

# Geniş Bantlı Fazlı Anten Dizileri için Tasarım Yaklaşımları

Sinan Köksoy, Kenan Çapraz, Mert Kalfa, Erhan Halavut  
ASELSAN A.Ş. Radar, Elektronik Harp ve İstihbarat Sistemleri (REHİS) Grubu  
Anten Teknolojileri Müdürlüğü  
Ankara

[skoksoy@aselsan.com.tr](mailto:skoksoy@aselsan.com.tr), [kcapraz@aselsan.com.tr](mailto:kcapraz@aselsan.com.tr), [mkalfa@aselsan.com.tr](mailto:mkalfa@aselsan.com.tr), [ehalavut@aselsan.com.tr](mailto:ehalavut@aselsan.com.tr)

**Özet:** Bu çalışmada geniş bantlı ve geniş açılarda tarama yapan fazlı anten dizilerinin geliştirilmesinde kullanılan tasarım yaklaşımları özetlenmiştir. Bu bağlamda, dizi çarpanı hesaplamaları, görünür uzay diyagramları ve üç boyutlu elektromanyetik benzetimlere dayanan çeşitli analiz yöntemleri basitten karmaşığa doğru sırayla ele alınmış, her birinin uygulama alanları ve kısıtlamaları incelenmiştir. Buna ek olarak, bu tür tasarımlarda özellikle dikkate alınması gereken elemanlar arası etkileşimler, aktif S parametreleri, sonluluk ve kenardan yansıma etkileri gibi konular da işlenmiştir. Son olarak, örnek uygulamalarda elde edilen elektromanyetik benzetim ve ölçüm sonuçları verilmiştir.

## 1. Giriş

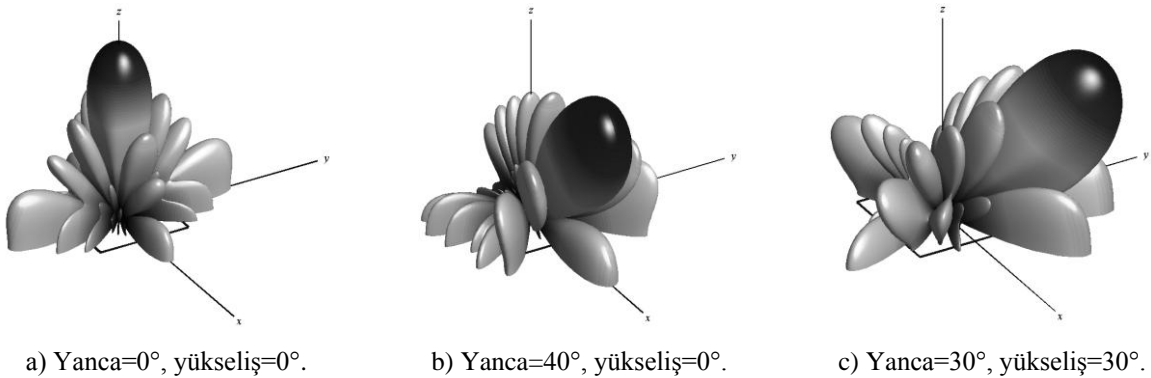
Fazlı anten dizileri radar, elektronik harp, uzaktan algılama ve telekomünikasyon alanlarında birçok uygulamada yer almaktadır. Geniş bantlı ve geniş açıda huzme yönlendirme yapabilen, karmaşık yapıdaki fazlı anten dizilerinin tasarımında çeşitli analiz yaklaşımları bulunmaktadır. Bu bağlamda öncelikle dizi çarpanı ve görünür uzay analizleri anten elemanlarının diziliminin ve anten açıklığının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Daha sonra tekil eleman ve sonsuz Floquet analizleri, elemanların özgül ışınma örüntüleri ve elemanlar arası etkileşimler de hesaba katılarak daha gerçekçi bir modellemeyle tasarımın hızlı bir biçimde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Son aşamada yapılan sonlu dizi benzetimleri ise, sonsuz benzetimlerde hesaba katılmayan kenar elemanı etkilerinin de hesaba katılarak tasarımın bütünsel olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

## 2. Dizi Çarpanı Hesabı ve Görünür Uzay Analizi

Dizi çarpanı, anten elemanlarının ışınma örüntülerini hesaba katmadan, ideal eşyönlü (izotropik) elemanlardan oluşan bir anten dizisi için hesaplanan ışınma örüntüsünü vermektedir ve herhangi bir dizilimde N adet eleman içeren bir dizi için en genel haliyle aşağıdaki gibi yazılabilir [1]:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N a_i e^{jk(\vec{r}_i \cdot \hat{a}_r)} \quad (1)$$

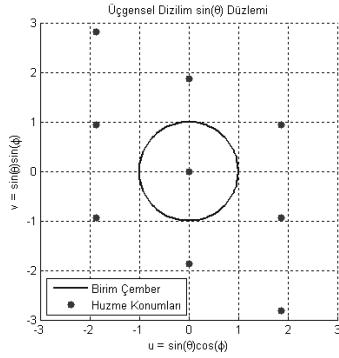
Bu ifade, temelde her bir dizi elemanından gelen katkıların toplanarak dizi çarpanının oluşturulmasını göstermektedir. Dizi çarpanı kullanılarak, herhangi bir eleman dağılımından oluşturulan bir dizinin yönlülük değeri (directivity), yan huzme (side lobe) düzeyi, ve huzme genişliği gibi özellikleri incelenebilir. Bunlara ek olarak, istenmeyen huzme (grating lobe) oluşup oluşmadığı da görülebilir. Şekil 1’de örnek bir dizi çarpanının ışınma örüntülerinin yukarı yarımkürede kalan kısımları üç farklı tarama durumu için gösterilmiştir.



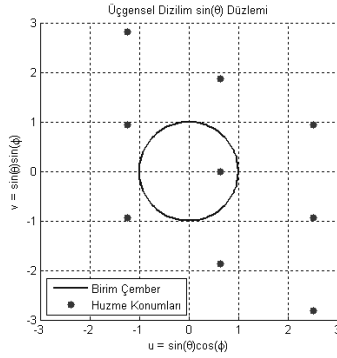
**Şekil 1.** Örnek bir düzlemsel dizi için dizi çarpanıyla hesaplanan uzak alan ışınma örüntüleri.

Dizi çarpanı hesabı, yan huzme düzeylerini incelenmesine olanak sağladığından dolayı farklı şekillerdeki (dikdörtgen, çokgen, dairesel, vb.) açıklıklar veya Taylor, Dolph-Chebyshev gibi farklı genlik dağılımları kullanılarak huzme şekillendirme ve yan huzme düzeyinin istenilen hale getirilmesi gibi çalışmaların yapılmasında kullanılabilir.

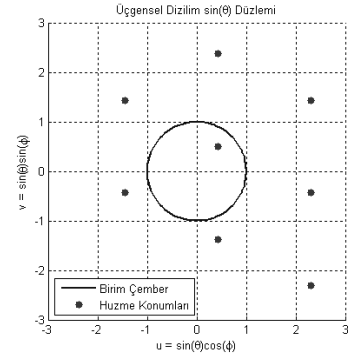
İstenmeyen huzmelerin daha ayrıntılı incelenmesi için görünür uzay (k-space) diyagramları [2] kullanılmaktadır. Şekil 2’de üçgen dizilimdeki bir dizi için iki farklı tarama durumundaki görünür uzay diyagramları verilmiştir. Bu yöntem yardımıyla farklı tarama durumlarında istenmeyen huzmelerin birim çemberin dışında bırakılmak suretiyle ışıma örüntüsünde ortaya çıkmalarının engellenmesi ve böylelikle belli bir anten açıklığından en az sayıda eleman kullanılarak en yüksek seviyede kazanç elde edilmesi mümkün olmaktadır. Geniş bantlı anten dizilerinde eleman yerleşimleri en yüksek frekansta ayarlanarak istenmeyen huzmeler tüm çalışma bandı boyunca önlenir.



a) Yanca=0°, yükseliş=0°.



b) Yanca=40°, yükseliş=0°.



c) Yanca=30°, yükseliş=30°.

Şekil 2. Üçgen dizilimli örnek bir dizinin iki farklı tarama durumu için görünür uzayı diyagramları.

### 3. Anten Elemanı Analizleri

Dizi içerisinde kullanılması düşünülen anten elemanlarının tek başına üç boyutlu olarak modellenerek analiz edilmesiyle bulunan sonuçlar dizi çarpanı hesaplamalarıyla birleştirildiğinde sonlu büyüklükte bir dizinin ışıma örüntüsü elde edilebilir. Fakat bu tür bir analiz doğru sonuç vermesi için anten elemanlarının dizi ortamına yerleştirildiklerinde giriş empedanslarının ve ışıma örüntülerinin fazla değişmemesi gerekmektedir. Bu durum ise ancak dizide bulunan antenler arası etkileşimlerin ihmal edilebilir düzeyde olması halinde geçerli olmaktadır. Dolayısıyla örneğin Vivaldi anten dizileri gibi elemanlar arasında güçlü etkileşimlerin söz konusu olduğu [3] ve dolayısıyla pasif (izole) ve aktif (dizi ortamı içerisinde) anten giriş empedansı ve ışıma örüntüleri [4] arasında büyük farklılıklar olduğu durumlarda daha ayrıntılı bir modelleme yapılması gerekmektedir.

Floquet analizleri [5], periyodik yapıdaki anten dizilerinin sonsuz ortamda modellenmesine imkân vermektedir. Bu yaklaşım, elemanlar arasındaki etkileşimlerin de dikkate alınması sayesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Floquet analizlerinin önemli bir avantajı, nümerik modelin sadece bir anten elemanı büyüklüğünde olması nedeniyle benzetimlerin oldukça hızlı yapılabilmesidir. Böylelikle küresel optimizasyon teknikleri kullanılarak dizi performansının büyük ölçüde optimize edilmesi mümkün olmaktadır. Öte yandan, sonlu boyutta bir dizide her elemanın merkez elemanlar kullanılarak modellenmesi dizinin tamamen karakterize edilebilmesi için yeterli olmamaktadır.

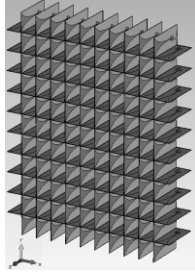
### 4. Sonlu Dizi Benzetimleri

Floquet analizlerinden elde edilen sonuçlar, sınırlı boyutlara sahip bir dizide iç elemanlar için oldukça doğru olmakla birlikte, dizinin kenarlarında kalan elemanlar için modellenmenin geçerliliği görece olarak daha kısıtlıdır. Sonlu bir dizide, kenarlardaki süresizlikler çeşitli yansıma ve yüzey dalgası etkilerine neden olabilmektedir [6]. Bu tür etkilerin de hesaba katılabilmesi için, dizinin sonlu modellenmesinin yapılması gerekmektedir. Sonlu modellerin benzetiminin donanımsal nedenlerle gerçekleştirilemediği durumlarda “sonlu çarpı sonsuz dizi” modellenmesi [7] gibi farklı yöntemlerin kullanılarak kenar etkilerinin hesaba katılması mümkündür.

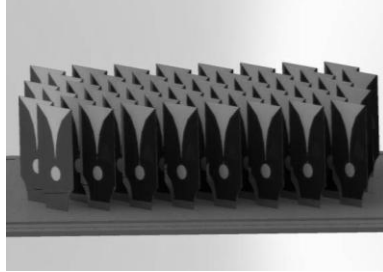
Bir anten dizisinin sonlu olarak modellenmesi, gerek anten elemanlarının empedans karakteristikleri, gerekse dizinin ışıma örüntüsünün karakterize edilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle geniş bantlı ve geniş açılara tarama yapan, dolayısıyla birçok çalışma senaryosunun söz konusu olduğu dizilerde dizi performansının ayrıntılı olarak için değerlendirilmesi, tasarım sürecinin başarısını doğrudan etkilemektedir.

## 5. Uygulama Örnekleri

ASELSAN REHİS Grubu Anten Teknolojileri Müdürlüğü bünyesinde 1-18 GHz frekans aralığında muhtelif geniş bantlı, geniş tarama aralığına sahip doğrusal ve düzlemsel yapıdaki fazlı anten dizileri, hava, kara ve deniz platformlarına konuşlu sistemler için geliştirilmektedir. Bu dizilere örnek olarak, oktav bantlı ayarlanabilir polarizasyonlu düzlemsel (Şekil 1a), yine oktav bantlı doğrusal polarizasyonlu düzlemsel (Şekil 1b) ve son olarak 3:1 bantlı (Şekil 1c) doğrusal anten dizileri üzerine yapılan bazı çalışmalar anlatılmıştır.



a) Ayarlanabilir polarizasyonlu dizi



b) 2:1 bantlı doğrusal polarizasyonlu düzlemsel dizi



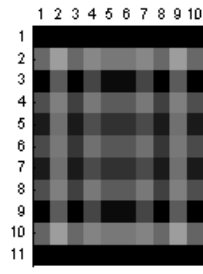
b) 3:1 bantlı doğrusal dizi

Şekil 3. Geniş bantlı, geniş tarama açılı fazlı anten dizisi örnekleri.

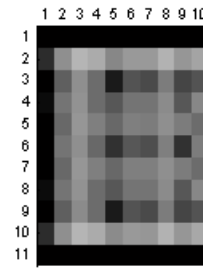
Şekil 4'te, çift polarizasyonlu Vivaldi anteninin dikey polarizasyonlu elemanlarının elektromanyetik benzetimle tek bir frekansta hesaplanan pasif ve iki farklı tarama durumu için aktif S parametreleri verilmiştir. Bu örnekte, pasif S parametreleri düşük düzeyde iken, anten elemanlarının arasındaki güçlü etkileşimlerden dolayı aktif yansımaların yüksek olduğu ve tarama yapıldıkça daha da yükseldiği görülmektedir. Ayrıca kenar etkilerinden kaynaklanan yansımaların alt ve üst kenarların bir yanındaki sıraları daha fazla etkilediği gözlenmektedir.



a) Pasif S parametreleri  $S_{i,i}$



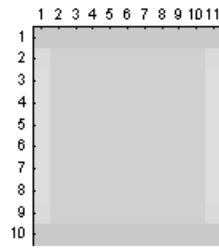
b) Yanca=0°, yükseliş=0° durumunda aktif S parametreleri.



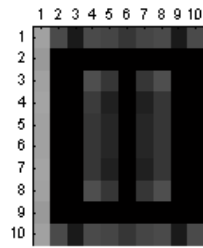
b) Yanca=30°, yükseliş=0° durumunda aktif S parametreleri.

Şekil 4. Çift polarizasyonlu dizinin dikey elemanlarının pasif ve aktif S parametreleri.

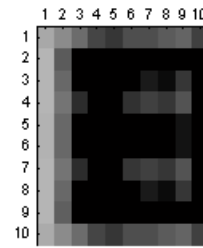
Şekil 5'te ise, çift polarizasyonlu Vivaldi anteninin yatay polarizasyonlu elemanlarının yine tek bir frekanstaki pasif ve aktif S parametreleri verilmiştir. Bu örnekte, anten elemanlarının arasındaki güçlü etkileşimlerden dolayı diğer polarizasyonun aksine, pasif S parametreleri oldukça yüksek iken aktif durumda yansımaların azaldığı görülmektedir. Ayrıca kenar etkilerinden kaynaklanan yansımaların sağ ve sol kenarlarda bulunan elemanları daha fazla etkilediği gözlenmektedir.



a) Pasif S parametreleri  $S_{i,i}$



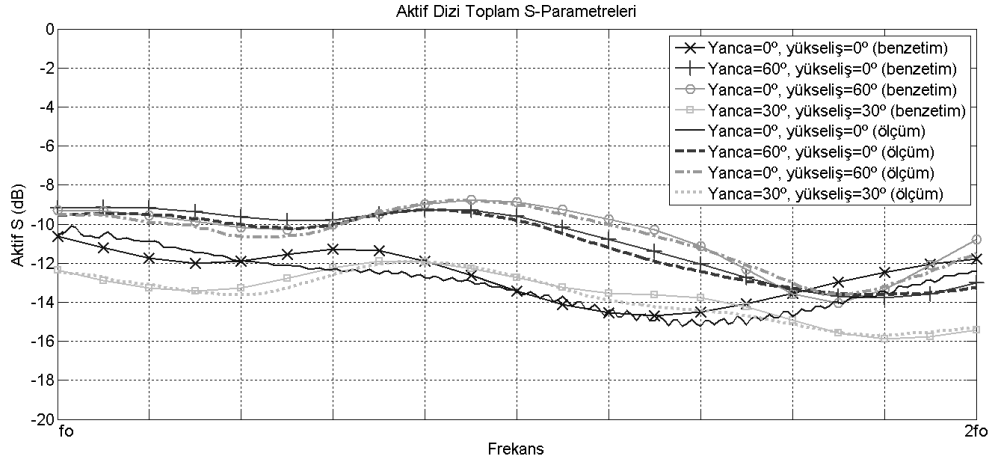
b) Yanca=0°, yükseliş=0° durumunda aktif S parametreleri.



b) Yanca=30°, yükseliş=0° durumunda aktif S parametreleri.

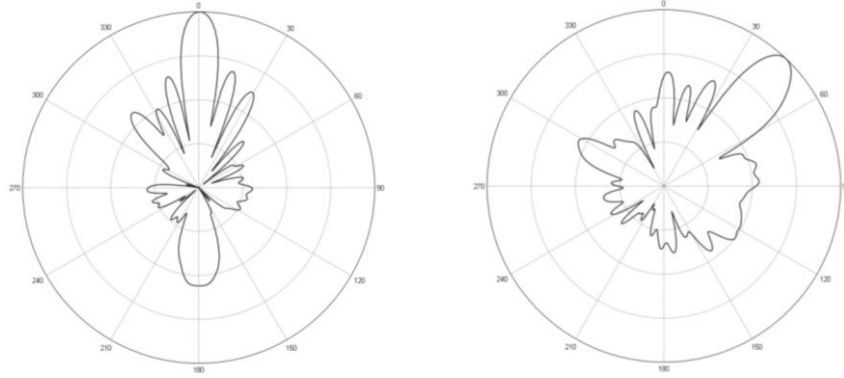
Şekil 5. Çift polarizasyonlu dizinin yatay elemanlarının pasif ve aktif S parametreleri.

Şekil 6’da tek polarizasyonlu Vivaldi dizisinin toplam S parametrelerini gösteren benzetim ve ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Elektromanyetik benzetim sonuçlarının ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6. Oktav bantlı tek polarizasyonlu dizinin S parametreleri.

Şekil 7’de 3:1 bantlı doğrusal yapıdaki bir Vivaldi anten dizisinin uzak alan ışıma örüntülerini gösteren ölçüm sonuçları, tarama yapılmayan ve geniş açıda tarama yapılan durumlar için gösterilmiştir.



Şekil 7. 3:1 bantlı doğrusal Vivaldi dizisinin ışıma örüntüleri.

## 6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında geniş bantlı ve geniş tarama açılarında çalışabilen fazlı anten dizilerinin tasarımına yönelik bazı yaklaşımlar işlenmiştir. Bu çerçevede, fazlı dizilerin incelenmesi için kullanılan çeşitli analiz yöntemleri, uygulama alanları ve kısıtlamalarıyla beraber sunulmuştur. Ayrıca geniş bantlı ve geniş tarama yapabilen antenlerin tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalar vurgulanmıştır. Son olarak, örnek anten tasarımları üzerinde değerlendirmeler yapılmış, üretimi gerçekleştirilmiş bir anten dizisinin analiz sonuçları, ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

## Kaynaklar

- [1]. R.J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 2005.
- [2]. E. Brookner, Ed., *Practical Phased Array Antenna Systems*, Artech House, 1991.
- [3]. A.O. Borysenko ve D.H. Schaubert, “Physical Aspects of Mutual Coupling in Finite Broadband Tapered Slot (Vivaldi) Arrays,” *5th International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Kiev, Ukrayna, 2005.
- [4]. D.M. Pozar, “The Active Element Pattern,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 42. cilt, 8. sayı, Ağustos 1994.
- [5]. B.A. Munk, *Finite Antenna Arrays and FSS*, John Wiley and Sons, 2003.
- [6]. R.C. Hansen, “Anomalous Edge Effects in Finite Arrays,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 47. cilt, 3. sayı, Mart 1999.
- [7]. A. Ellgardt, *Wide-angle Scanning Wide-band Phased Array Antennas*, Doktora Tezi, KTH, İsveç, 2009.