

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TAGUCHİ OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN ANTEN TASARIM  
PROBLEMLERİNE UYGULANMASI**

**İsmail SALKIM**

**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2012**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TAGUCHİ OPTİMİZASYON YÖNTEMİNİN ANTEN TASARIM PROBLEMLERİNE UYGULANMASI

İsmail SALKIM

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektronik Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ

Bu çalışma ile Taguchi optimizasyon yöntemi ve bu yöntemin nasıl uygulanacağına dair uygulama prosedürleri verilmiştir. Bu uygulama prosedürlerinden yola çıkarak Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılması ile elektromanyetik kuramındaki problemlerin (sentez, tasarım, vb.) ne şekilde çözümlendiğini gösteren literatür araştırmaları ile bazı deney sonuçları sunulmaya çalışılmıştır. Bunun yanında, Taguchi Yönteminin kullanıldığı diğer alanlardan da bahsedilmiştir. Elektromanyetik kuramındaki anten tasarım problemleri ile Taguchi Yönteminin uygulamaları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarla, Taguchi yönteminin söz konusu problemlerde geçerliliği ve etkinliği üzerinde yorumlamalar yapılmıştır.

**Ocak 2012, 105 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Taguchi Optimizasyon Yöntemi, Optimizasyon, Ters Problemler, Elektromanyetik Problemler

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **APPLICATION OF TAGUCHI OPTIMIZATION METHOD TO ANTENNA DESIGN PROBLEMS**

İsmail SALKIM

Ankara University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Asım Egemen YILMAZ

In this study, application procedures of the Taguchi optimization method are given. To demonstrate these application procedures, some problems (synthesis, design, etc) of the electromagnetic theory are solved by using the Taguchi optimization method. In addition, other application areas of the Taguchi method are also mentioned. Taguchi method applications are presented by antenna design problems in electromagnetic theory. Via the results, the applicability and the effectiveness of the Taguchi method is investigated in relevant problems.

**January 2012, 105 pages**

**Key Words :** Taguchi Optimization Method, Optimization, Inverse Problems, Electromagnetic Problems

## TEŐEKKÖR

ÇalıŐmalarımı yönlendiren, araŐtırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beŐeri iliŐkilerde de engin fikirleriyle yetiŐme ve geliŐmeme katkıda bulunan danışman hocam sayın Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ' (Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı )a ve hayatım boyunca birçok fedakarlıklar göstererek beni destekleyen değerli aileme derin duygularla teşekkür ederim.

İsmail SALKIM  
Ankara, Ocak 2012

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT .....	II
TEŞEKKÜR .....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
SİMGELER DİZİNİ .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	IX
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	3
2.1 Ortogonal diziler .....	3
2.1.1 Ortogonal dizi tanımı.....	3
2.1.2 Ortogonal dizilerin özellikleri .....	6
2.1.3 Ortogonal dizilerin oluşturulması .....	7
2.2 Taguchi yöntemi.....	11
2.2.1 Problemin başlatılması .....	17
2.2.2 Ortogonal diziyi kullanarak giriş parametrelerini tasarlama .....	18
2.2.3 Deneyin oluşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması .....	21
2.2.4 Optimum seviye değerlerinin tanımlanması ve doğrulama deneyinin koşturulması .....	22
2.2.5 Optimizasyon aralığının azaltılması.....	22
2.2.6 Sonlandırma kriterinin kontrolü.....	23
2.3 Anten dizileri .....	23
2.4 Mikroşerit antenler .....	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	28
3.1 Taguchi yönteminin elektromanyetik problemlere uygulanması.....	28
3.1.1 Problemin başlatılması .....	29
3.1.2 Giriş parametrelerinin belirlenmesi.....	31
3.1.3 Deneyin oluşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması .....	32
3.1.4 Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi .....	32
3.1.5 Optimizasyon aralığının azaltılması.....	33
3.1.6 Sonlandırma kriterinin kontrolü.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	35
4.1 Taguchi yönteminin rastrigin fonksiyonuna uygulanması.....	35
4.2 Taguchi yöntemi ile karesel mikroşerit yama anten tasarımı.....	41
4.2.1 İki değişken parametrelili karesel mikroşerit yama anten tasarımı .....	41

4.2.2 Üç değişken parametrelili karesel mikroşerit yama anten tasarımı.....	50
4.2.3 Beş (5) değişken parametrelili ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı	56
4.3 Taguchi yöntemi ile doğrusal anten dizisi tasarımı .....	66
4.3.1 On (10) değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı .....	69
4.3.2 Yirmi (20) değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı .....	75
4.4 Taguchi yöntemi ile genetik algoritmanın karşılaştırması.....	89
4.4.1 Genetik algoritmalar.....	89
4.4.2 Taguchi yöntemi ve genetik algoritmanın Rastrigin fonksiyonuna uygulanması ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması .....	91
4.4.3 Taguchi yöntemi ve genetik algoritma ile karesel mikroşerit yama anten tasarımının karşılaştırma sonuçları .....	93
4.4.4 Taguchi yöntemi ve genetik algoritma ile doğrusal anten dizisi tasarımının karşılaştırma sonuçları .....	98
5. SONUÇ .....	100
KAYNAKLAR .....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	106

## SİMGELER DİZİNİ

AF	<i>Array Factor</i> (Dizi Faktörü)
AISI H13	Sıcak İş Takım Çeliği
CD/DVD	<i>Compact Disk/Digital Versatile Disc</i> (Yoğun Disk/Sayısal Çok Amaçlı Disk)
Cr	Krom
dB	Decibel
GA	Genetik Algoritma
HO	Hata Oranı
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronical Engineers</i> (Elektrik-Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IE3D	<i>Electromagnetic simulation and optimization software</i> (Elektromanyetik simülasyon ve optimizasyon yazılımı)
LD	<i>Level Difference</i> (Seviye Farkı)
OA	<i>Orthogonal Array</i> (Ortogonal Dizi)
P	Parametre
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
RR	<i>Reduce Range</i> (Azaltma Oranı)
s	Seviye
SLL	<i>Side Lobe Level</i> (Yan Kulakçık Seviyesi)
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Sinyal Gürültü Oranı)
S/N	<i>Signal to Noise</i> (Sinyal Gürültü)
THS	Toplam Hesap Sayısı
TiN	Titanyum Nitrit
UF	Uygunluk Fonksiyonu
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> (Ultra Yüksek Frekans)
$\eta$	Sinyal Gürültü Oranı

YO	Yakınsama Oranı
YSA	Yapay Sinir Ağları
°C	<i>Derece Celsius</i> (Derece Santigrat)



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Taguchi yöntemi uygulama prosedürü (Weng vd. 2007a).....	17
Şekil 2.2 N elemanlı dizi.....	24
Şekil 3.1 Dizi Geometrisi.....	31
Şekil 4.1 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonu için yakınsama oranı.....	40
Şekil 4.2 Dikdörtgensel Mikroşerit Yama Anten.....	43
Şekil 4.3 İki değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyon deneyi yakınsama eğrisi.....	48
Şekil 4.4 Üç değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonu deneyi yakınsama eğrisi.....	54
Şekil 4.5 Çift frekanslı ok biçimli kompakt mikroşerit anten yapısı.....	56
Şekil 4.6 Beş değişken parametrelili ok biçimli mikroşerit anten tasarımı optimizasyon deneyi için yakınsama eğrisi.....	63
Şekil 4.7 Yirmi elemanlı dizi için sıfır kontrol noktalı örüntü.....	68
Şekil 4.8 Yirmi elemanlı dizi için sektör hüzme örüntüsü.....	69
Şekil 4.9 Weng vd. (2007b) tarafından yapılan 10 değişken parametreleri optimizasyon problemi için yakınsama eğrisi.....	73
Şekil 4.10 On değişken parametreleri optimizasyon problemi yakınsama eğrisi.....	74
Şekil 4.11 On değişken parametrelili optimizasyon problemi için istenen ve bulunan örüntünün birleşik görüntüsü.....	74
Şekil 4.12 Yirmi elemanlı eşit aralıklarla yerleştirilmiş doğrusal dizi geometrisi.....	76
Şekil 4.13 Weng vd. (2006a) tarafından yapılan 20 değişken parametreleri optimizasyon problemi için yakınsama eğrisi.....	85
Şekil 4.14 Yirmi değişken parametreleri optimizasyon problemi yakınsama eğrisi.....	86
Şekil 4.15 Yirmi değişken parametrelili optimizasyon problemi için istenen ve bulunan örüntünün birleşik görüntüsü.....	86
Şekil 4.16 Genetik algoritma yapısı.....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 OA (27, 10, 3, 2) ortogonal dizisi .....	5
Çizelge 2.2 OA (9, 4, 3, 2) ortogonal dizisi .....	10
Çizelge 2.3 OA (25, 6, 5, 2) ortogonal dizisi .....	10
Çizelge 2.4 Ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe ve Taşgetiren 2009).....	15
Çizelge 2.5 L8 Ortogonal dizisi ve parametrelerin yerleşimi .....	16
Çizelge 2.6 Rastrigin fonksiyonunun ilk iterasyonu için OA(27,10,3,2) ortogonal . dizisi parametre seviye değerleri gösterimi .....	19
Çizelge3.1 Sıfır kontrollü örüntü optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu (Weng 2007a) .....	33
Çizelge 4.1 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonunun ilk iterasyonu için Weng vd. tarafından bulunan tepki tablosu (Weng 2007a).....	38
Çizelge 4.2 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonunun ilk iterasyonu için bulunan teпки tablosu .....	38
Çizelge 4.3 Elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu .....	40
Çizelge 4.4 İki değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı için L9 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon <i>SNR</i> ve <i>UF</i> değerleri .....	44
Çizelge 4.5 İki değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu .....	46
Çizelge 4.6 İki değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu .....	48
Çizelge 4.7 Üç değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı için L9 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon <i>SNR</i> ve <i>UF</i> değerleri .....	51
Çizelge 4.8 Üç değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu .....	52
Çizelge 4.9 Üç değişken parametrelі dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonu deneyi sonuçları tablosu .....	54
Çizelge 4.10 Beş değişken parametrelі problem için L18 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon <i>SNR</i> ve <i>UF</i> değerleri .....	60
Çizelge 4.11 Ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu .....	62
Çizelge 4.12 Beş değişken parametrelі ok biçimli mikroşerit anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu .....	64
Çizelge 4.13 On değişken parametrelі problem için L27 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon <i>SNR</i> ve <i>UF</i> değerleri .....	70
Çizelge 4.14 On değişken parametrelі doğrusal anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu .....	72
Çizelge 4.15 İstenen parametre değerlerine göre bulunan parametre değerlerinin yakınlık miktarını gösteren hata oranı .....	75

Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon $SNR$ ve $UF$ değerleri .....	77
Çizelge 4.17 20 değişken parametrelili doğrusal anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu .....	84
Çizelge 4.18 Taguchi yöntemine göre bulunan genlik ve faz katsayıları değerleri .....	88
Çizelge 4.19 İstenen parametre değerlerine göre bulunan parametre değerlerinin yakınlık miktarını gösteren hata oranı .....	88
Çizelge 4.20 GA'da kullanılan parametre değerleri .....	92
Çizelge 4.21 GA ve Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu (birey sayısı=90).....	92
Çizelge 4.22 GA ve Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu (birey sayısı=20).....	93
Çizelge 4.23 GA'da kullanılan parametre değerleri .....	94
Çizelge 4.24 GA ve Taguchi yöntemi ile iki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90).....	94
Çizelge 4.25 Uygunluk fonksiyonu hesaplama sayısı .....	95
Çizelge 4.26 GA ve Taguchi yöntemi ile üç değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90) .....	95
Çizelge 4.27 GA ve Taguchi yöntemi ile beş değişken parametrelili ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90).....	96
Çizelge 4.28 GA ve Taguchi yöntemi ile iki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20) .....	96
Çizelge 4.29 GA ve Taguchi yöntemi ile üç değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20) .....	97
Çizelge 4.30 GA ve Taguchi yöntemi ile beş değişken parametrelili ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20).....	97
Çizelge 4.31 GA'da kullanılan parametre değerleri .....	98
Çizelge 4.32 GA ve Taguchi yöntemi ile 10 değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90) .....	98
Çizelge 4.33 GA ve Taguchi yöntemi ile 10 değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20) .....	99

## 1. GİRİŞ

Fiziksel teoriler, fiziksel sistemi tam olarak tanımlayan ve bazı ölçüm sonuçlarını öngörmemizi sağlayarak tahminlerde bulunmamıza izin verir. Bu şekilde ölçümlerin sonuçlarını tahmin ettiğimiz problem türlerine ileri problemler (analiz) denir. Ters problemler (sentez) ise bazı ölçümlerin gerçek sonuçlarını kullanarak sistemi tanımlayan parametreleri, bazı çıkarımlar yaparak bulunmasını sağlar. Ters problemlerin çözümünde, temelde ileri problemlerden yararlanarak deneme yanılma yolu ile çözüme ulaşılmaya çalışılır. Bu da deneysel çalışmaların yapılması sonucunu doğurur. Deneysel çalışmanın vazgeçilmez olduğu alan ve sektörlerde, zaman ve maliyet açısından büyük bir külfet oluşturan deneyler, “Taguchi Yöntemi” kullanılarak sayıca azaltılabilmekte, daha ucuz ve verimli sonuçlar alınabilmektedir. Taguchi yöntemi, temelde test ve kalite mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yöntem, ortogonal diziler (*orthogonal arrays*) kuramına dayanmasından ötürü, minimum test senaryosu ile maksimum test kapsamı sağlamak amacıyla ortaya konulmuştur. Özellikle anten dizisi tasarlama/sentezleme problemlerinde de, istenilen ışına örüntüsünü sağlayan dizi konfigürasyonunu bulma işlemi, kuramsal olarak  $n$  boyutlu uzayda  $2^n$  farklı olasılığın denenmesini gerektirmektedir. Taguchi yöntemi ile, sentezleme esnasındaki deneme-yanılma işlemlerini sistematik hale getireceği, optimum sonuca  $2^n$ ’den çok daha az sayıda deneme ile ulaşılabileceği değerlendirilmektedir.

Optimizasyon işlemi birçok alanda kullanılmakta olup son dönemlerde daha fazla önem kazanmıştır. Bu sebeple deneme yanılma yolu ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemini sistematik hale getirmek için genetik algoritmalar (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), yapay sinir ağları (YSA) gibi yeni algoritmalar da kullanılmaya başlanmıştır. Bu algoritmaların birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıflıkları optimizasyon hedeflerine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin yakınsama oranına yaklaşma hızı, genetik algoritmada oldukça iyi olmasına rağmen diğer yöntemlerde bu işlem biraz daha zayıf kalmaktadır. Taguchi yöntemi de benzer olarak diğer yöntemlerin başarısız olduğu bazı noktalarda bu yöntem ile oldukça iyi sonuçlar alınabilmektedir.

Bu tez çalışmasında da Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak elektromanyetik

kuramındaki bazı problemler (sentez, tasarım, vb.) için literatür araştırması sonucu bulunan çözümleri deneysel sonuçlarla birlikte sunulmaya çalışılmıştır. Bu problemlerden özellikle anten tasarım problemleri üzerinde durulmuş ve birkaç tipteki anten tasarım problemi çözülmüştür. Çözülen anten tasarım problemlerinde elde edilen sonuçlara göre yöntemin ne kadar başarılı ve etkin olduğu verilmiştir. Söz konusu yöntem 2006 yılı itibarı ile elektromanyetik kuramındaki bir takım problemlerde uygulanmaya başlanmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Ortogonal diziler

Ortogonal diziler ilk olarak Rao tarafından geliştirilmiş olup, faktöriyel tasarım problemlerinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır.

Mühendisler ve bilim adamları ürün geliştirmede ya da ürün geliştirme sürecinde iki husus ile karşı karşıyadır. Bu hususlardan bir tanesi, sürecin ya da ürünün performansını etkileyecek parametrenin kabul edilebilir ya da optimum değerinin bulunmasıdır. Diğer bir husus da eşdeğer performansı sağlayacak malzeme, alternatif tasarım ya da yöntemin en düşük maliyetle bulunmasıdır (Ross 1996). Taguchi yöntemi de bu yaklaşımı benimsemiştir. Taguchi yönteminin gelişimi özellikle istatistikte kullanılan ortogonal dizilere dayanmaktadır. Ortogonal diziler 1940'larda bulunmuş olup, özellikle deney tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ortogonal diziler, kontrol parametrelerini belirlemek için kullanılabilir etkin ve sistematik yollardan biridir. Çünkü, birkaç deneyin koşutlanması ile bile optimum sonuca ulaşılabilmektedir.

#### 2.1.1 Ortogonal dizi tanımı

$S$  sembol veya seviyelerden oluşan bir küme olsun.  $\mathbf{A}$  matrisi  $S$ 'den seçilen  $N$  satır ve  $k$  sütundan oluşan  $s$  seviye ve  $t$  şiddetinde bir ortogonal dizi olarak tanımlanır. Bu tanımda  $0 \leq t \leq k$  olmak üzere  $N \times t$ ,  $\mathbf{A}$  matrisinin bir alt dizisi ve  $t$  değeri de  $S$  temelli ve aynı zamanda oluşan bir satır olarak tanımlanır. Bu tanıma göre bir ortogonal dizi, özet olarak  $OA(N, k, s, t)$  şeklinde gösterilir (Weng vd. 2007a).

Bu tanımı daha iyi açıklamak için Çizelge 2.1'de 27 satır 10 sütuna sahip örnek bir  $OA(27, 10, 3, 2)$  ortogonal dizisi verilmiştir. Dizinin her bir girişi  $S = \{1, 2, 3\}$  kümesinden seçilmiştir. Bu sebeple belirtilen dizi üç seviyeli bir ortogonal dizidir.

Herhangi iki sütunun ( $t=2$ ) isteğe bağlı seçilmesi durumunda (1, 1), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (2, 2), (2, 3), (3, 1), (3, 2), (3, 3) kombinasyonlarını bir satır olarak dokuz olasılıklı olarak görülür. Her bir satırdaki parametrelerin oluşma olasılığı eşittir. Tanımdaki “ortogonal”ın anlamından, parametrelerin tüm kombinasyonları içerisinde en etkili ve dengeli bir biçimde seçim yapılması sağlanmış olur.

Bir ortogonal dizi deney tasarımında kullanıldığında, 10 adet sütun optimize edilecek 10 adet bağımsız parametreyi temsil eder. Bu sütunlarda yer alacak 1, 2, 3 değerleri her bir parametrenin seviyelerini göstermektedir. Farklı optimizasyon parametreleri için belirtilen 1, 2, 3 seviyeleri farklı değerler alacağı anlamına gelmektedir. Örneğin ilk parametre [0,1] optimizasyon aralığında değerler alabiliyorsa, seviyeler (1, 2, 3) için ilişkili değerler (0.25, 0.5, 0.75) olacaktır. Buna karşılık ikinci parametre [-1,0] aralığında değer alabiliyorsa, seviyeler (1, 2, 3) için ilişkili değerler (-0.75, -0.5, -0.25) olacaktır. Bu yüzden parametre seviyelerinin değerleri parametrenin kullanıldığı uygulama ve parametrenin tipine göre değişkenlik göstermektedir.

Aşağıda verilen ortogonal dizide tanımlanan her bir satır, 10 adet parametreden her birinin alabileceği seviyelerin kombinasyonunu içermektedir. Örneğin ilk satır tüm parametrelerin birinci (1.) seviye değerini alacağı anlamına gelmektedir. İkinci satırda ise 2. ve 8. parametrenin birinci (1.) seviye, 1, 3, 4, 5 ve 9 numaralı parametrelerin ikinci (2.) seviye değerini ve 6, 7 ve 10 numaralı parametrelerin üçüncü (3.) seviye değerini alacağı anlamına gelmektedir. Bu çizelgede her bir parametrenin ilgili seviyesinin aldığı değere göre ilgili satırdaki deney koşullararak bir sonuç elde edilmektedir. Aşağıda verilen Çizelge 2.1'e göre ortogonal dizide yer alan 27 satır her bir tasarım iterasyonu için 27 deneyin koşulların sağlanması gerektiği anlamına gelmektedir.

Çizelge 2.1 OA (27, 10, 3, 2) ortogonal dizisi

Deney Sayısı	Parametreler									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2



Çizelge 2.1 OA (27, 10, 3, 2) ortogonal dizisi (devam)

20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3

### 2.1.2 Ortogonal dizilerin özellikleri

Ortogonal dizilerin bilinen birkaç özelliği bulunmaktadır. Bu çalışmada Taguchi yöntemi ile ilgili olan, bilinen üç özelliği üzerinde durulmuştur. Bu özellikler aşağıda sırayla açıklanmıştır (Weng vd. 2007a).

Ortogonal dizilerin iyi bilinen özelliklerinden ilki tam faktöriyel özelliğe sahip olmasıdır. En az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyelerin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbiri ile çarpımları ile oluşan kombinasyonudur. Örneğin tam faktöriyel deney tasarımına göre 3 parametrelili ve bu parametrelerin 2 seviyeli (1, 2) değerleri için toplam  $2 \times 2 \times 2 = 8$  deney yapılması gerekmektedir. Fakat uygun ortogonal dizi seçimi ile bu deney sayısı 4'e düşürülebilmektedir. Benzer şekilde tam faktöriyel deney tasarımına göre 10 parametrelili ve her parametrenin üç seviyeli (1, 2, 3) değerleri için  $3^{10} = 59049$  deneyin koşturulması gerekmektedir. Bu deney tasarımı için ortogonal dizi seçimi ile yapılacak olursa sadece 27 deney ile optimum sonuca ulaşılabilmektedir. Burada deney sayısı oldukça azalmasına rağmen istatistiksel sonuçlara bakıldığında ortogonal dizi kullanımı

ile istenen optimum sonuçlara ulaşılabilmektedir.

Ortogonal dizilerin ikinci özelliği  $t$  parametreye kadar tüm kombinasyonların eşit olasılıkla oluşmasıdır. Örneğin yukarıda verilen çizelgede her bir parametreyi temsil eden sütunlara bakıldığında parametreye ait seviyelerin eşit olasılıkla olacak şekilde (9 kez) seşildiği görülür. Bu eşit olasılık herhangi bir parametre veya parametrelerin etkileşimi için dengeli ya da etkili karşılaştırma sağlar. Örneğin  $t$  parametresinin artması birbiri ile etkileşen parametrelerin çokluğunu ifade edebilir. Problemin türüne göre değişkenlik göstermekle beraber elektromanyetik ile ilgili problemlerin çözümü için yapılan çalışmalarda  $t$  değerini genelde 2 olarak seçilmiştir.

Ortogonal dizilerin alt dizilerinin yine ortogonal dizi olmasıdır. Bu gösterim  $N \times k'$  alt dizi yine  $OA(N, k, s, t)$  ortogonal dizisinden seçilen bir alt dizisi olarak  $OA(N, k', s, t')$  şeklinde gösterilir. Burada  $t' = \min\{k', t\}$  olarak tanımlanır. Bu ifade daha açık ifade edilmek istenirse, örneğin 13 parametrelili ve her parametrenin 3 seviyeli değerlerine sahip bir problemin çözümü için L16 ortogonal dizisi kullanılabilir. Eğer ortogonal dizi veri tabanında tanımlanmış parametre sayısına uygun ortogonal dizi yoksa, üst seviye bir ortogonal dizi seçilerek fazla olan sütunlar silinir. Bu şekilde uygun ortogonal dizi bulunmuş olur. Bu işlem gerçekleştirilirken, sütunlar silinip parametre sayısı düşürüldüğünden, ortogonal dizi veri tabanında bu parametre sayısı için kullanılabilir daha az deney sayısına sahip ortogonal dizi bulunmamalıdır.

### 2.1.3 Ortogonal dizilerin oluşturulması

Aşağıda ortogonal dizilerin varlığı ve oluşturulması ile ilgili temel iki soru üzerinde durulmuştur. Ortogonal dizinin varlığı ile basit bir durum “  $OA(N, k, s, t)$  ” dizisinin varlığı için verilen  $k$ ,  $s$ , ve  $t$ , değerlerine karşılık minimum  $N$  satır sayısının belirlenmesidir. Pratikte tercih ettiğimiz az sayıda deney sayısını temsil eden minimum  $N$  değerini bulmak için, Rao'nun eşitsizliklerinden yararlanılmaktadır.  $OA(N, k, s, t)$ 'nin parametreleri aşağıdaki eşitsizliği sağlamak zorundadır (Weng vd. 2007a).

$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{k}{i} (s-i)^i, \quad t=2u, \quad u>0$$

(2.1)

$$N \geq \sum_{i=0}^u \binom{k}{i} (s-i)^i + \binom{k-1}{i} (s-i)^{u+1}, \quad t=2u+1, \quad u \geq 0$$

(2.2)

Ortogonal dizilerin  $s=2$  seviyesi ve  $t=2, 3$  şiddetindeki (etki değeri) değerleri ile ilgili daha detaylı bilgiler Rao (1946) tarafından da verilmiştir.

Ortogonal dizilerin oluşturulması ile ilgili olarak da çok fazla sayıda teknik bulunmaktadır. Galois Alanları, bu yöntemlerin en çok bilinenlerindedir. Pek çok yöntem bu alanların ve sonlu geometrilerin kullanılmasını önermektedir. Ayrıca ortogonal diziler ve kodlama teorisi arasında da yakın bir ilişki mevcuttur. Bu nedenle, pek çok ortogonal dizi oluşturma tekniği hata düzeltme kodları temeline dayanmaktadır. Bunun yanında, fark şeması belirli ortogonal dizilerin oluşturulması ile ilgili bilinen eski yöntemlerden biridir. Günümüzde parametre, seviye ve şiddetine göre çok fazla sayıda ortogonal dizi veri tabanları oluşturulmuş ve kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında da L9, L18, L27 ve L81 ortogonal dizileri kullanılmış olup aşağıdaki bölümlerde bu ortogonal diziler verilmiştir.

Belirli uygulamalar için, ortogonal diziler bilgisayar kodları ile otomatik olarak oluşturulabilmektedir. Leung (2001) tarafından isteğe bağlı olarak seçilen tek seviye ( $s=3,5, 7, \dots$ ) ve 2 etki değerine ( $t=2$ ) göre oluşturulmuş ortogonal dizi verilmiştir.  $OA(N, k, s, t)$ , ortogonal dizisi için  $N$  ve  $k$  değerleri aşağıdaki iki eşitlik ile belirlenebilir;

$$N=s^p$$

(2.3)

$$k=(N-1)/(s-1), p \square 2, 3, \dots ; \quad (2.4)$$

$p$ , 2'den başlayan pozitif tam sayıdır. Ortogonal dizi oluşturma algoritması temel olan sütunların oluşturulması ve temel olmayan sütunların oluşturulması olmak üzere iki parçaya bölünebilir. Temel olmayan sütunlar temel olan sütunların doğrusal kombinasyonlarıdır. Bu algoritma için kullanılan sözde kodu aşağıdaki gibidir;

1) Temel sütunların oluşturulması

```

for  $ii=1$  den  $p$ 'ye
 $k=(s^{ii}-1)/(s-1)$ ;
for  $m=1$ 'den  $N$ 'ye
 $a(m,k)=[(m-1)/(s^p-1)] \bmod s$ 
end (döngü  $m$ )
end(döngü  $ii$ )

```

2) Temel olmayan sütunların oluşturulması

```

for  $ii=2$ 'den  $p$ 'ye
 $k=[(s^{ii}-1)/(s-1)]+1$ ;
for  $jj=1$ 'den  $k-1$ 'e
    for  $kk=1$ 'den  $s-1$ 'e
 $a(1 \sim m, k+kk+(jj-1)(s-1))=(a(1 \sim m, jj)kk a(1 \sim m, k)) \bmod s$ 
 $a(m, k)=[(m-1)/(s^p-1)] \bmod s$ 
    end (döngü  $kk$ )
    end (döngü  $jj$ )
end (döngü  $ii$ )
 $a(m, k) = a(m, k) + 1$ 

```

Bu koda göre oluşturulmuş OA(9, 4, 3, 2) ve OA(25, 6, 5, 2) ortogonal dizileri aşağıda sırasıyla Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.2 OA (9, 4, 3, 2) ortogonal dizisi

Parametreler				
Deney Sayısı	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Çizelge 2.3 OA (25, 6, 5, 2) ortogonal dizisi

Parametreler						
Deney Sayısı	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4

Çizelge 2.3 OA (25, 6, 5, 2) ortogonal dizisi (devam)

5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

## 2.2 Taguchi yöntemi

Taguchi, geliştirdiği ortogonal dizinler sayesinde yapılacak olan deneyleri önemli ölçüde azaltmış, bu da zaman ve maliyet kaybının artmasını engellemiştir. Anten tasarım deneyleri sonucunda istediğimiz amaca ulaşmak Taguchi yöntemi ile daha hızlı olmaktadır. Taguchi yönteminin en büyük avantajı yöntemin kolay uygulanabilir ve maliyet etkin bir yöntem olmasıdır.

Taguchi yöntemi, parametre tasarımı, sistem tasarımı ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş bir deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir. En yaygın olarak, kalite güvence sistemleri kapsamında toplanan verilerin, istatistiksel analizinde kullanılmaktadır. Bu yöntem kendi adı ile anılan Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olup Taguchi'ye göre bir ürünün kalitesinin, söz konusu ürünün geliştirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Ürünün arzulan özellikleri, ürün kalitesini belirlediğinden, bu özellikler tasarım aşamasında ortaya konmalı ve böylece arzu edilen performansta ürünlerin üretilmesi sağlanmalıdır (Taguchi vd. 2005). Taguchi'nin deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu saptamak adına oldukça yararlı bir yöntemdir (Gökçe ve Taşgetiren 2009).

Taguchi yöntemi literatürde bilim insanları tarafından en çok kullanılan deney tasarım ve optimizasyon yöntemlerinden biridir. Enjeksiyon kalıpları için alüminyum alaşımlı dökme plakaların alın tornalama parametrelerini çok amaçlı optimizasyon problemi olarak, Taguchi yöntemi ile L18 ortogonal dizisini kullanarak optimize edilmiş; eş zamanlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri bileşkesi minimize edilmiş ve talaş kaldırma oranı arttırılmıştır (Kopaj ve Krajnik 2007). Son frezeleme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemi uygulanmış, frezeleme parametreleri olarak kesme hızı, besleme oranı ve kesme derinliği ve kesme derinliği ile besleme oranı arasındaki etkileşimiyle 4 farklı parametre ve bu parametrelere 3 farklı seviye atanmıştır. Deney tasarımı için L27 ortogonal dizisi seçilmiştir. Kesici takım TiN kaplı malzeme ve işlenen malzemesi olarak da AISI H13 çeliği kullanmışlardır. Yapılan deney tasarımı sonucunda en iyi bileşkenin yüksek kesme hızı, düşük besleme hızı ve kısa kesme derinliği olduğu belirlenmiştir (Ghani vd. 2004).

Yuan Ke vd. (2002), çalışmalarında manyetik alanın kuvveti ve düzgünlüğü (*uniformity*) değer göstergesi olarak kullanarak, ince tip CD/DVD sürücü için en iyi manyetik tasarım Taguchi yöntemini uygulayarak tamamlamışlardır. Elde edilen sonuç, en iyi tasarım araştırmasının başarısı Taguchi Yöntemi ile kanıtlanmıştır. Ortalama değer ve düzgünlük dikkate alındığında, orijinal tasarım ortalama değerinde 1.2 kat ve

manyetik kuvvet düzgünlüğünde ise 2.3 kat olmuştur (Baynal 2005).

Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda, Taguchi yöntemi kullanılarak, çok daha az sayıda deneysel çalışma ile sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır. Taguchi deneysel tasarım metodunda geliştirilen metodoloji üç temel kavramdan oluşur bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır (Gökçe ve Taşgetiren 2009).

**Sistem tasarımı:** Sistem tasarımı bu metodun ilk adımıdır. Bu adımda eldeki bütün materyaller değerlendirilir, aynı zamanda mevcut teknolojik yenilikler araştırılır ve sistemde kullanılabilirliği üzerine fizibilitesi yapılır. Bu adımda amaç, en az maliyetle en iyi ürün tasarımı ve maksimum müşteri memnuniyetidir.

**Parametre tasarımı:** Süreç yenilemesi ve iyileştirmesinin en önemli adımı parametre tasarımıdır. Bu adımda üretilecek olan ürünün yada geliştirilecek olan ürünün özelliklerinin en iyi seviyeye getirilebilmesi için üretimde kullanılan parametrelerin iyileştirilmesi sağlanır. Parametrelere en iyi seviyeler seçilir. Üretim esnasında ürünün kalitesini olumsuz etkileyecek kontrol edilemeyen etkiler belirlenir. Bunlara kontrol edilemeyen parametre adı verilir bu parametrelerin etkileri minimize edilir.

Bu adımda parametreler bloklanırken Taguchi'nin geliştirmiş olduğu ortogonal diziler kullanılır. Aynı zamanda sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) analizi ile hesaplama yapılabilir. Parametreler belirlendikten sonra Taguchi ortogonal dizisinden bir dizi seçmek gerekmektedir. Çizelge 2.4'te Taguchi ortogonal dizi secim tablosu görülmektedir. Bu tabloya göre, bir araştırmacı 7 parametreye sahipse ve her bir parametrenin 2 seviyesi olduğu kabul edilirse L8 dizisi en uygun dizi olarak seçilir.

Çizelge 2.4'te L16 ve L32 dizileri 4 seviyeli deneyler için kullanılmaktadır. Aşağıda



verilen çizelgenin dışında kalan parametre ve seviyeler için deney şartları daha zor olduğundan parametre ya da seviye küçülterek uygun diziye getirilmesi tavsiye edilmektedir. Çizelge 2.5'te örnek olarak ortogonal diziler içerisinde L8 dizisi seçilmiş ve sütunlara P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 parametreleri atanmıştır. Bu çizelgede parametre sütunlarının altındaki 1-2'ler parametrelere ait seviyeleri göstermektedir. Y1, Y2, Y3 deneylerin tekrarlarının sonuçlarını göstermektedir. Aynı zamanda ortalamalar ve sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) değerleri de hesaplanarak kaydedilir (Gökçe ve Taşgetiren 2009).

**Tolerans tasarımı:** Tolerans tasarımında parametre belirleme çalışmaları sonucu istenilen hedefe ulaşamadığı durumda yapılan ilave çalışmalardan ibarettir. Bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapsmalar azaltılır.

Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) fonksiyonu olarak da ifade edilen üç farklı amaca uygun fonksiyon vardır. Bunlar; performans karakteristiği adı verilen sonucun en düşük değerinin en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} y_i^2 \right] \quad (2.5)$$

En yüksek değer en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} (1/y_i^2) \right] \quad (2.6)$$

Nominal değer en iyi olduğu durumda:

$$S/N = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{10} (\hat{y}^2 / S^2) \right] \quad (2.7)$$

$$\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i^2 / S^2) \quad (2.8)$$

$$S^2 = 1/(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ 'dir.} \quad (2.9)$$

Burada  $y_i$ , performans karakteristiğinin  $i$ . gözlem değeri;  $n$  değeri, ilk iterasyondaki test sayısı;  $\bar{y}$  değeri, gözlem değerlerinin ortalaması;  $S^2$ =gözlem değerlerinin varyansı olup  $S/N$  oranı büyüdükçe hedef etrafında ürün varyansı küçülür.

Çizelge 2.4 Ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe ve Taşgetiren 2009)

		Seviyeler							
		2		3		4		5	
Parametre Sayısı	D-2 S-2	L4	D-2 S-2	L9	D-2 S-1	L16	D-2 S-1	L25	
	D-3 S-2		D-3 S-2		D-3 S-1		D-3 S-1		
	D-4 S-2		D-4 S-2		D-4 S-1		D-4 S-1		
	D-5 S-2	L8	D-5 S-2	L18	D-5 S-1	L32	D-5 S-1	L50	
	D-6 S-2		D-6 S-2		D-6 S-1		D-6 S-1		
	D-7 S-2		D-7 S-2		D-7 S-1		D-7 S-1		
	D-8 S-2	L11	D-8 S-2	L27	D-8 S-1	L36	D-8 S-1	L50	
	D-9 S-2		D-9 S-2		D-9 S-1		D-9 S-1		
	D-10 S-2		D-10 S-2		D-10 S-1		D-10 S-1		
	D-11 S-2	L16	D-11 S-2	L36	D-11 S-1	L36	D-11 S-1	L50	
	D-12 S-2		D-12 S-2		D-12 S-1		D-12 S-1		
	D-13 S-2		D-13 S-2		D-13 S-1		D-13 S-1		
	D-14 S-2	L32	D-14 S-2	L36	D-14 S-1	L36	D-14 S-1	L50	
	D-15 S-2		D-15 S-2		D-15 S-1		D-15 S-1		
	D-16 S-2		D-16 S-2		D-16 S-1		D-16 S-1		
	D-17 S-2	L32	D-17 S-2	L36	D-17 S-1	L36	D-17 S-1	L50	
	D-18 S-2		D-18 S-2		D-18 S-1		D-18 S-1		
	D-19 S-2		D-19 S-2		D-19 S-1		D-19 S-1		
	D-20 S-2	L32	D-20 S-2	L36	D-20 S-1	L36	D-20 S-1	L50	
	D-21 S-2		D-21 S-2		D-21 S-1		D-21 S-1		
	D-22 S-2		D-22 S-2		D-22 S-1		D-22 S-1		
	D-23 S-2	L32	D-23 S-2	L36	D-23 S-1	L36	D-23 S-1	L50	
	D-24 S-2		D-24 S-2		D-24 S-1		D-24 S-1		
	D-25 S-2		D-25 S-2		D-25 S-1		D-25 S-1		
	D-26 S-2	L32	D-26 S-2	L36	D-26 S-1	L36	D-26 S-1	L50	
	D-27 S-2		D-27 S-2		D-27 S-1		D-27 S-1		
	D-28 S-2		D-28 S-2		D-28 S-1		D-28 S-1		

Çizelge 2.4 Ortogonal dizi seçim tablosu (Gökçe ve Taşgetiren 2009) (devam)

		Seviyeler			
Parame tre	2		3	4	5
	D=20	S=2	L32		
	D=20	S=2			
	D=21	S=2			

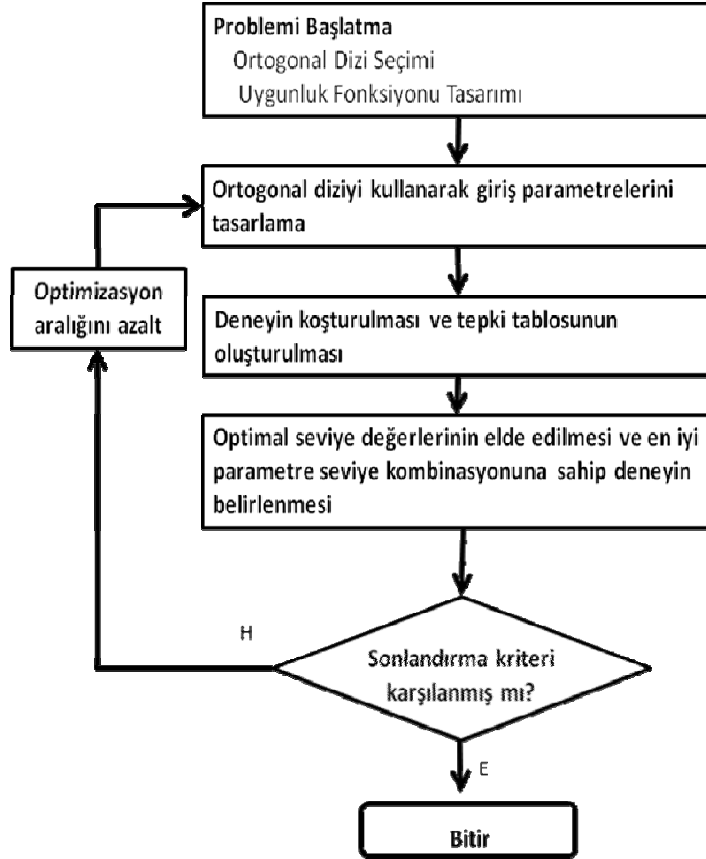
Çizelge 2.5 L8 Ortogonal dizisi ve parametrelerin yerleşimi

L8 Ortogonal Dizi												
Deneme No	Parametreler							Sonuçlar(3 Tekrar)				
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Y1	Y2	Y3	Ortalama	S/N Oranı
1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	*	*	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	*	*	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	*	*	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	*	*	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	*	*	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	*	*	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	*	*	*	*	*

Taguchi yöntemi uygulama prosedürü aşağıda başlıklar halinde verilen adımlara göre uygulanır. Taguchi yönteminin uygulama prosedürünü açıklamak üzere formül (2.10) verilen Rastrigin fonksiyonu seçilmiştir. Rastrigin fonksiyonu şu şekilde tanımlanır;

$$F(x) = 2 \sum_{i=1}^{10} [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10], \quad -9 < x_i < 8 \quad (2.10)$$

Bu fonksiyonda tüm  $x_i$  değerleri 0 olduğunda fonksiyon sonucu global minimum olan sifıra eşit olur. 10 adet giriş parametresi ( $x_i, i=1, \dots, 10$ ) optimize edilerek global minimum değeri bulunmaya çalışılır. Arama alanı  $[-9,8]$  arasında ayarlanarak asimetrik optimizasyon bölgesi bulunmaya çalışılır. Optimizasyon prosedürü uygulama detayları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.



Şekil 2.1 Taguchi yöntemi uygulama prosedürü (Weng vd. 2007a)

### 2.2.1 Problemin başlatılması

Taguchi optimizasyon yöntemi uygulama prosedürü problemin başlatılması adımı ile başlar. Bu adım uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun ( $UF$ ) tasarlanmasını içermektedir. Ortogonal dizinin seçimi, optimize edilecek olan parametrelerin sayısına bağlıdır. Örneğin optimize edilecek 10 adet parametre varsa,

seçilecek olan ortogonal dizide 10 adet parametreyi temsil edecek sütunun olması beklenir. Bu sütunlar OA ( $N, k, s, t$ ) ortogonal dizisinde  $k$ 'nin 10 değerine karşılık gelir. Ortogonal dizinin satırlarında yer alacak değerler ise her bir parametrenin alacağı seviye değerlerini gösterir. Bu seviyeler de ortogonal dizi gösteriminde “ $s$ ” değerine karşılık gelir. Taguchi yönteminde kullanılan dizilerde  $t$  (şiddet) değeri genelde 2 değerini alır. Bu değer küçük olması problemlerin çözümü için ortogonal dizide daha az sayıda satır (deney sayısı) olmasını sağlar. Bu açıklamalara göre 10 adet parametrenin optimizasyonu ihtiyacının olduğu bir problemde, bu parametrelerin üç seviyeleri değerleri varsa 10 adet sütuna, 3 seviyeye ve 2 şiddetinde parametrelere sahip bir ortogonal dizinin seçilmesi problemin çözümü için yeterlidir.

Ortogonal dizi veri tabanından uygun ortogonal dizi araştırıldığında OA (27, 13, 3, 2) ortogonal dizisinin yukarıda verilen problemin çözümü için uygun olduğu görülür. Bu dizinin bu problem ile uyumluluk içinde olmasını sağlamak için ilk 10 sütunu kullanılabilir şekilde sondaki üç sütunu silinir. Bu şekilde bir uyarılama yapıldığında Çizelge 2.1’de verilen ortogonal dizinin uygun olduğu görülür.

Uygunluk fonksiyonu ise optimizasyon hedefine göre tasarlanır. Uygunluk fonksiyonu, optimizasyon hedefi ile giriş parametreleri kullanılarak elde edilen sonuç arasındaki farkı sıfır yada sıfıra yakın olacak şekilde seçilir.

### **2.2.2 Ortogonal diziyi kullanarak giriş parametrelerini tasarlama**

Uygulama prosedürünün ikinci adımında deneyi koşturmak için giriş parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Ortogonal dizi kullanıldığında her bir parametrenin üç seviyesi için uygun nümerik değerlerinin belirlenmesi gerekir.

İlk iterasyon için her bir parametrenin ikinci seviye değeri optimizasyon aralığının merkezi olarak seçilir. Parametrenin birinci ve üçüncü seviye değerleri, ikinci seviye

değerinden seviye farkı ( $LD$ ) değerinin çıkarılması ve eklenmesi ile hesaplanır. Seviye farkı ilk iterasyon için aşağıdaki gibi hesaplanır (Weng vd. 2006a).

$$a(n)_1^2 = (\min+\max)/2=(8-(-9))/(3+1)=4.25 \quad (2.11)$$

Burada max optimizasyon aralığının üst sınırı, min ise optimizasyon değerinin alt sınırı olarak tanımlanır. Bu şekilde üç seviye optimizasyon aralığında düzenli bir şekilde dağılmış olur. Her bir parametrenin tüm seviyelerinin kombinasyonu kullanıldığında, Çizelge 2.1’de verilen ortogonal dizisi, her bir parametrenin uygun seviye değerleri ( $x_{n|1}^m$ ) ile uyumlu olacak şekilde dönüştürülerek, yukarıdaki seviye farkına göre hesaplanmış seviyelerin dağılımı aşağıda verilen Çizelge 2.6’da belirtildiği gibi gösterilir. Burada  $n$  parametre sıra numarasını, ilk iterasyonu,  $m$  de parametrenin seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 2.6 Rastrigin fonksiyonunun ilk iterasyonu için OA(27,10,3,2) ortogonal dizisi parametre seviye değerleri gösterimi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-4.75
-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
-4.75	-4.75	-4.75	-4.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75

Çizelge 22.6 Rastrigin fonksiyonunun ilk iterasyonu için OA(27,10,3,2) ortogonal dizisi parametre seviye değerleri gösterimi (devam)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-4.75	-0.5	-0.5	-0.5	-4.75	-4.75	-4.75	-0.5	-0.5	-0.5
-4.75	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	3.75	3.75	3.75
-4.75	-0.5	-0.5	-0.5	3.75	3.75	3.75	-4.75	-4.75	-4.75
-4.75	3.75	3.75	3.75	-4.75	-4.75	-4.75	3.75	3.75	3.75
-4.75	3.75	3.75	3.75	-0.5	-0.5	-0.5	-4.75	-4.75	-4.75
-4.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	-0.5	-0.5	-0.5
-0.5	-4.75	-0.5	3.75	-4.75	-0.5	3.75	-4.75	-0.5	3.75
-0.5	-4.75	-0.5	3.75	-0.5	3.75	-4.75	-0.5	3.75	-4.75
-0.5	-4.75	-0.5	3.75	3.75	-4.75	-0.5	3.75	-4.75	-0.5
-0.5	-0.5	3.75	-4.75	-4.75	-0.5	3.75	-0.5	3.75	-4.75
-0.5	-0.5	3.75	-4.75	-0.5	3.75	-4.75	3.75	-4.75	-0.5
-0.5	-0.5	3.75	-4.75	3.75	-4.75	-0.5	-4.75	-0.5	3.75
-0.5	3.75	-4.75	-0.5	-4.75	-0.5	3.75	3.75	-4.75	-0.5
-0.5	3.75	-4.75	-0.5	-0.5	3.75	-4.75	-4.75	-0.5	3.75
-0.5	3.75	-4.75	-0.5	3.75	-4.75	-0.5	-0.5	3.75	-4.75
3.75	-4.75	3.75	-0.5	-4.75	3.75	-0.5	-4.75	3.75	-0.5
3.75	-4.75	3.75	-0.5	-0.5	-4.75	3.75	-0.5	-4.75	3.75
3.75	-4.75	3.75	-0.5	3.75	-0.5	-4.75	3.75	-0.5	-4.75
3.75	-0.5	-4.75	3.75	-4.75	3.75	-0.5	-0.5	-4.75	3.75
3.75	-0.5	-4.75	3.75	-0.5	-4.75	3.75	3.75	-0.5	-4.75

Çizelge 22.6 Rastrigin fonksiyonunun ilk iterasyonu için OA(27,10,3,2) ortogonal dizisi parametre seviye değerleri gösterimi (devam)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.75	-0.5	-4.75	3.75	3.75	-0.5	-4.75	-4.75	3.75	-0.5
3.75	3.75	-0.5	-4.75	-4.75	3.75	-0.5	3.75	-0.5	-4.75
3.75	3.75	-0.5	-4.75	-0.5	-4.75	3.75	-4.75	3.75	-0.5
3.75	3.75	-0.5	-4.75	3.75	-0.5	-4.75	-0.5	-4.75	3.75

### 2.2.3 Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması

Giriş parametrelerinin belirlenmesinden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Örneğin ilk deney için tüm parametrelerin birinci seviye değerleri kullanılarak bölüm 2.2.1 ilk paragrafta tanımlanan uygunluk fonksiyonu hesabı yapılır. Bu hesap sonucu 325.63 değerinin hesaplandığı görülür. Daha sonra bulunan bu değere göre sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\eta = -20 \log(UF) \quad (2.12)$$

Bu formüle göre küçük uygunluk fonksiyonu değeri yüksek sinyal gürültü oranı sağlar. İlk iterasyondaki tüm deneylerin koşturulması ile, uygunluk fonksiyonu değerleri ve ilişkili ( $S/N$ ) değerleri elde edilir.

Bu  $S/N$  değerleri kullanılarak ilk iterasyon için her bir parametrenin  $n$  değeri ile her bir parametrenin  $m$  seviyesi kullanımıyla elde edilen ortalama  $S/N$  değerleri ile elde edilen tepki tablosu oluşturulur.



$$\eta^-(m,n) = \frac{1}{n} \sum_{i: OA(i,n)=m} \eta_i \quad (2.13)$$

#### 2.2.4 Optimum seviye değerlerinin tanımlanması ve doğrulama deneyinin koşturulması

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yuğsek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Optimal değer bulunduğunda, daha sonra doğrulama deneyi, bulunan  $a(n)_i^{\text{opt}}$  optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Bu doğrulama testi, ortogonal dizilerin tam faktöriyel özellikte olması sebebiyle yineleyen değildir. Yapılan ilk iterasyonda optimum sonucun bulunması mümkün olmayabilir. Bu durumda optimum sonuç sonraki iterasyonlarda bulunmaya çalışılır. Fakat elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır.

#### 2.2.5 Optimizasyon aralığının azaltılması

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Mevcut iterasyonda bulunan optimum değerler her bir parametrenin sonraki iterasyondaki seviye 2 değeri olacaktır. Seviye farkı ise aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$LD(n)_{i+1} = RR \times LD(n)_i \quad (2.14)$$

RR optimizasyon azaltma oranı problemin türüne göre 0.5 ile 1 arasında seçilebilmektedir. Çoğu uygulamada 0.5 değeri olarak seçilmiştir.

### 2.2.6 Sonlandırma kriterinin kontrolü

İterasyon sayısı arttıkça, her bir elemanın seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Aşağıdaki eşitlik sonlandırma kriteri olarak kullanılır.

$$\max (LD(n)_i) / LD(n)_1 \leq YO \quad (2.15)$$

Genelde yakınsama oranı 0.001 ile 0.01 arasında seçilir, bu şart sağlandığında optimizasyon işlemi sonlandırılır.

### 2.3 Anten dizileri

Anten dizisi elektromanyetik ve anten mühendisliğinde önemli alanlardan biridir. Bir anten dizi sistemi oluşturabilmek için elektriksel ve geometrik tasarım gerekir. Tek anten ile oluşturulan yapılarda demet genişliği büyük, yönlendiricilik ise düşüktür. Yönlendiriciliği arttırmak ve demet genişliğini daraltmak için anten dizileri iyi bir çözüm olmaktadır. Anten dizileri, tek bir anten ile yeterli olarak sağlanamayan düşük yan kulakçık seviyesi, dar ana hüzmeye, yüksek yönelme (*directivity*) yeteneği gibi özellikleri sağlamak amacı ile kullanılmaktadır (Balanis 2005, Visser 2005). İki ya da daha fazla antenin istenen ışınımı yapabilmesi için birlikte tasarlanıp bir sistem oluşturması ile anten dizileri oluşturulur. Anten dizilerine ulaşan işaretin genlik ve faz değerleri değiştirilerek istenilen bölgeye ışınım yapmak ve ışınımı sönmölemek mümkündür. Anten dizileri gerekliliğe göre tasarlanabilmektedir. Birçok iletişim sistemi yönlendiriciliği fazla antenleri tercih etmektedir, sistemin istediği bölge için ışınım artırılıp diğer bölgelerde sönmöleme yapılabilir.

Anten dizileri genelde dipol ve mikro şerit antenlerin belirli formda dizilmesi ile elde edilir. Bu diziler doğrusal, düzlemsel veya hacimsel diziler olabilirler. Dizi

elemanlarının bir doğru üzerinde konumlandırılmaları durumunda dizi doğrusal anten dizisi olarak adlandırılır. Düzlemselde ise yüzeyde, hacimselde ise bu elemanlar üç boyutlu bir ortamda yerleştirilmişlerdir. Doğrusal anten dizileri, diğer anten dizilerine temel teşkil eder ve bu tipteki dizinin tasarım yöntemleri diğer tipteki anten dizilerine uygulanabilir. Dizideki her bir anten elemanının uzak alandaki elektrik alan değeri, formül 2.16'daki gibi tanımlanır (Balanis 2005).

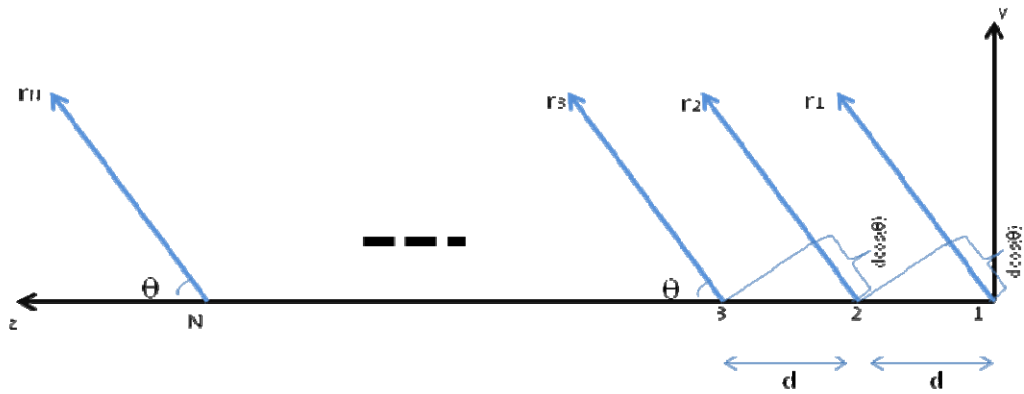
$$E_{Toplam} = E_{tek\_eleman} \times AF \quad (2.16)$$

$N$  elemanlı bir anten dizisinin her bir elemanı için Dizi Faktörü ( $AF$ ),

$$AF(\psi) = k \times d \times \cos\theta + \beta \text{ olmak üzere,} \quad (2.17)$$

şeklinde tanımlanabilir (Yıldırım vd. 2008). Burada  $k=2\pi/\lambda$ ,  $d$  ardışık iki dizi elemanı arasındaki mesafe ve  $\beta$  ardışık iki dizi elemanı arasındaki faz farkıdır.

$N$  elemanlı anten dizisi için,  $Z$  eksenini boyunca eşit  $d$  aralıkları ile yerleştirilmiş  $N$  adet noktasal dipol anten kullanıldığı varsayılır. Dizide bulunan elemanlar birbirine eşit ve genlikleri aynıdır. Elemanlar arasında  $d$  kadar uzaklık bulunmakta ve elemanların beslemeleri arasında  $\beta$  kadar faz farkı bulunmaktadır. Elemanlar arasında bulunan  $\beta$  faz farkı düzgün dizi oluşturmaktadır (Açıkgöz 2010).



Şekil 2.2  $N$  elemanlı dizi

Şekil 2.2’de düzgün anten dizilişi ve uzak alan geometrisi görülmektedir.

$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.18)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{+j(n-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.19)$$

Formül (2.18) ve (2.19)’de dizi faktörünün hesaplanması verilmiştir. Bu hesap aynı zamanda formül (2.20a)’daki gibi de hesaplanabilmektedir. Formül (2.20a)’daki hesabın kullanılabilmesi için formül (2.20b)’deki şartı sağlaması gerekmektedir.

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{+j(n-1)\psi} \quad (2.20a)$$

$$\psi = k \times d \times \cos(\theta) + \beta \quad (2.20b)$$

Formül (2.20a) açık bir şekilde yazılırsa, formül (2.21) elde edilir.

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.21)$$

Formül (2.21)’den formül (2.20a)’nın çıkarılması ile formül (2.22a) ve (2.22b) elde edilir. Eğer referans noktası anten dizisinin merkezinde ise dizi faktörü formül (2.22a)’daki gibi yazılabilmektedir.

$$AF = \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2.22a)$$

Formül (2.22a)’daki “Ψ” değeri küçük değerler alırsa, formül (2.22a) formülü (2.22b)’ye dönüştürülebilir.

$$AF = \frac{\sin(N\psi/2)}{(\psi/2)} \quad (2.22b)$$

Formül (2.22a) ve (2.22b) için alabilecekleri maksimum değer “ $N$ ” olmaktadır. Dizi faktörlerinin maksimum değerini bire indirmek için normalize etme yoluna başvurulursa formül (2.22c) elde edilir.

Ayrıca;

$$AF_n = \frac{\sin(N\psi / 2)}{(N\psi / 2)} \quad (2.22d)$$

formül (2.22c), formül (2.22d) şeklinde de yazılabilmektedir.

(2.16) ile (2.22d) arasındaki formüller için (Balanis 2005)’den yararlanılmıştır.

## 2.4 Mikroşerit antenler

Bilginin, antenler yardımı ile kablosuz bir şekilde iletilmesi büyük zaman kazandırmakta ve maliyeti azaltmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile tasarlanan elektronik cihazlar daha büyük frekanslara ihtiyaç duymaya ve boyutları gittikçe küçülmeye başlamıştır. Boyutları küçüldüğünden büyük donanımları üstüne eklemek ek maliyetler oluşturmaktadır. Tüm bu olumsuzluklara karşı mikroşerit antenler üretilmeye başlanmıştır.

Mikroşerit antenler günümüzde üretilmesinin ve kullanılmasının kolaylığının yanında küçük yapıları ve yüksek frekansı destekleyen yapılarından dolayı elektronik cihazlarda ve bilgi iletiminde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mikroşerit anten yapıları düz ve düz olmayan yapılara uygulanabilirliği ve hafif yapısının avantajı nedeniyle mobil ve mobil haberleşme araçları için kullanılabilirliği yüksek bir hale gelmiştir. Düşük güç kullanılarak UHF (300 MHz – 3 GHz) ve daha yüksek frekans bantlarında kullanılabilir. Bir uygulama için tek bir antenin yetmediği durumlarda, anten dizisi şeklinde kolayca tasarlanabilir ve kazanç gibi arttırılmak istenilen parametreler

kolaylıkla arttırılabilmektedir.

Mikroşerit antenler için küçük boyut ve maliyet önemli olduğundan bazı özelliklerden ödün vermiştir. Diğer antenlere nazaran ışıma kazancı düşük olmaktadır. Ayrıca besleme hattına çok duyarlı olmasından dolayı rezonans frekansındaki reaktif ve reel direnç değerlerini ayarlamak anteni tasarlayan için zorluk oluşturmaktadır (Balanis 2005). Işıma yapması istenen frekans bölgesinde büyük bir bant genişliğine sahip değildir, bant genişliği yaklaşık olarak rezonans frekansının %5'i kadar olmaktadır (Balanis 2008). Düşük güç gereksimi duyan sistemlerde kullanılabilirken, yüksek güç isteyen sistemlerde görevini yeterince yerine getirememektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Taguchi yönteminin elektromanyetik problemlere uygulanması

Ortogonal dizi konsepti kullanımı ile, Taguchi yöntemi optimizasyon sürecinde kullanılacak test sayısını azaltır. Bu yöntem kimya mühendisliği, makine mühendisliği, entegre bileşen üretimi, güç elektroniği, endüstri mühendisliği vb. birçok alanda kullanılmasına rağmen elektromanyetik alanından çok sınırlı sayıda uygulama mevcuttur. Bu tez kapsamında gerçekleştirilecek olan çalışmada amaç, Taguchi yönteminin elektromanyetik optimizasyonu alanında potansiyel bir yöntem olarak kullanılabilceğini göstermektir. Taguchi yöntemi elektromanyetik alanından mikrodalga filtre tasarımı, ultra geniş bant anten tasarımı ve doğrusal anten dizisi optimizasyonu gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında doğrusal anten dizisi oluşturma ve mikroşerit anten tasarımı uygulamaları seçilmiştir.

Günümüzde elektromanyetik ortam kirliliğinin iyice hissedilir ölçüde olması ve gelişen teknolojinin paralelinde bu kirliliğin artmaya devam etmesi, istenilen doğrultu ya da doğrultularda sıfırlara sahip anten dizilerini üreten tekniklerin de artmasına sebep olmuştur. Bu teknikler özellikle, radar, sonar ve haberleşme sistemlerindeki istenmeyen girişimlerin sebep olduğu işaret-gürültü oranındaki düşmeyi en aza indirebilmek açısından önemlidir. Arzu edilen doğrultularda dizi örüntüsünde sıfırlar üreten tekniklerin çoğu, anten dizi elemanlarının sadece genliklerinin, sadece fazlarının, hem genlik hem de fazlarının veya sadece konumlarının belirlenmesini ihtiva eder. Dizi elemanlarının sadece genliklerinin kontrol edilmesi ile yapılan tasarımlar uygulama açısından nispeten daha kolaydır ve nicemleme hatasına karşı hassasiyetleri daha azdır. Ancak, dizi elemanlarının genliklerini değiştirerek istenilen doğrultularda sıfırlara sahip örüntü üretmek için, dizi eleman sayısı kadar zayıflatıcı gereklidir. Eğer dizi elemanları dizi merkezine göre çiftli simetriye sahipse, gerekli olan zayıflatıcı sayısı ve hesaplama süresi yarıya düşer. İstenilen yönlerde sıfırlara sahip örüntü üretmek için dizi elemanlarının fazlarını ya da konumlarını belirleme problemi, kendi tabiatından dolayı doğrusal olmayan bir problemdir ve analitik yöntemlerle doğrudan çözümü mümkün

değildir. Dizi elemanlarının fazlarındaki değişimler çok küçük kabul edilerek, sıfırlama formülleri doğrusallaştırılabilir, ancak bu kabul ana demete göre simetrik açılarda sıfırların üretilmemesine sebep olur. Daha verimli ancak daha pahalı olan bir teknik, anten dizi elemanlarının hem genlik hem de fazlarının kontrol edilmesidir. Dizi elemanlarının konumlarında da küçük değişimler yapılarak ana demete göre simetrik yönde sıfırlar üretilir ancak bu durumda yapılan tasarımlarda dizi elemanlarının istenilen noktalara yerleştirilmesi için bazı mekanik sistemlerin kullanılması gerekir. Bu da pek tercih edilmeyen bir yöntemdir.

Bölüm 2.2’de Taguchi yönteminin uygulama prosedürü verilmişti. Bu bölümde ise Taguchi yönteminin elektromanyetik problemlere nasıl uygulanacağı konusu üzerinde durulacaktır. Elektromanyetik problemlerden ise anten tasarım problemleri üzerinde durulmuştur. Çeşitli tipteki antenler seçilerek bu antenlerin tasarım parametrelerinin optimizasyonu bahsi geçen yöntem kullanılarak yapılmaya çalışılmıştır. Taguchi yöntemi uygulama prosedürü aşağıda maddeler halinde verilerek gerekli açıklamalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, problemi daha basit bir uygulamadan başlatmak amacıyla yöntemin uygulanabilirliğini görmek için mikroşerit yama antenin tasarım parametreleri seçilerek yöntemin elektromanyetik alanında ne şekilde uygulandığı gösterilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, doğrusal anten dizisi elemanlarının genlik ve faz değerleri değiştirilerek, arzu edilen doğrultu veya doğrultularda sıfırlara sahip dizi örüntüsü üretmek için elektromanyetik problemlerin çözümünde Taguchi yönteminin ne şekilde uygulandığı gösterilmeye çalışılmıştır.

### **3.1.1 Problemin başlatılması**

Taguchi yönteminin uygulama prosedüründe de belirtildiği gibi, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktadır. Elektromanyetik problem olarak bazı çalışmalarda, doğrusal anten



dizisinin tasarlanması optimizasyon problemi olarak seçilmiştir. Örneğin bölüm 4.3.1’de verilen anten dizisinde 10 adet genlik parametresi değiştirilerek optimizasyon problemi çözülebilir. Bu 10 adet giriş parametresine uygun ortogonal dizi araştırıldığında OA(27, 10, 3, 2) ortogonal dizisinin bu probleme uyarlanabileceği görülür (Weng vd. 2006b, Weng vd. 2007a). Benzer şekilde doğrusal anten dizisinde, dizinin aynı sayıda faz değeri değiştirilmek istenseydi aynı ortogonal dizi kullanılabilirdi. Hem genlik hem de faz değerleri değiştirilebilecek bir şekilde optimizasyon problemi seçilebilir. Bu durumda eğer 10 adet genlik ve 10 adet faz parametresi seçileceğini düşünürsek 20 parametrelilik bu problemin çözümü için OA(81, 10, 3, 2) ortogonal dizisinin seçilmesi gerekecekti. Belirtilen problemlerde her bir parametrenin 3 seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür.

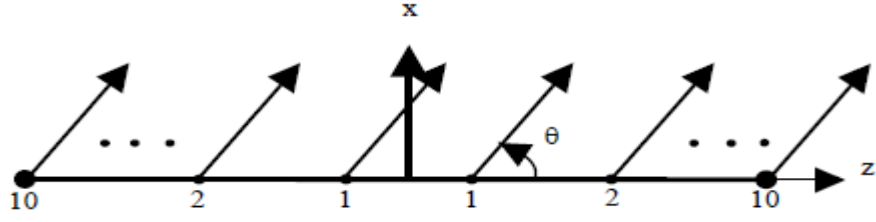
Uygunluk fonksiyonu ise optimizasyon hedefine göre tasarlandığı Taguchi yöntemi uygulama prosedüründe verilmişti. Doğrusal anten dizisi tasarlama probleminde dizi faktörü, uygunluk fonksiyonu belirleme amacı ile kullanılabilir. Dizi faktörü ile anten dizisi örüntüsü elde edilebilmektedir. Örneğin aşağıda Şekil 3.1 de verilen 20 elemanlık simetrik bir dizi için, dizi faktörü:

$$AF(\theta) = 2 \sum_{n=1}^{10} a(n) \cos[k \times d(n) \times \cos(\theta) + \beta(n)] \quad (3.1)$$

olarak yazılır. Burada  $k$  dalga sayısı olmak üzere;  $a(n)$ ,  $d(n)$  ve  $\beta(n)$  sırasıyla dizinin  $n$ . elemanının genlik, konum ve faz değerleridir. Fazlar eşit olduğunda yukarıdaki dizi faktörü daha da basitleştirilebilir. Bu dizi faktörüne göre uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilebilir.

$$f = \int_0^\pi |AF_d(\theta) - AF(\theta)| d\theta \quad (3.2)$$

$AF_d(\theta)$ , istenen dizi faktörü,  $AF(\theta)$  ise hesaplanan dizi faktörüdür.



Şekil 3.1 Dizi geometrisi

### 3.1.2 Giriş parametrelerinin belirlenmesi

Taguchi yöntemi uygulama prosedüründe deneyde ya da problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerleri ve seviyeleri belirlenmesi gerektiği belirlenmiştir. Doğrusal anten dizisinde 10 adet genlik parametresinin seçimi ile problemin giriş parametreleri belirlenerek problem çözümüne başlanabilir. Örneğin 3 seviyeli bir parametrenin seviyelerini belirlemek için öncelikle bu parametrenin 2. seviyesi değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a(n)_1^2 = (\min + \max) / 2 \quad (3.3)$$

Burada max optimizasyon aralığının üst limitini, min optimizasyon aralığının alt limitini,  $a(n)$   $n$ . giriş parametresini, 1 değeri birinci iterasyonu, 2 değeri giriş parametresinin 2. seviyesi olduğunu gösterir.

$a(n)_1^1$  ve  $a(n)_1^3$  değerleri ise  $a(n)_1^2$  değerine, seviye farkının çıkarılması/eklenmesi ile hesaplanır. Seviye farkı ( $LD$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$LD(n)_1 = (\max - \min) / (s + 1) \quad (3.4)$$

Buna göre;

$$a(n)_1^1 = a(n)_1^2 - LD(n)_1; a(n)_1^3 = a(n)_1^2 + LD(n)_1 \quad (3.5)$$

olarak hesaplanır.

Doğrusal anten dizisinde genlik değerlerinin 0 Volt ile 1 Volt arasında değerler alabildiği kabul edilirse, yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda ilk parametre için  $a(n)_1^1 = 0.25$ ,  $a(n)_1^2 = 0.5$ ,  $a(n)_1^3 = 0.75$  seviyelerinde değerler alır.

### 3.1.3 Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Bu oran aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$\eta = -20 \log(UF) \quad (3.6)$$

Bu formüle göre düşük uygunluk fonksiyonu değerleri için yüksek  $S/N$  oranı elde edilebilmektedir. Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır.

$$\eta^-(m,n) = (S/N) \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (3.7)$$

### 3.1.4 Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi bulunan  $a(n)_i^{\text{opt}}$  optimal seviyelerin

değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Weng vd. (2007a) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada elde edilen tepki tablosu verilmiştir.

Çizelge3.1 Sıfır kontrollü örüntü optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu (Weng 2007a)

Eleman Seviye	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	- 19.67	- 20.01	- 20.00	- 19.87	- 19.78	- 19.95	- 20.03	- 19.23	- 19.69	- 18.37
2	- 19.73	- 19.86	- 19.68	- 19.70	- 20.09	- 19.69	- 19.69	- 20.04	- 19.76	- 19.95
3	- 20.52	- 20.05	- 20.23	- 20.36	- 20.05	- 20.28	- 20.20	- 20.65	- 20.46	- 21.60

### 3.1.5 Optimizasyon aralığının azaltılması

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Mevcut iterasyonda bulunan optimum değerler her bir parametrenin sonraki iterasyondaki seviye 2 değeri olacaktır. Seviye farkı ise aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$LD(n)_{i+1} = RR \times LD(n)_i \quad (3.8)$$

$RR$  optimizasyon azaltma oranı problemin türüne göre 0.5 ile 1 arasında seçilebilmektedir. Çoğu uygulamada 0.5 değeri olarak seçilmiştir.

### 3.1.6 Sonlandırma kriterinin kontrolü

İterasyon sayısı arttıkça, her bir elemanın seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri, diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Aşağıdaki eşitlik sonlandırma kriteri olarak kullanılır.

$$\max (LD(n)_i )/ LD(n)_1 \leq YO \quad (3.9)$$

Anten tasarım problemlerinde genelde yakınsama oranı 0.001 ile 0.01 arasında seçilerek bu şart, sağlandığında optimizasyon işlemi sonlandırılır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşağıdaki başlıklarda bu tez çalışması kapsamında Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon uygulamaları verilmiştir. Her bir uygulamada, Taguchi yönteminin uygulanması ile elde edilen değerler ile beklenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi ve hata oranı çizelgeleri sunulmuştur. Fark matrisi çizelgeleri, beklenen değer ile Taguchi yöntemi ile bulunan değer arasındaki öklid mesafesini gösterirken, hata oranı çizelgeleri öklid mesafesinin beklenen değere yüzde olarak oranını göstermektedir.

### 4.1 Taguchi yönteminin Rastrigin fonksiyonuna uygulanması

Bu çalışmada öncelikle hem yöntemin uygulanabilirliğini görmek hem de daha önce Weng vd. (2007a) tarafından yapılan çalışmaları karşılaştırmak amacıyla Taguchi yöntemi, 10 katsayıya sahip Rastrigin fonksiyonu üzerinde uygulanmıştır. Rastrigin fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$f(x) = 2 \sum_{i=1}^{10} [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10], -9 < x_i < 8 \quad (4.1)$$

Bu fonksiyon  $x_i = 0$  olduğunda global minimum değerine sahiptir. On (10) adet giriş parametresi ( $x_i, i = 1, \dots, 10$ ) global minimumu bulmak için optimize edilecektir. Asimetrik optimizasyon uzayını elde etmek için optimizasyon arama aralığı  $[-9, 8]$  arasında ayarlanmıştır. Yukarıda Taguchi yöntemi uygulama prosedürü bölümünde belirtildiği gibi ilk iterasyondan sonra diğer iterasyonlarda, ilk iterasyonda yapılan işlemler uygulanarak istenen sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır. Aşağıda taguchi uygulama prosedürünün bu problem için uygulamaları aşamalı olarak verilmiştir.

Bölüm 2.2’de Taguchi yönteminin uygulama prosedürünün uygun ortogonal dizinin seçimini ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanmasını içeren problemin

başlatılması ile başladığı verilmişti. Ortogonal dizinin  $OA(N, k, s, t)$  seçimi optimize edilecek parametrelere bağlıydı. Bu problem için optimize edilecek 10 parametre olduğundan ( $k = 10$ ) olmak üzere 10 adet sütuna sahip ortogonal dizi seçilmelidir. Doğrusal olmayan etkileri modellemek için her bir giriş parametresi için üç seviye ( $s = 3$ ) seçilmesi uygundur. Birçok problem için 2 şiddetine ( $t=2$ ) sahip ortogonal dizi seçimi uygundur. Çünkü bu değer deney deneme sayısını temsil eden dizideki satır sayısının az olmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak 10 sütuna, 3 seviyeye ve 2 şiddetine sahip ortogonal dizinin seçilmesi yeterlidir.

Ortogonal dizi veri tabanından bu içeriğe sahip ortogonal dizi olarak  $OA(27, 13, 3, 2)$  dizisinin olduğu görülür. Bu probleme uygun dizi kullanmak için dizide yer alan son 3 sütun silinir. Bu şekilde  $OA(27, 10, 3, 2)$  ortogonal dizisi elde edilmiş olur.

Uygunluk Fonksiyonu ( $UF$ ) olarak optimizasyon hedefine uygun şekilde yine Rastrigin fonksiyonunun kendisi kullanılabilir.

$$UF = f(x) = \sum_{i=1}^{10} [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i^2) + 10], \quad (4.2)$$

Burada uygunluk fonksiyonu optimizasyon hedefi (0 değeri) giriş değerleri olan  $x_i$  ile elde edilen değerlerin arasındaki fark olarak kabul edilebilir. Burada uygunluk fonksiyonu ile elde edilen sonucun küçük olması, istenen sonuçlar ile elde edilen sonuçların bir birine o kadar yakın olması anlamına gelir.

Sonraki adım olarak giriş parametrelerinin belirlenmesi gelir. Ortogonal dizi kullanıldığında, dizideki her bir giriş parametresinin parametre seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. 2. Seviye parametre değeri optimizasyon aralığının merkezinde olacak parametre değeri seçilir. 1. ve 3. parametre seviyeleri bölüm 2.2.2’de anlatıldığı gibi 2. parametre seviyesine, seviye farkı değerinin eklenip çıkarılması ile

bulunmaktaydı. Bu problem için ilk iterasyon seviye farkı aşağıdaki şekilde bulunur;

$$LD_1=(8-(-9))/2=4.25 \text{ olarak bulunur.}$$

Bu değerlere göre parametre seviyelerinin ortogonal dizideki yerleşimi Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Giriş parametrelerinin belirlenmesinden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu hesaplanır. Örneğin ilk deney için tüm parametrelerin birinci seviye değerleri kullanılarak bölüm 2.2.1 ilk paragrafta tanımlanan uygunluk fonksiyonu hesabı yapılır. Bu hesap sonucu 325.63 değerinin hesaplandığı görülür. Daha sonra bulunan bu değere göre sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) formül 2.8'de verildiği gibi hesaplanır. Bu formüle göre küçük uygunluk fonksiyonu değeri yüksek sinyal gürültü oranı sağlar. İlk iterasyondaki tüm deneylerin koşturulması ile, uygunluk fonksiyonu değerleri ve ilişkili ( $S/N$ ) değerleri elde edilir.

Bu  $S/N$  değerleri kullanılarak ilk iterasyon için her bir parametrenin  $n$  değeri ile her bir parametrenin  $m$  seviyesi kullanımı ile elde edilen ortalama  $S/N$  değerleri ile elde edilen tepki tablosu oluşturulur.

Örneğin  $|x_7|_1^2$  parametresi için ortalama  $S/N$  oranı aşağıdaki şekilde bulunmuştur;

$$\bar{\eta}(2,7) = \frac{1}{9} \sum_{i,i \in \text{OA}(i,7)=2} \eta_i = \frac{1}{9} [(-47.83)+(-47.55)+(-48.25)+(-48.28)+(-47.86)+(-47.99)+(-47.86) \\ +(-48.15)+(-48.12)] = -47.99(\text{dB})$$

Bu değerlere göre Weng vd. (2007a) tarafından elde edilmiş tepki tablosu ise aşağıda verilmiştir;



Çizelge 4.1 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonunun ilk iterasyonu için Weng vd. tarafından bulunan tepki tablosu (Weng 2007a)

Parametreler Seviyeler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-48.37	-48.37	-48.37	-48.36	-48.37	-48.37	-48.37	-48.37	-48.37	-48.37
2	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98	-47.98
3	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11	-48.11

Benzer şekilde bu tez çalışmasında ilk iterasyon için elde edilmiş ola tepki tablosu aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonunun ilk iterasyonu için bulunan tepki tablosu

Parametreler Seviyeler	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Weng vd. (2007a) tarafından yapılan çalışma ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ilk iterasyon için aynı tepki tablosunun bulunduğu görülür.

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre sıradaki aşama optimum seviye değerlerinin belirlenmesi ve doğrulama deneyinin koşturulması verilmişti. Yukarıdaki tepki tablosuna göre her bir sütundaki en yüksek sinyal gürültü oranı ( $S/N$ ) her bir parametre için optimum seviyeyi belirtmektedir. Bu uygulama da ilk iterasyon için optimum parametre seviyeleri her bir parametre için yukarıdaki tabloda işaretlenmiş olarak görülmektedir.

Taguchi yöntemi uygulama prosedürünün sonraki adımı optimizasyon aralığının Optimizasyon aralığının azaltılması olarak verilmişti. Optimizasyon aralığının azaltılması için formül 2.10 kullanılmakta olup bu Rastrigin fonksiyonunun optimizasyon azaltma oranı Weng vd. (2007a) tarafından da belirlenmiş olan 0.8 değeri seçilmiştir.

Taguchi yönteminin son aşaması olarak tanımlanan sonlandırma kriterinin belirlenmesi aşamasında bu uygulama için optimizasyon hedefi olarak 0,0001 değeri seçilmiştir.

Yukarıda seçilen optimizasyon giriş parametrelerine göre Weng vd. (2007a) tarafından yapılan çalışmada aşağıdaki  $x_i$  değerleri bulunmuştur.

$x_i$  ,  $i =1, . . . ,10$  olmak üzere her bir  $x$  değeri sırasıyla  $1.453 \times 10^{-04}$  ,  $1.193 \times 10^{-04}$  ,  $7.738 \times 10^{-05}$  ,  $2.456 \times 10^{-04}$  ,  $-1.156 \times 10^{-04}$  ,  $2.212 \times 10^{-04}$  ,  $8.147 \times 10^{-05}$  ,  $2.882 \times 10^{-04}$  ,  $2.483 \times 10^{-04}$  , ve  $-8.899 \times 10^{-06}$  dır.

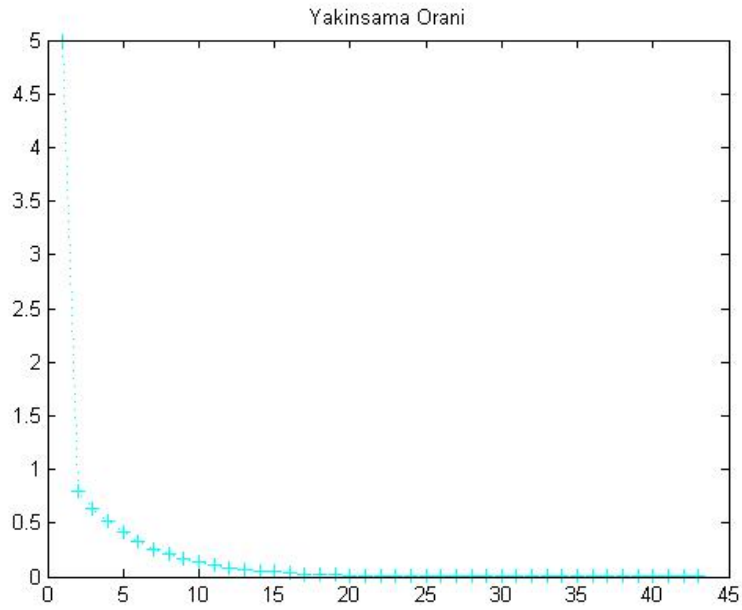
Bu tez çalışmasında bulunan katsayı değerleri ise aşağıdaki şekilde bulunmuştur;

$x_{bi}$  ,  $i =1, . . . ,10$  olmak üzere her bir  $x_b$  değeri sırasıyla  $1.723 \times 10^{-04}$  ,  $2.846 \times 10^{-04}$  ,  $-2.428 \times 10^{-04}$  ,  $1.755 \times 10^{-04}$  ,  $-1.165 \times 10^{-04}$  ,  $1.629 \times 10^{-04}$  ,  $2.012 \times 10^{-04}$  ,  $-6.57 \times 10^{-06}$  ,  $2.127 \times 10^{-04}$  ,  $-9.68 \times 10^{-06}$

Weng vd. (2007a) tarafından bulunan değerler istenen değerler olarak kabul edildiğinde tarafımızca bulunan  $x_{bi}$  değerleri ile yukarıda verilmiş olan Weng vd. (2007a) tarafından bulunan  $x_i$  değerleri için her bir parametrenin kendi içinde arasındaki fark alındığında, aşağıdaki fark matrisi elde edilmektedir. Bu değerler 43 iterasyon sonrası elde edilmiştir.

Çizelge 4.3 Elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu

Fark Matrisi										
Parametre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fark Sonucu	- 0.0000	- 0.0007	0.0002	0.0001	0.0005	0.0001	0.0016	0.0004	0.0000	- 0.0001



Şekil 4.1 Rastrigin fonksiyonu optimizasyonu için yakınsama oranı

Bu sonuçlara bakıldığında maksimum 0.0016 hassasiyette istenen optimizasyon değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Bu uygulama için elde edilen yakınsama oranı yukarıda verilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında Taguchi yönteminin istenen optimizasyon hedefine ulaşmak için ne kadar etkin ve ekonomik bir çözüm olduğu görülebilir.

Bu uygulamada özellikle Weng vd. (2007a) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın optimizasyon girdileri kullanılmıştır. Optimizasyon hedefi ve azaltma oranı gibi optimizasyon parametreleri değiştirilerek daha düşük hata oranı ve daha hızlı sonuçlara

ulaşılabilir. Örneğin optimizasyon hedefi aynı kalmak üzere azaltma oranı 0.75 olarak değiştirildiğinde en fazla 0.0012 hata oranı ile ve toplamda 34 iterasyon ile istenilen sonuçlara ulaşılabilmektedir. Fakat daha öncede bahsedildiği gibi bu çalışmada özellikle algoritmanın doğruluğu test edildiği için Weng vd. (2007a) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın optimizasyon parametrelerinin aynıları kullanılmıştır. İstenen sonuçlarının hassasiyetine göre sonuçlar optimizasyon parametreleri değiştirilerek daha hızlı ve maliyet etkin olarak elde edilebilir. Sonuçların geçerliliği ve kullanılabilirliği tamamen ihtiyaca göre seçilebilir.

## **4.2 Taguchi yöntemi ile dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı**

Tez çalışmasının genel yaklaşımı olarak, yöntemin uygulanabilirliğini ve başarısını görmek için öncelikle basit tasarım problemleri çözülmüş ve sonraki aşama olarak daha karmaşık problemler çözülmeye çalışılmıştır. Bu sebeple ilk olarak daha az değişken parametreye sahip mikroşerit yama anten tasarımı, optimizasyon problemi olarak seçilmiştir. Bu uygulamada da öncelikle mikroşerit yama anten tasarımı için gerekli parametrelerden ikisi değişken bırakılıp diğerleri sabit tutulmuştur. Uygulamanın ikinci aşamasında ise anten tasarımı için gerekli olan tüm parametreler değişken kabul edilmiş ve bu parametrelerin optimizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Uygulamanın üçüncü aşamasında da anten tipi değiştirilerek daha karmaşık bir tasarım problemi çözülmüştür. Aşağıdaki başlıklarda uygulamanın tüm aşamaları ve sonuçları verilmiştir.

### **4.2.1 İki değişken parametrelilik dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı**

Bu çalışmada, dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarım parametrelerinin uzunluk ( $L$ ) ve genişlik ( $W$ ) değerleri değiştirilerek arzu edilen rezonans frekansı bulunmaya çalışılmış ve elektromanyetik problemlerin çözümünde Taguchi yönteminin ne şekilde uygulandığı gösterilmiştir.

Yukarıdaki bölümlerde Taguchi yönteminin uygulama prosedürü verilmişti. Bu bölümde ise yukarıdaki bölümlerde açıklanmış olan yöntemin, dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımında uygulanması üzerinde durulacaktır. Boyu  $L$ , genişliği  $W$  ve yüksekliği  $h$  olan dikdörtgenel bir mikroşerit yama anten, Şekil 4.2’de verilmiştir. Mikroşerit anten tasarım problemi ile ilgili formülasyon doğrudan (Kara 1996)’dan alınmıştır. Kara tarafından verilen rezonans frekansı hesap formülü aşağıdaki gibidir:

$$f_r = \frac{c_0}{2 \left( L + \Delta W \right) \sqrt{\varepsilon_e}} \quad (4.3)$$

Burada  $c_0$  elektromanyetik dalgaların boş uzaydaki hızını ve  $\varepsilon_e(W)$  ise etkin dielektrik sabitini göstermektedir. Dielektrik katsayısı ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\varepsilon_e(W) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \left( 1 + \frac{10}{\mu} \right)^{ab}} \quad (4.4)$$

Burada  $\varepsilon_r$  malzemenin bağıl elektriksel geçirgenlik sabiti ve  $\mu = W/h$  olarak tanımlanır.  $a$  ve  $b$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

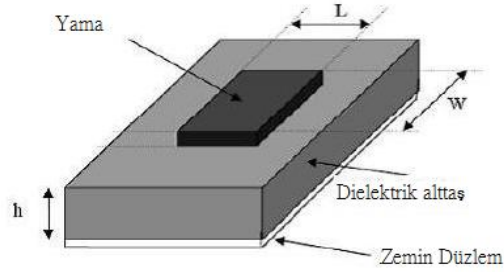
$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[ \frac{\mu^4 + \left( \frac{\mu}{52} \right)^2}{\mu^4 + 0.432} \right] + \frac{1}{18.7} \ln \left[ 1 + \left( \frac{\mu}{18.1} \right)^3 \right] \quad (4.5)$$

$$b = 0.564 \left( \frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 0.3} \right)^{0.053} \quad (4.6)$$

Bu durumda genişlik değişimi  $\Delta W$  aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\Delta W = 0.824 h \frac{\left[ \varepsilon_e(W) + 0.300 \right] \left( W/h + 0.264 \right)}{\left[ \varepsilon_e(W) - 0.258 \right] \left( W/h + 0.813 \right)} \quad (4.7)$$

Problem  $F = |f_{dr} - f_{hr}|$  değerinin minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. Bu hesap, yöntemin uygulanmasında uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) olarak tanımlanmaktadır. Burada  $f_{dr}$  istenen rezonans frekans değerini;  $f_{hr}$  ise verilen sabit bir  $\varepsilon_r$  ve  $h$  giriş değerlerine karşılık hesaplanan rezonans frekans değerini temsil etmektedir.



Şekil 4.2 Dikdörtgenel Mikroşerit Yama Anten

#### **Problemın başlatılması:**

Taguchi yönteminin uygulama prosedürüne göre, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktaydı. Şekil 4.2'de verilen dikdörtgenel mikroşerit yama antende, diğer parametreler sabit olmak üzere  $L$  ve  $W$  parametreleri değiştirilerek istenilen bir rezonans frekans değerini sağlayan bir tasarım konfigürasyonu elde edilebilir. Bu durumda, 2 adet giriş parametresi bulunmasından dolayı OA (9, 2, 3, 2) ortogonal dizisinin bu problem için uygun olduğu ve uyarlanabileceği görülür. Belirtilen problemde, her bir parametrenin 3 seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür. Ortogonal dizi ve parametre seviyelerinin yerleşimi Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) ise optimizasyon hedefine göre tanımlanmaktadır.

Dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı probleminde rezonans frekansı ( $f_r$ ) uygunluk fonksiyonu belirleme amacı ile kullanılabilir. Rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{c_0}{2 \left( L + \Delta W \right) \sqrt{\epsilon_e}} \quad (4.8)$$

olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla, uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$F = |f_{dr} - f_{hr}| \quad (4.9)$$

Bu formülde  $f_{dr}$  elde edilmesi istenen rezonans frekans değerini;  $f_{hr}$  ise Taguchi yöntemine göre her bir denemede hesaplanan rezonans frekans değerini temsil etmektedir.

Çizelge 4.4 İki değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı için L9 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon  $SNR$  ve  $UF$  değerleri

Parametre Deney	1.	2.	$UF$ (dB)	$SNR$
1	1	1	6.1906	-195.8347
2	2	1	6.1937	-195.8391
3	3	1	6.1953	-195.8413
4	1	2	6.1906	-195.8347
5	2	2	6.1937	-195.8391
6	3	2	6.1953	-195.8413
7	1	3	6.1906	-195.8347
8	2	3	6.1937	-195.8391
9	3	3	6.1953	-195.8413

#### Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi:

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre deneyde yada problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerleri ve seviyeleri belirlenmesi gerekmektedir. Dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımında  $L$  (uzunluk) ve  $W$  (genişlik)

parametreleri seçilerek problemin giriş parametrelerinin belirlenmesi ile başlanabilir. Örneğin 3 seviyeli bir parametrenin seviyelerini belirlemek için öncelikle bu parametrenin 2. seviyesi değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a(n)_1^2 = (\min + \max) / 2 \quad (4.10)$$

Burada max, optimizasyon aralığının üst limitini, min ise optimizasyon aralığının alt limitini,  $a(n)$   $n$ . giriş parametresini, 1 değeri birinci iterasyonu, 2 değeri giriş parametresinin 2. seviyesi olduğunu göstermektedir.

$a(n)_1^1$  ve  $a(n)_1^3$  değerleri ise  $a(n)_1^2$  değerine seviye farkının çıkarılması/eklenmesi ile hesaplanır. Seviye farkı ( $LD$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$LD(n)_1 = (\max - \min) / (s + 1) \quad (4.11)$$

Buna göre;

$$a(n)_1^1 = a(n)_1^2 - LD(n)_1; \quad a(n)_1^3 = a(n)_1^2 + LD(n)_1 \quad (4.12)$$

olarak hesaplanır. Dikdörtgensel mikroşerit yama anten parametrelerinden  $L$  (uzunluk) ve  $W$  (genişlik) değerlerinin 0 mm ile 25 mm arasında değerler alabildiği kabul edilirse, yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda  $L$  parametresi ilk iterasyonda  $a(n)_1^1 = 10$ ,  $a(n)_1^2 = 15$ ,  $a(n)_1^3 = 20$  seviyelerinde değerler alır.

#### **Deneyin koşuturulması ve tepki tablosunun oluşturulması:**

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Bu oran aşağıdaki formüle göre hesaplanır.



$$\eta = -20 \log(UF) \text{ dB} \quad (4.13)$$

Bu formüle göre düşük uygunluk fonksiyonu değerleri için yüksek  $S/N$  oranı elde edilebilmektedir. Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır (Weng vd. 2007a).

$$\bar{\eta}(m, n) = \frac{s}{N} + \sum_{i, OA(i, n) = m} \eta_i \quad (4.14)$$

**Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi:**

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi, bulunan  $a(n)_i$  optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Çizelge 4.5'te verilen birinci anten tasarım problemi için ilk iterasyonda elde edilen sonuçlara göre oluşturulmuş tepki tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.5 İki değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu

Parametre Seviye	$L$	$W$
1	-193.6197	-193.6240
2	-193.6250	-193.6240
3	-193.6274	-193.6240

**Optimizasyon aralığının azaltılması:**

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda

bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Mevcut iterasyonda bulunan optimum değerler her bir parametrenin sonraki iterasyondaki seviye 2 değeri olacaktır. Seviye farkı ise aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$LD(n)_{i+1} = RR \times LD(n)_i \quad (4.15)$$

$RR$  optimizasyon azaltma oranı problemin tipine göre 0.5 ile 1 arasında seçilebilmektedir. Bu uygulamada 0.8 değeri kullanılmıştır.

#### **Sonlandırma kriterinin kontrolü:**

İterasyon sayısı arttıkça, her bir parametrenin seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri değeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Aşağıdaki eşitlik sonlandırma kriteri olarak kullanılır.

$$\frac{LD(n)_i}{LD(n)_1} < YO \quad (4.16)$$

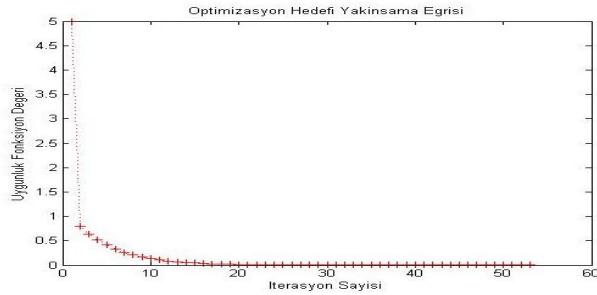
Genelde yakınsama oranı ( $YO$ ) 0.0001 ile 0.01 arasında seçilir bu şart, sağlandığında optimizasyon işlemi sonlandırılır. Bu uygulamada yakınsama oranı 0.0001 seçilmiştir.

Aşağıda yedi farklı anten tasarım problemi için bulunan sonuçlar tablo halinde verilmiştir. Tabloda, verilen girdi değerlerine göre elde edilen çıktılar ( $L$  ve  $W$ ) sunulmuştur. Bu çıktı değerlerine göre rezonans frekansı hesaplanarak istenen rezonans frekansını elde etme başarımı da verilmiştir. Bu amaçla, aşağıdaki şekilde bir hata ölçütü tanımlanmıştır:

$$\text{Hata Oranı (HO)} = |f_{dr} - f_{hr}| / f_{dr} \quad (4.17)$$

Çizelge 4.6'da her bir problemin çözümü için verilen sonuçlar, Taguchi yöntemi ile 53 iterasyonda elde edilmiştir. Optimizasyon hedefine 53. iterasyonda ulaşıldığını gösteren

yakınsama eğrisi, Şekil 4.3'te verilmiştir. Her iterasyonda ise 9 adet deney koşturulmuştur. Bu değerlere göre her bir anten problemi için uygunluk fonksiyonunun toplamda  $9 \times 53 = 477$  defa hesaplandığı söylenebilir. Bu değer, Çizelge 4.6'da *THS* (Toplam Hesap Sayısı) olarak gösterilmektedir. Ayrıca istenen rezonans frekansını elde etme başarımı ölçütünü gösteren *HO* (hata oranı) da bu tabloda verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Taguchi yöntemin istenen rezonans frekansını elde etmek için ne kadar etkin ve hızlı bir yöntem olduğu söylenebilir.



Şekil 4.3 İki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyon deneyi yakınsama eğrisi

Çizelge 4.6 İki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu

Prob. No	Girdiler			Çıktılar		$f_{hr}$ (GHz)	<i>THS</i>	<i>HO</i>
	$f_{dr}$ (GHz)	$\epsilon_r$	$h$ (mm)	$L$ (mm)	$W$ (mm)			
1	6.200	2.55	2.0	0.013 3	0.705 6	6.200	477	$8.8 \times 10^{-7}$
2	8.450	2.22	0.17	0.011 7	0.110 2	8.530	477	$1.1 \times 10^{-6}$
3	7.740	2.22	0.17	0.012 8	0.113 3	7.740	477	$8.7 \times 10^{-7}$
4	3.970	2.22	0.79	0.024 5	1.285 2	3.966	477	$9 \times 10^{-4}$

Çizelge 4.6 İki değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu (devam)

Prob. No	Girdiler			Çıktılar		$f_{hr}$ (GHz)	THS	HO
	$f_{dr}$ (GHz)	$\epsilon_r$	H (mm)	L (mm)	W (mm)			
5	5.060	2.33	1.57	0.017 5	0.006 2	5.060	477	$7.2 \times 10^{-7}$
6	5.600	2.55	1.63	0.015 1	- 0.112 5	5.600	477	$6.1 \times 10^{-7} \times$
7	4.805	2.33	1.57	0.019 5	0.000 8	4.806	477	$6.7 \times 10^{-7} \times$

Bu problem için optimizasyon parametreleri değiştirilerek maliyet etkin veya daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Optimizasyon hedefi 0.0001 olarak sabit bırakılıp azaltma oranı 0.75 olarak değiştirildiğinde iterasyon sayısı 42'ye düşmektedir. Bu sonuç  $9 \times 42 = 378$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranı bazı rezonans frekansları için 0.09 değerine kadar yükselirken bazıları için ise  $8.7 \times 10^{-7}$  değerlerinde değişmektedir. Optimizasyon azaltma oranı benzer şekilde yükseltildiğinde (örneğin 0.9 olması durumunda) iterasyon sayısı artmaktadır.

Yukarıdaki işleme benzer olarak azaltma oranı 0.8 değerinde sabit tutulup, optimizasyon hedefi 0.001 değerine yükseltildiğinde iterasyon sayısı 32'ye düşmektedir. Bu sonuç  $9 \times 32 = 278$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranı, bazı rezonans frekansları için 0.0004 değerine kadar yükselirken bazıları için ise  $7 \times 10^{-7}$  değerlerinde değişmektedir.

Sonuç olarak iki değişkenli mikroşerit yama anten tasarımında istenen ihtiyaca göre (maliyet etkin veya hassas ölçüm) optimizasyon parametreleri değiştirilerek ulaşılabilmektedir.

#### 4.2.2 Üç değişken parametrelilik dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı

Bu uygulamanın ikinci aşamasında da dikdörtgenel mikroşerit anten tasarım parametrelerinin hem uzunluk ( $L$ ) ve genişlik ( $W$ ) hem de yükseklik ( $h$ ) değerleri değiştirilerek arzu edilen rezonans frekansı bulunmaya çalışılmıştır.

Boyu  $L$ , genişliği  $W$  ve yüksekliği  $h$  olan dikdörtgenel bir mikroşerit yama anten, Şekil 4.2’de verilmiştir. Mikroşerit anten tasarım problemi ile ilgili formülasyon doğrudan (Kara 1996)’dan alınmıştır. İstenen rezonans frekansını elde etmek için bölüm 4.2.1’de verilen tüm formüller bu uygulama içinde geçerlidir.

##### **Problemin başlatılması:**

Taguchi yönteminin uygulama prosedürüne göre, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktaydı. Şekil 4.2’de verilen dikdörtgenel mikroşerit yama antende, bu kez  $L$  ve  $W$  parametrelerine ek olarak  $h$  parametresi de değiştirilerek istenilen bir rezonans frekans değerini sağlayan bir tasarım konfigürasyonu elde edilmeye çalışılmıştır. Bu durumda, 3 adet giriş parametresi bulunmasından dolayı, OA(9, 3, 3, 2) ortogonal dizisinin bu problem için uygun olduğu ve uyarlanabileceği görülür. Bu ortogonal dizi L9 ortogonal dizisi olarak tanımlanmakta olup 4 değişken parametresi olan problemlerde kullanılabilir. Belirtilen problemde, her bir parametrenin 3 seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür. Ortogonal dizi ve parametre seviyelerinin yerleşimi Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Problem yukarıdaki bölümde de belirtildiği gibi  $F=|f_{dr} - f_{hr}|$  değerinin minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. Burada  $f_{dr}$  istenen rezonans frekans değerini,  $f_{hr}$  ise verilen sabit bir  $\epsilon_r$  ve giriş değerlerine karşılık hesaplanan rezonans frekans değerini temsil etmektedir. Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) ise iki değişken parametrelilik problemde kullanılan formül ile aynıdır.

Çizelge 4.7 Üç değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı için L9 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri

Parametre Deney	1.	2.	3.	<i>UF</i> (dB)	<i>SNR</i>
1	1	1	1	5.6277	-195.0067
2	2	1	2	4.7283	-193.4941
3	3	1	3	3.9813	-192.0005
4	1	2	2	5.5636	-194.9071
5	2	2	3	4.6699	-193.3862
6	3	2	3	3.4804	-190.8327
7	1	3	1	4.2688	-192.6061
8	2	3	2	3.6444	-191.2324
9	3	3	3	3.0460	-189.6747

#### Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi:

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre deneyde ya da problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerlerinin ve seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımında  $L$  (uzunluk),  $W$  (genişlik) ve  $h$  (yükseklik) parametreleri seçilerek problemin giriş parametrelerinin belirlenmesi ile başlanabilir. Dikdörtgensel mikroşerit yama anten parametrelerinden  $L$  (uzunluk),  $W$  (genişlik) ve  $h$  (yükseklik) değerlerinin 5 mm ile 25 mm arasında değerler alabildiği kabul edilirse, parametrelerin başlangıç değerlerinin ne olacağı bölüm 4.2.1’de verilen formüllerle hesaplanabilir.

#### Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması:

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır (Weng vd. 2007a).  $SNR$  ve  $UF$  değerlerinin nasıl hesaplanacağı bir önceki tasarım probleminin çözümünde anlatılmıştı.

**Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi:**

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi bulunan  $a(n)_i$  optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Çizelge 4.7’de verilen üç eğişken parametrelili anten tasarım problemi için ilk iterasyonda elde edilen sonuçlara göre oluşturulmuş tepki tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.8 Üç değişken parametrelili dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu

Parametre Seviye	$L$	$W$	$h$
1	-194.1733	-193.5004	-192.3573
2	-192.7042	-193.0420	-192.6920
3	-190.8360	-191.1711	-192.6643

**Optimizasyon aralığının azaltılması:**

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Bu uygulamada  $RR$  optimizasyon azaltma oranı için 0.8 değeri kullanılmıştır.

**Sonlandırma kriterinin kontrolü:**

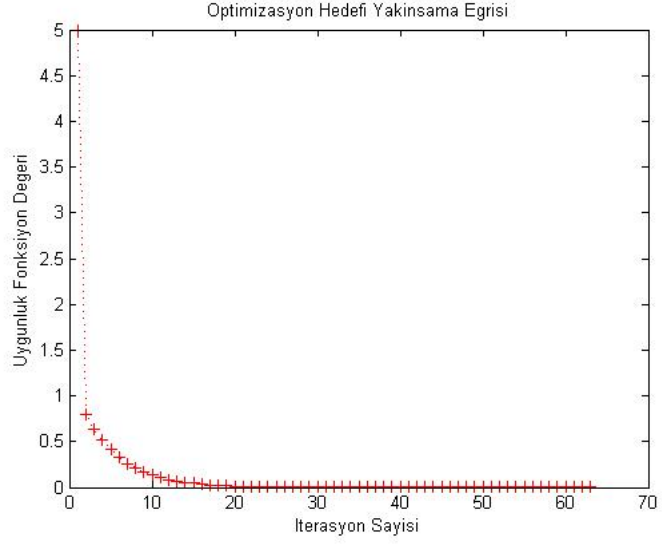
İterasyon sayısı arttıkça, her bir parametrenin seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Bu uygulamada sonlandırma kriterini temsil eden yakınsama oranı olarak 0.00001 seçilmiştir.

Aşağıda uygulamanın gerçekleştirilmesi ile elde edilen anten tasarım problemleri sonuçları sunulmuştur. Bu uygulamada 15 farklı üç değişken parametrelili anten tasarımı problemi için sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Tablolarda, verilen girdi değerlerine göre elde edilen çıktılar ( $L$ ,  $W$  ve  $h$ ) sunulmuştur. Bu çıktı değerlerine göre rezonans frekansı hesaplanarak istenen rezonans frekansını elde etme başarımı da verilmiştir. Bu amaçla, yukarıdaki bölümde formül 4.17 ile tanımlanan hata ölçütü kullanılmıştır.

Çizelge 4.9'da üç değişken parametrelili mikroşerit yama anten tasarımı probleminin çözümü için verilen sonuçlar, Taguchi yöntemi ile 63 iterasyonda elde edilmiştir. Optimizasyon hedefine 63. iterasyonda ulaşıldığını gösteren yakınsama eğrisi, Şekil 4.4'de verilmiştir. Her iterasyonda ise bu uygulama için 9 adet deney koşturulmuştur. Bu değerlere göre her bir anten problemi için uygunluk fonksiyonunun toplam  $9 \times 63 = 567$  defa hesaplandığı söylenebilir. Bu değer, Çizelge 4.9'da *THS* olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Taguchi yönteminin elektromanyetik optimizasyon problemlerinin başka birinde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Yöntemin uygulama prosedürü detaylı şekilde açıklanmış; dikdörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı örneği, bu yöntemin geçerliliğini göstermek üzere sunulmuştur. Bulunan sonuçlar, istenen rezonans frekansının optimize edilen parametrelerle başarılı bir şekilde elde edilebildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçların hassasiyeti incelendiğinde, Taguchi yönteminin optimizasyon hedefine ulaşmak için oldukça iyi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma da, Taguchi yönteminin elektromanyetik optimizasyon ve tasarım problemlerinin çözümünde kullanılabilir güçlü ve pratik bir yöntem olduğunu göstermektedir.





Şekil 4.4 Üç değişken parametrelilik dikkörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonu deneyi yakınsama eğrisi

Çizelge 4.9 Üç değişken parametrelilik dikkörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonu deneyi sonuçları tablosu

Prob. No	Girdiler					Hesaplanan Parametreler (Taguchi Meth)			$f_{hr}$ MHz (Taguchi Meth)	THS	HO
	$f_{dr}$ MHz (Kara 1996)	$f_{dr}$ MHz (Akdağlı vd. 2007)	$f_{dr}$ MHz (Karver vd. 1981)	$f_{dr}$ MHz (Garg 2001)	$\epsilon_r$	$L$ (mm)	$W$ (mm)	$h$ (mm)			
1	7740	7737	7750	7750	2.22	5.4535	6.9720	5.5028	7740	567	0.000008
2	3970	3925	3949	3983	2.22	10.7404	3.9035	10.0980	3969	567	0.000001
3	9140	9138	11330	10620	2.33	5.5000	9.0743	5.1433	9140	567	0.000001
4	4805	4715	4749	4824	2.33	18.1977	15.9804	9.4796	4805	567	0.000001
5	8270	8348	8986	9579	2.33	6.3758	7.0684	6.1827	8270	567	0.000001
6	7134	7136	6601	7342	2.55	12.4197	13.7223	9.7152	7138	567	0.000001
7	6200	6207	6053	6413	2.55	13.3525	12.6782	5.9375	6200	567	0.000001
8	5100	5259	4993	5693	2.55	17.6271	13.4493	8.2298	5100	567	0.000001
9	6070	6041	5660	6317	2.55	14.5981	11.5285	6.7370	6070	567	0.000001
10	5820	5815	5423	6042	2.55	16.4308	12.8016	10.1087	5820	567	0.000001

Çizelge 4.9 Üç değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı optimizasyonu deneyi sonuçları tablosu (devam)

Prob. No	Girdiler					Hesaplanan Parametreler (Taguchi Meth)			$f_{hr}$ MHz (Taguchi Meth)	THS	HO
	$f_{dr}$ MHz (Kara 1996)	$f_{dr}$ MHz (Akdağlı vd. 2007)	$f_{dr}$ MHz (Karver vd. 1981)	$f_{dr}$ MHz (Garg 2001)	$\epsilon_r$	L (mm)	W (mm)	h (mm)			
11	6560	6578	6421	6729	2.55	13.5499	10.0418	5.6766	6564	567	0.000001
12	5270	5204	5155	5572	2.55	6.6699	2.5405	7.5000	5272	567	0.000001
13	6380	6434	5823	5660	2.55	13.9460	12.3227	7.8952	6380	567	0.000001
14	5990	5971	5264	5063	2.55	13.8490	12.9235	5.9781	5990	567	0.000001

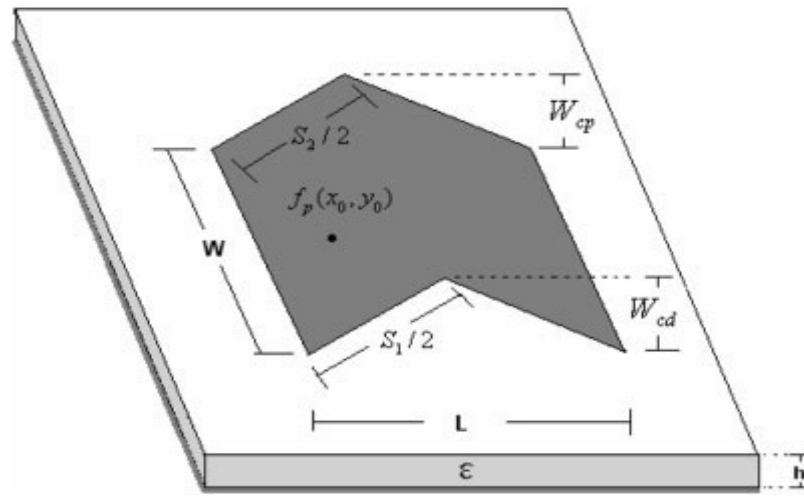
Bu problem için optimizasyon parametreleri değiştirilerek maliyet etkin veya daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Optimizasyon hedefi 0.00001 olarak sabit bırakılıp azaltma oranı 0.75 olarak değiştirildiğinde iterasyon sayısı 50'ye düşmektedir. Bu sonuç  $9 \times 50 = 450$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranı  $6 \times 10^{-6}$  ve altındaki değerlerinde değişmektedir. Benzer olarak optimizasyon azaltma oranı yükseltildiğinde iterasyon sayısı yükselmektedir.

Yukarıdaki işleme benzer olarak azaltma oranı 0.8 değerinde sabit tutulup, optimizasyon hedefi 0.001 değerine yükseltildiğinde iterasyon sayısı 32'ye düşmektedir. Bu sonuç  $9 \times 32 = 278$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranı  $1 \times 10^{-5}$  ve altındaki değerlerinde değişmektedir.

Sonuç olarak üç değişkenli mikroşerit yama anten tasarımında, istenen ihtiyaca göre (maliyet etkin veya hassas ölçüm) optimizasyon parametreleri değiştirilerek ulaşabilmektedir.

### 4.2.3 Beş (5) değişken parametrelili ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı

Mikroşerit antenler dar bant genişliğine sahip oldukları ve yalnız rezonans frekansının komşuluğunda verimli olarak çalışabildikleri için bu tür antenlerin rezonans frekansının doğru olarak belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde, kompakt silindir mikroşerit antenlerin (George vd. 1996)  $TM_{10}$  modu için, geniş bant çift frekanslı mikroşerit antenlerin (Deepukumar vd. 1996) ve kompakt çift frekanslı mikroşerit antenlerin (Kundukulan vd. 2002)  $TM_{10}$  ve  $TM_{01}$  modları için rezonans frekansının hesaplanmasına yönelik analitik yöntemler mevcuttur. Şekil 4.5'te, bilinen standart dikdörtgen yamalı mikroşerit antenlere göre %65 den daha fazlaya varan alan tasarrufu ile benzer ışıma karakteristiği gösterebilen ok biçimli mikroşerit anten geometrisi verilmiştir (Kundukulan vd. 2002). Burada  $L$  yama uzunluğu,  $W$  yama genişliği,  $W_{cd}$  ve  $W_{cp}$  yama girinti ve çıkıntı yükseklikleri,  $S_1$  ve  $S_2$  yama eğim uzunlukları,  $h$  taban kalınlığı ve  $\epsilon_r$  taban dielektrik sabitidir. Çift frekanslı ok biçimli mikroşerit antenin  $TM_{10}$  ve  $TM_{01}$  mod frekanslarını uyarmak için, anten  $f_p(x_0, y_0)$  noktasından koaksiyel beslenmiştir. Şekil 4.5'te gösterilen çift frekanslı ok biçimli mikroşerit antenin  $f_{10}$  ve  $f_{01}$  rezonans frekansları, dikdörtgen mikroşerit antenin rezonans frekansını hesaplamak için kullanılan standart denklemlerin  $W_{cd}$  ve  $W_{cp}$  yama girinti ve çıkıntı uzunlukları dikkate alınarak yeniden düzenlenmesi ile elde edilen aşağıda verilen ifadelerden hesaplanabilir.



Şekil 4.5 Çift frekanslı ok biçimli kompakt mikroşerit anten yapısı

$$f_{10} = \frac{c_0}{2(S_{eff} + 2\Delta l_1)\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (4.18a)$$

$$f_{01} = \frac{c_0}{2(W_{eff} + 2\Delta l_2)\sqrt{\varepsilon_2}} \quad (4.18b)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0.5} \quad (4.19a)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{S}\right)^{-0.5} \quad (4.19b)$$

$$\Delta l_1 = \frac{0.412 h [\varepsilon_1 + 0.3] (W/h + 0.258)}{[\varepsilon_1 - 0.258] (W/h + 0.8)} \quad (4.20a)$$

$$\Delta l_2 = \frac{0.412 h [\varepsilon_2 + 0.3] (S/h + 0.258)}{[\varepsilon_2 - 0.258] (S/h + 0.8)} \quad (4.20b)$$

$$S = \frac{(S_1 + S_2)}{2} \quad (4.21)$$

Efektif uzunluk  $S_{eff}$  ve efektif genişlik  $W_{eff}$ ,  $L < W$  için formül (4.22) ve  $L \geq W$  için formül (4.23) kullanılarak hesaplanır.

$$S_{eff} = S_1 - (0.0001/L) + 0.001W - 0.68(W_{cd} - 0.01) - 0.03(W_{cp} - 0.01) \quad , (W_{cd}/W) \leq 0.5 \quad (4.22a)$$

$$W_{eff} = W + 0.58W_{cp} - 0.43W_{cd}$$

$$S_{eff} = 0.5(S_1 + L) + 0.4W_{cd} - 0.175W - 0.003(W_{cp} - 0.01) \quad , (W_{cd}/W) > 0.5 \quad (4.22b)$$

$$W_{eff} = 0.78W + 0.0258W_{cd} + 0.49W_{cp}$$

ve  $L \geq W$  için;

$$S_{eff} = S_1 + 2.3(L - 2W - 0.0046 / L)W_{cd} + 0.00006 / L - 0.1(W_{cp} - 0.01), (W_{cd}/W) < 1 \quad (4.23a)$$

$$W_{eff} = W - 0.43W_{cd} + 0.58W_{cp} + 0.0023(L - W), (W_{cd}/W) \leq 0.5 \quad (4.23b)$$

$$W_{eff} = 0.78W + 0.025W_{cd} + 0.49W_{cp} + 0.0025(W_{cd} / W) + 0.17(L - W - 0.01), (W_{cd}/W) > 0.5 \quad (4.23c)$$

Yukarıda  $S_{eff}$  ve  $W_{eff}$  değerlerinin hesaplama yöntemleri verilmiştir. Bu hesaplamalar anten rezonans frekansını kendi doğruluk ve hesabı içerisinde hesaplamak için empirik formüllerle gösterilmiştir. Bu çalışmada ok biçimli kompakt mikroşerit antenin tasarımı için gerekli olan  $S_{eff}$  ve  $W_{eff}$  değerlerinin basit ve doğru gösterimleri aşağıdaki gibi kullanılmıştır.

$$S_{eff} = S_1 + 0.5762L \cos\left(\frac{0.69W_{cp}}{W_{cp} + W}\right) - 0.5638S_1 \cos\left[1.925\left(\frac{W_{cd}}{W_{cd} + W}\right)^{1.337}\right] \quad (4.24a)$$

$$W_{eff} = 0.9511 \times W + 0.205 \times W_{cd} \times \cos\left[2.3356 \times \left(\frac{W_{cp}}{W_{cp} + W}\right)^{-1.5274}\right] + 0.46 \times W_{cp} \times \cos\left[4.838 \times \left(\frac{W_{cd}}{W_{cd} + W}\right)^{1.369}\right] \quad (4.24b)$$

### **Problemin başlatılması:**

Taguchi yönteminin uygulama prosedürüne göre, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktaydı. Şekil 4.5'te verilen ok biçimli mikroşerit yama antende,  $L$ ,  $W$ ,  $W_{cp}$ ,  $W_{cd}$  ve  $h$  parametreleri değiştirilerek istenilen bir rezonans frekans değerlerini sağlayan bir tasarım

konfigürasyonu elde edilebilir. Bu durumda, 5 adet giriş parametresi bulunmasından dolayı, OA(18, 5, 3, 2) ortogonal dizisinin bu problem için uygun olduğu ve uyarlanabileceği görülür. Belirtilen problemde, her bir parametrenin 3 seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür. Ortogonal dizi ve parametre seviyelerinin yerleşimi Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) ise optimizasyon hedefine göre tanımlanmaktadır. Ok biçimli mikroşerit anten tasarımı probleminde rezonans frekansı ( $f_r$ ) uygunluk fonksiyonu belirleme amacı ile kullanılabilir. Rezonans frekanslarının hesaplanması formül 4.18a ve 4.18b ile yukarıda verilmişti. Dolayısıyla, uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$UF = |f_{dr} - f_{hr}| \quad (4.25)$$

Bu formülde  $f_{dr}$  elde edilmesi istenen rezonans frekans değerini;  $f_{hr}$  ise Taguchi yöntemine göre her bir denemede hesaplanan rezonans frekans değerini temsil etmektedir. Bu problemde iki adet rezonans frekansı olmasından ötürü her iterasyonda elde edilen uygunluk fonksiyonunun büyük olanına göre optimizasyona devam edilir.

Çizelge 4.10 Beş değişken parametrelili problem için L18 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri

<b>Parametre Deney</b>	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>	<b>4.</b>	<b>5.</b>	<b><i>UF</i> (dB)</b>	<b><i>SNR</i></b>
<b>1</b>	1	1	1	1	1	3.8387	- 171.6838
<b>2</b>	1	2	2	2	2	4.9525	- 173.8965
<b>3</b>	1	3	3	3	3	6.5088	- 176.2700
<b>4</b>	2	1	1	2	3	4.3959	- 172.8609
<b>5</b>	2	2	2	3	1	4.2916	- 172.6524
<b>6</b>	2	3	3	1	2	5.6241	- 175.0011
<b>7</b>	3	1	2	1	3	4.9966	- 173.9735
<b>8</b>	3	2	3	2	1	5.1915	- 174.3058
<b>9</b>	3	3	1	3	2	4.9483	- 173.8891
<b>10</b>	1	1	3	3	1	5.9336	- 175.4664
<b>11</b>	1	2	1	1	2	2.3969	- 167.5930
<b>12</b>	1	3	2	2	3	5.5440	- 174.8764
<b>13</b>	2	1	2	3	2	5.0067	- 173.9910
<b>14</b>	2	2	3	1	3	6.0620	- 175.6523
<b>15</b>	2	3	1	2	1	1.3024	- 162.2948
<b>16</b>	3	1	3	2	2	5.2012	- 174.3221
<b>17</b>	3	2	1	3	3	4.5027	- 173.0694
<b>18</b>	3	3	2	1	1	4.9317	- 173.8600

### **Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi:**

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre deneyde yada problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerleri ve seviyeleri belirlenmesi gerekmektedir. Ok biçimli mikroşerit anten tasarımında  $L$  (uzunluk),  $W$  (genişlik),  $W_{cd}$  (Girinti),  $W_{cp}$  (çıkıntı) ve  $h$  (yükseklik) parametreleri seçilerek problemin giriş parametrelerinin belirlenmesi ile başlanabilir. Ok biçimli mikroşerit yama anten parametrelerinden  $L$  (uzunluk),  $W$  (genişlik),  $W_{cd}$  (Girinti),  $W_{cp}$  (çıkıntı) ve  $h$  (yükseklik) değerlerinin 0 cm ile 10 cm arasında değerler alabildiği kabul edilirse, parametrelerin başlangıç değerlerinin ne olacağı bölüm 4.2.1’de verilen formüllerle hesaplanabilir.

### **Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması:**

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır (Weng vd. 2007a).  $SNR$  ve  $UF$  değerlerinin nasıl hesaplanacağı bir önceki problemin çözümünde anlatılmıştı.

### **Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi:**

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi bulunan  $a(n)_i$  optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Çizelge 4.11’de verilen ok biçimli mikroşerit anten tasarım problemi için ilk iterasyonda elde edilen sonuçlara göre oluşturulmuş tepki tablosu verilmiştir.



Çizelge 4.11 Ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu

<b>Parametre</b> <b>Seviye</b>	<b><math>L</math></b>	<b><math>W</math></b>	<b><math>W_{cp}</math></b>	<b><math>W_{cd}</math></b>	<b><math>h</math></b>
<b>1</b>	-171.7105	-173.2977	-173.7163	-170.2318	-172.9606
<b>2</b>	-173.1155	-172.0754	-172.8616	-173.8750	-172.0928
<b>3</b>	-174.4504	-173.9033	-172.6986	-175.1696	-174.2230

**Optimizasyon aralığının azaltılması:**

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Bu uygulamada  $RR$  optimizasyon azaltma oranı için 0.9 değeri kullanılmıştır.

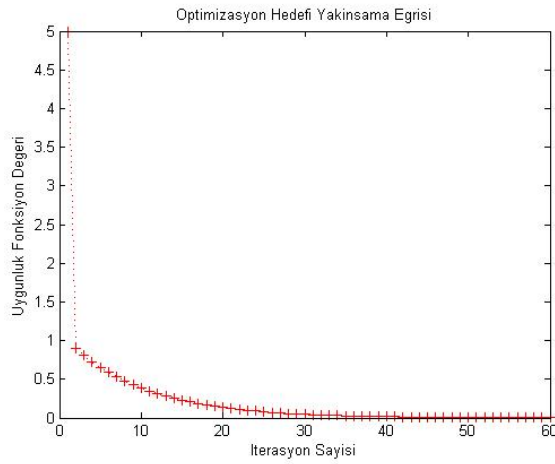
**Sonlandırma kriterinin kontrolü:**

İterasyon sayısı arttıkça, her bir parametrenin seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Bu uygulamada sonlandırma kriterini temsil eden yakınsama oranı olarak 0.002 seçilmiştir.

Aşağıda uygulamanın gerçekleştirilmesi ile elde edilen anten tasarım problemleri sonuçları sunulmuştur. Bu uygulamada 28 farklı anten tasarımı problemi için sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Tablolarda, verilen girdi değerlerine göre elde edilen çıktılar ( $L$ ,  $W$ ,  $W_{cp}$ ,  $W_{cd}$  ve  $h$ ) sunulmuştur. Bu çıktı değerlerine göre rezonans frekansı hesaplanarak istenen rezonans frekansını elde etme başarımı da verilmiştir. Bu amaçla, yukarıdaki bölümde formül 4.17 ile tanımlanan hata ölçütü kullanılmıştır. Bu uygulamada diğerlerinden farklı olarak hata çift rezonans frekansı için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12’de ok biçimli mikroşerit anten tasarımı probleminin çözümü için verilen sonuçlar, Taguchi yöntemi ile 60 iterasyonda elde edilmiştir. Optimizasyon hedefine 60. iterasyonda ulaşıldığını gösteren yakınsama eğrisi, Şekil 4.6’da verilmiştir. Her iterasyonda ise bu uygulama için 18 adet deney koşturulmuştur. Bu değerlere göre her bir anten problemi için uygunluk fonksiyonunun toplam  $18 \times 60 = 1080$  defa hesaplandığı söylenebilir. Bu değer, Çizelge 4.12’de *THS* olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada, Taguchi yönteminin elektromanyetik optimizasyon problemlerinin birinde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Yöntemin uygulama prosedürü detaylı şekilde açıklanmış; ok biçimli mikroşerit anten tasarımı örneği, bu yöntemin geçerliliğini göstermek üzere sunulmuştur. Bulunan sonuçlar, istenen rezonans frekansının optimize edilen parametrelerle başarılı bir şekilde elde edilebildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçların hassasiyeti incelendiğinde, Taguchi yönteminin optimizasyon hedefine ulaşmak için oldukça iyi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu uygulama ile de, Taguchi yönteminin, elektromanyetik optimizasyon ve tasarım problemlerinin çözümünde kullanılabilir güçlü ve pratik bir yöntem olduğu söylenebilir.



Şekil 4.6 Beş değişken parametrelili ok biçimli mikroşerit anten tasarımı optimizasyon deneyi için yakınsama eğrisi

Çizelge 4.12 Beş değişken parametrelili ok biçimli mikroserit anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu

Prob. No	Girdiler					Hesaplanan Parametreler (Taguchi Meth)					$f_{hr}$ GHz		THS	HO <sub>1</sub>	HO <sub>2</sub>
	$f_{10}$ (GHz)		$f_{10}$ (GHz)		$\epsilon_r$	L (cm)	W (cm)	$W_{cp}$ (cm)	$W_{cd}$ (cm)	h (cm)	$f_{10}$ (GHz)	$f_{10}$ (GHz)			
	$f_{dr}$ GHz (IE3D)	$f_{dr}$ GHz (Akdağlı vd. 2007)	$f_{dr}$ GHz (IE3D)	$f_{dr}$ GHz (Akdağlı vd. 2007)											
1	2.15	2.149	1.88	1.880	4.28	0.984	3.5661	1.4658	1.3018	2.85	2.158	1.883	1080	0.0002	0.001
2	2.17	2.174	1.54	1.547	4.28	1.190	4.0194	2.5616	0.8729	3.14	2.174	1.543	1080	0.0010	0.002
3	1.41	1.412	1.60	1.581	4.28	2.866	3.7789	0.4706	2.3936	1.71	1.401	1.722	1080	0.0072	0.073
4	2.16	2.159	1.11	1.116	4.28	0.694	5.0490	2.5024	0.0650	4.58	2.162	1.112	1080	0.0002	0.001
5	0.96	0.966	1.37	1.372	4.28	2.354	2.3481	1.1255	3.4792	4.58	0.968	1.367	1080	0.0029	0.003
6	1.69	1.687	1.42	1.417	4.28	1.410	3.8196	1.5582	1.1445	4.61	1.692	1.422	1080	0.0006	0.001
7	1.68	1.680	1.03	1.016	4.28	1.861	7.8254	3.2538	1.8783	2.19	1.685	1.032	1080	0.0006	0.002
8	1.37	1.376	1.24	1.245	4.28	1.599	4.4150	4.1335	1.6613	5.58	1.375	1.242	1080	0.0004	0.001
9	0.74	0.745	1.47	1.475	4.28	0.585	2.6014	3.7656	5.6071	4.25	0.747	1.473	1080	0.0015	0.000
10	1.03	1.021	1.46	1.468	4.28	2.739	2.6264	0.8874	3.3290	3.11	1.039	1.465	1080	0.0011	0.001
11	1.90	1.873	1.90	1.902	2.2	4.501	5.4513	0.2646	1.4698	0.46	1.912	1.887	1080	0.0048	0.008
12	1.37	1.382	1.86	1.882	2.2	3.910	4.4906	3.3179	3.0887	2.29	1.374	1.860	1080	0.0001	0.000
13	1.21	1.221	1.84	1.876	2.2	1.273	4.7808	3.2315	4.2274	4.64	1.217	1.847	1080	0.0001	0.000
14	2.98	3.004	1.98	1.987	2.2	2.190	5.1261	2.7908	1.6006	0.53	2.987	1.985	1080	0.0018	0.001

Çizelge 4.12 Beş değişken parametrelili ok biçimli mikroserit anten tasarımı optimizasyon deneyi sonuçları tablosu (devam)

Prob. No	Girdiler					Hesaplanan Parametreler (Taguchi Meth)					$f_{hr}$ GHz		THS	HO <sub>1</sub>	HO <sub>2</sub>
	$f_{10}$ (GHz)		$f_{10}$ (GHz)		$\epsilon_r$	L (cm)	W (cm)	$W_{cp}$ (cm)	$W_{cd}$ (cm)	h (cm)	$f_{10}$ (GHz)	$f_{10}$ (GHz)			
	$f_{dr}$ GHz (IE3D)	$f_{dr}$ GHz (Akdağlı vd. 2007)	$f_{dr}$ GHz (IE3D)	$f_{dr}$ GHz (Akdağlı vd. 2007)											
15	1.62	1.616	1.95	1.941	2.2	3.596	2.4136	2.1988	1.7663	3.13	1.622	1.954	1080	0.0015	0.000
16	1.23	1.228	1.92	1.932	2.2	2.221	5.2239	3.3837	4.2316	3.46	1.232	1.921	1080	0.0008	0.001
17	1.11	1.101	0.93	0.921	10.2	1.276	7.3386	7.5117	2.1322	2.98	1.112	0.931	1080	0.0007	0.000
18	0.74	0.736	1.06	1.067	10.2	4.363	3.4991	2.6200	2.5246	2.33	0.741	1.066	1080	0.0001	0.000
19	1.42	1.413	0.93	0.934	10.2	1.383	3.5657	3.2730	0.6421	4.03	1.424	0.936	1080	0.0001	0.002
20	2.08	2.108	1.39	1.435	4.28	0.948	3.9246	0.6426	0.3633	4.60	2.078	1.387	1080	0.0006	0.005
21	1.64	1.667	1.37	1.409	4.28	2.169	3.6179	0.5824	0.9299	3.94	1.645	1.386	1080	0.0001	0.005
22	1.36	1.373	1.36	1.393	4.28	1.658	5.6699	3.4512	2.5191	3.47	1.369	1.364	1080	0.0007	0.001
23	1.63	1.653	1.01	1.018	4.28	2.862	3.8885	8.1113	0.8742	3.02	1.633	1.012	1080	0.0001	0.000
24	1.34	1.362	1.00	1.008	4.28	0.999	8.8718	6.0118	1.6949	5.38	1.343	1.006	1080	0.0003	0.001
25	1.14	1.156	1.00	1.001	4.28	5.100	5.9674	0.9339	1.0672	2.08	1.151	1.010	1080	0.0032	0.007
26	1.40	1.409	0.93	0.940	10.2	1.286	3.9410	3.4744	0.7486	3.98	1.409	0.933	1080	0.0003	0.002
27	1.11	1.102	0.92	0.924	10.2	1.559	6.8660	7.5145	2.1574	2.62	1.112	0.926	1080	0.0006	0.002
28	0.92	0.901	0.91	0.916	10.2	4.051	4.7735	0.8584	1.4879	1.54	0.933	0.925	1080	0.0091	0.007

Bu problem için optimizasyon parametreleri değiştirilerek maliyet etkin veya daha hassas sonuçlar elde edilebilir. Optimizasyon hedefi 0.002 olarak sabit bırakılıp, azaltma oranı 0.75 olarak değiştirildiğinde iterasyon sayısı 23'e düşmektedir. Bu sonuç  $18 \times 23 = 414$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranı bazı rezonans frekansları için 0.0016 ile  $1 \times 10^{-4}$  değeri arasında değişmektedir. Optimizasyon azaltma oranı benzer şekilde yükseltildiğinde (örneğin 0.9 olması durumunda) iterasyon sayısı artmaktadır.

Yukarıdaki işleme benzer olarak azaltma oranı 0.8 değerinde sabit tutulup, optimizasyon hedefi 0.001 değerine yükseltildiğinde iterasyon sayısı 32'ye düşmektedir. Bu sonuç  $18 \times 32 = 576$  defa uygunluk fonksiyonunun hesaplanması anlamına gelmektedir. Bu optimizasyon parametrelerine göre hata oranları rezonans frekansları için  $1 \times 10^{-4}$  ve altı değerlerinde değişmektedir.

Sonuç olarak beş değişkenli mikroşerit yama anten tasarımında istenen ihtiyaca göre (maliyet etkin veya hassas ölçüm) optimizasyon parametreleri değiştirilerek ulaşılabilmektedir.

### **4.3 Taguchi yöntemi ile doğrusal anten dizisi tasarımı**

#### **Sıfır Kontrol Noktalı Örüntüye Sahip Anten Dizisi**

Bu örüntü tipinde ilk tasarım hedefi dizi faktörü belirli bir yönde sıfırlara sahip anten hüzmeleri olsun diye, dizi elemanlarının değerlerini optimize etmektir. Bu hüzmelerde 10 veya 20 adet dizi elemanı z eksenini boyunca yerleştirilmiş olup dizi elemanları arasında yarım dalga boyu olacak şekilde simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu hüzmeyi elde etmek için bölüm 4.3.1'de verilen çalışma uygulanmıştır.

20 elemanlık simetrik dizi için dizi faktörü aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$AF(\theta) = 2 \sum_{i=1}^{10} [a(n) \times e^{j\varphi(n)} \cos[\beta \times d(n) \times \cos(\theta)]] \quad (4.26)$$

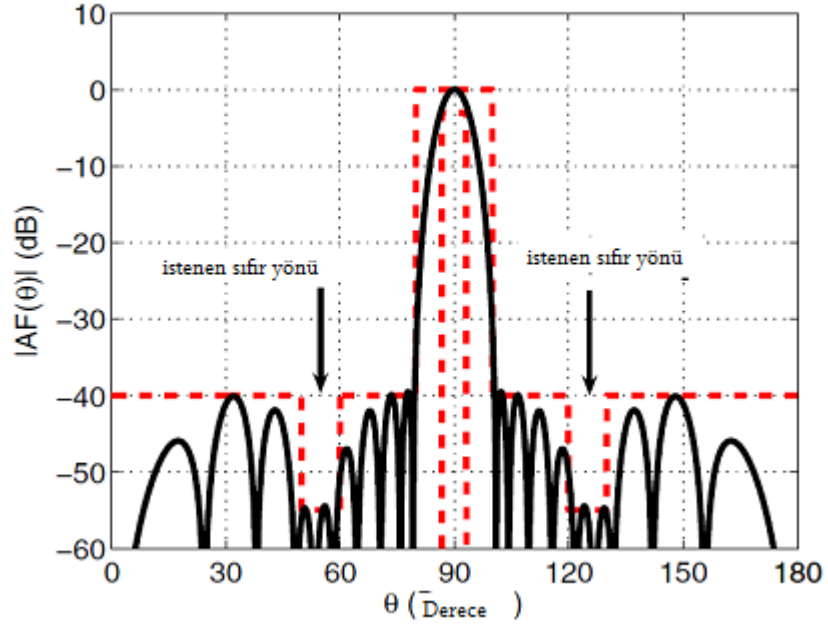
$b$  dalga numarası,  $a(n)$ ,  $\varphi(n)$  ve  $d(n)$  sırasıyla  $n$ . elemanın genlik, faz ve yer bilgisini göstermektedir. Eğer sadece genlik katsayıları optimize edilmiş olsaydı dizi faktörü aşağıdaki gibi basitçe gösterilebilirdi;

$$AF(\theta) = 2 \sum_{i=1}^{10} [a(n) \cos[\beta \times d(n) \times \cos(\theta)]] \quad (4.27)$$

Uygunluk fonksiyonu optimizasyon hedefine göre seçilir. Formül (3.2) uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

$AF(\theta)$  formül 4.26 ile elde edilmiş olan örüntüdür. Bu çalışmalardaki uygulamalarda  $AF_d(\theta)$  istenen örüntü için maske,  $d\theta$  ise  $0.1^\circ$  aralığı olarak kabul edilmiştir.

Sıfır kontrol noktalı örüntü aşağıda Şekil 4.7’de verilmiştir. -55 dB genliğine sahip iki sıfır noktası  $50^\circ$  ve  $60^\circ$  ile  $120^\circ$  ve  $130^\circ$  arasında gösterilmiştir. Basitçe uygunluk fonksiyonu istenen ve elde edilen örüntü arasındaki fark olarak düşünülebilir. İstenen örüntü maske içinde  $AF(\theta) < AF_d(\theta)$  olduğunda bunun uygunluk fonksiyonuna etkisi sıfırdır. İstenen örüntü maske dışında  $AF(\theta) > AF_d(\theta)$  olduğunda bunun uygunluk fonksiyonuna etkisi fazladır. Daha küçük uygunluk fonksiyonu daha yakın bir değer anlamına gelmektedir.

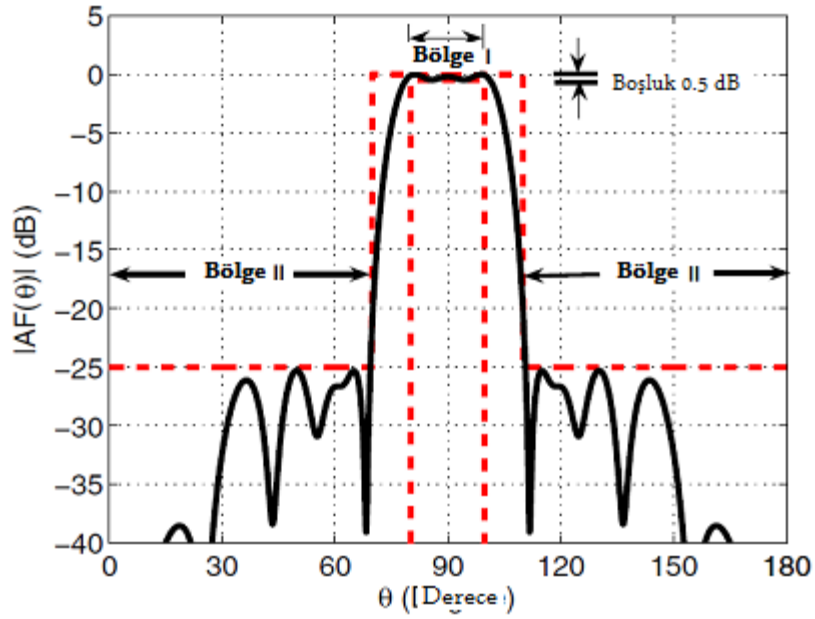


Şekil 4.7 Yirmi elemanlı dizi için sıfır kontrol noktalı örüntü

### Sektör Hüzme Örüntüsü

Taguchi yönteminin geçerliliğinin gösterilebildiği nispeten daha karmaşık olan sektör hüzme örüntüsü tasarımı bu bölümde ele alınmıştır. Burada 20 adet dizi elemanının hem genlik hem de faz değerli optimize edilerek istenen örüntü elde edilmeye çalışılmıştır. Burada sadece 10 adet genlik, 10 adet faz elemanı kullanılarak istenen örüntü elde edilmiştir.

Sektör hüzme örüntü için gereksinim aşağıda Şekil 4.8’de verilmiştir. Sektör hüzme örüntü de iki belirli açı bölgesi bulunmaktadır. Bölge I  $78^{\circ}$ - $102^{\circ}$  aralığında dalgacığın 0.5 dB daha küçük olduğu bölgede yer almaktadır. Bölge II,  $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$  ve  $110^{\circ}$ - $180^{\circ}$  aralıklarında yan kulakçık seviyelerinin (SLL) -25 dB’den aşağıda olduğu bölgede yer almaktadır. Be tez çalışmasında optimizasyon aralıkları genlik için 0 ve 1 aralığında açılar için  $-\pi$  ve  $+\pi$  aralığı olarak seçilmişlerdir.



Şekil 4.8 Yirmi elemanlı dizi için sektör hüzmne örüntüsü

#### 4.3.1 On (10) değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı

Bu problemde tasarım hedefi olarak anten dizisinin istenen yönlerde sıfırlara sahip olmasını sağlayacak genlik parametrelerini optimize etmektir. Anten dizisinde 10 eleman eşit aralıklarla yerleştirilmiş olup istenen sıfır kontrollü örüntü elde edilmeye çalışılmıştır. Bu örüntünün sahip olması gereken özellikler yukarıdaki bölümde verilmiştir. Diğer bölümlerde verildiği gibi bu uygulama için Taguchi yönteminin uygulama adımları aşağıda sunulmuştur.

##### **Problemin başlatılması:**

Taguchi yönteminin uygulama prosedürüne göre, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktaydı. Bu uygulamada 10 adet genlik parametresi değiştirilerek istenen sıfır kontrollü anten örüntüsü elde edilmeye çalışılmıştır. Bu durumda, 10 adet giriş parametresi bulunmasından dolayı, OA(27, 13, 3, 2) ortogonal dizisinin bu problem için uygun olduğu ve uyarlanabileceği görülür. Belirtilen problemde, her bir parametrenin 3



seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür. Ortogonal dizi ve parametre seviyelerinin yerleşimi Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) ise optimizasyon hedefine göre tanımlanmaktadır. Anten dizisi tasarımında dizi faktörü uygunluk fonksiyonu olarak kullanılabilir. 20 elemanlık simetrik bir dizi için, dizi faktörü formül (3.1)'de tanımlanmıştır. Dolayısıyla, uygunluk fonksiyonu formül (3.2)'de verilen şekliyle kullanılabilir.

Çizelge 4.13 On değişken parametrelili problem için L27 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon  $SNR$  ve  $UF$  değerleri

Parametre Deney	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	$UF$	$SNR$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	104.2067	-40.3579
2	2	1	2	2	2	3	3	1	2	3	167.2843	-44.4691
3	3	1	3	3	3	2	2	1	3	2	218.1906	-46.7767
4	1	2	1	2	2	2	3	3	1	2	199.4708	-45.9976
5	2	2	2	3	3	1	2	3	2	1	129.3409	-42.2347
6	3	2	3	1	1	3	1	3	3	3	236.5539	-47.4786
7	1	3	1	3	3	3	2	2	1	3	270.9650	-48.6583
8	2	3	2	1	1	2	1	2	2	2	161.5481	-44.1660
9	3	3	3	2	2	1	3	2	3	1	197.4212	-45.9079
10	1	1	2	1	2	2	2	3	3	1	159.6605	-44.0640
11	2	1	3	2	3	1	1	3	1	3	210.0118	-46.4449
12	3	1	1	3	1	3	3	3	2	2	235.1207	-47.4258
13	1	2	2	2	3	3	1	2	3	2	188.8459	-45.5222
14	2	2	3	3	1	2	3	2	1	1	129.0111	-42.2125
15	3	2	1	1	2	1	2	2	2	3	162.6018	-44.2225
16	1	3	2	3	1	1	3	1	3	3	248.2003	-47.8960

Çizelge 4.13 On değişken parametrelili problem için L27 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri (devam)

17	2	3	3	1	2	3	2	1	1	2	137.1688	-42.7451
18	3	3	1	2	3	2	1	1	2	1	115.1692	-41.2267
19	1	1	3	1	3	3	3	2	2	1	203.4701	-46.1700
20	2	1	1	2	1	2	2	2	3	3	187.7363	-45.4710
21	3	1	2	3	2	1	1	2	1	2	149.8397	-43.5125
22	1	2	3	2	1	1	2	1	2	2	124.6686	-41.9151
23	2	2	1	3	2	3	1	1	3	1	197.6217	-45.9167
24	3	2	2	1	3	2	3	1	1	3	219.9808	-46.8477
25	1	3	3	3	2	2	1	3	2	3	250.9164	-47.9906
26	2	3	1	1	3	1	3	3	3	2	206.2786	-46.2891
27	3	3	2	2	1	3	2	3	1	1	184.8075	-45.3344

#### **Giriş Parametrelerinin Belirlenmesi:**

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre deneyde ya da problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerleri ve seviyeleri belirlenmesi gerekmektedir. Doğrusal anten dizisi tasarımında 10 adet genlik parametresi seçilerek problemin giriş parametrelerinin belirlenmesi ile başlanabilir. Örneğin 3 seviyeli bir parametrenin seviyelerini belirlemek için öncelikle bu parametrenin 2. seviyesi değerinin nasıl hesaplandığı bölüm 3.1.2’de anlatılmıştı. Seviye farkının hesaplanması yine aynı bölümde verilmişti. Doğrusal anten dizisi tasarımında tüm parametrelerin 0 V ile 1 V arasında değerler aldığı kabul edilirse tüm parametrelerin ikinci seviye değerlerinin 0.5 V olarak hesaplandığı görülür.

#### **Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması:**

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Bu oranın nasıl hesaplandığı bölüm 3.1.3’de verilmişti.

Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır. Bu uygulamada ilk iterasyon için elde edilmiş tepki tablosu Çizelge 4.14'te verilmiştir.

**Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi:**

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi bulunan  $a(n)_i$  optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Çizelge 4.14'te verilen anten tasarım problemi için ilk iterasyonda elde edilen sonuçlara göre oluşturulmuş tepki tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.14 On değişken parametrelili doğrusal anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu

Parametre Seviye	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1	- 45.396	- 44.965	- 45.062	- 44.766	- 44.695	- 44.309	- 44.735	- 44.239	- 44.679	- 43.713
2	- 44.438	- 44.705	- 44.894	- 44.698	- 44.980	- 44.972	- 44.602	- 45.093	- 44.424	- 44.927
3	- 45.414	- 45.579	- 45.293	- 45.847	- 45.574	- 45.968	- 45.912	- 45.917	- 46.146	- 46.608

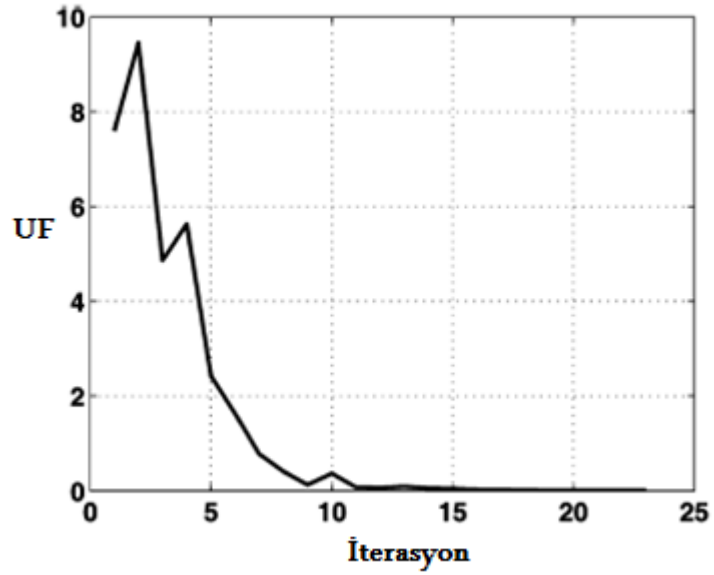
**Optimizasyon aralığının azaltılması:**

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Mevcut iterasyonda bulunan optimum değerler her bir parametrenin sonraki iterasyondaki seviye 2 değeri olacaktır. Seviye farkının nasıl hesaplanacağı bölüm 3.1.5'de verilmişti.  $RR$  optimizasyon azaltma oranı olarak bu uygulamada 0.75 değeri kullanılmıştır.

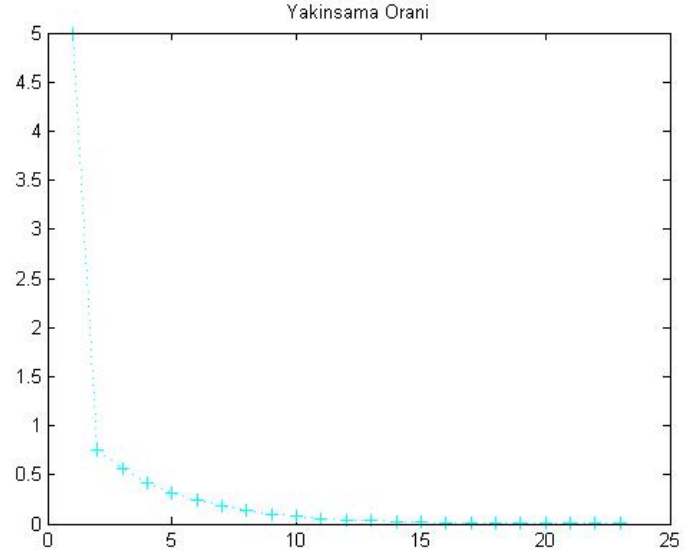
### Sonlandırma kriterinin kontrolü:

İterasyon sayısı arttıkça, her bir parametrenin seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Bu uygulamada yakınsama oranı 0.002 olarak seçilmiştir.

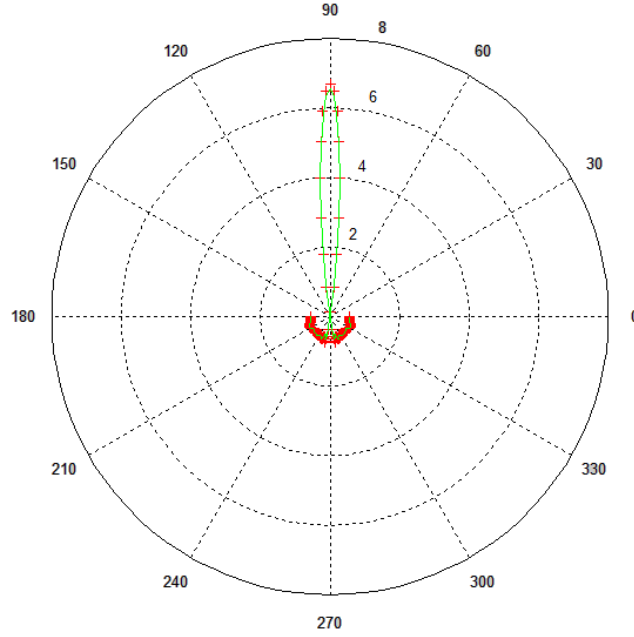
Bu problem için Weng vd. (2007b) tarafından kullanılan aynı giriş parametreleri kullanılarak elde ettiğimiz sonuçlar Weng vd. (2007b) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir. Optimizasyon problemi 23 iterasyonda çözülmüştür.



Şekil 4.9 Weng vd. (2007b) tarafından yapılan 10 değişken parametreleri optimizasyon problemi için yakınsama eğrisi



Şekil 4.10 On değişken parametreleri optimizasyon problemi yakinsama eğrisi



Şekil 4.11 On değişken parametrelili optimizasyon problemi için istenen ve bulunan örüntünün birleşik görüntüsü

Weng vd. (2007b) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucu elde edilen genlik değerleri  $[0.603, 0.577, 0.530, 0.459, 0.379, 0.294, 0.214, 0.155, 0.082, 0.046]$  şeklindedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen genlik değerleri;

[0.6063, 0.5770, 0.5146, 0.4371, 0.3637, 0.2836, 0.2078, 0.1559, 0.0839, 0.0457]  
şeklindedir.

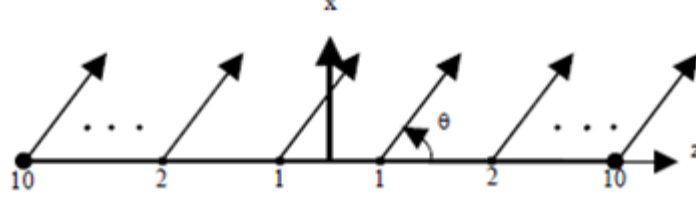
İstenen genlik değerleri ile elde edilen değerlerin arasında yakınlık değerine bakıldığında aşağıdaki hata oranı elde edilmektedir.

Çizelge 4.15 İstenen parametre değerlerine göre bulunan parametre değerlerinin yakınlık miktarını gösteren hata oranı

Hata Oranı									
P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10
0.0055	0.0001	0.0290	0.0478	0.0403	0.0355	0.0290	0.0057	0.0228	0.0061

#### 4.3.2 Yirmi (20) değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı

Bu çalışmada Taguchi yöntemi ile sektör hüzme örüntüsünün elde edilmesi gösterilerek yöntemin ne kadar çok yönlü ve sağlam olduğu kanıtlanmaya çalışılmıştır. Aşağıda gösterildiği gibi yarım dalga boyu ile yerleştirilmiş 20 elemanlı anten dizisi kullanılarak dizinin hem genlik hem de faz elemanları optimize edilmesi ile istenen anten örüntüsü elde edilmeye çalışılmıştır. 20 eleman olması sebebiyle OA(81, 20, 3, 2) ortogonal dizisi kullanılarak 10 sütun genlik, 10 sütun faz elemanlarını temsil edecek şekilde sektör hüzme örüntüsü elde edilmeye çalışılmıştır. Sektör hüzme örüntüsünün taşınması gereken özellikler bölüm 4.3'te verilmişti.



Şekil 4.12 Yirmi elemanlı eşit aralıklarla yerleştirilmiş doğrusal dizi geometrisi

20 elemanlı simetrik dizi için dizi faktörü olarak formül 4.26 kullanılmıştır.

#### Problemın başlatılması:

Taguchi yönteminin uygulama prosedürüne göre, yöntem uygun ortogonal dizinin seçimi ve uygun uygunluk fonksiyonunun tasarlanması ile başlamaktaydı. Bu uygulamada 10 adet genlik parametresi ve 10 adet faz parametresi değiştirilerek istenen sektör hüzme örüntüsü elde edilmeye çalışılmıştır. Bu durumda 20 adet giriş parametresi bulunmasından dolayı, OA(81, 20, 3, 2) ortogonal dizisinin bu problem için uygun olduğu ve uyarlanabileceği görülür. Belirtilen problemde, her bir parametrenin 3 seviyeli değerlere sahip olduğu düşünülmüştür. Ortogonal dizi ve parametre seviyelerinin yerleşimi Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Uygunluk fonksiyonu ( $UF$ ) ise optimizasyon hedefine göre tanımlanmaktadır. Anten dizisi tasarımında dizi faktörü uygunluk fonksiyonu olarak kullanılabilir. 20 elemanlık simetrik bir dizi için, dizi faktörü formül (3.1)'de tanımlanmıştır. Dolayısıyla, uygunluk fonksiyonu formül (3.2) de verilen şekliyle kullanılabilir.

Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri

Para metr e Seviy e	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	<i>UF</i>	<i>SNR</i>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	50.0037	-43.5220
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	202.1249	-46.1124
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	198.1318	-45.9391
4	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	02.3121	-46.1204
5	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	249.3363	-47.9357
6	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	211.9965	-46.5266
7	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	368.1164	-51.3197
8	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	319.1578	-50.0801
9	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	372.5706	-51.4242
10	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	264.0086	-48.4324
11	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3	1	348.4407	-50.8426
12	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	1	1	1	2	252.9717	-48.0614
13	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	338.4096	-50.5889
14	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	365.5789	-51.2596
15	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	2	430.9362	-52.6883
16	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	269.0305	-48.5960
17	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	99.4573	-49.5267



Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri (devam)

18	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	335.3553	-50.5101
19	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	2	365.2694	-51.2523
20	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	3	324.0305	-50.2117
21	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	1	447.1100	-53.0083
22	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	354.7531	-50.9985
23	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	344.3093	-50.7390
24	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	318.0546	-50.0500
25	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	418.4417	-52.4327
26	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	3	388.7238	-51.7928
27	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	419.7977	-52.4608
28	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	374.2829	-51.4640
29	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	368.1379	-51.3202
30	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	422.6700	-52.5200
31	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	2	3	1	2	3	1	341.1177	-50.6581
32	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	334.0388	-50.4759
33	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	3	1	2	3	1	2	3	459.9963	-53.2551
34	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	411.2155	-52.2814
35	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	2	3	1	2	403.7231	-52.1217

Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri (devam)

36	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	335.8822	-50.5237
37	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	3	437.4887	-52.8193
38	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	2	3	1	3	1	2	1	535.9962	-54.5832
39	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	3	1	2	1	2	3	2	334.0752	-50.4769
40	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	1	2	3	2	3	1	3	451.8109	-53.0991
41	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1	454.0973	-53.1430
42	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	3	1	2	1	2	3	2	449.3424	-53.0515
43	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	434.1088	-52.7520
44	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	424.0234	-52.5478
45	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	444.6843	-52.9610
46	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	2	385.9808	-51.7313
47	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	2	3	1	1	2	3	3	373.4846	-51.4455
48	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	3	1	2	2	3	1	1	442.5648	-52.9195
49	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	438.8621	-52.8466
50	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	479.3716	-53.6134
51	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	410.7479	-52.2715
52	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	1	2	3	3	1	2	2	384.9578	-51.7083
53	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	1	2	3	3	438.8143	-52.8456

Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri (devam)

54	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	435.0905	-52.7716
55	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	394.0131	-51.9102
56	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	483.1937	-53.6824
57	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	401.6229	-52.0764
58	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1	3	2	1	377.8012	-51.5453
59	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	366.0786	-51.2715
60	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	3	2	1	3	404.7343	-52.1434
61	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1	3	2	1	3	2	1	384.1776	-51.6906
62	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	2	1	3	2	1	3	2	406.2485	-52.1758
63	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	397.0388	-51.9767
64	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	3	495.4302	-53.8996
65	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	2	1	3	3	2	1	1	444.5963	-52.9593
66	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	3	2	1	1	3	2	2	336.4128	-50.5375
67	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	1	3	2	2	1	3	3	435.9911	-52.7896
68	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1	455.6375	-53.1724
69	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	1	3	2	2	564.9048	-55.0395
70	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	496.1222	-53.9118
71	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	359.6206	-51.1169

Çizelge 4.16 Yirmi değişken parametrelili problem için L81 ortogonal dizisi ve ilk iterasyon *SNR* ve *UF* değerleri (devam)

<b>72</b>	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	446.6791	-52.9999
<b>73</b>	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2	466.5221	-53.3774
<b>74</b>	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	2	1	3	1	3	2	3	382.2470	-51.6469
<b>75</b>	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	3	2	1	2	1	3	1	479.3886	-53.6138
<b>76</b>	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	432.0893	-52.7115
<b>77</b>	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	399.4359	-52.0289
<b>78</b>	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	425.3263	-52.5744
<b>79</b>	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	1	3	2	3	2	1	2	471.6556	-53.4725
<b>80</b>	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	2	1	3	1	3	2	3	547.0720	-54.7609
<b>81</b>	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2	1	3	1	453.6742	-53.1349

### **Giriş parametrelerinin belirlenmesi:**

Taguchi yöntemi uygulama prosedürüne göre deneyde ya da problemde kullanılacak parametrelerin nümerik değerleri ve seviyeleri belirlenmesi gerekmektedir. Doğrusal anten dizisi tasarımında 10 adet genlik parametresi ve 10 adet faz parametresi seçilerek problemin giriş parametrelerinin belirlenmesi ile başlanabilir. Örneğin 3 seviyeli bir parametrenin seviyelerini belirlemek için öncelikle bu parametrenin 2. seviyesi değerinin nasıl hesaplandığı bölüm 3.1.2’de anlatılmıştı. Seviye farkının hesaplanması yine aynı bölümde verilmişti. Doğrusal anten dizisi tasarımında genlik parametrelerinin 0 V ile 1 V arasında değerler ve faz parametrelerinin ise  $-\pi$  ile  $+\pi$  radyan arasında kabul edilirse, genlik parametrelerin ikinci seviye değerlerinin 0.5 V ve faz parametresi değerlerinin 0 (sıfır) radyan olarak hesaplandığı görülür.

### **Deneyin koşturulması ve tepki tablosunun oluşturulması:**

Ortogonal dizi girişlerinin uygun giriş değerlerine dönüşümünden sonra, her bir deney için uygunluk fonksiyonu analitik olarak hesaplanır. Bu uygunluk fonksiyonu sinyal gürültü ( $S/N$ ) oranının ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Bu oranın nasıl hesaplandığı bölüm 3.1.3’de verilmiştir.

Tüm deneylerin koşturulmasından sonra, uygun ve ilişkili  $S/N$  oranı elde edilmektedir. Bu sonuçlar, ortalama  $S/N$  oranları kullanılarak tepki tablosu oluşturmada kullanılmaktadır. Bu uygulamada ilk iterasyon için elde edilmiş tepki tablosu Çizelge 4.17’de verilmiştir.

### **Optimal seviye değerlerinin elde edilmesi ve en iyi parametre seviye kombinasyonuna sahip deneyin belirlenmesi:**

Tepki tablosunun oluşturulması ile her bir parametrenin en yüksek  $S/N$  oranına sahip seviyesi belirlenir. Daha sonra doğrulama deneyi bulunan a(n)i optimal seviyelerin değerlerinin kombinasyonu ile uygulanır. Elde edilen uygun değer, sonraki iterasyonlar ile ilişkili olacaktır. Aşağıda Çizelge 4.17’de verilen anten tasarım problemi için ilk iterasyonda elde edilen sonuçlara göre oluşturulmuş

tepki tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.17 20 değişken parametrelili doğrusal anten tasarımı optimizasyonunun ilk iterasyonu için tepki tablosu

Parametre Seviye	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	- 49.7197	- 50.4471	- 51.0207	- 51.1754	- 51.1247	- 51.1545	- 51.2976	- 51.1594	- 51.1124	- 51.1508	- 51.8059	- 51.4800	- 51.3369	- 51.4049	- 51.3640	- 51.4613	- 51.3305	- 51.6622	- 51.7130	- 51.3369
2	- 52.3040	- 51.9395	- 51.5721	- 51.5234	- 51.5777	- 51.5343	- 51.5231	- 51.4046	- 51.5698	- 51.4050	- 51.2615	- 51.3395	- 51.6765	- 51.6079	- 51.5540	- 51.6504	- 51.6618	- 51.4470	- 51.2097	- 51.6765
3	- 52.6748	- 52.3119	- 52.1056	- 51.9997	- 51.9962	- 52.0097	- 51.8778	- 52.1345	- 52.0163	- 52.1428	- 51.6311	- 51.8790	- 51.6851	- 51.6858	- 51.7805	- 51.5868	- 51.7062	- 51.5894	- 51.7758	- 51.6851

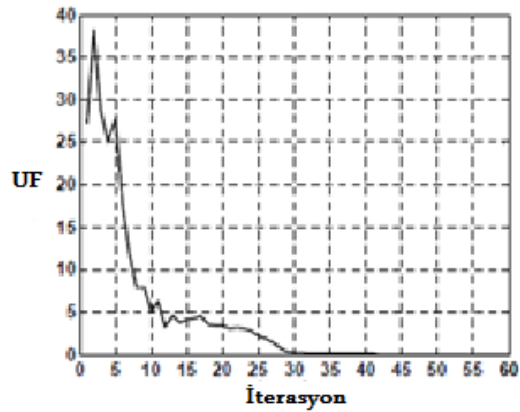
### **Optimizasyon aralığının azaltılması:**

Eğer ilk iterasyonda sonlandırma kriteri karşılanmamışsa bu işlemler sonraki iterasyon için tekrar edilir. Sonraki iterasyonda kullanılacak parametre seviyeleri bu iterasyonda bulunan optimum seviyelere göre ayarlanır. Mevcut iterasyonda bulunan optimum değerler her bir parametrenin sonraki iterasyondaki seviye 2 değeri olacaktır. Seviye farkının nasıl hesaplanacağı bölüm 3.1.5’de verilmişti. *RR* optimizasyon azaltma oranı olarak bu uygulamada 0.9 değeri kullanılmıştır.

### **Sonlandırma kriterinin kontrolü:**

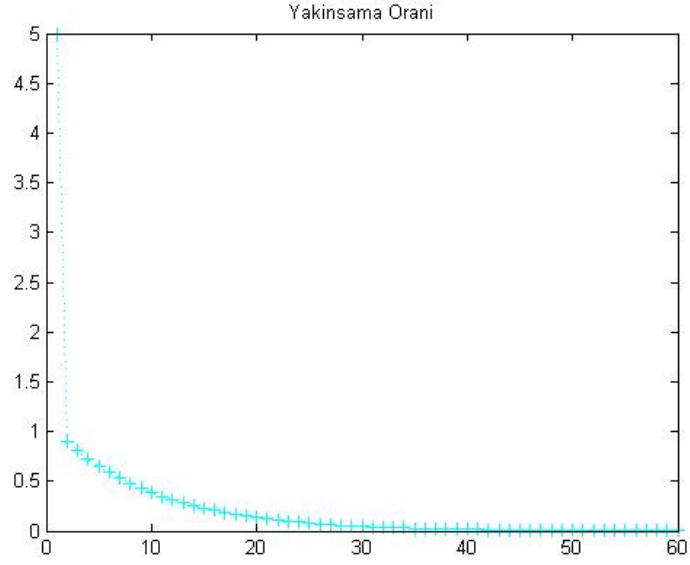
İterasyon sayısı arttıkça, her bir parametrenin seviye farkı azalmaktadır. Bu nedenle her bir seviyenin değeri diğeri ile ilişkili olup, sonraki iterasyonun uygunluk değeri bu iterasyondaki uygunluk değeri ile ilişkilidir. Bu uygulamada yakınsama oranı 0.002 olarak seçilmiştir.

Bu problem için Weng vd. (2006a) tarafından kullanılan aynı giriş parametreleri kullanılarak elde ettiğimiz sonuçlar Weng vd. (2006a) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmiştir. Optimizasyon problemi 60 iterasyonda çözülmüştür.

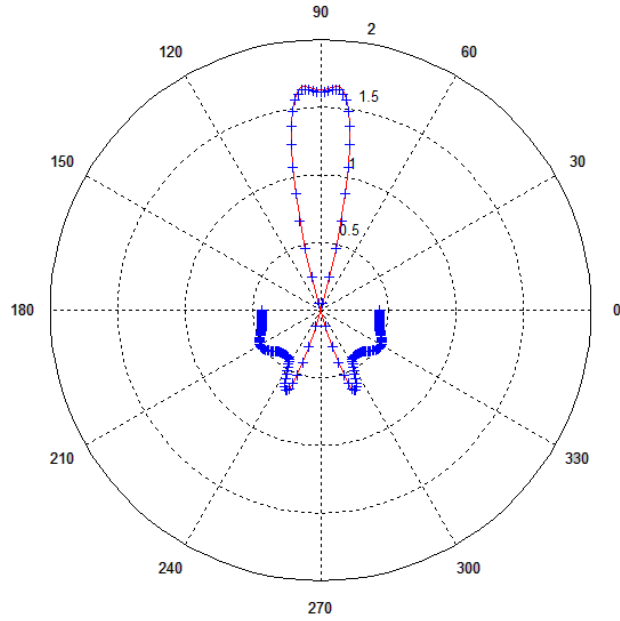


Şekil 4.13 Weng vd. (2006a) tarafından yapılan 20 değişken parametreleri optimizasyon problemi için yakınsama eğrisi





Şekil 4.14 Yirmi değişken parametreleri optimizasyon problemi yakınsama eğrisi



Şekil 4.15 Yirmi değişken parametrelili optimizasyon problemi için istenen ve bulunan örüntünün birleşik görüntüsü

Weng vd. tarafından yapılan çalışmada yakınsama oranı 0.002, optimizasyon azaltma oranı 0.9 şeklinde giriş parametreleri olarak seçilerek [0.437, 0.321, 0.188, 0.122, 0.132, 0.130, 0.079, 0, 0, 0] genlik değerleri, [9.03, 2.51, -16.74, -77.72, -119.81, -112.63, -

111.57, -111.27, -170.14, -175.43] derece cinsinden faz değerleri bulunmuştur. Bu parametreler ile istenen örüntü tanımlanarak, bu parametrelerin optimizasyonu bizim çalışmamızda yapılmaya çalışılmıştır.

Weng vd. (2006a) tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre 14 elemanlı simetrik doğrusal dizi ile istenen optimizasyon hedefine ulaşılabilir. Weng tarafından elde edilen yakınsama oranı yukarıda Şekil 4.13’de verilmiştir. Aynı yakınsama oranı tarafımızca da bulunmuş olup Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara Taguchi yönteminin optimizasyon probleminin çözümünde ne kadar etkin olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.18 Taguchi yöntemine göre bulunan genlik ve faz katsayıları değerleri

Genlik Katsayıları										Faz Katsayıları									
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
0.4346	0.3183	0.1847	0.1194	0.1332	0.1317	0.0815	0.0036	0.0018	0.0000	9.0234	2.9535	- 16.0319	78.1699	- 120.1793	- 112.5152	- 109.5005	- 63.0954	- 104.9044	- 16.0319

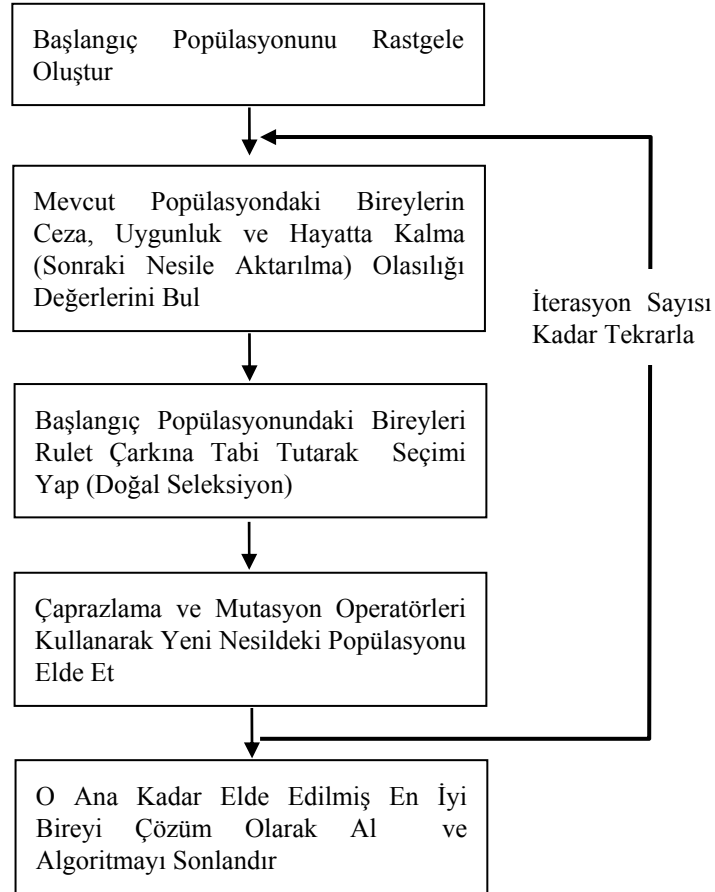
Çizelge 4.19 İstenen parametre değerlerine göre bulunan parametre değerlerinin yakınlık miktarını gösteren hata oranı

Hata Oranı																			
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
0.0054	0.0086	0.0175	0.0216	0.0092	0.0133	0.0321	0.00	0.00	00.00	0.0007	0.1767	0.0423	0.0058	0.0031	0.0010	0.0185	0.4330	0.3834	0.9086

## 4.4 Taguchi yöntemi ile genetik algoritmanın karşılaştırması

### 4.4.1 Genetik algoritmalar

Genetik Algoritmalar ilk defa 1975 yılında Holland tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmaya başlanması ise Goldberg'ın çalışmasının ardından gerçekleşmiştir. 1992 yılında ise Koza, Genetik Algoritmayı kullanarak çeşitli görevleri yerine getiren programlar geliştirmiş ve bu yönteme Genetik Programlama adını vermiştir. Genetik Algoritmanın genel çalışma mantığı Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16 Genetik algoritma yapısı

#### Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

Genetik algoritmaya optimizasyonu yapılacak fonksiyonun değişkenlerini içeren uygun

sayıdaki bireylerin rastgele 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 (Michalewicz 1992). Popülasyonun oluşturulmasında önemli parametrelerden birisi de popülasyondaki birey sayısının optimum çözümü sağlayacak şekilde belirlenmesidir.

### **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.

### **Rulet Çarkı, Çaprazlama ve Mutasyon İşlemleri**

Oluşturulan ilk popülasyondan en iyi bireylerin seçilerek bir sonraki nesle aktarılabilmesi için bireylere rulet çarkı uygulanır. Bu maksatla ilk bireyden başlamak üzere her birey için 0 ile 1 arasında rastgele bir X sayısı üretilir. X sayısı bireylerin kümülatif olasılıklarından küçük olmak üzere, bu değere karşılık gelen birey yeni popülasyona aktırılır. Böylece kümülatif olasılığı yüksek (iyi) bireylerin sonraki nesle aktarılması sağlanır.

Ortaya çıkan ara popülasyondaki her birey için yine 0 ile 1 arasında rastgele 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 rastgele olarak belirlenecek sıra ve sayıdaki geni ile diğer ebeveynin aynı sıra ve sayıdaki genleri karşılıklı yer değiştirilir ve iki yeni birey (çocuk) elde edilir.

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.

Bu tez kapsamında genetik algoritma ile ilgili gerçekleştirilen uygulamalar MATLAB 7.0.1 platformunda geliştirilmiş olup, MATLAB'ın Genetik Algoritma Araç Kutusu (*GA Toolbox*) kullanılmıştır. Uygulama sırasında sadece MATLAB'da yer alan genetik algoritma çözümleyicisinin varsayılan değerleri değiştirilerek beklenen sonuçlar bulunmaya yapılmıştır. Aşağıdaki başlıklarda her bir uygulama için genetik algoritmanın değiştirilmiş olan varsayılan değerleri verilmiştir.

#### **4.4.2 Taguchi yöntemi ve genetik algoritmanın Rastrigin fonksiyonuna uygulanması ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması**

Bu uygulamada öncelikle Rastrigin fonksiyonunun yerel minimum değerleri genetik algoritma ile bulunmaya çalışılmıştır. Bulunan değerler Bölüm 4.1'de verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre beklenen değerlerle her bir algoritmanın çalıştırılması sonucu bulunan değerler arasındaki farkı gösteren değerler aşağıda Çizelge 4.21'de verilmiştir.

Genetik algoritma ile bulunan sonuçlarda, genetik algoritmanın aşağıdaki parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.20 GA’da kullanılan parametre değerleri

Parametre Adı	Tek Noktalı Çaprazlama Yönteminde Kullanılan Değer
Popülasyondaki Birey Sayısı	90
Eleman Sayısı	10
İterasyon Sayısı	150
Çaprazlama Oranı	0.8
Mutasyon Oranı	0.2

Çizelge 4.21 GA ve Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu (birey sayısı=90)

Fark Matrisi										
Parametre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Fark Sonucu (Taguchi)</b>	- 0.0000	- 0.0007	0.0002	0.0001	0.0005	0.0001	0.0016	0.0004	0.0000	- 0.0001
<b>Fark Sonucu (GA)</b>	0.9983	0.0084	- 0.9887	- 0.9718	0.0004	- 0.9888	- 0.0222	- 0.0047	0.0130	0.0240

Genetik algoritmanın parametrelerinden sadece popülasyon sayısı değeri 20 olarak değiştirildiğinde elde edilen yeni sonuçlar aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 4.22 GA ve Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu (birey sayısı=20)

Fark Matrisi										
Parametre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Çizelge 4.22 GA ve Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlarla bulunmak istenen değerler arasındaki yakınlığı gösteren fark matrisi tablosu (birey sayısı=20) (devam)

Fark Matrisi										
Parametre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Fark Sonucu (Taguchi)</b>	- 0.0000	- 0.0007	0.0002	0.0001	0.0005	0.0001	0.0016	0.0004	0.0000	- 0.0001
<b>Fark Sonucu (GA)</b>	0.0020	- 0.0246	- 0.9774	- 0.0435	- 0.9916	- 0.0278	0.0124	- 0.0113	- 0.0061	- 1.9590

Fark matrisindeki sonuçlar incelendiğinde Taguchi yönteminin genetik algoritmaya nazaran daha başarılı sonuçlar verdiğini görebilmekteyiz.

#### 4.4.3 Taguchi yöntemi ve genetik algoritma ile dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımının karşılaştırma sonuçları

Bu uygulamada da öncelikle mikroşerit yama antenin iki parametresi daha sonra üç parametresi ve daha sonra beş parametresi değişken kabul edilerek istenen rezonans frekansı bulunmaya çalışılmıştır. Bulunan değerler Bölüm 4.2’de verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre beklenen değerlerle her bir algoritmanın çalıştırılması sonucu bulunan değerler arasındaki farkı gösteren değerler aşağıda sırasıyla Çizelge 4.24,

Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27 ‘de verilmiştir.



Genetik algoritma ile bulunan sonuçlarda, genetik algoritmanın aşağıdaki parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.23 GA’da kullanılan parametre değerleri

Parametre Adı	Tek Noktalı Çaprazlama Yönteminde Kullanılan Değer
Popülasyondaki Birey Sayısı	90
Eleman Sayısı	2 (ilk uygulama için) 3 (ikinci uygulama için) 5 (üçüncü uygulama için)
İterasyon Sayısı	150
Çaprazlama Oranı	0.8
Mutasyon Oranı	0.2

Çizelge 4.24 GA ve Taguchi yöntemi ile iki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90)

Prob . No	<i>THS</i> (Taguchi)	<i>THS</i> (GA)	<i>HO</i> (Taguchi)	<i>HO</i> (GA)
1	477	13500	$8.8 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-3}$
2	477	13500	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-4}$
3	477	13500	$8.7 \times 10^{-7}$	$8.6 \times 10^{-5}$
4	477	13500	$9 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-5}$
5	477	13500	$7.2 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-4}$
6	477	13500	$6.1 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-5}$
7	477	13500	$6.7 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-4}$

Bu uygulamada ayrıca Taguchi yöntemi ile diğer yöntemler arasındaki işlem yükünü gösteren bir araştırma sunulmuştur. Bu araştırma aşağıda Çizelge 4.25’de verilmiştir.

Çizelge 4.25 Uygunluk fonksiyonu hesaplama sayısı

	Çözüm Yöntemi		
	GA (Pattnaik vd. 2003)	PSO (Yılmaz vd. 2007)	Taguchi (Bu Çalışma)
Uygunluk fonksiyonu hesaplama sayısı	20×200=4000 (20 birey ve 200 iterasyon)	20×50=1000 (20 parçacık ve 50 iterasyon)	32×53=477 (3 seviye, 2 parametre ve 53 iterasyon)

Çizelge 4.26 GA ve Taguchi yöntemi ile üç değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90)

Prob. No	<i>THS</i> (Taguchi)	<i>THS</i> (GA)	<i>HO</i> (Taguchi)	<i>HO</i> (GA)
1	567	13500	$8 \times 10^{-6}$	$6.89 \times 10^{-5}$
2	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$4.13 \times 10^{-5}$
3	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.77 \times 10^{-5}$
4	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.83 \times 10^{-4}$
5	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$4.16 \times 10^{-5}$
6	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$2.05 \times 10^{-4}$
7	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-4}$
8	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-5}$
9	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-4}$
10	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$2.71 \times 10^{-5}$
11	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.77 \times 10^{-4}$
12	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-4}$
13	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$4.04 \times 10^{-5}$
14	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$2.41 \times 10^{-4}$

Çizelge 4.27 GA ve Taguchi yöntemi ile beş değişken parametrelili ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90)

Prob. No	THS (Taguchi)	THS (GA)	$f_{dr}$		Taguchi		GA	
			$f_{10}(\text{GHz})$ (IE3D)	$f_{10}(\text{GHz})$ (IE3D)	$HO_1$	$HO_2$	$HO_1$	$HO_2$
1	1080	13500	2.159	1.886	0.0002	0.0017	$1.59 \times 10$	0.0088
2	1080	13500	2.172	1.547	0.0010	0.0023	0.0027	0.3648
3	1080	13500	1.412	1.605	0.0072	0.0735	0.0491	0.0633
4	1080	13500	1.903	1.903	0.0048	0.0084	0.0008	0.1691
5	1080	13500	1.374	1.862	0.0001	0.0004	0.2594	0.0766
6	1080	13500	1.217	1.847	0.0001	0.0004	0.3981	0.8374
7	1080	13500	1.425	0.939	0.0001	0.0029	0.1022	2.0620
8	1080	13500	1.112	0.932	0.0007	0.0009	$1.16 \times 10$	0.0216
9	1080	13500	0.926	0.917	0.0018	0.0019	$2.67 \times 10$	0.8582
10	1080	13500	2.080	1.395	0.0006	0.0053	0.0071	1.3782

Genetik algoritmanın parametrelerinden sadece popülasyon sayısı 20 değeri ile değiştirildiğinde elde edilen yeni sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 4.28 GA ve Taguchi yöntemi ile iki değişken parametrelili dikdörtgenel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20)

Prob. No	THS (Taguchi)	THS (GA)	HO (Taguchi)	HO (GA)
1	477	13500	$8.8 \times 10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-4}$
2	477	13500	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-8}$
3	477	13500	$8.7 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-4}$
4	477	13500	$9 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-8}$
5	477	13500	$7.2 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-5}$
6	477	13500	$6.1 \times 10^{-7}$	$6.1 \times 10^{-6}$
7	477	13500	$6.7 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-4}$

Çizelge 4.29 GA ve Taguchi yöntemi ile üç değişken parametrelilik dikkörtgensel mikroşerit yama anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20)

Prob. No	<i>THS</i> (Taguchi)	<i>THS</i> (GA)	<i>HO</i> (Taguchi)	<i>HO</i> (GA)
1	567	13500	$8 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-5}$
2	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$8.2 \times 10^{-6}$
3	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-4}$
4	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-5}$
5	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$8.3 \times 10^{-4}$
6	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-4}$
7	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-5}$
8	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-5}$
9	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$
10	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-4}$
11	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-5}$
12	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-4}$
13	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-5}$
14	567	13500	$1 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-5}$

Çizelge 4.30 GA ve Taguchi yöntemi ile beş değişken parametrelilik ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20)

Prob. No	<i>THS</i> (Taguchi)	<i>THS</i> (GA)	$f_{dr}$		Taguchi		GA	
			$f_{10}$ (GHz) (IE3D)	$f_{10}$ (GHz) (IE3D)	$HO_1$	$HO_2$	$HO_1$	$HO_2$
1	1080	13500	2.159	1.886	0.0002	0.0017	0.0001	0.0144
2	1080	13500	2.172	1.547	0.0010	0.0023	0.0001	0.0005
3	1080	13500	1.412	1.605	0.0072	0.0735	0.0833	0.00001
4	1080	13500	1.903	1.903	0.0048	0.0084	0.00006	0.0018
5	1080	13500	1.374	1.862	0.0001	0.0004	0.6133	0.0832
6	1080	13500	1.217	1.847	0.0001	0.0004	0.00008	1.000
7	1080	13500	1.425	0.939	0.0001	0.0029	0.0023	0.1923
8	1080	13500	1.112	0.932	0.0007	0.0009	0.0012	0.9498
9	1080	13500	0.926	0.917	0.0018	0.0019	0.9014	0.0025
10	1080	13500	2.080	1.395	0.0006	0.0053	0.0165	0.0072

#### 4.4.4 Taguchi yöntemi ve genetik algoritma ile doğrusal anten dizisi tasarımının karşılaştırma sonuçları

Bu uygulamada genetik algoritma ile genlik parametreleri değişken olan doğrusal anten dizisi tasarlanmaya çalışılmıştır. Bulunan değerler Bölüm 4.3.1’de verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Buna göre beklenen değerlerle her bir algoritmanın çalıştırılması sonucu bulunan değerler arasındaki farkı gösteren değerler Çizelge 4.32’de verilmiştir.

Genetik algoritma ile bulunan sonuçlarda, genetik algoritmanın aşağıdaki parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.31 GA’da kullanılan parametre değerleri

Parametre Adı	Tek Noktalı Çaprazlama Yönteminde Kullanılan Değer
Popülasyondaki Birey Sayısı	90
Eleman Sayısı	10

Çizelge 4.31 GA’da kullanılan parametre değerleri (devam)

İterasyon Sayısı	150
Çaprazlama Oranı	0.8
Mutasyon Oranı	0.2

Çizelge 4.32 GA ve Taguchi yöntemi ile 10 değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=90)

Hata Oranı										
Yöntem	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10
Taguchi	0.0055	0.0001	0.0290	0.0478	0.0403	0.0355	0.0290	0.0057	0.0228	0.0061
GA	0.0287	0.1078	0.1581	0.1228	0.0891	0.2639	0.2532	0.2630	0.2389	0.6436

Genetik algoritmanın parametrelerinden sadece popülasyon sayısı değeri 20 olarak değiştirildiğinde elde edilen yeni sonuçlar aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 4.33 GA ve Taguchi yöntemi ile 10 değişken parametrelili doğrusal anten dizisi tasarımı karşılaştırma sonuçları (birey sayısı=20)

<b>Hata Oranı</b>										
<b>Yöntem</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>
<b>Taguchi</b>	0.0055	0.0001	0.0290	0.0478	0.0403	0.0355	0.0290	0.0057	0.0228	0.0061
<b>GA</b>	0.1011	0.1361	0.0032	0.0276	0.0722	0.2719	0.2124	0.2308	0.3653	0.7957

Yukarıdaki çizelgelerde gösterilen sonuçlar incelendiğinde Taguchi yönteminin genetik algoritmaya nazaran daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında öncelikle Taguchi optimizasyon yöntemi ve bu yöntemin elektromanyetik alanında kullanılması ile ilgili açıklayıcı bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Daha önce elektromanyetik alanında gerçekleştirilen bazı çalışmalara değinilmiş, örnek olarak da mikroşerit yama anten tasarımı ve doğrusal anten dizisi örüntüsü elde etme problemleri üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde Taguchi yöntemi ile istenen anten tasarım parametrelerinin başarılı bir şekilde elde edilebildiği görülmüştür. Hatta bu yöntemin kolaylıkla uygulanabileceği ve bu yöntemin kullanılması durumunda istenen hedeflere hızlı bir şekilde ulaşılabilceği değerlendirilmektedir.

Bunun yanında, Taguchi yönteminin birçok değişik elektromanyetik problemin çözümünde iyi bir aday çözüm yöntemi olarak kullanılabilceğini ve kolaylıkla problemlere uyarlanabilceğini söylenebilir. Literatür araştırması sonucu mikroşerit filtre tasarımı, ultra geniş bant anten tasarımı, daraltılmış anten dizisi tasarımı, yansıma dizisi antenleri, bant geçiren ve bant durduran filtre tasarımları gibi elektromanyetik alandaki diğer problemler için Taguchi yönteminin uygulanabilceği değerlendirilmektedir. Doğrusal olmayan (dikdörtgensel, dairesel, iç içe geçmiş vb.) anten dizisi tasarlanması problemleri içinde bu yöntemin uygulanabilceği öngörülmektedir. Ayrıca problemin türüne bağlı olmakla birlikte Taguchi yöntemi ile elde edilen optimizasyon sonuçlarının diğer optimizasyon algoritmaları ile elde edilen sonuçlara göre daha başarılı olduğu bazı çalışmalar incelenmiştir. Bu tez çalışmasında da Taguchi yöntemi ve genetik algoritma, anten tasarım problemlerine ayrı ayrı uygulanarak bu yöntemlerin karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları bölüm 4.4'de her bir uygulama için verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Taguchi yönteminin genetik algoritmaya göre daha başarılı sonuçlar verdiği değerlendirilmektedir. Genetik algoritmanın yerel minimuma takıldığı ve daha düşük hassasiyette sonuçlar ürettiği görülmüştür. Ayrıca yerel minimuma takılmasından dolayı genetik algoritma her çalıştırıldığında bir öncekinden farklı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak yöntemin uygulanabilirliğini görmek ve algoritmanın doğruluğunu test etmek için öncelikle (Weng vd. 2007a) tarafından Rastrigin fonksiyonu üzerinde yapılan çalışma referans alınmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada Weng vd. tarafından elde edilen sonuçların birebir aynısı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bölüm 4.1'de verilmiştir. Bu sonuçlar elde edildikten sonra anten tasarım problemleri üzerinde durulmuştur.

Bu çalışma dahilinde temelde iki tip anten tasarımı problemi seçilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Mikro şerit yama anten tasarımında ilk olarak diğer parametreleri sabit olmak üzere uzunluk ve genişlik parametreleri ( $L$  ve  $W$ ) değiştirilerek istenen rezonans frekansı elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde istenen sonuçların kabul edilebilir hata oranında olduğu ve toplamda 9 deney ile 53 iterasyonda elde edilebildiği görülmüştür. Bu deney ve iterasyon sayısı ile toplamda 477 hesap sayısı ile beklenen sonuçlar elde edilmiştir. Bu problem için diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırma yapıldığında Taguchi yönteminin daha az maliyetli olduğu görülebilir. Hatta kabul edilebilir hata oranı ve optimizasyon hedefi biraz daha yüksek tutulursa iterasyon sayısı düşürülerek toplam hesap sayısında ciddi düşüş ile maliyet düşürülebilmektedir.
- Mikro şerit yama anten tasarımında ikinci olarak tüm tasarım parametreleri ( $L$ ,  $W$  ve  $h$ ) değişken kabul edilerek istenen rezonans frekansını elde etmek için optimize edilmiştir. Bu problemde de yine önceki problemde olduğu gibi sonuçların istenen hata oranı ile elde edilebildiği görülmüştür. Bu problemde sonuçlar her iterasyonda 9 deney olmak üzere 63 iterasyon ile toplamda 567 hesap sayısı ile elde edilmiştir. Bu problemde elde edilen sonuçlar önceki probleme göre daha iyi hata oranı ile elde edilmiştir.
- Mikroşerit anten tasarımında son olarak ok biçimli kompakt mikroşerit anten tasarımı problemi üzerinde durulmuştur. Bu problemde anten tipinden dolayı iki adet rezonans frekansı optimize edilecek parametrelerle bulunmaya çalışılmıştır. Bu uygulamada optimize edilecek parametre sayısı önceki problemlere nazaran



daha fazla olması sebebiyle L18 ortogonal dizisi kullanılarak her iterasyonda daha fazla deney koşturulmuştur. Bu problemde sonuçlar her iterasyonda 18 deney olmak üzere 60 iterasyon ile toplamda 1080 hesap sayısı ile elde edilmiştir. Bu problemde elde edilen sonuçlar önceki problemlere yakın hata oranı ile elde edilmiştir.

- Taguchi yönteminin uygulamasına bir sonraki aşama olarak doğrusal anten dizisi tasarımı ile devam edilmiştir. Doğrusal anten dizisinde diğer problemlerden farklı olarak optimize edilecek parametre sayısının fazla olması ve ayrıca uygunluk fonksiyonu hesabının daha karmaşık olması sebebiyle maliyet fonksiyonu artmıştır. Fakat bu problemde de istenen sonuçlar beklenen hata oranı ile elde edilebilmiştir. Doğrusal anten dizisi tasarımında ilk olarak dizi faktörünün hesaplanmasında sadece genlik katsayıları değiştirilerek istenen örüntü elde edilmeye çalışılmıştır. Bu problemde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Taguchi yönteminin uygulamasına son aşama olarak doğrusal anten dizisinin tasarımı için hem genlik hem de faz katsayıları optimize edilmiştir. Bu tip doğrusal anten dizisinde diğer problemlerden farklı olarak optimize edilecek parametre sayısının fazla olması sebebiyle optimizasyon biraz daha karmaşık hale gelmiş ve diğer problemlere göre elde edilen sonuçlar ile beklenen sonuçlar arasındaki hata oranı daha yüksek çıkmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akdağlı, A., Özdemir, C., Yamaçlı, S., Arcasoy, C.C. 2007. Improved formulas for the Resonant frequencies of dual Frequency arrow shaped Compact microstrip antenna, Microwave and optical technology letters, 50, 62-64.
- Açıkgöz, T. 2010. RSSI ile konum belirlemede anten tipinin mesafe ölçmeye etkisinin araştırılması ve denenmesi bitirme ödevi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 75s., İstanbul.
- Balanis, C.A. 2005. antenna theory analysis and design. John Wiley&Interscience publication, 664s., New Jersey.
- Balanis, C.A. 2008. Modern antenna handbook, Wiley and Sons,1680s., MA, USA
- Baynal, K. 2005. Çoklu yanıtli kalite karakteristiklerinin eş zamanli eniyilenmesinde Taguchi yöntemi ve otomotiv endüstrisinde bir uygulama. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 16; 1-24.
- Carver, K. R., Mink, J.W. 1981. Microstrip antenna technology, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-29, No. 1, 2-24.
- Carver, K. Mink, J. 1979. Proceedings workshop on printed circuit antenna technology, New Mexico State University, 480s., Las Cruces.
- Darwin, J.D., Lal, D.M., Nagarajan,G. 2008. Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18%Cr martensitic stainless steel. Journal of Material Processing Technology, 195, 241-247.
- Deepukumar M., George J., Aanandan C.K., Mohanan P., Nair K.G. 1996. Broadband dual frequency microstrip antenna, Electronics Letters, 32, 1531–1532.
- Deschamps, G.A. 1953. Microstrip microwave antennas, 3. USAR Sempozyumu sunumu.
- Duduhan, T. 2009. Taguchi Deney tasarımı uygulaması tezi, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 62, Türkiye.
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A. 2001. Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, 875s, London.
- George, J., Deepukumar M., Aanandan C.K., Mohanan P., Nair K.G., 1996. New compact microstrip antenna, Electronics Letters, 32, 508–509
- Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H. 2004. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. Journal of Materials Processing Technology, 145, 84–92.
- Gökce, B., Taşgetiren, S. 2009. Kalite için deney tasarımı, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 71-83.
- Gutton, H., Baissinot, G. FR 703113-1995.
- Hedayat, A.S., Sloane, N. J. A., Stufken, J. 1999. Orthogonal Arrays: Theory and Applications. Springer-Verlag, 416s., New York.

- Hamzaçebi, C., Kutay, F. 2003. Taguchi metodu: bir uygulama, *Teknoloji*, 6, 7-17.
- Howell, J. Q. 1995. Microstrip antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 23, 90-93.
- James, J. R. 1981. *Microstrip Antenna Theory and Design*, IEE and Peter Peregrinus, 304s., London and New York.
- James, J. R., Hall, P. S. 1989. *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrinus Ltd, 1350s., London.
- Kopaj, J., Krajnik, P. 2007. Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method. *Journal of Material Processing Technology*, 191, 400-403.
- Kara, M. 1996. The resonant frequency of rectangular microstrip antenna elements with various substrate thicknesses, *Microwave and Optical Technology Letters*, 11, 55-59.
- Kraus, J.D. 1950. *Electrical and Electronic Engineering Series: Antennas*, McGraw-Hill Inc., 553s., New York.
- Kundukulan S. O., Paulson M., Aanandan C. K., Mohanan P. 2002. Analytical equations for compact dual frequency microstrip antenna, *International Journal of RF&Microwave Computer-Aided Engineering*, 12, 477-482.
- Leung Y., Wang, Y. 2001. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5, 41-53.
- Michalewicz, Z. 1992. *Genetic Algorithms + Data Structures=Evaluation Programs*. Springer-Verlag, 407s., Berlin.
- Munson, R.E. US 3713162, 1973.
- Pattnaik S.S., Khuntia B., Panda D.C. Neog D.K., Devi S. 2003. Calculation of optimized parameters of rectangular microstrip patch antenna using genetic algorithm, *Microwave and Optical Technology Letters*, 37, 431-433.
- Rao, C. R. 1946. Hypercubes of strength "D" leading to confounded designs in factorial experiments, *Bulletin of the Calcutta Mathematical Society*, 38, 67-78
- Rao, C. R. 1947. Factorial experiments derivable from combinatorial arrangements of arrays, *Journal of the Royal Statistical Society*, 9, 128-139.
- Ross, P. J. 1996. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Mc-Graw-Hill, 329s., New York.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Y.Wu 2005. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, Wiley, 1662s., New York.
- Weng, W.C., Yang, F., Elsherbeni, A. 2006. Optimization using Taguchi method for electromagnetic applications. *Proceedings of the First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, 1-6.
- Weng, W.C., Yang, F., Elsherbeni, A. 2006. Electromagnetic optimization using Taguchi method: a case study of linear antenna array design. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 6, 2063.

- Weng, W.C., Yang, F., Elsherbeni, A. 2007. Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi's Method. Morgan&Claypool, 97s., Arizona.
- Weng, W.C., Yang, F., Elsherbeni, A. 2007. Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 55, 723-730.
- Yıldırım, A., Yağcı, H.B., Paker, S. 2008. 2.4 GHz'de yüksek kazançlı mikroşerit yama anten tasarım ve gerçekleştirimi, Web Sitesi: [http://www.emo.org.tr/ekler/f9f313a22b388dc\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/f9f313a22b388dc_ek.pdf) Erişim Tarihi: 15.10.2011.
- Yılmaz A.E., Kuzuoglu M. 2007. Calculation of optimized parameters of rectangular microstrip patch antenna using particle swarm optimization, Microwave and Optical Technology Letters, 12, 2905–2907.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı:** İsmail SALKIM

**Doğum Yeri :** Elazığ

**Doğum Tarihi:** 05.02.1982

**Medeni Hali :** Bekar

**Yabancı Dili :** İngilizce

### **Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)**

Lise : Elazığ Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi(1996-1999)

Lisans : Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği(1999-2003)

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl**

MEYER Test ve Belgelendirme Hiz. Ltd. Şti. (2003-2006)

Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş. (2007-2012)

Baker Hughes Incorporated (2012-...)

### **Yayımları (SCI ve diğer)**

1. SALKIM, İ. 2008. Transition to Quality at Medical Device Manufacturers in Turkey and CE Marking,(Medetel-2008 The International Educational and Networking Forum for eHealth, Telemedicine and Health ICT Conference, Luxembourg)
2. SALKIM, İ. 2008. Transition to Quality at Medical Device Manufacturers and CE Marking, (II. International Conference On Quality In Healthcare, Accreditation And Patient Safety-2008,Turkey)
3. SALKIM, İ., YILMAZ, A.E. 2010. Rectangular Microstrip Patch Antenna Design Using Taguchi's Method (IEEE 18th Signal and Communication Applications Conference (SİU)-2010, Turkey),
4. SALKIM, İ., YILMAZ, A.E. 2011. Calculation of Optimized Parameters for the Rectangular Microstrip Antennas by means of Taguchi Method, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review).
5. E-Government Framework (Turkey Information Association Study Group)