

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKRODALGA GÜÇ SENSÖRLERİ KALİBRASYON  
PARAMETRELERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE  
BELİRLENMESİ

FATİH YAMAN

HAZİRAN 2005

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Şerafettin EREL

Yrd. Doç. Dr. Ediz POLAT

Yrd. Doç. Dr. Fikret YALÇINKAYA

## ÖZET

### MİKRODALGA GÜÇ SENSÖRLERİ KALİBRASYON PARAMETRELERİNİN YAPAY SINIR AĞLARI İLE BELİRLENMESİ

YAMAN, Fatih

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Fikret YALÇINKAYA

Haziran 2005, 123 sayfa

Bu tez çalışmasında, mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon parametreleri, son yıllarda zor mühendislik problemlerinin çözümünde etkin ve yaygın bir biçimde kullanılan yapay sinir ağları (YSA) ile yüksek bir doğrulukla belirlenmiştir. YSA ve mikrodalga güç sensörleri ile ilgili temel bilgiler verildikten sonra, güç sensörlerinin kalibrasyon yöntemi açıklanmıştır. Uygulama kısmında, YSA için kullanılacak eğitim ve test verilerini elde etmek amacıyla, laboratuvar ortamında kurulan kalibrasyon düzeneği ile 0.01 GHz'den 18 GHz'e kadar 225 farklı frekansta güç ölçümleri yapılmıştır. Bu 225 ölçümün 220 adedi YSA'yı eğitmek için kullanılırken diğer 5 ölçüm

eğitilen bu ağın doğruluğunu göstermek amacıyla test için kullanılmıştır. Yapılan uygulamalarda sırasıyla, standart g sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CF_{STD}$ ), kalibre edilen güç sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CF_{DUT}$ ), standart g sensöründen elde edilen g değeri ( $P_{STD}$ ) ve kalibre edilen güç sensöründen elde edilen güç değerine ( $P_{DUT}$ ) ait bir giriş bir çıkışa sahip YSA yapıları sunulmuştur. Ayrıca mukayese yapmak amacıyla, frekansa karşılık yukarıda verilen parametre değerlerini belirleyen bir giriş dört ıkışlı YSA yapısı da verilmiştir. YSA modeli olarak ileri beslemeli geri yayılımlı (feed forward back propagation) ağ modeli seçilmiştir. YSA ile elde edilen sonuçların hem eğitim hem de test için kullanılan deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. YSA'nın mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmasının avantajları, uygulamadaki basitliği ve doğruluğudur.

**Anahtar Kelimeler :** Yapay Sinir Ağları, Kalibrasyon, Mikrodalga Güç Sensörü.

## **ABSTRACT**

### DETERMINATION OF MICROWAVE POWER SENSORS CALIBRATION PARAMETERS WITH THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

YAMAN, Fatih

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics, M. Sc. Thesis

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Fikret YALÇINKAYA

June 2005, 123 pages

In this thesis, calibration parameters of the microwave power sensors were determined in a high accuracy by using the artificial neural networks (ANNs) which are effectively and widely used in solving difficult engineering problems in recent years. As first, ANNs and the microwave power sensors were described fundamentally, then, calibration method of the power sensor was explained. In the implementation section, in order to obtain the train and test data for ANNs, 225 measurements from 0.01 GHz to 18 GHz were carried out by using the calibration system organised in laboratory. While using 220 of 225 measurements for training the ANNs, other 5 measurements were used for testing in order to show the accuracy of this trained ANNs. In the applications, ANN models having one input and one output were presented for the calibration factor value of the standart power

sensor ( $CF_{STD}$ ), the calibration factor value of power sensor under calibration ( $CF_{DUT}$ ), power value of the standart power sensor ( $P_{STD}$ ), and the power value of power sensor under calibration ( $P_{DUT}$ ), respectively. Furthermore, for a comparison, the ANN model with one input and four outputs, which computes parameters given above versus frequency was also given. Feed-forward back-propagation network model was chosen as the ANN model. It was shown that the results of the ANNs are agree very well with the experimental results used for both training and testing. The advantages of the ANNs on the determination of microwave power sensors calibration parameters are the ease of implementation and accuracy.

**Key Words:** Artificial Neural Networks, Calibration, Microwave Power Sensor.

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü yardımını esirgemeyen ve büyük destek olan hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Fikret Yalçınkaya'ya, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm sayın Ali Akdağlı'ya, bana destek olan mesai arkadaşlarım Mustafa Akgöl ve Engin Balcı'ya ve tezimi hazırlamam esnasında büyük fedakarlıklarını gördüğüm eşim ve kızıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
GİRİŞ .....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	5
2.1. Yapay Sinir Ağları .....	5
2.1.1. Yapay Sinir Ağları Nedir? .....	5
2.1.2. Yapay ve Biyolojik Sinir Ağları .....	7
2.1.3. Yapay Sinir Ağı Hücresi .....	8
2.1.4. Yapay Sinir Ağlarının Mimarisi .....	10
2.1.5. Aktivasyon Fonksiyonları .....	11
2.1.5.1. Eşik ve Signum Aktivasyon Fonksiyonları ....	11
2.1.5.2. Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu .....	12
2.1.5.3. Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu ....	13
2.1.6. Yapay Sinir Ağı Modelleri .....	14
2.1.7. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme .....	15
2.1.7.1. Danışmanlı Öğrenme .....	16
2.1.7.2. Öğrenme Oranları .....	18
2.1.7.3. Geri Yayılımlı Öğrenme .....	18



2.1.7.4.	Danışmansız Öğrenme .....	21
2.1.7.5.	Karma Öğrenme Kuralı .....	22
2.1.7.6.	Yarışmacı Öğrenme .....	23
2.1.8.	Yapay Sinir Ağlarının Üstünlükleri .....	23
2.1.8.1.	Paralellik .....	23
2.1.8.2.	Gerçekleştirilebilirlik .....	23
2.1.8.3.	Yerel Bilgi İşleme .....	24
2.1.8.4.	Hata Toleransı .....	24
2.1.8.5.	Öğrenebilirlik .....	24
2.1.9.	Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları .....	25
2.2.	Mikrodalga Güç Sensörleri ve Kalibrasyonu .....	27
2.2.1.	Mikrodalga Güç Ölçümlerinin Önemi .....	27
2.2.2.	Güç Ölçümleri .....	28
2.2.3.	Ortalama Güç .....	31
2.2.4.	Güç Ölçüm Metodları .....	31
2.2.5.	Önemli Güç Sensörü Parametreleri .....	32
2.2.6.	Termistör Sensörler ve Enstrümantasyon .....	33
2.2.7.	Termokuplör Sensörler ve Enstrümantasyon .....	35
2.2.8.	Diyot Sensörler ve Enstrümantasyon .....	41
2.2.8.1.	Diyot Dedektör Prensipleri .....	42
2.2.8.2.	Diyotların Güç Algılama İçin Kullanılması ...	48
2.2.9.	Güç Sensörlerinin Kalibrasyonu .....	51
2.2.10.	Ölçüm Belirsizliği .....	52
2.2.11.	RF Devre Tanımları .....	53
2.2.12.	Yansıma Katsayısı .....	56

2.2.13. İşaret Akış Diyagramları .....	59
3. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	65
3.1. Mikrodalga Güç Sensörü Parametrelerinin YSA ile Belirlenmesi .....	65
3.1.1. Bir Giriş Bir Çıkışlı YSA Yapısı ile Elde Edilen Sonuçlar .....	66
3.1.2. Bir Giriş Dört Çıkışlı YSA Yapısı ile Elde Edilen Sonuçlar .....	79
4. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	90
KAYNAKLAR .....	94
EK 1. YSA PROGRAMLARI .....	100

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### ŞEKİL

2.1.	Yapay Sinir Ağı Yapısı .....	6
2.2.	Biyolojik Sinir Hücresi .....	8
2.3.	Temel Yapay Sinir Ağı Hücresi .....	9
2.4.	Eşik (a) Ve Signum (b) Aktivasyon Fonksiyonları .....	12
2.5.	Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu .....	13
2.6.	Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu .....	13
2.7.	İleri Beslemeli YSA Yapısı .....	14
2.8.	Geri Beslemeli YSA Yapısı .....	15
2.9.	Danışmanlı Öğrenme .....	17
2.10.	Geri Yayılım Ağı Örneği .....	19
2.11.	Genel Bir Geri Yayılım Ağ Yapısı .....	20
2.12.	Danışmansız Öğrenme .....	21
2.13.	Gücün Sinüzoidal Periyot İle Değişimi .....	29
2.14.	Metal Çubuğun Bir Ucundan Isıtılması İle Elektrik Alanın Artması ...	36
2.15.	İki Metalli Devre Boyunca Elde Edilen Toplam Termoelektrik Gerilim .....	37
2.16.	Termokuplör Güç Sensörünün Şematik Diyagramı (Agilent 8481A) .....	38
2.17.	Termokuplör Yapısının Görünümü (Agilent 8481A) .....	39
2.18.	Sensör/Güç Ölçer Mimarisi Blok Diyagramı (Agilent 435A/8481A) .....	41

2.19. Düşük Bariyerli Schottky Diyotun Bağlantı Noktası Doğrultma Karakteristiği .....	43
2.20. Diyot Algılama Karakteristiği .....	45
2.21. Bir Kaynak Ve Uyumlandırma Dirençli Bir Diyot Dedektörün Devre Diyagramı .....	46
2.22. PDB Diyotun İki Farklı Sürüş Gerilimi Bölgesi İçin I-V Karakteristiği .....	49
2.23. Güç Sensörü Kalibrasyon Sistemi .....	52
2.24. Herhangi Bir Yüke Bağlanmış Bir Thevenin Eşdeğer Üretici .....	54
2.25. Bir Yük İçin İşaret Akış Diyagramı .....	59
2.26. Bir Mikrodalga Üreteç İçin İşaret Akış Diyagramı .....	60
2.27. Yüke Bağlanmış Bir Üretcin Tam İşaret Akış Diyagramı .....	61
3.1. CFSTD, CFDUT, PSTD ve PDUT parametrelerinin ayrı ayrı frekansa bağlı değişimlerini belirlemek için oluşturulan YSA yapıları .....	66
3.2. CFSTD İçin Eğitimin Epoch Sayısına Bağlı Değişimi .....	73
3.3. CF <sub>STD</sub> Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	73
3.4. CF <sub>STD</sub> Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	74
3.5. CF <sub>DUT</sub> İçin Eğitimin Epoch Sayısına Bağlı Değişimi .....	74
3.6. CF <sub>DUT</sub> Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	75
3.7. CF <sub>DUT</sub> Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	75
3.8. P <sub>STD</sub> İçin Eğitimin Epoch Sayısına Bağlı Değişimi .....	76

3.9.	$P_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	76
3.10.	$P_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	77
3.11.	$P_{DUT}$ İçin Eğitimin Epoch Sayısına Bağlı Değişimi .....	77
3.12.	$P_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	78
3.13.	$P_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	78
3.14.	$CF_{STD}$ , $CF_{DUT}$ , $P_{STD}$ ve $P_{DUT}$ parametrelerinin birlikte frekansa bağlı değişimlerini hesaplamak için oluşturulan YSA yapısı .....	79
3.15.	$CF_{STD}$ , $CF_{DUT}$ , $P_{STD}$ Ve $P_{DUT}$ İçin Eğitimin Epoch Sayısına Bağlı Değişimi .....	85
3.16.	$CF_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	85
3.17.	$CF_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	86
3.18.	$P_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	86
3.19.	$P_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Olarak Ve YSA İle Elde Edilen Eğitim Sonuçları .....	87
3.20.	$CF_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	87
3.21.	$CF_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test Sonuçları .....	88

3.22. $P_{DUT}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test	
Sonuçları .....	88
3.23. $P_{STD}$ Değerleri İçin Deneysel Ve YSA İle Elde Edilen Test	
Sonuçları .....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

- 3.1.  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin deneysel olarak ve YSA ile elde edilen her birinin ayrı ayrı frekansa bağlı değişimleri ..... 67
- 3.2.  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin birlikte deneysel olarak ve YSA ile elde edilen frekansa bağlı değişimleri ..... 79

## 1. GİRİŞ

Özellikle bilgisayar bilimleri alanında yaşanmakta olan baş döndürücü gelişme ister istemez bilgisayar tabanlı sistemlerle çalışan kişi ve kuruluşları da etkilemekte ve gelişime ayak uydurmayı zorunlu kılmaktadır. Haberleşme ve iletişim alanındaki gelişmeler, ülkeler arası kurulan iletişim ağları (İnternet) dünyayı büyük bir iletişim ağı haline getirmiştir. Dünyanın herhangi bir yerinde üretilen bilginin sayısal hale getirilerek bilgisayar ortamında saklanması, o bilgiye dünyanın herhangi bir yerinden çok kısa sürede erişimi olanaklı kılmaktadır. “Bilgi Çağı” ve “Bilgi Toplumu” gibi terimlerin sıklıkla kullanıldığı günümüzde bilginin önemi daha açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bilginin öneminin arttığı oranda o bilgiye ulaşabilmeyi sağlayan sistemlerin de önemi artmaktadır.

Bilgisayarların insan zekasının henüz çok uzağında olduğu günümüzde, yapay zeka (YZ) kavramından sıklıkla bahsedilmektedir. YZ, zeka ve düşünme gerektiren işlemlerin bilgisayarlar tarafından yapılmasını sağlayacak araştırmaların yapılması ve yeni yöntemlerin geliştirilmesi konusunda çalışılan bilim dalıdır. Başka bir ifade ile YZ, düşünme, anlama, kavrama, yorumlama ve öğrenme yapılarının programlama ile taklit edilerek problemlerin çözümüne uygulanmasıdır<sup>(1)</sup>. Bütün bilgisayarlar, işlemci hızı ve sahip olduğu hafıza elemanı ve hızı ile değerlendirilirken, YZ, hesaplama gücü, kullanılan yol ve yöntemler ile hafıza olmak üzere üç ana başlık altında karşılaştırılmaktadır. İnsan beynindeki nöronların kimyasal olarak birbirine



bağlanma potansiyeli, hesaplama gücü olarak ifade edilir. YZ donanımı işlem kapasitelerine, başka bir deyişle işlemci hızına karşılık geldiğinden hesaplama gücünü artırmaktadır. Karşılaşılan problemlerde algılama ve çözümlene gibi eylemler için kullanılan yol ve yöntemler, insan psikolojisinde çözümlene metodolojisine ve prensiplerine karşılık gelmektedir. Öğrenilen bilgiyi tutan hafızanın kapasitesi ve güvenilirliği insan belleğiyle ifade edilirken, bu kavram YZ sisteminde bilgisayar hafızasına karşılık gelmektedir.

Bilgisayarların becerilerini artırabilmenin yolu, düşünme gerektiren zor problemleri çözümlenebilecek, algılayabilecek, yorumlayabilecek, karar verebilecek ve farklı çözüm yolları önerebilecek yaklaşımların geliştirilmesinden geçmektedir. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler, YZ konusunda yapılan çalışmaları ve konuya olan ilgiyi artırmıştır. Bu sayede, bilimsel çalışmalar kolaylaşmış, özellikle beynin daha iyi anlaşılması için nöropsikolojik, psikolojik ve buna benzer davranışların üç boyutlu olarak algılanabilmesini sağlamıştır. Tomografik metotlarla, beyin dokusundaki ani işlevler artırılabilen ve elde edilen sonuçlar beynin çalışma prensibinin daha iyi anlaşılabilmesine büyük katkılar sağlamaktadır. Bu katkıların artması, YZ tekniklerinin gelişmesine katkıda bulunmaktadır. Yapay zeka tekniklerine örnek olarak uzman sistemler (expert systems), bulanık mantık (fuzzy logic), sezgisel optimizasyon teknikleri (heuristic optimization techniques) ve yapay sinir ağları (artificial neural networks) verilebilir<sup>(1)</sup>.

Esin kaynağını, biyolojik sinir ağlarının işleyişinden alan yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin işleyişini taklit ederler<sup>(1)</sup>. YSA, bir sisteme tek veya çoklu parametrelere bağlı olarak tanımlanan giriş verileri ile sistemin

yine tek veya çoklu parametrelere bağılı olarak tanımlanabilen çıkışları arasında ilişki kurabilme yeteneğine sahiptir. Bu, YSA'nın öğrenme kabiliyetine haiz olduğunu gösterir ki öğrenme yeteneği, belki de araştırmacıların dikkatini YSA üzerine çeken en önemli özelliklerden birisidir. Çünkü herhangi bir olay hakkında girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi (doğrusal olsun veya olmasın) elde bulunan mevcut örneklerden genellemeler yaparak ortaya koymak ve bu genelleme ile yeni oluşan veya ortaya çıkan daha önce hiç görülmemiş olayları, önceki örneklerden çağrışım yaparak ilgili olayla ilgili çözümler üretebilmek oldukça önemlidir. Bu özellik, YSA'daki zeki davranışın da temelini oluşturur. Herhangi bir uygulama için en uygun olan YSA yapısını ve öğrenme algoritmasını seçmek gerekir. Çeşitli YSA yapıları ve öğrenme algoritmalarına ilişkin bir çok çalışma literatürde mevcuttur<sup>(1-35)</sup>.

Birçok elverişli özelliklere sahip olmalarından dolayı YSA, bugün, mühendislik alanında; imalat sanayinde, askeri proje uygulamalarında, endüstriyel ürün tasarımında, bilgi yönetiminde, tıbbi görüntü işlemede<sup>(7)</sup>, tıbbi tanı koymada, biomedikal uygulamalarda, tarımsal alanda, hayvancılık alanında; hayvan davranış modellerinin oluşturulmasında, uzay ve havacılık sanayinde<sup>(8,11)</sup>, yüzey modellemede<sup>(9)</sup> kullanılmıştır. YSA'nın bir çok doğrusal olmayan hesabı ihtiva eden elektromanyetik ve mikrodalga sistemlerine başarıyla uygulandığını gösteren çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur<sup>(10,12-13)</sup>.

Güç kavramının önemli olduğu mikrodalga sistemlerinde, güç ölçümünde kullanılan güç sensörlerinin ve dolayısıyla bu sensörlerin kalibrasyon işlemlerinin de önemi göz ardı edilemez<sup>(14)</sup>. Kalibrasyonu

yapılmış bir başka güç sensörü referans alınarak yapılan mikrodalga güç sensörü kalibrasyonunda ise, doğru ve belirli bir dereceye kadar hassas çözümlerin elde edilmesi esastır. Belirli bir frekans sahasında yapılan kalibrasyon işleminde, yüksek bir doğruluk için, bu frekans sahasında çok fazla sayıda örnek alınmalı, bu ise gerek iş gücü gerekse işlem bakımından oldukça uzun bir süreci gerektirmektedir. Bunun yerine, daha az sayıda örnek kullanılarak fakat doğru bir modelleme ile sorunun üstesinden gelinebilir. Yukarıda anlatılan cazip özelliklerinden dolayı, sunulan yüksek lisans tez çalışmasında, mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon parametreleri, tanımlanmış tüm frekans bandı için YSA kullanılarak yüksek bir doğrulukla belirlenmiştir.

Bölüm 2’de YSA’nın kısa bir tarihçesi, biyolojik beyin ile karşılaştırılması, uygulama alanları, YSA mimarileri ve YSA’da eğitime anlatılmış ve mikrodalga frekansındaki sinyallerin güç ölçümlerinde kullanılan güç sensörlerinin yapıları ve kalibrasyonu incelenmiştir.

Bölüm 3’de, mikrodalga güç sensörlerinin deneysel olarak elde edilen kalibrasyon parametreleri ile, söz konusu parametrelerin YSA ile belirlenmesine ait uygulama örnekleri verilmiştir.

Bölüm 4’de tez çalışmasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Yapay Sinir Ağları

#### 2.1.1. Yapay Sinir Ağları Nedir?

Yapay sinir ağları (YSA), beynin bazı fonksiyonlarını ve özellikle öğrenme yöntemlerini benzetim yolu ile gerçekleştirmek için tasarlanmıştır ve geleneksel yöntem ve bilgisayarların yetersiz kaldığı sınıflandırma, kümeleme, veri işleme gibi alanlarda başarılı sonuçlar vermektedir<sup>(1)</sup>. YSA'nın özellikle tahmin problemlerinde kullanılabilmesi için yeterli sayıda bilgi ile eğitilmesi gerekir. Ağların eğitimi için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir.

YSA'nın temel yapısı, beyne sıradan bir bilgisayarinkinden daha çok benzemektedir. Yine de birimleri gerçek nöronlar kadar karmaşık değildir ve ağların çoğunun yapısı, beyin kabuğundaki bağlantılarla karşılaştırıldığında oldukça basit kalmaktadır. Çünkü insan beyninde yaklaşık  $10^{12}$  adet nöron vardır ve aradaki bağlantıları da göz önüne alırsak bunun günümüz teknolojisi ile sağlanması mümkün değildir.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi YSA, giriş ve çıkışları olan kara kutular gibi düşünülebilir. Bu kara kutunun işlevi basitçe, matematiksel bir fonksiyonu temsil etmek şeklinde düşünülebilir. Ancak bu fonksiyonun tam olarak bir matematiksel karşılığının olması gerekmemektedir. Yapay sinir ağlarındaki her bir işlem birimi, basit bir anahtar görevi yapar ve şiddetine göre, gelen sinyalleri söndürür ya da iletir. Böylece sistem içindeki her birim belirli bir yüke sahip olur.



Her birim, sinyalin gücüne göre açık ya da kapalı duruma geçerek basit bir tetikleyici görevi üstlenir. Yükler, sistem içinde bir bütün teşkil ederek, karakterler arasında ilgi kurmayı sağlar. YSA araştırmalarının odağındaki soru, yüklerin sinyalleri nasıl değiştirmesi gerektiğidir. Bu noktada herhangi bir formdaki bilgi girişinin, ne tür bir çıkışa çevrileceği, değişik modellerde farklılık göstermektedir. Diğer önemli bir farklılık ise, verilerin sistemde depolanma şeklidir. Nöral bir tasarımda, bilgisayarda saklı olan bilgiyi, tüm sisteme yayılmış küçük yük birimlerinin birleşerek oluşturduğu bir bütün evre (epoch) temsil etmektedir. Ortama yeni bir bilgi aktarıldığında ise, yerel büyük bir değişiklik yerine tüm sistemde küçük bir değişiklik yapılmaktadır.

Günümüzde gelişmiş sinir ağı uygulamaları, ya geleneksel bilgisayarlar üzerinde yazılım benzetimleri kullanılarak veya özel donanım içeren bilgisayarlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

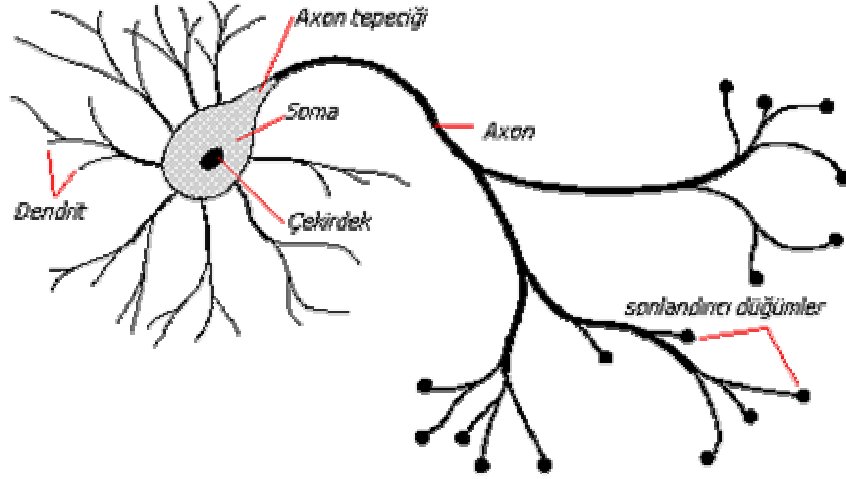
### 2.1.2. Yapay ve Biyolojik Sinir Ağları

Canlı hücrelerin en önemli özelliği, kimyevi potansiyel enerjini kendi organize yapılarını korumak için gerekli olan diğer enerji şekillerine çevirebilmeleridir. Her hücre, entropisinin artmasına yani dağılmasına mani olmak için enerji sarf etmek zorundadır<sup>(1,2)</sup>. Çevredeki değişiklikleri, bunların kendi üzerine tesir derecesini, yani düzenini, dengesini ne dereceye kadar bozabileceğini bilmesi, gerekli ayarlamaları yapması, bu ayarlamaların da ne dereceye kadar hedefe uygun olduğunu ölçmesi ve gereken düzeltmelerde bulunması, kısaca çevreye uyumunu sağlaması, canlılığını devam ettirebilmesi için bir “haber alma- karar verme- icra” sistemine ihtiyaç vardır.

YSA, insan beyninin çalışma mekanizması taklit edilerek geliştirilen ve biyolojik olarak insan beyninin yaptığı temel işlemleri belirli bir yazılımla gerçekleştirmeyi amaçlayan bir mantıksal programlama tekniğidir. Bilgisayar ortamında, beynin yaptığı işlemleri yapabilen, karar veren, sonuç çıkaran, yetersiz veri durumunda var olan mevcut bilgiden yola çıkarak sonuca ulaşan, sürekli veri girişini kabul eden, öğrenen, hatırlayan bir algoritma kısaca “Yapay Sinir Ağları” olarak adlandırılır. Kohonen; yapay nöral ağların adaptif elemanların yoğun bir şekilde paralel olarak bağlanmasıyla oluşan ve gerçek dünyadaki cisimlerle aynen biyolojik sinir sisteminin yaptığı gibi ilişkide bulunabilmeleri için hiyerarşik organizasyonları düzenlenmiş yapılar olduğuna dikkat çekmiştir<sup>(15)</sup>.

YSA'daki işlem elemanları, biyolojik olarak insan beynindeki nöronlara karşılık gelmektedir. Dendrit olarak adlandırılan yapı, diğer hücrelerden bilgiyi alan nöron girişleri olarak görev yapar. Diğer hücrelere bilgiyi transfer eden

eleman ise aksonlardır. Dolayısıyla aksonlar, nöron çıkışları olarak görev yaparlar. Akson ile dendrit arasındaki bağlantı ise sinapslar tarafından gerçekleştirilir. Bir sinir hücresinin biyolojik bakımdan incelenmesi Şekil 2.2'de verilmiştir.



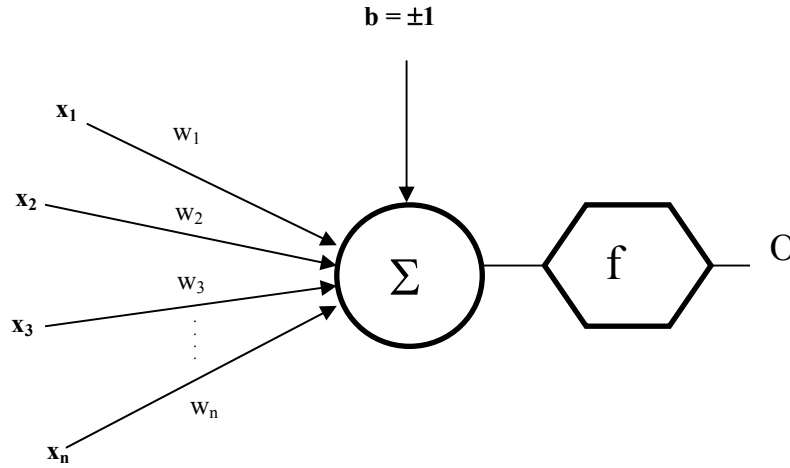
**Şekil 2.2.** Biyolojik sinir hücresi

YSA'nın işleyişi de buna benzer olarak gerçekleşmektedir. 1940 yılında McCulloch ve Pitts<sup>(3)</sup> nöronun, mantık sistemlerinde basit eş değer yapısıyla modellenebileceğini ortaya atmışlardır. Bu modele göre, bir nöron N tane ağırlıklandırılmış girişi toplamakta, bir eşik değeri bu toplamdan çıkartıp sonucu lineer olmayan bir fonksiyondan geçirmektedir.

### 2.1.3. Yapay Sinir Ağı Hücresi

Temel bir yapay sinir ağı hücresi biyolojik sinir hücresine göre çok daha basit bir yapıya sahiptir. En temel nöron modeli Şekil 2.3'de

görülmektedir. Yapay sinir ağı hücresinde temel olarak dış ortamdan ya da diğer nöronlardan alınan veriler yani girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar bulunmaktadır. Dış ortamdan alınan veri ağırlıklar aracılığıyla nörona bağlanır ve bu ağırlıklar ilgili girişin etkisini belirler. Toplam fonksiyonu ise net girişi hesaplar. Net giriş; girişler ile bu girişlerle ilgili ağırlıkların çarpımının bir sonucudur. Aktivasyon fonksiyonu, işlem süresince net çıkışını hesaplar ve bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Aktivasyon fonksiyonu, genelde doğrusal olmayan bir fonksiyondur.



**Şekil 2.3.** Temel yapay sinir ağı hücresi

O, çıkış, b, bias (aktivasyon fonksiyonunun eşik değeri), n giriş sayısı, ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), girişler, ve ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ) ağırlıklar olmak üzere nöronun matematiksel modeli Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$O = f(W.X + b) \quad (2.1)$$

Burada, W ağırlıklar matrisi, X ise girişler matrisini temsil etmektedir.

Denklem 2.2a ve Denklem 2.2.b ile farklı bir şekilde;



$$\text{net} = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \quad (2.2a)$$

$$O = f(\text{net}) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (2.2b)$$

şeklinde bir nöronun çıkışı matematiksel olarak elde edilir. Denklem (2.1) ve (2.2b)'de verilen “  $f$  ” aktivasyon fonksiyonudur.<sup>(2)</sup>

#### 2.1.4. Yapay Sinir Ağlarının Mimarisi

Yapay Sinir Ağlarının çalışma hızlarını etkileyen en önemli etken, yapay sinir ağlarının iç mimarisine ait olan katmanların (tabaka ya da layer) ve düğümlerin (node) sayısıdır. Her katmanda 1 ya da daha fazla düğüm bulunur ki genelde 1'den fazladır. Her katmandaki düğüm sayısı ve katman sayısı sonuç olarak toplam düğüm sayısını etkiler. Toplam düğüm sayısı ve düğümler arasındaki bağlantılar ne kadar çok ise yapay sinir ağlarının çalışma hızı buna paralel olarak ama üstel bir şekilde azalır.

Yapay sinir ağlarındaki düğümlerin bir çıkışı ve genelde birden fazla girişleri vardır. Bu çıkış ve girişler diğer düğümlere, yapay sinir ağlarının çıkışına veya yapay sinir ağlarının girişine bağlanabilir. Düğümlerinin tamamı yapay sinir ağlarının girişini oluşturan ve bu düğümlerin kendi girişi olmayan katman giriş katmanı, düğümlerinin tamamı çıkışı oluşturan ve bu düğümlerin kendi çıkışı olmayan katman çıkış katmanı olarak, diğer katmanlar ise ara katmanlar ya da dışardan görünmedikleri için gizli katmanlar olarak adlandırılır.

YSA düğümünün görevi, girişindeki sayıları kendi ağırlık değerleri ile çarpıp, sonra çarpımları toplayıp, toplamı bir aktivasyon fonksiyonundan (genelde sigmoid veya tanjant hiperbolik) geçirdikten sonra çıkışa vermektir. Ancak giriş ve çıkış katmanındaki nöronlar bu kuraldan hariçtir. Giriş katmanındaki nöronlar sadece içerdikleri değeri çıkışa aktarırlar. Çıkış katmanındaki nöronlar ise sadece kendi girişlerindeki verilerin uygun ağırlıklarla çarpılmış hallerini toplayıp saklarlar. Bu işleme yayılım (propagation) denilir. Burada aktivasyon fonksiyonunun görevi, hem çıkışları belirli değerler arasında tutmak hem de sürekli bir fonksiyon oluşturmaktır. Fonksiyonun sürekli olması türevinin alınması için, türevinin alınması ise eğitime aşamasındaki algoritmalar için gereklidir. Fonksiyonun türev karakteristikleri, eğitime aşamasının hızını ve başarısını da etkiler. Bu nedenle yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları sigmoid ve hiperbolik tanjant fonksiyonlarıdır. Aktivasyon fonksiyonları ve çeşitleri hakkında bilgiler aşağıdaki kısımda verilmiştir.

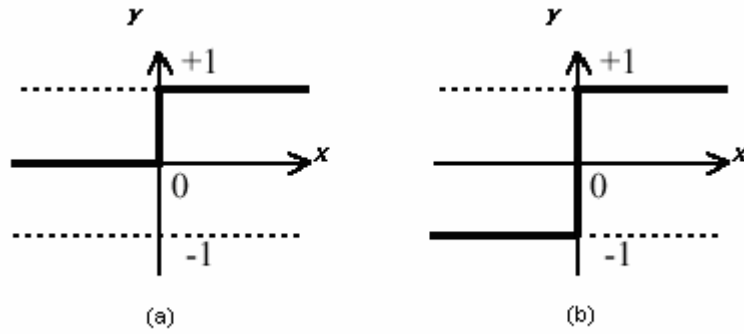
### **2.1.5. Aktivasyon Fonksiyonları**

YSA'da hangi katman için hangi aktivasyon fonksiyonunun kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak seçilmektedir. Bununla beraber, aşağıda verilen aktivasyon fonksiyonları en genel aktivasyon fonksiyonlarıdır.

#### **2.1.5.1. Eşik ve Signum Aktivasyon Fonksiyonları**

Eşik aktivasyon fonksiyonu net giriş değeri sıfırdan küçükse net

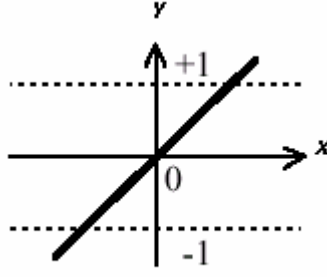
çıkışında sıfır, sıfırdan daha büyük bir değer ise net çıkışında +1 değeri üretir. Şekil 2.4.a'da eşik aktivasyon fonksiyonunun grafiği görülmektedir. Eşik aktivasyon fonksiyonuna benzeyen ve -1 ile +1 arasında değişen diğer bir aktivasyon fonksiyonu ise Şekil 2.4.b'de verilen Signum (işaret) aktivasyon fonksiyonudur. Signum aktivasyon fonksiyonu, net giriş değeri sıfırdan büyükse +1, sıfırdan küçükse -1, sıfıra eşitse sıfır değerini verir.



**Şekil 2.4.** Eşik (a) ve signum (b) aktivasyon fonksiyonları

### 2.1.5.2. Doğrusal Aktivasyon Fonksiyonu

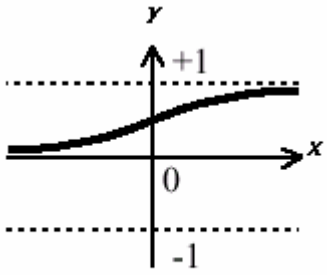
Şekil 2.5'de giriş-çıkış grafiği verilen doğrusal aktivasyon fonksiyonunda çıkış girişe eşittir. Sürekli çıkışlar gerektiği zaman çıkış katmanındaki aktivasyon fonksiyonunun doğrusal aktivasyon fonksiyonu olabilmektedir.



**Şekil 2.5.** Doğrusal aktivasyon fonksiyonu

### 2.1.5.3. Logaritma Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

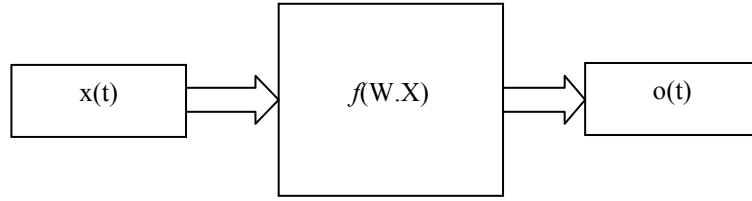
Lojistik fonksiyon olarak da adlandırılan ve grafiği Şekil 2.6'da verilen logaritma sigmoid aktivasyon fonksiyonu doğrusal olmamasından dolayı türevi alınabilmektedir. Lojistik fonksiyona benzeyen ancak -1 ile +1 arasında değişen bir aktivasyon fonksiyonu olan hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu da doğrusal olmayan türevi alınabilir bir fonksiyondur. Bu yüzden bu iki fonksiyon, daha sonraki bölümlerde anlatılacak olan geri yayımlı ağlarda sıklıkla tercih edilen aktivasyon fonksiyonlarıdır.



**Şekil 2.6.** Logaritma sigmoid aktivasyon fonksiyonu

### 2.1.6. Yapay Sinir Ağı Modelleri

En basit ve en genel YSA, tek yönlü sinyal akışını kullanırlar. YSA modelleri temel olarak iki grupta toplanmaktadır. İleri beslemeli YSA ve geri beslemeli YSA. İleri beslemeli YSA'da gecikmeler yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri, eğiticiden alınan istenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilir ve ağ ağırlıkları güncellenir. Şekil 2.7'de ileri beslemeli bir YSA yapısına ait blok gösterim verilmiştir.

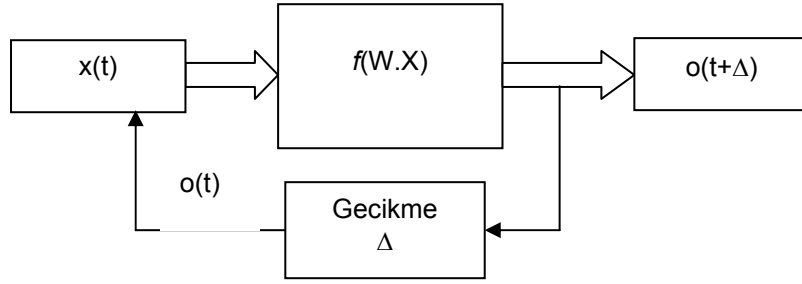


**Şekil 2.7.** İleri beslemeli YSA yapısı

Geri beslemeli YSA'da ise tıpkı kontrol uygulamalarında olduğu gibi gecikmeler söz konusudur. Geri beslemeli nöral ağ, çıkışlar girişlere bağlanarak ileri beslemeli bir ağdan elde edilir.  $\Delta$  sabiti gecikme süresi olmak üzere ağın  $t$  anındaki çıkışı  $o(t)$  ise,  $t+\Delta$  anındaki çıkışı:

$$o(t + \Delta) = f[W.o(t)] \quad (2.3)$$

ile ifade edilir. Dikkat edilmesi gereken nokta başlangıç anında  $x(t)$ 'ye ihtiyaç duyulmasıdır. Şekil 2.8'de verilen blok diyagram, geri beslemeli bir YSA'nın akış yönünü göstermektedir<sup>(1,2,4,5)</sup>.



**Şekil 2.8.** Geri beslemeli YSA yapısı

### 2.1.7. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

McCulluch ve Pitts'in<sup>(3)</sup> sinir ağının temel problemi olan öğrenmenin nasıl olacağına, Donald Hebb 1949 yılında yayınladığı<sup>(6)</sup> "The Organization of Behavior" isimli kitabında çözüm getirmiştir. Bu kitapta sinapsların şartlara uyum sağlama yeteneği incelenmiş ve Hebb kuralı adı verilen öğrenme kuralı anlatılmıştır. Bu kuralda temel fikir, iki sinir bağlantısı arasındaki kuvvet (ağırlığın değeri), sinirlerin aynı zamanda etkinleştirilmesine bağlıdır. Hebb, sinir faaliyetlerini örnek alarak bunların hafızadaki basit bir yerde yerleşebileceğini varsaymış ve bu kurama göre sinirlerin birbirlerini ortaklaşa uyardıklarını ve bu uyarma neticesinde aralarındaki sinaptik bağlantı kuvvetinin (ağırlıkların) kendi etkinlikleri çarpımı oranında artacağını ortaya koymuştur<sup>(2)</sup>.

YSA'da bilgi, ağdaki bağlantıların ağırlıklarında depolanır. Bir ağda öğrenme kısaca, istenen bir işlevi yerine getirecek şekilde ağırlıkların ayarlanması sürecidir. YSA'da öğrenme, sinirler arasındaki ağırlıkların değiştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Buna göre sinirler arası bağlantılar üzerindeki ağırlıkları belirli bir yöntem (öğrenme kuralları) ile dinamik olarak değiştirilebilen ağlar eğitilebilir.

Eğitilebilen yani öğrenebilen ağlar, yeni Őekilleri tanıyabilir (rnt tanıma) veya verilen bir girişin hangi sınıfa ait olduğuna karar verebilir (sınıflandırma). YSA'da öğrenme, düğümler arasındaki ağırlıkların, düğümlerdeki aktivasyon ya da transfer fonksiyonlarının ayarlanmasıyla yapılmaktadır. YSA'da öğrenme yöntemleri, danışmanlı ve danışmansız olarak ikiye ayrılır.

### **2.1.7.1. Danışmanlı ğrenme**

Danışmanlı ğrenmede, kullanılan YSA'daki gerçek çıkış, istenilen çıkıŐla kıyaslanır. İlk baŐta rasgele seçilen ağırlıklar, ağ tarafından öyle ayarlanır ki, bir sonraki döngüde (epoch) gerçek çıkış (ağ tarafından üretilen çıkış) ile istenilen çıkış arasındaki fark daha azalsın. ğrenme yöntemi, bütün işleme elemanlarının anlık hatalarını en aza indirmeye çalışır. Bu hata azaltma işlemi, kabul edilebilir doğruluğa ulaŐana kadar ağırlıklar devamlı olarak güncellenir.

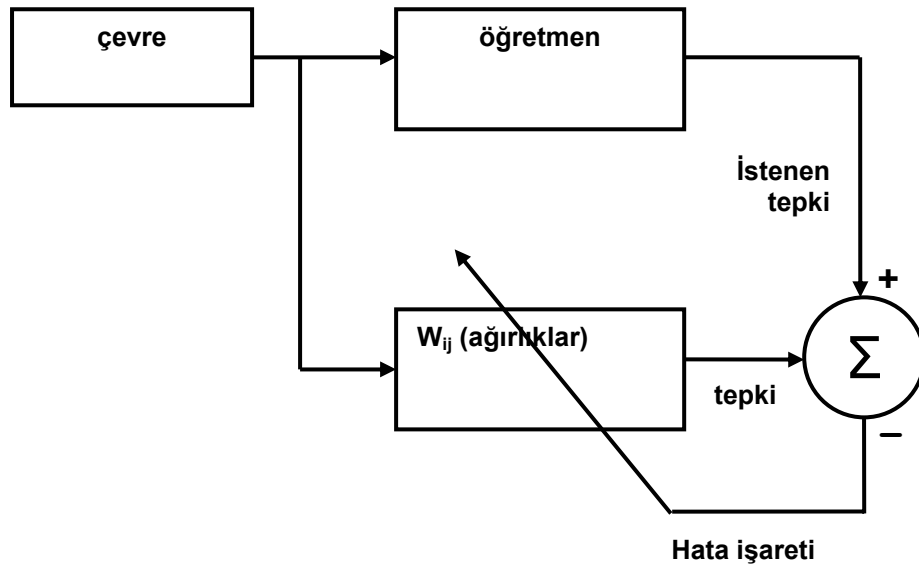
Danışmanlı ğrenmede YSA, kullanılmadan önce eğitilmelidir. Eğitme iŐlemine, sinir ağına giriş ve çıkış bilgileri sunularak baŐlanır. Bu bilgiler genellikle eğitme kümesi olarak tanımlanır. Yani, her bir giriş kümesi için uygun çıkış kümesi ağa sağlanmalıdır.

Eğitim işleminde ne kadar çok veri kullanılırsa ağ o kadar hassas eğitilir, ancak bu eğitme safhasının uzun sürmesine neden olacaktır. Sinir ağı, belirli bir sıralamadaki girişler için istenen istatistiksel doğruluğu elde ettiği zaman eğitme işlemi tamamlanmış kabul edilir ve eğitme işlemi bitirilir. Eğitim aŐaması tamamlandıktan sonra ağ kullanılmaya baŐlandıđında, bulunan ağırlıkların değeri sabit olarak alınır ve bir daha deđiŐtirilmezler. Bazı ağ yapılarında ağ

çalışırken çok düşük oranda eğitmeye izin verilir. Bu işlem ağların değişken koşullara uyum sağlamasına yardımcı olur <sup>(2)</sup>.

Eğer sistemin önemli olan özellikleri ve ilişkileri öğrenmesi gerekiyorsa, o zaman eğitime kümesinin, bütün ihtiyaç duyulan bilgileri içermesi gerekir. Eğer ağ sadece belirli bir aralıktaki örnekler ile eğitilirse, bu aralıkta verilen girişler için oldukça iyi çözümler üretse de bu aralık dışındaki farklı bir giriş ya da giriş seti için yeterli çözümler vermez. Yeni şeyler öğrenme safhasında eski olayları unutabilir. Sonuç olarak, sistem gerekli bilgilerle öğrenmek zorundadır.

Giriş ve çıkış bilgilerinin nasıl sunulacağı veya nasıl kodlanacağı, bir ağı bir şekilde yönlendirmek için önemli bir unsurdur. YSA sadece sayısal giriş bilgileri ile çalışırlar. Bu yüzden ham bilgiler genellikle ölçeklendirilmelidir (normalizasyon). Danışmanlı öğrenmenin işleyişini gösteren blok diyagram Şekil 2.9'da verilmiştir.



**Şekil 2.9.** Danışmanlı öğrenme



### 2.1.7.2. Öğrenme Oranları

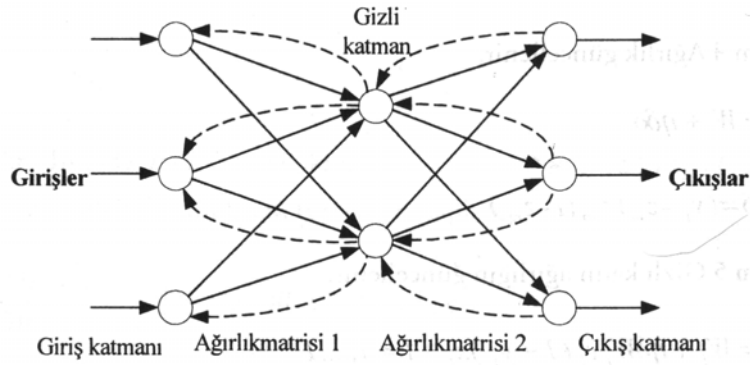
YSA'daki öğrenme oranı denetlenebilir birkaç etkene bağlıdır. Düşük bir öğrenme oranı, yeterli derecede eğitilmiş bir sistem üretmek için daha fazla zaman harcanacağı anlamına gelmektedir. Ancak, daha yüksek öğrenme oranında bir ağı, daha yavaş öğrenen bir ağa göre gerçek ayrımlar yapamayabilir.

Bir çok öğrenme işleminde, öğrenme oranı veya öğrenme sabiti kullanılır. Öğrenme oranı genellikle pozitif ve sıfır ile bir arasında bir değer olmaktadır. Eğer birden büyük öğrenme oranı seçilirse ağırlıkları uyarlayacak öğrenme algoritmasını ayarlamak kolay olur, ancak ağda salınımlar ortaya çıkar. Küçük öğrenme oranı, o anki hataları hızlı bir şekilde düzeltememesine rağmen en iyi sonuca ulaşma şansını yükseltmektedir <sup>(2)</sup>.

### 2.1.7.3. Geri Yayılımlı Öğrenme

Geri yayılım (back propagation) ağı, Geoffrey Hinton ve James McClelland tarafından geliştirilmiştir<sup>(18)</sup>. Geri yayılımlı öğrenen ağlar hiyerarşik yapıdadır. Giriş, çıkış ve en az bir gizli katman olmak üzere üç katmandan oluşurlar. Gizli katman ve gizli katmandaki düğüm sayısı değiştirilebilir. Düğüm sayısının artması ağın hatırlama yeteneğini artırmakla birlikte öğrenme işleminin süresini uzatmaktadır. Düğüm sayısının azaltılması eğitim süresini kısaltmakta fakat hatırlama yeteneğini de azaltmaktadır. Giriş katmanındaki her bir düğüm gizli

katmandaki her düğüme, gizli katman birden fazla ise bu katmandaki her bir düğüm kendisinden sonra gelen katmandaki her düğüme ve gizli katman çıkışındaki her düğüm çıkış katmanındaki her düğüme bağlıdır. Bir katmandaki hiçbir düğüm kendi katmanındaki diğer bir düğüme bağlı değildir. Her katmanın çıkış değerleri bir sonraki katmanın giriş değeridir. Bu şekilde giriş değerlerinin ağırlık girişinden çıkışına doğru ilerlemesine ileri besleme denilir. Şekil 2.10'da bir geri yayılım ağı örneği görülmektedir.

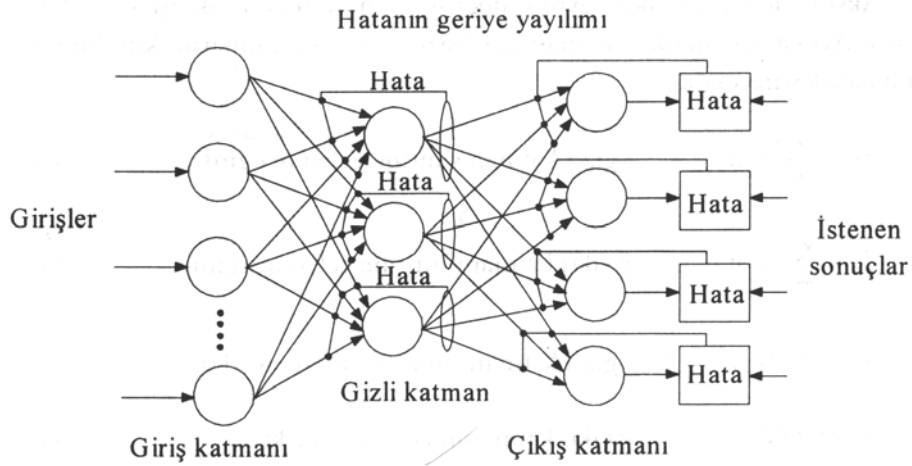


**Şekil 2.10.** Geri yayılım ağı örneği

Geril yayılım ağında hatalar, ileri besleme aktivasyon fonksiyonunun türevi tarafından ileri besleme mekanizması içinde kullanılan aynı bağlantılar aracılığıyla, geriye doğru yayılmaktadır. Öğrenme işlemi, bu ağıda basit çift yönlü hafıza birleştirmeye dayanmaktadır.

Geril yayılım öğrenme yönteminde sistem hatasını veya maliyet işlevini azaltma esasına dayanan bir eniyileme (optimizasyon) işlemi yapılır. Bu yöntemde ağırlık ayarlamaları yapıldığı için "geril yayılım" ismi kullanılmıştır.

Öğrenme fazında, giriş örnekleri ağı belirli bir sırada sunulur. Her bir çalışma örneği çıktı örneği hesaplanana kadar katman katman ileri yayılır. Hesaplanan çıktı, daha sonra olması beklenenle karşılaştırılıp aradaki fark "hata" olarak bulunur. Hatalar, katman katman sinaptik ayarlamaların yapıldığı geri besleme bağlantılarında "girdiler" olarak kullanılır. Şekil 2.11 geri yayılım çalışması için değiştirilmiş bir çok katmanlı ileri beslemeli ağı göstermektedir. Geriye doğru olan bağlantılar sadece "öğrenme fazı" için kullanılırken, ileri doğru olan bağlantılar hem öğrenme amacıyla hem de işlemsel fazlar için kullanılır.



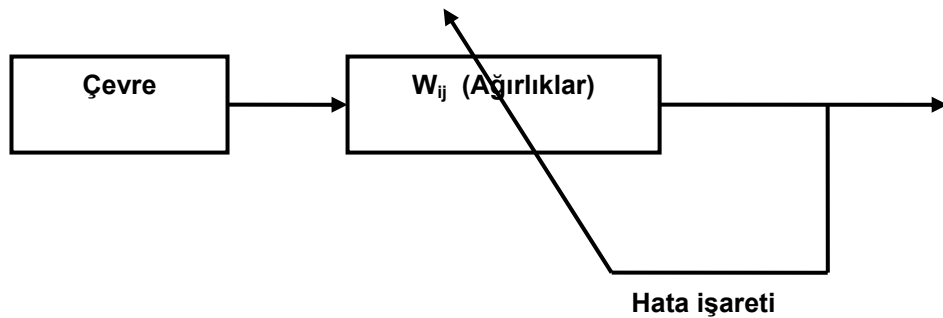
**Şekil 2.11.** Genel bir geri yayılım ağı yapısı

Geri yayılım öğrenme kullanıldığında, sonraki katmanların hataları kullanılarak gizli katmanın ağırlıkları ayarlanır. Böylece çıkış katmanında hesaplanan hatalarla son gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıklar ayarlanır. Aynı biçimde, bu işlemler ilk gizli katmana kadar tekrarlanır. Bu yolla hatalar katman katman ilgili katmanın ağırlık düzeltmeleri yapılarak

geriye doğru yayılır. Tamamlanan çalışma süresi içinde “toplam hata” en aza indirilinceye kadar bu işlemler tekrarlanır.

#### 2.1.7.4. Danışmansız Öğrenme

Danışmansız öğrenmede sistemin doğru çıkış hakkında bilgisi yoktur ve girişlere göre kendi kendisini örnekler. Danışmansız olarak eğitilebilen ağlar istenen ya da hedef çıkış olmadan giriş bilgilerinin özelliklerine göre ağırlık değerlerini ayarlar. Danışmansız öğrenmeye, Hebbian öğrenme, Grossberg öğrenme<sup>(19)</sup>, Kohonen'in öz örgütlemeli harita ağı örnek olarak verilebilir. Kohonen tarafından geliştirilen danışmansız öğrenme yönteminin kullanıldığı öz örgütlemeli harita ağ da biyolojik sistemlerdeki öğrenmeden esinlenilmiştir. Bu yöntemde sinirler öğrenmek için elverişli durum ya da ölçülerini güncellemek için yarışır. En büyük çıkış ile işlenen sinir, kazananı belirler ve komşularına bağlantı boyutlarını güncellemeleri için izin verir. Şekil 2.12'de danışmansız öğrenme ana hatlarıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Danışmansız öğrenme

Danışmansız öğrenmede ağ, istenen dış verilerle değil girilen bilgilerle çalışır. Bu tür öğrenmede gizli sınırlar dışardan yardım almaksızın kendilerini örgütlemek için bir yol bulmalıdırlar. Bu yaklaşımda, verilen giriş vektörleri için önceden bilinebilen performansını ölçebilecek ağ için hiçbir çıkış örneği sağlanmaz, yani ağ, yaparak öğrenmektedir.

Danışmansız öğrenme için belli başlı örneklerden birisi Kohonen ağıdır. Kohonen ağında, giriş katmanına ek olarak, birbiriyle topolojik olarak ilişkili sınırlardan oluşan tek bir çıkış katmanı vardır. Her bir giriş, çıkış katmanındaki her bir sinire bağlıdır. Ağ rasgele ağırlıklarla çalışmaya başlar. Herhangi bir giriş uygulandığında, giriş vektörüne Öklid uzaklığı en az olan sinir seçilir ve bu sinire gelen bağlantı giriş ağırlıkları giriş vektörüne yaklaşacak şekilde yenilenir. Bu kazanan sinirle birlikte, onun topolojik komşuluğunda bulunan belli sayıda sinire gelen ağırlıklar da benzer şekilde değiştirilir.

#### **2.1.7.5. Karma Öğrenme Kuralı**

Karma öğrenme kuralında değişik uygulamalarda kullanılabilecek iki çeşit öğrenme örneği vardır. Bunlardan birincisi çevrim dışı öğrenme (off-line learning) ya da öbek öğrenme (batch learning) olarak adlandırılır. İkincisi ise çevrim içi öğrenme (on-line learning) ya da örnek örneğe öğrenme (pattern by pattern learning) olup, değişkenler her bir giriş, çıkış veri parçalarının sunulmasından sonra derhal güncelleştirilir.

Her iki öğrenme tarzını da birleştirmek ve değişkenleri belli bir eğitim veri girişi yapıldıktan sonra güncelleştirmek mümkündür. Bu güncelleştirme aralığına çağ büyüklüğü (epoch size) denir.

### **2.1.7.6. Yarışmacı Öğrenme**

Yarışmacı öğrenim, girişte yer alan örnekleri ayırt etmede kullanılabilir. Yarışmacı öğrenim sistemine bazı eğitici bilgi/örnekler verilerek (örneğin; rakamlar (el yazısıyla), resimler, ses) bunları bilgi yapılarına göre sınıflandırmada kullanılan bir öğrenme yöntemidir.

### **2.1.8. Yapay Sinir Ağlarının Üstünlükleri**

Sinir sisteminin modellenmesi için yapılan çalışmalar sonucu oluşturulan YSA, biyolojik sinir sisteminin üstünlüklerine de sahiptir. Bu üstünlükleri şu şekilde özetlemek mümkündür:

#### **2.1.8.1. Paralellik**

Alışılmış bilgi işlem yöntemlerinin çoğu seri işlemlerden oluşmaktadır. Bu da hız ve güvenilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Seri bir işlem gerçekleşirken herhangi bir birimin yavaş oluşu tüm sistemi doğrudan yavaşlatırken, paralel bir sistemde yavaş bir birimin etkisi çok azdır.

#### **2.1.8.2. Gerçekleştirilebilirlik**

YSA'nın basit işlemler gerçekleştiren türden hücrelerden oluşması ve bağlantıların düzgün olması, ağların gerçekleştirilmesi açısından büyük kolaylık sağlamaktadır.

### **2.1.8.3. Yerel Bilgi İşleme**

YSA'da her bir işlem birimi, çözülecek problemin tümü ile ilgilenmek yerine, sadece problemin gerekli parçası ile ilgilenmektedir ve problemin bir parçası işlemektedir. Hücrelerin çok basit işlem yapmalarına rağmen, sağlanan görev paylaşımı sayesinde, çok karmaşık problemler çözülebilmektedir.

### **2.1.8.4. Hata Toleransı**

Paralel bilgi işleme yapan bir sistemde, sistemin ayrı ayrı işlem elemanlarında meydana gelecek olan hatalı çalışma veya hasar, sistemin performansında keskin bir düşüşe yol açmadan, performansın sadece hata birimlerinin oranınca düşmesine sebep olur.

### **2.1.8.5. Öğrenebilirlik**

Alışlagelmiş veri işleme yöntemlerinin çoğu programlama yolu ile hesaplamaya dayanmaktadır. Bu yöntemler ile, tam tanımlı olmayan bir problemin çözümü yapılamaz. Bunun yanında, herhangi bir problemin çözümü için probleme yönelik bir algoritmanın geliştirilmesi gerekmektedir. YSA, problemleri verilen örneklerle çözer.

### 2.1.9. Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları

Halen uygulanabilirliği , gelecekte uygulanabileceği hususunda ümit veren aktif çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, yapay sinir ağlarının kullanım alanları ve uygulamaları kısaca şu şekilde özetlenebilir<sup>(2)</sup>:

#### ◆ **Biyoloji**

- Beyni ve diğer sistemleri daha iyi anlama
- Retina ve kornea'yı modelleme

#### ◆ **İş Dünyası**

- Petrol ve jeolojik yapı değişimlerinin tahmini
- Özel durumlar için toplum eğilimlerinin tanımı
- Veri tabanı oluşturulması
- Hava yolları ve ücret düzenlemesi
- El yazısı karakterini tanıma

#### ◆ **Çevresel**

- Numuneleri analiz etme
- Hava tahmini

#### ◆ **Finans**

- Kredi riski değerlendirmesi
- Sahte para ve evrak tanımı



- El yazısı formların değerlendirilmesi
- Yatırım eğilimleri ve portföy analizi

#### ◆ **Üretim**

- Robot ve kontrol sistemlerini otomatikleştirme
- Üretim işlem kontrolü
- Kalite kontrolü
- Montaj hattında parça seçimi

#### ◆ **Tıp**

- Sağırlar için ses analizi
- Semptom hastalıkların teşhis ve tedavisi
- Ameliyat görüntüleme
- İlaçların yan etkilerinin analizi
- X-ışınlarını okuma
- Epileptik felcin nedenlerini anlama

#### ◆ **Askeri**

- Radar sinyallerini anlama
- Yeni ve gelişmiş silahlar tasarlama
- Keşif yapma
- Kıt kaynakların kullanımını optimize etme
- Hedef tanıma ve izleme

## 2.2. Mikrodalga Güç Sensörleri ve Kalibrasyonu

### 2.2.1. Mikrodalga Güç Ölçümlerinin Önemi

Bir sistemin veya cihazın tasarımında, RF ve mikrodalga cihazların seçiminde ve performanslarında kritik faktör çıkış güç seviyesidir.

Yüksek güçlü katı hal (Solid state) elemanların maliyetlerinin yüksekliğine bağlı olarak istenilen güç seviyesindeki her dB için fiyat artmaktadır. Ayrıca bir çok mikrodalga sisteminin çalışma esnasında çıkış gücünün izlenmesi gerekmektedir. Bu durum ölçüm tekniklerinin tekrarlanabilir, izlenebilir ve doğru olmasını gerektirir. Bu durumdan dolayı iyi bir ekipmana, iyi bir ölçüm tekniğine ve standart WATT'ın ne olduğu hususunda ortak anlaşmaya varılmasına gereksinim duyulmuştur. Amerika'da güç standardının oluşturulması ile ilgili bu anlaşma Colorado Boulder'da NIST (National Institute of Standards and Technology) tarafından oluşturulmuştur. Ülkelerin ulusal metroloji ve standart kuruluşları (Türkiye'de TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, (UME)), farklı frekans bantları için çeşitli mikrodalga mikrok calorimetreler şeklindeki Milli Referans Standartları muhafaza etmektedirler<sup>(39-40)</sup>.

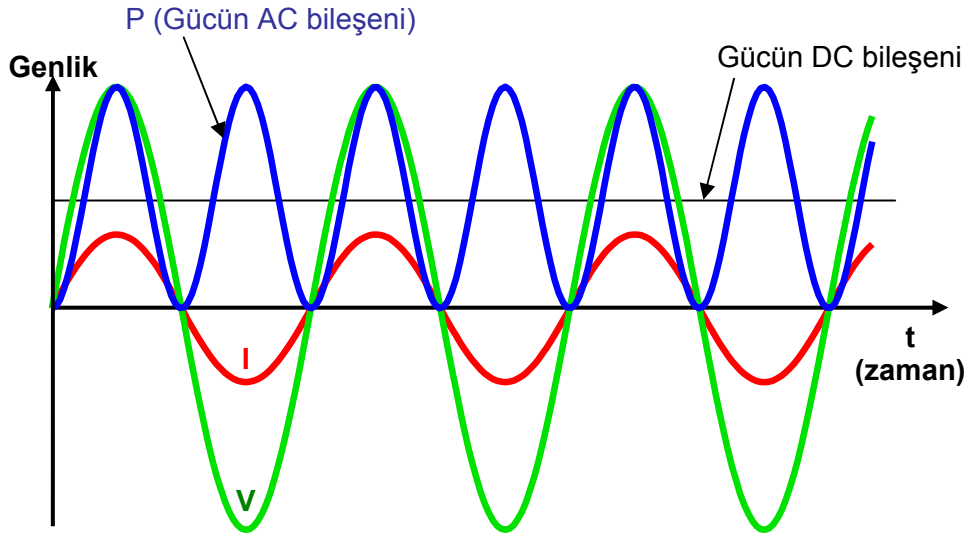
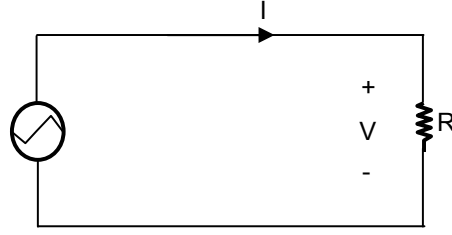
Düşük frekanslarda (100 KHz'in altında), güç genelde belli bir empedans üzerindeki gerilim ölçümünden hesaplanır. Frekans arttıkça, empedans büyük değişimlere sahip olur, böylece güç ölçümleri daha karmaşık hale gelir.

### 2.2.2. Güç Ölçümleri

Ortalama güç birçok RF ve mikrodalga sistemlerin belirlenmesinde kullanılır. “Darbe gücü” veya “tepe genlikli zarf gücü” ifadeleri radar ve navigasyon sistemleri ve yakın zamanda da telsiz iletişim sistemlerindeki TDMA (zaman bölmeli çoklu erişim) işaretler için uygundur.

Temel olarak teoride güç, gerilim ve akım değerlerinin çarpılmasından elde edilir. Fakat AC gerilimin bir devirlik zamanı için bu çarpım, devir boyunca Şekil 2.13’de görüldüğü gibi  $2f$  ilişkisine göre değişir. Bu örnekten, sinüzoidal bir üreteç sinüzoidal bir akım üretir. Gerilim ve akımın çarpımı üreteç frekansının iki katındaki frekansta bir terim ve DC’de de bir terime sahiptir. Genelde kullanılan güç kelimesi, burada ifade edilen güç çarpımının DC bileşenini ifade eder<sup>(47)</sup>.

İncelenecek olan bütün güç ölçme yöntemleri (tepe genlikli güç ölçümü hariç), ortalama kullanarak, DC terime cevap veren güç sensörleri kullanırlar.



**Şekil 2.13.** Gücün sinüzoidal periyot ile değişimi

Gücün temel tanımı birim zamanda kullanılan enerjidir. Bu, bir watt'ın tanımı olan saniye başına bir joule hızındaki enerji transferi tanımıyla uygun düşer. Çözömlenmesi gereken önemli bir soru, gücü hesaplarırken veya ölçerken enerji transfer hızı için hangi zaman miktarı üzerinden ortalama alınacağıdır.

Şekil 2.13'e göre, ölçüm veya hesaplama yaparken dar bir zaman aralığı kullanılırsa enerji transfer hızı için farklı değerler bulunur. Fakat radyo

ve mikrodalga frekanslarında bu şekilde gerilim-akım çarpımının mikroskobik gösterimi yoktur.

Sürekli bir güç dalgası için, güç, daha matematiksel bir yaklaşımla, Şekil 2.13'deki P eğrisi altındaki ortalama yüksekliğin bulunmasıdır. Ortalama, eğrinin altındaki alanın entegral ile bulunması ve bu alanın sahip olduğu zaman uzunluğuna bölünmesidir. Zaman uzunluğu AC periyodun tam katları olmalıdır. Denklem 2.3,  $1/T_0$  frekansındaki sürekli bir dalganın gücünü vermektedir.

$$P = \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} e_p \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right) \cdot i_p \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \phi\right) dt \quad (2.3)$$

$T_0$  AC periyodu,  $e_p$  ve  $i_p$ , e ve i'nin tepe değerleri,  $\phi$ , e ve i arasındaki faz açısı, ve n AC periyotların sayısıdır. Bu  $n = 1, 2, 3, \dots$  için Denklem 2.4'deki sonucu verir.

$$P = \frac{e_p i_p}{2} \cos \phi \quad (2.4)$$

Entegrasyon zamanı birden fazla periyot seçilirse, n'nin tam sayı seçilip seçilmemesinin bir etkisi kalmaz. Büyük n değerleri için bu sonuç güç ölçümünün temelidir. Denklem 2.5, sinüzoidal işaretler için tepe ve rms değerler arasındaki ilişkiyi verir.

$$e_p = \sqrt{2} E_{rms} \quad i_p = \sqrt{2} I_{rms} \quad (2.5)$$

Denklem 2.4'dekileri kullanarak güç için Denklem 2.6 yazılabilir <sup>(47)</sup>.

$$P = E_{rms} \cdot I_{rms} \cos \phi$$

(2.6)

### 2.2.3. Ortalama Güç

Ortalama güç, en düşük frekanstaki birden fazla periyot üzerinden ortalaması alınan enerji transfer hızıdır. Bir sürekli işaret için en düşük ve en yüksek frekans aynı olduğu için, ortalama güç ve güç aynı değere sahiptir. Genlik modüleli bir dalga için güç, işaretin modülasyon elemanının birden fazla periyodu üzerinden ortalama alınarak bulunur.

Matematiksel yaklaşımla, ortalama güç Denklem 2.7.'deki gibidir.

$$P_{avg} = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} e(t) \cdot i(t) dt \quad (2.7)$$

T, e(t) ve i(t)'nin en düşük frekans elemanının periyodudur. Ortalama alan güç sensörleri ve güç ölçerlerin ortalama alma zamanları saniyenin yüzlerce birinden saniyelere kadar uzanır ve bundan dolayı bu işlemle genlik modülasyonunun en genel formunun ortalaması elde edilir<sup>(41-42)</sup>.

### 2.2.4. Güç Ölçüm Metodları

Mikrodalga frekanslardaki ortalama gücü algılamak ve ölçmek için üç farklı yöntem vardır. Her bir yöntem, mikrodalga gücü, ölçülebilir DC veya düşük frekanslı bir işarete dönüştürmek için farklı cihazlar kullanır. Bu cihazlar, termistör, termokuplör ve diyot dedektördür.

Her bir metot diğerine göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

### 2.2.5. Önemli Güç Sensörü Parametreleri

RF kaynağın veya iletim hattının karakteristik empedansı ile sensörün RF giriş empedansı arasında empedans uyumsuzluğu olabilir. Bundan dolayı sensöre gelen gücün bir kısmı, kaynağa geri döner. Gelen güç  $P_i$ , yansıyan güç  $P_r$  ve harcanan güç  $P_d$  arasındaki ilişki Denklem 2.8. ile verilmektedir:

$$P_i = P_r + P_d \quad (2.8)$$

Özel bir sensör için  $P_i$  ve  $P_r$  arasındaki ilişki sensör yansıma katsayısı  $\rho_\lambda$  ile Denklem 2.9'daki gibi verilir:

$$P_r = \rho_\ell^2 P_i \quad (2.9)$$

En yaygın hata kaynağı, uyumsuzluk belirsizliğine katkısından dolayı yansıma katsayısının genliğidir ve güç sensörü için önemli bir değerdir. İdeal sensörün yansıma katsayısı sıfırdır, uyumsuzluk yoktur.  $\rho_\ell$  için % 5 veya 0.05 (yaklaşık 1.11 SWR) arası tercih edilen değerlerdir.

İdeal olmayan durumun ikinci sebebi sensörün içinde, RF gücün, gücü algılayan elemandan farklı yerlerde harcanmasından kaynaklanır. Ölçülen, sensör üzerinde harcanan gerçek güçtür. Bu etki sensörün etkin verimi  $\eta_e$  (Effective efficiency) olarak tanımlanır. Sensör veriminin 1 (%100) olması, sensöre giren gücün hepsinin algılayıcı eleman tarafından soğurulması ve ölçülmesidir. İletkenlerde, yan duvarlarda veya diğer elemanlarda güç harcanmamıştır.

Bir güç sensörünün en sık kullanılan özelliği kalibrasyon faktörü olarak adlandırılan ve Denklem 2.10'da verilen  $K_b$ 'dir, yansıma katsayısı ve veriminin bir kombinasyonudur:

$$K_b = \eta_e (1 - \rho_e^2) \quad (2.10)$$

Bir sensördeki 0.9 (%90) değerindeki  $K_b$  için güç metre, gelen güçten ( $P_i$ ) %10 daha düşük bir güç seviyesi gösterecektir. Modern güç sensörleri üretim sonrası fabrikada kalibre edilerek satışa sunulmaktadır ve kalibrasyon kartı taşırlar veya EEPROM'da muhafaza edilen düzeltme verisine sahiptirler. Güç metreler bu düşük okunan seviyeyi, üzerlerindeki kalibrasyon faktör kadranını düzenleyerek, klavye kullanılarak veya GPIB (Genel amaçlı arayüz iletişim yolu) üzerinden girilen düzeltme faktörüyle, sensörün ölçüm frekansındaki kalibrasyon faktörüne uygun düşmesi için düzeltirler<sup>(47)</sup>.

### **2.2.6. Termistör Sensörler ve Enstrümantasyon**

Bolometre sensörler, özellikle termistörler, mikrodalga güç ölçümlerinde önemli tarihsel bir yer edinmiştir. Bununla birlikte günümüzde termokuplör ve diyot teknolojileri; yüksek duyarlılıkları, daha geniş dinamik aralıkları ve yüksek güç kapasitelerinden dolayı mikrodalga güç ölçümlerini büyük oranda ele geçirmiştir. Termistörler, DC güç uygulama kabiliyetinden dolayı güç transfer standartları için seçilen sensör türüdür.



Bolometreler, sıcaklık değişmelerinden dolayı değişen dirençlerle çalışan güç sensörleridir. Sıcaklık değişimi mikrodalga enerjinin bolometrik eleman içinde ısıya dönüşmesinden kaynaklanır. İki tip bolometre vardır, barretter ve termistörler. Barretter, pozitif sıcaklık katsayılı bir dirence sahip olan ince bir teldir. Termistörler negatif katsayılı yarıiletkenlerdir.

Mikrodalga güç ölçümleri için kullanılan termistör, küçük metalik-oksit boncuktur, tipik olarak tel çapı 0.03 mm ve kendisi 0.4 mm çapındadır. Termistörün direnç güç ilişkisi lineerlikten oldukça uzaktır ve termistörden termistöre göre de çok değişkendir. Bu yüzden, dengeli-köprü (balanced-bridge) tekniği termistör elemanını sabit dirençte tutar (R), bu değer DC veya düşük frekanslı bir AC meyil gerilimi ile sağlanır. Mikrodalga güç termistörde harcadıkça, R daha düşük değere doğru azalmaya başlar, meyil gerilimi (gücü) köprüyü dengeleyecek miktarda geri çekilir ve R aynı değerde tutulur. Meyil gücündeki düşüş mikrodalga güçteki yükselme ile orantılı olmalıdır. Meyil gücündeki düşüş, mikrodalga gücün gösterimi için bir ölçü aleti ile gösterilir.

Termistörler koaksiyel veya dalga kılavuzu içine monte edilirler, böylelikle mikrodalga ve RF frekanslarda kullanılan ortak iletim hattı sistemleri ile uyum içinde olurlar. Termistör ve montaj elemanlarının tasarımı, termistör elemanının monte elemanı üzerine gelen gücü mümkün olduğunca fazla soğurmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Öncelikle, belirlenmiş frekans aralığı boyunca, sensörün, iletim hattına iyi bir empedans uyumluluğu sağlanmalıdır. Sadece termistör elemanının üzerinde harcanan güç miktarı ölçü aletinde kullanıldığı için, sensörün montaj yapısı ile oluşturduğu

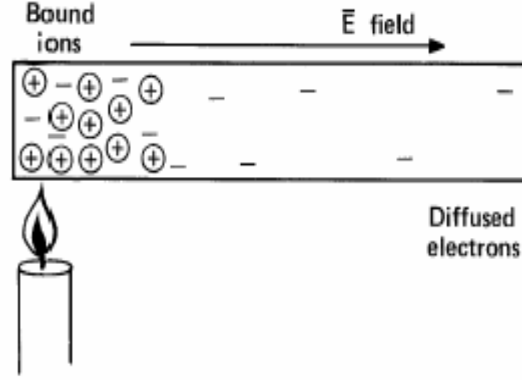
dielektrik ve direnç kayıpları da düşük olmalıdır. Ek olarak, mekanik tasarım, termal ve fiziksel şoktan izolasyonu sağlamalı ve sızıntıyı küçük tutabilmelidir ki mikrodalga güç, termistörün çevresindeki paralel yollardaki montajdan kaçmasın. Dışarıdaki RF gücün montaj yerine girmemesi için ekranlama da önemlidir<sup>(47)</sup>.

### **2.2.7. Termokuplör Sensörler ve Enstrümantasyon**

Termokuplörler 1974'den beri RF ve mikrodalga algılamada kullanılan bir teknolojidir<sup>(43)</sup>. Termokuplörler ısı-tabanlı sensörler olduğu için, doğru "ortalama dedektörü" olarak bilinirler. Termistörlerden daha sağlamdırlar, 0.3  $\mu$ W (-30 dBm)'a kadar güç ölçümü yapabilirler, daha iyi VSWR (gerilim duran dalga oranı)'a sahip oldukları için daha düşük belirsizlik değerine sahiptirler. Termokuplör teknolojisinin gelişimi, tam, sağlam, eksiksiz ve kopyalanabilir güç sensörlerini elde edecek yarıiletken ve ince-film teknolojilerinin birleşmesi sonucunda olmuştur.

Termokuplörler farklı iki metalin sıcak ve soğuk bağlantılarında, sıcaklık farklılıklarından dolayı bir gerilim üretmeleri prensibi üzerine çalışırlar. 2.14.'deki gibi sol taraftan ısıtılan uzun metal bir çubuk düşünelim. Sol taraftan artan termal tahrikten dolayı bir çok elektron serbest hale geçer. Soldaki elektronların yoğunluğunun artışı sağa doğru yayılmaya neden olur. Sağa doğru hareket eden her elektron pozitif yüklü bir iyon bırakır. Bu pozitif yüklü iyon Coulomb Kanununa göre serbest kalan bu elektronu geri çekmeye çalışır. Çubuk, ısı tarafından indüklenen sağa yönelimli yayılım kuvveti ile sola yönelimli Coulomb kuvveti tam olarak dengelendiği zaman dengeye

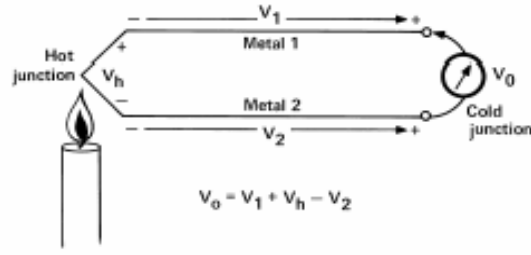
ulaşır. Sola yönelimli olan kuvvet sağa doğru işaret eden elektrik alan ile ifade edilebilir. Çubuk boyunca toplanan elektrik alan Thomson Elektromotor Kuvvet (EMF) adı verilen gerilim kaynağını oluşturur.



**Şekil 2.14.** Metal çubuğun bir ucundan ısıtılması ile elektrik alanın artması

Aynı prensip farklı metaller için de, bağlantı noktasında farklı serbest elektron yoğunluklarının yayılmaya ve EMF'ye neden olur. Bu olay Peltier etkisi olarak bilinir.

Bir termokuplör, Şekil 2.15'de gösterildiği gibi, genelde farklı iki materyalden oluşan bir halka veya devredir. Metallerin bağlantılarından birisi ısıya maruz bırakılır, diğeri bırakılmaz. Şayet halka kapalı bırakılırsa, iki bağlantı farklı sıcaklıklarda olduğu sürece halkadan akım akacaktır. Hassas bir voltmetre halkaya takılırsa, net EMF'i ölçer. Termokuplör halka, net termoelektrik gerilimi üretmek için Thomson ve Peltier EMF'in her ikisini de kullanır. Toplam etki Seebeck etkisi olarak da bilinir.

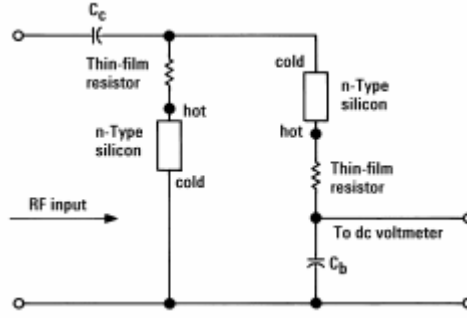


**Şekil 2.15.** İki metalli devre boyunca elde edilen toplam termoelektrik gerilim

Bazen bir çok bağlantı çifti veya termokuplörler seri olarak bağlanırlar ve her çiftin ilk bağlantı noktası ısıya maruz bırakılacak, ikincisi bırakılmayacak şekilde düzenlenir. Bu şekilde, bir termokuplör tarafından üretilen net EMF bir sonraki ile toplanır ve sonuçta daha büyük bir termoelektrik gerilim üretilir. Böyle bir seri termokuplörün birleşimine termogrup denir.

Modern termokuplör 1974'te ortaya çıkmıştır. Yarıiletken ve ince-film teknolojisinin avantajını kullanmıştır. Ana yapı elemanı n-tipi silikon, ince dokumayı destekleyen p-tipi silikon çerçevedir. Çerçevenin hafif meyilli kenarları silikon kristal yüzey üzerinde izotropik olmayan kazımadan kaynaklanır.

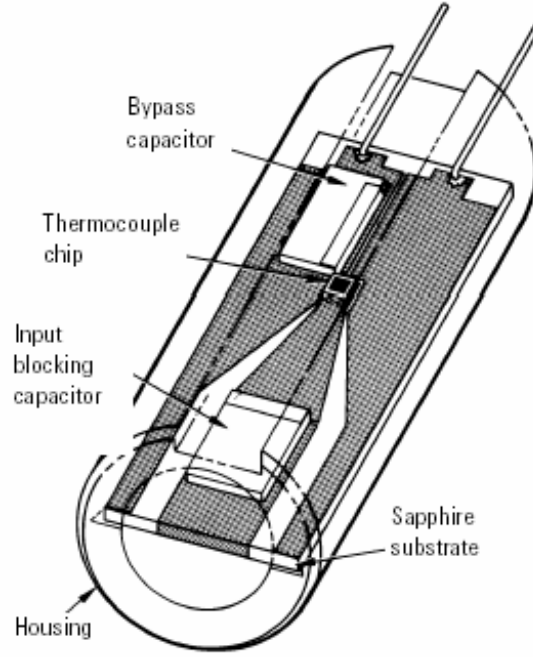
Direnç, RF enerjisi ısı enerjisine çevirdiğinde, oldukça ince olan çipin merkezi, iki sebepten dolayı dış kenardan daha sıcak hale gelir. İlki, direncin şekli çipin merkezinde akım yoğunluğunun ve üretilen ısının daha çok olmasına neden olur. İkincisi, çipin dış kenarları, daha kalın ve uçlar boyunca iletim yoluyla daha rahat soğutulabilir. Bundan dolayı, çip üzerinde termoelektrik emf'ye yol açan termal değişim vardır.



**Şekil 2.16.** Termokuplör güç sensörünün şematik diyagramı (Agilent 8481A)

Güç sensörü, 2.18'deki elektriksel olarak bağlandığı şekilde, bir çip üzerinde iki tane aynı termokuplör taşır. Termokuplörler DC voltmetrelerde seri bağlanırlar. RF giriş frekansları için,  $C_c$  kuplaj kapasitörleri tarafından sürülen iki termokuplör paralel olarak bağlıdır. RF akımın yarısı her bir termokuplör üzerinden geçer. Her bir ince-film direnç ve silikon seri bağlıdır ve  $100 \Omega$  toplam dirence sahiptir. Paralel olan iki termokuplör RF iletim hattına  $50 \Omega$  sonlandırma sağlar.

Soldaki termokuplörün alttaki düğüm noktası doğrudan toprağa bağlıdır ve sağdaki termokuplörün alttaki düğüm noktası  $C_b$  by-pass kapasitör ile RF toprağa bağlıdır. Ayrı termokuplörlerden üretilen DC gerilimler seri olarak toplanırlar ve daha büyük gerilimler oluştururlar. Bunun yanında, iki termokuplör yapısının temel avantajı voltmetreye giden her iki uç RF toprağındadır; böylece üst uç için RF bobine ihtiyaç yoktur.



**Şekil 2.17.** Termokuplör yapısının görünümü (Agilent 8481A)

Termokuplör çip, Şekil 2.17’de olduğu gibi safir bir silikon tabaka üzerindeki iletim hattına takılmıştır. Ortak yüzeysel bir iletim hattı yapısı, hat boyunca her kesit düzleminde aynı karakteristik empedansı muhafaza etmesinin yanında, tipik 50  $\Omega$ ’luk hat boyutlarını çip boyutlarına inceltmeye izin verir.

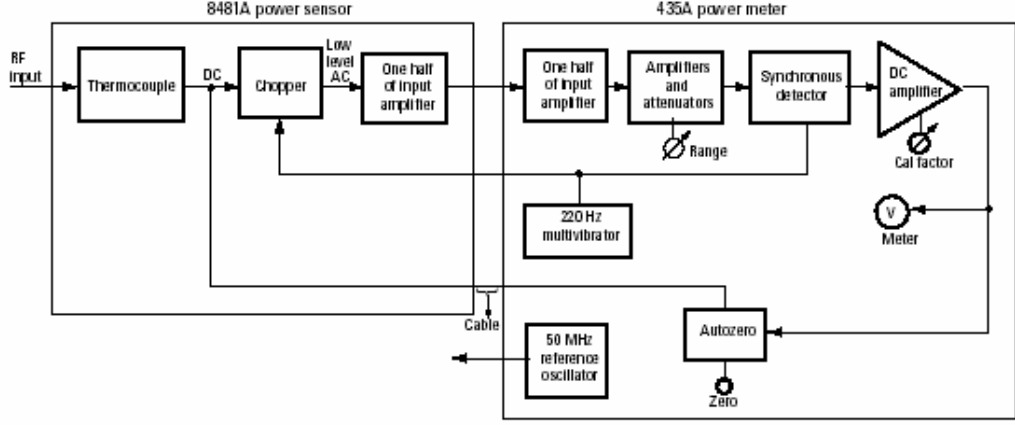
Yüksek frekanslı güç ölçümlerinde bir termokuplör sensörün temel karakteristiği miliwatt seviyesindeki RF girişi için verdiği mikrovolt seviyesindeki çıkış hassasiyetidir. Hassasiyet termokuplörün diğer iki termoelektrik güç ve termal direnç parametrelerinin çarpımına eşittir. Termoelektrik güç sıcak ve soğuk bağlantı noktaları arasındaki sıcaklık farkının  $^{\circ}\text{C}$  derecesi başına mikrovolt olarak termokuplör çıkışıdır.

Termoelektrik gerilim ortam sıcaklığından oldukça az etkilenir. Buna rağmen, ortam sıcaklığının değişimleri sıcaklık gradyenti oluşmasından korunmalıdır.

Termokuplör sensör teknolojisinin ortaya çıkması, güç hassasiyeti artırılmış güç ölçer mimarisini gerekli kılmıştır, şu anda çok düşük çıkışlı sensörler kullanılabilir.

Termokuplör sensör DC çıkışı çok düşük seviyededir (yaklaşık olarak 1mW uygulanan güç için 160 nV), bundan dolayı bu işareti basit esnek bir kabloda iletmek zordur. Bu problem, kullanıcının güç ölçer ile sensör arasındaki kabloyu uzatmak (25 feet veya daha fazla) istemesi ile daha da artar. Bu sebeple, güç sensörünün içinde bir takım düşük-seviyeli AC yükseltme devresi bulunmaktadır.

Böyle küçük DC gerilimleri taşımak için pratik bir yol, bu gerilimi kare dalgaya çevirmek için "chopper" (kıyıcı) elemanından geçirmek ve AC kuplajlı bir sistem ile yükseltmektir. Uygun yükseltmeden sonra, işaret eş zamanlı olarak yüksek seviyeli AC'de algılanır. Bu, ölçüm sonucunu elde etmek için işlenmesi gereken yüksek seviyeden DC üretir. Şekil 2.18, sensör/güç ölçer mimarisinin örnek bir blok diyagramıdır<sup>(44-47)</sup>.



**Şekil 2.18.** Sensör/güç ölçer mimarisi blok diyagramı (Agilent 435A/8481A)

İşaretleri yükseltirken gürültüyü azaltmanın bir yolu kanal bant genişliğini sınırlamaktır. Gürültü oluşturan mekanizmalar geniş bantlı olduğu için, yükselticinin bant genişliğini azaltmak toplam gürültünün gücünü azaltacaktır. En zayıf işaretler için en dar bant genişlikleri ve en hassas aralık seçilir.

### 2.2.8. Diyot Sensörler ve Enstrümantasyon

Doğrultucu diyotlar uzun süredir dedektör olarak ve nispi güç ölçümlerinde kullanıla gelmiştir. En eski diyotlar, zarf algılama (envelope detection) ve süper-heterodin alıcılarda lineer olmayan mikser elemanı olarak kullanılmıştır. (Resim 2.1.)





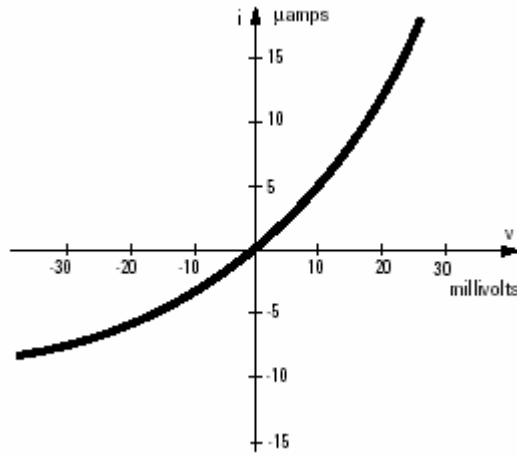
**Resim 2.1.** Diyot mikrodalga güç sensörü (Agilent E9300A)

Yüksek frekans diyotlar, 1904'te uygulama alanı bulmuştur<sup>(48)</sup>. Oldukça sağlam ve kararlı, mikrodalga frekanslarında metal-yarıiletken bağlantılı diyotların yapılmasını mümkün kılan teknoloji, düşük bariyerli (low-barrier) Schottky (LBS) diyot teknolojisi olmuştur. Bu diyotlar, 1974'te güç sensörü olarak sunuldu. 18 GHz'in üstüne kadar olan frekanslarda -70 dBm (100pW)'e kadar düşük güç değerlerini ölçme ve algılama kabiliyetine sahiptirler<sup>(49)</sup>.

#### **2.2.8.1. Diyot Dedektör Prensipleri**

Diyotlar, lineer olmayan akım-gerilim özelliklerinden kaynaklanan doğrultucu yapılarını kullanarak, AC işaretleri DC işaretlere çevirirler. Basit bir p-n diyot, uygun şekilde paketlenirse, hassas bir mikrodalga dedektör olacaktır. Bununla birlikte, biriken yük etkisi p-n bağlantısının bant genişliğini kısıtlar. Schottky bariyer diyot, bağlantı noktasında yük biriktirmez fakat çoğu düşük işaret seviyelerinde oldukça yüksek empedansa sahiptir. Konvansiyonel bir Schottky diyotun 0.3 volt bağlantı gerilimini aşmak için -20 dBm RF işarete ihtiyaç vardır. Şayet algılanan çıkış, meyil gerilimi tarafından

oluşturulan sapması giderilmiş AC kuplajlı ise, alternatif bir metod, diyotu 0.3 volta ön gerilimlemektir. AC kuplaj sayesinde, ön gerilimlenmiş diyotla ölçülebilecek minimum güç, ön gerilimlemeden dolayı oluşan sapma ve gürültüden dolayı 10 dB daha düşürülebilir. Bu tekniğe tipik bir örnek, diyot dedektör kullanan skalar network analizördür.



**Şekil 2.19.** Düşük-bariyerli Schottky diyotun bağlantı noktası doğrultma karakteristiği

Nokta-kontak teknoloji ile üretilen metal-yarıiletken bağlantıları, bağlantı noktasında düşük gerilimli bariyer sergilerler (yaklaşık 0.3 volt ileri gerilimli bir bariyer). Oldukça üstün özellikli RF ve mikrodalga performansı sergilerler. Metal-yarıiletken bağlantılı LBS diyotlar nokta-kontak teknolojisinin yerini aldılar, tekrarlanabilirlik ve güvenilirliği oldukça artırdılar. 2.19 bir LBS bağlantı noktasının tipik bir I-V karakteristiğini göstermektedir, eğri kare kuralını göstermek için uzatılmıştır<sup>(50)</sup>.

Matematiksel olarak algılayıcı diyotun diyot denklemi şu şekildedir:

$$i = I_s (e^{av} - 1) \quad (2.11)$$

burada  $a=q/nKT$ ,  $i$  diyot akımı,  $v$  diyot üzerindeki net gerilim,  $I_s$  doyma akımıdır ve  $I_s$  verilen bir sıcaklıkta sabittir.  $K$  Boltzmann sabiti,  $T$  mutlak sıcaklık,  $q$  elektron yükü ve  $n$  deneysel veri uyumu için düzeltme sabiti ( $n$  buradaki güç algılayıcı cihazlar için yaklaşık olarak 1.1 dir).  $a$ 'nın tipik değeri  $40 \text{ (volt)}^{-1}$ 'in biraz altındadır.

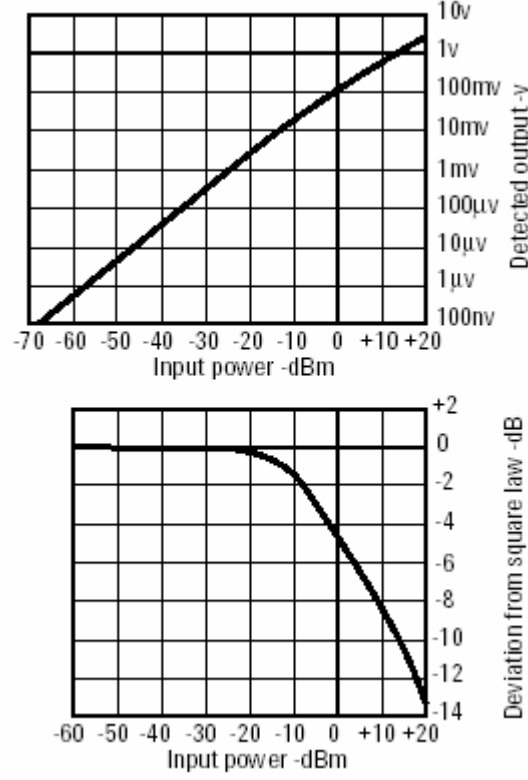
Denklem 2.12, doğrultma hareketini daha iyi analiz etmek için güç serisi olarak yazılır:

$$i = I_s \left( av + \frac{(av)^2}{2!} + \frac{(av)^3}{3!} + \dots \right) \quad (2.12)$$

Doğrultmayı sağlayan ikinci ve diğer çift dereceden terimlerdir. Küçük seviyeli işaretler için, sadece ikinci dereceden terim anlamlıdır ki bundan dolayı diyot için kare kuralı bölgesinde çalışıyor denir. Bu bölgede, çıkış  $i$  (ve çıkış  $v$ ) RF giriş geriliminin karesiyle orantılıdır. Dördüncü ve daha büyük dereceden terimlerin etkin hale geldiği  $v$  geriliminin oldukça büyük olduğu zaman, diyot cevabı kare-kuralı bölgesinde değildir. Burada, diyot artık kare-kuralı bölgesinden çıkmıştır, ve geçiş bölgesi veya yarı kare-kuralı  $i$ - $v$  bölgesindedir. Bu bölgenin üstünde lineer algılama bölgesi vardır (çıkış gerilimi giriş gerilimiyle orantılıdır).

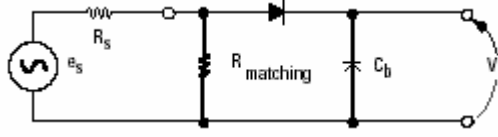
Tipik olarak paketlenmiş bir diyot için, kare-kuralı bölgesi, gürültü seviyesinden yaklaşık olarak (-20) dBm seviyesine kadar uzanır. Geçiş bölgesi giriş gücü -20 dBm'den 0 dBm'e kadar, lineer bölge ise 0 dBm üzerinde devam eder. 0 dBm RF giriş gerilimi,  $50 \Omega$ 'luk bir sistemde yaklaşık

olarak 220 mV (rms)'a eşittir. Geniş dinamik aralıklı güç sensörleri için, geçiş ve lineer bölgelerin tam olarak tanımlanması oldukça önemlidir.



**Şekil 2.20.** Diyot algılama karakteristiği

Şekil 2.20'de tipik bir algılama eğrisi görülmekte olup gürültü seviyesi (-70) dBm'den (+20) dBm'e kadar uzanır. Diyot karakteristiği kare-kuralı, geçiş ve lineer bölgeler olarak ayrılır (gürültü değeri, kare-kuralı eğrisinin sonsuz küçük güç değerine teorik olarak uzanması için sıfır olarak kabul edilmiştir). Algılama diyotları, günümüzde, zaman ve sıcaklık ile oldukça kararlı transfer karakteristiği gösterecek şekilde üretilebilmektedir. Bu kararlı yapı üzerine, veri düzeltme ve telafi etme teknikleri 90 dB dinamik aralık avantajını kullanırlar<sup>(47)</sup>.



**Şekil 2.21.** Bir kaynak ve uyumlandırma dirençli bir diyot dedektörün devre diyagramı

2.21, düşük seviyeli RF işaretlerin algılanması için meyil gerilimi verilmemiş bir diyotun basitleştirilmiş bir devresidir. Diyotun lineer olmayan i-v karakteristiğinden dolayı algılama oluşur; diyotun üzerindeki RF gerilim doğrultulur ve DC çıkış gerilimi oluşur.

Şayet RF işaretler için kullanılan diyot direnci üretcin kaynak direncine uyumlandırılırsa, diyota maksimum RF güç verilir. Bununla birlikte, RF gerilim diyot üzerinde olduğu müddetçe, RF gerilimi algılayacaktır. Aşağıda açıklanan sebeplerden dolayı, küçük RF işaretler için kullanılan diyot direnci tipik olarak  $50 \Omega$ 'dan daha büyüktür ve ayrı bir uyumlandırma direnci, güç sensörünün giriş sonlandırma empedansı olarak kullanılır. Diyot üzerine maksimum güç transferi, küçük RF işaretler için diyot direnci kaynak direncine uyumlandırıldığı zaman gerçekleşir. Orijindeki diyot direnci Denklem 2.13'ün türevi alınarak bulunur:

$$R_o = \frac{1}{aI_s} \quad (2.13)$$

$R_o$  direnci sıcaklığın güçlü bir fonksiyonudur ki diyot hassasiyeti ve yansımaya katsayısı da sıcaklığın güçlü birer fonksiyonudur. Sıcaklık

bağımlılığının daha az olmasını sağlamak için  $R_o$ , kaynak direncinden çok daha büyük olur ve  $50 \Omega$  uyumlandırma direnci üretcin ana sonlandırması olarak çalışır. Diyotun  $R_o$ 'ı çok büyük yapılırsa, RF'den DC'ye güç dönüşümü oldukça az olacaktır, bundan dolayı da daha büyük  $R_o$ , hassasiyeti azaltır. Ters doyum akımı  $27.5-13.8 \mu A$  arasında olan bir diyot için  $1-2 k\Omega$  mertebesinde orijin direnci vardır. Küçük işaretlere karşı iyi hassasiyet ile iyi bir sıcaklık performansı arasındaki çelişki  $I_s$  akımının  $10 \mu A$  ve  $R_o$ 'ın yaklaşık olarak  $2.75 k\Omega$  olarak yapılmasından kaynaklanır.

$I_s$  doyma akımı için istenen akım değeri, bağlantı noktasında düşük gerilim bariyeri oluşturacak malzemenin diyotun inşasında kullanılması ile sağlanır. Schottky metal-yarıiletken bağlantı noktası böyle bir düşük gerilimli bariyer için düzenlenebilir.

Orijin direnci  $R_o$ , bir dedektör diyotun oldukça değişik koşullar altındaki çalışmasının anlaşılmasında çok kullanışlı bir kavramdır. Algılanan çıkışın kaynak empedansının reel kısmını  $R_o$  ifade eder, böylece sonlu bir direncin etkisi hesaplanabilir.  $I_s$ 'deki sıcaklığa bağlı değişim (silikon LBSD'ler her  $10^\circ C$  için ikiye katlar) incelenirse, yüklenmiş dedektörün sıcaklık katsayısı da hesaplanabilir.

Doğal olarak,  $R_o$  cihaza gelen giriş gücüne karşı hassastır, ve sadece "termal gerilimden"  $V_t = nKT/q$ , veya yaklaşık  $28 mV$  tepe değerinden daha düşük bağlantı gerilimleri için sabit olabileceği düşünülür. Bu sınır değeri,  $50\Omega$ 'luk bir sistemde, çıkışın kare-kuralından ayrıldığı güç seviyesiyle karşılıklı olarak bağlantılıdır.

### 2.2.8.2. Diyotların Güç Algılama İçin Kullanılması

Hatasız silikonlu yarıiletken üretim yöntemi Schottky diyotların mükemmel tekrarlanabilirliğe ulaşmalarını sağlamıştır. Bağlantı bölgesi daha büyük olduğu için daha da sağlamdırlar.

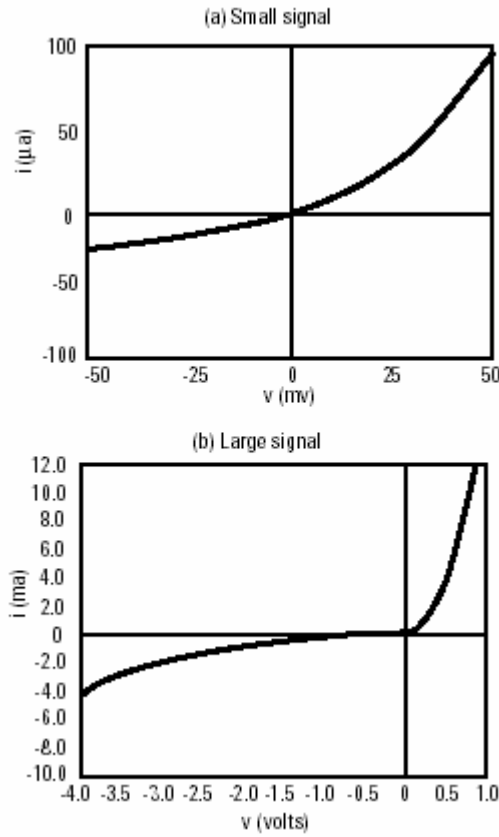
Galyum-arsenit (GaAs) yarıiletken materyal teknolojisi 1980'lerde geliştikçe, bu tür cihazlar mikrodalga frekanslarında silikondan daha üstün özellikler gösterdiler. Düzlemsel-katkılı- bariyer (planar-doped-barrier) (LPD) teknolojisi olarak bilinen gelişmiş diyot üretimi güç algılama alanında avantajlar sundu. Bu, oldukça ince epitaksiyel katmanları oluşturmak için kullanılan moleküler ışın epitaksisi ismi verilen materyal hazırlama işlemi üzerine dayalıdır. İki tip diyot bağlantısının kesitini gösterir, düşük-bariyer Schottky ve düzlemsel-katkılı-bariyer diyotlar. PDB diyotların katkı profili, saf kristal katmanlar  $n^+$  ve  $p^+$  bölgeleri arasına yayılmış olarak,  $n^+-I-p^+-I-n^+$  şeklindedir. I-V karakteristiği katkının simetrisine bağlı olarak yüksek dereceden bir simetriye sahiptir.

$p^+$  bölgesi eşit olmayan kalınlıktaki iki saf kristal katmanının arasında bulunur. Bu asimetri PDB cihazına doğrultucu diyot karakteristiği verir. PDB diyotun en büyük özelliği,  $C_o$  bağlantı kapasitansı oluşacak şekilde tasarlanabilmesidir.  $C_o$  oldukça küçük, 20 fF (femto farad) dır ve nerdeyse ön gerilimlemeden bağımsızdır. Aynı zamanda metal kontak koruyucunun boyutlarından bağımsızdır.

Ön gerilimlemeden bağımsız oldukça kararlı bir  $C_o$  sonucunda, bu cihazların frekans kare-kuralı karakteristiği metal-yarıiletken cihazlarına göre daha sabittir. Düşük kapasitans kuplajlı düşük bağlantı direnci, bu düşük

direnç bağlantı noktasının radyo düzeltme (RC) zaman sabitini düşürdüğü için, mükemmel bir mikrodalga işaret performansı sağlar.

Bir PDB diyotun, bağlantı noktasındaki saf katmandan dolayı frekans hassasiyeti oldukça az olur. Bir p-n bağlantılı diyotta bağlantının eşdeğer kapasitansı güç seviyesi ile değişir, fakat, PDB diyotta bağlantı kapasitansı, saf katman tarafından belirlenmekte olup neredeyse güç ile sabittir.



**Şekil 2.22.** PDB diyotun iki farklı sürüş gerilimi bölgesi için I-V karakteristiği

2.22 tipik bir PDB diyotun iki bölge i-v karakteristiğini göstermektedir. 2.22a küçük işaret bölgesini gösterirken, 2.22b sağda lineer ve solda kırılma bölgesi olan daha büyük işaret karakteristiğini gösterir.



Üstelik (-70) dBm, (-20) dBm aralığında tam bir kare-kuralı performansı sağlarlar. Diyot sensör teknolojisi hassasiyette oldukça üstündür, bununla birlikte gerçekte termokuplör sensörler yüksek güç seviyelerinde, (-30) dBm'den (+20) dBm'e kadar, bir avantaj olarak saf kare-kuralı dedektör olma özelliklerini korurlar. Bundan dolayı, her iki teknoloji de bir diğerinin yerine kullanılamaz, kullanıcının uygulama alanına göre hangi teknolojinin kullanılacağı belirlenir.

100 pW (-70 dBm) seviyesindeki güç değerlerini algılamada diyot dedektör çıkışı 50 nV civarındadır. Bu düşük işaret seviyeleri için, kaçak işaretlerin ve termokuplör etkilerinin istenen işaretin önüne geçmesini önlemek amacıyla, karmaşık yükselteçler ve kırıyıcı (chopper) devrelere ihtiyaç vardır. Eski diyot güç sensörler için, diyotun termal yalıtımını sağlamak için fazladan boyut ve ağırlığa ihtiyaç vardır. Çift-diyotlu konfigürasyon yüksek hassasiyetli devrelerin termal etkilerinin çoğunu dengeler ve daha küçük ve düşük maliyetli yapıların içinde daha üstün sapma özelliklerine ulaşır<sup>(47)</sup>.

### **2.2.9. Güç Sensörlerinin Kalibrasyonu**

Güç sensörlerinin kalibrasyonu, Şekil 2.25.'de verilen kalibrasyon sistemi ile sağlanabilir. Sinyal jeneratöründen uygulanan güç değeri kalibrasyonu yapılan diyot sensör ve referans termistör sensör ile her frekans değeri için ayrı ayrı ölçülür<sup>(49)</sup>. Söz konusu ölçümler, belirsizliği azaltmak ve doğruluğu yükseltmek için sensörlerin değişik bağlantı şekillerinde (sensör konnektörlerinin 120°, 240° ve 360° açılardaki bağlantıları ile) ve birkaç tekrarlı olarak binlerce defa yapılır. Bu işlemleri manuel olarak yapmak nerede ise imkansızdır. Bu sebeple bir PC ve yazılım vasıtası ile cihazların GPIB bağlantıları kullanılarak bahsedilen ölçümler otomatik olarak yapılır. Sinyal jeneratöründen uygulanan mikrodalga sinyalin gücü P ise; referans (standart) olarak kullanılan sensör ile ölçülen güç P<sub>STD</sub>; Denklem 2.14a ile hesaplanır.

$$P_{STD} = P \times CF_{STD} \quad (2.14a)$$

Kalibrasyonu yapılan güç sensörü ile ölçülen güç P<sub>DUT</sub>, Denklem 2.14b ile hesaplanır.

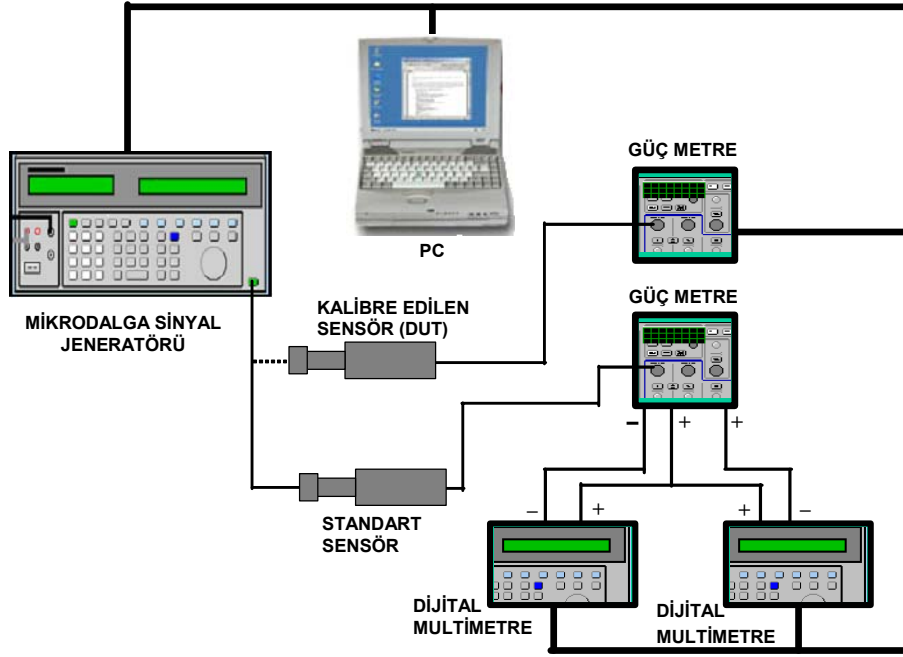
$$P_{DUT} = P \times CF_{DUT} \quad (2.14b)$$

Bu iki eşitlikten;

$$\frac{P_{STD}}{CF_{STD}} = \frac{P_{DUT}}{CF_{DUT}} \quad (2.15a)$$

$$CF_{DUT} = \frac{P_{DUT}}{P_{STD}} \times CF_{STD} \quad (2.15b)$$

bulunur. Referans sensörün kalibrasyonu genellikle primer (birincil) seviye kalibrasyon laboratuvarları tarafından kalorimetrelerle yapılır<sup>(52-53)</sup>.



**Şekil 2.23.** Güç sensörü kalibrasyon sistemi

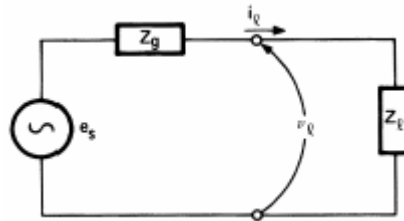
### 2.2.10. Ölçüm Belirsizliği

RF ve mikrodalga ölçümlerinde ölçüm belirsizliğinin bir çok kaynağı vardır. Güç ölçümlerinde, en büyük hatalar neredeyse her zaman sensör ve kaynak uyumsuzluğundan kaynaklanır. Bir çok yönü bulunan uyumsuzluk belirsizlikleri, oldukça komplike, nadiren tam anlaşılabilir ve nadiren düzgün hesaplanan bir yapıya sahiptir. Uyumsuzluğun anlaşılması için gözlemlemeye yardımcı olan işaret akış diyagramı kavramı bilinmelidir. Verim ve kalibrasyon faktörü en önemli sensör belirsizliklerindedir. Bunu güç ölçerinin değişik enstrümantasyon belirsizlikleri takip eder. Sonuçta, toplam belirsizliğe etki eden tüm hatalar incelenmelidir. Dünya metroloji ve kalite komitesi ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ve raporlanması adına yeni bir

yol izlemek ve bunu kabul etmek için çalışma başlatmış ve izlenecek yöntem, İsviçre Geneva'da bulunan The International Standards Organization (ISO) tarafından resmi olarak yayınlanan bir standart olan "ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" ile belirlenmiştir<sup>(54)</sup>. Daha sonra ölçüm belirsizliği kavramı genişletilerek ISO tarafından ISO/IEC 17025 dokümanı ile değiştirilmiştir.

### 2.2.11. RF Devre Tanımları

Düşük frekanslarda bir üretici tanımlamanın metodu, Thevenin ve Norton eşdeğer devrelerini kapsar. Örneğin bir üreticinin Thevenin eşdeğer devresi 2.24'de gösterildiği gibi bir gerilim üretici,  $e_s$ , ve seri olarak bağlı bir empedansa,  $Z_g$ , sahiptir. Bir üretici için  $e_s$ , bir çok elemandan oluşmuş olsa bile, yük açık devre iken çıkış portunun karşısındaki gerilim olarak tanımlanır.  $Z_g$ , üreticinin içindeki bütün kaynaklar sıfıra çekildiğinde üretece bakılınca görülen empedans olarak tanımlanır.



**Şekil 2.24.** Herhangi bir yüke bağlanmış bir Thevenin eşdeğer üretici

Bir üreteç tarafından bir yüke verilen güç yük empedansının bir fonksiyonudur. Yük mükemmel açık devre veya kısa devre ise verilen güç sıfırdır. 2.24'ün analiz edilmesi ile, yüke aktarılan gücün, yük empedansı  $Z_t$ 'nin üreteç empedansı  $Z_g$ 'nin kompleks eşleniği olduğunda, maksimum olacağı görülür. Bu güç seviyesi “üreteçten elde edilen güç”, “maksimum kullanılabilir güç” veya “kullanılabilir güç” olarak adlandırılır.  $Z_t=R_t+jX_t$  ve  $Z_g=R_g+jX_g$  birbirlerinin kompleks eşleniği oldukları zaman direnç değerleri birbirine eşit ve imajiner kısımları genlikte eşit fakat zıt işaretlidir. Bundan dolayı  $R_t=R_g$  ve  $X_t=-X_g$ 'dir. Kompleks eşlenik “\*” ile yazılır ve  $Z_t = Z_g^*$  maksimum güç transferi için gerekli olan şarttır.

Thevenin eşdeğer devresi bir çok sebepten dolayı mikrodalga frekanslarında kullanışlı değildir. Birinci sebep, açık devre gerilimin ölçülmesinin, kapasitans saçaklanması (fringing) ve voltmetre probun yükleme etkisinden dolayı zor olmasıdır. İkinci sebep, dalga boyunun belli bir oranıyla ayırık bulunan iletim yolu boyunca iki nokta arasındaki gerilimin tanımlanması istendiği mikrodalga frekanslarında, gerilim kavramı kullanışlılığını kaybeder. Hatta, dörtgensel dalga kılavuzunda gerilimin ele alındığı problemler vardır. Sonuç olarak, güç kavramı RF ve mikrodalga frekanslarda üreteçleri karakterize etmek için gerilim kavramından çok daha sıklıkla kullanılır.

Açık sonlandırmada harcanan güç her zaman için sıfır olduğundan Thevenin eşdeğer gerilim üreticini tanımlayan açık devre, gücü ölçmede kullanışsızdır. RF üreteçleri karakterize etmek için kullanılan referans empedans neredeyse her zaman  $50 \Omega$ 'dur. Bunun sebebi, ilgilenilen frekans

aralığı boyunca 50  $\Omega$ 'luk bir iletim hattı ile gerçekleşmesinin kolay olması ve sonlandırmanın daha az yansımali olmasıdır.

Karakteristik empedans için standart sembol  $Z_o$  referans empedans için de standarttır. Bazı durumlarda, örneğin, 75 $\Omega$  iletim hattının kullanıldığı 50 $\Omega$  referans empedanslı sistemlerde, bir diğer sembol  $Z_r$  referans empedans için kullanılmalıdır.  $Z_o$  bu tez çalışmasında referans empedans için kullanılmış bir notasyondur. Bundan dolayı bir üreteç, referans yüke,  $Z_o=50\Omega$  verdiği güç ile karakterize edilir. Genelde bu güç üreteçten alınan maksimum kullanılabilen güce eşit değildir,  $Z_g=Z_o$  olursa bu güçler birbirine eşittirler.

Frekanslar 300 MHz'i aştıkça empedans kavramı kullanışlılığını kaybeder ve yerini yansıma katsayısına bırakır. Bir iletim hattında uyumsuz bir yüke doğru görünen empedans iletim hattı boyunca bakılan pozisyona göre sürekli değişir. Empedansın genlik ve fazı hat pozisyonunun bir fonksiyonudur. Yansıma katsayısı sabit bir genliğe sahiptir ve yükten olan uzaklığa lineer bağlı olan bir faz açısına sahiptir.

#### 2.2.12. Yansıma Katsayısı

Gücün, yüke bir çok dalga boyu uzunluğundaki bir iletim hattı ile verildiği mikrodalga frekanslarında, gerilim ve akım oranı (Ohm kanunu) olarak verilen yük tanımının yerine gelen ve yansıyan dalgalar ve ikisinin oranını kullanmak çok daha uygun olacaktır. Pasif bir yükü karakterize etmek için, Ohm kanununun yerine:

$$\frac{b_\ell}{a_\ell} = \Gamma_\ell \quad (2.16)$$

denklemini kullanılır,  $a_\lambda$  gelen dalganın gerilimi ile orantılı,  $b_\lambda$  yansıyan dalganın gerilimi ile orantılıdır ve  $\Gamma_\lambda$  yansıma katsayısıdır. Üç değer de genelde kompleksler ve frekans ile değişirler.  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$  değerleri aşağıdaki denklemlere göre normalize edilirler:

$$a_\ell^2 = P_i \quad (2.17)$$

$$b_\ell^2 = P_r \quad (2.18)$$

$P_i$  yük üzerine gelen güç,  $P_r$  yük tarafından yansıtılan güçtür. Yük tarafından harcanan net güç,  $P_d$ :

$$P_d = P_i - P_r = a_\ell^2 - b_\ell^2 \quad (2.19)$$

ile verilir. Bu güç kaynaktan elde edilen toplam güçtür; sadece ısıya çevrilen gücü kapsamaz, aynı zamanda uzaya ışımaya yoluyla verilen gücü ve teçhizatın diğer parçalarına yardımcı kablolar aracılığı ile akan gücü de kapsar.

İletim hattı teorisi yansıma katsayısı  $\Gamma_\lambda$ 'i empedans  $Z_\lambda$ 'ye şu şekilde ilişkilendirir:

$$\Gamma_\ell = \frac{Z_\ell - Z_o}{Z_\ell + Z_o} \quad (2.20)$$

$Z_o$  sistemin karakteristik empedansıdır. Yük gerilimi,  $V_\lambda$ , ve yük akımı  $I_\lambda$  şu şekildedir:

$V_\lambda$  : (gelen dalganın gerilimi + yansıyan dalganın gerilimi)

$$v_\lambda = \sqrt{Z_o}(a_\ell + b_\ell) \quad (2.21)$$

$I_\lambda$  = (gelen dalganın akımı - yansıyan dalganın akımı)

$$I_\lambda = \frac{1}{\sqrt{Z_o}}(a_\ell - b_\ell) \quad (2.22)$$

ilerleyen dalga içindeki akım gerilimin  $Z_o$  'a bölünmesi ile elde edildiğinden,  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$  'ye göre çözüm şunu verir:

$$a_\ell = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_\ell + Z_o i_\ell) \quad (2.23)$$

$$b_\ell = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_\ell - Z_o i_\ell) \quad (2.24)$$

Bu denklemler birçok literatürde,  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$  'yi tanımlamak için kullanılmaktadır<sup>(55)</sup>. Bununla birlikte buradaki amaç ,  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$  'yi daha iyi tanıtmaktır. Süper pozisyon teoremi,  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$  'ye uygulanırken güce uygulanamaz.

Yansıma katsayısı  $\Gamma_\lambda$ , çoğunlukla genliği  $\rho_\lambda$  ve fazı  $\phi_\lambda$  cinsinden ifade edilir. Buna göre  $\rho_\lambda$ ,  $a_\lambda$ 'ye göre  $b_\lambda$ 'nin genliğini verir.  $\phi_\lambda$ ,  $a_\lambda$ 'ye göre  $b_\lambda$ 'nin fazını verir.

Yansıma katsayısını ölçmenin en genel metodu  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$ 'yi ayrı ayrı gözlemleyip sonrada oranlarını almaktır. Bazen  $a_\lambda$  ve  $b_\lambda$ 'yi ayrı ayrı



gözlemlemek zor olur fakat bir iletim hattı üzerindeki a ve b tarafından oluşturulan karşıt-ilerleyen dalgaların girişim desenini gözlemlemek mümkün olur. Bu desen duran dalga desendir. Bu girişim deseni işaret genliğinin minimum ve maksimum olduğu bölgelere sahiptir. Maksimum bölgeler yapıcı girişim tarafından oluşturulmuş ve  $|a_\lambda| + |b_\lambda|$  genliğine sahiptir. Minimum bölgeler yıkıcı girişim tarafından oluşturulmuş ve  $|a_\lambda| - |b_\lambda|$  genliğine sahiptir. Maksimum genliğin minimum genliğe oranı duran dalga oranı olarak adlandırılır (SWR, bazen duran dalganın gerilim oranı VSWR olarak ). SWR, yarık açılmış bir hat ve hareket edebilen bir prob ile veya network analizör ile ölçülebilir. SWR ile yansımaya katsayısının genliği  $\rho_\lambda$ , arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$SWR = \frac{a_\ell + b_\ell}{a_\ell - b_\ell} = \frac{1 + \frac{b_\ell}{a_\ell}}{1 - \frac{b_\ell}{a_\ell}} = \frac{1 + \rho_\ell}{1 - \rho_\ell} \quad (2.25)$$

### 2.2.13. İşaret Akış Diyagramları

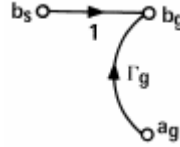
Bir devre elemanı boyunca veya değişik elemanlar arasından akan gücün görüntülenmesi akış diyagramı yardımıyla yapılır ve işaret akış diyagramı olarak adlandırılır<sup>(56)</sup>. Bu metot 1960'ların ortasında network analizörlerin devrelerde dalganın ilerlemesinin açıklanması için kullanıldığı zamanlarda popüler olmuştur.



**Şekil 2.25.** Bir yük için işaret akış diyagramı

Bir yük için kullanılan işaret akış diyagramı (2.25) iki düğüm noktasına sahiptir, biri gelen dalgayı,  $a_l$ , ve diğeri yansıyan dalgayı,  $b_l$ , gösterir. Onlar,  $\Gamma_l$  kolu ile bağlanırlar ve  $\Gamma_l$ ,  $a_l$ 'nin  $b_l$ 'ye dönüşürken nasıl değiştiğini gösterir.

Thevenin eşdeğerin bir üretici karakterize etmek için üretçi empedansı ve açık devre gerilimi isminde iki büyüklüğe sahip olması gibi bir mikrodalga veya RF üretici karakterize etmek için de mikrodalga eşdeğeri  $\Gamma_g$  ve  $b_s$  olarak iki büyüklüğe sahiptir.



**Şekil 2.26.** Bir mikrodalga üretçi için işaret akış diyagramı

Bir üretçi için denklem (2.26'e bakınız) şu şekildedir:

$$b_g = b_s + \Gamma_g a_g \quad (2.26)$$

burada

$b_g$  üretçiden çıkan güç

$a_g$  diğer elemanlardan üretcin üzerine gelen güç

$\Gamma_g$  üretece yönelik yansıma katsayısı

$b_s$  içeride üretilen dalga

$\Gamma_g$  ve  $Z_g$  arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$\Gamma_g = \frac{Z_g - Z_o}{Z_g + Z_o} \quad (2.27)$$

$b_s$  referans yükten üretece giden  $P_{g_{z_o}}$  gücüne şöyle ilişkilendirilir:

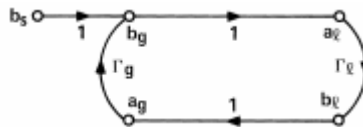
$$P_{g_{z_o}} = b_s^2 \quad (2.28)$$

$b_s$  ve Thevenin gerilimi  $e_s$ , arasında:

$$b_s = \frac{e_s \sqrt{Z_o}}{Z_g + Z_o} \quad (2.29)$$

denklemini vardır.

Üretecin işaret akış diyagramını gelen dalga  $a_g$  ve yansıyan dalga  $b_g$ 'yi gösteren iki düğüm noktasına sahiptir. Üretecin güç üretme kabiliyetini gösteren dahili bir düğüm noktası  $b_s$  vardır, değeri bir olan kol üzerinden  $b_g$ 'ye katılır.  $b_g$ 'nin diğer bir bileşeni üreteçten yansıyan  $a_g$ 'dir.



**Şekil 2.27.** Yüke bağlanmış bir üretcin tam işaret akış diyagramı

Yük ve üretçi için geçerli eşdeğer devreler incelendiği zaman üretçiden yüke güç akışı analiz edilebilir. Yük üretece bağlandığı zaman üretçiden çıkan güç yüke gelen güç, yükten yansıyan güç üretece gelen güç olur. Tamamlanmış işaret akış diyagramı (2.27)  $b_g$ 'nin  $a_\ell$ 'ye ve  $b_\ell$ 'nin  $a_g$ 'ye bağlantısının bir değerli kol ile olduğunu göstermektedir.

İlk olarak, üretçiden gelen güç yük tarafından yansıtılır. Yansıtılan bu güç üretçiden tekrar yansıtılır ve üretçi tarafından üretilen güç ile birleşir ve yeni bir gelen güç üretilir. Yeni gelen güç yansır ve bu şekilde devam eder. Bununla birlikte bu durum cebirsel olarak tanımlanan aşağıdaki aynı sonuca yakınsar.

Yük denklemi şu şekilde yazılır:

$$b_\ell = \Gamma_\ell a_\ell = a_g \quad (2.30)$$

Üreteç denklemi şu şekilde yazılır:

$$b_g = b_s + \Gamma_g a_g = a_\ell \quad (2.31)$$

$a_\ell$  ve  $b_\ell$ ,  $b_s$ ,  $\Gamma_\ell$  ve  $\Gamma_g$  cinsinden çözülebilir:

$$a_\ell = \frac{b_s}{1 - \Gamma_g \Gamma_\ell} \quad (2.32)$$

$$b_\ell = \frac{b_s \Gamma_\ell}{1 - \Gamma_g \Gamma_\ell} \quad (2.33)$$

Bu çözümlerden gelen ve yansıyan güç hesaplanabilir:

$$P_i = a_\ell^2 = b_s^2 \frac{1}{(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2} \quad (2.34)$$

$$P_r = b_\ell^2 = b_s^2 \frac{\Gamma_\ell^2}{(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2} \quad (2.35)$$

Harcanan güç  $P_d$  üreteç tarafından yüke verilen güce ( $P_{g\ell}$ ) eşittir:

$$P_d = P_{g\ell} = P_i - P_r = b_s^2 \frac{1 - \Gamma_\ell^2}{(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2} \quad (2.36)$$

Denklemlerin özel iki durumu vardır. İlki,  $\Gamma_\ell$  sıfır olursa yani yük empedansı  $Z_o$  ise Denklem 2.36 üreteç tarafından  $Z_o$  yüküne verilen güç miktarını verir:

$$P_{g\ell, Z_\ell=Z_o} = P_{gZ_o} = b_s^2 \quad (2.37)$$

bu durum  $b_s$ 'yi kaynağın ürettiği dalga olarak tanımlamamıza yarar. İkinci durumun gerçekleştiği zaman:

$$\Gamma_g = \Gamma_\ell^* \quad (2.38)$$

(\*) kompleks eşleniği gösterir. Denklem 2.38'in yorumu, üreteçten yüke bakan yansıma katsayısı yükten üretece geri bakan yansıma katsayısının kompleks eşleniği şeklindedir. İki yönden bakan empedanslar da birbirinin kompleks eşleniğidir. Üreteç “eşleniksel olarak uyumludur” denir.  $\Gamma_\ell$ , Denklem 2.38'i sağlayacak şekilde ayarlanırsa üreteç maksimum kullanılabilir gücünü ( $P_{av}$ ) açığa çıkarır, ifadesi şöyledir:

$$P_{av} = \frac{b_s^2}{1 - \Gamma_g^2} \quad (2.39)$$

Denklem 2.37 ve 2.39'u karşılaştırırsak,  $P_{av} \geq P_{gZ_0}$  olduğu görülür. Uyumlandırma terimi her iki şart,  $Z_t = Z_0$  ve  $Z_t = Z_g^*$ , için de kullanılmaktadır. Uyumlandırma kelimesi sıfır yansıma katsayısını göstermek adına olduğuunda "Zo uyumlandırma", maksimum güç transferini verecek güç adına olduğuunda ise "eşlenik uyumlandırma" olarak değiştirilmelidir.

Şu anda farklar rahatlıkla görülebilmektedir. Bir güç sensörü bir üretece bağlandığı zaman ölçülen güç, Denklem 2.36'nin  $P_{gZ_0}$ 'ıdır, fakat üretici karakterize eden uygun güç, Denklem 2.37'nin  $P_{gZ_0}$ 'ıdır. , Denklem 2.37'nin Denklem 2.36'ya oranı:

$$\frac{P_{gZ_0}}{P_{g\ell}} = \frac{(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2}{1 - \Gamma_\ell^2} \quad (2.40)$$

veya dB olarak:

$$dB = 10 \log \frac{P_{gZ_0}}{P_{g\ell}} = 10 \log(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2 - 10 \log(1 - \Gamma_\ell^2) \quad (2.41)$$

Bu oran (dB olarak) "Zo uyumsuzluk kaybı" olarak adlandırılır. Denklem 2.40'ın 1'in altında bir değeri vermesi oldukça muhtemeldir. Bundan sonra Denklem 2.41, dB olarak negatif bir sayı verecektir.

Bu durumda  $Z_0$  yüküne transfer edilenden daha fazla bir güç transferi bu özel yüke yapılacaktır. Aslında bu  $Z_0$  uyumsuzluk kaybı, bir kazanç

değeridir. Bu duruma bir örnek üreteç ve yükün eşlenik uyumlu olmaları durumundadır.

Benzer bir fark eşlenik uyumlandırma durumunda mevcuttur; Denklem 2.39'dan  $P_{g\ell}$ 'in ölçülmesi Denklem 2.39'dan  $P_{av}$ 'nin ölçülmesinden farklıdır. Bu denklemlerin oranı:

$$\frac{P_{av}}{P_{g\ell}} = \frac{(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell)^2}{(1 - \Gamma_g^2)(1 - \Gamma_\ell^2)} \quad (2.42)$$

veya dB olarak:

$$dB = 10 \log \frac{P_{av}}{P_{g\ell}} = 10 \log(1 - \Gamma_g \Gamma_\ell^2) - 10 \log(1 - \Gamma_g^2) - 10 \log(1 - \Gamma_\ell^2) \quad (2.43)$$

Bu oran "eşlenik uyumsuzluk oranı" olarak adlandırılır.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

#### a. Mikrodalga Güç Sensörü Parametrelerinin YSA ile Belirlenmesi

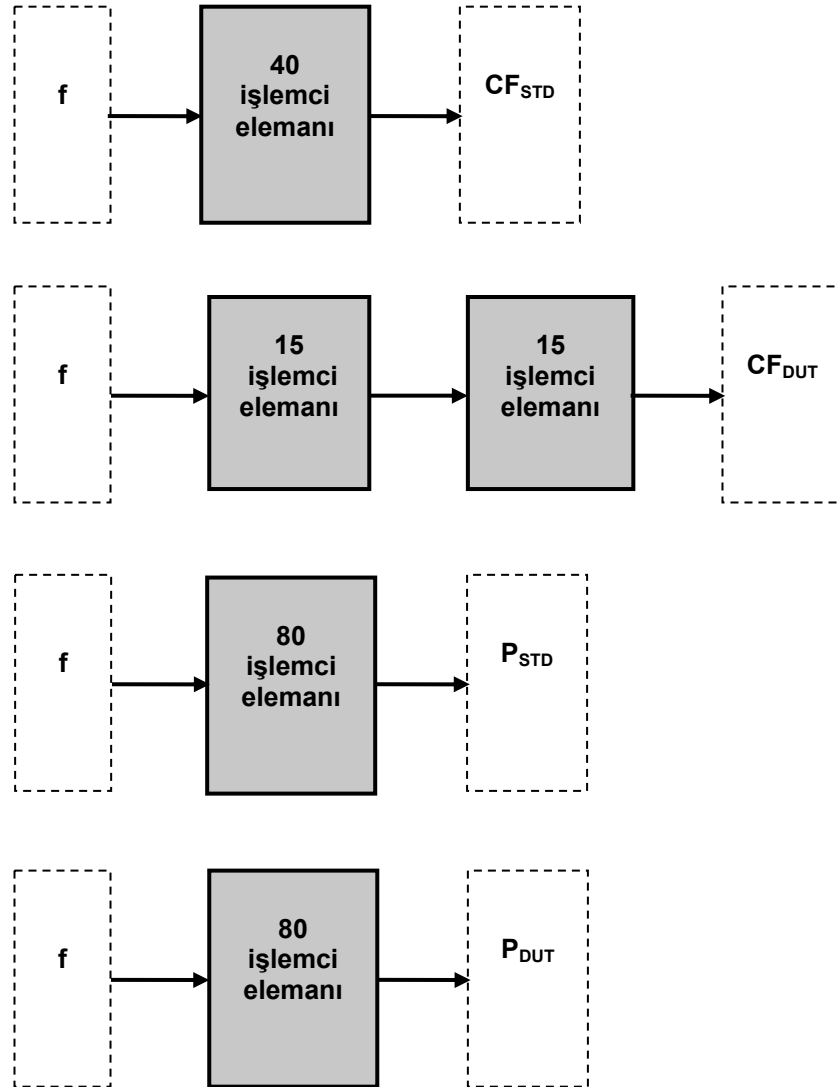
YSA'nın mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon parametreleri hesabında başarısını göstermek için standart g sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CF_{STD}$ ), kalibre edilen güç sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CF_{DUT}$ ), standart g sensöründen elde edilen g değeri ( $P_{STD}$ ) ve kalibre edilen güç sensöründen elde edilen güç değerine ( $P_{DUT}$ ) ilişkin 5 farklı YSA oluşturulmuştur. Verilen örneklerin tümünde frekans giriş olarak kabul edilmiştir. İlk 4 örnekte frekans girişine karşılık yukarıda verilen 4 parametreye ( $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$ ) ait bir giriş bir çıkışlı modeller elde edilirken son örnekte frekansa karşılık aynı anda bu 4 çıkışı üreten ağ yapısı sunulmuştur.

YSA'da kullanılacak olan eğitim ve test verilerini elde etmek amacıyla,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  değerleri için laboratuvar ortamında kurulan kalibrasyon düzeneği ile 0.01 GHz'den 18 GHz'e kadar 225 farklı frekansta g ölçümleri yapılmıştır.  $CF_{STD}$  değerleri st seviye bir kalibrasyon kuruluŐundan alınmıŐ, eğitim ve test için kullanılacak  $CF_{DUT}$  değerleri Denklem 2.15b ile hesaplatılmıŐtır.



### 3.1.1. Bir Giriş Bir Çıkışlı YSA Yapısı ile Elde Edilen Sonuçlar

Laboratuar ortamında kurulan Şekil 2.23'deki kalibrasyon düzeneği ile 0.01 GHz'den 18 GHz'e kadar elde edilen 225 farklı frekanstaki değerden 220 adedi Şekil 3.1'de verilen YSA'ları eğitmek için kullanılırken diğer 5 adedi test için kullanılmıştır.  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin her birinin ayrı ayrı deneysel ve YSA ile elde edilen frekansa bağlı değişimleri karşılaştırılmak üzere Çizelge 3.1.'de listelenmiştir.



**Şekil 3.1.**  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin ayrı ayrı frekansa bağlı değişimlerini belirlemek için oluşturulan YSA yapıları

YSA yapısı olarak, bu tip mühendislik problemlerinin çözümünde başarısını ispatlamış ve literatürde en çok kullanılan YSA tiplerinden biri olan “ileri beslemeli geri yayımlı (feed-forward back-propagation)” ağ modeli seçilmiştir. Eğitim algoritması olarak ise birçok eğitim algoritması denendikten sonra en kısa sürede en doğru çözümleri üreten Levenberg-Marquard metodu kullanılmıştır. Uygulamalara bağlı olarak, farklı işlem elemanı sayılarına sahip 1 ya da 2 gizli katmanlı ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ modellerinin eğitiminde, kalibrasyon faktörlerine ait YSA yapılarında 5000 epoch, güç değerlerine ait YSA yapılarında ise 3000 epoch ile yeterli sonuçların elde edildiği görülmüş ve bu epoch sayılarına ulaşmak için gerekli sürenin 3-50 dakika arasında olduğu gözlenmiştir. Çalışmada kullanılan ağ yapılarına ait parametre değerleri, EK-1’de verilen her bir uygulama için matlab ortamında oluşturulmuş program dosyalarında verilmiştir.

**Çizelge 3.1.**  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin deneysel olarak ve YSA ile elde edilen her birinin ayrı ayrı frekansa bağlı değişimleri

Frekans (GHz)	Deneysel sonuçlar				YSA ile elde edilen sonuçlar (1 Giriş-1 Çıkış)			
	$CF_{STD}$	$CF_{DUT}$	$P_{STD}$ (mW)	$P_{DUT}$ (mW)	$CF_{STD}$	$CF_{DUT}$	$P_{STD}$ (mW)	$P_{DUT}$ (mW)
0,010	99,2	100,2	0,9691	0,9786	99,2	100,2	0,9730	0,9858
0,015	99,6	100,7	0,9867	0,9976	99,6	100,7	0,9771	0,9858
0,020	99,9	100,7	0,9747	0,9816	99,9	100,7	0,9799	0,9857
<b>0,025*</b>	<b>100,1</b>	<b>100,6</b>	<b>0,9804</b>	<b>0,9843</b>	<b>100,1</b>	<b>100,6</b>	<b>0,9818</b>	<b>0,9855</b>
0,030	100,2	100,5	0,9800	0,9822	100,2	100,5	0,9830	0,9853
0,035	100,2	100,4	0,9849	0,9863	100,2	100,4	0,9836	0,9849
0,040	100,2	100,3	0,9838	0,9846	100,2	100,3	0,9838	0,9843
0,045	100,1	100,2	0,9861	0,9862	100,2	100,2	0,9837	0,9835
0,050	100,1	100,1	0,9829	0,9824	100,1	100,1	0,9833	0,9826
0,055	100,1	100,0	0,9833	0,9823	100,1	100,0	0,9829	0,9817
0,060	100,1	100,0	0,9786	0,9772	100,1	100,0	0,9823	0,9810
0,065	100,1	100,0	0,9821	0,9804	100,1	99,9	0,9818	0,9805

0,070	100,0	99,8	0,9855	0,9834	100,0	99,9	0,9812	0,9801
0,075	100,0	99,8	0,9800	0,9778	100,0	99,8	0,9807	0,9799
0,080	100,0	99,8	0,9792	0,9769	100,0	99,8	0,9802	0,9797
0,085	100,0	99,8	0,9790	0,9764	100,0	99,8	0,9798	0,9797
0,090	100,0	99,8	0,9792	0,9765	100,0	99,8	0,9795	0,9796
0,095	100,0	99,8	0,9795	0,9767	100,0	99,8	0,9793	0,9796
0,100	100,0	99,7	0,9796	0,9767	100,0	99,7	0,9792	0,9796
0,125	100,0	99,7	0,9806	0,9771	100,0	99,7	0,9799	0,9795
0,150	100,0	99,7	0,9819	0,9782	100,0	99,7	0,9821	0,9795
0,175	100,0	99,6	0,9843	0,9803	100,1	99,7	0,9849	0,9795
0,200	100,1	99,7	0,9870	0,9827	100,1	99,7	0,9875	0,9795
0,225	100,1	99,7	0,9893	0,9847	100,1	99,7	0,9893	0,9795
0,250	100,1	99,7	0,9905	0,9857	100,1	99,7	0,9896	0,9794
0,275	100,1	99,6	0,9889	0,9840	100,1	99,6	0,9884	0,9792
0,300	100,1	99,6	0,9860	0,9808	100,1	99,6	0,9859	0,9787
0,325	100,1	99,6	0,9817	0,9763	100,1	99,6	0,9828	0,9777
0,350	100,1	99,6	0,9787	0,9730	100,1	99,6	0,9800	0,9760
0,375	100,1	99,5	0,9786	0,9727	100,1	99,5	0,9780	0,9734
0,400	100,1	99,5	0,9785	0,9723	100,1	99,5	0,9767	0,9708
0,425	100,1	99,4	0,9777	0,9709	100,1	99,4	0,9760	0,9688
0,450	100,0	99,3	0,9763	0,9686	100,1	99,3	0,9756	0,9677
0,475	100,0	99,2	0,9738	0,9656	100,0	99,2	0,9753	0,9671
0,500	100,0	99,2	0,9721	0,9637	100,0	99,2	0,9750	0,9668
0,525	100,0	99,2	0,9727	0,9646	100,0	99,2	0,9747	0,9666
0,550	100,0	99,3	0,9738	0,9663	100,0	99,2	0,9743	0,9664
0,575	99,9	99,2	0,9760	0,9690	99,9	99,2	0,9737	0,9662
0,600	99,9	99,3	0,9776	0,9708	99,9	99,2	0,9731	0,9659
<b>0,625*</b>	<b>99,8</b>	<b>99,2</b>	<b>0,9719</b>	<b>0,9654</b>	<b>99,9</b>	<b>99,2</b>	<b>0,9723</b>	<b>0,9655</b>
0,650	99,8	99,2	0,9663	0,9600	99,8	99,2	0,9714	0,9649
0,675	99,8	99,2	0,9690	0,9628	99,8	99,2	0,9703	0,9642
0,700	99,8	99,2	0,9717	0,9656	99,7	99,2	0,9690	0,9632
0,725	99,7	99,1	0,9698	0,9637	99,7	99,1	0,9676	0,9620
0,750	99,7	99,1	0,9665	0,9604	99,7	99,1	0,9661	0,9605
0,775	99,6	99,0	0,9636	0,9576	99,6	99,0	0,9646	0,9587
0,800	99,6	99,0	0,9614	0,9553	99,6	99,0	0,9630	0,9567
0,825	99,6	99,0	0,9606	0,9540	99,6	98,9	0,9614	0,9546
0,850	99,5	98,8	0,9600	0,9531	99,5	98,9	0,9599	0,9526
0,875	99,5	98,8	0,9594	0,9522	99,5	98,8	0,9586	0,9507
0,900	99,5	98,8	0,9587	0,9511	99,5	98,7	0,9573	0,9491
0,925	99,4	98,6	0,9556	0,9473	99,5	98,6	0,9562	0,9477
0,950	99,4	98,5	0,9531	0,9442	99,4	98,5	0,9553	0,9466
0,975	99,4	98,5	0,9544	0,9450	99,4	98,5	0,9545	0,9458
1,000	99,4	98,4	0,9557	0,9459	99,4	98,4	0,9538	0,9452
1,100	99,4	98,5	0,9537	0,9446	99,4	98,5	0,9523	0,9440
1,200	99,4	98,6	0,9506	0,9426	99,4	98,6	0,9516	0,9427
1,300	99,4	98,6	0,9511	0,9433	99,4	98,6	0,9517	0,9433
1,400	99,4	98,7	0,9564	0,9488	99,3	98,6	0,9563	0,9488

1,500	99,3	98,6	0,9599	0,9524	99,3	98,6	0,9598	0,9524
1,600	99,3	98,6	0,9598	0,9522	99,3	98,6	0,9599	0,9522
1,700	99,3	98,5	0,9597	0,9519	99,3	98,6	0,9599	0,9519
1,800	99,3	98,5	0,9612	0,9533	99,3	98,5	0,9611	0,9533
1,900	99,3	98,5	0,9689	0,9607	99,3	98,5	0,9690	0,9607
2,000	99,3	98,5	0,9740	0,9656	99,3	98,5	0,9738	0,9656
2,100	99,3	98,5	0,9734	0,9650	99,3	98,5	0,9736	0,9650
2,200	99,3	98,5	0,9722	0,9637	99,3	98,5	0,9723	0,9637
2,300	99,2	98,4	0,9706	0,9621	99,2	98,4	0,9704	0,9621
2,400	99,2	98,4	0,9679	0,9597	99,2	98,4	0,9680	0,9597
2,500	99,2	98,4	0,9657	0,9577	99,2	98,4	0,9658	0,9577
2,600	99,1	98,4	0,9643	0,9566	99,1	98,4	0,9643	0,9566
2,700	99,1	98,4	0,9634	0,9558	99,1	98,4	0,9634	0,9558
2,800	99,1	98,4	0,9635	0,9560	99,1	98,3	0,9635	0,9560
2,900	99,0	98,2	0,9650	0,9571	99,0	98,3	0,9650	0,9571
3,000	99,0	98,2	0,9660	0,9579	99,0	98,2	0,9660	0,9579
3,100	99,0	98,2	0,9636	0,9552	99,0	98,2	0,9636	0,9552
3,200	99,0	98,1	0,9598	0,9509	99,0	98,1	0,9598	0,9509
3,300	98,9	98,0	0,9592	0,9502	98,9	98,1	0,9592	0,9502
<b>3,400*</b>	<b>98,9</b>	<b>98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,9508</b>	<b>98,9</b>	<b>98,0</b>	<b>0,9601</b>	<b>0,9505</b>
3,500	98,9	98,0	0,9608	0,9513	98,9	97,9	0,9608	0,9513
3,600	98,9	97,9	0,9615	0,9514	98,9	97,9	0,9615	0,9515
3,700	98,8	97,8	0,9620	0,9515	98,8	97,8	0,9620	0,9514
3,800	98,8	97,8	0,9611	0,9505	98,8	97,8	0,9611	0,9505
3,900	98,8	97,7	0,9556	0,9450	98,8	97,7	0,9556	0,9450
4,000	98,8	97,7	0,9521	0,9414	98,8	97,7	0,9521	0,9414
4,100	98,8	97,7	0,9526	0,9419	98,8	97,7	0,9526	0,9419
4,200	98,8	97,7	0,9538	0,9430	98,8	97,7	0,9538	0,9430
4,300	98,8	97,8	0,9556	0,9451	98,8	97,8	0,9556	0,9451
4,400	98,8	97,9	0,9591	0,9496	98,8	97,8	0,9591	0,9496
4,500	98,7	97,8	0,9610	0,9522	98,7	97,8	0,9610	0,9522
4,600	98,7	97,8	0,9568	0,9480	98,7	97,8	0,9568	0,9480
4,700	98,7	97,9	0,9498	0,9413	98,7	97,9	0,9498	0,9413
4,800	98,7	98,0	0,9470	0,9397	98,7	98,0	0,9470	0,9397
4,900	98,7	98,1	0,9458	0,9394	98,7	98,1	0,9458	0,9394
5,000	98,7	98,1	0,9453	0,9393	98,7	98,1	0,9453	0,9393
5,100	98,7	98,1	0,9465	0,9401	98,7	98,1	0,9465	0,9401
5,200	98,7	98,0	0,9484	0,9413	98,7	98,0	0,9484	0,9413
5,300	98,7	98,0	0,9486	0,9414	98,7	98,0	0,9486	0,9414
5,400	98,7	98,0	0,9478	0,9405	98,7	98,0	0,9478	0,9405
5,500	98,7	97,9	0,9473	0,9395	98,7	97,9	0,9473	0,9395
5,600	98,6	97,7	0,9480	0,9391	98,6	97,7	0,9480	0,9391
5,700	98,6	97,6	0,9490	0,9386	98,6	97,6	0,9490	0,9386
5,800	98,6	97,5	0,9489	0,9377	98,6	97,5	0,9489	0,9377
5,900	98,6	97,4	0,9476	0,9359	98,6	97,4	0,9476	0,9359
6,000	98,6	97,4	0,9467	0,9348	98,6	97,4	0,9467	0,9348
6,100	98,6	97,3	0,9478	0,9353	98,6	97,3	0,9478	0,9353

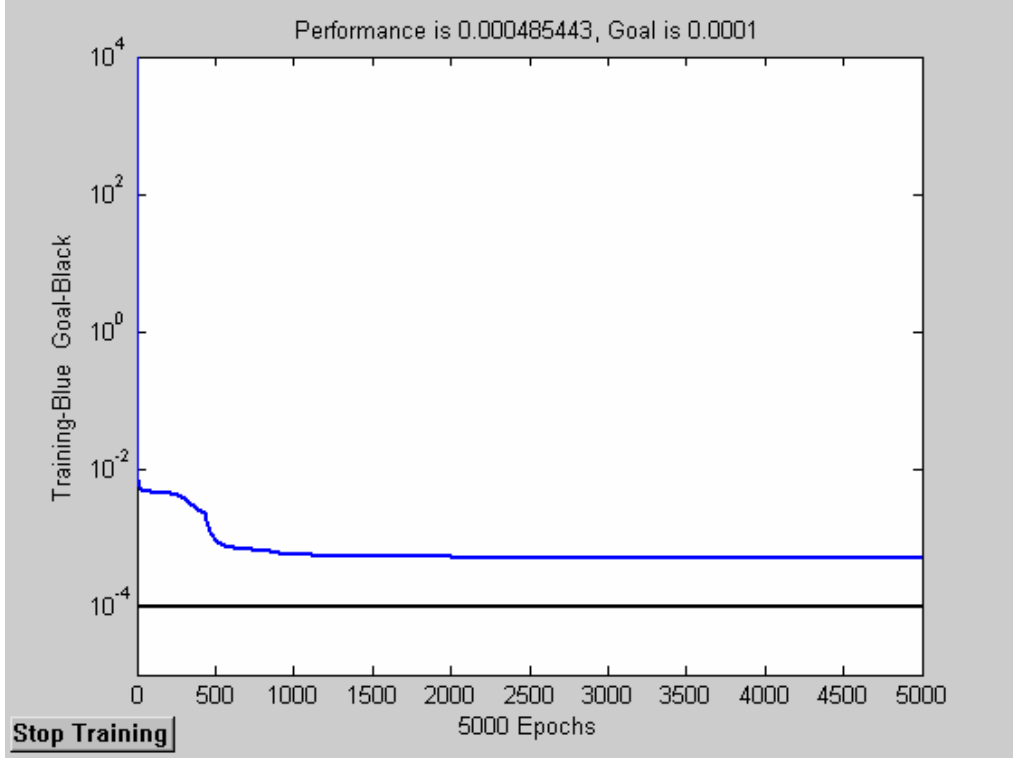
6,200	98,6	97,3	0,9495	0,9362	98,6	97,3	0,9495	0,9362
6,300	98,6	97,2	0,9498	0,9363	98,6	97,2	0,9498	0,9363
6,400	98,6	97,2	0,9496	0,9361	98,6	97,2	0,9496	0,9361
6,500	98,6	97,2	0,9494	0,9357	98,6	97,2	0,9494	0,9357
6,600	98,5	97,1	0,9484	0,9347	98,5	97,1	0,9484	0,9347
6,700	98,5	97,2	0,9469	0,9336	98,5	97,2	0,9469	0,9336
6,800	98,5	97,2	0,9462	0,9334	98,5	97,2	0,9462	0,9334
6,900	98,5	97,3	0,9457	0,9335	98,5	97,3	0,9457	0,9335
7,000	98,5	97,3	0,9454	0,9336	98,5	97,3	0,9454	0,9336
7,100	98,5	97,3	0,9453	0,9335	98,5	97,3	0,9453	0,9335
7,200	98,5	97,3	0,9452	0,9332	98,5	97,3	0,9452	0,9332
7,300	98,5	97,3	0,9447	0,9325	98,5	97,3	0,9447	0,9325
7,400	98,5	97,3	0,9424	0,9301	98,5	97,3	0,9424	0,9301
7,500	98,5	97,2	0,9402	0,9275	98,5	97,2	0,9402	0,9275
<b>7,600*</b>	<b>98,4</b>	<b>97</b>	<b>0,9388</b>	<b>0,9246</b>	<b>98,5</b>	<b>97,0</b>	<b>0,9384</b>	<b>0,9241</b>
7,700	98,4	96,8	0,9378	0,9220	98,4	96,8	0,9378	0,9220
7,800	98,4	96,7	0,9377	0,9216	98,4	96,7	0,9377	0,9216
7,900	98,4	96,7	0,9382	0,9216	98,4	96,7	0,9382	0,9216
8,000	98,4	96,6	0,9391	0,9217	98,4	96,6	0,9391	0,9217
8,100	98,4	96,5	0,9429	0,9242	98,4	96,5	0,9429	0,9242
8,200	98,3	96,3	0,9479	0,9280	98,3	96,3	0,9479	0,9280
8,300	98,3	96,3	0,9485	0,9284	98,3	96,3	0,9485	0,9284
8,400	98,2	96,2	0,9465	0,9266	98,2	96,2	0,9465	0,9266
8,500	98,1	96,1	0,9436	0,9239	98,1	96,1	0,9436	0,9239
8,600	98,1	96,1	0,9383	0,9185	98,1	96,1	0,9383	0,9185
8,700	98,0	96,0	0,9325	0,9126	98,0	96,0	0,9325	0,9126
8,800	97,9	95,9	0,9324	0,9124	97,9	95,9	0,9324	0,9124
8,900	97,9	95,9	0,9371	0,9173	97,9	95,9	0,9371	0,9173
9,000	97,9	95,9	0,9402	0,9204	97,9	95,9	0,9402	0,9204
9,100	97,9	95,9	0,9384	0,9184	97,9	95,9	0,9384	0,9184
9,200	97,9	95,8	0,9349	0,9144	97,9	95,8	0,9349	0,9144
9,300	98,0	95,8	0,9320	0,9109	98,0	95,8	0,9320	0,9109
9,400	98,0	95,8	0,9290	0,9073	98,0	95,8	0,9290	0,9073
9,500	98,1	95,8	0,9275	0,9054	98,1	95,8	0,9275	0,9054
9,600	98,1	95,7	0,9300	0,9070	98,1	95,7	0,9300	0,9070
9,700	98,1	95,6	0,9337	0,9094	98,1	95,7	0,9337	0,9094
9,800	98,2	95,7	0,9339	0,9093	98,2	95,7	0,9339	0,9093
9,900	98,2	95,6	0,9308	0,9061	98,2	95,6	0,9308	0,9061
10,000	98,2	95,6	0,9288	0,9037	98,2	95,6	0,9288	0,9037
10,100	98,2	95,5	0,9287	0,9030	98,2	95,5	0,9287	0,9030
10,200	98,1	95,4	0,9286	0,9026	98,1	95,4	0,9286	0,9026
10,300	98,0	95,3	0,9293	0,9031	98,0	95,3	0,9293	0,9031
10,400	97,9	95,2	0,9327	0,9062	97,9	95,2	0,9327	0,9062
10,500	97,8	95,0	0,9350	0,9082	97,8	95,1	0,9350	0,9082
10,600	97,6	94,9	0,9328	0,9062	97,6	94,9	0,9328	0,9062
10,700	97,5	94,8	0,9284	0,9021	97,5	94,8	0,9284	0,9021
10,800	97,4	94,7	0,9240	0,8977	97,4	94,7	0,9240	0,8977

10,900	97,3	94,5	0,9187	0,8921	97,3	94,6	0,9187	0,8921
11,000	97,3	94,5	0,9160	0,8892	97,3	94,4	0,9160	0,8892
11,100	97,3	94,4	0,9202	0,8926	97,3	94,4	0,9202	0,8927
11,200	97,3	94,3	0,9273	0,8982	97,3	94,3	0,9273	0,8981
11,300	97,4	94,3	0,9303	0,9001	97,4	94,3	0,9303	0,9002
11,400	97,4	94,2	0,9318	0,9008	97,4	94,3	0,9318	0,9008
11,500	97,5	94,3	0,9324	0,9011	97,5	94,3	0,9324	0,9011
11,600	97,6	94,4	0,9257	0,8948	97,6	94,4	0,9257	0,8948
11,700	97,6	94,4	0,9152	0,8851	97,6	94,5	0,9152	0,8851
11,800	97,7	94,6	0,9136	0,8838	97,7	94,6	0,9136	0,8838
11,900	97,7	94,7	0,9159	0,8872	97,7	94,7	0,9159	0,8872
12,000	97,7	94,8	0,9192	0,8919	97,7	94,8	0,9192	0,8919
12,100	97,7	95,0	0,9259	0,8995	97,7	94,9	0,9259	0,8995
12,200	97,6	94,9	0,9334	0,9074	97,6	95,0	0,9334	0,9074
12,300	97,6	95,0	0,9314	0,9060	97,6	95,0	0,9314	0,9060
12,400	97,5	95,1	0,9145	0,8912	97,5	95,1	0,9145	0,8912
12,500	97,4	95,1	0,9035	0,8817	97,4	95,1	0,9035	0,8817
12,600	97,3	95,0	0,9042	0,8825	97,3	95,0	0,9042	0,8825
12,700	97,2	95,0	0,9057	0,8844	97,2	95,0	0,9057	0,8845
12,800	97,1	94,9	0,9081	0,8870	97,1	94,9	0,9081	0,8870
12,900	97,1	94,9	0,9127	0,8915	97,1	94,9	0,9127	0,8915
13,000	97,0	94,8	0,9153	0,8940	97,0	94,8	0,9153	0,8940
13,100	97,0	94,6	0,9087	0,8860	97,0	94,6	0,9087	0,8860
13,200	96,9	94,3	0,8986	0,8737	96,9	94,3	0,8986	0,8737
13,300	96,9	94,2	0,8975	0,8720	96,9	94,2	0,8975	0,8720
13,400	96,8	94,0	0,9020	0,8753	96,8	94,0	0,9020	0,8753
13,500	96,8	93,8	0,9056	0,8774	96,8	93,8	0,9056	0,8774
13,600	96,7	93,6	0,9069	0,8770	96,7	93,6	0,9069	0,8770
13,700	96,7	93,4	0,9077	0,8759	96,7	93,4	0,9077	0,8759
13,800	96,7	93,2	0,9061	0,8730	96,7	93,2	0,9061	0,8729
13,900	96,6	93,1	0,8968	0,8642	96,6	93,1	0,8968	0,8643
14,000	96,6	93,2	0,8907	0,8588	96,6	93,2	0,8907	0,8587
14,100	96,6	93,2	0,9023	0,8698	96,6	93,2	0,9023	0,8699
14,200	96,5	93,0	0,9202	0,8868	96,5	93,0	0,9203	0,8866
14,300	96,5	93,1	0,9228	0,8898	96,5	93,0	0,9224	0,8899
14,400	96,4	93,3	0,9177	0,8881	96,4	93,4	0,9183	0,8885
14,500	96,4	93,8	0,9105	0,8855	96,4	93,8	0,9103	0,8850
14,600	96,4	94,2	0,8989	0,8776	96,4	94,1	0,8986	0,8778
14,700	96,3	94,3	0,8868	0,8680	96,3	94,3	0,8872	0,8681
14,800	96,3	94,4	0,8865	0,8688	96,3	94,5	0,8862	0,8687
14,900	96,3	94,8	0,8962	0,8820	96,3	94,8	0,8964	0,8823
15,000	96,3	95,1	0,9025	0,8905	96,3	95,0	0,9023	0,8900
15,100	96,3	95,1	0,9020	0,8903	96,3	95,2	0,9021	0,8908
15,200	96,3	95,2	0,9008	0,8898	96,3	95,2	0,9009	0,8899
15,300	96,4	95,4	0,8988	0,8887	96,4	95,3	0,8988	0,8884
15,400	96,4	95,5	0,8949	0,8861	96,4	95,5	0,8947	0,8862
15,500	96,5	95,7	0,8926	0,8846	96,5	95,7	0,8929	0,8846

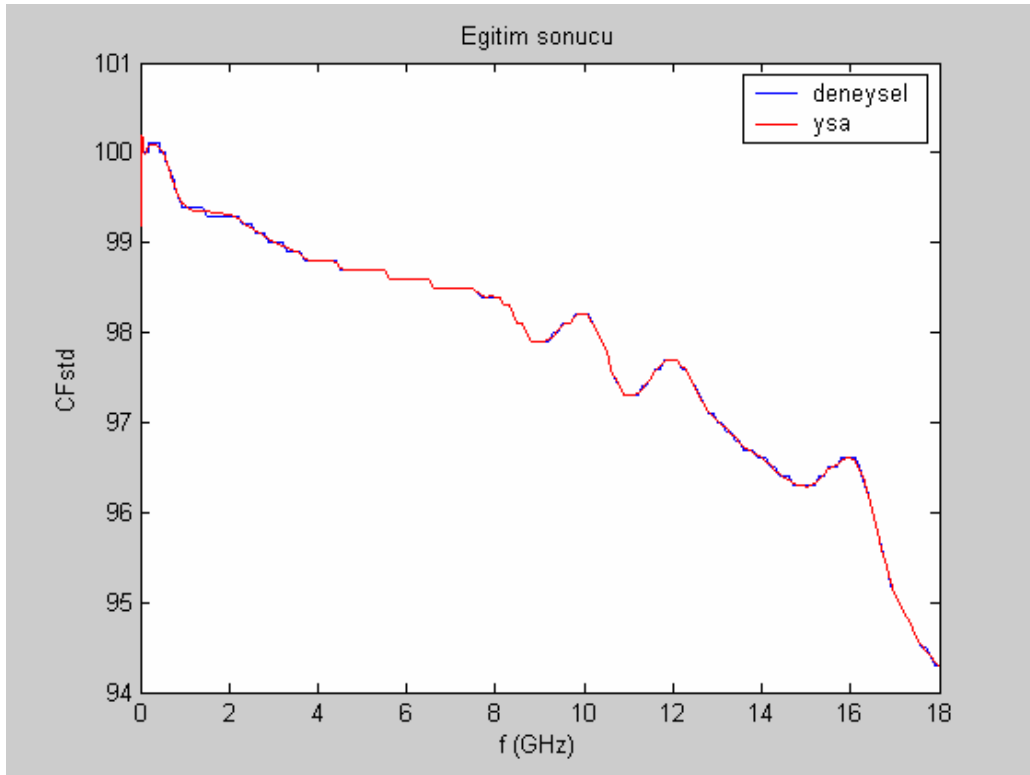
15,600	96,5	95,5	0,9000	0,8899	96,5	95,5	0,9000	0,8899
15,700	96,5	95,1	0,9119	0,8981	96,5	95,1	0,9115	0,8980
15,800	96,6	95,0	0,9151	0,8998	96,6	95,0	0,9159	0,8998
15,900	96,6	95,0	0,9156	0,8998	96,6	95,0	0,9148	0,8997
16,000	96,6	94,9	0,9163	0,8998	96,6	94,9	0,9164	0,9005
16,100	96,6	94,7	0,9212	0,9023	96,6	94,7	0,9220	0,9024
16,200	96,5	94,3	0,9277	0,9060	96,5	94,3	0,9270	0,9047
16,300	96,3	94,1	0,9279	0,9061	96,4	94,1	0,9274	0,9058
16,400	96,2	94,2	0,9219	0,9019	96,2	94,2	0,9229	0,9037
<b>16,500*</b>	<b>96</b>	<b>94,1</b>	<b>0,9156</b>	<b>0,8971</b>	<b>96,0</b>	<b>94,1</b>	<b>0,9158</b>	<b>0,8976</b>
16,600	95,8	93,9	0,9103	0,8920	95,8	93,9	0,9094	0,8904
16,700	95,6	93,7	0,9061	0,8875	95,6	93,7	0,9062	0,8874
16,800	95,4	93,6	0,9064	0,8885	95,4	93,6	0,9071	0,8909
16,900	95,2	93,8	0,9115	0,8975	95,2	93,8	0,9112	0,8971
17,000	95,1	94,0	0,9148	0,9033	95,1	94,0	0,9147	0,9004
17,100	95,0	93,9	0,9080	0,8974	95,0	93,9	0,9081	0,8981
17,200	94,9	94,1	0,8965	0,8883	94,9	94,1	0,8963	0,8917
17,300	94,8	94,4	0,8913	0,8867	94,8	94,4	0,8917	0,8856
17,400	94,7	94,7	0,8884	0,8876	94,7	94,7	0,8878	0,8845
17,500	94,6	94,9	0,8872	0,8892	94,6	94,9	0,8875	0,8910
17,600	94,5	94,7	0,9004	0,9020	94,5	94,7	0,9005	0,9039
17,700	94,5	94,5	0,9207	0,9202	94,5	94,5	0,9199	0,9176
17,800	94,4	94,3	0,9245	0,9235	94,4	94,3	0,9259	0,9248
17,900	94,3	94,3	0,9222	0,9214	94,3	94,3	0,9208	0,9211
18,000	94,3	94,3	0,9134	0,9133	94,3	94,3	0,9139	0,9133

\* Eğitimde kullanılmayan, sadece test için kullanılan deneysel ve YSA ile elde edilen değerlerdir.

Yapılan ilk 4 uygulamada,  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  değerlerine ait YSA ile elde edilen sonuçlara ait program sonu elde edilen performans ile eğitim ve test grafikleri aşağıda verilmiştir.

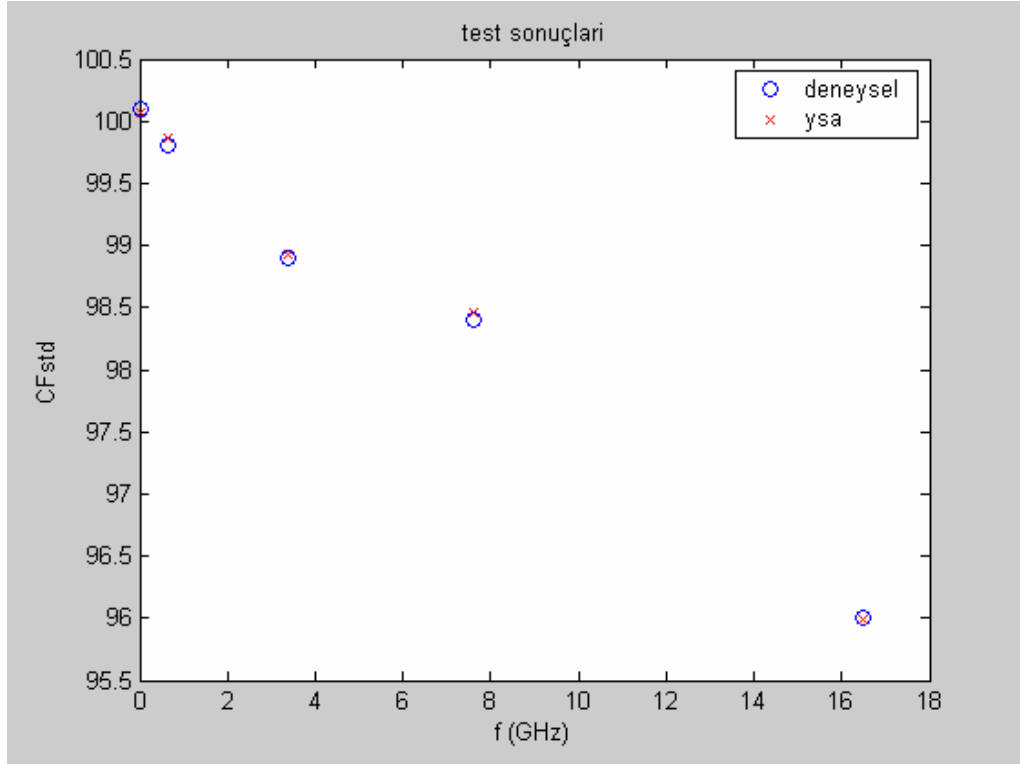


**Şekil 3.2.** CF<sub>STD</sub> için eğitimin epoch sayısına bağlı değişimi.

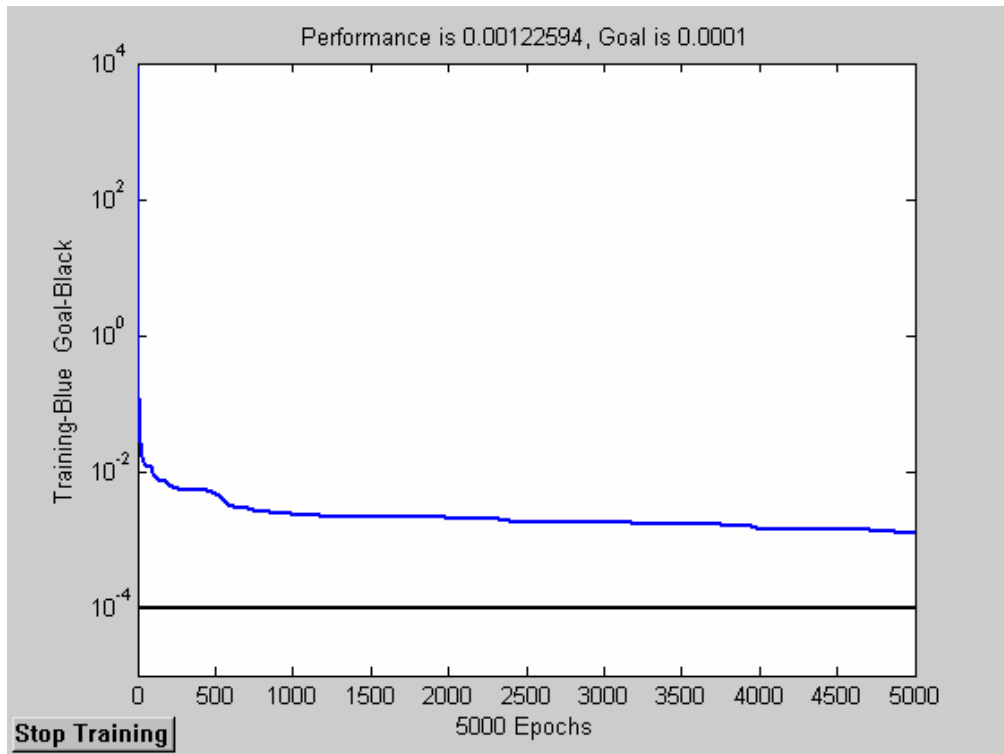


**Şekil 3.3.** CF<sub>STD</sub> değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları.

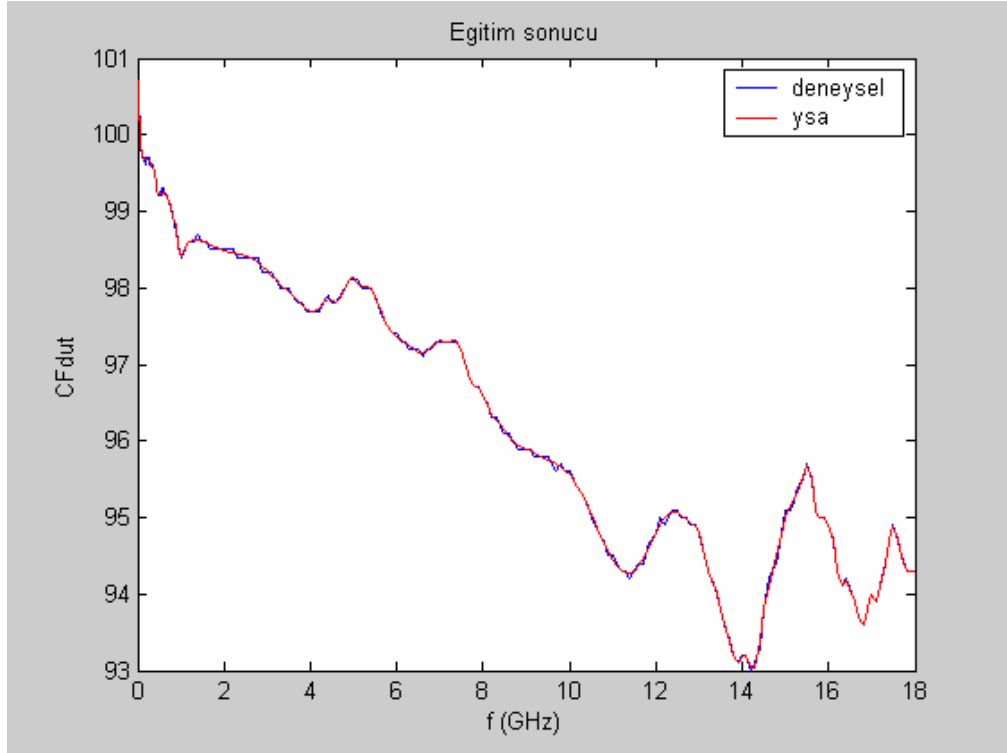




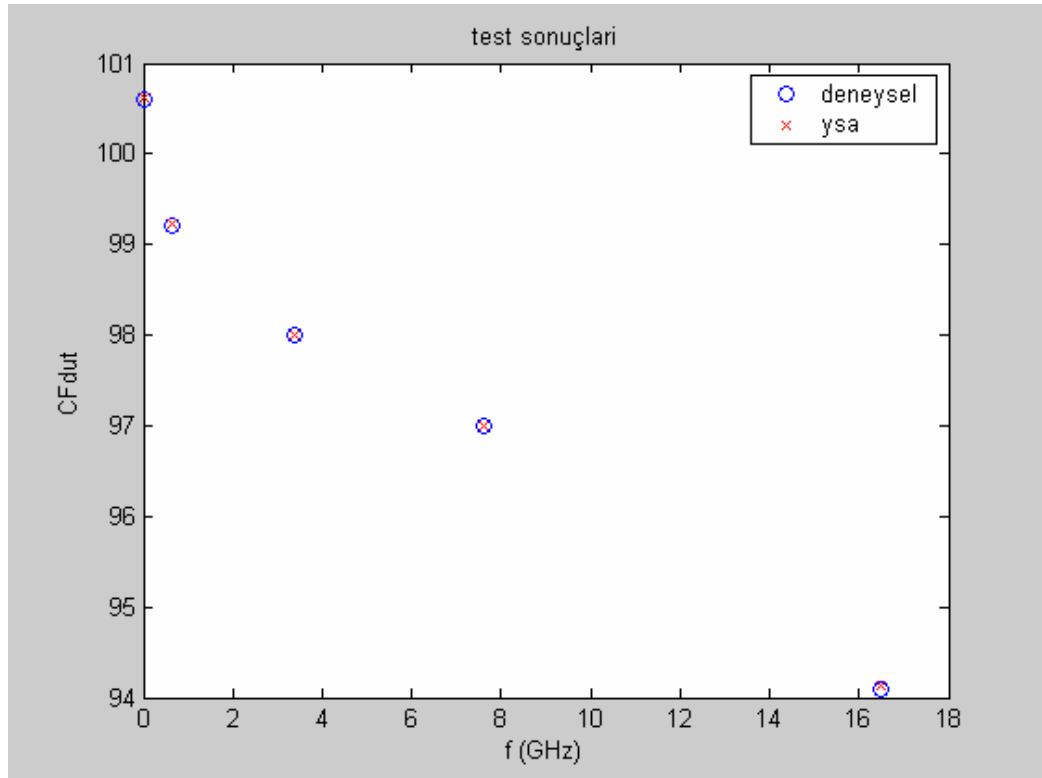
**Şekil 3.4.**  $CF_{STD}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları.



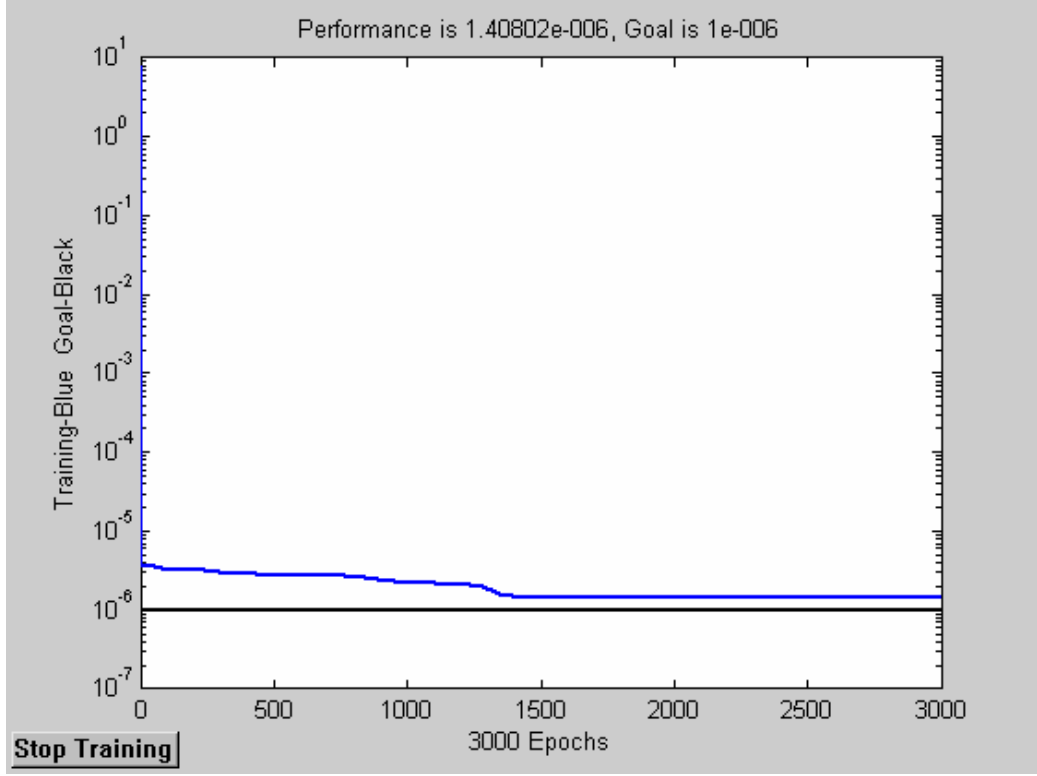
**Şekil 3.5.**  $CF_{DUT}$  için eğitimin epoch sayısına bağlı değişimi.



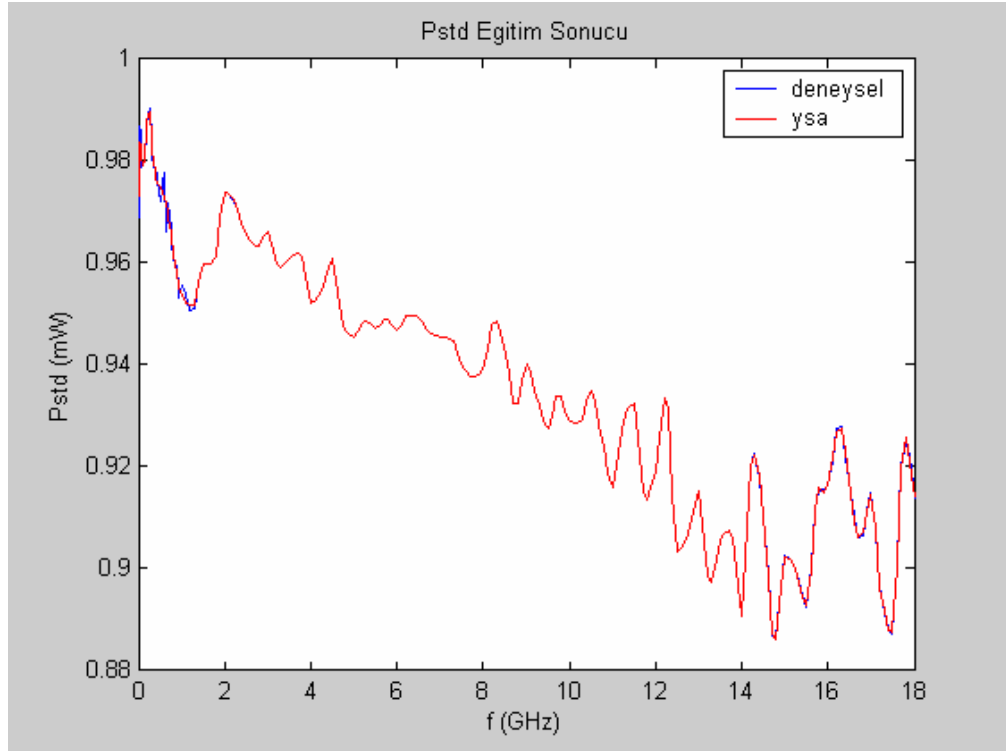
**Şekil 3.6.**  $CF_{DUT}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları.



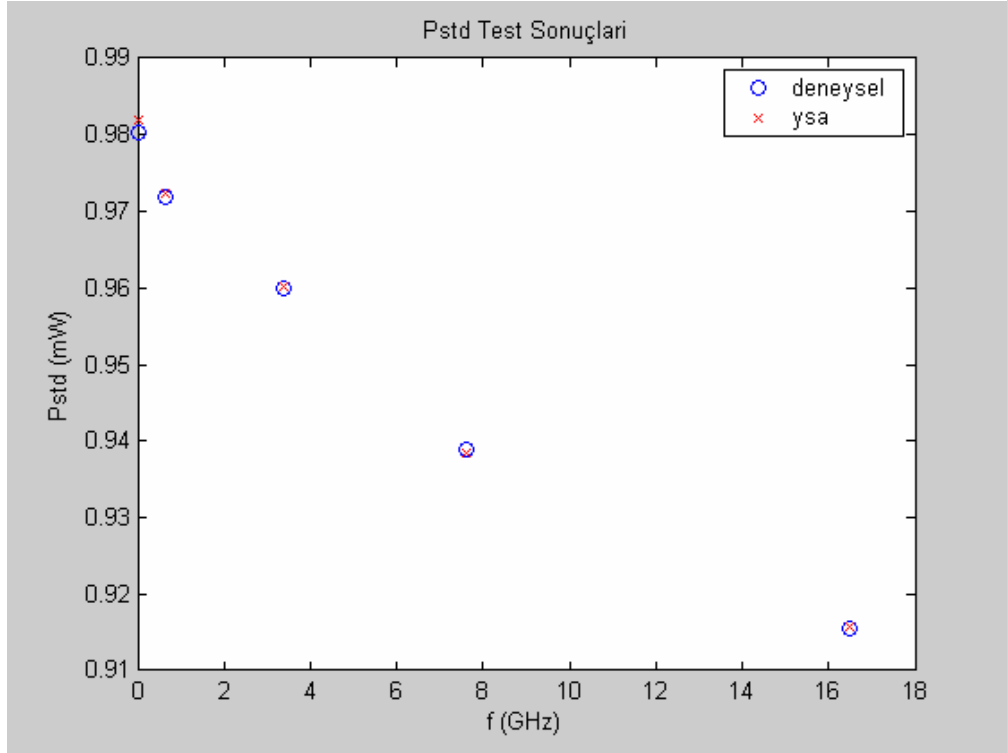
**Şekil 3.7.**  $CF_{DUT}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları.



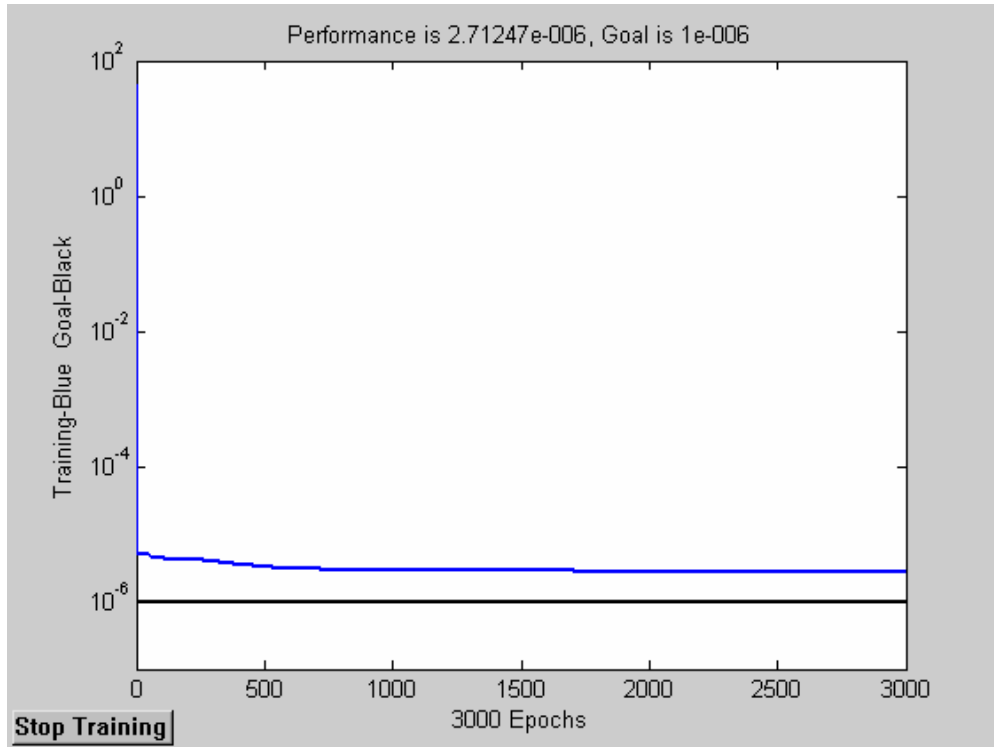
**Şekil 3.8.**  $P_{STD}$  için eğitimin epoch sayısına bağlı değişimi.



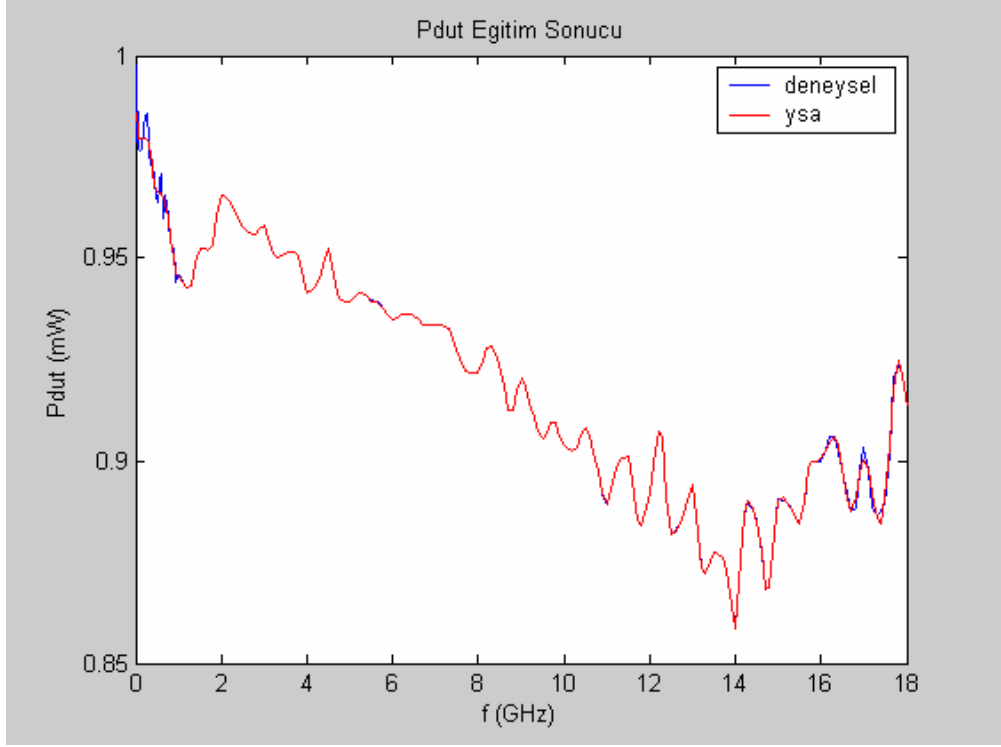
**Şekil 3.9.**  $P_{STD}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları.



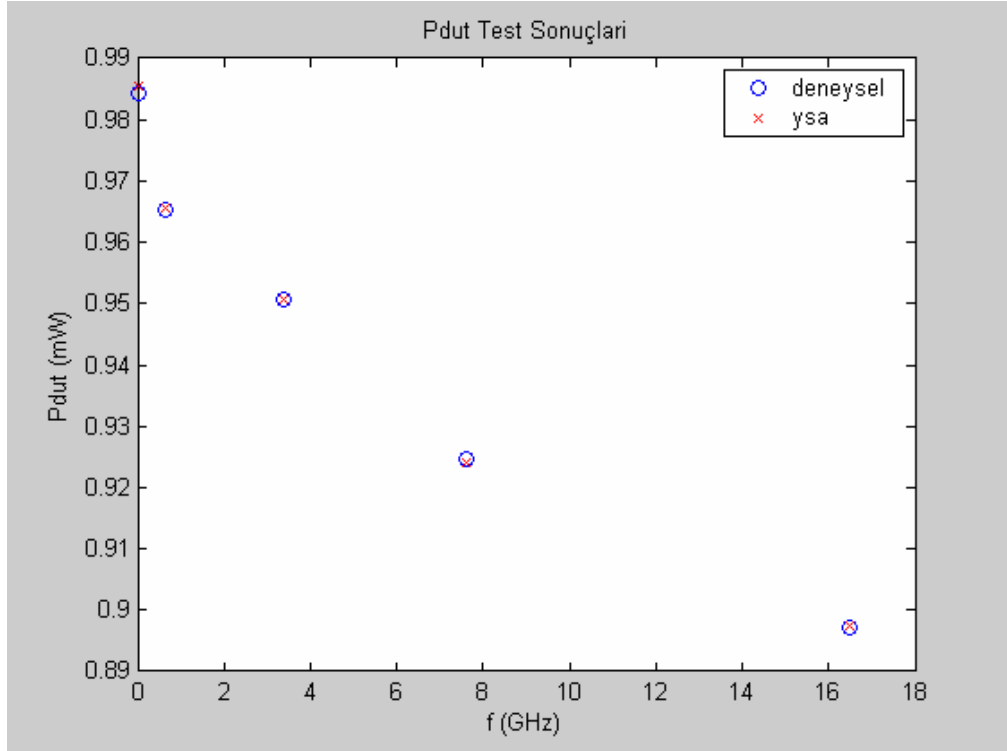
**Şekil 3.10.**  $P_{STD}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları



**Şekil 3.11.**  $P_{DUT}$  için eğitimin epoch sayısına bağlı değişimi



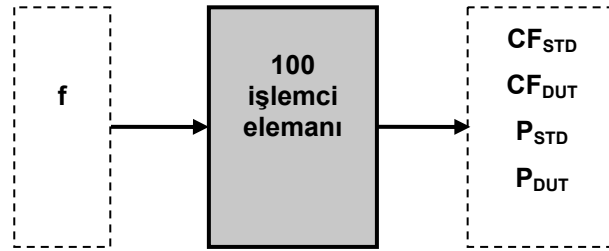
**Şekil 3.12.**  $P_{DUT}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları



**Şekil 3.13.**  $P_{DUT}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları

### 3.1.2. Bir Giriş Dört Çıkışlı YSA Yapısı ile Elde Edilen Sonuçlar

Bir giriş bir çıkışlı YSA yapısı ile elde edilen sonuçlarla mukayese yapmak amacıyla laboratuvar ortamında elde edilen 225 farklı frekanstaki değerden 220 adedi, frekansa karşılık aynı anda 4 parametreye ait çıkışları üreten Şekil 3.14'deki YSA'yı eğitmek için kullanılırken diğer 5 adedi test için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2.'de sunulmuştur.



**Şekil 3.14.**  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin birlikte frekansa bağlı değişimlerini belirlemek için oluşturulan YSA yapısı

**Çizelge 3.2.**  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  parametrelerinin birlikte deneysel olarak ve YSA ile elde edilen frekansa bağlı değişimleri

Frekans (GHz)	Deneysel sonuçlar				YSA ile elde edilen sonuçlar (1 Giriş-4 Çıkış)			
	CFstd	CFdut	Pstd (mW)	Pdut (mW)	CFstd	CFdut	Pstd (mW)	Pdut (mW)
0,010	99,2	100,2	0,9691	0,9786	99,6	100,6	0,9743	0,9834
0,015	99,6	100,7	0,9867	0,9976	99,7	100,5	0,9772	0,9849
0,020	99,9	100,7	0,9747	0,9816	99,8	100,5	0,9795	0,9858
<b>0,025*</b>	<b>100,1</b>	<b>100,6</b>	<b>0,9804</b>	<b>0,9843</b>	<b>99,9</b>	<b>100,4</b>	<b>0,9811</b>	<b>0,9863</b>
0,030	100,2	100,5	0,9800	0,9822	99,9	100,4	0,9823	0,9863
0,035	100,2	100,4	0,9849	0,9863	100,0	100,3	0,9830	0,9860
0,040	100,2	100,3	0,9838	0,9846	100,0	100,3	0,9833	0,9854
0,045	100,1	100,2	0,9861	0,9862	100,0	100,2	0,9834	0,9846
0,050	100,1	100,1	0,9829	0,9824	100,0	100,1	0,9832	0,9837
0,055	100,1	100,0	0,9833	0,9823	100,1	100,1	0,9829	0,9827
0,060	100,1	100,0	0,9786	0,9772	100,1	100,0	0,9824	0,9816
0,065	100,1	100,0	0,9821	0,9804	100,1	100,0	0,9819	0,9806
0,070	100,0	99,8	0,9855	0,9834	100,1	99,9	0,9813	0,9795

0,075	100,0	99,8	0,9800	0,9778	100,1	99,9	0,9808	0,9785
0,080	100,0	99,8	0,9792	0,9769	100,1	99,8	0,9803	0,9777
0,085	100,0	99,8	0,9790	0,9764	100,1	99,8	0,9799	0,9769
0,090	100,0	99,8	0,9792	0,9765	100,1	99,8	0,9795	0,9762
0,095	100,0	99,8	0,9795	0,9767	100,1	99,7	0,9792	0,9757
0,100	100,0	99,7	0,9796	0,9767	100,1	99,7	0,9791	0,9753
0,125	100,0	99,7	0,9806	0,9771	100,1	99,7	0,9799	0,9753
0,150	100,0	99,7	0,9819	0,9782	100,1	99,7	0,9826	0,9777
0,175	100,0	99,6	0,9843	0,9803	100,2	99,7	0,9859	0,9809
0,200	100,1	99,7	0,9870	0,9827	100,2	99,7	0,9884	0,9834
0,225	100,1	99,7	0,9893	0,9847	100,2	99,7	0,9895	0,9844
0,250	100,1	99,7	0,9905	0,9857	100,2	99,7	0,9890	0,9840
0,275	100,1	99,6	0,9889	0,9840	100,2	99,7	0,9875	0,9824
0,300	100,1	99,6	0,9860	0,9808	100,1	99,6	0,9853	0,9801
0,325	100,1	99,6	0,9817	0,9763	100,1	99,6	0,9830	0,9776
0,350	100,1	99,6	0,9787	0,9730	100,0	99,5	0,9807	0,9752
0,375	100,1	99,5	0,9786	0,9727	100,0	99,5	0,9787	0,9731
0,400	100,1	99,5	0,9785	0,9723	100,0	99,4	0,9771	0,9713
0,425	100,1	99,4	0,9777	0,9709	99,9	99,4	0,9759	0,9699
0,450	100,0	99,3	0,9763	0,9686	99,9	99,3	0,9750	0,9688
0,475	100,0	99,2	0,9738	0,9656	99,9	99,3	0,9743	0,9680
0,500	100,0	99,2	0,9721	0,9637	99,9	99,3	0,9739	0,9675
0,525	100,0	99,2	0,9727	0,9646	99,9	99,3	0,9736	0,9670
0,550	100,0	99,3	0,9738	0,9663	99,9	99,3	0,9733	0,9667
0,575	99,9	99,2	0,9760	0,9690	99,9	99,3	0,9731	0,9663
0,600	99,9	99,3	0,9776	0,9708	99,9	99,2	0,9728	0,9659
<b>0,625*</b>	<b>99,8</b>	<b>99,2</b>	<b>0,9719</b>	<b>0,9654</b>	<b>99,9</b>	<b>99,2</b>	<b>0,9723</b>	<b>0,9654</b>
0,650	99,8	99,2	0,9663	0,9600	99,9	99,2	0,9718	0,9647
0,675	99,8	99,2	0,9690	0,9628	99,9	99,2	0,9710	0,9639
0,700	99,8	99,2	0,9717	0,9656	99,8	99,1	0,9700	0,9628
0,725	99,7	99,1	0,9698	0,9637	99,8	99,1	0,9687	0,9614
0,750	99,7	99,1	0,9665	0,9604	99,7	99,0	0,9672	0,9598
0,775	99,6	99,0	0,9636	0,9576	99,7	99,0	0,9655	0,9579
0,800	99,6	99,0	0,9614	0,9553	99,6	98,9	0,9636	0,9560
0,825	99,6	99,0	0,9606	0,9540	99,6	98,8	0,9618	0,9540
0,850	99,5	98,8	0,9600	0,9531	99,5	98,8	0,9600	0,9522
0,875	99,5	98,8	0,9594	0,9522	99,5	98,7	0,9585	0,9505
0,900	99,5	98,8	0,9587	0,9511	99,5	98,7	0,9571	0,9491
0,925	99,4	98,6	0,9556	0,9473	99,4	98,6	0,9560	0,9479
0,950	99,4	98,5	0,9531	0,9442	99,4	98,6	0,9551	0,9470
0,975	99,4	98,5	0,9544	0,9450	99,4	98,6	0,9543	0,9462
1,000	99,4	98,4	0,9557	0,9459	99,4	98,6	0,9537	0,9456
1,100	99,4	98,5	0,9537	0,9446	99,4	98,6	0,9522	0,9441
1,200	99,4	98,6	0,9506	0,9426	99,3	98,6	0,9511	0,9431
1,300	99,4	98,6	0,9511	0,9433	99,4	98,6	0,9512	0,9433
1,400	99,4	98,7	0,9564	0,9488	99,4	98,7	0,9564	0,9488

1,500	99,3	98,6	0,9599	0,9524	99,3	98,6	0,9600	0,9523
1,600	99,3	98,6	0,9598	0,9522	99,3	98,5	0,9601	0,9524
1,700	99,3	98,5	0,9597	0,9519	99,3	98,5	0,9592	0,9516
1,800	99,3	98,5	0,9612	0,9533	99,3	98,5	0,9614	0,9537
1,900	99,3	98,5	0,9689	0,9607	99,3	98,5	0,9688	0,9606
2,000	99,3	98,5	0,9740	0,9656	99,3	98,5	0,9740	0,9655
2,100	99,3	98,5	0,9734	0,9650	99,3	98,5	0,9736	0,9652
2,200	99,3	98,5	0,9722	0,9637	99,3	98,5	0,9719	0,9636
2,300	99,2	98,4	0,9706	0,9621	99,2	98,4	0,9704	0,9621
2,400	99,2	98,4	0,9679	0,9597	99,2	98,4	0,9680	0,9599
2,500	99,2	98,4	0,9657	0,9577	99,2	98,4	0,9659	0,9580
2,600	99,1	98,4	0,9643	0,9566	99,2	98,4	0,9643	0,9565
2,700	99,1	98,4	0,9634	0,9558	99,1	98,4	0,9633	0,9556
2,800	99,1	98,4	0,9635	0,9560	99,1	98,4	0,9635	0,9557
2,900	99,0	98,2	0,9650	0,9571	99,0	98,3	0,9653	0,9574
3,000	99,0	98,2	0,9660	0,9579	99,0	98,2	0,9658	0,9577
3,100	99,0	98,2	0,9636	0,9552	99,0	98,2	0,9636	0,9553
3,200	99,0	98,1	0,9598	0,9509	99,0	98,1	0,9597	0,9509
3,300	98,9	98,0	0,9592	0,9502	99,0	98,0	0,9594	0,9503
<b>3,400*</b>	<b>98,9</b>	<b>98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,9508</b>	<b>98,9</b>	<b>98,0</b>	<b>0,9600</b>	<b>0,9506</b>
3,500	98,9	98,0	0,9608	0,9513	98,9	98,0	0,9607	0,9510
3,600	98,9	97,9	0,9615	0,9514	98,9	97,9	0,9615	0,9515
3,700	98,8	97,8	0,9620	0,9515	98,8	97,8	0,9621	0,9517
3,800	98,8	97,8	0,9611	0,9505	98,8	97,8	0,9610	0,9504
3,900	98,8	97,7	0,9556	0,9450	98,8	97,7	0,9556	0,9450
4,000	98,8	97,7	0,9521	0,9414	98,8	97,7	0,9521	0,9414
4,100	98,8	97,7	0,9526	0,9419	98,8	97,7	0,9527	0,9419
4,200	98,8	97,7	0,9538	0,9430	98,8	97,7	0,9538	0,9430
4,300	98,8	97,8	0,9556	0,9451	98,8	97,8	0,9556	0,9451
4,400	98,8	97,9	0,9591	0,9496	98,8	97,9	0,9591	0,9496
4,500	98,7	97,8	0,9610	0,9522	98,7	97,8	0,9610	0,9522
4,600	98,7	97,8	0,9568	0,9480	98,7	97,8	0,9568	0,9480
4,700	98,7	97,9	0,9498	0,9413	98,7	97,9	0,9498	0,9413
4,800	98,7	98,0	0,9470	0,9397	98,7	98,0	0,9470	0,9397
4,900	98,7	98,1	0,9458	0,9394	98,7	98,1	0,9458	0,9394
5,000	98,7	98,1	0,9453	0,9393	98,7	98,1	0,9454	0,9393
5,100	98,7	98,1	0,9465	0,9401	98,7	98,1	0,9465	0,9401
5,200	98,7	98,0	0,9484	0,9413	98,7	98,0	0,9484	0,9413
5,300	98,7	98,0	0,9486	0,9414	98,7	98,0	0,9486	0,9414
5,400	98,7	98,0	0,9478	0,9405	98,7	98,0	0,9478	0,9405
5,500	98,7	97,9	0,9473	0,9395	98,7	97,9	0,9473	0,9395
5,600	98,6	97,7	0,9480	0,9391	98,6	97,7	0,9480	0,9391
5,700	98,6	97,6	0,9490	0,9386	98,6	97,6	0,9490	0,9386
5,800	98,6	97,5	0,9489	0,9377	98,6	97,5	0,9489	0,9377
5,900	98,6	97,4	0,9476	0,9359	98,6	97,4	0,9476	0,9359
6,000	98,6	97,4	0,9467	0,9348	98,6	97,4	0,9467	0,9348



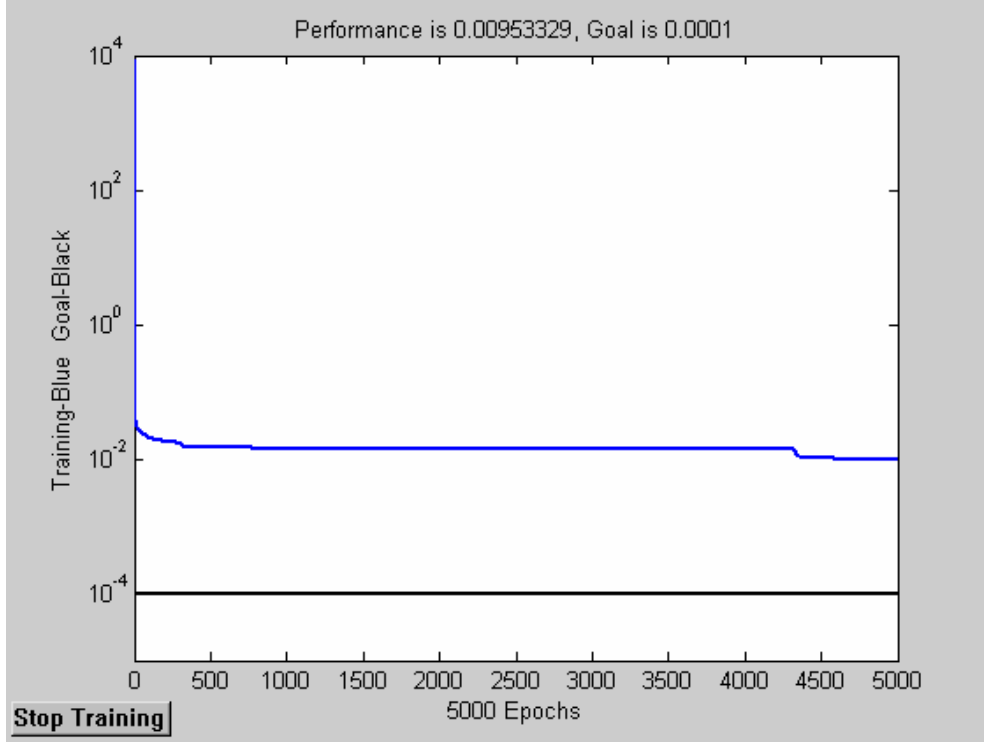
6,100	98,6	97,3	0,9478	0,9353	98,6	97,3	0,9478	0,9353
6,200	98,6	97,3	0,9495	0,9362	98,6	97,3	0,9495	0,9362
6,300	98,6	97,2	0,9498	0,9363	98,6	97,2	0,9498	0,9363
6,400	98,6	97,2	0,9496	0,9361	98,6	97,2	0,9496	0,9361
6,500	98,6	97,2	0,9494	0,9357	98,6	97,2	0,9494	0,9357
6,600	98,5	97,1	0,9484	0,9347	98,5	97,1	0,9484	0,9347
6,700	98,5	97,2	0,9469	0,9336	98,5	97,2	0,9469	0,9337
6,800	98,5	97,2	0,9462	0,9334	98,5	97,2	0,9462	0,9334
6,900	98,5	97,3	0,9457	0,9335	98,5	97,3	0,9456	0,9336
7,000	98,5	97,3	0,9454	0,9336	98,5	97,3	0,9455	0,9336
7,100	98,5	97,3	0,9453	0,9335	98,5	97,3	0,9454	0,9334
7,200	98,5	97,3	0,9452	0,9332	98,5	97,3	0,9452	0,9332
7,300	98,5	97,3	0,9447	0,9325	98,5	97,3	0,9447	0,9325
7,400	98,5	97,3	0,9424	0,9301	98,5	97,3	0,9424	0,9301
7,500	98,5	97,2	0,9402	0,9275	98,5	97,2	0,9402	0,9275
<b>7,600*</b>	<b>98,4</b>	<b>97</b>	<b>0,9388</b>	<b>0,9246</b>	<b>98,5</b>	<b>97,1</b>	<b>0,9380</b>	<b>0,9239</b>
7,700	98,4	96,8	0,9378	0,9220	98,4	96,8	0,9378	0,9220
7,800	98,4	96,7	0,9377	0,9216	98,4	96,7	0,9377	0,9216
7,900	98,4	96,7	0,9382	0,9216	98,4	96,7	0,9382	0,9216
8,000	98,4	96,6	0,9391	0,9217	98,4	96,6	0,9391	0,9217
8,100	98,4	96,5	0,9429	0,9242	98,4	96,5	0,9429	0,9242
8,200	98,3	96,3	0,9479	0,9280	98,3	96,3	0,9479	0,9280
8,300	98,3	96,3	0,9485	0,9284	98,3	96,3	0,9485	0,9284
8,400	98,2	96,2	0,9465	0,9266	98,2	96,2	0,9465	0,9266
8,500	98,1	96,1	0,9436	0,9239	98,1	96,1	0,9436	0,9239
8,600	98,1	96,1	0,9383	0,9185	98,1	96,1	0,9383	0,9185
8,700	98,0	96,0	0,9325	0,9126	98,0	96,0	0,9325	0,9126
8,800	97,9	95,9	0,9324	0,9124	97,9	95,9	0,9324	0,9124
8,900	97,9	95,9	0,9371	0,9173	97,9	95,9	0,9371	0,9173
9,000	97,9	95,9	0,9402	0,9204	97,9	95,9	0,9402	0,9204
9,100	97,9	95,9	0,9384	0,9184	97,9	95,9	0,9384	0,9184
9,200	97,9	95,8	0,9349	0,9144	97,9	95,8	0,9349	0,9144
9,300	98,0	95,8	0,9320	0,9109	98,0	95,8	0,9320	0,9109
9,400	98,0	95,8	0,9290	0,9073	98,0	95,8	0,9290	0,9073
9,500	98,1	95,8	0,9275	0,9054	98,1	95,8	0,9275	0,9054
9,600	98,1	95,7	0,9300	0,9070	98,1	95,7	0,9300	0,9070
9,700	98,1	95,6	0,9337	0,9094	98,1	95,6	0,9337	0,9094
9,800	98,2	95,7	0,9339	0,9093	98,2	95,7	0,9339	0,9093
9,900	98,2	95,6	0,9308	0,9061	98,2	95,6	0,9308	0,9061
10,000	98,2	95,6	0,9288	0,9037	98,2	95,6	0,9288	0,9037
10,100	98,2	95,5	0,9287	0,9030	98,2	95,5	0,9287	0,9030
10,200	98,1	95,4	0,9286	0,9026	98,1	95,4	0,9286	0,9026
10,300	98,0	95,3	0,9293	0,9031	98,0	95,3	0,9293	0,9031
10,400	97,9	95,2	0,9327	0,9062	97,9	95,2	0,9327	0,9062
10,500	97,8	95,0	0,9350	0,9082	97,8	95,0	0,9350	0,9082
10,600	97,6	94,9	0,9328	0,9062	97,6	94,9	0,9328	0,9062

10,700	97,5	94,8	0,9284	0,9021	97,5	94,8	0,9284	0,9021
10,800	97,4	94,7	0,9240	0,8977	97,4	94,7	0,9240	0,8977
10,900	97,3	94,5	0,9187	0,8921	97,3	94,5	0,9187	0,8921
11,000	97,3	94,5	0,9160	0,8892	97,3	94,5	0,9160	0,8892
11,100	97,3	94,4	0,9202	0,8926	97,3	94,4	0,9202	0,8926
11,200	97,3	94,3	0,9273	0,8982	97,3	94,3	0,9273	0,8982
11,300	97,4	94,3	0,9303	0,9001	97,4	94,3	0,9303	0,9001
11,400	97,4	94,2	0,9318	0,9008	97,4	94,2	0,9318	0,9008
11,500	97,5	94,3	0,9324	0,9011	97,5	94,3	0,9324	0,9011
11,600	97,6	94,4	0,9257	0,8948	97,6	94,4	0,9257	0,8948
11,700	97,6	94,4	0,9152	0,8851	97,6	94,4	0,9152	0,8851
11,800	97,7	94,6	0,9136	0,8838	97,7	94,6	0,9136	0,8838
11,900	97,7	94,7	0,9159	0,8872	97,7	94,7	0,9159	0,8872
12,000	97,7	94,8	0,9192	0,8919	97,7	94,8	0,9192	0,8919
12,100	97,7	95,0	0,9259	0,8995	97,7	95,0	0,9259	0,8995
12,200	97,6	94,9	0,9334	0,9074	97,6	94,9	0,9334	0,9074
12,300	97,6	95,0	0,9314	0,9060	97,6	95,0	0,9314	0,9060
12,400	97,5	95,1	0,9145	0,8912	97,5	95,1	0,9145	0,8912
12,500	97,4	95,1	0,9035	0,8817	97,4	95,1	0,9035	0,8817
12,600	97,3	95,0	0,9042	0,8825	97,3	95,0	0,9042	0,8825
12,700	97,2	95,0	0,9057	0,8844	97,2	95,0	0,9057	0,8844
12,800	97,1	94,9	0,9081	0,8870	97,1	94,9	0,9081	0,8870
12,900	97,1	94,9	0,9127	0,8915	97,1	94,9	0,9127	0,8915
13,000	97,0	94,8	0,9153	0,8940	97,0	94,8	0,9153	0,8940
13,100	97,0	94,6	0,9087	0,8860	97,0	94,6	0,9087	0,8860
13,200	96,9	94,3	0,8986	0,8737	96,9	94,3	0,8986	0,8738
13,300	96,9	94,2	0,8975	0,8720	96,9	94,2	0,8975	0,8720
13,400	96,8	94,0	0,9020	0,8753	96,8	94,0	0,9021	0,8752
13,500	96,8	93,8	0,9056	0,8774	96,8	93,8	0,9056	0,8773
13,600	96,7	93,6	0,9069	0,8770	96,7	93,6	0,9069	0,8771
13,700	96,7	93,4	0,9077	0,8759	96,7	93,4	0,9076	0,8760
13,800	96,7	93,2	0,9061	0,8730	96,7	93,2	0,9062	0,8730
13,900	96,6	93,1	0,8968	0,8642	96,6	93,1	0,8968	0,8642
14,000	96,6	93,2	0,8907	0,8588	96,6	93,2	0,8907	0,8588
14,100	96,6	93,2	0,9023	0,8698	96,6	93,2	0,9022	0,8699
14,200	96,5	93,0	0,9202	0,8868	96,5	93,0	0,9202	0,8868
14,300	96,5	93,1	0,9228	0,8898	96,5	93,1	0,9227	0,8898
14,400	96,4	93,3	0,9177	0,8881	96,4	93,3	0,9179	0,8880
14,500	96,4	93,8	0,9105	0,8855	96,4	93,8	0,9105	0,8854
14,600	96,4	94,2	0,8989	0,8776	96,4	94,2	0,8988	0,8778
14,700	96,3	94,3	0,8868	0,8680	96,3	94,3	0,8869	0,8680
14,800	96,3	94,4	0,8865	0,8688	96,3	94,4	0,8865	0,8687
14,900	96,3	94,8	0,8962	0,8820	96,3	94,8	0,8962	0,8820
15,000	96,3	95,1	0,9025	0,8905	96,3	95,1	0,9024	0,8904
15,100	96,3	95,1	0,9020	0,8903	96,3	95,1	0,9021	0,8905
15,200	96,3	95,2	0,9008	0,8898	96,3	95,2	0,9009	0,8897

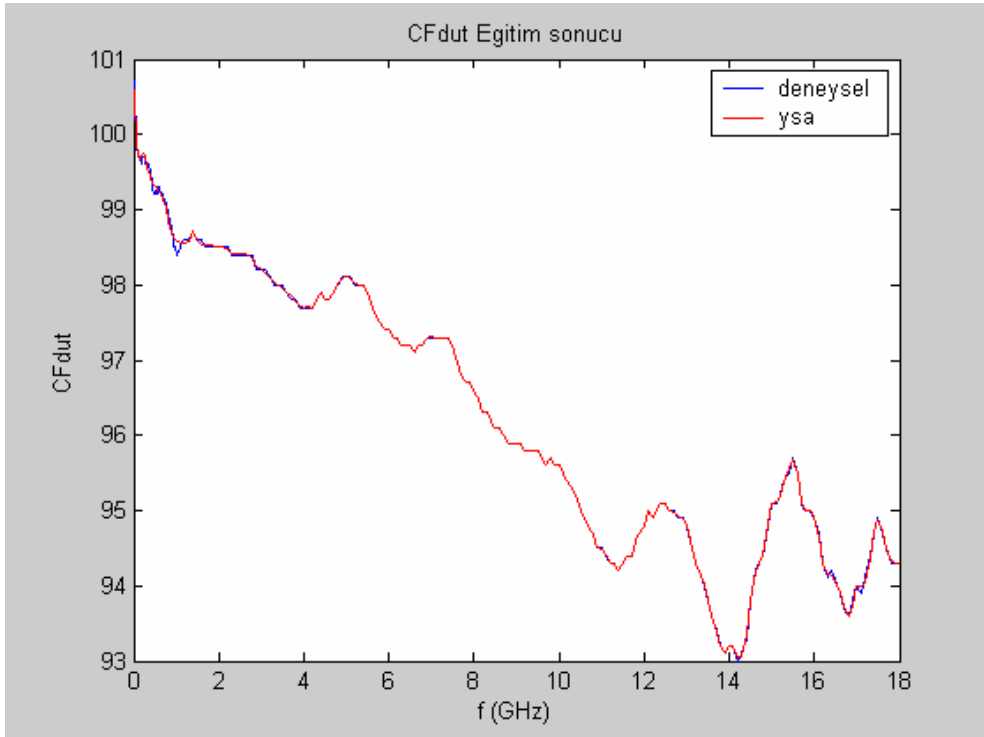
15,300	96,4	95,4	0,8988	0,8887	96,4	95,4	0,8988	0,8887
15,400	96,4	95,5	0,8949	0,8861	96,4	95,6	0,8948	0,8861
15,500	96,5	95,7	0,8926	0,8846	96,5	95,7	0,8926	0,8848
15,600	96,5	95,5	0,9000	0,8899	96,5	95,5	0,9000	0,8898
15,700	96,5	95,1	0,9119	0,8981	96,6	95,1	0,9120	0,8977
15,800	96,6	95,0	0,9151	0,8998	96,6	95,0	0,9156	0,9000
15,900	96,6	95,0	0,9156	0,8998	96,6	95,0	0,9155	0,8998
16,000	96,6	94,9	0,9163	0,8998	96,6	94,9	0,9159	0,8998
16,100	96,6	94,7	0,9212	0,9023	96,5	94,6	0,9211	0,9026
16,200	96,5	94,3	0,9277	0,9060	96,4	94,3	0,9276	0,9063
16,300	96,3	94,1	0,9279	0,9061	96,4	94,2	0,9274	0,9057
16,400	96,2	94,2	0,9219	0,9019	96,2	94,1	0,9228	0,9022
<b>16,500*</b>	<b>96</b>	<b>94,1</b>	<b>0,9156</b>	<b>0,8971</b>	<b>96,1</b>	<b>94,1</b>	<b>0,9167</b>	<b>0,8972</b>
16,600	95,8	93,9	0,9103	0,8920	95,8	93,9	0,9102	0,8915
16,700	95,6	93,7	0,9061	0,8875	95,6	93,7	0,9059	0,8875
16,800	95,4	93,6	0,9064	0,8885	95,4	93,6	0,9063	0,8890
16,900	95,2	93,8	0,9115	0,8975	95,2	93,7	0,9117	0,8971
17,000	95,1	94,0	0,9148	0,9033	95,1	94,0	0,9149	0,9035
17,100	95,0	93,9	0,9080	0,8974	95,0	94,0	0,9075	0,8973
17,200	94,9	94,1	0,8965	0,8883	94,9	94,1	0,8969	0,8883
17,300	94,8	94,4	0,8913	0,8867	94,8	94,4	0,8914	0,8866
17,400	94,7	94,7	0,8884	0,8876	94,7	94,7	0,8881	0,8877
17,500	94,6	94,9	0,8872	0,8892	94,6	94,9	0,8873	0,8893
17,600	94,5	94,7	0,9004	0,9020	94,5	94,7	0,9004	0,9019
17,700	94,5	94,5	0,9207	0,9202	94,5	94,5	0,9207	0,9203
17,800	94,4	94,3	0,9245	0,9235	94,4	94,3	0,9245	0,9235
17,900	94,3	94,3	0,9222	0,9214	94,3	94,3	0,9222	0,9214
18,000	94,3	94,3	0,9134	0,9133	94,3	94,3	0,9134	0,9133

\* Eğitimde kullanılmayan, sadece test için kullanılan deneysel ve YSA ile elde edilen değerlerdir.

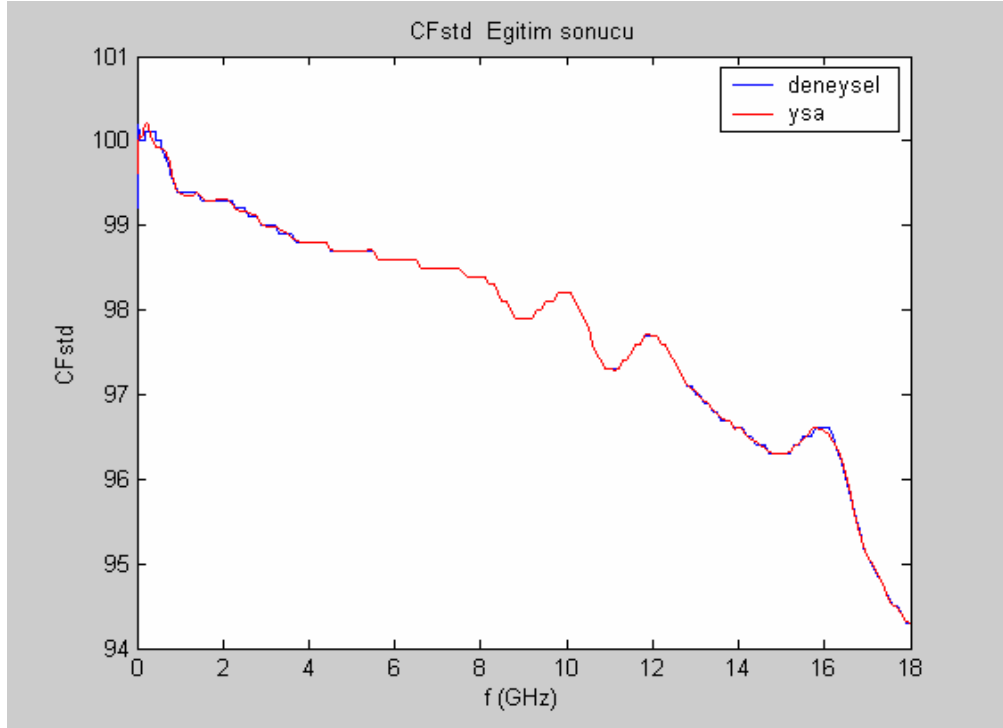
Yapılan uygulamada,  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  değerlerine ait YSA'da 1 giriş- 4 çıkışlı model ile elde edilen sonuçların grafikleri aşağıda verilmiştir.



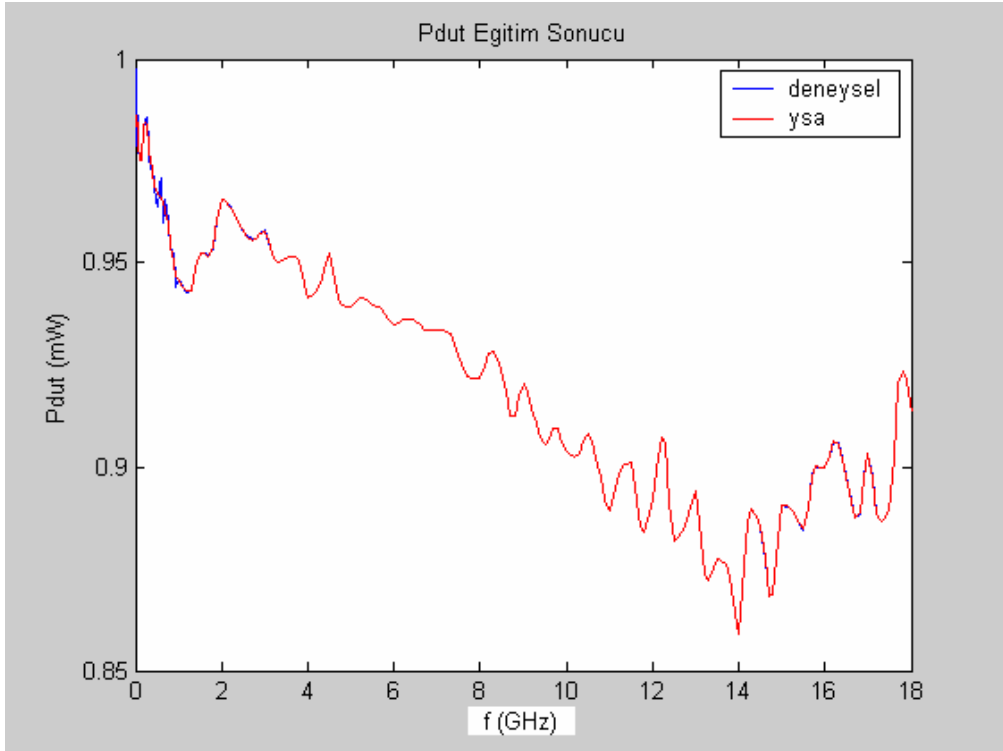
**Şekil 3.15.**  $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  için eğitimin epoch sayısına bağlı değişimi



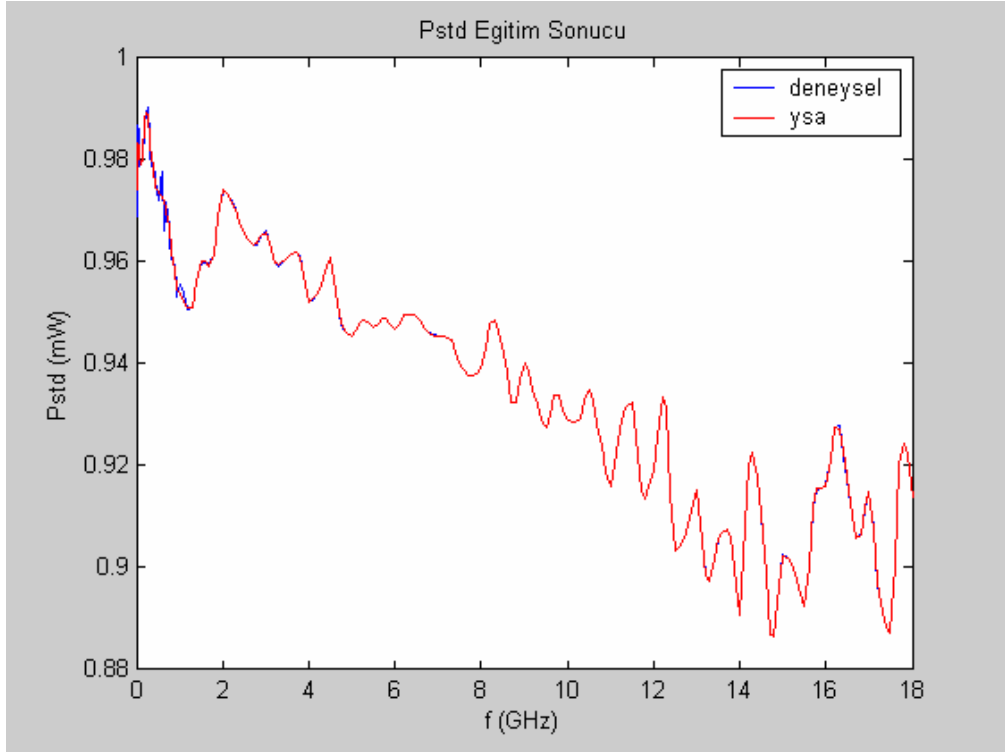
**Şekil 3.16.**  $CF_{DUT}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları



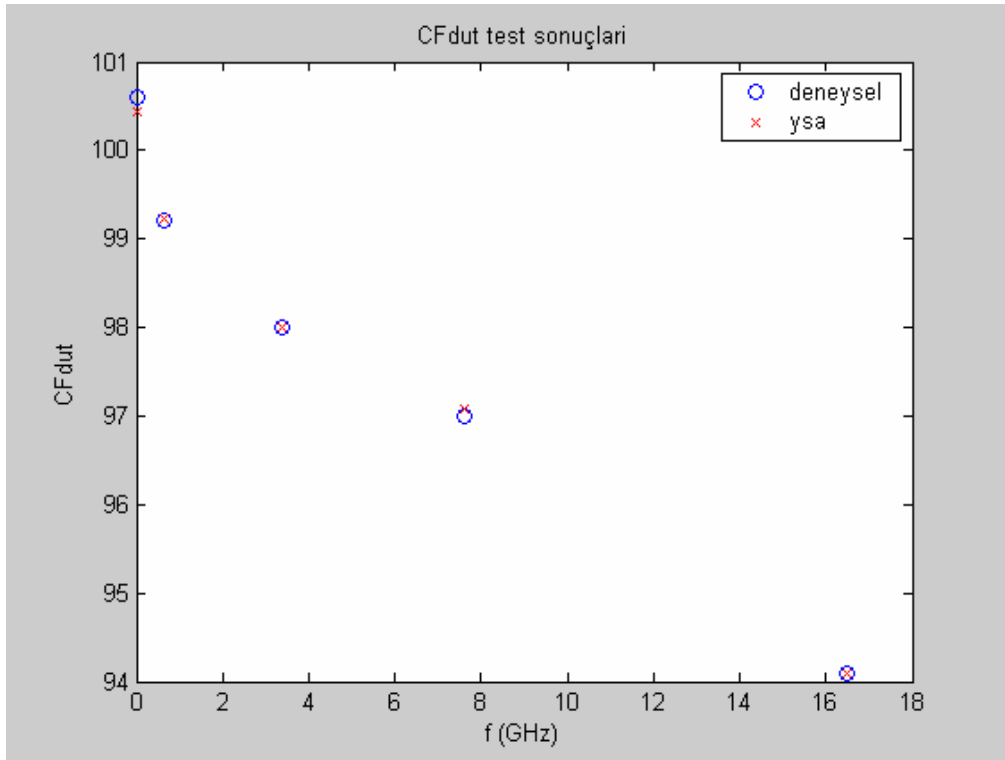
**Şekil 3.17.**  $CF_{STD}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları



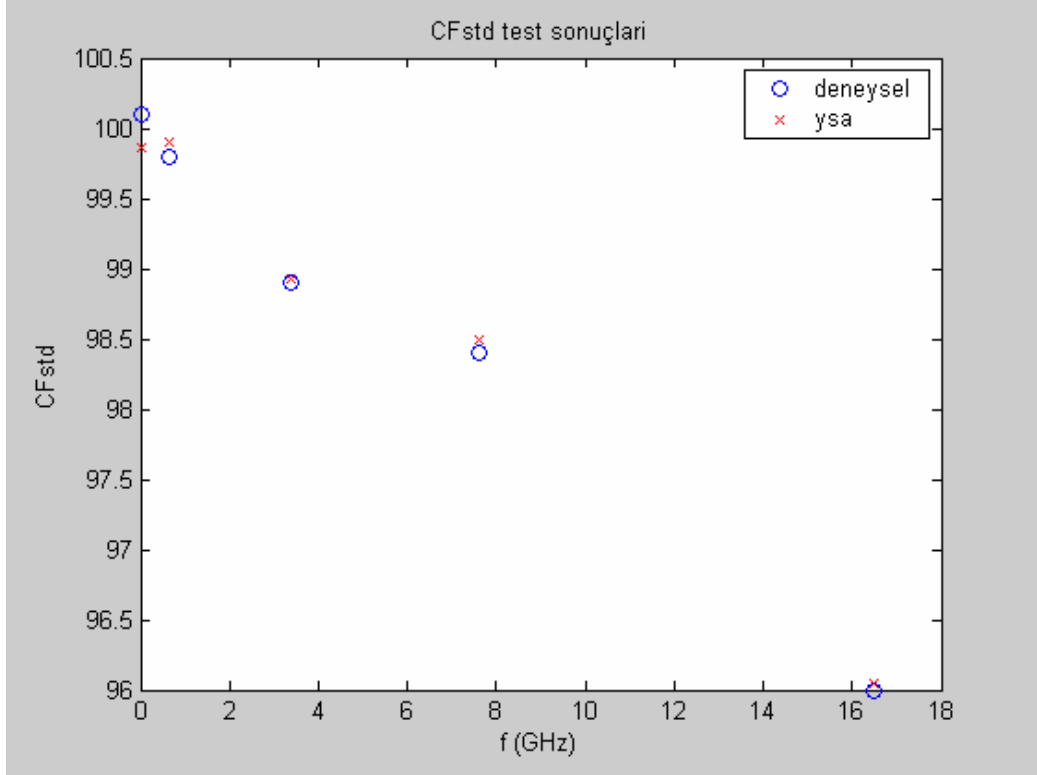
**Şekil 3.18.**  $P_{DUT}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları



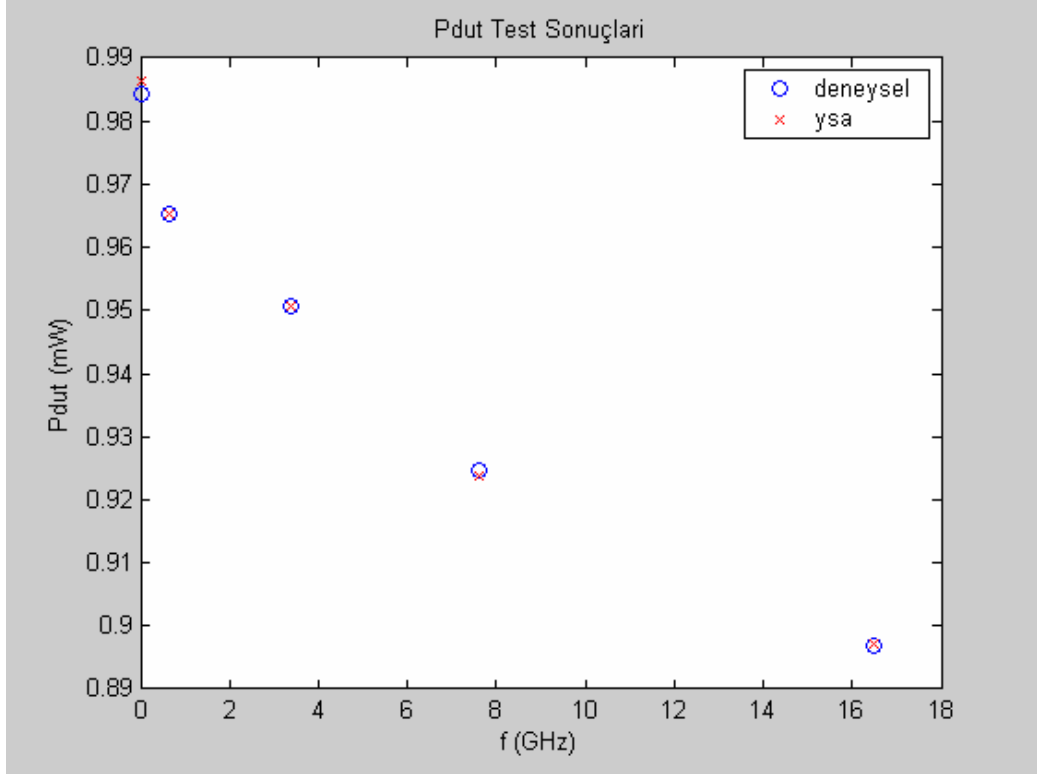
**Şekil 3.19.**  $P_{STD}$  değerleri için deneysel olarak ve YSA ile elde edilen eğitim sonuçları



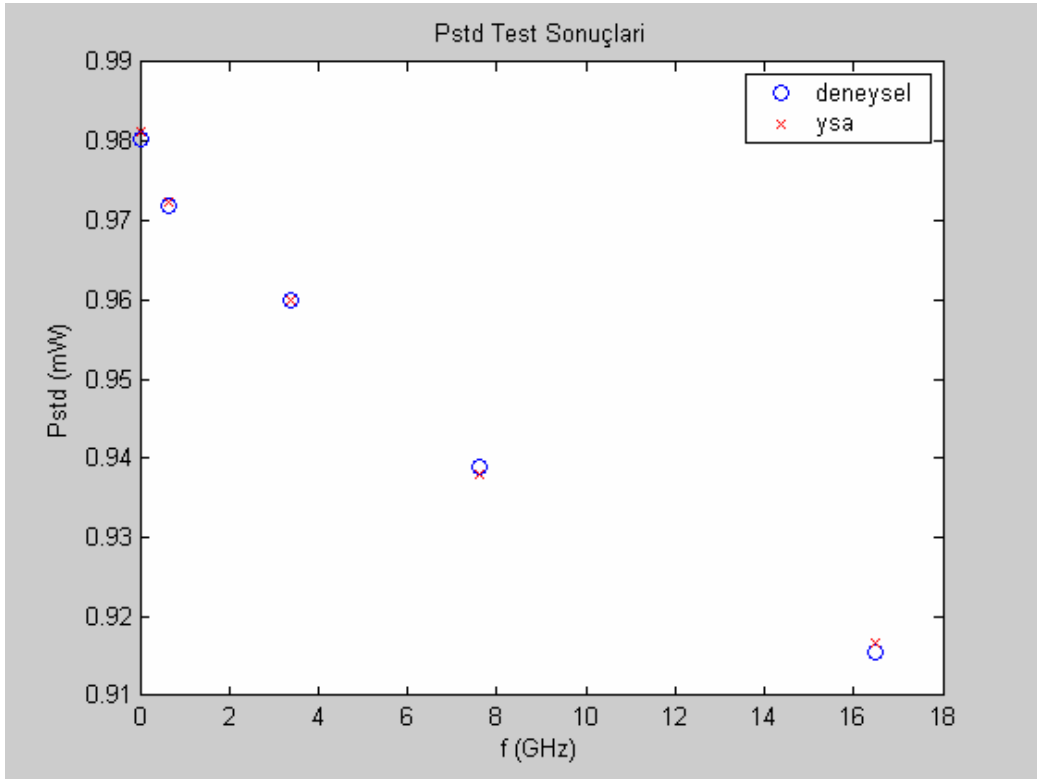
**Şekil 3.20.**  $CF_{DUT}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları



**Şekil 3.21.**  $CF_{STD}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları



**Şekil 3.22.**  $P_{DUT}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları



**Şekil 3.23.**  $P_{STD}$  değerleri için deneysel ve YSA ile elde edilen test sonuçları



Şekil 3.1.-3.23 ve Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2'den görüldüğü gibi YSA ile elde edilen sonuçlar hem eğitim hem de test için kullanılan deneysel sonuçlarla çok iyi bir uyum içerisindedirler.

Elde edilen sonuçlar, nöral modellerin çok yönlülüğünü, güçlülüğünü ve hesaplama verimliliğini göstermektedir. Ağ yapıları bir defa eğitildikten sonra kullanıcı, sadece frekans parametresini giriş olarak kullanarak tüm modellere ait parametreler ( $CF_{STD}$ ,  $CF_{DUT}$ ,  $P_{STD}$  ve  $P_{DUT}$  ) için bir kaç milisaniyede sonuç alabilmektedir. Daha çok giriş verisi ile daha iyi sonuçların alınabileceği de belirtilmelidir.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, mikrodalga sinyallerin güç ölçümlerinde kullanılan sensörlerin kalibrasyon parametreleri olan standart güç sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CF_{STD}$ ), kalibre edilen güç sensörünün kalibrasyon faktör değeri ( $CD_{DUT}$ ), standart güç sensöründen elde edilen güç değeri ( $P_{STD}$ ) ve kalibre edilen güç sensöründen elde edilen güç değeri ( $P_{DUT}$ ), esin kaynağını biyolojik sinir ağlarının işleyişinden alan ve insan beyninin işleyişini taklit eden yapay sinir ağları ile kullanım ihtiyaçlarını karşılayacak bir doğrulukla belirlenmiştir.

YSA'da kullanılan eğitim ve test verilerini elde etmek maksadıyla, laboratuvar ortamında kurulan Şekil 2.23'deki kalibrasyon düzeneği kullanılmıştır. YSA, bu düzeneğe ile ölçülen 220 adet güç ölçüm örneği ile eğitilirken, eğitilen ağların başarısı, eğitim örneklerinden farklı 5 örnek ile test edilmiştir. YSA modeli olarak, bu tip problemlerin çözümü için literatürde en çok tercih edilen ileri beslemeli geri yayımlı ağ modeli seçilmiştir. Eğitim algoritması olarak ise bu tez çalışması için en kısa sürede en doğru çözümleri üreten Levenberg-Marquard metodu kullanılmıştır.

Şekil 3.1 - 3.23 ve Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'den açıkça görüldüğü gibi YSA ile elde edilen hem eğitim hem de test sonuçlarının, laboratuvar ortamında elde edilen deneysel sonuçlarla iyi derecede bir yaklaşıklık içerisindedir. Böylece sunulan çalışmada önerilen nöral yapıların yüksek bir doğruluğa sahip oldukları gösterilmiştir. Ancak Şekil 3.1'de verilen YSA yapısı ile elde edilen sonuçların, Şekil 3.14'de verilen YSA yapısı ile elde edilenden daha

yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir. Buradan YSA uygulamalarında giriş ve istenilen çıkış değerlerinin birebir ilişkilendirilmesinin genel olarak verimi artırdığını söylemek mümkündür.

Daha çok giriş verisi ile daha iyi sonuçların alınabileceği de belirtilmelidir. Ancak bu tez çalışmasında hedeflenen çıkış doğruluklarının elde edilmesinde kullanılan eğitim verisi sayısının yeterli olduğu görülmüştür.

Mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon işlemi; sinyal jeneratöründen alınan mikrodalga sinyalin gücünün, referans olarak kullanılan sensör ile kalibrasyonu yapılan sensör vasıtasıyla güç metre ve hassas multimetrede okunması, kaydedilmesi ve sonuçların gerekli matematiksel işlemlere tabi tutulması gibi uzun bir süreci gerektirmektedir. Ayrıca ölçüm belirsizliklerini en aza indirmek için söz konusu ölçümler birkaç tekrarlı olarak ve sensörün değişik bağlantı konumlarında yapılmaktadır. Bu durum yapılan ölçüm sayısını, dolayısı ile kalibrasyon süresini daha da artırmaktadır. Bu sebepten dolayı güç sensörlerinin kalibrasyon parametreleri, laboratuvarlar tarafından 1 GHz, 2 GHz, 3 GHz gibi sadece ana frekans değerleri için hesaplanmaktadır. Kullanıcı tarafından herhangi bir ara frekans değerinde güç ölçümü yapılırken, en yakın ana frekansa ait kalibrasyon faktör değeri kullanılmakta veya alt ve üst ana frekansa ait kalibrasyon faktör değerlerinin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Bu durum ölçüm hatasının artmasına neden olmaktadır.

Tez çalışmasında YSA'yı eğitmek ve test etmek maksadıyla kullanılan 225 adet ölçüm verisi için kurulan bilgisayar destekli kalibrasyon sistemi ile yaklaşık 16.000 adet ölçüm alınmıştır. Daha düşük ara frekans değerleri için

söz konusu parametrelerin ölçüm yapılarak belirlenmesi için günlerce süren on binlerce ölçüm yapılması gerekecektir. Yapılan tez çalışmasında, oluşturulmuş olan YSA yapıları ile istenilen her ara frekans değeri için kalibrasyon parametreleri birkaç milisaniyede ve yeterli doğrulukta bulunabilmektedir.

Elde edilen sonuçlar nöral modellerin çok yönlülüğünü, güçlülüğünü ve hesaplama verimliliğini göstermektedir. Ayrıca, tez çalışmasında, her ne kadar tek bir mikrodalga güç sensörü üzerinde yapılan uygulamalar ile YSA'nın başarısı gösterilmiş olsa da, farklı bir mikrodalga güç sensörünün kullanılması durumunda da benzer sonuçların elde edileceği aşikardır. Başka bir deyişle yapılan YSA çalışmaları, farklı tip uygulamalar için genelleştirilebilir. Özellikle ölçümü zor ve karışık hesaplamalar gerektiren yansıma katsayısı, sensör etkin verimi, sensör lineerliği gibi ölçüm parametreleri ile ölçüm belirsizliğinin belirlenmesinde YSA'nın etkin olarak kullanılabileceği görülmektedir.

YSA'nın mikrodalga güç sensörlerinin kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmasının avantajları, uygulamadaki basitliği ve elde edilen parametre değerlerinin doğruluğu olmuştur.

Literatürde YSA ile ilgili mühendislik dallarının hemen hemen tamamı için yüzlerce uygulama ve teorik çalışma bulunmaktadır. Ancak bu tez çalışmasının mikrodalga güç sensörü kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi konusundaki ilk çalışma olduğu değerlendirilmektedir. Tez çalışması bu yönü ile; müteakip zamanlarda yapılacak benzer çalışmalar için hem teorik hem de uygulama bakımından bir kaynak olabilecektir.

Genel olarak, öğrenme kabiliyeti, kolayca farklı problemlere uygulanabilirliği, genelleme yapabilme yeteneği, daha az bilgiye gereksinim duyması, paralel yapılarından dolayı hızlı işlem yapabilmeleri ve kolaylıkla gerçekleştirilebilmeleri YSA'yı mühendislik ve diğer uygulamalar için alternatif metodlara göre üstün yapan özelliklerdir. YSA'nın dezavantajları ise bazı karmaşık sistem uygulamalarında yavaş eğitilmeleri, çok sayıda eğitim verisine ihtiyaç duymaları, bazı uygulamalar için düşük performansları, ağ parametresi ve yapı seçimindeki güçlükleridir.

## KAYNAKLAR

1. Ş. Sağıroğlu, E. Beşdok, M. Eler, Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I, Yapay Sinir Ağları, Ufuk Kitapevi, Kayseri, 2003.
2. Ç. Elmas, Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003.
3. W. S. McCulloch and W. Pitts, A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, Bulletin of Mathematical Biophysics, **5**, 115(1943).
4. I. Alexander, Neural Computing Architectures, North Oxford Academic Publishers Ltd., London, 1989.
5. B. Bavarian, Introduction to Neural Networks for Intelligent Control, IEEE Control Systems Magazine, **1**, 201(1989).
6. D. O. Hebb, The Organization of Behavior, J. Wiley and Sons, New York, 1949.
7. M.D. Levine, Vision In Man and Machine, McGraw-Hill, New York, 1985.
8. M.Sonka, V.Hlavac, R. Boyle, Image Processing, Analysis and machine vision, second edition, Brook/Cole Publishing Company, Pacific Grove, USA, 1999.
9. M.Petrov, A. Talapov, T.Robertson, A.Lebedev, A.Zhilayev, L.Polonskiy, Optical 3D Digitisers, Bringing Life to the Virtual World, IEEE Computer Graphics, **18**, 28(1998).
10. T. Kohonen, Learning Vector Quantization, Neural Networks, **1**, 303(1988).

11. R.Congalton, K.Green, Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data, Principles and Practices, Lewis Publisher, London, 1999.
12. K. Güney, M. Erler, and Ş. Sağıroğlu, Artificial Neural Networks for the Resonant Resistrance Calculation of Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas, Electromagnetics, **20**, 387(2000).
13. N. Innator, D. Reisfeld, Y. Yeshurun, Face Recognition by supervised/unsupervised hybrid Network, Pattern Recognition Letters, **17**, 67(1996).
14. G. L. Creech, B. J. Poul, C. D. Lesniak, T. J. Jenkins and M. Calcaterra, Artificial Neural Networks for Fast and Accurate EM-CAD of Microwave Circuits, IEEE Trans. Mic. Theory Tech. **45**, 794(1997).
15. T. Kohonen, Self-Organizing Maps, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
16. R. J. Mailloux and H. L. Southall, The Analogy between the Buttler Matrix and Neural Network Direction-Finding Array, IEEE Antennas Propagation Magazine, **39**, 27(1997).
17. O. Masory, A. L. Aguirre, Sensor Calibration Methods-Performance Study, Applications of ANNs, SPIE, **1294**, 490(1990).
18. J.McClelland, B.McNaughton, R.O'Reilly, Why There Are Complementary Learning System in the Hippocampus and Neocortex, Inside From the Successes and Failures of Connectionist Models of Learning and Memory, Psychological Review, **102**, 419(1995).

19. S.Grossberg, Competitive Learning From Interactive Activation to Adaptive Resonance, *Cognitive Science*, **11**, 23(1987).
20. Torrance, S., *The Mind and the Machine: Philosophical Aspects of Artificial Intelligence*, NY Ellis Harwood Limited, 1984.
21. Topçuoğlu, A., *Yapay Zeka, Bilim ve Teknik*(2001).
22. Suplee, C., *Robot Revolution*, National Geographic(1997).
23. Haton, J. P., *Yapay Zeka, İletişim Yayınları*, (1991).
24. W.D. Blair, G.A. Watson, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, Benchmark for Radar Allocation and Tracking in ECM, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **34**, 1097(1998).
25. Nwana, S. N., *Intelligent Tutoring Systems: an Overview*, *Artificial Intelligence Review*, **4**, 251(1990).
26. Partridge, D. & Hussain, K.M., *Artificial Intelligence and Business Management*, Ablex Publishing Corporation, New Jersey, 1992.
27. W.D. Blair, G.A. Watson, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom, Benchmark for Radar Allocation and Tracking in ECM, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **34**, 1097(1998).
28. D. Karaboğa, K. Güney, A. Kaplan and A. Akdağlı, A New Effective Side Length Expression Obtained Using a Modified Tabu Search Algorithm for the Resonant Frequency of a Triangular Microstrip Antenna, *Int. J. RF and Microwave Computer Aided Engineering*, **8**, 4(1998).



29. A. Akdağlı and K. Güney, Effective patch radius expression obtained using a genetic algorithm for the resonant frequency of electrically thin and thick circular microstrip antennas, IEE Proc.- Microwave Antennas and Propagation, **147**, 156(2000).
30. R.A.; Felix, E.N. Sanchez and G. Chen, Reproducing chaos by variable structure recurrent neural networks, IEEE Trans. Neural Networks **15**, 1450(2005).
31. S.; Ferrari and R.F. Stengel, Smooth function approximation using neural Networks, **15**, 24(2004).
32. D.Z. Feng; W.X. Zheng and Y. Jia, Neural network learning algorithms for tracking minor subspace in high-dimensional data stream, IEEE Trans. Neural Networks, **16**, 513(2005).
33. F.H.C. Tivive and A. Bouzerdoun, Efficient training algorithms for a class of shunting inhibitory convolutional neural Networks, IEEE Trans. Neural Networks, **16**, 541(2005).
34. G. Burel and D. Carel. Detection and localization of faces on digital images. Pattern Recognition Letters, **15**:963–967(1994).
35. H. A. Rowley, S. Baluja, and T. Kanade. Neural network-based face detection. IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, **20**:23–38(1998).
36. M.P. Weidman, Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibration, NIST Technical Note **1379**, January(1996).
37. Allen, J.W., F.R. Clague, N.T. Larsen, and W. P Weidman, NIST microwave power standards in waveguide, NIST Technical Note **1511**, U.S. Department of Commerce, February(1999).

38. R.F. Juroshek, John R., A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch, Microwave Journal, October(1997).
39. M.P. Weidman and P.A. Hudson, WR-10 Millimeterwave Microcalorimeter, NIST Technical Note **1044**, June, 1981.
40. F.R. Clague, A Calibration Service for Coaxial Reference Standards for Microwave Power, NIST Technical Note **1374**, May, 1995.
41. IEEE STD 194-1977, IEEE Standard Pulse Terms and Definitions, July 26, 1977.
42. ANSI/IEEE STD 181-1977, IEEE Standard on Pulse Measurement and Analysis by Objective Techniques, July 22, 1977.
43. W.H. Jackson, A Thin-Film Semiconductor Thermocouple for Microwave Power Measurements, Hewlett-Packard Journal, **26**, 1(1974).
44. A.P. Edwards, Digital Power Meter Offers Improved Accuracy, Hands-Off Operation, Systems Capability, Hewlett-Packard Journal, **27**, 2(1975).
45. J.C. Lamy, Microelectronics Enhance Thermocouple Power Measurements, Hewlett-Packard Journal, **26**, 1(1974).
46. Power Meter-New Designs Add Accuracy and Convenience, Microwaves, **13**, 11(1974).
47. Agilent Technologies, Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements, Application Note 64-1C, USA, April 16, 2001.
48. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, Second Edition, Wiley, (1981).

49. A. A. Fraser, A Planar-Doped-Barrier Detector for General Purpose Applications, Microwave Journal, (May, 1987).
50. Anderson, Alan, "Power Measurements for the Communications Market," MW/RF Magazine, October, 2000.
51. Weidman, M.P., Direct comparison transfer of microwave power sensor calibration, NIST Technical Note **1379**, U.S. Dept. of Commerce, January 1996.
52. Clague, F. R. , and P. G. Voris, Coaxial reference standard for microwave power, NIST Technical Note **1357**, U. S.Department of Commerce, April 1993.
53. Allen, J.W., F.R. Clague, N.T. Larsen, and W. P Weidman, "NIST microwave power standards in waveguide," NIST Technical Note **1511**, U. S. Department of Commerce, February 1999.
54. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISBN 92-67-10188-9, 1995.
55. K. Kurakawa, Power Waves and the Scattering Matrix, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, **13**, 2(1965).
56. NAMAS NIS 3003, The Expression of Uncertainty and confidence in Measurement for Calibrations, Edition 8, NAMAS Executive, National Physical Laboratory, Teddington, TW11 0LW, England, 1995.

## EK 1. YSA PROGRAMLARI

### CF<sub>STD</sub> parametresi için oluşturulan program

```
clear all;clc;

%tt=rand(1)*1000;

rand('seed',665);

giris=load('cfstdgir.txt');

cikis=load('cfstdcik.txt');

fnc1='tansig'; fnc2='logsig'; fnc3='purelin';

net=newff([minmax(giris)],[1,40,1],{fnc1,fnc1,fnc3},'trainlm');

%net parametreleri

    net.trainParam.show =100;

    net.trainParam.lr = 0.60;

    net.trainParam.lr_inc = 1.02;

    net.trainParam.epochs =5000;

    net.trainParam.goal = 1e-4;

net=train(net,giris,cikis);

t_fr=[.025 .625 3.4 7.6 16.5];

t_ysa=sim(net,t_fr);

disp('ysa ile elde edilen sonuçlar');

disp(t_ysa);

disp('deneysel sonuclar');

t_dny=[100.1 99.8 98.9 98.4 96.0];

disp(t_dny);
```

```
dny_cik=cikis';
ysa_cik=sim(net,giris);
figure
plot(giris,dny_cik,'b',giris,ysa_cik,'r');,
title('Egitim sonucu');
legend('deneysel','ysa');
figure
plot(t_fr,t_dny,'bo',t_fr,t_ysa,'rx');
title('test sonuçlari');
legend('deneysel','ysa');
warning off;
```

## CF<sub>DUT</sub> parametresi için oluşturulan program

```
clear all;clc;

%tt=rand(1)*1000;

rand('seed',746);

giris=load('cfdutgir.txt');

cikis=load('cfdutcik.txt');

fnc1='tansig'; fnc2='logsig'; fnc3='purelin';

net=newff([minmax(giris)],[1,15,15,1],{fnc1,fnc1,fnc1,fnc3},'trainlm');

%net parametreleri

    net.trainParam.show =100;

    net.trainParam.lr = 0.60;

    net.trainParam.lr_inc = 1.02;

    net.trainParam.epochs =5000;

    net.trainParam.goal = 1e-4;

net=train(net,giris,cikis');

t_fr=[.025 .625 3.4 7.6 16.5];

t_ysa=sim(net,t_fr);

disp('ysa ile elde edilen sonuçlar');

disp(t_ysa);

disp('deneysel sonuçlar');

t_dny=[100.6 99.2 98.0 97.0 94.1];

disp(t_dny);

dny_cik=cikis';

ysa_cik=sim(net,giris);

figure
```

```
plot(giris,dny_cik,'b',giris,ysa_cik,'r'),  
title('Egitim sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
plot(t_fr,t_dny,'bo',t_fr,t_ysa,'rx');  
title('test sonuçlari');  
legend('deneysel','ysa');  
  
warning off;
```

## **P<sub>STD</sub> parametresi için oluşturulan program**

```
clear all;clc;

%tt=rand(1)*1000;

rand('seed',785);

giris=load('pstdgir.txt');

cikis=load('pstdcik.txt');

fnc1='tansig'; fnc2='logsig'; fnc3='purelin';

net=newff([minmax(giris)],[1,80,1],{fnc1,fnc1,fnc3},'trainlm');

%net parametreleri

    net.trainParam.show =100;

    net.trainParam.lr = 0.60;

    net.trainParam.lr_inc = 1.02;

    net.trainParam.epochs =3000;

    net.trainParam.goal = 1e-6;

net=train(net,giris,cikis');

t_fr=[.025 .625 3.4 7.6 16.5];

t_ysa=sim(net,t_fr);

disp('ysa ile elde edilen sonuçlar');

disp(t_ysa);

disp('deneysel sonuclar');

t_dny=[0.9804 0.9719 0.9600 0.9388 0.9156];

disp(t_dny);

dny_cik=cikis';

ysa_cik=sim(net,giris);

figure
```



```
plot(giris,dny_cik,'b',giris,ysa_cik,'r');  
title('Egitim sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
plot(t_fr,t_dny,'bo',t_fr,t_ysa,'rx');  
title('test sonuçlari');  
legend('deneysel','ysa');  
  
warning off;
```

## **P<sub>DUT</sub> parametresi için oluşturulan program**

```
clear all;clc;

tt=rand(1)*1000;

rand('seed',709);

giris=load('pdutgir.txt');

cikis=load('pducik.txt');

fnc1='tansig'; fnc2='logsig'; fnc3='purelin';

net=newff([minmax(giris)],[1,80,1],{fnc1,fnc1,fnc3},'trainlm');

%net parametreleri

    net.trainParam.show =100;

    net.trainParam.lr = 0.60;

    net.trainParam.lr_inc = 1.02;

    net.trainParam.epochs =3000;

    net.trainParam.goal = 1e-6;

net=train(net,giris,cikis');

t_fr=[.025 .625 3.4 7.6 16.5];

t_ysa=sim(net,t_fr);

disp('ysa ile elde edilen sonuçlar');

disp(t_ysa);

disp('deneysel sonuclar');

t_dny=[.9843 .9654 .9508 .9246 .8971];

disp(t_dny);

dny_cik=cikis';

ysa_cik=sim(net,giris);

figure
```

```
plot(giris,dny_cik,'b',giris,ysa_cik,'r');  
title('Egitim sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
plot(t_fr,t_dny,'bo',t_fr,t_ysa,'rx');  
title('test sonuçlari');  
legend('deneysel','ysa');  
  
warning off;
```

## **CF<sub>STD</sub>, CF<sub>DUT</sub>, P<sub>STD</sub> ve P<sub>DUT</sub> parametreleri için oluşturulan program**

```
clear all;clc;

%tt=rand(1)*1000;

rand('seed',950);

giris=load('toplamgir.txt');

cikis=load('toplamcik.txt');

fnc1='tansig'; fnc2='logsig'; fnc3='purelin';

net=newff([minmax(giris)],[1,100,4],{fnc1,fnc1,fnc3},'trainlm');

%net parametreleri

    net.trainParam.show =100;

    net.trainParam.lr = 0.60;

    net.trainParam.lr_inc = 1.02;

    net.trainParam.epochs =5000;

    net.trainParam.goal = 1e-4;

net=train(net,giris,cikis');

d1=[100.6  100.1  0.9843      0.9804];

d2=[99.2   99.8  0.9654      0.9719];

d3=[98.0   98.9  0.9508      0.9600];

d4=[97.0   98.4  0.9246      0.9388];

d5=[94.1   96.0  0.8970      0.9156];

t_fr=[.025 .625  3.4  7.6 16.5];

t_ysa=sim(net,t_fr);

disp('ysa ile elde edilen sonuçlar');

t_ysa(:,3)=t_ysa(:,3)/100;

t_ysa(:,4)=t_ysa(:,4)/100;
```

```
disp(t_ysa);  
disp('deneysel sonuclar');  
t_dny=[d1;d2;d3;d4;d5];  
disp(t_dny);  
dny_cik=cikis;  
ysa_cik=sim(net,giris);  
figure  
plot(giris,dny_cik(:,1),'b',giris,ysa_cik(:,1),'r');,  
title('CFdut Egitim Sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
figure  
plot(giris,dny_cik(:,2),'b',giris,ysa_cik(:,2),'r');,  
title('CFstd Egitim Sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
figure  
plot(giris,dny_cik(:,3)/100,'b',giris,ysa_cik(:,3)/100,'r');,  
title('Pdut Egitim Sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
figure  
plot(giris,dny_cik(:,4)/100,'b',giris,ysa_cik(:,4)/100,'r');,  
title('Pstd Egitim Sonucu');  
legend('deneysel','ysa');  
figure  
plot(t_fr,t_dny(:,1),'bo',t_fr,t_ysa(:,1),'rx');  
title('CFdut Test Sonuclari');
```

```
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
  
plot(t_fr,t_dny(:,2),'bo',t_fr,t_ysa(:,2),'rx');  
  
title('CFstd Test Sonuçlari');  
  
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
  
plot(t_fr,t_dny(:,3),'bo',t_fr,t_ysa(:,3),'rx');  
  
title('Pdut Test Sonuçlari');  
  
legend('deneysel','ysa');  
  
figure  
  
plot(t_fr,t_dny(:,4),'bo',t_fr,t_ysa(:,4),'rx');  
  
title('Pstd Test Sonuçlari');  
  
legend('deneysel','ysa');  
  
warning off;;
```