

Genetik Algoritmada Tek ve Çok Noktalı Çaprazlama Tekniklerinin Doğrusal Anten Dizisi Sentez Probleminde İncelenmesi

Fatih YAMAN¹

Asım Egemen YILMAZ²

^{1,2}Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 06100, Tandoğan, Ankara.

¹e-posta: fyaman73@yahoo.com

²e-posta: aeyilmaz@eng.ankara.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, öncelikle istenilen ışınma örüntüsünü sağlayacak, elemanları eşit ağırlığa sahip bir dipol anten dizisinin konfigürasyonunun Genetik Algoritma ile elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu maksatla eşdeğer dipol anten elemanlarına sahip, ardışık elemanları arasındaki faz farkı sabit olan doğrusal anten dizilerinden oluşan popülasyonlar üretilmiş; bu popülasyonlar genetik algoritmalar ile doğal seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Klasik Genetik Algoritma yöntemlerinde kullanılan tek noktalı çaprazlama yöntemi, performans yönünden çok noktalı çaprazlama yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Rastgele bir popülasyon ile başlanan süreç sonunda istenilen anten ışınma örüntüsüne oldukça yakın sonuçlar veren anten dizisi konfigürasyonu elde edilebilmiştir. Tek noktalı ve çok noktalı çaprazlama yöntemleri arasında yapılan karşılaştırmada, ele alınan anten dizisi uygulaması için tek noktalı çaprazlama yönteminin çok noktalı çaprazlama yöntemine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin iyi ebeveyn genlerindeki farklı sıra gruplarının karşılıklı yer değiştirmesinin, iyi gen yapılarının sonraki nesillere aktarılma olasılığını azaltması olduğu değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen değerler, tablo ve grafiksel olarak verilmiştir.

1. Giriş

Genetik Algoritma, evrim teorisindeki en iyi olan bireyin hayatta kalma ve genlerini sonraki nesillere aktarma olasılığının daha fazla olması esasına dayanmaktadır. Genetik Algoritma, kullanılan operatörler yoluyla en iyi bireyi bulmaya yönlendirilmiş bir arama yöntemi olmasına karşın; en iyi çözümü her zaman bulması garanti edilememektedir. Öte yandan, yapılan çalışmalar, Genetik Algoritma ile yapılan optimizasyon çalışmalarında ulaşılan sonuçların, çoğunlukla diğer optimizasyon teknikleriyle elde edilenlerden daha kullanılabilir olduğunu göstermektedir [1-2].

Genetik Algoritma, karmaşık fonksiyonların global optimum (maksimum veya minimum) noktalarının bulunması için gerekli çözümü sağlayan bir yöntemdir. Geleneksel optimizasyon yöntemleri için çok zor olarak kabul edilen çok değişkenli optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. En iyinin yaşaması ve zayıf olanın elenmesi kuralına bağlı olarak, algoritma sürekli iyileşen çözümler (veya çözüm adayları) üretir. Kötü olan çözümler

(veya çözüm adayları) ise algoritmanın süreci gereğince elenir [1-5].

Genetik Algoritmalar ayrık problemlerin çözümünde etkin olarak kullanılmaktadır. Bu anlamda, mühendislik uygulamalarında süresiz problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar vermekte olup elektromanyetik kuramındaki belirli problemlere de başarı ile uygulanmaktadır.

Elektromanyetik kuramındaki popüler araştırma konu başlıklarından biri olan anten dizilerinde temel amaç, tek anten ile elde edilemeyen bir ışınma örüntüsünün en az hata ile sağlanmasıdır. Bunun için dizi elemanlarının elektriksel özellikleri ve geometrik yerleşimleri önem kazanır.

Genel olarak, anten dizilerinin istenilen doğrultuda dar bir ana hüzmeye ve düşük seviyeli yan hüzmelerden oluşan bir örüntüye sahip olması istenir. Bu maksatla dizi elemanlarının geometrik yerleşimi, aralarındaki mesafeler, uyarım genlikleri ve ardışık iki eleman arasındaki faz farkı gibi parametreler uygun konfigürasyonda seçilmelidir. Anten dizileri doğrusal, düzlemsel veya dairesel olabilmektedir [6].

Literatürde Genetik Algoritmaların farklı uygulamaları kullanılarak anten dizisi tasarımı, sentezi ve örüntü şekillendirme konularında bir çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalardan farklı olarak klasik Genetik Algoritmanın standart elitizm ve mutasyon uygulamasının yanı sıra, en iyi bireyi elde etmekteki başarısının incelenmesi maksadıyla çok noktalı çaprazlama operatörü de kullanılmıştır. Ayrıca Genetik Algoritmalarda yaygın olarak kullanılan fonksiyon değişkenlerinin ikili sistemde "0" ve "1" karakterleri ile temsil edilmesi yerine, bireylerdeki "1" genleri dizinin aktif elemanlarını, "0" genleri ise dizinin pasif (kapalı) elemanlarını temsil etmek üzere kullanılmıştır.

2. Genetik Algoritmalar

Genetik Algoritmalar ilk defa 1975 yılında Holland tarafından ortaya konulmuştur [1]. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmaya başlanması ise Goldberg'in çalışmasının ardından gerçekleşmiştir. 1992 yılında ise Koza, Genetik Algoritmayı kullanarak çeşitli görevleri yerine getiren programlar geliştirmiş ve bu yöntemle Genetik Programlama adını vermiştir.

Genetik Algoritma, rastgele oluşturulan ve birçok çözüm takımının içinde bulunduğu, popülasyon adı verilen gen havuzu ile çalışmaya başlar [4]. Her bir değişkene bir kromozom adı verilir. Kromozomlar, genlerin kombinasyonu olup fonksiyonun değişkenlerinin tamamını bünyesinde bulunduran bireyleri oluştururlar. Genetik Algoritmalarında her bir bireyi, popülasyonun bir satırı temsil etmektedir. Fonksiyonun tüm değişkenlerinin yan yana sıralanması ile birey oluşmaktadır.

Değişkenler değişik şekillerde kodlanırlar. En yaygın olanı, ikilik sayı sistemi ile kodlanmasıdır. Bu sistemde kromozomlar "0" ve "1" genlerinin kombinasyonlarından oluşurlar. Popülasyonun her bir bireyi için uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanır.

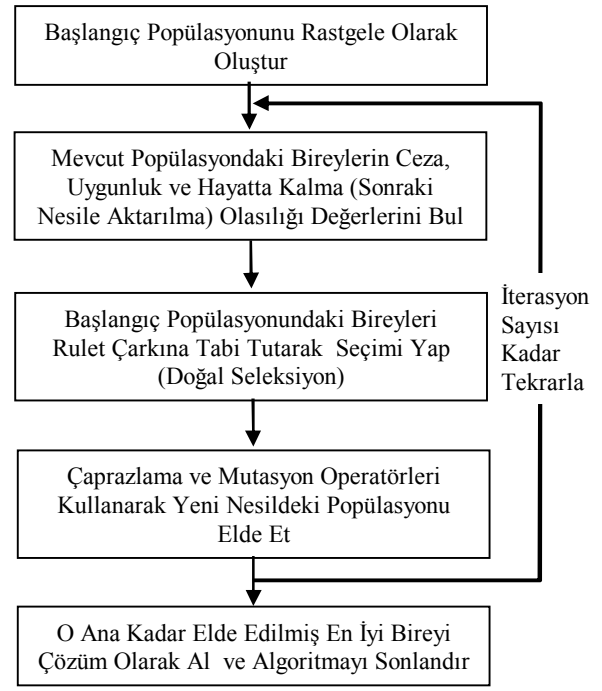
Kromozomlardan başarılı olanlar, yani uygunluk fonksiyonu değerleri aranan kriterlere yakın olanlar bir seçim yöntemi ile seçilirler. Aranan kriterlerden uzak olanlar ise elenirler. Başarılı bireyler ebeveyn olarak kabul edilerek aralarında üreme meydana getirilir. Bu olaya Genetik Algoritmada çaprazlama denir. Çaprazlama ebeveynlerin bazı genlerini yeni bireyler üzerine kopyalamaları işlemidir. Çaprazlama (üreme) sonucunda yeni bireyler elde edilir.

Daha sonra yeni bireylerin ebeveynlerinin kopyası olması olasılığını önlemek ve türdeki çeşitliliği artırmak amacıyla, bu bireyler mutasyona uğratılır. Mutasyon ile rastgele bazı genler değişikliğe uğrar. Örneğin ikili sayı düzeninde kodlama durumunda "0" ise "1", "1" ise "0" olurlar. Algoritmada bireyler arasında çaprazlama olma olasılığı ve herhangi bir bireyde mutasyon olma olasılığı gibi parametreler, program tasarlama tarafından belirlenir.

Sonuçta başarılı bireylerin genleri alt nesillere aktarılırken, zayıf olan bireylerin genleri ise zamanla yok olur. Yeni nesiller oluştuğunda gen havuzunun da kalitesi gittikçe artar. Başlangıçta havuz içinde birçok başarısız birey bulunmasına karşın, nesiller ilerledikçe havuzun çoğunluğunu başarılı bireyler oluşturur. En sonunda tüm bireyler aranan ideal bireye dönüşür. Bu durumda, optimizasyon sonuçlanmış olur.

Genetik Algoritma çalışmasında programın sonlandırılma şartı olarak nesil sayısı, programın çalışma süresi veya belirli bir süre boyunca sürekli aynı sonuçların elde edilmesi (bir başka deyişle en iyi çözüm önerisinde bir değişim olmaması) vb. bir takım koşullar belirlenebilir [4].

Genetik Algoritmanın genel çalışma mantığı Şekil-1'de verilmektedir.



Şekil-1: Genetik Algoritma Yapısı

2.1. Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Genetik algoritmaya optimizasyonu yapılacak fonksiyonun değişkenlerini içeren uygun sayıdaki bireylerin rasgele olacak şekilde oluşturulması ile başlanır. Burada bireylerin sahip olması gereken gen sayısı, çözülecek probleme bağlı olarak kullanıcı tarafından belirlenir. Genellikle söz konusu genler, ele alınan problemdeki genlerin sahip olabileceği değer aralığı ile doğrudan ilgilidir [4]. Popülasyonun oluşturulmasında önemli parametrelerden birisi de popülasyondaki birey sayısının optimum çözümü sağlayacak şekilde belirlenmesidir. Başlangıç Popülasyonunda gerektiğinden fazla sayıda birey bulunması, oluşturulacak programın işlem yükünü artırdığı gibi, istenilen başarının elde edilememesine neden olabilmektedir. Aynı şekilde popülasyondaki birey sayısının gerektiğinden az sayıda belirlenmesi ise, iterasyon sayısının gereksiz bir şekilde artmasına ve çözümsüzlüğe neden olabilmektedir.

2.2. Bireylerin Ceza, Uygunluk ve Olasılık Değerlerinin Bulunması

Genetik algoritmada ikinci adım, başlangıç popülasyonuna ait bireylerin ceza (hata) değerlerinin, referans olarak kabul edilen değerlerle kıyaslanarak hesaplanmasıdır. Bireydeki ceza fonksiyonu hesaplanabilecek gen sayısı n olmak üzere birey için ceza fonksiyonu;

$$C_i = \sum_{j=1}^n |X_{ref} - X_j| \quad (1)$$

olarak tanımlanır.

Bu durumda her bir bireye ait uygunluk fonksiyonu,

$$U_i = \frac{1}{C_i} \quad (2)$$

Bireylerin olasılıkları, m popülasyondaki birey sayısı olmak üzere her bir bireyin olasılık değeri;

$$P_i = \frac{U_i}{\sum_{j=1}^m U_j} \quad (3)$$

Bireylerin kümülatif olasılıkları ise, m popülasyondaki birey sayısı olmak üzere;

$$KP_i = P_1 + \sum_{i=2}^m P_i \quad (4)$$

formülü ile hesaplanabilir.

2.3. Rulet Çarkı, Çaprazlama ve Mutasyon İşlemleri

Oluşturulan ilk popülasyondan en iyi bireylerin seçilerek bir sonraki nesile aktarılabilmesi için bireylere rulet çarkı uygulanır. Bu maksatla ilk bireyden başlamak üzere her birey için “0” ile “1” arasında rasgele bir X sayısı üretilir. $X < KP_i$ şartını sağlayan KP_i değerine karşılık gelen birey yeni popülasyona aktırılır. Böylece kümülatif olasılığı yüksek (iyi) bireylerin sonraki nesile aktarılması sağlanır.

Ortaya çıkan ara popülasyondaki her birey için yine “0” ile “1” arasında rasgele bir X sayısı üretilir. X sayısı, kullanıcı tarafından belirlenen çaprazlama oranından küçük olan bireyler ikili gruplara ayrılarak ebeveyn olarak kabul edilir ve bunlara kendi aralarında çaprazlama (gen değişimi) işlemi uygulanır.

Bunun için, ebeveyn olarak seçilen bireylerden ilkinin rasgele olarak belirlenecek sıra ve sayıdaki geni ile diğer ebeveynin aynı sıra ve sayıdaki genleri karşılıklı yer değiştirilir ve iki yeni birey (çocuk) elde edilir.

Ebeveyn-1: 1011000|10100001001

Ebeveyn-2: 0101011|11000110101

Çocuk-1: 1011000|11000110101

Çocuk-2: 0101011|10100001001

Sonraki nesillerde sürekli benzer bireylerin ortaya çıkmasını önlemek maksadıyla çaprazlama işlemi sonrası oluşturulan ara popülasyon, mutasyon işlemine tabi tutulur. Bu amaçla kullanıcı tarafından belirlenecek mutasyon oranı kadar gen “0” ise “1”, “1” ise “0” yapılır [4].

Çocuk-1: 101100011000110101

101101011000110101

(6. geni mutasyona uğrattılmıştır)

Çocuk-2: 010101110100001001

010101100100001001

(8. geni mutasyona uğrattılmıştır)

Bu işlemler iterasyon sayısı kadar sürdürülür. Elde edilen son popülasyondaki uygunluk değeri en yüksek birey, en iyi birey olarak seçilir ve genetik algoritma tamamlanmış olur [4].

3. Doğrusal Anten Dizileri

Anten dizileri, farklı veya benzer antenlerin değişik şekillerde birleştirilmesiyle oluşturulmuş anten sistemleridir. Anten dizileri, tek bir anten ile yeterli olarak sağlanamayan düşük yan kulakçık (*side lobe*) seviyesi, dar ana hüzmeye, yüksek yönelme (*directivity*) yeteneği gibi özellikleri sağlamak amacı ile kullanılmaktadır.

Diziler, çeşitli geometrik şekillerde konumlandırılabilir. Dizi elemanlarının bir doğru üzerinde konumlandırılmaları durumunda ise doğrusal anten dizisi olarak adlandırılırlar. Anten dizileri, elektronik tarama özellikleri sayesinde özellikle radar sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Ayrıca dizideki elemanların güçlerinin birbirine eklenmesi ile yüksek güçlü örüntü/patern (*pattern*) elde edilmekte, mekanik harekete ihtiyaç duyulmaksızın ana hüzmeye istenildiği gibi yer değiştirebilmektedir [6-8].

Anten dizilerinin bir diğer avantajı da, özellikle hava araçlarının yüzeyine bu araçların aerodinamik yapılarını bozmadan yerleştirebilmeleridir.

Dizideki her bir anten elemanının uzak alandaki elektrik alan değeri,

$$\mathbf{E}_{toplam} = \mathbf{E}_{tek_eleman} \times AF \quad (5)$$

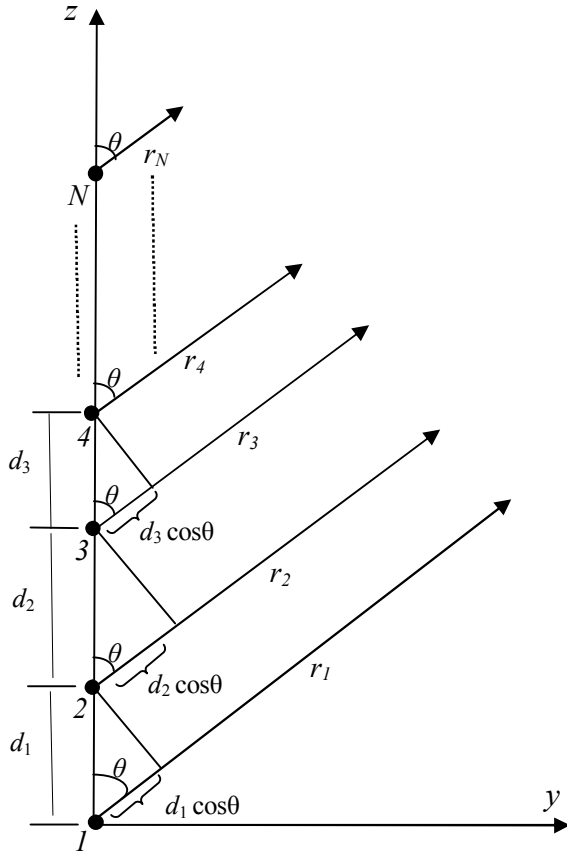
olarak tanımlanır [6]. Burada AF , Dizi Faktörü'dür (*Array Factor*). Dizi elemanlarının geometrisi Şekil-2'de verilmiştir.

N elemanlı bir anten dizisinin Dizi Faktörü (AF),

$\psi = k d \cos\theta + \beta$ olmak üzere,

$$AF = \frac{1}{N} \frac{\sin(\frac{N}{2}\psi)}{\sin(\frac{1}{2}\psi)} \quad (6)$$

şeklinde tanımlanabilir [6]. Burada $k = 2\pi / \lambda$, d ardışık iki dizi elemanı arasındaki mesafe ve β ardışık iki dizi elemanı arasındaki faz farkıdır.



Şekil-2: Dizi Geometrisi

4. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, doğrusal anten dizilerinde elde edilmek istenen ışınma örüntüsünü sağlayan konfigürasyonun Genetik Algoritma ile bulunmasına çalışılmıştır. Elde edilmek istenen örüntünün ışınma katsayıları, algoritmaya girdi olarak verilmiştir.

Genetik algoritmada çaprazlama operatörü olarak öncelikle tek nokta çaprazlama yöntemi kullanılmış, daha sonra ise çok noktalı çaprazlama operatörü denenmiştir. Denklem (5)'de belirtilen ve dizideki her bir anten elemanının tek başına elektrik alan ifadesi olan $E_{tek-eleman} = \cos\theta$ kabul edilmiştir.

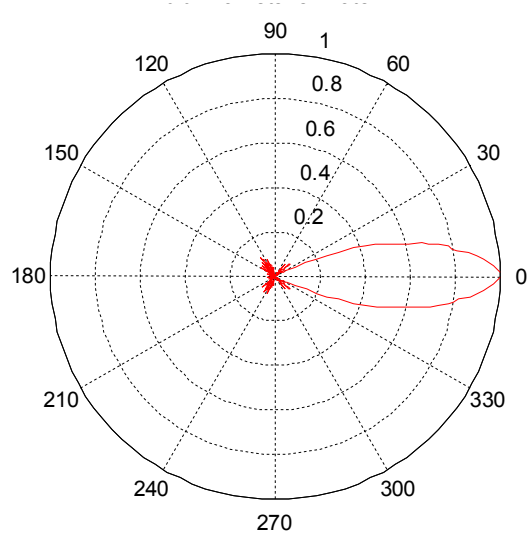
Dizi faktörünün hesaplanmasında ise Denklem (6) kullanılmıştır. Geliştirilen uygulamada, Genetik Algoritma kapsamında oluşturulan bireylerde "1" genleri dizinin aktif (açık) olan anten elemanlarını, "0" genleri ise dizinin pasif (kapalı) anten elemanlarını temsil etmektedir.

Çalışmada ışınma diyagramı, $0-2\pi$ radyan ($0-360^\circ$) aralığında 360 eşit parçaya bölünmüştür. Böylece, 1° hassasiyetinde

inceleme imkânı bulunmuştur. Öncelikle, istenilen örüntü/patern tanımlanmıştır. Tanımlanan örüntü, ana hüzmesi 0° merkezli olan ve yan hüzmeleri sıfıra yakın değerlerde bulunan ideale yakın bir örüntüdür. Ana hüzmeye, 48° 'lik bir açıyı kapsamakta olup yarı güç hüzmeye genişliği (Half Power Beam Width) 39° 'dir. Çalışma frekansı 300 MHz, ardışık elemanlar arası faz farkı ise $-\pi/2$ radyan olarak seçilmiştir.

Ana hüzmeyi dışındaki açılarda sıfır değeri yerine sıfıra yakın çok küçük değerler (0.1 'in altındaki ışınma katsayıları) kullanılmasının nedeni, Genetik Algoritmanın sıfır değerine yakınsamasını önlemektir. Elde edilmek istenen ışınma örüntüsü Şekil-3'de verilmiştir.

Söz konusu uygulama MATLAB 7.3.0 platformunda geliştirilmiş olup, MATLAB'ın Genetik Algoritma Araç Kutusu (*GA Toolbox*) kullanılmamıştır. Herhangi bir hazır ürün/kütüphane kullanılmamasının temel nedeni, ileride yapılacak çalışmalarda Genetik Algoritma'nın performans artırımı için çeşitli deneyler yapılacak ve algoritmanın birtakım değişimlere uğratılacak olmasıdır.



Şekil-3: Bulunmak İstenen Referans Dizi Örüntüsü/ Paterni

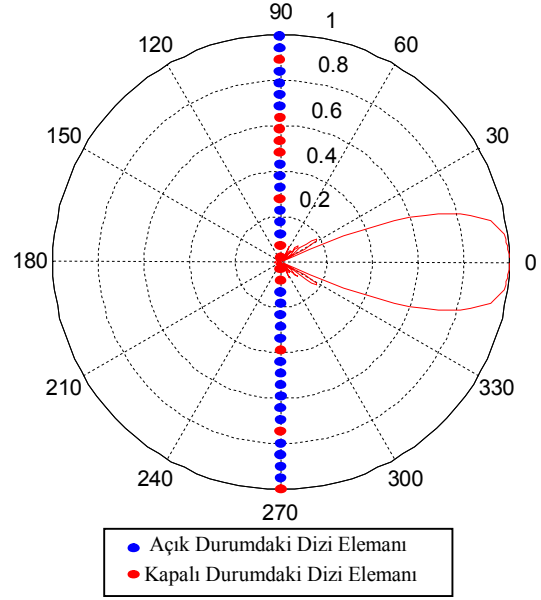
5. Bulgular

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde, sabit genlikli ve sabit faz farkına ($-\pi/2$ radyan) sahip eşit elemanlardan oluşan doğrusal dipol anten dizisi model olarak alınmıştır. Algoritmada; bağımsız deneme sayısı, popülasyondaki birey sayısı, dizideki eleman sayısı, çaprazlama oranı ve mutasyon oranı parametreleri değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Optimum çözüm, Tablo 1'deki parametre değerleri ile elde edilmiştir.

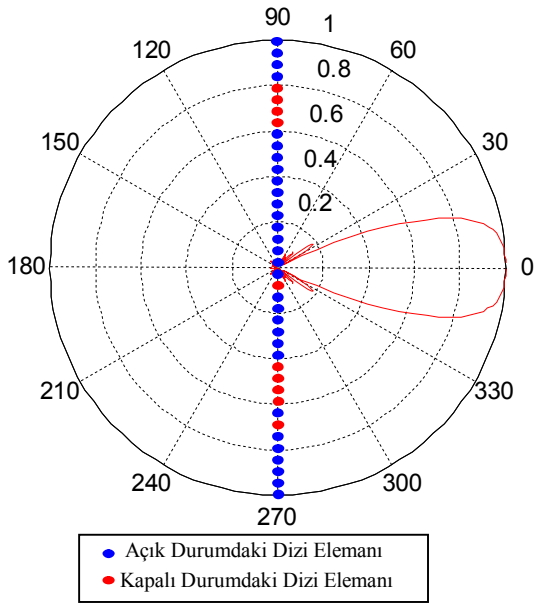
Kullanılan algorithmada öncelikle tek noktali çaprazlama operatörü ile sonuca gidilmiştir. Söz konusu yöntemde elde edilen sonuçlar tatmin edici seviyededir. Alternatif bir yöntem olarak çok noktali çaprazlama operatörü kullanılmış; ancak, daha başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Dolayısı ile yapılan çalışmada tek noktali çaprazlama yöntemi daha iyi sonuç vermiştir. Her iki yöntemde ait örüntü/patern dağılımları ve söz konusu dağılımları veren anten dizisi konfigürasyonları Şekil-4 ve Şekil-5’de verilmiştir.

Tablo-1: GA’da Kullanılan Parametre Değerleri
($f = 300$ MHz; Faz Farkı = $-\pi/2$ radyan).

Parametre Adı	Tek ve Çok Noktalı Çaprazlama Yönteminde Kullanılan Değer
Popülasyondaki Birey Sayısı	50
Dizideki Eleman Sayısı	40
İterasyon Sayısı	120
Çaprazlama Oranı	0.2
Mutasyon Oranı	0.01
Bağımsız Deneme Sayısı	100



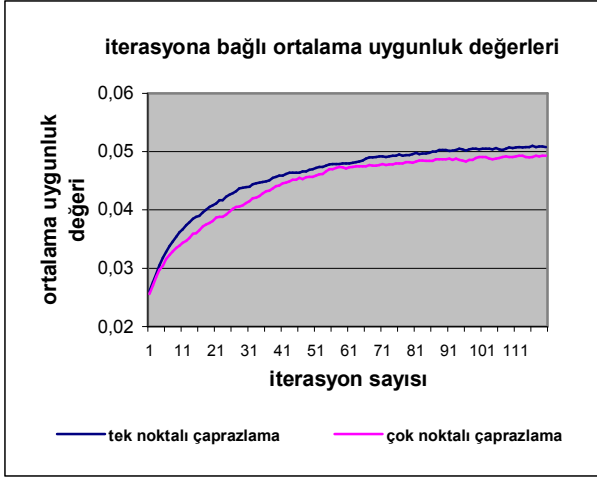
Şekil-5: Çok Noktalı Çaprazlama Yöntemi ile Elde Edilen Örüntü/Patern ve İlgili Anten Dizisi Konfigürasyonu



Şekil-4: Tek Noktalı Çaprazlama Yöntemi ile Elde Edilen Örüntü/Patern ve İlgili Anten Dizisi Konfigürasyonu

Örüntü/Patern dağılımlarında iki yöntemde ait sonuçlar benzer gözükmektedir. Ancak tek ve çok noktali çaprazlama teknikleri arasındaki performans farkının daha iyi görülebilmesi için Genetik Algoritma sonucu elde edilen popülasyonlardaki bireylerin uygunluk değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Ayrıca iki çaprazlama yönteminin karşılaştırılmasında, Genetik Algoritmaların doğası gereği bulunan şans faktörünün yanıltıcı etkisini en aza indirmek amacıyla, her bir yöntem için birbirinden bağımsız 100 deneme yapılmış ve söz konusu denemelerde elde edilen sonuçların ortalamaları Şekil-6’da grafik olarak verilmiştir.

Şekil-6’daki sonuçlar incelendiğinde, tek noktali çaprazlama yöntemindeki ortalama uygunluk değerlerinin çok noktali çaprazlama yöntemine göre, yapılan denemelerin çoğunluğunda daha yüksek olduğu açık bir şekilde görülebilmektedir. Bunun nedeni, rulet çarkı sonucunda seçilen iyi bireylerin (ebeveynlerin) çok noktali (iki noktali) çaprazlama yöntemine tabi tutularak farklı sıralardaki iki gen gruplarının yer değiştirmesi, böylece iyi gen dizilimlerinin çocuklara (yeni bireylere) yansımalarının tek noktali çaprazlama yöntemine göre daha sınırlı olmasıdır.



Şekil-6: Birbirinden Bağımsız 100 Deneme Sonunda Tek ve Çok Noktalı Çaprazlama Yöntemleri Kullanılarak Bulunan İterasyona Bağlı Popülasyon Ortalama Uygunluk Değerleri

Elde edilen bu sonuç, yapılan anten dizisi uygulaması için geçerli olup, söz konusu sonucun tüm Genetik Algoritma uygulamaları için genelleştirilmesi yanlış olacaktır.

6. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada öncelikle, lineer dipol anten dizisinde olması istenen bir paterni sağlayacak anten dizisinin Genetik Algoritmalarla elde edilmesi sağlanmıştır. Rastgele bir popülasyon ile başlanan süreçte, istenilen anten ışıma örüntüsüne oldukça yakın sonuçlar veren anten dizisi konfigürasyonu elde edilebilmiştir. Genetik Algoritmalarda yaygın olarak kullanılan fonksiyon değişkenlerinin ikili sistemde “0” ve “1” karakterleri ile temsil edilmesi yerine, bireylerdeki “1” genleri dizinin aktif olan antenlerini, “0” genleri ise dizinin pasif (kapalı) anten elemanlarını temsil etmek üzere kullanılmıştır.

Ayrıca kullanılan Genetik Algoritmada, tek ve çok noktali çaprazlama yöntemlerinin her ikisi de denenmiş; bu iki yöntem arasında performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Her bir çaprazlama yöntemi için yapılan 100 bağımsız deneme sonunda, ele alınan anten dizisi uygulaması için tek noktali çaprazlama yönteminin çok noktali çaprazlama yöntemine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin iyi ebeveyn genlerindeki farklı sıra gruplarının karşılıklı yer değiştirmesinin, iyi gen yapılarının sonraki nesillere aktarılma olasılığı azaltması olduğu söylenebilir.

Sonraki çalışmalarda, farklı türdeki anten dizilerinin sentezi problemlerinin ele alınması, bu amaçla daha farklı genetik algoritma türlerinin denenmesi hedeflenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] Holland, J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [2] Whitley, L.D., *Foundations of Genetic Algorithms-2*, MorganKaufmann Publishers Inc., California, 1993.
- [3] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman, 1989.
- [4] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [5] Öztürk, A., “Güç Sistemlerindeki Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma ile İncelenmesi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2007.
- [6] Balanis, C.A., *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley&Interscience Publication, New Jersey, 2005.
- [7] Visser, H.J., *Array and Phased Array Antenna Basics*, John Wiley & Sons Publication, 2005.
- [8] Mahanti, G.K., Pathak, N. and Mahanti, N., “Synthesis of Thinned Linear Antenna Arrays With Fixed Sidelobe Level Using Real-Coded Genetic Algorithm”, *Progress In Electromagnetics Research, PIER 75*, 319–328, 2007.