemi uygulanmadan önce baraj gürültü girişimi altında kalmaktadır. LCMV yöntemi uygulandıktan sonra, sinyal çıktısında baraj gürültü girişimi etkisinin bastırıldığı ve hedef sinyalin (yükseliş zamanı 0,2. saniyede olan darbe modülasyonlu sinyal) ve ölçülebilir duruma geldiği görülmektedir.

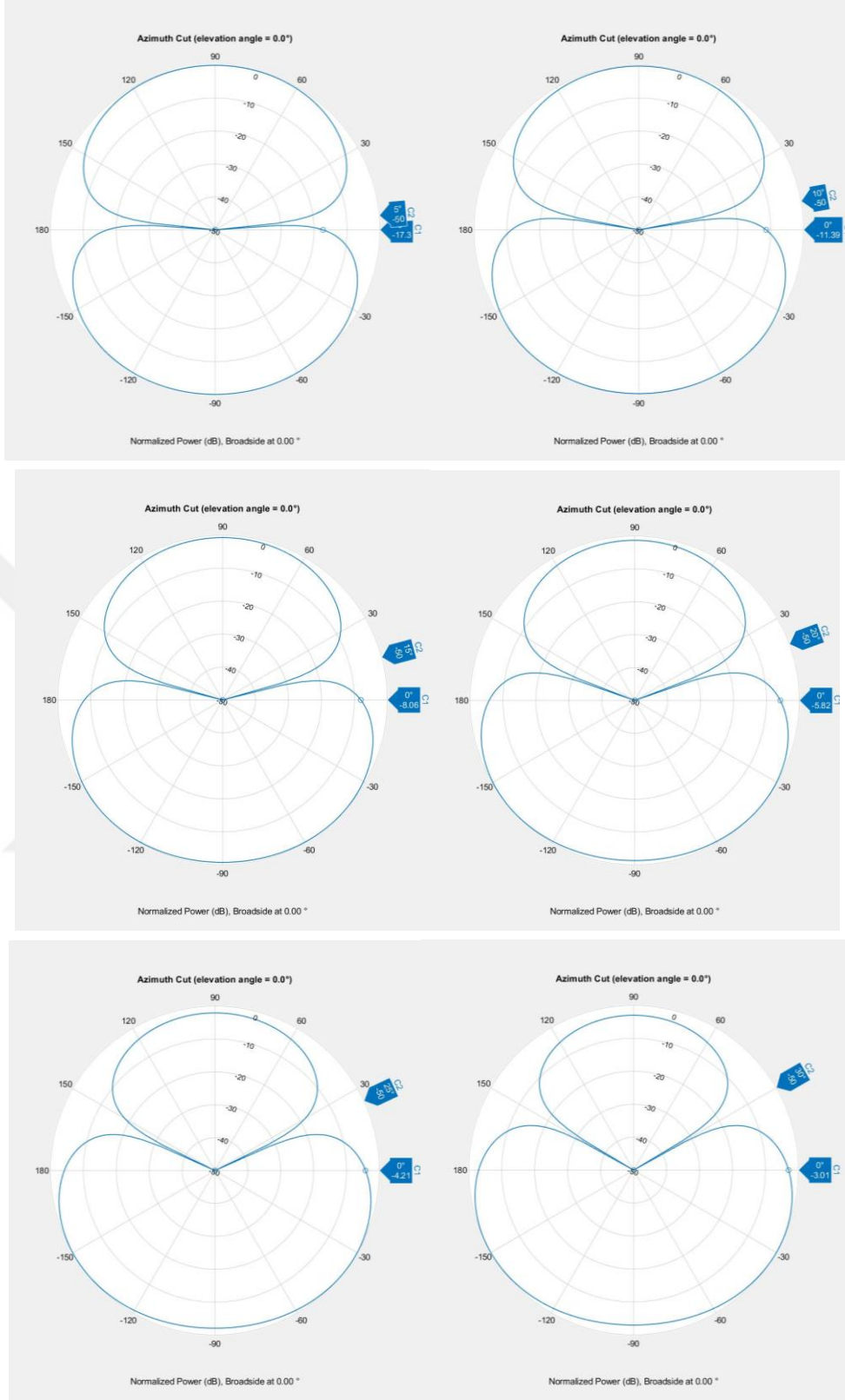
2'li anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.17'de ve Çizelge 4.11'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 18'de ve Çizelge 4.12'de verilmiştir.





Şekil 4.17 İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.18. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

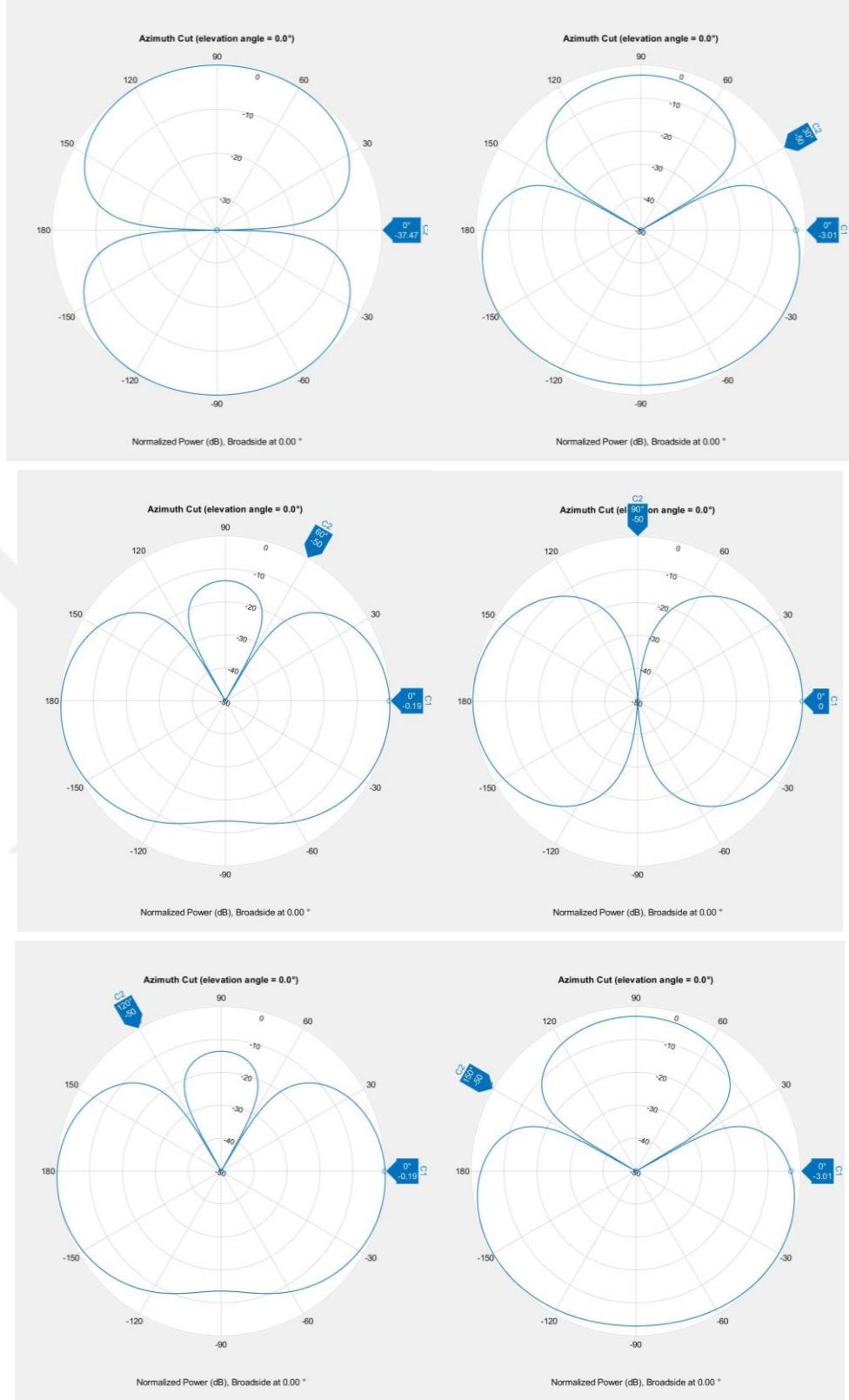
Çizelge 4.11. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-50,00	-50,00	0,00
30	-3,01	-50,00	46,99
60	-0,19	-50,00	49,81
90	0,00	-50,00	50,00
120	-0,19	-50,00	49,81
150	-3,01	-50,00	46,99
180	-50,00	-50,00	0,00

Çizelge 4.12. İkili Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

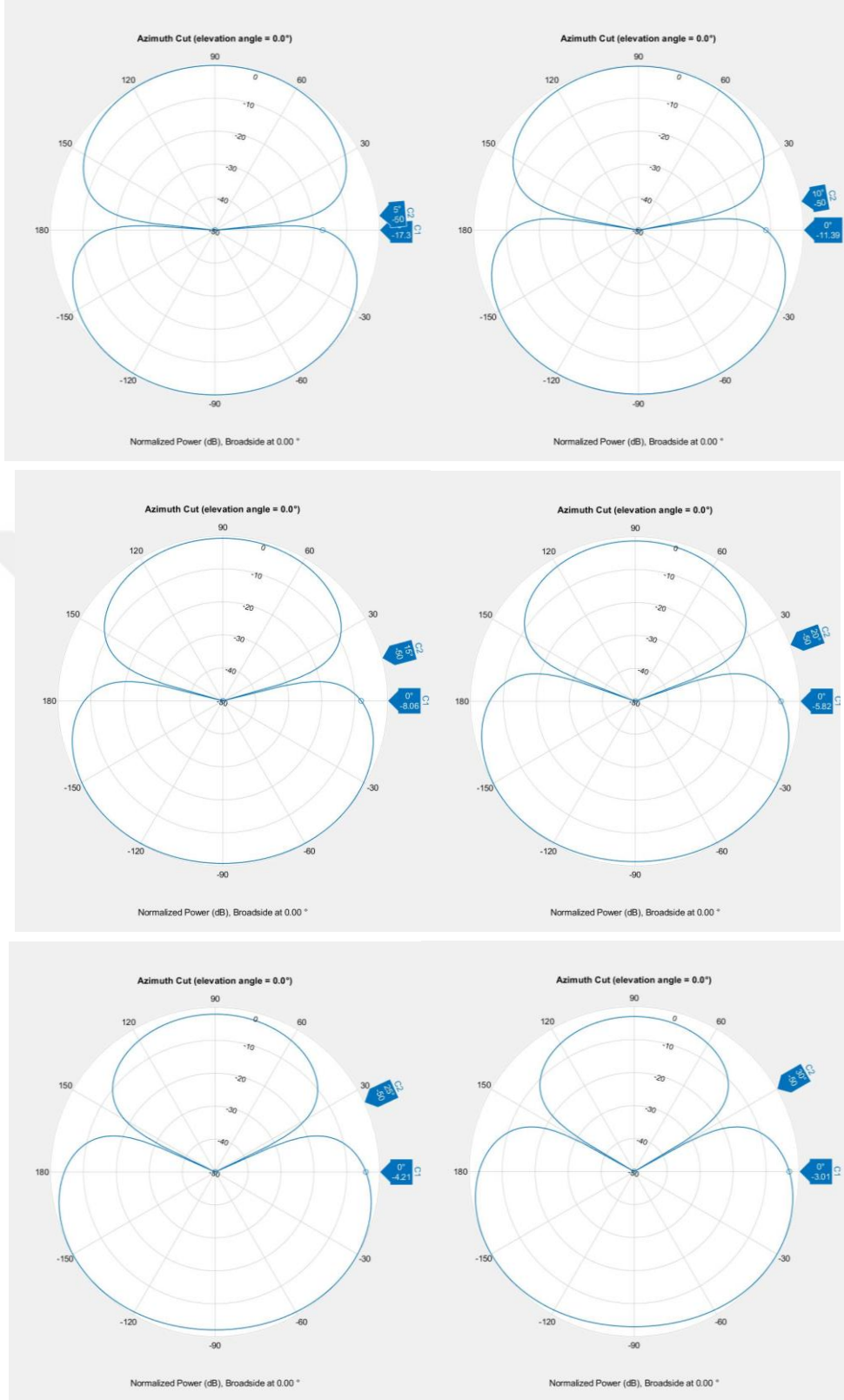
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-31,24	-50,00	18,76
2	-25,22	-50,00	24,78
3	-21,71	-50,00	28,29
5	-17,30	-50,00	32,70
10	-11,39	-50,00	38,61
15	-8,06	-50,00	41,94
20	-5,82	-50,00	44,18
25	-4,21	-50,00	45,79
30	-3,01	-50,00	46,99

4'lü karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.19'da ve Çizelge 4.13'te verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.20'de ve Çizelge 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.19. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.20. Dörtlü Kareyel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

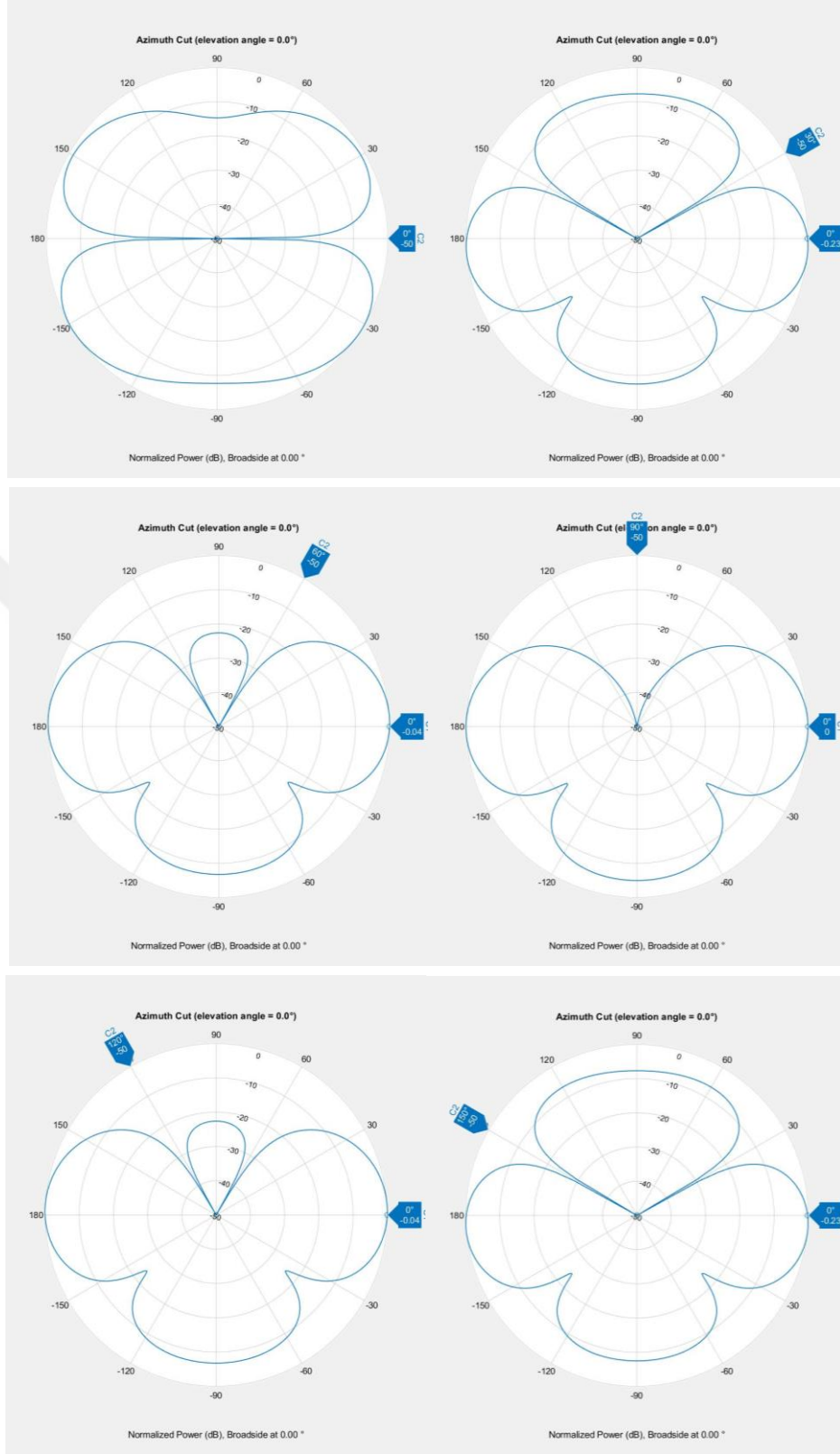
Çizelge 4.13. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-37,47	-37,47	0,00
30	-3,01	-50,00	46,99
60	-0,19	-50,00	49,81
90	0,00	-50,00	50,00
120	-0,19	-50,00	49,81
150	-3,01	-50,00	46,99
180	-37,47	-37,47	0,00

Çizelge 4.14. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

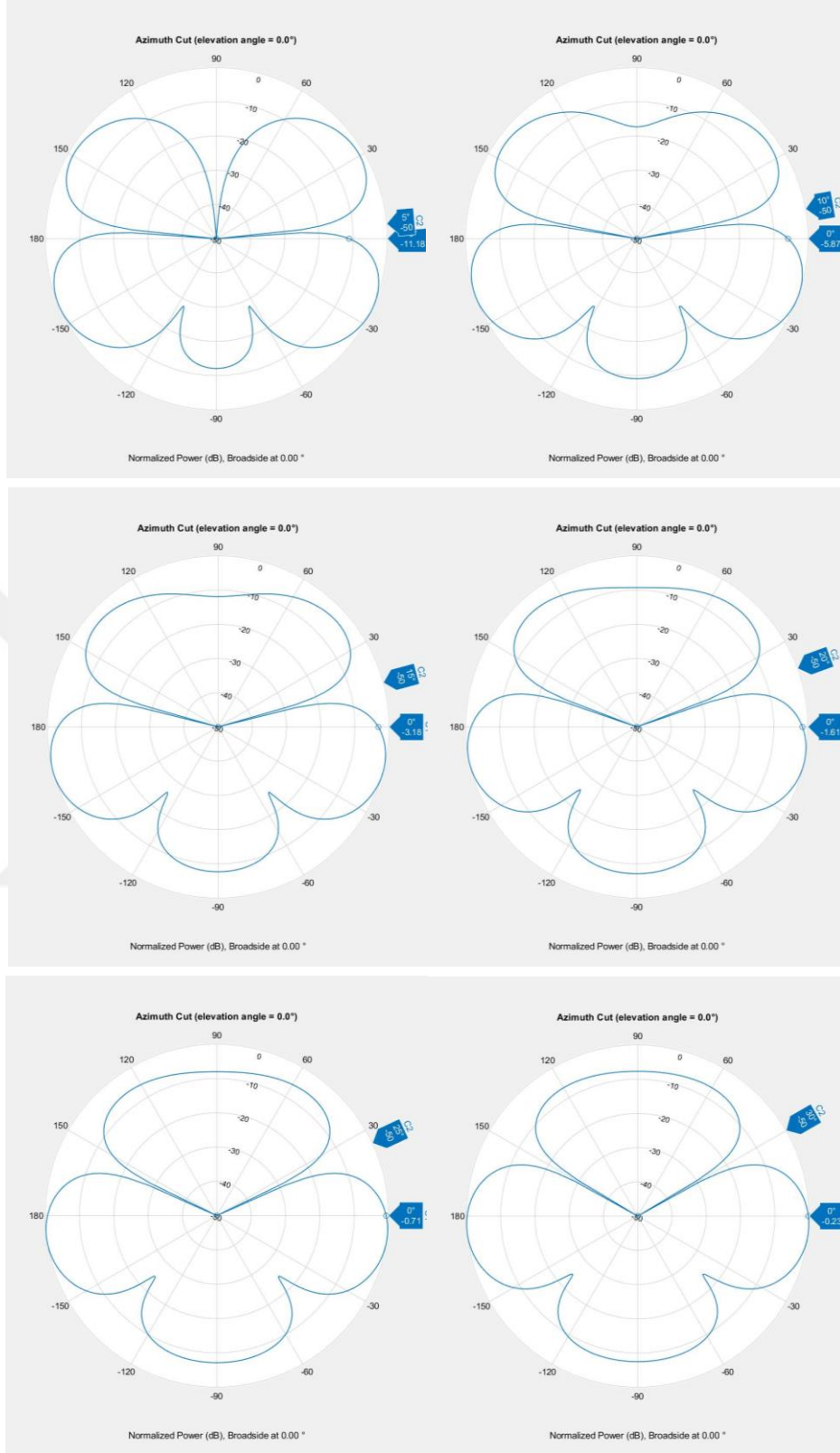
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-31,24	-50,00	18,76
2	-25,23	-50,00	24,77
3	-21,71	-50,00	28,29
5	-17,30	-50,00	32,70
10	-11,39	-50,00	38,61
15	-8,06	-50,00	41,94
20	-5,82	-50,00	44,18
25	-4,21	-50,00	45,79
30	-3,01	-50,00	46,99

8'li dairesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.21'de ve Çizelge 4.15'te verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.22'de ve Çizelge 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.21. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.22. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

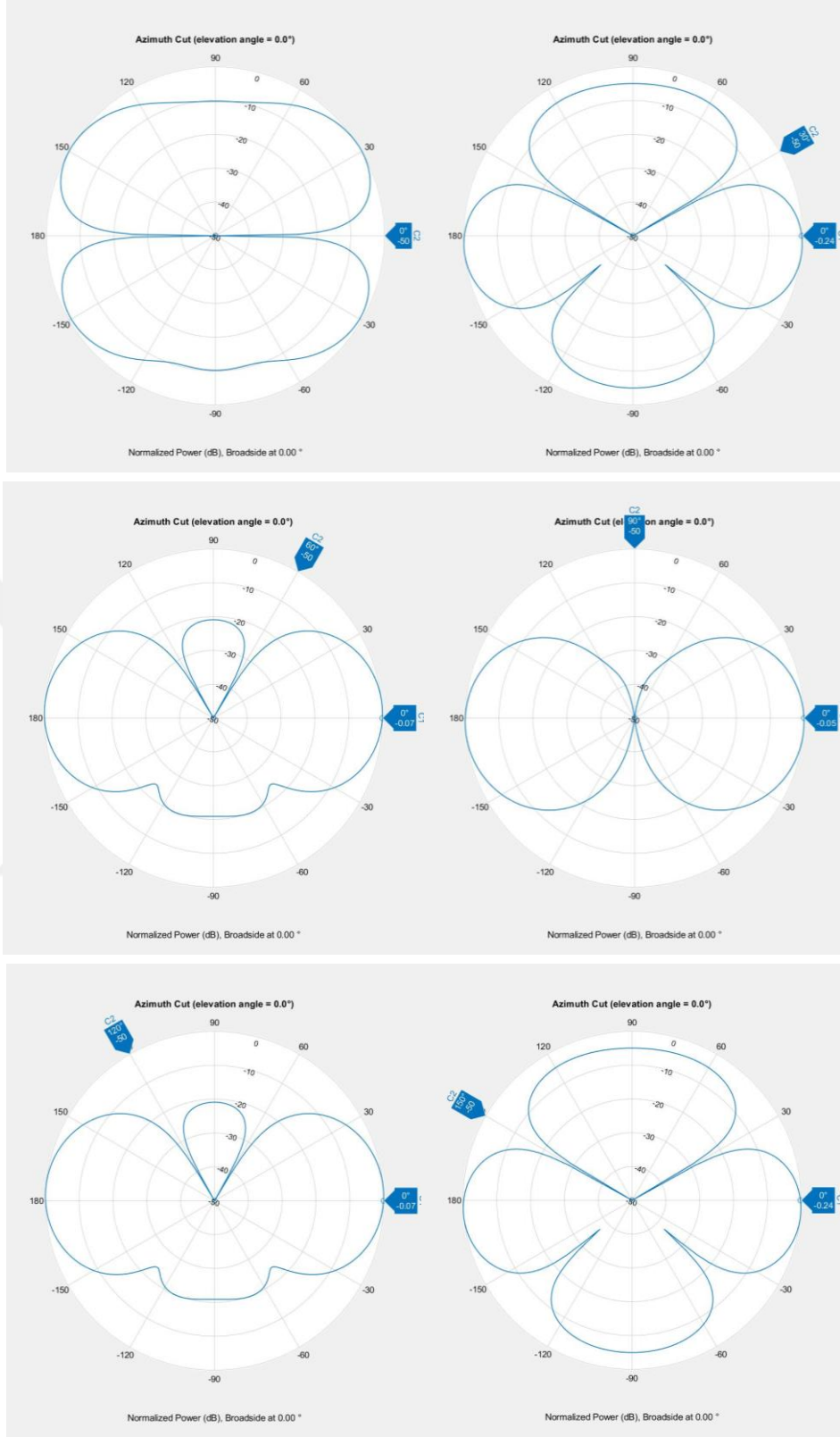
Çizelge 4.15. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-50,00		-50,00		0,00
30	-0,23		-50,00		49,77
60	-0,04		-50,00		49,96
90	0,00		-50,00		50,00
120	-0,04		-50,00		49,96
150	-0,23		-50,00		49,77
180	-50,00		-50,00		0,00

Çizelge 4.16. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

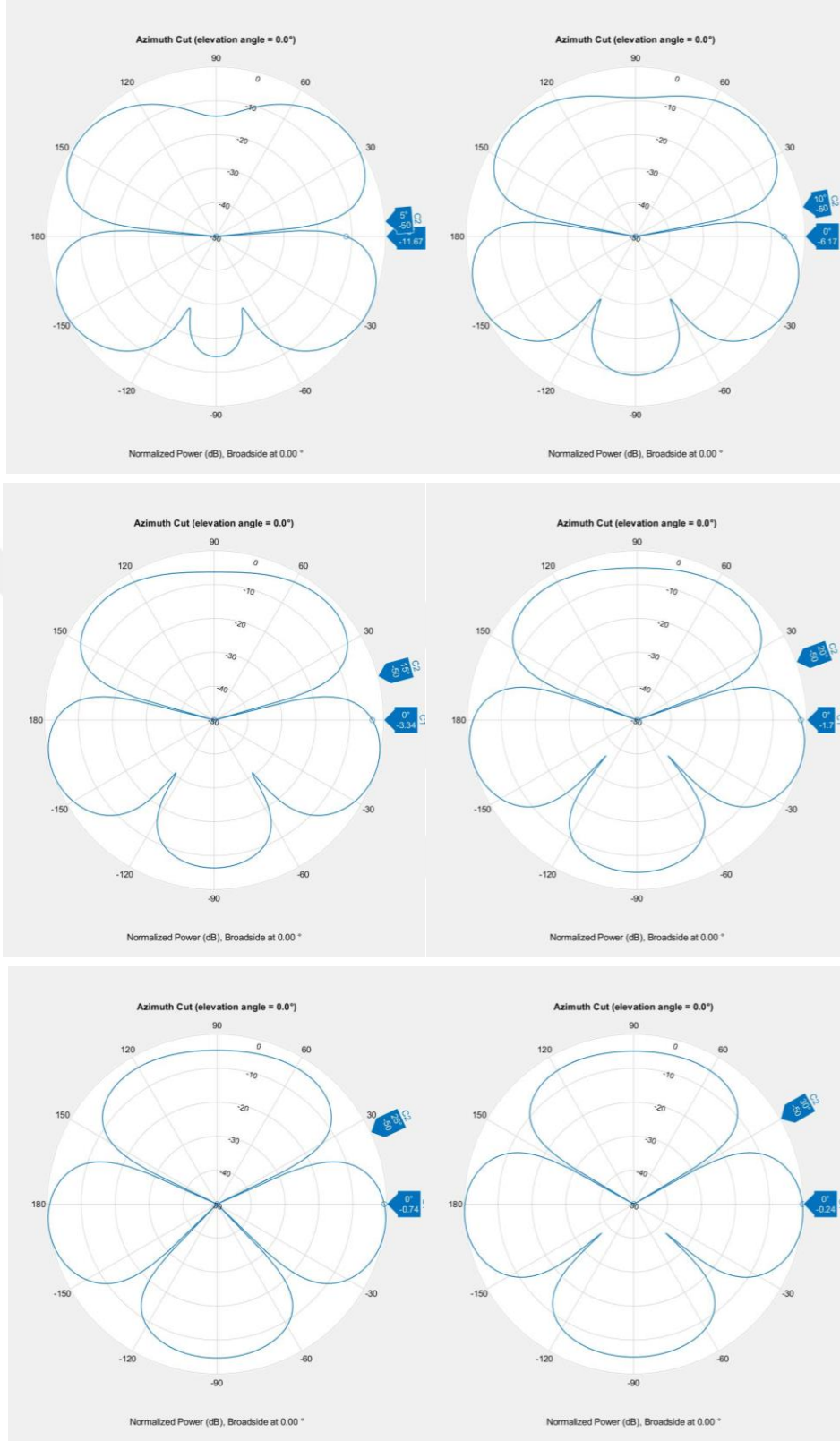
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-24,68		-50,00		25,32
2	-18,77		-50,00		31,33
3	-15,36		-50,00		34,64
5	-11,18		-50,00		38,82
10	-5,87		-50,00		44,13
15	-3,18		-50,00		46,82
20	-1,61		-50,00		48,39
25	-0,71		-50,00		49,29
30	-0,23		-50,00		49,77

8'li karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.23'te ve Çizelge 4.17'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.24'te ve Çizelge 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.23. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.24. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

Çizelge 4.17. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-50,00	-50,00	0,00
30	-0,24	-50,00	49,76
60	-0,07	-50,00	49,93
90	-0,05	-50,00	49,95
120	-0,07	-50,00	49,93
150	-0,24	-50,00	49,76
180	-50,00	-50,00	0,00

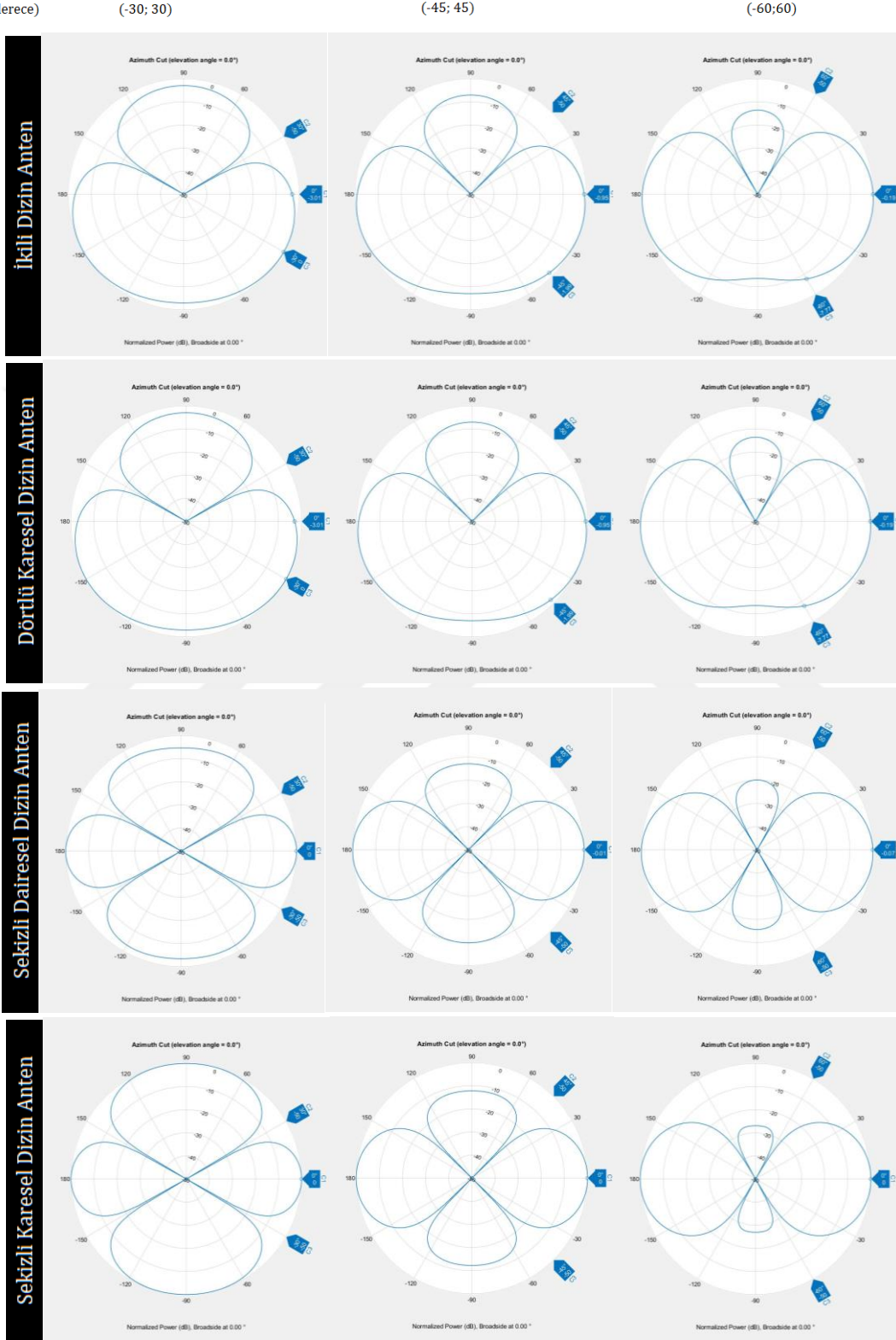
Çizelge 4.18. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile LCMV Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-25,35	-50,00	24,65
2	-19,39	-50,00	30,61
3	-15,94	-50,00	34,06
5	-11,67	-50,00	38,33
10	-6,17	-50,00	43,83
15	-3,34	-50,00	46,66
20	-1,70	-50,00	48,30
25	-0,74	-50,00	49,26
30	-0,24	-50,00	49,76

Tüm anten dizisi geometrileri için; girişim sinyalinin iki ayrı yönden geldiği ve yalnızca bir girişim yönünün bilindiği durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.25'te ve Çizelge 4.19'da verilmiştir.

- i. İki girişim sinyalden yalnızca pozitif açılı girişim sinyalinin yönünün bilindiği durumda bastırma sonuçları aşağıdaki gibidir:

Karıştırma
Yönleri
(derece)



Şekil 4.25. İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri

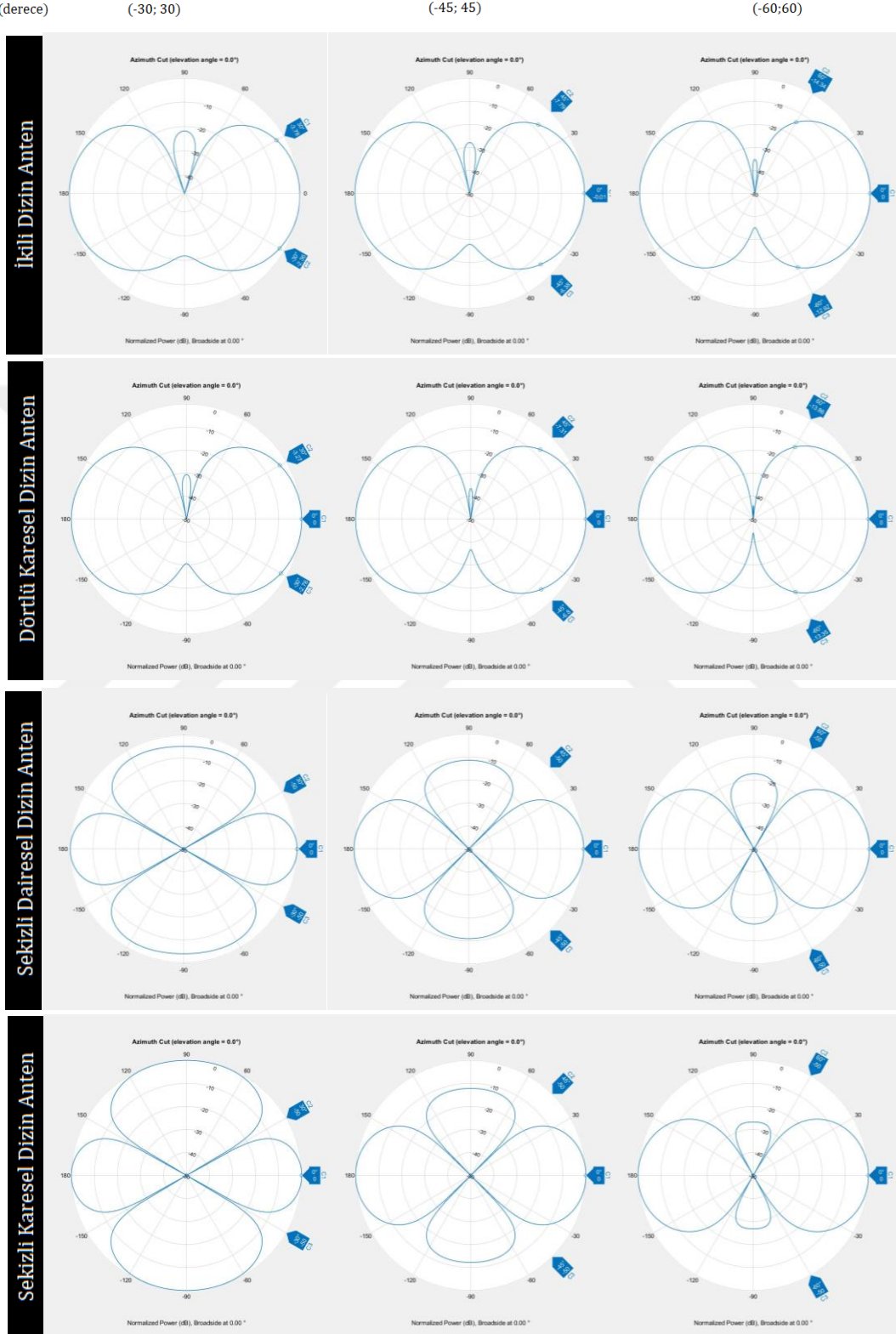
Çizelge 4.19. Yalnızca Birinin Yönü Bilinen İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi			4'lü Karesel Anten Dizisi			8'li Dairesel Anten Dizisi			8'li Karesel Anten Dizisi		
	İstenen Sinyal Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönünün deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
(-30, 30°)	-3,01	0,00; -50,00	-3,01; 46,99	-3,01	0,00; -50,00	-3,01; 46,99	0,00	-50,00; -50,00	50; 50	-0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-45, 45°)	-0,95	1,99; -50,00	-2,94; 49,05	-0,95	1,99; -50,00	-2,94; 49,05	-0,01	-50,00; -50,00	49,99; 49,99	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-60, 60°)	-0,19	-7,77; -50,00	7,58; 49,81	-0,19	-7,77; -50,00	7,58; 49,81	-0,07	-50,00; -50,00	49,93; 49,93	-0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00

Tüm anten dizisi geometrileri için; girişim sinyalinin iki ayrı yönden geldiği ve iki girişim yönünün de bilindiği durumda LCMV uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.26'da ve Çizelge 4.20'de verilmiştir.

- ii. İki girişim sinyalden ikisinin de yönlerinin bilindiği durumda bastırma sonuçları aşağıdaki gibidir:

Karıştırma
Yönleri
(derece)



Şekil 4.26. İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri

Çizelge 4.20. Yönleri Bilinen İki Girişim Sinyali ile LCMV Algoritması Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi			4'lü Karesel Anten Dizisi			8'li Dairesel Anten Dizisi			8'li Karesel Anten Dizisi		
	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
(-30, 30°)	-0,01	-2,36; -3,78	2,35; 3,77	0,00	-2,76; -3,27	2,76; 3,27	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-45, 45°)	-0,01	-6,38; -7,79	6,37; 7,78	0,00	-6,80; -7,31	6,80; 7,31	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00
(-60, 60°)	0,00	-12,92; -14,34	12,92; 14,34	0,00	-13,35; -13,86	13,35; 13,86	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00	0,00	-50,00; -50,00	50,00; 50,00

Tüm sonuçlar incelendiğinde, hedef sinyalle girişim sinyalinin yakınlığına göre, olabildiğince hedef sinyal yönünde maksimum kazanç elde edilecek şekilde anten örüntüsünün ağırlıklandırıldığı görülmüştür. Girişim sinyalinin yönlerinin değişmesi ile, bastırma açısının da başarılı bir şekilde girişim sinyali yönünde değiştiği görülmektedir. Tüm sonuçlarda görülmektedir ki, LCMV algoritması girişim sinyali yönünde anten ağırlıklandırmalarında her açı farkı için kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır.

Anten dizisindeki eleman sayısı azaldıkça, hedef sinyal ile girişim sinyali arasında görece küçük açıların olduğu durumlarda hedef sinyal yönündeki kazanç ve girişim sinyali yönündeki bastırma azalmaktadır. Bu nedenle hedef sinyal ile girişim sinyali arasındaki oran da azalmaktadır. Çizelge 4.21'de görülmektedir ki, girişim sinyalinin hedef sinyalden [1-30] derece farkla geldiği durumlarda, 8'li anten dizileri kullanmak 2'li ve 4'lü anten dizileri kullanmaya göre daha yüksek bastırma oranları

sağlamaktadır. Kaynakların geliş açıları arasındaki farkın 30 dereceden büyük olduğu durumlarda ise anten sayısının bastırma oranları üzerinde belirgin bir avantajı görülmemektedir. Yine Çizelge 4.21'de görülmektedir ki, LCMV algoritması benzetim sonuçlarında 8'li antenlerde anten dizisi yerleşiminin girişim bastırma oranına belirgin bir etkisi yoktur.

Tek girişimin olduğu örneklerde, girişim sinyali yönünün de algoritmaya girdi olarak verilmesi, tüm örneklerde yüksek bastırma oranlarına ulaşılmasını sağlamıştır. Öyle ki, hedef sinyal ve girişim sinyali kaynakları arasındaki farkın 1 derece olduğu durumda dahi örneklerde 18 dB'nin üzerinde girişim bastırma değerleri elde edilmiştir. Bu bastırmanın yeterli olduğu kullanımlarda, anten dizisi eleman sayısı azaltılarak maliyet düşürülebilir.

İki girişim sinyali ile yapılan benzetim çalışmaları sonuçlarına göre, iki girişim sinyalinin olduğu ve bir girişim sinyalinin yönünün algoritmaya girdi yapıp diğer girişim sinyalinin yönünün bilinemediği durumda, 2'li ve 4'lü anten dizisi uygulamalarında bilinmeyen girişim sinyalinin 3 dB altında hedef sinyalin alınacağı tespit edilmiştir. Bu durumda, dahili/öz girişim durumuna karşı önlem alan bir sistemin dış bir kaynaktan girişime uğraması durumunda, 2'li ve 4'lü anten dizileri ile verimli çalışmayacağı değerlendirilebilir. 8'li anten dizilerinin 2'li ve 4'lü anten dizilerine göre belirgin bir avantajı olduğu görülmektedir ve 2 girişim yönünde de anten ağırlıklandırmaları ile kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır.

İki girişim sinyali ile yapılan benzetim çalışmaları sonuçlarına göre, iki girişim sinyalinin olduğu ve iki girişim sinyali yönünün de algoritmaya girdi olarak verildiği durumda, 2'li ve 4'lü anten dizisi uygulamalarında girişim bastırma oranının 3 dB seviyelerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu durumda, 2 dahili/öz girişim kaynağına karşı önlem alan bir sistemin, 2'li ve 4'lü anten dizileri ile verimli çalışmayacağı değerlendirilebilir. 8'li anten dizilerinin 2'li ve 4'lü anten dizilerine göre belirgin bir avantajı olduğu görülmektedir ve 2 girişim yönünde de anten ağırlıklandırmaları ile kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır.

Çizelge 4.21. Kullanılan Anten Dizilerine Göre LCMV Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	4'lü Kareseleli Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Dairesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Kareseleli Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	18,76	18,76	25,32	24,65
2	24,78	24,77	31,33	30,61
3	28,29	28,29	34,64	34,06
5	32,70	32,70	38,82	38,33
10	38,61	38,61	44,13	43,83
15	41,94	41,94	46,82	46,66
20	44,18	44,18	48,39	48,30
25	45,79	45,79	49,29	49,26
30	46,99	46,99	49,77	49,76
60	49,81	49,81	49,96	49,93
90	50,00	50,00	50,00	49,95
120	49,81	49,81	49,96	49,93
150	46,99	46,99	49,77	49,76
180	0,00	0,00	0,00	0,00

4.3. PI Algoritması ile Girişim Bastırma Benzetim Çalışmaları

PI yönteminde hedef sinyal yönü ve girişim sinyali yönü bilinmez. Gürültü tabanına göre güçlü gelen sinyal yönünde kazanç sıfırlama (nulling) sağlanır. Bu nedenle, uydu navigasyon sistemlerindeki gibi; hedef sinyal gücünün düşük olduğu ve yönünün bilinmediği, bilinmeyen bir yönden girişime maruz kalınan problemler için kullanımı uygundur. Benzetim çalışmalarında algoritmaya hedef sinyal veya girişim sinyali için herhangi bir yön girdisi yapılmamıştır. Algoritma çıktısı olarak elde edilen ağırlıklandırma vektörleri ile, girişim sinyali/sinyalleri yönünde kazanç sıfırlama (nulling) amaçlanır. Benzetim parametreleri aşağıdaki gibidir:

İstenen sinyal parametreleri:

Frekans: 1500 MHz, darbe modülasyonlu

Güç: 1 W

Gürültü: 0,5 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 3 dB

Sinyal geliş yönü: yanca açısı: 0 derece, yükseliş açısı: 0 derece

Baraj gürültü girişim sinyali parametreleri:

Frekans: 1500 MHz

Güç: 100 W

Gürültü: 10 W beyaz Gaussian gürültü, SNR: 10 dB

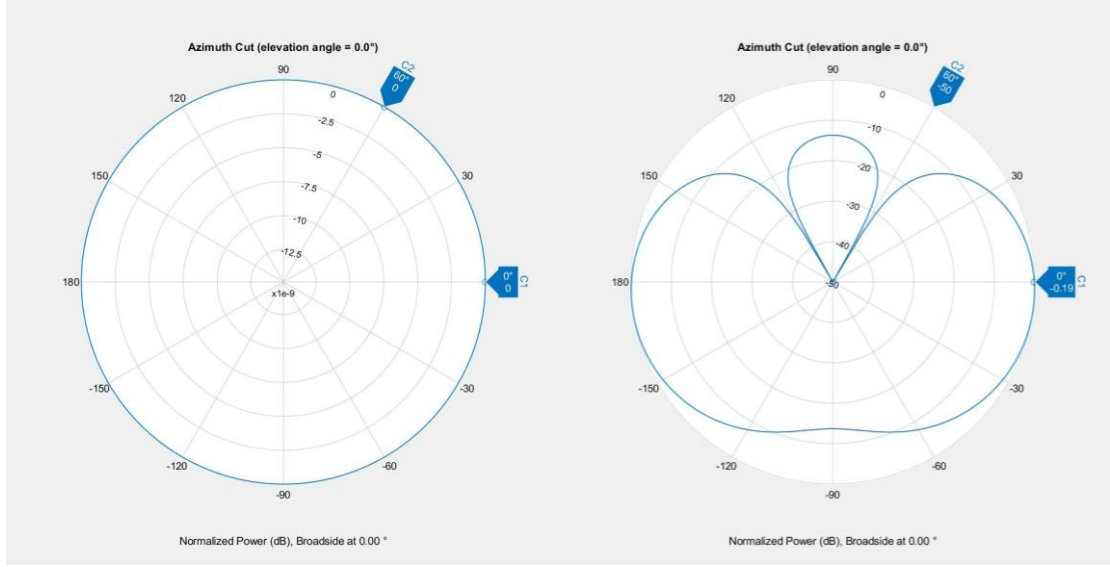
Sinyal geliş yönleri: Her benzetim için değişmektedir. Değerler sonuçlar ile verilmiştir.

Anten parametreleri:

Frekans aralığı: 1300-1700 MHz

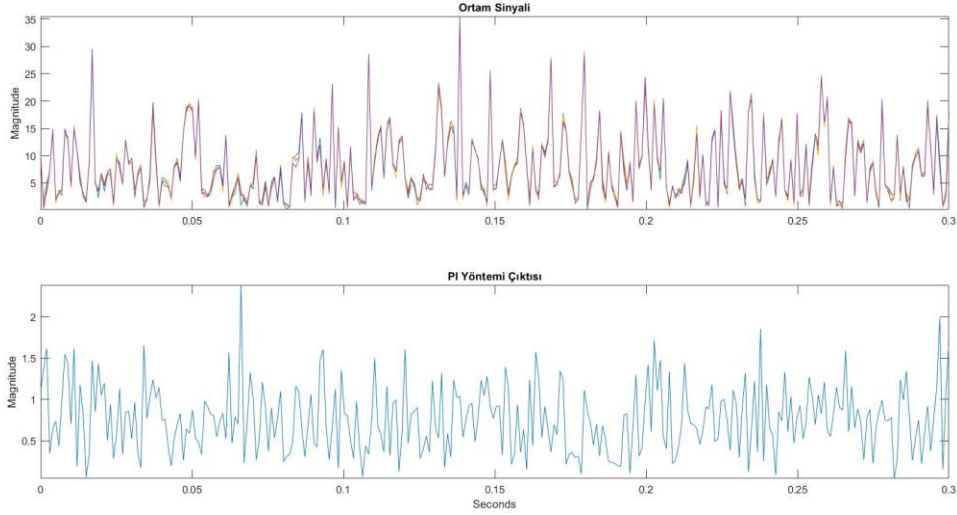
Komşu antenler arası boşluk: 0,1 m

Benzetim çalışmalarında, hedef sinyalin ve girişim sinyalinin anten dizisi önüne düzlem dalga olarak geldiği durum ele alınmıştır. Anten önüne gelen gürültü eklenmiş hedef sinyal ve gürültü eklenmiş girişim sinyali toplanarak anten dizisi önündeki ortam sinyali elde edilmiştir. Yanıt vektörü, $g = [1]$ ve kısıtlama vektörü, $C = [1, 0, \dots, 0]$ (anten dizisi eleman sayısı uzunluğunda) olarak belirlendikten sonra, ortam sinyali verileri PI algoritmasına girdi yapılarak PI ağırlıklandırmaları elde edilmiş ve ağırlıklandırılmış anten örüntüleri çizdirilmiştir. İstenen sinyal ve girişim sinyali yönündeki bastırma seviyeleri bulunmuş ve girişim/sinyal bastırma seviyeleri belirlenmiştir.



(a)

(b)



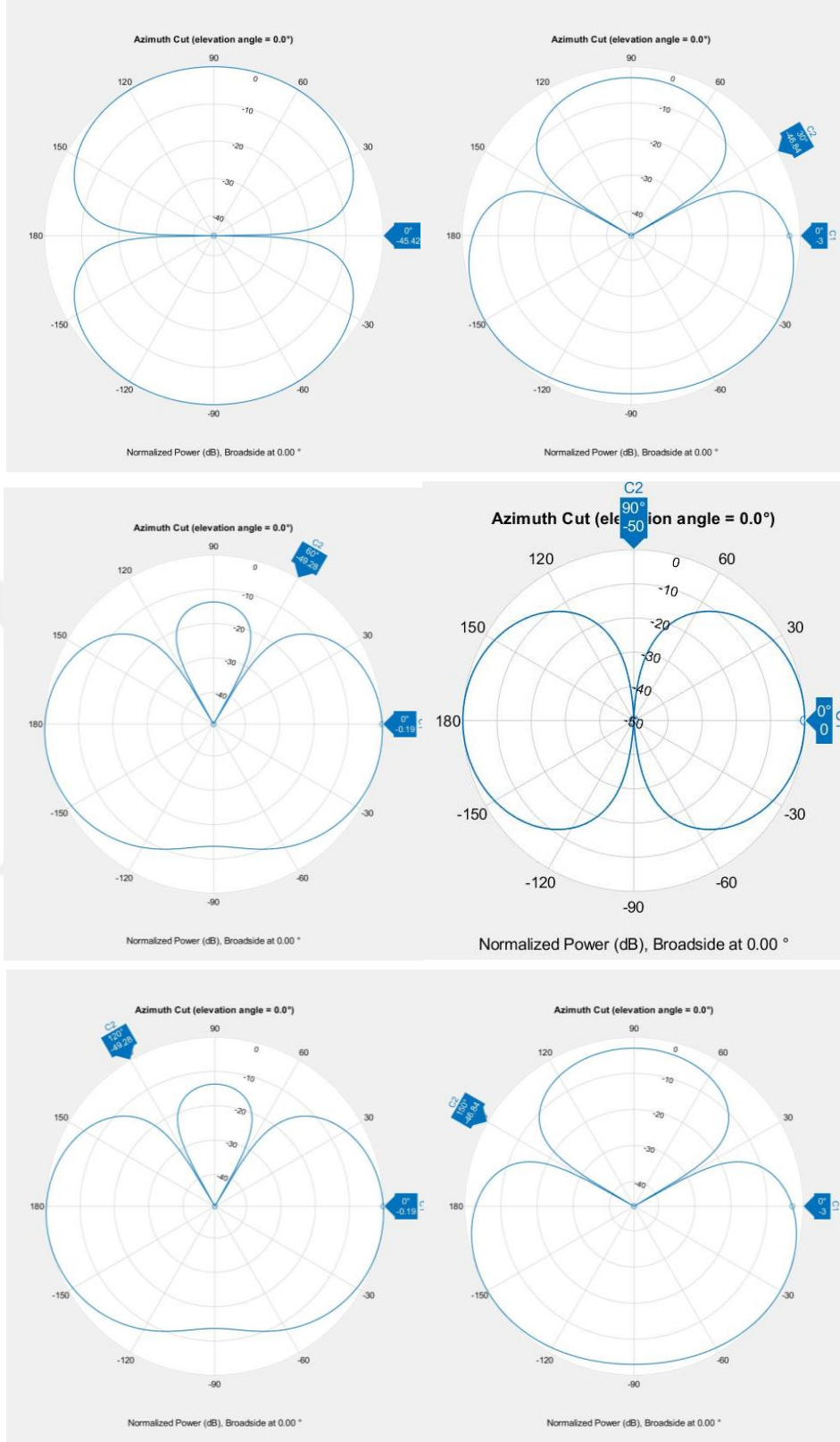
(c)

Şekil 4.27. Tek Anten Örüntüsü (a), Uyarlamalı Anten Dizisi Örüntüsü (b) ve Uyarlamalı Anten Dizisi ile PI Yöntemi Kullanımı Öncesi (c-üst) ve Sonrası (c-alt) Ortam Sinyali Genlik-Zaman Grafiği

Uyarlamalı anten dizileri kullanılarak PI tekniğinin uygulanması ile anten örüntüsünde değişiklikler meydana getirilerek; Şekil 4.27-a ve Şekil 4.27-b'de görüldüğü gibi, tek bir eşyönlü anten ile oluşan girişim/sinyal seviyesine göre daha az girişim/sinyal seviyesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.27-c'de görülmektedir ki, üst grafikte, hedef sinyal PI yöntemi uygulanmadan önce baraj gürültü girişimi altında kalmaktadır. PI yöntemi uygulandıktan sonra, sinyal çıktısında baraj gürültü girişimi etkisinin bastırıldığı görülmektedir.

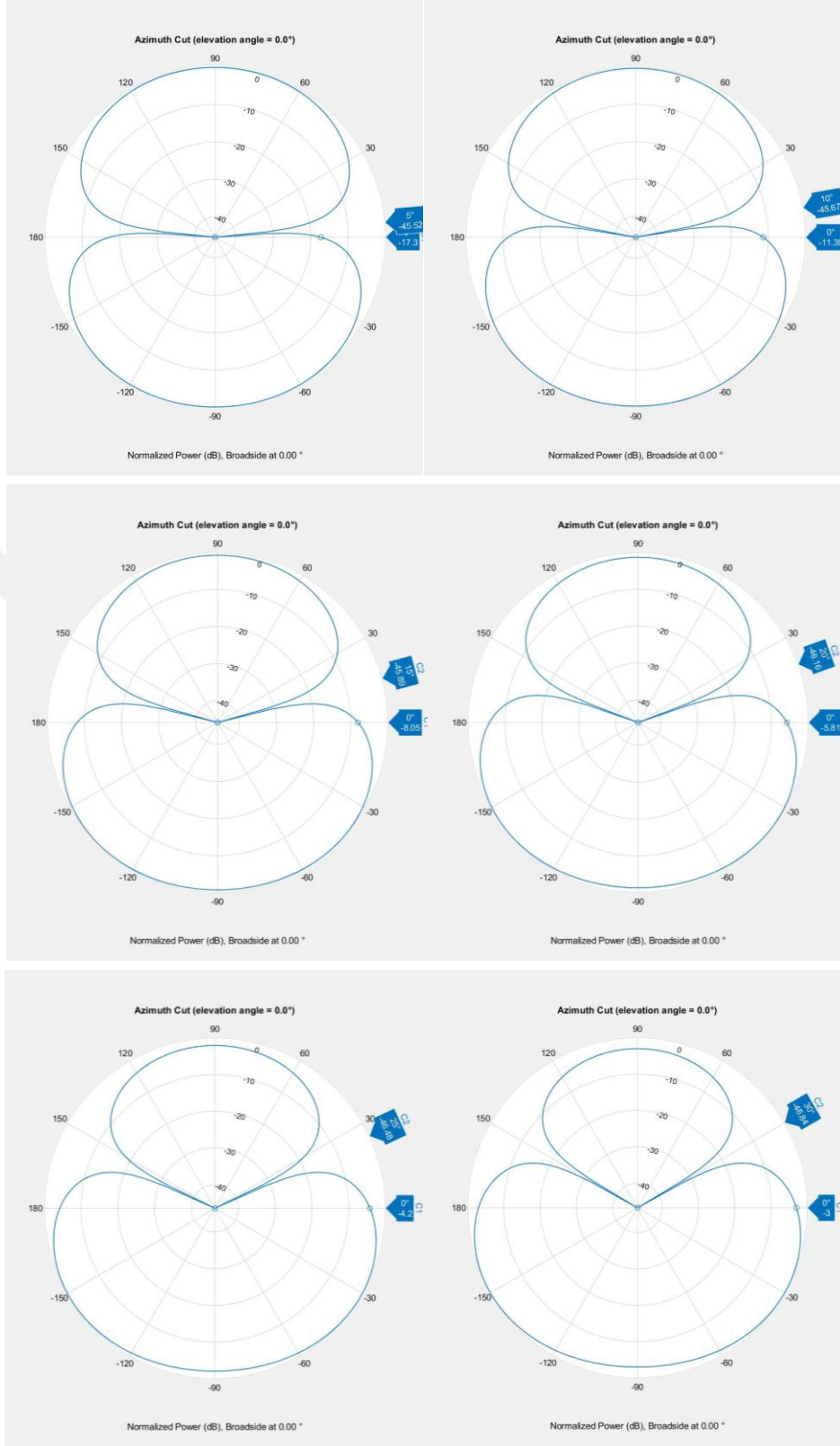
2'li anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda PI uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 28'de ve Çizelge 22'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 29'da ve Çizelge 23'te verilmiştir.





Şekil 4.28. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.29. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştirma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

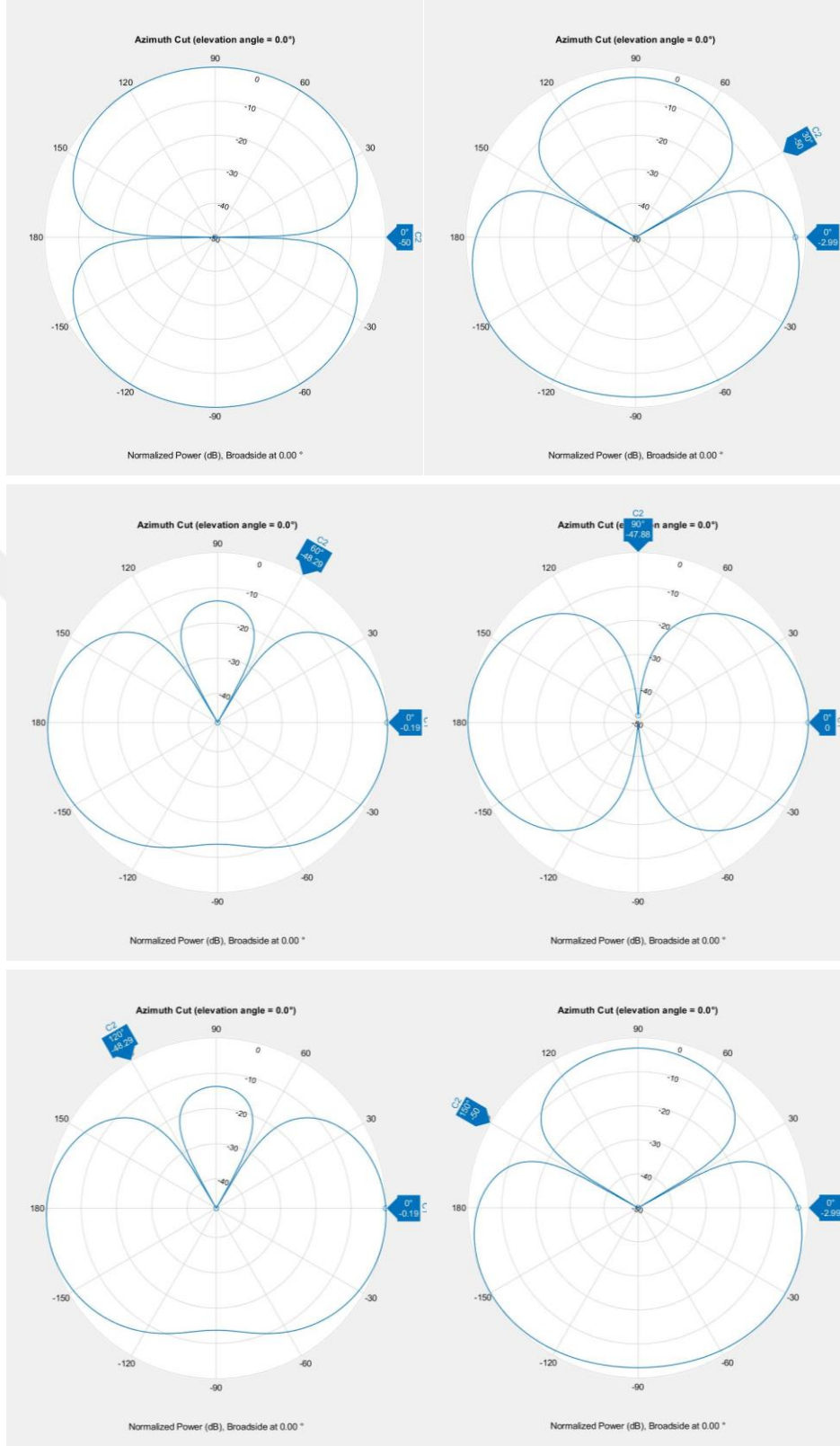
Çizelge 4.22. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-45,42	-45,42	0,00
30	-3,00	-46,84	43,84
60	-0,19	-49,28	49,09
90	0,00	-50,00	50,00
120	-0,19	-49,28	49,09
150	-3,00	-46,84	43,84
180	-45,42	-45,42	0,00

Çizelge 4.23. İkili Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

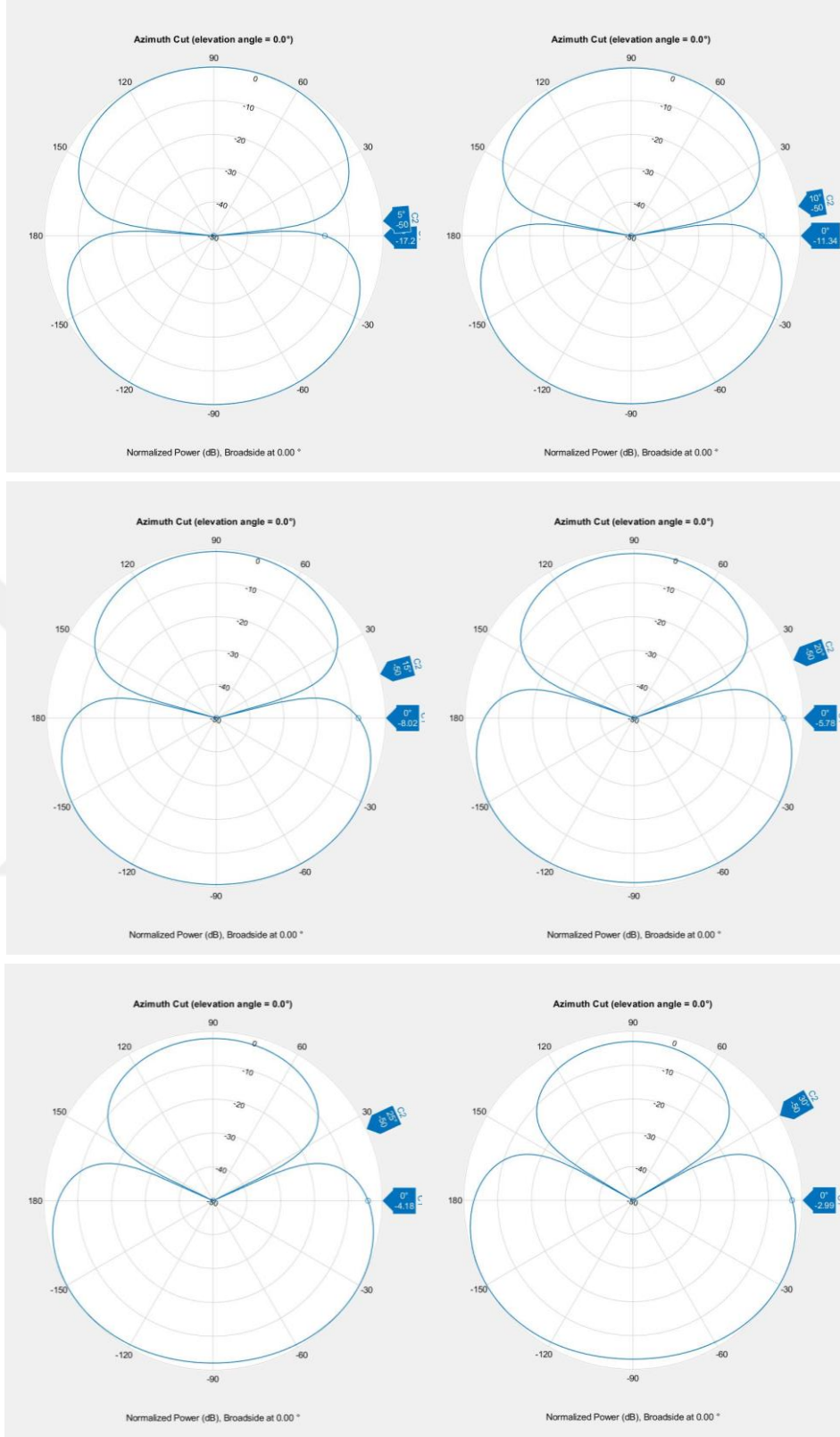
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-31,14	-45,43	14,29
2	-25,21	-45,45	20,24
3	-21,71	-45,47	23,76
5	-17,30	-45,52	28,22
10	-11,39	-45,67	34,28
15	-8,05	-45,89	37,84
20	-5,81	-46,16	40,35
25	-4,20	-46,48	42,28
30	-3,00	-46,84	43,84

4'lü karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda PI uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.30'da ve Çizelge 4.24'te verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.31'de ve Çizelge 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.30. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.31. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

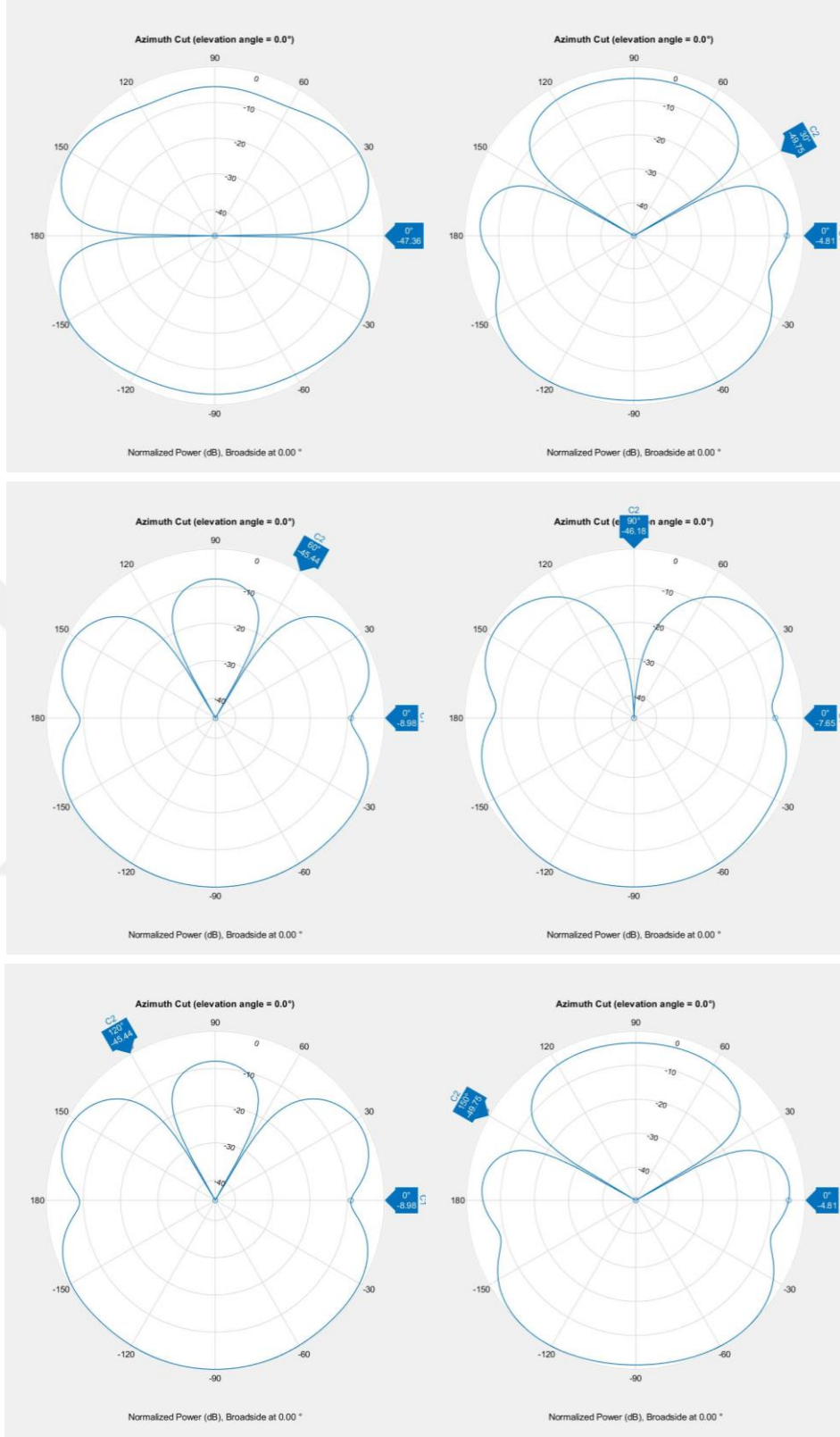
Çizelge 4.24. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-50,00		-50,00		0,00
30	-2,99		-50,00		47,01
60	-0,19		-48,29		48,10
90	0,00		-47,88		47,88
120	-0,19		-48,29		48,10
150	-2,99		-50,00		47,01
180	-50,00		-50,00		0,00

Çizelge 4.25. Dörtlü Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

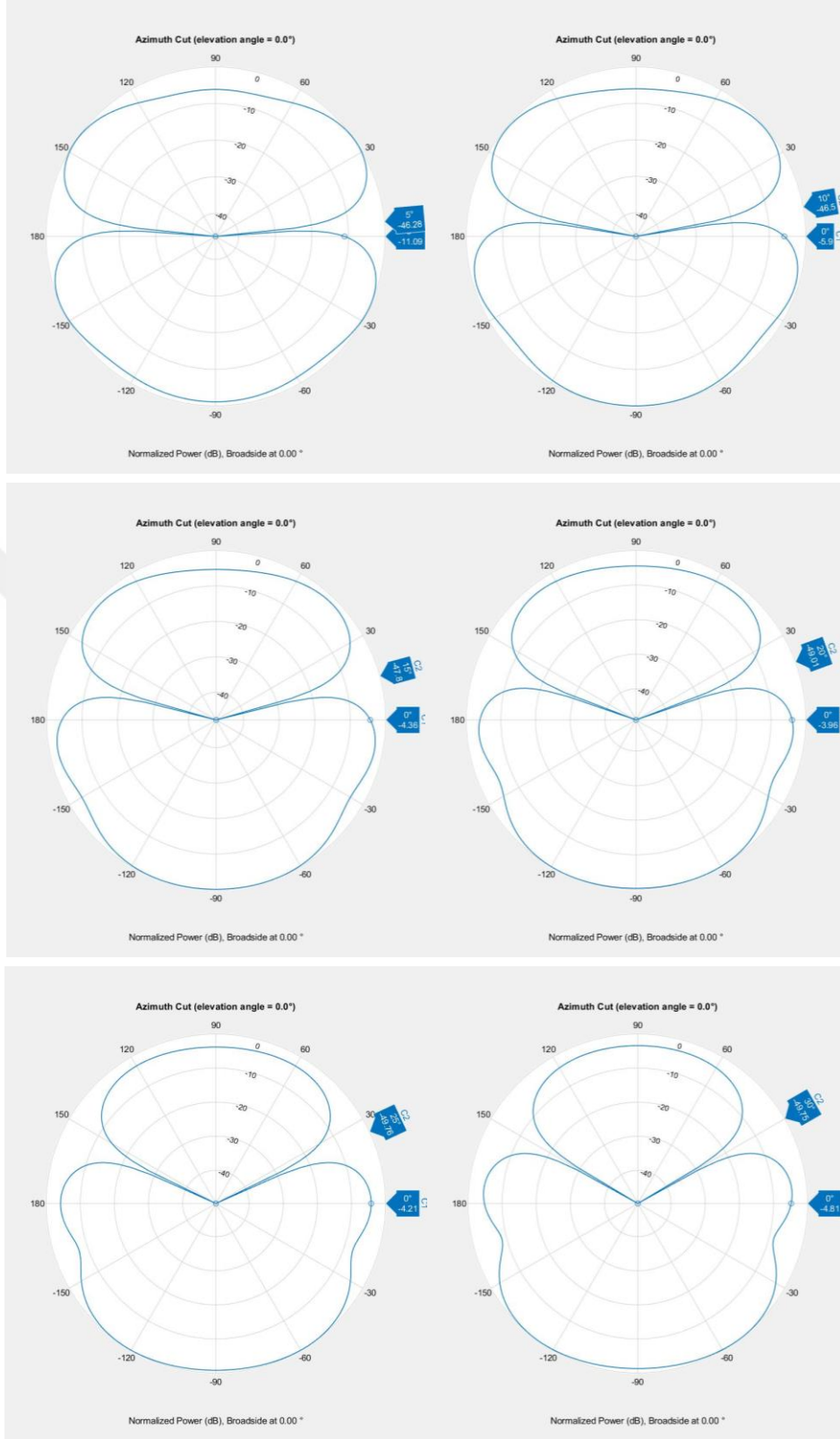
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Sinyal Bastırma	Girişim Yönündeki (dB)	Sinyali Bastırma	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-30,80		-50,00		19,20
2	-25,00		-50,00		25,00
3	-21,56		-50,00		28,44
5	-17,20		-50,00		32,80
10	-11,34		-50,00		38,66
15	-8,020		-50,00		41,98
20	-5,78		-50,00		44,22
25	-4,18		-50,00		45,82
30	-2,99		-50,00		47,01

8'li dairesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda PI uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.32'de ve Çizelge 4.26'da verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.33'te ve Çizelge 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.32. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.33. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [5-30] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

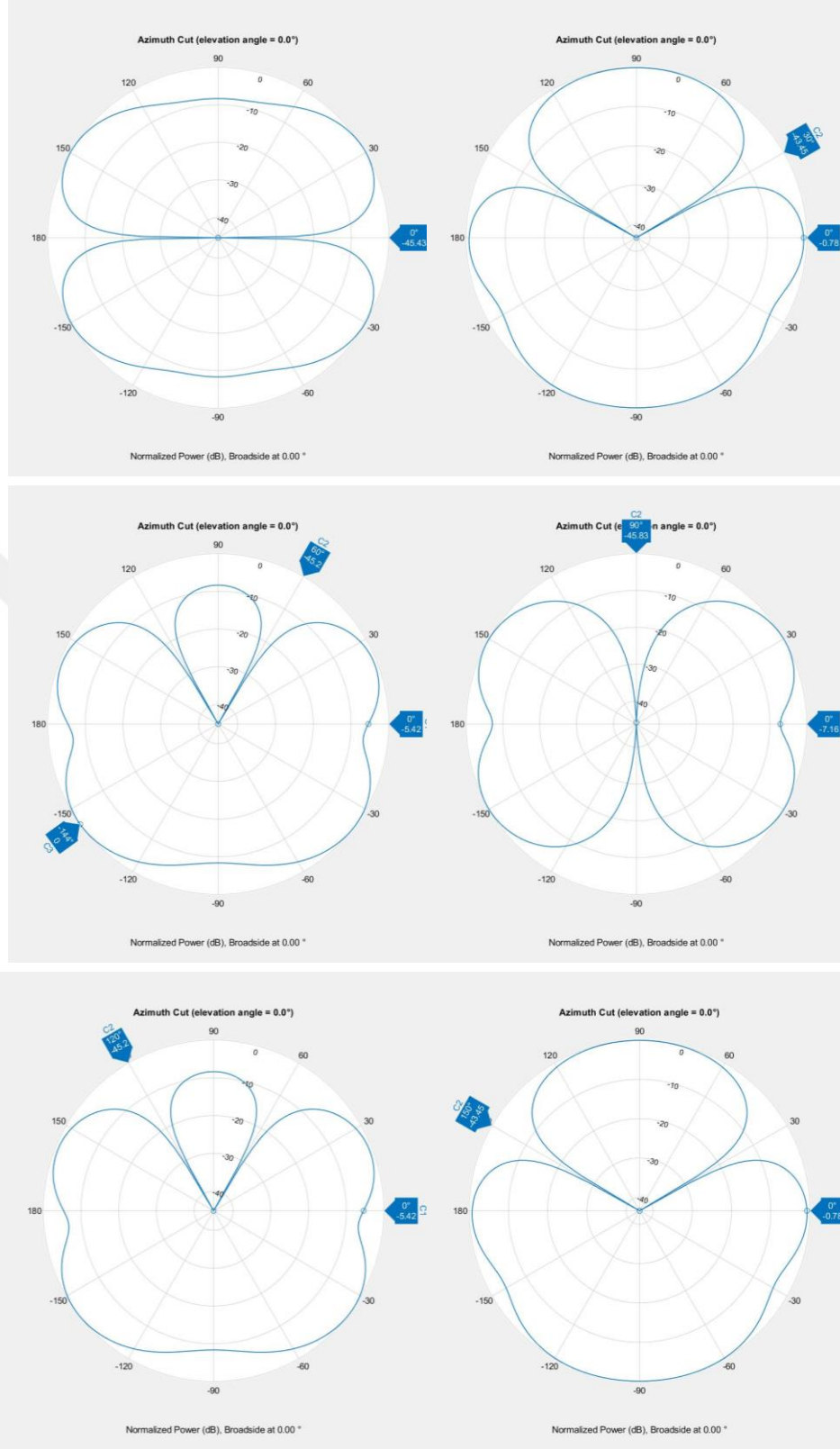
Çizelge 4.26. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-47,36	-47,36	0,00
30	-4,81	-49,75	44,94
60	-8,98	-45,44	36,46
90	-7,65	-46,18	38,53
120	-8,98	-45,44	36,46
150	-4,81	-49,75	44,94
180	-47,36	-47,36	0,00

Çizelge 4.27. Sekizli Dairesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

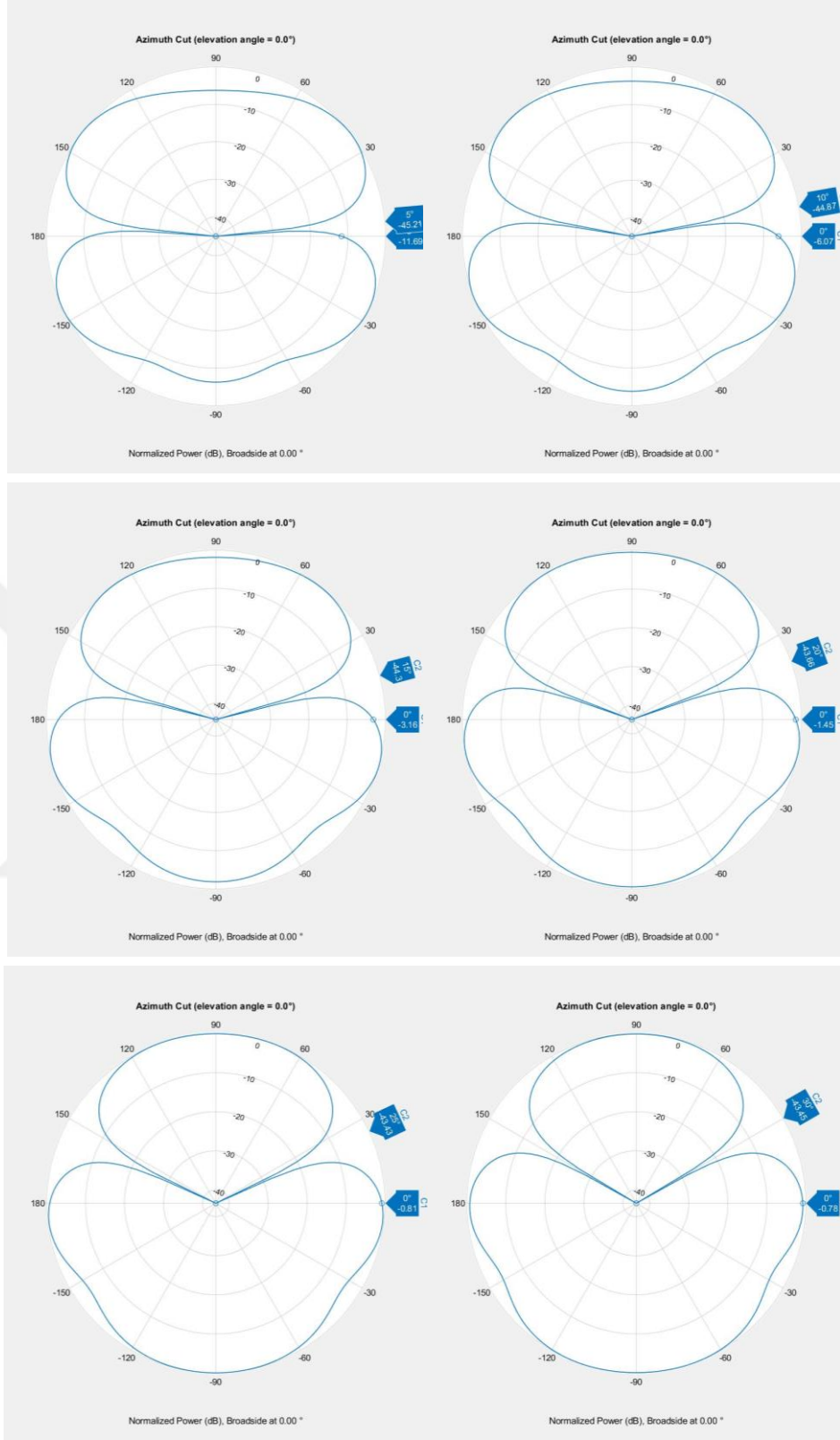
Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-25,61	-47,11	21,50
2	-19,35	-46,88	27,53
3	-15,69	-46,66	30,97
5	-11,09	-46,28	35,19
10	-5,90	-46,50	40,60
15	-4,36	-47,80	43,44
20	-3,96	-49,01	45,05
25	-4,21	-49,76	45,55
30	-4,81	-49,75	44,94

8'li karesel anten dizisi ile, girişim sinyalinin [0-180] derece arasında olduğu durumda PI uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.34'te ve Çizelge 4.28'de verilmiştir. Girişim sinyalinin [0-30] derece arasında olduğu durumda oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları ise sırası ile Şekil 4.35'te ve Çizelge 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.34. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 0, Sağ Üst: 30, Sol Orta: 60, Sağ Orta: 90, Sol Alt: 120, Sağ Alt: 150



Şekil 4.35. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Girişim Yönleri (derece): Sol Üst: 5, Sağ Üst: 10, Sol Orta: 15, Sağ Orta: 20, Sol Alt: 25, Sağ Alt: 30

Çizelge 4.28. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [0-180] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
0	-45,43	-45,43	0,00
30	-0,78	-43,45	42,67
60	-5,42	-45,20	39,78
90	-7,16	-45,83	38,67
120	-5,42	-45,20	39,78
150	-0,78	-43,45	42,67
180	-45,43	-45,43	0,00

Çizelge 4.29. Sekizli Karesel Anten Dizisi ile PI Algoritması [1-30] derece Girişim Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	İstenen Sinyal Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
1	-25,98	-45,41	19,43
2	-19,73	-45,37	25,64
3	-16,14	-45,33	29,19
5	-11,69	-45,21	33,52
10	-6,07	-44,87	38,80
15	-3,16	-44,30	41,14
20	-1,45	-43,66	42,21
25	-0,81	-43,43	42,62
30	-0,78	-43,45	42,67

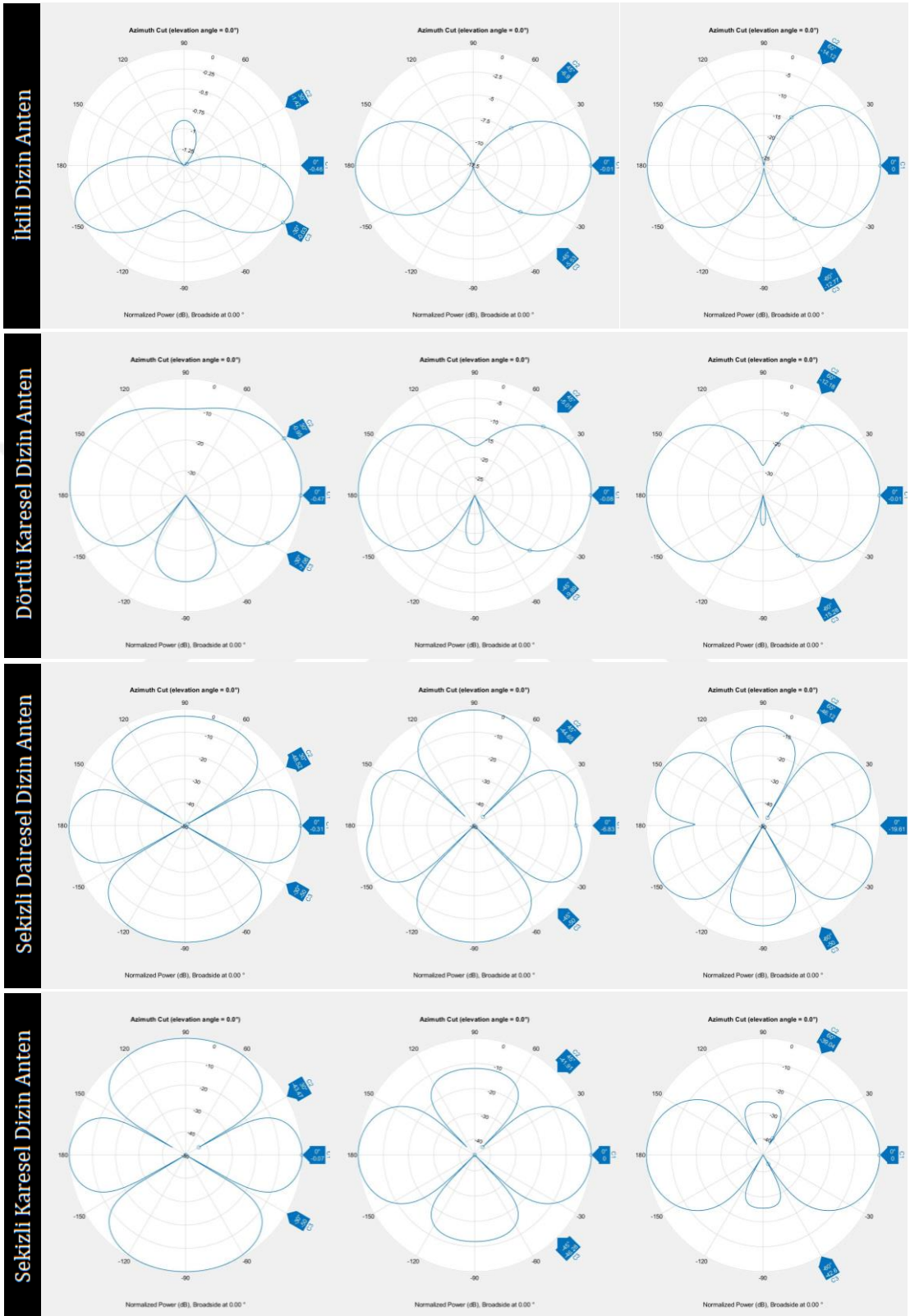
Tüm anten dizisi geometrileri için; girişim sinyalinin iki ayrı yönden geldiği durumda PI uyarlamalı anten algoritması sonucu oluşan anten örüntüleri ve girişim/sinyal seviyesi bastırma sonuçları sırası ile Şekil 4.36'da ve Çizelge 4.30'da verilmiştir.

Karıştırma
Yönleri
(derece)

(-30; 30)

(-45; 45)

(-60; 60)



Şekil 4.36. İki Girişim Sinyali ile PI Algoritması Benzetimi Sonrası Ağırlıklandırılmış Anten Örüntüleri (Karıştırma Sinyali: [0-180] derece)

Çizelge 4.30. İki Girişim Sinyali ile PI Algoritması Benzetim Sonuçları

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi			4'lü Karesel Anten Dizisi			8'li Dairesel Anten Dizisi			8'li Karesel Anten Dizisi		
	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)	İstenen Sinyal Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim Sinyali Yönü deki Bastırma (dB)	Girişim/Sinyal Seviyesi Bastırma Oranı (dB)
(-30, 30°)	-0,46	-0,03; -1,42	-0,43; 0,96	-0,47	-7,06; -0,95	6,59; 0,48	-0,31	-50,00; -48,52	49,69; 48,21	-0,07	-50,00; -43,47	49,93; 43,40
(-45, 45°)	-0,01	-5,53; -6,90	5,52; 6,80	-0,08	-9,89; -5,01	9,81; 4,93	-6,83	-50,00; -44,65	43,17; 37,82	0,00	-48,28; -41,91	48,28; 41,91
(-60, 60°)	0,00	-12,77; -14,12	12,77; 14,12	-0,01	-15,28; -12,18	15,27; 12,17	-19,61	-42,60; -39,04	22,99; 19,43	0,00	-42,60; -39,04	42,60; 39,04

Tüm sonuçlar incelendiğinde, girişim sinyalinin yönlerinin değişmesi ile, bastırma açısının da başarılı bir şekilde girişim sinyali yönünde değiştiği görülmektedir. Tüm sonuçlarda görülmektedir ki, PI algoritması girişim sinyali yönünde anten ağırlıklandırılmalarında her açıda maksimuma yakın kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır.

İstenen sinyalin tek yöllü geldiği durumda, Çizelge 4.31'de görülmektedir ki, girişim sinyalinin hedef sinyalden 1-15 derece farkla geldiği durumlarda, 4'lü ve 8'li anten dizileri kullanmak 2'li anten dizisi kullanmaya göre daha yüksek bastırma oranları sağlamaktadır. Kaynakların geliş açıları arasındaki farkın 15 dereceden büyük olduğu durumlarda ise 2'li anten dizisi ile alınan PI algoritması ile bastırma oranları diğer anten dizilerine göre daha yüksek seviyelerde sağlanmaktadır. Yine Çizelge 4.31'de görülmektedir ki, girişim sinyalinin hedef sinyalden 60-120 derece farkla

geldiği durumlarda, 2'li ve 4'lü anten dizileri 8'li anten dizilerine göre belirgin bir şekilde daha yüksek (yaklaşık 10-12 dB) bastırma sağlamaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde, hedef sinyalin tek yönlü geldiği durumlarda 2'li anten dizisi kullanımı ile PI algoritmasının girişim bastırma oranı iyi seviyededir. Bu nedenle, bu tip uygulamalarda anten dizisi eleman sayısı azaltılarak maliyet düşürülebilir.

İki girişim sinyalinin olduğu benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre, iki girişim sinyalinin olduğu durumda 8'li anten dizilerinin 2'li ve 4'lü anten dizilerine göre belirgin bir avantajı olduğu görülmektedir. 8'li anten dizilerinde 2 girişim kaynağı olduğu durumda, tüm açı değerlerinde normalize değerlere göre oldukça yüksek değerlerde bastırma sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 4.31. Kullanılan Anten Dizilerine Göre PI Algoritması Girişim Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	4'lü Karesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Dairesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)	8'li Karesel Anten Dizisi Bastırma Oranları (dB)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	14,29	19,20	21,50	19,43
2	20,24	25,00	27,53	25,64
3	23,76	28,44	30,97	29,19
5	28,22	32,80	35,19	33,52
10	34,28	38,66	40,60	38,80
15	37,84	41,98	43,44	41,14
20	40,35	44,22	45,05	42,21
25	42,28	45,82	45,55	42,62
30	43,84	47,01	44,94	42,67
60	49,09	48,10	36,46	39,78
90	50,00	47,88	38,53	38,67
120	49,09	48,10	36,46	39,78
150	43,84	47,01	44,94	42,67
180	0,00	0,00	0,00	0,00

PI algoritmasının uydu navigasyon sistemlerinde kullanımı önerildiğinde, hedef sinyalin çok yönlü olarak her yönden gelebileceği ve gürültü seviyesinin altında olabileceği göz önünde bulundurmaktır. Bu nedenle, normalize anten örüntüsü sonuçlarında yalnızca girişim sinyali yönündeki anten ağırlıklandırma kazançlarını karşılaştırmak faydalı olacaktır. Çizelge 4.32 incelendiğinde görülmektedir ki, 4'lü karesel anten dizisi yerleşiminde, girişim yönünde en yüksek seviyede bastırma elde edilmektedir. 8'li karesel anten dizisi yerleşiminde ise görece daha düşük bir bastırma ile karşılaşılmıştır. Ancak tüm sonuçlar -45 dB'den daha fazla girişim yönünde bastırma sağladığı için tüm sonuçların yeteri kadar yüksek seviyede bastırmanın sağlandığını gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 4.32. Kullanılan Anten Dizilerine Göre PI Algoritması Girişim Yönünde Bastırma Performanslarının Karşılaştırılması

Girişim Yönü (derece)	2'li Anten Dizisi Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	4'lü Karesel Anten Dizisi Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	8'li Dairesel Anten Dizisi Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)	8'li Karesel Anten Dizisi Girişim Sinyali Yönündeki Bastırma (dB)
1	-45,43	-50,00	-47,11	-45,41
2	-45,45	-50,00	-46,88	-45,37
3	-45,47	-50,00	-46,66	-45,33
5	-45,52	-50,00	-46,28	-45,21
10	-45,67	-50,00	-46,50	-44,87
15	-45,89	-50,00	-47,80	-44,30
20	-46,16	-50,00	-49,01	-43,66
25	-46,48	-50,00	-49,76	-43,43
30	-46,84	-50,00	-49,75	-43,45
60	-49,28	-50,00	-45,44	-45,20
90	-50,00	-48,29	-46,18	-45,83
120	-49,28	-47,88	-45,44	-45,20
150	-46,84	-48,29	-49,75	-43,45

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında uydu haberleşme sistemlerinde elektromanyetik girişim, elektromanyetik dahili/öz girişim ve uydu navigasyon sistemlerinde elektromanyetik girişim ayrı ayrı incelenmiş ve girişim bastırma yöntemleri olarak sırasıyla MVDR, LCMV ve PI tekniklerinin uygulanabilirliği analiz edilmiştir. Tüm sonuçlar irdelendiğinde görülmektedir ki, bu problemler için önerilen tekniklerin her birinin, problemlerin şartlarına oldukça uygun oldukları görülmektedir.

İncelenen tüm girişim bastırma tekniklerinde, anten dizisi eleman sayısının fazla olmasının birden fazla kaynak ve yönden gelen girişim sinyallerini bastırmakta önemli bir etmen olduğu görülmüştür. Ancak tek girişim sinyalinin olduğu durumlarda 2'li anten dizisi kullanımı da verimli sonuçlar vermektedir ve bu durum maliyeti düşürmek için değerlendirilebilir. Özellikle PI algoritmasının uydu navigasyon sistemlerinde kullanımı sırasında, hedef sinyalin çok yönlü ve gürültü seviyesinin altında olduğu durumda Çizelge 4.31 ve Çizelge 4.32'ye göre tekil karıştırma sinyali için en verimli sonuçlar 4'lü anten dizisi ile sağlanmıştır.

Genel olarak, hedef sinyal ile girişim sinyalinin geliş yönleri arasındaki açı farkının az olduğu durumlarda, tez kapsamında incelenen tüm yöntemler için bastırma seviyesi ciddi seviyede düşecektir. Dolayısı ile, örneğin girişim kaynağı başka bir uydu olduğunda ve bu girişime neden olan uydudan hedef uyduya yakın açılarda bir girişim meydana geldiğinde MVDR, LCMV ve PI tekniklerinin bastırma performansı anten dizisi eleman sayısına bağlı olarak düşük olacaktır. Bu tip hedef sinyal ile girişim sinyalinin geliş açıları arasındaki farkın az olduğu girişim etkileri için çok elemanlı anten dizilerinin seçilmesi daha verimli bastırma sonuçlarının elde edilmesini sağlayacaktır. Ancak, girişim kaynağının hedef sinyal kaynağından açısal olarak uzakta olduğu durumlarda 2 elemanlı anten dizileri dahi oldukça verimli sonuçlar vermektedir.

MVDR algoritması, girdi olarak yalnızca hedef sinyal yönünü kullandığından ve hedef sinyal yönünde anten kazancını maksimize etmeye çalıştığından, hedef sinyal yönünün genel olarak bilindiği uydu haberleşme sistemlerindeki girişim bastırma

ihtiyacını karşılamaktadır ve aynı işlevde kullanılabilir PI algoritmasına göre bastırma oranında avantaj sağlamaktadır. Çoklu girişim problemlerinde ise, MVDR algoritması sistemde var olan anten dizisi eleman sayısına bağlı olarak çoklu girişim bastırma işlevini yerine getirebilmektedir.

LCMV algoritması, girişim sinyali yönünün bilindiği durumlarda MVDR algoritmasına ve PI algoritmasına göre büyük avantaj sağladığı Çizelge 4.10, Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.31 karşılaştırıldığında görülmektedir. Bu nedenle, elektromanyetik dahili/öz girişim problemlerinde kullanımı bilinen bir girişim sinyalini bastırmada en verimli sonuçları verecektir.

Hem göndermeç, hem almaç bulunan sistemlerde sistemdeki göndermecin sistemdeki almaç üzerindeki girişim etkilerini ortadan kaldırmak için (in-bound full-duplex) LCMV algoritması kullanılabilir. Çünkü bu gibi durumlarda girişim yönü bilgilerine sahip olunabilecek ve bu algoritmadan en verimli şekilde yararlanabilecek ortam sağlanmış olacaktır.

İki girişim sinyalinin olduğu ve bir girişim sinyalinin yönünün algoritmaya girdi yapıлып diğer girişim sinyalinin yönünün bilinemediği durumda, 2'li ve 4'lü anten dizisi uygulamalarında bilinmeyen girişim sinyalinin 3 dB altında hedef sinyalin alınacağı tespit edilmiştir. Bu durumda, dahili/öz girişim durumuna karşı önlem alan bir sistemin dış bir kaynaktan girişime uğraması durumunda, 2'li ve 4'lü anten dizileri ile verimli çalışmayacağı değerlendirilebilir. 8'li anten dizilerinin 2'li ve 4'lü anten dizilerine göre belirgin bir avantajı olduğu görülmektedir ve 2 girişim yönünde de anten ağırlıklandırılmaları ile kazanç sıfırlama (nulling) sağlamaktadır. Dolayısı ile, bu tip girişim problemlerinde, yeterli bastırma değerlerinin sağlanması durumunda MVDR algoritmasından yararlanması da değerlendirilebilir. Ancak, birden fazla girişim kaynağının bulunduğu ve tüm girişim sinyallerinin dahili sistemlerden/alt sistemlerden kaynaklandığı durumda, tüm girişim sinyallerinin yönleri elde edilebilirse LCMV algoritması yüksek seviyede bastırma sağlayabilmektedir.

PI algoritmasının bastırma gücü diğer algoritmalarındaki kadar güçlü olmasa da; PI algoritması, hedef sinyal yönünün bilinmediği veya sürekli değiştiği durumlar için bu örnekler arasında tek alternatiftir. Bu nedenle, uydu navigasyon sistemleri için çok

uygun görünmektedir. İstenen sinyal ve girişim sinyallerinden hiçbirinin bilinmediği bu konseptte, incelenen yöntemler arasında kullanılabilir tek yöntem olarak görülmektedir.

Uydu navigasyon sistemlerinde hedef sinyalin alınan güç seviyeleri çok düşük seviyelerde, çoğu zaman ortamdaki gürültü seviyesinin altındadır. İstenen sinyal DSSS teknikleri sonrası elde edilmektedir. Ayrıca, hedef sinyalin hangi konumdan geldiği, sinyalin geliş yönünden değil, sinyal içerisindeki bilgiden elde edilmektedir. İstenen sinyalin birçok yönden ve değişken olarak gelebildiği durumlarda PI algoritması girişim sinyaline tüm yönlerde verimli bir şekilde bastırma uygulayabilmektedir. Girişim sinyalinin tek yönden geldiği durumlarda 2'li veya 4'lü karesel anten dizilerinin kullanımı ile daha verimli sonuçlar alınabilmektedir. Böylece daha az anten dizisi elemanı kullanılarak ekipman gideri azaltılabilir. Ancak çok yönlü girişim problemlerinde tüm girişim sinyallerinin bastırılması için anten dizisi elemanı sayısı diğer yöntemlerde olduğu gibi artırılmalıdır.

Günümüzde, yörüngedeki faal uydu sayısı ve yerküredeki girişim etmenlerinin giderek arttığı görülmektedir. Devletler tarafından halka açık kullanıma izin verilmeyen frekans bantlarında yayın yapmak için gerekli cihazlara sahip olmak her geçen gün kolaylaşmaktadır. Ayrıca, devletlerin elektronik harp amacıyla uzay segmentini kullanmaya giderek önem vermektedir. Bu koşullar irdelendiğinde, elektromanyetik girişim bastırma yöntemlerinin gelecekte meydana gelebilecek olası girişim problemlerinde kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

6. KAYNAKÇA

- [1] H. Editors, «HISTORY,» A&E Television Networks, 31 01 2019. [Çevrimiçi]. Link: <https://www.history.com/topics/inventions/guglielmo-marconi>. [Erişildi: 23 11 2021].
- [2] A. C. Clarke, «Extra-Terrestrial Relays - Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?,» *Wireless World*, cilt 51, no. 10, pp. 305-308, 1945.
- [3] «Elecromagnetic interference,» Wikimedia Foundation, Inc., 17 09 2021. [Çevrimiçi]. Link: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_interference. [Erişildi: 24 11 2021].
- [4] V. Muthukrishnan, «Electromagnetic Interference (EMI): What it is & How To Reduce it,» 03 09 2020. [Çevrimiçi]. Link: <https://www.electrical4u.com/electromagnetic-interference/>. [Erişildi: 25 11 2021].
- [5] CISA ve SAFECOM/NCSVIC, «Radio Frequency Interference Best Practices Guidebook,» Cybersecurity and Infrastructure Security Agency; SAFECOM/NCSVIC,; 2020.
- [6] F. S. Sayın, *Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve PCB Uygulamaları*.
- [7] «wikipedi.org,» Wikimedia Foundation, Inc, 10 11 2021. [Çevrimiçi]. Link: https://en.wikipedia.org/wiki/Communications_satellite. [Erişildi: 27 11 2021].
- [8] G. Maral, «Interference Analysis,» %1 içinde *VSAT Networks, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 207-226.
- [9] «INTERFERENCE CANCELLATION,» L3Harris Technologies, Inc., [Çevrimiçi]. Link: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/interference-cancellation>. [Erişildi: 25 12 2021].
- [10] «wikipedia.org,» Wikimedia Foundation, Inc, 25 11 2021. [Çevrimiçi]. Link: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation. [Erişildi: 28 11 2021].
- [11] S. Dawoud, «GNSS principles and comparison,» Potsdam University, 2012.
- [12] «File:Comparison satellite navigation orbits.svg,» Wikimedia Foundation, Inc, 27 09 2021. [Çevrimiçi]. Link: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Comparison_satellite_navigation_orbits.svg. [Erişildi: 28 11 2021].

- [13] «GNSS Frequencies and Signals,» [Çevrimiçi]. Link: <https://novatel.com/support/known-solutions/gnss-frequencies-and-signals>. [Erişildi: 28 11 2021].
- [14] «Test your Android device's satellite navigation performance,» 21 08 2018. [Çevrimiçi]. Link: <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/test-your-android-device-s-satellite-navigation-performance>. [Erişildi: 28 11 2021].
- [15] M. Cuntz, A. Konovaltsev, L. Kurz, C. Hättich, G. Kappen, M. Sgammini, A. Hornbostel, A. Dreher ve M. Meurer, «Interference and Countermeasures for GNSS Receivers,» %1 içinde *TUM Navigation Colloquium*, 2011.
- [16] E. Milne, *GNSS: Mitigating the Threats of Interference, Jamming & Spoofing*, 30.05.2018.
- [17] F. Filippi, M. Hunter ve G. Buesnel, «An Assessment of GNSS Receiver Behaviour in Laboratory Conditions When Subject to Meaconing or Spoofing Scenarios,» 12 01 2020. [Çevrimiçi]. Link: <https://www.thegpstime.com/gnss-receiver-meaconing-or-spoofing-scenarios/>. [Erişildi: 25 12 2021].
- [18] J. Ji, J. Zhang, D. Su and W. U. o. T. W. School of Information Engineering, "A Multipath Mitigation Algorithm for vehicle with Smart Antenna," in *International Conference on Power and Energy Engineering* , 2018.
- [19] C. Karakuş, «Microwave Circuits and Antenna Design - Beamforming and Antenna Array,» 2019. [Çevrimiçi]. Link: <https://ckk.com.tr/ders/microwave/00%20MicrowaveCircuits%20Ders-40.pdf>.
- [20] F. Liu, R. Du ve X. Bai, «A Virtual Space-Time Adaptive Beamforming Method for Space-Time Antijamming,» *Progress In Electromagnetics Research M*, no. 58, pp. 183-191, 2017.
- [21] K.-H. Lee, «A Study on Radar Target Detection using Space Time Adaptive Processing Algorithm and LCMV Algorithm,» *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, cilt 12, no. 5, pp. 243-248, 2021.
- [22] B. Allen ve M. Ghavami, *Adaptive Array Systems: Fundamentals and Applications*, Wiley, 2005.
- [23] J. Capon, «High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis,» *Proceedings of the IEEE*, pp. 1408-1418, 1969.
- [24] Mathworks, «Beamforming Overview,» [Çevrimiçi]. Link: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/beamforming-concepts.html>.
- [25] S. Waghmare, N. Gotarne, R. Botre ve K. Maske, «Beamforming Smart Antenna LCMV & MVDR Algorithm,» *International Journal of Advanced*

Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), no. Volume 4, Issue 3, pp. 1024-1025, 2015.

- [26] M. Souden, J. Benesty ve S. Affes, «A study of the LCMV and MVDR noise reduction filters,» *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp. 4925-4935, 2010.
- [27] S. Darzi, T. S. Kiong, M. T. Islam, M. Ismail, S. Kibria ve B. Salem, «Null Steering of Adaptive Beamforming Using Linear Constraint Minimum Variance Assisted by Particle Swarm Optimization, Dynamic Mutated Artificial Immune System, and Gravitational Search Algorithm,» *The Scientific World Journal*, no. 724639, 2014.
- [28] X. GUO, L. CHU ve B. LI, «Robust Adaptive LCMV Beamformer Based on an Iterative Suboptimal Solution,» *RADIOENGINEERING*, cilt 24, no. 2, pp. 572-582, 2015.
- [29] E. A. MOHAMED ve Z. z. TAN, «Adaptive Antenna Utilizing Power Inversion and Linearly Constrained Minimum Variance Algorithms,» *CHINESE JOURNAL OF AERONAUTICS*, cilt 18, no. 2, pp. 153-160, 2005.
- [30] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley, 2002.
- [31] R. T. Compton, «The Power-Inversion Adaptive Array: Concept and Performance,» *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 803-814, Kasım 1979.
- [32] M. G. Amin, «Adaptive Interference Nulling and Direction of Arrival Estimation in GPS Dual-Polarized Antenna Receiver,» %1 içinde *Adaptive Signal Processing in Wireless Communications*, CRC Press, 2009, pp. 418-419.
- [33] D. MENG, Z. FENG ve M. LU, «Anti-Jamming with Adaptive Arrays Utilizing Power Inversion Algorithm,» *TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY*, cilt 13, no. 6, pp. 796-799, 2008.