

# YAPAY SİNİR AĞI TABANLI DOĞRUSALLAŞTIRMA BİRİMİ TASARIMI

Nuh EROĞLU<sup>1</sup> İlker DALKIRAN<sup>2</sup> Kenan DANIŞMAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Proton Bilgisayar ve Mühendislik Ltd. Şti.

Salih Avgun Paşa Cad. Kılıçer Apt. No:3/C, Kocasinan, KAYSERİ

<sup>2,3</sup>Erciyes Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 38039, Melikgazi, KAYSERİ

<sup>1</sup>e-posta: [nuheroglu@gmail.com](mailto:nuheroglu@gmail.com)

<sup>2</sup>e-posta: [ilkerd@erciyes.edu.tr](mailto:ilkerd@erciyes.edu.tr)

<sup>3</sup>e-posta: [danismak@erciyes.edu.tr](mailto:danismak@erciyes.edu.tr)

*Anahtar Sözcükler: Doğrusallaştırma, Yapay Sinir Ağları, Sıcaklık Ölçümü, NTC*

## ÖZET

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan sensörlerin çoğunun ölçtüğü fiziksel büyüklükle ürettiği çıkış arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur. Bu çalışmada negatif sıcaklık katsayısına sahip termistör (NTC) çıkışının doğrusallaştırılması amacıyla literatürde yer alan çeşitli teknikler mikrodenetleyici tabanlı elektronik devre kullanılarak denenmiştir. Hız, kullanılan hafıza kapasitesi gibi kriterler dikkate alınarak elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağları (YSA) tabanlı doğrusallaştırma işlemleri neticesinde elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak en uygun yapılar önerilmiştir.

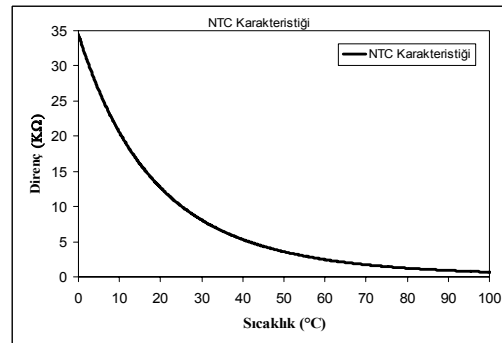
## 1. GİRİŞ

Fiziksel büyüklükler içerisinde sıcaklık, insanların sürekli olarak ilgi duydukları bir nicelik olmuştur. Bu nedenle sıcaklığın ölçülebilmesi için çeşitli sistemler tasarlanmıştır [1-3]. Sensörlerin ölçtükları sıcaklık değerleri ile çıkışlarında ürettikleri elektriksel büyüklükler arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Dolayısıyla sensör çıkışlarının daha kolay bir şekilde değerlendirilebilmesi için girişle ilişkili olarak doğrusallaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş ve literatüre girmiş farklı teknikler mevcuttur. Analog doğrusallaştırma teknikleri, interpolasyon tekniği (eğri uydurma), parçalı doğrusallaştırma tekniği ve "Look-Up Table" (LUT) şeklinde isimlendirilen teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır [4-8].

YSA, nöronların yapısındaki doğrusal olmayan transfer fonksiyonlarından dolayı gerçek hayatta karşılaşılan ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar vermektedir. Herhangi bir probleme ait az sayıda örnekten problemin giriş ve çıkışları arasında ilişki kurup daha önce hiç karşılaşılmayan girişlere karşılık beklenen çıkışlara çok yakın sonuçlar üretmektedir. Bunun yanı sıra ilgilenilen problemde meydana gelen değişimlere göre yeniden eğitilebilir olması önemli bir avantajdır. YSA'ların, probleme ait bilgileri depolaması ve

paralel işlem yapabilmesi, pek çok farklı disiplinlerde kullanılmasının nedenlerindedir. Genel olarak bakıldığında inşaat, yapı, makine, kimya, elektronik, süreç ve sistem mühendisliğinde yapay sinir ağları, oldukça fazla uygulama alanı bulmuştur [9,10].

Endüstriyel uygulamalarda sıcaklık ölçümü için kullanılan birçok sıcaklık sensörü vardır [11,12]. Bu çalışmada gerek kolay temin edilmeleri, gerek uygulama devrelerinin basitliği nedeniyle TTC3A103 tipi NTC kullanılarak literatürde yer alan doğrusallaştırma tekniklerinden seri direnç bağlama yöntemi, interpolasyon tekniği (eğri uydurma), LUT tekniği ve bir doğrusallaştırma tekniği olarak YSA, mikrodenetleyici tabanlı bir elektronik devre üzerinde gerçekleştirilmiştir. 25°C sıcaklıkta 10KΩ' luk direnç gösteren bu elemana ait karakteristik Şekil-1'de verilmiştir [13]. Her bir tekniğin performansı ve ürettiği sonuçlar diğer tekniklerle mukayese edilmiştir. Bahsedilen bu tekniklerin hepsi için NTC den alınan voltaj, sisteme giriş olarak uygulanmış ve girişe karşılık çıkış olarak sıcaklık bilgisi sıvı kristal ekrana yazdırılmıştır.



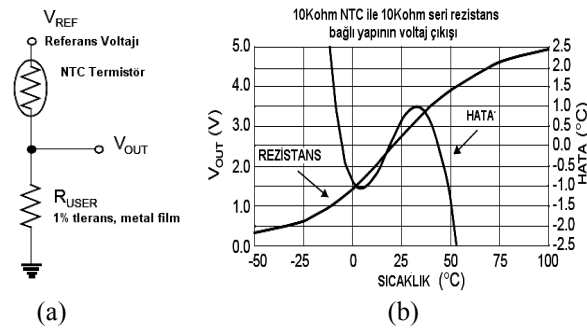
Şekil-1. TTC3A103 tipi NTC' nin Sıcaklık-Direnç Karakteristiği

## 2. ANALOG DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ

Analog devreler kullanılarak yapılan doğrusallaştırma işlemlerinde sayısal bir kontrol birimine ihtiyaç

duyulmaz. Buna karşılık bahsedilen devrelerin yapısında kullanılan direnç ve kapasitör gibi elemanların devrenin çalışma sahasını doğrudan etkilemesi, bu elemanların istenilen değerde temin edilememesi ve eleman değerlerinin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişebilmesi gibi pek çok dezavantaj, doğrusallaştırma işlemlerinde analog devrelerin tercih edilmemesine neden olmaktadır [6, 14]. Şekil-2.a'da seri direnç bağlı bir NTC nin çıkışı analog olarak doğrusallaştırılmaktadır. Bu devrede kullanılan direncin değerine bağlı olarak doğrusallaştırılan aralığın çok dar bir bölgeye karşılık geldiği Şekil-2.b'de görülmektedir.

Gelişen yarıiletken teknolojisiyle beraber mikroişlemci fiyatlarının düşmesi, veri değerlendirme sistemlerini ihtiva eden birçok tasarımda bu devre elemanlarının tercih edilmesinde uygun ortamı hazırlamıştır. Dolayısıyla bunların birer devre elemanı olarak kullanılmasıyla analog doğrusallaştırma yöntemlerinin yerine sayısal doğrusallaştırma yöntemleri tercih edilmeye başlanmıştır [15].



Şekil-2. Seri Direnç Kullanılarak Gerçekleştirilen Analog Doğrusallaştırma Tekniğine İlişkin (a). Devre Yapısı (b). Sıcaklık-Çıkış Voltajı ve Sıcaklık-Hata Eğrileri

### 3. SAYISAL DOĞRUSALLAŞTIRMA TEKNİKLERİ

Günümüzde mikroişlemci tabanlı sıcaklık ölçüm sistemlerinin tasarımında, girişle doğrusal olmayan çıkış üreten sensörlerin çıkışlarının doğrusallaştırılması amacıyla interpolasyon (eğri uydurma) metotları kullanılmaktadır. Bu metotla yapılan tasarımlar, iki alternatif üzerine kurulmuştur. Bunlardan ilkinde, katsayıları sadece okunabilir bir hafıza (ROM) üzerinde saklanan ve interpolasyon tekniğiyle elde edilen birinci dereceden veya daha yüksek dereceli bir denklem ile sensörden alınan mevcut giriş verileri kullanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde çıkışlar üretilir. Böyle bir sistemde denklemin derecesi küçük olursa katsayıların sayısı da az olmaktadır. Tasarlanan sistemin yapısı basit olmakla beraber, sistemin çıkışında elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçlar arasındaki hata miktarı büyük olmaktadır. Artırılan sistem derecesi ile birlikte denkleme ait katsayıların sayısı ve buna paralel olarak

sistem karmaşası da artmaktadır. İnterpolasyon tekniğinde ikinci bir yöntem, uydurulan eğrinin üstel, trigonometrik veya daha farklı bir formda olmasıdır. Ancak bahsedilen tipte bir fonksiyonun devre üzerinde gerçekleştirimi de polinom tipindeki denklemlerinki gibi zordur [5, 16].

TTC3A103 tipi NTC için üretici firma tarafından verilen sıcaklığa bağlı direnç ifadesi Denklem-1'de verilmiştir [12, 13].

$$R_T = R_{Tr} * e^{\left[-\frac{B}{Tr^2} \cdot \Delta T(T_r / T)\right]} \quad (1)$$

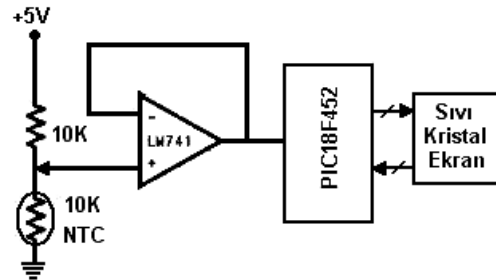
Bu ifadede T, NTC nin bulunduğu ortamın sıcaklığını,  $R_T$ , T sıcaklığındaki NTC nin direncini,  $T_r$ , 25°C oda sıcaklığını,  $R_{Tr}$ , oda sıcaklığındaki NTC direncini (10KΩ), B, üretici firma tarafından katalog bilgisi olarak verilen rezistans sıcaklık katsayımı ifade etmektedir. Denklem-1 kullanılarak, ölçülen sıcaklık değeri,

$$T = \frac{1}{\frac{1}{Tr} - \frac{1}{B} * \ln\left(\frac{R_{Tr}}{R_T}\right)} \quad (2)$$

olarak elde edilir. Denklem-2'de verilen matematiksel ifade Şekil-3'de blok şeması verilen devredeki mikrodenetleyici üzerinde gerçekleştirilerek NTC nin çıkışı doğrusallaştırılmıştır.

Bir diğer yöntemde ise, ROM üzerinde saklanan tek boyutlu "Look-Up Table" (LUT) olarak isimlendirilen bir veri tabanı oluşturulmakta ve sensörden okunan veriye karşılık bu veri tabanından uygun değerler seçilerek çıkışa aktarılmaktadır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı oluşturulan veri tabanının büyüklüğünün sistemin hassasiyeti ile doğru orantılı olarak artmasıdır. Diğer bir deyişle yüksek hassasiyetli bir ölçme sisteminin arzu edildiği uygulamalarda ihtiyaç duyulan hafıza boyutlarının artması kaçınılmazdır [5,7].

Yapılan çalışmada, Denklem-1'de verilen eşitlik kullanılarak NTC ye ilişkin sıcaklık-direnç ilişkisi tespit edilmiş ve Şekil-3' de blok şeması verilen devrede mikrodenetleyici üzerinde tek boyutlu 100 elemanlı bir LUT oluşturulmuştur.



Şekil-3. Eğri Uydurma Tekniği ile NTC Çıkışının Doğrusallaştırılması

#### 4. YAPAY SINİR AĞLARI

Doğrusal olmayan sistem karakteristiklerini en az hata ile modelleyebilme potansiyeline sahip olmalarından dolayı yapay sinir ağları, eğri uydurma alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları kullanılarak ölçüm sisteminin kalibrasyon verisinden kolayca elde edilebilen ve öğrenme verisi olarak da adlandırılan giriş-çıkış veri çiftlerinden, doğrudan olmasa da dolaylı olarak giriş çıkış ilişkisini ortaya koyan F fonksiyonu elde edilir. Bu bağlamda, polinomial interpolasyon gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında, herhangi bir sistem davranışının modellenmesinde yapay sinir ağları daha düşük hatalar sunabilmektedir. Ayrıca yapay sinir ağları kullanılarak yüksek dereceden polinomial interpolasyonun neden olduğu bilinen sayısal kararsızlık problemleri aşılmaktadır [9, 10, 15, 17-20].

YSA'nın eğitimi ve testi için gerekli olan voltaj ve sıcaklık bilgileri, üzerinde 10 bit ADC bulunan PIC18F452 serisi mikrodenetleyici kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayar ortamında MATLAB NN Toolbox ile eğitilen YSA'nın ağırlıkları yine PIC18F452'nin içerisine gömülerek YSA'nın donanım üzerinde çalışması sağlanmıştır. Seçilen modelin ileride donanımsal olarak gerçekleştirilebileceği düşünülerek (paralel çalışan YSA işlemci bloğu) sistem hatası ile küçük boyutlu bir model arasında optimum çözümü sağlayacak bir seçim yapılmıştır. Tablo-1'de bir ve iki ara katmanlı ağ modellerinin test hataları ve nöron sayıları yer almaktadır.

Yapılan çalışmada, donanım üzerinde (Şekil-3) hem bir ara katmanlı hem de iki ara katmanlı YSA modelleri denenmiştir. Gerçekleştirilen tek ara katmanlı ağ modelinin yapısı, 1x9x1 şeklinde olup giriş ve çıkış katında doğrusal transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Gizli katmanda ise transfer fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant sigmoid seçilmiştir. Modelin eğitimi sırasında Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması kullanılmıştır. İki ara katmanlı yapıda ise 1x10x3x1 şeklinde bir ağ modeli gerçekleştirilmiş olup yine giriş ve çıkış katında doğrusal transfer

Tablo-1. Farklı YSA Modellerine Ait Bilgisayar Ortamındaki Test Hataları ve Nöron Sayıları

Test Hatası (MSE)	1. Ara Katman	Transfer Fonksiyonu	2. Ara Katman	Transfer Fonksiyonu
0,00176	10	Tanjant Sigmoid	3	Tanjant Sigmoid
0,00178	5	Tanjant Sigmoid	7	Logaritmik Sigmoid
0,00178	7	Logaritmik Sigmoid	8	Tanjant Sigmoid
0,00197	9	Tanjant Sigmoid	0	
0,00199	8	Logaritmik Sigmoid	0	
0,00199	10	Tanjant Sigmoid	0	

fonksiyonu kullanılmıştır. Her iki ara katmanda da hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonu seçilmiştir. Gerek eğitim aşamasında gerekse test aşamasında veriler  $\pm 1$  arasında normalize edilmiştir.

#### 5. DEVRE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Yapılan çalışmada Şekil-3'de blok yapısı verilen devre, MICROCHIP firmasının ürettiği PIC18F452 serisi mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Mikrodenetleyici 40 MHz çalışma frekansına sahip olup bu elemanın 33 adet giriş-çıkış terminali bulunmaktadır. Mikrodenetleyici üzerinde 8 kanal, 10 bit ADC bulunmaktadır. ADC nin dinamik sahası 0-5V olup adım büyüklüğü 4,8828125mV'tur [14]. Tasarlanan bu sistem ile NTC nin doğrusal olmayan karakteristiği de dikkate alındığında 0~30°C aralığında yaklaşık olarak  $\pm 0,07^\circ\text{C}$  lik, 30~100°C aralığında ise  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  lik bir hassasiyetle sıcaklık farkı algılanabilmektedir.

Gerçekleştirimi yapılan teknikler için gerekli olan veriler, NTC elemanı yerine 000.000mV ile 320.000mV aralığında  $\pm 0.006\%+4.16\mu\text{V}$  hassasiyete sahip Wavetek 9100 kalibratör kullanılarak üretilmiştir [21].

Bahsedilen doğrusallaştırma algoritmalarından LUT tekniğine, matematiksel modele ve YSA'na ait hız ve mikrodenetleyici üzerindeki kapladıkları hafıza boyutları, Tablo-2'de verilmektedir.

#### 6. SONUÇ

Yapılan bu çalışma ile doğrusal olmayan bir sensörün çıkışının doğrusallaştırılması amacıyla yapay sinir ağlarının alternatif bir yöntem olabileceği görülmüştür. Yapılan deneysel ölçümler neticesinde LUT ve YSA nin ürettikleri çıkışlar için matematiksel model referans alınarak hata analizi yapılmıştır. Elde edilen hata miktarları ortalama yüzde bağıl hata cinsinden Tablo-3'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde her üç tekniğinde bazı avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmıştır.

Tablo-2. Gerçekleştirilen Teknikleri Ait İşlem Süreleri ve Kapladıkları Hafıza Boyutları

	İşlem Süresi ( $\mu\text{sn}$ )	Hafıza Boyutu (KB)
1 Ara Katmanlı YSA	88	8
2 Ara Katmanlı YSA	105	10
LUT	19	3
Matematiksel Model	52	1

Tablo-3. Matematiksel Model Referans Alındığında Diğer Tekniklerin Ort. % Bağıl Hata Miktarları

	1 Ara Katmanlı YSA	2 Ara Katmanlı YSA	LUT
Ort. % Bağıl Hata (°C ± %)	1,366	1,049	1,204

Mikrodenetleyici üzerinde gerçekleştirilen 100 elemanlı LUT ile 0,5°C hassasiyetle ölçümler yapılmıştır. Eğer ölçüm hassasiyeti artırılmak istenirse kullanılacak olan LUT un boyutları büyüyeceği için işlem süresi de artacaktır. Ayrıca kullanılan mikrodenetleyicinin hafızası da sınırlı olduğu için harici hafıza elemanlarına ihtiyaç duyulabilecektir. Böyle bir durumda ise işlem süresi daha da artacaktır.

Bu çalışmada kullanılan matematiksel model çok karmaşık değildir. Ancak farklı sensörler için daha karmaşık matematiksel modellerin ortaya konması durumunda zorluklar yaşanabilir. Örneğin yazılan programları mikrodenetleyiciye uygun hale getiren derleyicilerin kütüphaneleri, gerekli fonksiyonları desteklemeyebilir. Bu durumda gerekli matematiksel fonksiyonları gerçekleştirmek için yürütülmesi gerekli olan işlem sayısı artacak ve dolayısıyla da işlem süresi uzayacaktır.

Tasarlanacak YSA tabanlı bir doğrusallaştırma biriminde seçilecek YSA modeli için hız ve hata kriterleri dikkate alınmalıdır. Tablo-2 ve Tablo-3 göz önüne alındığında tek ara katmanlı model seçildiğinde sistem, daha hızlı çalışmaktadır. Buna karşılık sistem hatası büyümektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan mikrodenetleyicinin seri işlem mantığıyla çalıştığı göz önüne alınmalıdır. Paralel işlem mantığıyla çalışan bir donanımın kullanılması durumunda aynı hata miktarlarına sahip ancak daha hızlı çalışan YSA modelleri ortaya konulabilecektir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] Omega Engineering Inc., [www.omega.com](http://www.omega.com)
- [2] Ellab A/S, [www.ellab.dk](http://www.ellab.dk)
- [3] National Semiconductor Corporation, [www.national.com](http://www.national.com)
- [4] Brignell J., Software Techniques For Sensor Compensation, SENS. ACTUATORS A., Vol 25, Iss 27, pp 29-35, 1991.
- [5] Mahana, P.N., Trofimenkoff F.N., Transducer Output Signal Processing Using an Eight-bit Microcomputer, IEEE TRANS. INST. & MEAS., Vol IM-35, Iss 2, pp 182-186, 1986.
- [6] Patranabis D., Ghosh S., Bakshi C., Linearizing Transducer Characteristics, IEEE TRANS. INST. & MEAS., Vol 37, Iss 1, pp 66-69, 1988.
- [7] Flammini A., Marioli D., Taroni A., Transducer Output Signal Processing Using An Optimal Look-Up Table In Microcontroller Based Systems, ELECTRONICS LETTERS, Vol 33, Iss 14, pp. 1197-1198, 1997.
- [8] Bucci G., Faccio M., Landi C., The Implementation Of A Smart Sensor Based On A Piece-Linear A/D Converter, IEEE TRANS. INST. & MEAS. TECH. CONFERENCE, pp 1173-1177, 1997.
- [9] Meireles M.R.G., Almeida P.E.M., Simoes M.G., A Comprehensive Review For Industrial Applicability Of Artificial Neural Networks, IEEE TRANS. IND. ELECT., Vol 50, Iss 3, pp. 585-601, 2003.
- [10] Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M., Neural Network Design, PWS Publishing Company, Boston, 1995.
- [11] Considine, D.M., Process Instruments And Controls Handbook, New York, MacGraw-Hill, 1985.
- [12] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharki J., McGhee J., Temperature Measurement, John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [13] Thinking Electronic Industrail Co., Ltd., [www.thinking.com.tw](http://www.thinking.com.tw)
- [14] Microchip Technology Inc., [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [15] Attari M., Boudjema F., Heniche M., An Artificial Neural Network To Linearize A G (Tungsten vs. Tungsten 26% Rhenium) Thermocouple Characteristic In The Range Of Zero To 2000°C, PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, ISIE '95, , Vol 1,1995.
- [16] Anvekar D.K., Sonde B.S., Transducer Output Signal Processing Using Dual And Triple Microprocessor Systems, IEEE TRANS. INST. & MEAS., Vol 38, Iss 3, pp 834-836, 1989.
- [17] Dalkıran İ., Danışman K., An Artificial Neural Network to Linearize Different Thermocouple Characteristics, INTERNATIONAL XII. TURKISH SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NEURAL NETWORKS – TAINN 2003, 2003
- [18] Dempsey G.L., Alt N.L., Olson B.A., Alig J.S., Control Sensor Linearization Using a Microcontroller-Based Neural Network, PROCEEDINGS OF IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, pp 3078-3083, 1997.
- [19] Medrano-Marques N.J., Martin-del-Brio B., A General Method For Sensor Linearization Based On Neural Networks, IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, pp 497-500, 2000.
- [20] Medrano-Marques N.J., Martin-del-Brio B., Sensor Linearization With Neural Networks, IEEE TRANS. IND. ELECT., Vol 48, Iss 6, pp. 1288-1290, 2001.
- [21] Test Equipment Connection, [www.testequipmentconnection.com](http://www.testequipmentconnection.com)