KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ITS-90 UYUMLU STANDART PLATİN DİRENÇ TERMOMETRE SİSTEMİNİN ANFIS İLE GELİŞTİRİLMESİ

ERBİL KIZILDAŞ

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ITS-90 UYUMLU STANDART PLATİN DİRENÇ TERMOMETRE SİSTEMİNİN ANFIS İLE GELİŞTİRİLMESİ

ERBİL KIZILDAŞ

Prof.Dr. Melih İNAL
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç.Dr. Mehmet YILDIRIM
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç.Dr. Serhat YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Yrd.Doç.Dr. Atila BOSTAN
Jüri Üyesi, Atılım Üniversitesi .....

Yrd.Doç.Dr. Tolga ÖNEL
Jüri Üyesi, Deniz Harp Okulu .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.01.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yazılım dünyasında eskiden süre gelen yöntemlerin başında kesin verilerin kullanıldığı analitik hesaplama gelmektedir. Ancak, kesin veri olmayan durumlarda da doğru sonuca ulaşabilme ihtiyacı vardır. Günlük hayatta sıklıkla karşılaştığımız problemler için genel geçerliliği olan basit matematiksel formül bulmak çoğu zaman mümkün değildir.

Yumuşak hesaplama genel olarak analitik modeller ile yorumlanması güç olan çok değişkenli ve çok parametreli sayısal yapıların analizinde kullanılmaktadır. Şüphe ve belirsizlik ortamlarında, yumuşak hesaplama algoritmaları ile insan beyninin sorgulama ve öğrenme yeteneği taklit edilmektedir. Bilgisayarlardaki işlem gücü artarken işlem maliyetlerinin de azalması oldukça yoğun bir işlem gücü gerektiren bu yaklaşımı giderek daha cazip hale getirmektedir.

Bu çalışmada yumuşak hesaplama algoritmalarından biri olan Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi (ANFIS- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), Standart Platin Direnç Termometreleri (SPRT)'nin geliştirilmesine yönelik ekonomik katkı sağlayacak bir model için kullanılmıştır.

SPRT'ler uluslararası sıcaklık ölçeğinin oluşturulmasında kullanılan sabit sıcaklık noktalarının birbirleri ile olan bağlantılarının kurulmasında kullanılmaktadır. Tüm metroloji enstitüleri platin direnç termometreleri, standart referans termometre olarak kullanmaktadır. Böylece pratik uygulamalarda ölçülen sıcaklıklar ITS-90 ile ilişkilendirilmiş ve izlenebilirlikle birlikte, çalışmaların uluslararası kabul gören bir sıcaklık ölçeğinde yapılması sağlanmıştır.

ANFIS, çok değişik alanlara başarıyla uygulanmış ve bu alanların gelişmesine katkı sağlamıştır. Mevcut durumda SPRT geliştirilmesine uygulanmayan ANFIS ilk defa bu alanda uygulanmıştır. Bu çalışmayla ölçümlerde termometre hatalarından kaynaklanan sorunların en aza indirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, ANFIS modeli ile oluşturulan sıcaklık ölçüm sistemi diğerlerine oranla daha ekonomiktir.

Çalışmalarım süresince her türlü desteği bana sunan, tezim ile ilgili yaptığım çalışmaların tüm aşamalarında yanımda olan, danışmanım Prof.Dr. Melih İNAL'a ve tez izleme komitesi üyesi hocalarım Doç.Dr. Mehmet YILDIRIM ve Doç.Dr. Serhat YILMAZ'a teşekkür ederim. Tezimin gerçekleştirilmesi aşamasında sıcaklık laboratuarını kullanmama izin veren TÜBİTAK UME'ye ve yardımlarından dolayı sıcaklık laboratuarı çalışanlarına şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam sırasında bazen ihmal etmek zorunda kaldığım, yine de bana desteğini esirgemeyen eşim Hatice KIZILDAŞ ve kızlarım Damla KIZILDAŞ ve Büşra KIZILDAŞ'a sevgilerimi sunarım.

Ocak – 2016 Erbil KIZILDAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. PLATİN DİRENÇ TERMOMETRELER 11
1.1. Platin Direnç Termometrelerin Çalışma Prensibi 12
1.2. Direnç Ölçümü ve Veri Alma 14
1.3. Standart Platin Direnç Termometrelerinin Kalibrasyonu 16
1.3.1. 13,8033 K – 273,16 K sıcaklık aralığı 18
1.3.2. 273,16 K / 1234,93 K sıcaklık aralığı 20
1.3.3. ITS-90'daki ara sıcaklık bölgeleri 20
1.4. SPRT Yapısı 22
2. ARA DEĞERLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE ITS-90 SICAKLIK STANDARDININ GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ 25
2.1. Geleneksel Ara Değerleme Yöntemleri 25
2.2. Yapay Sinir Ağları 27
2.3. Bulanık Çıkartım Sistemi 29
2.4. Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi 30
3. VERİ EDİNİM CİHAZI VE MATLAB ENTEGRASYONU 33
3.1. MATLAB Yazılımının İncelenmesi 33
3.2. Veri Edinim Cihazı ile Dizüstü Bilgisayar Entegrasyonu 34
3.3. Veri Edinimi Cihazı İle MATLAB Uyuşumu 36
3.4. Veri Edinimi Cihazı Üzerinden Direncin Okutulması 37
3.5. Uygulama Arayüzünün C#'da Gerçekleştirilmesi ve MATLAB Entegrasyonun Sağlanması 39
4. SPRT'LERİN ANFIS İLE GELİŞTİRİLMESİ 43
4.1. Veri Edinimi Çalışmaları 43
4.2. Öğrenme Aşamasında Kullanılan Veriler 43
4.3. Verilerin ANFIS Öğrenme Aşamasında Kullanılması 44
5. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEMİN TEST EDİLMESİ 50
5.1. TÜBİTAK UME Sıcaklık Laboratuvarında ITS-90'a Göre Yapılan Ölçüm İşlemleri 50
5.2. Ölçüm İçin Kullanılan SPRT'nin Özellikleri 53
5.3. Gerçekleştirilen Sistem İle Yapılan Ölçüm İşlemleri 54
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 62
EKLER 67
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 97
ÖZGEÇMİŞ 98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Standart platin direnç termometre 11
Şekil 1.2. Potansiyometrik yöntemle direnç ölçümü....15
Şekil 1.3. Wheatstone köprüsü ile direnç ölçümü 15
Şekil 1.4. Standart platin direnç termometre ve genel hatları ile boyutları 23
Şekil 1.5. Standart platin direnç termometre sensör yapısı 24
Şekil 2.1. İki boyutlu ara değerlemede griddata komutunun kullanımı 26
Şekil 2.2. Bulanık çıkarım sistemi süreç adımları 29
Şekil 2.3. Örnek bir ANFIS ağının yapısı 32
Şekil 3.1. Veri edinim cihazı 34
Şekil 3.2. Veri edinim cihazı bağlantıları....35
Şekil 3.3. NI ExpressCard-8360 kartının bilgisayara entegre edilmesi....35
Şekil 3.4. Cihazın konfigürasyon ekranı 36
Şekil 3.5. Cihazın konfigürasyon ekranı ve test panel 36
Şekil 3.6. Cihaza bağlanmak için kullanılan kod....37
Şekil 3.7. Cihazdan veri almak için kullanılan kod 37
Şekil 3.8. Cihazın bağlantısının kesilmesi 38
Şekil 3.9. NI PXI-4071 ölçüm arayüzü ve sanal cihazın ayarlanması 39
Şekil 3.10. Uygulama arayüz temel yapısı....40
Şekil 3.11. MLApp nesneleri oluşturulması....41
Şekil 3.12. MATLAB kodlarını çalıştırma kodları....41
Şekil 3.13. Uygulamadan çıkış....42
Şekil 4.1. ANFIS öğrenme aşaması kodları....45
Şekil 4.2. Öğrenme ve kontrol verilerinin dağılımı 46
Şekil 4.3. Eğitilen data ile ANFIS çıkışının karşılaştırılması....47
Şekil 4.4. Mutlak hata....47
Şekil 4.5. Kontrol verisi ile bağıl hatanın gösterimi 48
Şekil 4.6. Eğitim verisi ile bağıl hatanın gösterimi....48
Şekil 4.7. ANFIS eğitim sonucu....49
Şekil 5.1. Galyum bakım banyosu....51
Şekil 5.2. Wheatstone köprüsü....51
Şekil 5.3. Suyun üçlü noktası bakım banyosu 52
Şekil 5.4. Bilgisayar ve veri edinim cihazının SPRT ile bağlantısı....55
Şekil 5.5. Gerçekleştirilen arayüz yazılımı....55
Şekil 5.6. TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarındaki ölçüm işlemleri....56
Şekil 5.7. Galyumun ergime noktasında direnç ve sıcaklık ölçümü....57
Şekil 5.8. Kalayın donma noktasında direnç ve sıcaklık ölçümü....57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Uluslararası sıcaklık ölçeğini oluşturan sabit sıcaklık noktaları 17
Tablo 1.2. ITS-90 tarafından hesaplanan katsayılar 19
Tablo 4.1. Farklı SPRT'ler için suyun üçlü noktası değerleri 43
Tablo 5.1. ITS-90 sabit nokta sıcaklık değerleri 52
Tablo 5.2. Sabit noktalarda ölçülen direnç oranları ve belirsizlik değerleri 53
Tablo 5.3. ITS-90'a göre -189,3442 °C ile 0,01 °C aralığı için elde edilen kalibrasyon katsayıları 53
Tablo 5.4. ITS-90'a göre 0,01 °C ile 419,527 °C aralığı için elde edilen kalibrasyon katsayıları 54
Tablo 5.5. SPRT'nin referans ve ölçüm değerleri ile aralarındaki fark.....58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	Amper
Ag	:	Gümüş
Al	:	Alüminyum
Ar	:	Argon
Au	:	Altın
°C	:	Santigrat
Cu	:	Bakır
Ga	:	Galyum
H_2	:	Hidrojen
H_2O	:	Su
Hg	:	Civa
I	:	Akım
K	:	Kelvin
kPa	:	Kilopascal
Ln	:	İndiyum
mK	:	mili Kelvin
Ne	:	Neon
O_2	:	Oksijen
p	:	Toplam özdirenç
p_t	:	Isıl etkenlere bağlı özdirenç, (Ω.m)
p_i	:	Safsızlıklara bağlı özdirenç, (Ω.m)
p_d	:	Mekanik gerilmeler nedeniyle bozukluklara bağlı özdirenç, (Ω.m)
R	:	Direnç
R(t)	:	Metal telin t sıcaklığındaki direnç değeri
R(0°C)	:	Metal telin 0 °C'deki direnç değeri
R'(t)	:	Örgüde yabancı atomlar olduğunda, t sıcaklığındaki direnç değeri
Sn	:	Kalay
t	:	Ortamın sıcaklık değeri
W	:	Sıcaklık değeri
wi	:	Kural eşleştirme faktörü
V	:	Voltaj
Zn	:	Çinko
α	:	Metal telin sıcaklık uzama katsayısı
α'	:	Yabancı atomların bulunduğu örgüdeki sıcaklık uzama katsayısı
Ω	:	Ohm

Kısaltmalar

ANFIS	:	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi)
ANN	:	Artificial Neural Network (Yapay Sinir Ağları)
ARIMA-ANN	:	Autoregressive Intelligent Moving Average-Artificial Neural Network (Özbağınımlı Akıllı Hareketli Ortalama-Yapay Sinir Ağları)
ARMA	:	Autoregressive Moving Average (Özbağınımlı Hareketli Ortalama)
BCO	:	Bulanık C-Ortalamalar

CIPM	:	International Comite Of Measurement (Uluslararası Ölçüm Komitesi)
ENRBF	:	Extended Normalized Radial Basis Function (Genişletilmiş Normalleştirilmiş Radyal Temel Fonksiyon)
IT2FNN	:	Ara Katman Tip-2 Bulanık Sinir Ağı (Interval Type-2 Fuzzy Neural Network)
ITS-90	:	International Temperature Scale (Uluslararası Sıcaklık Ölçeği)
NRBF	:	Normalized Radial Basis Function (Normalleştirilmiş Radyal Temel Fonksiyon)
PCMCIA	:	Personal Computer Memory Card International Association (Kişisel Bilgisayar Bellek Kartı Uluslararası Birliği)
RTD	:	Resistance Temperature Detector (Rezistans Sıcaklık Sezilmeyicisi)
SOFNN	:	Self-Organizing Fuzzy Neural Network (Özörgütlemeli Bulanık Sinir Ağı)
SPRT	:	Standard Platinum Resistance Thermometer (Standart Platin Direnç Termometre)
SÜN	:	Suyun Üçlü Noktası
TSK	:	Takagi–Sugeno–Kang (Sugeno Bulanık Modeli)
UME	:	Ulusal Metroloji Enstitüsü
YSA	:	Yapay Sinir Ağları

ITS-90 UYUMLU STANDART PLATİN DİRENÇ TERMOMETRE SİSTEMİNİN ANFIS İLE GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Uluslararası sıcaklık ölçeği (ITS-90)'nde ara değerleme (interpolasyon) aracı olarak Standart Platin Direnç Termometreleri (SPRT) ve sıcaklık ölçeği için özel olarak tanımlanmış fonksiyonlar kullanılmaktadır. ITS-90, maddelerin değişmeyen fiziksel özelliklerinden (ergime / donma / üçlü hal sabit sıcaklık nokta değerleri) yararlanılarak oluşturulmuştur. TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'nde ITS-90 da tanımlı sabit sıcaklık nokta değerlerinin elde edilmesine yönelik, her türlü alt yapı ihtiyacı kurulmuş ve çok çeşitli sabit sıcaklık nokta hücreleri yapılmıştır. Ancak ölçeğe ait ara değerlerin oluşturulması için kullanımı zorunlu olan SPRT dünyadaki diğer birçok metroloji enstitüsünde olduğu gibi halen yurt dışından temin edilmektedir.

Yumuşak Hesaplama Araçlarından biri olan Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi (ANFIS- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), bulanık çıkartım sistemi ve eğiticili öğrenme algoritmasına sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarının uyarlamalı bir modelidir. Uyarlamalı model, işlem birimlerini ve bu birimlerin bağlantılarını içeren bir yapay sinir ağı katmanına sahiptir. İşlem birimleri, ağırlıklara sahip olup bir öğrenme algoritmasının öngördüğü hata değerini minimize etmek için bu ağırlıkların nasıl değiştirileceği belli olan uyarlamalı bir yapıdadır.

Bu tez çalışmasında, UME'de yapılan SPRT'lerde ANFIS kullanılarak ITS-90 standardının sisteme öğretilmesi amaçlanmaktadır. Böylece ITS-90'da tanımlanmış ara değerleme hesaplamaları yapılmadan, ölçülen her direnç değerine karşılık gelen sıcaklık değerini pratik olarak hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir. Problem girdisi olarak TÜBİTAK UME'nin sıcaklık laboratuvarında elde edilen veriler kullanılmıştır. Oluşturulan sistemde, SPRT'lerde Wheatstone köprüsü kullanılmadan analitik ANFIS kullanılarak 2 mK'den küçük hata ile TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuvarlarında elde edilen sıcaklık ölçümlerine çok yakın sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ara Değerleme, Uluslararası Sıcaklık Ölçeği, Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi, Yumuşak Hesaplama Algoritması.

DEVOLOPMENT OF ITS-90 COMPLIANT STANDARD PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER SYSTEM WITH ANFIS

ABSTRACT

As an equipment for interpolation, Standard Platinum Resistance Thermometers (SPRT) and functions which are specifically defined for temperature scale are used in International Temperature Scale (ITS-90). ITS-90 is designed from the unaltered physical features of substances (melting / frosting / the measures of stable temperature in trible conditions). At TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) National Metrology Institute, all required and necessary basum were constructed and a variety of stable temperature cells were designed in order to get the result of measures in constant temperature defined in ITS-90. However, the standard platinum resistant thermometers which have to be used to measure interpolation are imported from other countries as in other metrology institutes.

As one of Soft Computing Tools, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) is an adaptive model of fuzzy inference system and feedforward artificial neural network which has a supervised learning algorithm. The adaptive model includes calculation parts and artificial neural network divisions including connections of these divisions. Calculation parts have weights and are in adaptive form of which can minimize the error measures that are predicted by learning algorithms to change the weights.

The purpose of this thesis is to teach the ITS-90 standard to the system by applying ANFIS which are produced from SPRT by UME. Thus, a software has been developed, which can practically calculate the value of temperature in response to the resistance value measured without interpolating the ITS-90 values. The data which is gathered from temperature laboratory of UME, TUBİTAK was used as problem input. Through the developed system by using ANFIS and wıthout applying Wheatstone bridge of SPRT, the measurement of temperature with fault less than 2 mK which has the closest result to the value of UME TUBITAK laboratories was performed.

Keywords: Interpolation, International Temperature Scale, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Soft Computing Algorithm.

GİRİŞ

Uluslararası Ölçüm Komitesi (CIPM-International Comite of Measurement) 1887 yılından beri, ölçüm birliğinin sağlanması ve sıcaklık ölçümleri konusunda çalışmalar yapmaktadır. 1990 yılında yapılan son çalışmada uluslararası sıcaklık ölçeği (ITS-90) oluşturulmuştur. ITS-90, maddelerin değişmeyen fiziksel özelliklerinden (ergime / donma / üçlü hal sabit sıcaklık nokta değerleri) yararlanılarak oluşturulmuştur. Uluslararası bu sıcaklık standardında ara değerleme (interpolasyon) aracı olarak SPRT'ler ve sıcaklık ölçeği için özel olarak tanımlanmış fonksiyonların kullanılmıştır. Böylece pratik uygulamalarda ölçülen sıcaklıklar ITS-90 ile ilişkilendirilmiş ve izlenebilirlikle birlikte, çalışmaların uluslararası kabul gören bir sıcaklık ölçeğinde yapılması sağlanmıştır.

Ülkemizdeki her türlü ölçüm birim sistemine ait fiziksel büyüklükleri en hassas şekilde oluşturmak ve ülke içerisine bu sistemin dağılımını sağlamakla görevlendirilmiş olan TÜBİTAK UME kurumudur. UME'de ITS-90 da tanımlı sabit sıcaklık nokta değerlerinin elde edilmesine yönelik, her türlü alt yapı ihtiyacı kurulmuş ve çok çeşitli sabit sıcaklık nokta hücreleri yapılmıştır. Ancak ölçeğe ait ara değerlerin oluşturulması için kullanılan standart platin direnç termometreleri dünyadaki diğer birçok metroloji enstitüsünde olduğu gibi halen yurt dışından temin edilmektedir. Bu konudaki dışa bağımlılığın ortadan kaldırılması ülkemize büyük yarar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında; UME'de yapılan SPRT'lerde ANFIS kullanılarak ITS-90 standardının sisteme öğretilmesi amaçlanmaktadır. Böylece ITS-90 da tanımlanmış ara değerleme hesaplamaları yapılmadan, ölçülen her direnç değerine karşılık gelen sıcaklık değerini pratik olarak hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir.

Platin dirençli bir sıcaklık ölçüm sistemi, saf platinden yapılmış bir direnç elemanı (sensör) ve diğer ölçüm bileşenlerinden oluşur. Diğer bileşenler; sensörü (algılayıcıyı) koruyacak bir kaplamayı, elektriksel bağlantıları, direnç ölçme yöntemini ve bu değeri anlamlı bir sıcaklığa dönüştürecek veri edinim bölümünden oluşur.

ANFIS, bulanık çıkartım sistemi ve eğiticili öğrenme algoritmasına sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarının uyarlamalı bir modelidir. Uyarlamalı model, işlem birimlerini ve bu birimlerin bağlantılarını içeren bir yapay sinir ağı katmanına sahiptir. İşlem birimleri, ağırlıklarla birbirine bağlı, bir öğrenme algoritmasının öngördüğü hata değerini minimize etmek için bu ağırlıkların nasıl değiştirileceği belli olan uyarlamalı bir yapıya sahiptir. ANFIS modelinde, geri-yansıtma dereceli azalma (gradient descent) ve en küçük kareler yönteminin birleşimi esas alınarak melez (hybrid) öğrenme algoritması ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında, -189,3442 °C ile 419,527 °C sıcaklık aralığını kapsayacak, 10 mK'den daha düşük doğrulukta ölçüm yapabilecek sıcaklık ölçüm sistemi ve bu sisteme ait tüm ara değerleme hesaplarının gerçekleştirilmesi amaçlandı. Bu sayede 1990 yılından beri kullanılan ITS-90 standardının geliştirilmesine katkı sağlayarak daha hassas ara değerleme yapılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışması Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında, ara değerleme işleminde ANFIS kullanılarak, platin esaslı direnç termometrelerin geliştirilmesi temel amaçtır. Buna göre, bu tez çalışmasının alt amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Standart platin direnç termometrelerinin geliştirilmesine katkı sağlamak,
- Uyarlamalı yapay sinir-bulanık çıkartım sistemini ilk defa platin esaslı direnç termometrelerin ara değerleme işleminde kullanmak,
- Sıcaklık ölçüm sisteminde düşük maliyetli sistem tasarlamaya çalışmak,
- ANFIS modeli ile ara değerleme yaparak, modelin ölçüm dünyasında kullanımını sağlamak.

Literatür çalışması yapılırken konu ile ilgili incelenen kaynaklar aşağıda verilmektedir:

Lee ve diğ. (2014) çalışmalarında, üç boyutlu hız ölçümünde yaygın olarak kullanılan çok delikli pitot tüpünün zaman alıcı kalibrasyon prosedürlerinin azaltılmasını incelemişlerdir [1]. Pitot tüpü kalibrasyonunun amacı basınç farklılıkları ve akış özellikleri arasındaki haritalama ilişkisini kurmaktır. Kalibrasyon verileri kullanarak bu ilişkileri belirlemek için yaygın olarak sıfırlamama kalibrasyon yöntemi kullanılmaktadır. Sıfırlamama kalibrasyon yönteminde gerçek zamanlı elde edilen akış özellikleri, akış açıları ve boyutsuz basıncı katsayılarından oluşan büyük bir veri tabanı kullanılmaktadır. Mevcut durumda bu veri tabanından yapay sinir ağları

yöntemi ile yararlanılmaktadır. Ancak, eğitim sürecinin daha kısa ve sonuçların daha doğru olması ihtiyacı vardır. Pitot tüpü kalibrasyon modellemesinde ANFIS ilk defa kullanılarak, bulanık kurallar ile etkin ve hızlı öğrenme sağlanmıştır. Kalibrasyon verilerinden ANFIS yapısı belirlendikten sonra, pitot tüpü kalibrasyon parametrelerinin ağı kurulmuştur. Sonrasında ANFIS gerçek zamanlı veri toplama sistemi ve rüzgar tüneli ile entegre edilmiş, bu sayede kalibrasyon prosedürleri azaltılmıştır.

Wu ve diğ. (2007) çalışmalarında, kablosuz yerel alan ağlarının radyo işaretlerinin içsel ortamlarda yayılması sırasında meydana gelen yansıma, girişim ve çoklu yol etkilerini azaltmayı amaçlamıştır [2]. Yaklaşım iki aşamada ele alınmıştır. Birinci aşamada, tekrarlı alınan işaret gücü temel alınır. Ara değerleme, eğri uydurma ve ANFIS; içsel yayılma modelini geliştirmek için kullanılmıştır. Böylece alınan radyo işaretlerinin gücü yaklaşık olarak bir fiziksel büyüklüğe çevrilmiştir. İkinci aşamada ise Kalman Filtresi kullanılarak test yayılma ortamında konumlandırılmış pozisyonlardan uygun uzaklıklar tahmin edilmiştir. Ara değerleme, eğri uydurma ve ANFIS tabanlı yayılma modelleri karşılaştırılmıştır.

Basterretxea ve Tarela (2007) çalışmalarında, bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının doğrusal olmayan fonksiyonlara etkisini açıklamıştır [3]. Sistem mimarilerinin yapısının büyüklüğü, yaklaşık kapasitesi, planlamaların düzgünlüğü bu karşılaştırmalı çalışmada performans kriterleri olarak kullanılmıştır. Donanım gerçekleştirimi için tasarlanan hesaplama algoritması için iki çeşit transfer fonksiyonu kullanılmıştır: Bunlar logaritmik sigmoid ve Gauss fonksiyonlarıdır. Bir gizli katmanı olan Geri Yayılım ve Radyal Temelli Fonksiyon yapay sinir ağı modelleri analiz için seçilmiştir. Genelleştirilebilir sonuçlar elde etmek için bilinen yaklaşım problemlerinin benzetimi kullanılmıştır. Bulanık mantık sistemlerinin performans analizinde, bulanık mantık çıkartım sisteminin sonuçlarını değerlendirmek için bir fonksiyonel eşitleme teoremi kullanılmıştır. Sonuç olarak öğrenme yeteneğine sahip yapay-bulanık sistemlerin davranışını gözlemlemek için ANFIS kullanılmıştır.

Jang ve Gulley (1994) çalışmalarında, bulanık denetleyici tabanlı kazanç ayarlama uygulamasını açıklamışlardır [4]. Öncelikle Sugeno Bulanık Modeli ile ANFIS modeli tanımlanmıştır. Daha sonra kazanç ayarlama ile Sugeno bulanık modelinin benzerliği açıklanmıştır. Makalede Sugeno bulanık denetleyicinin gerçekte bulanık if-then kurallarındaki üyelik fonksiyonları aracılığı geri besleme kazancının

ayarlandığı noktadaki kazanç değerinin özel bir durumu olduğu gösterilmiştir. Çeşitli çalışma noktalarında istenen kazanç değerleri oluştuğunda, Sugeno bulanık denetleyiciyi ile ANFIS öğrenme algoritması ara değerleme denetim mekanizmalarının üretilebilmesi için uygulanmıştır. Önerilen yöntemin geçerliliği cart-pole ve ball-beam sistemleri olarak çok iyi bilinen denetim problemlerinin benzetimi ile gerçeklenmiştir. Önerilen yaklaşım doğrusal olmayan denetim sistemlerinde büyük avantajlar sağlamaktadır.

Cai ve diğ. (2003) çalışmalarında, bataryanın şarj durumu tahmininde kullanılan yaklaşımı anlatmıştır [5]. Batarya, basit gibi gözükse de fiziksel ve kimyasal işlemlerin etkileşimini içeren oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan bir sistemdir. Bataryanın şarj durumu hakkında bataryanın ne kadar enerjiye sahip olduğu konusundaki ana etken olarak batarya yönetimi ve enerji durumunun tahmininde ANFIS kullanılmıştır. İlk önce ANFIS'in giriş verileri üç değişik teknikle seçilmiştir. Bu teknikler: doğrusal korelasyon analiz, parametrik olmayan korelasyon analiz ve kısmi korelasyon analizidir. Sonra, 5 giriş ve 1 çıkışlı ANFIS modelinde Takagi ve Sugeno'nun bulanık if-then kuralları kullanılmıştır. Daha sonra eğitim verileri tanımlanmıştır. Sonunda, ANFIS'i eğitmek için gradyan ve en küçük kareler metodunu birleştiren melez öğrenme algoritması kullanılmıştır. ANFIS'le bulunan sonuçlarla ölçülmüş sonuçlar karşılaştırılmış ve ANFIS'in yaklaşımı daha başarılı bulunmuştur. Yapay sinir ağlarının üç katmanlı ileri beslemeli geri yayılım yöntemi de aynı konuya uygulanmış ve ANFIS'in ara değerlemede daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Ahmed ve Shah (2015) çalışmalarında, Bangladeş Surma Nehri'nin biyokimyasal oksijen talebini (BOD) tahmin etmek için ANFIS modelini uygulamışlardır [6]. Veri setleri 10 değişik su kalite parametresinden oluşmuştur. ANFIS modellerinin performansı; korelasyon katsayısı (R), ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve Nash modeli verimliliği (E) vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, ANFIS modeli ile kabul edilebilir doğrulukta biyokimyasal oksijen talebininin tahmin edilebildiğini ve nehir suyu kalitesi tahmini için ANFIS'in değerli bir araç olduğunu göstermiştir.

Castro ve diğ. (2009) çalışmalarında, melez öğrenme algoritma tekniklerini içeren "Ara katman tip-2 bulanık sinir ağı-interval type-2 fuzzy neural network (IT2FNN)" yapısını önermişlerdir [7]. Deneysel çalışmada kontrol sistemleri için doğrusal olmayan tanımlama problemi ile doğrusal olmayan Mackey–Glass karışık zaman

serisi tahmin probleminin benzetimi yapılmıştır. Her iki probleme de hem öğrenme yapısı olan IT2FNN ve hem de ANFIS uygulanmıştır. IT2FNN'in seçilen problemler için daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Qiaoa ve Wang (2008) çalışmalarında, geleneksel giriş çıkış yer ayırma problemlerinde özörgütlemeli bulanık sinir ağlarının yaratılması için yeni bir öğrenme algoritmasını (özörgütlemeli bulanık sinir ağı-SOFNN) önermişlerdir [8]. SOFNN, örnek verilerden öğrenmeyi otomatik gerekleştirir ve giriş-hedef örneklerini baz alan eş zamanlı parametre ve yapı tanımayı otomatikleştirir. Algoritmanın fonksiyon yaklaştırma ve atık su tedavi sisteminin modelinin tahminini içeren iki tane gerçekleştirimi vardır. Gerçekleştirilen algoritmalar diğer yaklaşımlarla kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Öncelikle fonksiyon yaklaştırma örneğinin diğer yaklaşımlara göre etkinliği ve yüksek performansı gösterilmiştir. Diğer örnekte ise bulanık sinir ağlarına göre SOFNN algoritmasında suyun kalitesi daha iyi tahmin edilmiş ve gösterilmiştir.

Ma ve diğ. (2008) çalışmalarında, çok boyutlu regresyon problemlerinin çözümünde kullanılan klasik Normalleştirilmiş Radyal Temel Fonksiyon (NRBF-Normalized Radial Basis Function) modeliyle karşılaşılan zorlukları ortaya koymuş ve Genişletilmiş NRBF (ENRBF-Extended Normalized Radial Basis Function)'nın bu problemleri çözmedeki esnekliği ve kolaylığını sergilemişlerdir [9].

Yu ve Li (2008) çalışmalarında, destek vektör mekanizmaları ve bulanık mantık kuralları ile bilinmeyen doğrusal olmayan sistemleri tanımlamak için yeni bir yaklaşım önermişlerdir [10]. Yaklaşım dört basamağı içermiştir. Bunlar; çevrimiçi kümeleme, yapı tanımlama, parametre tanımlama ve yerel model birleşimidir.

Yu ve Li (2009) çalışmalarında, destek vektör mekanizmaları ve bulanık mantık kuralları ile yeni bir doğrusal olmayan modelleme yaklaşımını tanımlamışlardır [11]. Yapı tanımlama, vektör mekanizmalarını destekleyen bulanık mantık ve çevrimiçi bir kümeleme yöntemi tarafından gerçekleştirilmiştir. Zaman değişkenli öğrenme oranı, bulanık mantık kurallarının üyelik fonksiyonunu güncellemek için uygulanır.

Yılmaz ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda, bulanık mantık kuralları kullanarak, değişkenler arası zamansal ilişkiler vasıtasıyla geleceğe yönelik davranış tahmini ortamı sağlamak üzere tasarlanmış bir sinir-bulanık mantık sistemi önerilmiştir [12]. ANFIS_unfolded_in_time (zamanda genişletilmiş) olarak adlandırılan bu sistem ANFIS bulanık mantık sinir sistemin değiştirilmiş biçimidir. Bu

sistemin kural tabanı Takagi–Sugeno–Kang (TSK) bulanık kurallarını içermiştir. Öğrenme fazında geriye yayılma (back-propagation) öğrenme algoritması kullanılmıştır. Sistem değişken veriyi ve unfolded modeli oluşturmak için gerekli sayıda katmanda bir değişken tanımlar ve daha sonra gelecek tahmininde bulunur.

Buragohain ve Mahanta (2008) çalışmalarında, ANFIS'in kesin olmayan ve iyi tanımlanmamış sistemlerin kontrolü ve modellemesi için kullanılan bir akıllı yapay sinir bulanık mantık tekniği olduğunu belirtmişlerdir [13]. Giriş ve çıkış veri çifti öğrenme için önemlidir. Ancak iyi bir öğrenme için çoğu zaman istenilen sayıda ve doğrulukta giriş ve çıkış verisi elde edilememektedir. Bu da ANFIS'in başarılı sonuç vermesini engellemektedir. Bu çalışmada; ANFIS tabanlı bir modelleme sisteminde istenilen doğrulukta sonuç almayı da sağlayacak şekilde öğrenme verisini minimize etmek için tam faktoriyel tasarım (full factorial design) olarak adlandırılan bir istatistik tekniğini kullanan sistem önerilmiştir. Önerilen sistem ile öğrenme için gerekli verinin azaldığı ve dolayısı ile hesaplama zamanı ve yükünün azaldığı gözlenmiş ve klasik ANFIS sistemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Valenzuela ve diğ. (2008) çalışmalarında, zaman dizilerinin tahmininde ANN (Artificial Neural Network) gibi akıllı teknikler, bulanık sistemler ve evrimsel algoritmaların melezleşmesinden oluşan ARIMA-ANN (Autoregressive Intelligent Moving Average- Artificial Neural Network) modelini önermişlerdir [14]. Geleneksel olarak ARMA (Autoregressive Moving Average) modeli zaman serilerinin tahmin edilmesinde en çok kullanılan doğrusal model olmuştur. Son dönemde yapılan çalışmalar ise Yapay Sinir Ağları (ANN-Artificial Neural Network) ile zaman serilerini tahmin etmenin klasik ARMA yöntemine alternatif olabilecek umut vadeden bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu nedenle karışık problemlerin çözümünde performans olarak iki yöntem karşılaştırılmıştır. Önerilen modelin tahmin doğruluğu performansı ARMA ve ANN modelleri ayrı ayrı kullanıldıklarında elde edilen performanstan daha iyi çıkmıştır. Dışardan müdahale olmadan bulanık kurallar ve melez ARIMA_ANN modeli kullanarak ARIMA veya ARMA modelinin sırası belirlenmeye çalışılmıştır. Önerilen sistem, kullanımı ve ayarlanması kolay ARIMA modelleri ile hesaplama gücü yüksek ANN modelinin avantajlarını birleştirmiştir.

Rojas ve diğ. (2008) çalışmalarında, öncelikle ARMA (Autoregressive Moving Average) modeli ile yapay sinir ağlarının birleştirilmiş melez yöntemini araştırmak, daha sonra ARMA yapısı ve Box–Jenkins yöntemini kullanılarak zaman serilerinde önemli problemlerden biri olan model tanımlanmasını çözmeyi amaçlamışlardır [15].

Bu makalede bulanık sistemler, sinir ağları ve evrimsel algoritmaları kullanarak zaman serilerini tahmin etmek için yeni bir prosedür önerilmiştir. Yapay sinir ağlarının paradigmalarını temel alan uzman sistem elde etmeyi planlamışlardır. Böylece doğrusal model, insanın uzman olarak katılımı, yani birikimleri olmadan otomatik olarak tanımlanacaktır. Elde edilen doğrusal model yapay sinir ağları ile birleştirilerek tahmin sonuçlarından daha iyi bir performans sergileyen bir melez sistem yaratılmıştır.

Kholghi ve Hosseini (2009) çalışmalarında, İranın kuzeyindeki yeraltı sularının seviyesinin tahmininde ANFIS yöntemi ile geleneksel kriging ara değerleme yöntemini karşılaştırmışlardır [16]. Her iki yönteminde bu amaçla kullanılabileceğini görmüşlerdir. Bununla birlikte ara değerlemede ANFIS'in daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Özkan (2009) çalışmasında, dağıtık verilerin ara değerlemesi için ANFIS'in uygulanmasını gerçekleştirmiştir [17]. Kriging ara değerleme algoritması da hesaplamalarda kullanılmıştır. Çalışmada, istatistiksel varyans analizi ve bunun "variogram" olarak adlandırılan grafiksel bir gösterimin modellemesi ile yerel ara değerlemeyi içeren bir yöntemin geleneksel kriging ardeğerleme yöntemine uygulanması gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde deneysel variogram ANFIS ile modellenmiş ve bu model belirlenmiş noktaların bilinmeyen değerlerinin ara değerlemesinde kullanılmıştır. Bu yöntemle her referans nokta için bütün bilinmeyen noktalar gruplanır. Üzerinde çalışılan veri, kullanılan matematiksel fonksiyonlara bağlıdır. Yani öğrenme aşamasında kullanılan veriler, geleneksel hesaplamalarda elde edilen verilerdir. Sistemin öğrenmesinden sonra ara değerlemede ANFIS uygulanmıştır. Yapılan testler, önerilen çözümün bilinen diğer yöntemlere göre oldukça iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Erginel (2010) çalışmasında, ürünlerin paketlenmesini incelemiş ve ürünlerin yükleme ile taşıma sırasında zarar görmesini engelleyecek şekilde paketlenmesi için uygulanan yöntemlere bulanık mantık modelini eklemiştir [18]. Yapılan deneyler sonucunda bulanık çıkartım sisteminin mevcut durumda uygulanan matematiksel modele göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Dimirovski (2008) çalışmasında, uyarlamalı yapay sinir bulanık sistemi modelinde kullanılan öğrenme tekniğinin önemli sorunu haline gelen işlemsel karmaşıklığı azaltma ve bütünlüğün korunması amacıyla eniyilik (optimality) indeksi konularını

incelemiştir [19]. Uyarlanmış bulanık çıkartım sistemlerinin kontrol odaklı uygulamalarında bu karmaşıklığın çözümü için uyarlamalı yapay sinir bulanık çıkartım sisteminin gerçekleştirilmesi daha uygun bir tasarım olarak ortaya çıkmıştır. Öğrenme amaçlı olarak Gauss etkinleştirme fonksiyonunun kullanıldığı ileri beslemeli sinir ağı kullanılmıştır. Bilgi tabanlı kurallar belirli bağlantıları göstermek için tasarlanmış ve ilgili kuvvetler giriş çıkış veri kümesinin yerine uyarlanmıştır. Çözümde bilgilerin küçültülmesi önemli bir rol oynamıştır. Uygun bir hata fonksiyonunun minimizasyonunu sağlayan bir öğrenme algoritmasına makalede belirtilen üyelik-fonksiyon parametreleri uygulanarak istenilen çözümler elde edilmiştir.

Bodyanskiya ve Kulishova (2008) çalışmalarında, baskı mürekkeplerinin yansıma katsayılarının ara değerlemesi için özellikle sorun olarak tespit edilen düzensiz eksenel dikdörtgen sistemindeki iki boyutlu fonksiyonun ara değerlemesi konusunu incelemişlerdir [20]. Sorunu çözmek için bir bellek tabanlı yapay sinir ve bulanık çıkartım sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem hesaplamada basitliği sağlamış ve yüksek kaliteli ara değerleme yapmıştır.

Wang (2009) çalışmasında, amortisörün manyetiğinin ANFIS ile modellenmesini anlatmıştır [21]. Doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı amortisörün manyetiğinin modellemesi çok zordur. Amortisörün manyetiğinin ters modelinin belirlenmesi ise daha da zordur. Bu zor işlemi gerçekleştirmek için ANFIS modeli uygulanmıştır. ANFIS sistemi, giriş ve çıkışları aynı sayıda olan amortisörün manyetiğinin fiziksel özelliklerine benzer bir şekilde tasarlanmıştır. Eğitim verisi ve iyi seçilmiş test verileriyle amortisörün manyetiğinin ters modelinin ANFIS ile tanımlandığı görülmüştür.

Bacchetti ve Saccani (2012) çalışmalarında, yedek parça yönetiminde kullanılan envanter sınıflandırma ve envanter yönetim türlerini özetlemişlerdir [22]. İncelenen 25 makalenin 15'inde parça kritikliğinin envanter sınıflandırmada kullanıldığı belirtilmiştir. Parça kritikliği belirleme yöntemlerini, niceliksel ve niteliksel olarak iki kategoride sınıflandırmışlardır. Niceliksel parça kritikliği sınıflandırma yöntemleri olarak ABC Analizi, Öbekleme Algoritmaları, Bulanık Mantık ve Uzman Sistemler ile Hiyerarşik Nitel-Nicel Analiz Yöntemi kullanıldığı belirtilmiştir. Parça kritikliği belirlemede kullanılan niteliksel yöntemler arasında ise Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Liu ve diğ. (2013) çalışmalarında; hata türleri, etkileri ve kritiklik analizini konu alan 75 adet makaleyi özetlemişlerdir [23]. Yöntemlerin yetersiz kaldığı hususlar ve bu alandaki geliştirmelerde kullanılan algoritmalar belirtilmiştir. Geliştirmede kullanılan yöntemler arasında sıklıkla Çok Amaçlı Karar Verme Yöntemi, Matematiksel Programlama, Yapay Zeka ve bu yöntemlerin hibrit kullanımlarıyla elde edilen sonuçlara dikkat çekilmiştir. Yöntemde olasılık, şiddet ve keşfedilebilirlik parametrelerini kullanarak risk öncelik değeri hesaplamaktadır. Söz konusu parametrelere ilgili değerlerin atanmasında uzman bağımlılığı önemli bir husus olarak belirtilmiştir. Uzman bağımlılığından kaynaklı öznelliğin, aynı arıza türüne farklı risk öncelik değerinin atanması ile sonuçlandığı durumlardan bahsedilmiştir.

Yin ve diğ. (2013) çalışmalarında, tedarik zinciri yönetiminde gruplama teknolojisi problemini Bulanık C-Ortalamalar (BCO) algoritması ile çözümü konusunu incelemişlerdir [24]. Gruplama teknolojisi, benzer parçaların ve üretim fonksiyonları/süreçlerinin bir araya getirilmesidir. Bulanık C-Ortalamalar algoritmasının, gruplamada kullanılan geleneksel optimizasyon tekniklerine olan üstünlüğüne değinilmiştir. BCO algoritması kullanılarak müşteri siparişleri, taşıma ve tedarik zinciri fonksiyonları dinamik olarak ilişkilendirilebilmektedir. Çalışmada ayrıca Bulanık C-Ortalamalar algoritmasında ihtiyaç duyulan öbek miktarı ve öbek bulanıklık derecelerinin belirlenmesi için Genetik Algoritmalar ve Yasaklı Arama (YA) algoritmalarından faydalanılmıştır.

Literatürdeki çalışmalara genel anlamda bakıldığında, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve ANFIS gibi yumuşak hesaplama algoritmalarından değişik alanlarda faydalanıldığı görülmüştür. Ancak, ITS-90 sıcaklık standartının geliştirilmesinde yumuşak hesaplama algoritmalarının kullanımına rastlanmadı. Özellikle ANFIS'in bu amaçla kullanımıyla ilgili hiçbir makale tespit edilemedi.

ITS-90 da tanımlanmış ara değerleme hesaplamaları yapılmadan, ölçülen her direnç değerine karşılık gelen sıcaklık değerini bulmada ANFIS'in kullanımı bir ilktir. Bununla birlikte SPRT ölçümlerinde kullanılan veri edinim cihazında da değişiklik yapılarak düşük maliyetli bir sistem gerçekleştirildi. Bu hususlar değerlendirildiğinde; ANFIS'in bu alanda henüz bir uygulamasının olmaması ve gerçekleştirilen sistemin mevcut kullanılan sisteme göre hem pratik hem de maliyetinin düşük olması tez çalışmasının özgünlük değerini arttıracağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında; Bölüm 1'de, Standart Platin Direnç Termometre yapısı, kalibrasyonu ve ITS-90 standardı anlatılmıştır.

Bölüm 2'de, geleneksel ara değerleme yöntemleri, yapay sinir ağları, bulanık çıkartım sistemi ve uyarlamalı yapay sinir-bulanık çıkartım sistemi tanıtılarak ITS-90 standartının geliştirilmesinde kullanılabilirliği incelenmiştir.

Bölüm 3'te, tez kapsamında kullanılan yazılımlar ve cihazların özellikleri incelenerek, birbirleriyle entegrasyonunun nasıl gerçekleştirildiğinden bahsedilmiştir. Bu kapsamda; bilgisayar ile veri edinim cihazı bağlantısının nasıl yapıldığı, hangi yazılımların kullanıldığı ve geliştirildiği, konfigürasyon ayarlarının nasıl yapıldığı tanıtılmıştır.

Bölüm 4'de, TÜBİTAK UME'de yapılan veri edinim çalışmalarından ve yapılan hesaplamalardan elde edilen verilerin ANFIS'in öğrenme aşamasında kullanılması anlatılmıştır. Bir kısım verilerin test amaçlı da kullanılmasıyla çıkan sonuçlardan öğrenmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

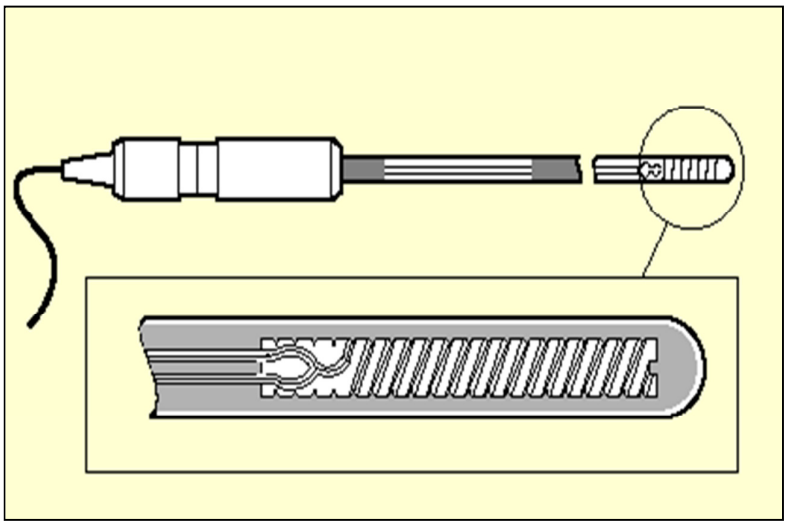
Bölüm 5'de, tez kapsamında gerçekleştirilen sistemin TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuvarında test edilmesi anlatılmıştır. Laboratuvarda sistemin oluşturulması, seçilen SPRT'nin özellikleri, gerçekleştirilen sistem ile sabit noktalarda SPRT ölçümleri ve bulunan direnç ve sıcaklık değerlerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 6'da, tez çalışması ile elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

1. PLATİN DİRENÇ TERMOMETRELER

İnsanlar tarih boyunca sıcaklığı kontrol etmek ve günlük hayatta ve endüstriyel tesislerde kullanmak, sıcaklık ölçümlerini belirli bir kesinlik ve tekrarlanabilirlik ile yapabilmek için termometrelere gerek duymuşlardır. Bu amaçla çok değişik termometreler geliştirilmiş ve ölçülen sıcaklığın aynı olması için standartlar geliştirilmiştir. Böylece Uluslararası Ölçüm Komitesi tarafından uluslararası sıcaklık ölçeği (ITS-90) kabul edilmiştir. Endüstride ve bilimsel araştırmalarda sıcaklık ölçümlerinin büyük bir bölümü kontak termometreler ile gerçekleştirilmektedir. En çok kullanılan kontak termometre tipleri: platin direnç termometreler, ısılçift termometreler, termistörler, ve sıvılı cam termometrelerdir. Platin direnç termometreler ve ısılçift termometreleri daha çok kullanılmaktadır. Son yıllarda özellikle 900 ^{o}C altı sıcaklıklarda platin direnç termometreler, ısılçift termometrelerin yerini almaktadır. Platin direnç termometreler ısılçift termometrelerden daha fazla kararlılığa, kesinliğe ve tekrarlanabilirliğe sahiptir [25-26].

Platin direnç termometreleri değişik şekillerde imal edilebilirler, Şekil 1.1'de tipik bir standart platin direnç termometre görülmektedir.



Şekil 1.1. Standart platin direnç termometre [27]

Platin direnç termometreleri sargı telinin elektrik direncinin sıcaklıkla değişmesi prensibini kullanmaktadır. Bir güç kaynağından gönderilen akımla bu direnç değişimi ölçülmektedir. Platinin sıcaklık-direnç değişiminin doğrusal olmasından dolayı sargı teli olarak platin kullanılmaktadır. Kararlılık problemi olmaması için platin sargı teli kimyasal kirlenmelerden uzak tutulmalıdır. Direnç termometrelerin, direnci ölçmek için bir akıma ihtiyacı vardır, bu durum direncin ısınmasına ve yanlış sıcaklık ölçülerine sebep olabilir. Bu nedenle hassas ölçümler için dört tel kullanılmalıdır [28].

1.1. Platin Direnç Termometrelerin Çalışma Prensibi

Teorik olarak rezistanslı sıcaklık sensörlerinde herhangi bir iletken kullanılabilir. Ancak; tekrarlanabilirlik, uzun süreli kararlılık, sıcaklığa karşı duyarlılık, yüksek elektriksel direnç, oksidasyona karşı duyarlılık ve üretim kısıtlamalarına uygunluk gibi pratikte ihtiyaç duyulan özellikler, kullanılabilecek malzemelerin sayısını sınırlandırır [29].

Bakır, nikel ve platin metal temelli sensörlerde en çok kullanılan malzemelerdir. Bakır genellikle -100 °C ile 100 °C sıcaklık aralığında kullanılır ve diğerlerine karşı daha ucuzdur. Nikel ve alaşımları, yüksek direnç ve sıcaklık direnç katsayılarına sahip olup maliyetleri düşüktür. Öte yandan elektriksel dirençlerinin sıcaklığa göre değişimi doğrusal değildir ve malzeme uzamaya karşı çok hassastır. Platinin direnci ($\approx$10$\mu\Omega$/cm) bakırınkinin yaklaşık altı katıdır, ergime noktası (1760 °C) ve sıcaklık direnç katsayısı da yüksektir. Platin diğerlerine göre daha zor tepkimeye girer ve tüm bu özellikleri nedeniyle -260°C ile 1000 °C sıcaklık aralığında yüksek doğruluklu ölçüm uygulamalarında en çok tercih edilen malzemedir [30].

Bir malzemedeki elektrik iletimi, elektronların normal rasgele hareketlerini değiştirerek bir yönde net bir elektron akışı sağlayan bir elektrik alanının varlığında gerçekleşir. Net akış kristal örgüdeki bozukluklar/düzensizlikler, örgü titreşimi ve foton saçılımı gibi ısının indüklediği etkiler nedeniyle saçılımla kesintiye uğrayabilir. Elektronların bu şekilde yavaşlamaları, malzemenin elektriksel direnci veya özdirenç kavramıyla açıklanır. Özdirenç bir malzemenin birim hacim başına düşen direnci olarak tanımlanır ve bir elektrik alanındaki elektronların hareketlerindeki empedansın bir ölçüsüdür. Metaller için özdirenç Denklem (1.1)'de verilen Matthiessen kuralıyla modellenebilir [31] ;

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d \qquad (1.1)$$

p : toplam özdirenç = R.A / L, (Ω.m)

p_t : ısıl etkenlere bağlı özdirenç, (Ω.m)

p_i : safsızlıklara bağlı özdirenç, (Ω.m)

p_d : mekanik gerilmeler nedeniyle bozukluklara bağlı özdirenç, (Ω.m)

R : direnç, (Ω)

L : uzunluk, (m)

A : kesit alanı, (m^2)

Çıkış değeri yalnızca sıcaklığa bağlı olan bir cihazın üretilebilmesi için, uzama ve safsızlık etkileri, tasarım ve üretim aşamasında minimuma indirilmelidir. Metaller için akım ve voltaj arasındaki ilişki Denklem (1.2)'de gösterilen Ohm yasasıyla belirlenir;

$$R = \frac{V}{I}(\Omega) \tag{1.2}$$

V : voltaj (V)

I : akım (A)

Bir rezistörde sıcaklık yükseldikçe örgü titreşimi ve dolayısı ile elektron akışına karşı direnç, mutlak sıcaklıkla orantılı bir şekilde artar. Direnç ve sıcaklık arasındaki ilişki yaklaşık olarak Denklem (1.3)'deki gibi kurulabilir;

$$R(t) = R(0°C)(1 + \alpha t) \tag{1.3}$$

R(t) : Metal telin t sıcaklığındaki direnç değeri

R(0°C) : Metal telin 0 °C'deki direnç değeri

α : Metal telin sıcaklık uzama katsayısı

t : Ortamın sıcaklık değeri

Yabancı atomların ise elektriksel dirence etkisi ise yabancı atomlardan gelen direnç farkı da göz önüne alınarak Denklem (1.4)'deki gibi yazılabilir;

$$R'(t) = R(t) + \Delta R \tag{1.4}$$

Denklem (1.4), Denklem (1.3)'te gösterilen 0 °C'deki direnç değeri cinsinden Denklem (1.5) gibi yazılabilir;

$$R'(t) = R(0°C)(1 + \alpha' t) \tag{1.5}$$

α', yabancı atomların bulunduğu örgüdeki sıcaklık uzama katsayısı Denklem (1.6)'da görüldüğü gibi olacaktır;

$$\alpha' = \alpha \frac{R(0°C)}{R(0°C) + \Delta R} \tag{1.6}$$

Bu şekilde yabancı atomların buz noktası direncini artırdığı ve sıcaklık katsayısı α'yı düşürdüğü görülebilir.

Platin direnç termometresinin yapımında kullanılan platin malzemedeki yabancı atomların, termometrenin okuduğu direnç (dolayısıyla sıcaklık) değerine önemli ölçüde etki edeceği bir gerçektir. Termometre yapımında kullanılan malzeme ne kadar saf olursa, termometrenin okuduğu direnç değeri o kadar kararlı ve tekrarlanabilir olur.

Sonuç olarak; platin termometre seçiminde α değeri, platin malzeme içerisindeki saflık miktarını tespit açısından önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Direnç Ölçümü ve Veri Alma

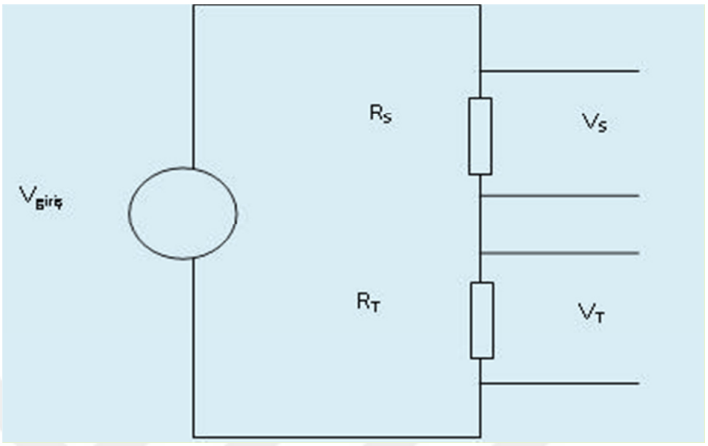
Rezistans Sıcaklık Sezilmeyicisi (Resistance Temperature Detector-RTD) kullanılarak bir sıcaklık ölçümünün alınması için, önce direncin ölçülmesi gerekir. Bunu yapmanın en basit yolu rezistörden bir akım geçirmek ve bunun uçlarındaki potansiyeli ölçmektir. Eğer akım biliniyorsa, potansiyelin akıma oranı Ohm yasasına göre direnci verir ve sıcaklık, direnç-sıcaklık karakteristiklerinden elde edilir.

Platin dirençli termometrelerde direnç ölçümü için iki yöntem vardır; bunlar potansiyometrik yöntem ve köprü yöntemidir.

Potansiyometrik yöntemlerde bilinen bir rezistörün bilinen voltajı ile sıcaklığı arasında ilişki kurulur. Prensip Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Standart bir rezistör (R_S) ve bilinen bir rezistörden (R_T) akım geçirilir. İki rezistörden geçen akım birbirlerine eşit olduğundan, Ohm yasasıyla bilinmeyen direnç Denklem (1.7)'deki gibi hesaplanır;

$$R_T = \frac{V_T}{V_S}.R_S \tag{1.7}$$

Bu denklemin kullanılabilmesi için (V_T) ve (V_S)'nin bilinmesi gerekir ki, bu ölçümlerde yüksek empedanslı bir voltmetre kullanılarak yapılabilir.

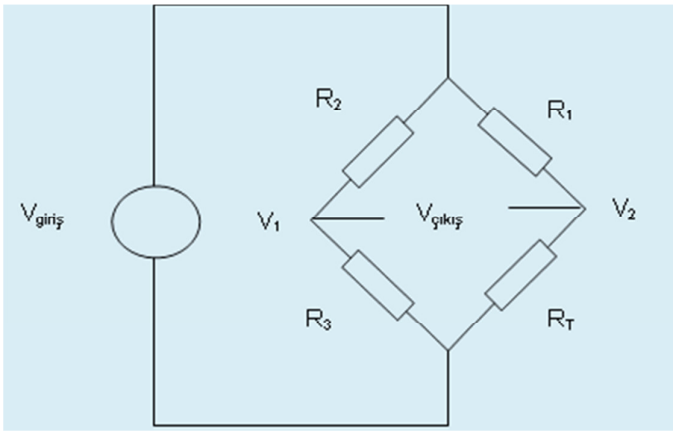


Şekil 1.2. Potansiyometrik yöntemle direnç ölçümü

Direnç ölçümleri için Wheatstone köprüsünden de yararlanılır. Bu yöntemin prensibi, iki voltaj bölücü kullanılarak çıkış voltajlarının karşılaştırılmasıdır. Bunlardan biri direnç termometreyi içerir. Buna ilişkin devre Şekil 1.3 'de gösterilmiştir. Köprünün çıkış voltajı Denklem (1.8)'deki gibi ifade edilir;

$$V_{cikis} = V_1 - V_2 = \frac{R_2.R_T \quad R_3R_1}{(R_2 + R_3).(R_1 + R_T)}.V_{giriş} \tag{1.8}$$

Bir Wheatstone köprüsü bilinmeyen voltajın bulunabilmesi için dengeli veya dengesiz modda çalıştırılabilir.



Şekil 1.3. Wheatstone köprüsü ile direnç ölçümü

Dengeli modda R_1, R_2, R_3 dirençlerinden biri, köprünün iki kolundaki V_1 ve V_2 eşit oluncaya kadar değiştirilir. Bu durumda V_2-V_1 sıfır olur ve köprü dengeye gelir. Bu durumda bilinmeyen direnç Denklem (1.9)'daki gibi hesaplanır;

$$R_T = \frac{R_3}{R_2}.R_1 \tag{1.9}$$

Dengeli köprü yönteminin dezavantajı bağlantıların dirençlerinin etkisinin yok edilememesidir.

Wheatstone köprüsü dengesiz modda da kullanılabilir. Bu modda değişken rezistör bilinen bir sıcaklıkta (genellikle kolay elde edilebilirliği nedeniyle buz noktası sıcaklığı olan (0,010 °C) denge durumu oluşuncaya kadar değiştirilir. Dirençlerden biri değişken direnç (R) olarak kullanılır. Böylece diğer sıcaklıklarda alınan çıkış voltajı, sıcaklığın değerini belirlemekte kullanılır. Denklem (1.8)'den yola çıkılarak çıkış voltajı Denklem (1.10)'daki gibi bulunur;

$$V_{cikis} = \frac{R_T \quad R_0}{(R_1 + R_0).(R_1 + R_T)}.R_1.V_{giriş} \tag{1.10}$$

R_1, R_T'ye göre yüksekse çıkış yaklaşık olarak Denklem (1.11)'deki gibidir;

$$V_{cikis} = \frac{V_{giriş}}{R_1}.R_0.\alpha\alpha. \tag{1.11}$$

Platin termometrelerin uzatmaları iki, üç ve dört telden oluşturulabilir. Ancak en hassas ölçümler dört telli uzatmalarla yapılan termometrelerle elde edilir. Bu tasarım köprü dengesiz olduğunda farklı bağlantılardaki direnç değişikliklerine karşı hassastır.

1.3. Standart Platin Direnç Termometrelerinin Kalibrasyonu

SPRT'ler, ITS-90'da kabul edilen ve Tablo 1.1'de verilen sabit sıcaklık noktalarının birbirleri ile ilişkilendirilmesinde kullanılır. Bu ilişkilendirmede her bir sabit noktaya atanmış bulunan sıcaklık değerinin, SPRT yardımıyla direnç değerleri ölçülür, her ölçümün ardından suyun üçlü noktası sıcaklık değerinin direnç değeri alınarak direnç oranları hesaplanır. Sıcaklık aralıklarına göre ITS-90'da tanımlanan ara değer hesaplama denklemlerinde yerlerine konularak denklemlerin katsayıları bulunur ve bulunan denklemler yardımı ile ara değerdeki sıcaklıklar hesaplanır [32-34].

Tablo 1.1. Uluslararası sıcaklık ölçeğini oluşturan sabit sıcaklık noktaları

Numara	Madde[i] ve Durumu[ii]	Sıcaklık T_{90} / K	$W_r(T_{90})$[iii]	(dT/dp) / (10^{-8} K.Pa^{-1})[iv]	(dT/dl) / 10^{-3} K.m^{-1} [v]
1	He (tp)	3 - 5			
2	e-H_2 (tp)	13,8033	0,001 19007	34	0,25
3	e-H_2 (tp) (veya He) (gp)	≈17	(0,002 296 46)[3]		
4	e-H_2 (vp) (veya He) (gp)	≈20,3	(0,004 235 36)[3]		
5	Ne (tp)	24,5561	0,008 449 74	16	1,9
6	O_2 (tp)	54,3584	0,091 718 04	12	1,5
7	Ar (tp)	83,8058	0,215 859 75	25	3,3
8	Hg (tp)	234,3156	0,844 142 11	5,4	7,1
9	H_2O (tp)	273,16	1,000 000 00	-7,5	-0,73
10	Ga (mp)	302,9146	1,118 138 89	-2,0	-1,2
11	In (fp)	429,7485	1,609 801 85	4,9	3,3
12	Sn (fp)	505,078	1,892 797 68	3,3	2,2
13	Zn (fp)	692,677	2,568 917 30	4,3	2,7
14	Al (fp)	933,473	3,376 008 60	7,0	1,6
15	Ag (fp)	1234,93	4,286 420 53	6,0	5,4
16	Au (fp)	1337,33		6,1	10
17	Cu (fp)	1357,77		3,3	2,6

[i] ^{3}He hariç bütün maddeler doğal izotop bileşenleri halindedir. e-H_2 dengedeki doğru ve para molekül halindeki hidrojendir.

[ii] vp: buhar basıncı noktası, gp: gaz termometre noktası, tp: üçlü nokta (katı, sıvı ve buhar fazlarının dengede olduğu sıcaklık), mp ve fp: ergime ve donma noktası (101325Pa basınç altında katı ve sıvı fazların dengede olduğu sıcaklıktır)

[iii] $Wr(T_{90})$, T_{90} sıcaklığındaki $R(T_{90})$ direncinin suyun üçlü noktasındaki direnç değerine R(273.16 K) oranıdır.

[iv] Sıcaklığın basınç ile değişimidir. (milikelvin (mK) / standart atmosfer basıncına eşittir.)

[v] Sıcaklığın derinlik ile değişimidir. (mK / sıvının yüksekliği(m))

Standart platin direnç termometreleri ile ölçümler 13,8033 K ile 1234,93 K sıcaklık aralığında yapılır. Bu aralık Hidrojenin üçlü noktası (13,8033 K) ile Gümüşün donma noktası (1234,93 K) aralığını kapsar. Burada Uluslararası Sıcaklık Ölçeğine uygun referans sıcaklık (T_{90}), platin direnç termometresi ile sabit noktalardaki kalibrasyonlar sonunda hesaplanır [35].

Bu aralıktaki sıcaklık değerleri (Denklem (1.12)'de gösterildiği şekilde platin termometrenin sabit sıcaklık noktasındaki direnç değerinin $R(T_{90})$ suyun üçlü noktasındaki direnç değerine R(273,16 K) oranı ile tespit edilir;

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273{,}16\,K) \tag{1.12}$$

SPRT'lerin ITS-90 standardı olarak kullanılması için, aşağıdaki bağıntıların sağlanması gerekir;

$$W(302{,}9146\ K) \geq 1{,}11807 \tag{1.13}$$

$$W(234{,}3156\ K) \leq 0{,}844235 \tag{1.14}$$

Gümüşün donma noktası sıcaklığına kadar kullanılacak termometreler ayrıca Denklem (1.15)'i de sağlamalıdır;

$$W(1234{,}93K) \geq 4{,}2844 \tag{1.15}$$

Her bir termodinamik sıcaklık aralığında T_{90} uygun referans fonksiyonlarından $W(T_{90})$-$Wr(T_{90})$, değerleri hesaplanır. Belirleyici sabit noktalarda bu sapmalar termometrenin doğrudan kalibrasyonundan elde edilir. Ara sıcaklıklarda ise, uygun sapma fonksiyonları kullanılır.

Uluslararası Sıcaklık Ölçeğinin tanımlamış olduğu aradeğer (interpolasyon) denklemleri ve hangi sabit sıcaklık noktaları ile ilişkilendirildikleri aşağıda anlatılmıştır.

1.3.1. 13,8033 K – 273,16 K sıcaklık aralığı

Bu sıcaklık aralığında kalibrasyonlar; Hidrojen, Neon, Oksijen, Argon, Civa ve Suyun üçlü nokta sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Denklem (1.16) kullanılarak ölçülen direnç değeri istenilen sıcaklık değerine dönüştürülür [36];

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90})/273{,}16K) + 1{,}5}{1{,}5}\right]^i \quad (1.16)$$

Denklem (1.16)'ya 0,1 mK belirsizlikle yaklaşan ters eşitlik ise Denklem (1.17)'deki gibi elde edilebilir;

$$T_{90}/273{,}16K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} \quad 0{,}65}{0{,}35}\right]^i \quad (1.17)$$

Denklem (1.17)'de A_0,A_i, B_0 ve B_i, ITS-90 tarafından Tablo 1.2'de verilmiş katsayılardır.

Tablo 1.2. ITS-90 tarafından hesaplanan katsayılar

İ	Ai	Bi	Ci	Di
0	-2,13534729	0,183324722	2,78157254	439,932854
1	3,18324720	0,240975303	1,64650916	472,418020
2	-1,80143597	0,209108771	-0,13714390	37,684494
3	0,71727204	0,190439972	-0,00649767	7,472018
4	0,50344027	0,142648498	-0,00234444	2,920828
5	-0,61899395	0,077993465	0,00511868	0,005184
6	-0,05332322	0,012475611	0,00187982	-0,963864
7	0,28021362	-0,032267127	-0,00204472	-0,188732
8	0,10715224	-0,075291522	-0,00046122	0,191203
9	-0,29302865	-0,056470670	0,00045724	0,049025
10	0,04459872	0,076201285	-	-
11	0,11868632	0,123893204	-	-
12	-0,05248134	-0,029201193	-	-
13	-	-0,091173542	-	-
14	-	0,001317696	-	-
15	-	0,026025526	-	-

1.3.2. 273,16 K / 1234,93 K sıcaklık aralığı

Bu sıcaklık aralığı platin termometrelerin kullanabileceği en yüksek aralıktır. Bu sıcaklık aralığında kalibrasyonlar, Galyumun ergime noktası, İndiyum, Kalay, Çinko, Alüminyum ve Gümüşün donma sabit sıcaklık noktalarında gerçekleştirilir [37,38].

Bu sıcaklık aralığındaki referans fonksiyon Denklem (1.18)'de tanımlanmıştır;

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^{9} C_i \left[\frac{T_{90}/K) 754,15}{481} \right]^i \qquad (1.18)$$

Denklem (1.18)'e 0.13 mK belirsizlikle yaklaşan ters eşitlik ise Denklem (1.19)'daki gibi elde edilebilir;

$$T_{90}/K \quad 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^{9} D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) \quad 2,64}{1,64} \right]^i \qquad (1.19)$$

Denklem (1.19)'da C_0, C_i, D_0 ve D_i katsayıları, ITS-90 tarafından Tablo 1.2'de verilmiştir.

1.3.3. ITS-90'daki ara sıcaklık bölgeleri

SPRT'ler her yıl dış etkenlerden kaynaklı ölçüm hatalarının azaltılması için kalibrasyon yapılırlar. Bu kalibrasyonlarda ITS-90'da bulunan ara sıcaklık bölgeleri kullanılır. Bu nedenle, termometrenin hangi ara sıcaklık değerinde kullanılacağı önemlidir. Bu belirlendikten sonra alt paragraflarda ayrıntıları verilen sıcaklık aralıklarında termometreler kalibrasyona sokulur.

Termometre, 83,8058 K ile 273,16 K aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda Argon, Civa ve suyun üçlü noktası sabit sıcaklıkları kullanılır. Denklem (1.20)'de sunulan sapma fonksiyonu elde edilir;

$$W(T_{90}) \quad W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) \quad 1] + b[W(T_{90}) \quad 1] \ln W(T_{90}) \qquad (1.20)$$

Denklem (1.20)'den a, b katsayıları tanımlayıcı sabit noktalarda yapılan ölçümlerden elde edilir.

Termometre, 273,16 K ile 1234,93 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, kalayın, çinkonun, alüminyumun ve gümüşün donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Denklem (1.21)'deki sapma fonksiyonu elde edilir;

$$W(T_{90}) \quad W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) \quad 1] + b[W(T_{90}) \quad 1]^2 + c[W(T_{90}) \quad 1]^3 \qquad (1.21)$$
$$+ d[W(T_{90}) \quad W(660{,}323°C)]^2$$

Alüminyumun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda d=0'dır. a, b ve c katsayıları kalay, çinko ve alüminyumun donma noktalarında ölçülen $Wr(T_{90})$ değerinden sapmalar, sapma fonksiyonuna konularak elde edilir. d katsayısı alüminyumun donma noktasında $Wr(T_{90})$ değerinden sapma ölçülerek belirlenir [39]. Gümüş için 273,16 K ile 1234,93 K aralığında a, b, c ve d katsayıları elde edilir.

Termometre, 273,17 K ile 933,473 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, kalayın, çinkonun, alüminyumun donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Bu aralıkta sapma fonksiyonundan a, b, c katsayıları elde edilir ve d=0'dır.

Termometre, 273,17 K ile 692,677 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, kalayın ve çinkonun donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. 273,17 K ile 692,677 K aralığında sapma fonksiyonundan a, b katsayıları elde edilir; c=d=0'dır.

Termometre, 273,17 K ile 505,078 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, indiyumun ve kalayın donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Bu aralıkta sapma fonksiyonundan a, b katsayıları elde edilir; c=d=0'dır.

Termometre, 273,17 K ile 429,7485 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, indiyumun donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Bu aralıkta sapma fonksiyonundan a katsayısı elde edilir; b=c=d=0'dır.

Termometre, 273,17 K ile 302,9146 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı ve galyumun ergime sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Bu aralıkta sapma fonksiyonundan a katsayısı elde edilir; b=c=d=0'dır.

Termometre, 234,3156 K ile 302,9146 K sıcaklık aralığında kalibre edilir. Kalibrasyonda, civanın ve suyun üçlü noktası sıcaklığı ile galyumun ergime sabit sıcaklık noktaları kullanılır. Bu aralıkta sapma fonksiyonundan a, b katsayıları elde

edilir; c=d=0'dır. Bu ölçeğin önemli özelliği hassas ölçümlerin oda sıcaklığı civarında yapılabilmesidir.

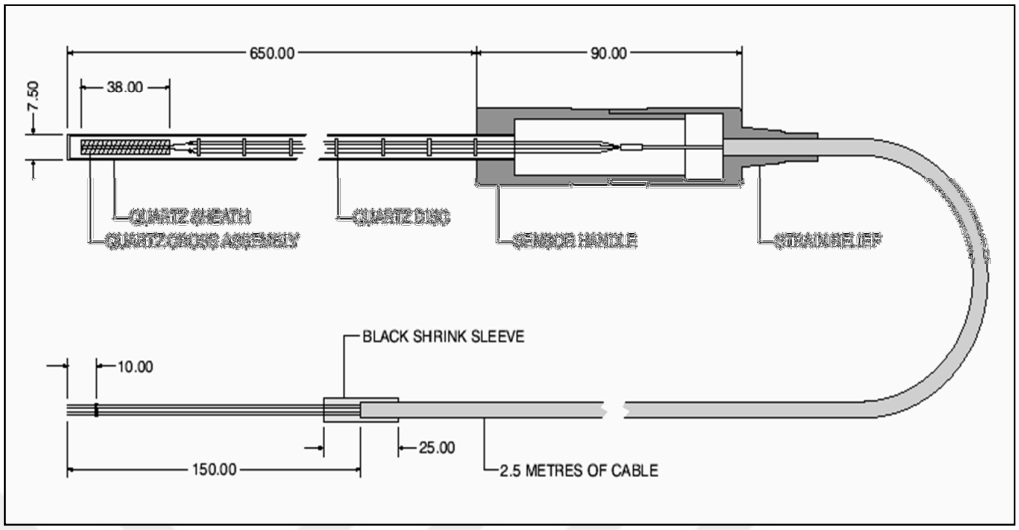
ITS-90, 273,16 K ile 302,9146 K sıcaklık aralığında ölçüm yapmayı sağlamaktadır. İstenirse bu aralık civanın üçlü noktası sıcaklığı olan 234,3156 K' e kadar genişletilebilir. Termometre 234,3156 K ile/ 302,9146 K aralığında civa ve suyun üçlü nokta sıcaklıklarında ve galyumun ergime noktası sıcaklığında kalibre edilir [40-42].

1.4. SPRT Yapısı

PRT tasarımının amacı, duyarlı eleman (sensör) uygulama sıcaklığına tepki verirken aynı zamanda aşındırıcı akışkanlar, titreşim, basınç ve nem gibi çevre koşullarından olumsuz etkilenmemesini sağlamaktır. PRT tasarımında en ciddi sorun genellikle mekanik şok ve ısıl genleşmeye bağlı olarak uzamasıdır. Bir rezistanslı termometrenin en basit formu elektriksel yalıtımı da sağlayan bir destek ve helezonik bir tel içerir. Böyle bir tasarım şok ve titreşimlere karşı çok hassastır. Bu durumda çarpmalar telin desteklenmemiş kısımlarının esnemesine ve uzamasına neden olur ki, bu da telde sertleşme etkisi yaratarak kristal yapıyı bozar ve telin direnci artar. Bununla baş etmenin bir yolu helezonik teli bir katıya monte etmektir. Ancak bu tasarımda da katı ve tel arasındaki genleşme farkından dolayı, platin tel yine sertleşme etkisinde kalır ve direnç belirsizliği yine de artar. Pratik PRT tasarımları mekanik sağlamlık ve minimum uzama özellikleri arasında bir denge bulmaya çalışır [43].

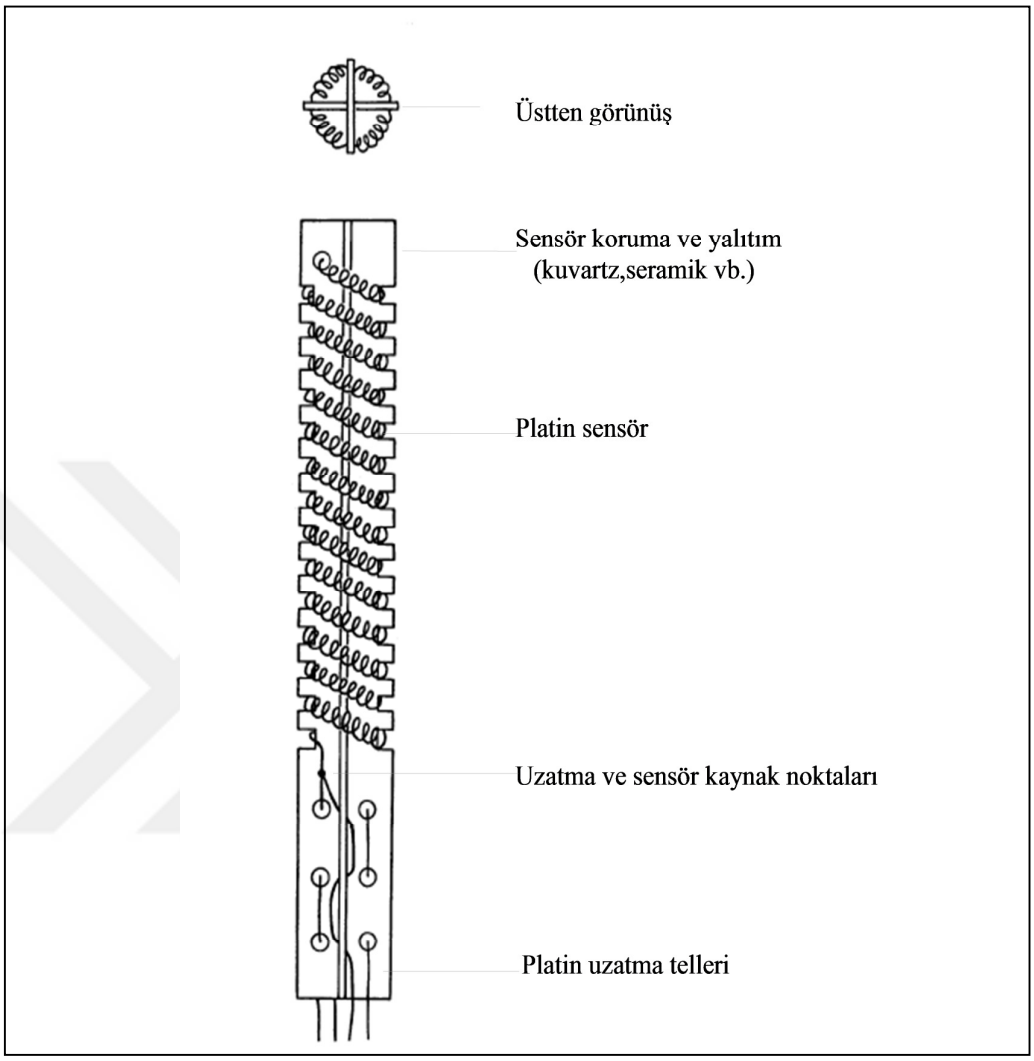
SPRT'ler kapsül, uzun gövdeli ve yüksek sıcaklık ölçümlerine uygun olmak üzere üç kategoriye ayrılırlar. Uluslararası sıcaklık ölçeğine göre kullanılan PRT'ler kullanılacak sıcaklık aralığına göre imal edilir.

Kapsül tipi SPRT'ler 13,8 K'e kadar olan düşük sıcaklıklarda kullanılır. Bağlantı telleri kısa tutulur ve genellikle ince bakır veya konstantan uzatma bağlantılarıyla kaynaklanır. Tasarımın prensibi, bağlantılar boyunca ısıl iletimden kaynaklanan hataların minimuma indirilmesidir. Kroyojenik sıcaklıklarda bu tip iletim hataları ihmal edilebilir. Sensör tipik olarak 0 °C'de 25 ohm nominal dirence sahiptir. Isıl etkileşim, platin bir kılıf içine, oda sıcaklığında 30 kPa'lık bir basınç altında ısı transferine yardımcı olacak oksijen katkılı helyum gazı konularak sağlanır. 25 ohm'luk bir direnç elde etmek için 0,07 mm çapında 600 mm uzunluğunda helezonik Platin tel gerekir [44]. Standart platin direnç termometre boyutları Şekil 1.4'de gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Standart platin direnç termometre ve genel hatları ile boyutları [45]

Daha yüksek sıcaklıklarda kullanılacak SPRT'lerin gövdeleri daha uzun yapılmaktadır. -189,352 °C / 419,527 °C sıcaklık aralığında kabul edilen ara değerleme enstrümanı, uzun gövdeli SPRT'lerdir. Bu cihazlar cam veya kuvars kaplama içerisinde, bir şekillendirici etrafına sarılmış platin içerirler. Platin telin sarıldığı şekillendiriciler genellikle mika malzemelerden yapılır. Mika üzerine açılan dört adet uç ile mika çevresinde platin telin kalınlığının sığacağı şekilde ince oyuklar açılır. Bu oyuklar çifte helis oluşturacak şekilde de tasarlanabilir. Bu tasarımda telin yarısı şekillendiriciye sarılırken bir sonraki oyuk boş kalır ve bir sonraki turda boş kalan oyuk doldurulur. Elde edilen biçim çift sargılı bobin olarak adlandırılır ve birbirine yakın tellerdeki elektrik alanlarının birbirini götürmesini sağlayarak indükleme etkilerini minimuma indirir. Standart platin direnç termometre sensör yapısı Şekil 1.5'de görülmektedir.



Şekil 1.5. Standart platin direnç termometre sensör yapısı [46]

Yüksek sıcaklık SPRT'leri, kimyasal değişimlere karşı direnç sağlayacak şekilde tasarlanır. Platin kararlı bir metal olmasına karşın oksitlenebilir ve kristal büyümeye uğrayabilir. Oksidasyon problemi PRT'lerin maksimum çalışma sıcaklıklarını, uzun vadede kararlılıklarını ve belirsizliklerini belirler. 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mika malzeme yerine yüksek saflıkta kuvars malzeme kullanılır [47].

2. ARA DEĞERLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER VE ITS-90 SICAKLIK STANDARDININ GELİŞTİRİLMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

Belirli bir aralıkta değişim gösteren bir fonksiyonun bazı değerleri biliniyorken, bilinmeyen diğer değerleri bulmak için ara değerleme yöntemi kullanılır. Başka bir deyişle ölçüm sonuçlarından hareketle, bir fonksiyonun ölçüm aralığı içinde kalan fakat bilinmeyen değerlerinin hesaplanması işlemine ara değerleme denir. Ara değerlendirme amaçlı olarak bu tez kapsamında kullanılan MATLAB programında geleneksel yöntemler bulunduğu gibi yumuşak hesaplama algoritmalarıyla da ara değerleme işlemi yapılabilir.

2.1. Geleneksel Ara Değerleme Yöntemleri

MATLAB'de geleneksel ara değerleme yöntemi olarak interp1 ve interp2 fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlardan interp1 fonksiyonu veri analizi ve eğri uydurma işlemlerinde tek boyutlu ara değer hesabı yapar. Kullanımı Denklem (2.1)'de gösterilmiştir;

$$yi = \text{interp1}(x,y,xi,\text{method}) \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de parantez içine önce değişken aralığı sonra fonksiyon değeri ve fonksiyon değeri bulunmak istenen değer ve daha sonra method yerine interpolasyon türünü ifade edene parametreler girilir. Kullanılan metotlar olarak; "nearest", "linear", "spline" ve "cubic" olarak isimlendirilmektedir.

Method türü girilmez ise varsayılan metot "lineer" olarak kabul edilir. "spline" ve "cubic" türleri "linear" ve "nearest" türüne göre daha duyarlı olduğundan çoğu uygulamada tercih edilir.

"nearest" ara değerleme metodu istenilen noktaya en yakın olan veri noktasını verir. "linear" ara değerleme metodu, istenilen x değerinin solundaki ve sağındaki veri noktalarını alıp, bu noktalardan bir doğru geçirir. Bu doğrunun istenilen x değerine karşılık gelen y değerini verir. "linear" ara değerleme metodu sadece birinci derece bir polinoma uyan veri noktaları için en uygun sonucu vermektedir. "cubic" ara

değerleme metodu, her iki veri noktasından geçen 3. derece bir polinom bulur ve bu polinomu kullanarak istenilen noktadaki y değerini hesaplar.

İki boyutlu ara değerleme işleminde interp2 fonksiyonu kullanılır. Bu işlem görüntü işleme ve veri görüntülenmesinde kullanılır. Tek boyutlu ara değerlemede kullanılan metodlar bunun için de kullanılabilir. Kullanımı Denklem (2.2)'de gösterilmiştir;

$$zi = \text{interp2}(x, y, z, xi, yi, \text{method}) \tag{2.2}$$

Bu tez kapsamında iki boyutlu ara değerleme yapmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte geleneksel yöntem olan interp2 metodu iki boyutlu ara değerleme işleminde kullanılmakla birlikte belirli x ve y değerleri için z değerlerinin sayısı x ve y değerlerinin çarpımı kadar olmalıdır.

ITS-90 standartında her bir sabit noktaya atanmış bulunan sıcaklık değerinin, SPRT yardımıyla direnç değerleri ölçülür, her ölçümün ardından Suyun Üçlü Noktası (SÜN) sıcaklık değerinin direnç değeri alınarak direnç oranları hesaplanır. Bu nedenle sıcaklık değerlerini bulabilmek için belirli SÜN değerlerindeki direnç değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Tez kapsamında, giriş değerleri olarak 10 adet SÜN değerleri ile birlikte belirli sıcaklık aralıklarında ölçülen direnç değerleri kullanılmaktadır. İki boyutlu ara değerlemede interp2 fonksiyonunun kullanımı için x ve y değerleri için z değerlerinin sayısı, x ve y değerlerinin çarpımı kadar olmalıdır. Ancak, ölçümlerle elde edilen mevcut veri kümesinde bu kadar z değeri yani sıcaklık değeri yoktur.

Ayrıca, bu çalışma kapsamında literatürde bir fonksiyon yoktur. ANFIS'e giriş olarak sunulan SÜN değerleri ile direnç değerlerine göre hesaplanan sıcaklık için interp2'yi kullanmak için veriyi matris şeklinde iki boyutlu hale dönüştürmek gerekir. Matrisel anlamda bu noktalara karşılık gelecek değeri bulmak için de bir fonksiyona ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında kullanılmak üzere doğrudan böyle bir fonksiyon olmadığından, Şekil 2.1.'de gösterildiği şekilde ancak "griddata" komutunun yalnızca iki boyutlu ara değerlemeyi destekleyen 'v4' seçeneği ile mevcut veriye ait bir aradeğerleme yapmak mümkün olmuştur.

```
y_s = griddata(x(:,1),x(:,2),y,x_test(:,1),x_test(:,2),'v4')
```

Şekil 2.1. İki boyutlu ara değerlemede griddata komutunun kullanımı

İki boyutlu ara değerlemede çıkış verisi için tanımlı tek bir matematiksel fonksiyon olmadığından ara değerleme yapabilmek için "interp2" komutu kullanılamamıştır. Bu komut yerine geleneksel aradeğerleme yöntemlerinin performansını görmek için "griddata" komutundan yararlanılmıştır [48].

Bu sonuçlara göre griddata komutu ile yapılan aradeğerleme sonucunda elde edilen ortalama karasel hata 7,7993e-006 bulunmuştur. ANFIS'de 9,0488e-007 olan ortalama karasel hata göz önüne alındığında geleneksel ara değerleme yöntemiyle istenilen hassasiyetin yakalanamayacağı görülmüştür.

2.2. Yapay Sinir Ağları

İnsanlığın doğayı araştırma ve taklit etme çabalarının en son ürünlerinden bir tanesi Yapay Sinir Ağları (YSA) teknolojisidir. Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin biyolojik bilgi işleme tekniğinden esinlenerek geliştirilmiş bir bilgi işlem teknolojisidir. YSA ile basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli taklit edilir. Taklit edilen sinir hücrelerine nöronlar denir ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir. Bir insanın, düşünme ve gözlemleme yeteneklerini gerektiren problemlere yönelik çözümler üretebilmesinin temel sebebi ise insan beyninin ve dolayısıyla insanın sahip olduğu yaşayarak veya deneyerek öğrenme yeteneğidir [49].

Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren yaşayarak bir öğrenme süreci içerisine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe ettikçe sinaptik bağlantılar ayarlanır ve hatta yeni bağlantılar oluşur. Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitme yoluyla örnekler kullanarak olur; başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitim algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla olur [50].

YSA'lar, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem biriminden (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem birimi, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem birimi, diğer nöronlardan sinyalleri

alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem birimleri kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır [51].

Yapay sinir hesaplamanın merkezinde dağıtılmış, uyarlamalı ve doğrusal olmayan işlem kavramları vardır. YSA'lar, geleneksel işlemcilerden farklı şekilde işlem yapmaktadırlar. Geleneksel işlemcilerde, tek bir merkezi işlem birimi her hareketi sırasıyla gerçekleştirir. YSA'lar ise her biri büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen, çok sayıda basit işlem birimlerinden oluşmaktadır. En basit şekilde, bir işlem birimi, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile ağırlıklandırır, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlar ve bir çıktı değeri oluşturur. İlk bakışta, işlem birimlerinin çalışma şekli yanıltıcı şekilde basittir. Yapay sinir hesaplamasının gücü, toplam işlem yükünü paylaşan işlem birimlerinin birbirleri arasındaki yoğun bağlantı yapısından gelmektedir. Bu sistemlerde geri yansıtma metoduyla daha sağlıklı öğrenme sağlanmaktadır.

Çoğu YSA'da, benzer karakteristiğe sahip işlem birimleri katmanlar halinde yapılandırılırlar ve transfer fonksiyonları eş zamanlı olarak çalıştırılırlar. Hemen hemen tüm ağlar, veri alan ve çıktı üreten işlem birimlerine sahiptirler.

YSA'nın ana öğesi olan matematiksel transfer fonksiyonu, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, transfer fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem birimlerinin bu ağırlıklandırılmış girdileri birleştirme şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak işlem birimlerinin transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir.

Yapay sinir ağlarının üstünlüklerinin yanı sıra; sistem içerisinde ne olduğunun bilinmemesi, bazı ağlar hariç kararlılık analizleri yapılamaması, farklı sistemlere eşdeğer YSA yapısının uygulanmasının zor olması dezavantajıdır.

Sadece YSA kullanılarak ITS-90 standardının geliştirilmesi planlansaydı, öğrenme aşaması gerçekleştirildiği için belirli bir seviyede sonuç alınabilirdi. Ancak, bulanık sinir sisteminin özelliği olan üyelik fonksiyonunun kullanılmaması istenilen hassasiyette sonuca ulaşılmasını engellemektedir. Bu tez kapsamında, SPRT'lerin kalibrasyonunda birinci derece sıcaklık laboratuvarlarında mevcut olan hassasiyet planlandığından sadece YSA kullanımı yetersiz kalacağı düşünülmektedir.

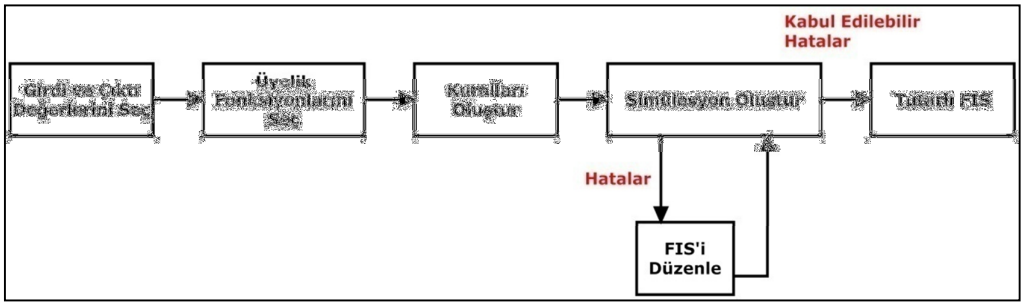
2.3. Bulanık Çıkartım Sistemi

Bulanık çıkartım sisteminin temeli bulanık küme ve alt kümelere dayanır. Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır (1) ya da değildir (0). Bulanık varlık kümesinde her bir varlığın üyelik derecesi vardır. Varlıkların üyelik derecesi, (0..1) aralığında herhangi bir değer olabilir.

Örnek olarak öğrencinin 10 üzerinden aldığı notlarda 5 notunu iyi olarak kabul edersek klasik küme kuramına göre 5'in üzerindeki notları iyi olarak kabul ederiz ve notların kümedeki üyelik değerleri "1" olur. 5'in altındaki notlar ise kötü nottur ve kümedeki üyelik değerleri "0" olur. Bulanık küme yaklaşımında ise öğrencinin aldığı 2 notu için üyelik derecesi "0,2", 5 notu için üyelik değeri "0,45" olabilir

Klasik kümelerin aksine bulanık kümelerde elemanların üyelik dereceleri [0..1] aralığında sonsuz sayıda değişebilir. Keskin kümelerdeki soğuk-sıcak, hızlı-yavaş, aydınlık-karanlık gibi ikili değişkenler, bulanık çıkartım sisteminde biraz soğuk, çok sıcak, biraz karanlık ya da çok aydınlık gibi esnek niteleyicilerle yumuşatılarak gerçek dünyaya benzetilir. En önemli fark, böyle bir çatıda bilginin kaynağındaki küme üyeliğinin kesin tanımlanmış ön koşullarının olmayışıdır [52].

Bulanık Çıkarım Sistemi, girdi-çıktı değerleri arasında ilişki oluşturarak çalışan; şeffaf ve açıklanabilir bilgiler içeren akıllı sistemdir. Bulanık çıkartım sistemi yapısını oluştururken takip edilen süreç adımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Bulanık çıkarım sistemi süreç adımları [53]

İncelenen sistem için Şekil 2.2'de sıralandığı şekilde öncelikle girdi ve çıktı değerleri belirlenir. Verinin yapısı ve değer aralıkları bu süreçte incelenir. Üretilecek çıktı değerlerine uygun girdi değerlerinin seçilmesi de önemlidir.

“Girdi-Çıktı Değerleri” seçildikten sonra uygun Üyelik Fonksiyonu seçilir. Bulanıklaştırma aşamasında kullanılan bu üyelik fonksiyonları, üyelik/aidiyet değerlerinin belirlenmesi açısından önemlidir.

“Üyelik Fonksiyonu” belirlendikten sonra, kurallar olarak adlandırdığımız ve gerekçeler ile şartların tanımlandığı adıma geçilir. Bu süreç adımı eğer-ise’ler olarak da adlandırılmaktadır.

Girdilere karşılık üyelik fonksiyonları ile belirlenen değerlerin etkileşiminin hangi operatör ile yapılacağı (AND (ve), OR (veya), NOT (mantıksal değil)), Mamdani yapısı kullanılarak sabit bir değer mi veya Sugeno yapısı ile sabit bir değer ya da birinci dereceden denkleme bağlı bir çıktı mı üretileceği bu aşamada tanımlanır.

Bulanık çıkarım sistemi yapısının oluşturulmasında Mamdani veya Sugeno türünün kullanılması genel anlamda fark yaratmamaktadır. Ancak Yapay Sinir Ağları ya da Genetik Algoritma gibi yumuşak hesaplama algoritmalarının kullanılabilir olması açısından Sugeno yapısı tercih edilmektedir [54].

Sürecin “Simülasyon Oluşturma” adımında tanımlanan ilişkiler ve çıktı başarımı bulanık çıkarım yapısı üzerinde incelenir. Gerek duyulursa eğer-ise kuralları ile üyelik fonksiyonlarında düzenlemeler yapılır. Tutarlı sonuçların alındığı gözlendiğinde süreç tamamlanmış olur. Elde edilen “Bulanık Çıkarım Sistemi” kullanılarak, yeni verilecek girdi verisinin ilişkili olduğu çıktı değeri bulunabilecektir. Bulanık çıkartım sistemi yapısı içinde kullanılan kurallar gözlenebilir durumdadır yani hangi şartta hangi değer atamasının yapıldığı tanımlanabilmektedir.

Bu tez kapsamında bulanık sinir sisteminin kullanılmamasının nedeni; çalışılan sorun için bulanık çıkartım sisteminin en önemli özelliği olan kuralların tam olarak oluşturulamamasıdır. Bu tez kapsamında bulunacak sonuçtaki önemli durum, istenilen 10 mK’den küçük hassasiyeti sağlamaktır. Bulanık çıkartım sistemlerinin en önemli özelliği olan kural oluşturma aşamasının tam olarak tanımlanamaması bu hassasiyetin sağlanmasına engel olacaktır.

2.4. Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi

Günümüzde geleneksel yöntemlere alternatif olarak doğrusal bir ilişkiye sahip olmayan problemlerin çözümünde, yapay sinir ağı ya da bulanık mantık tabanlı akıllı sistemler kullanılmaktadır. Bulanık mantık ve sinir ağları, akıllı sistemlerin

geliştirilmesinde kullanılan tamamlayıcı araçlardır. Yapay sinir ağları, ham verilerle uğraşıldığında iyi sonuçlar vermektedir. Bulanik mantık ise, uzman görüşü sonucu elde edilen dilsel bilgileri kullanarak iyi sonuçlar çıkarmaktadır. Aslında bulanık sistemlerin öğrenme kabiliyeti yoktur ve kendilerini yeni koşullara adapte edemezler. Diğer yandan yapay sinir ağları öğrenme kabiliyetine sahiptir [55, 56].

ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının en iyi özellikleri birleştirilerek Roger Jang tarafından geliştirilmiştir. ANFIS, yapay sinir ağlarının paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuçlar çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuç olarak ANFIS sayesinde her iki yöntemin en üstün yönleri bir araya getirilerek daha etkin yaklaşımlar geliştirilmiştir**.**

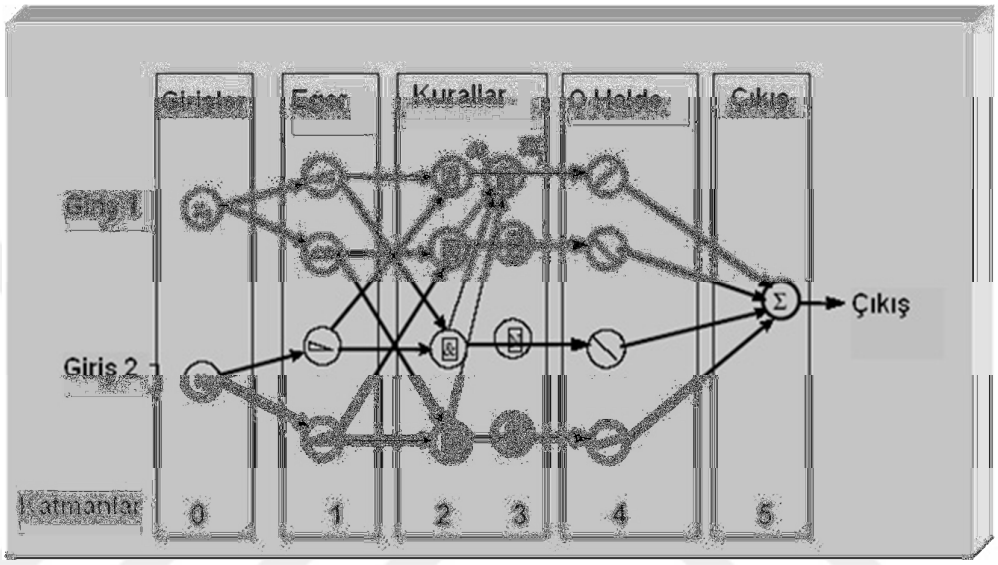
ANFIS, ele alınan problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmekte veya kuralların veriler yardımıyla bir akıllı uzman tarafından atanmasına olanak vermektedir. ANFIS'in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına olanak sağlaması uzman görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu nedenle birçok tahmin probleminde yapay sinir ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkanı tanıdığı için daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yapıda eğiticili öğrenme kuralına sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarının uyarlamalı ağ biçimi tanımlanmıştır. Uyarlamalı ağ, işlem birimlerini ve bu birimlerin bağlantılarını içeren bir ağ yapısıdır. İşlem birimlerinin hepsi veya bir kısmı, çıkışları kendi parametrelerine bağlı olan ve öğrenme kurallarının öngörülmüş hata değerini minimize etmek için bu parametrelerin nasıl değiştirileceği açıkça belirtilmiş uyarlamalı işlem birimleridir. Uyarlamalı ağların temel öğrenme kuralı; geri-yansıtma dereceli azalma (gradient descent) ve en küçük kareler yönteminin birleşimi esas alınarak melez (hybrid) öğrenme algoritması kullanılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'deki ANFIS ağı yapısındaki her katmanın işlevi aşağıda açıklanmıştır [57]:

- K0: durum değişkenleri, ANFIS giriş katmanı içindeki düğümlerdir.
- K1: her bir durum değişkeni terim kümesi, üyelik değerlerini hesaplayan ANFIS değerler katmanı içindeki düğümlerdir.
- K2: bulanık mantık yapısındaki her bir kural, kural eşleştirme faktörünü, w_i, hesaplamak için minimumlaştırma veya çarpma işlemi yapan ANFIS kurallar katmanı içindeki düğümlerdir.

• K3: her bir kural eşleştirme faktörü, w_i , normalleştirme katmanı içerisinde $\overline{w_i}$ ölçeklendirilir.

• K4: her bir $\overline{w_i}$ ağırlığı fonksiyon katmanı içinde kural çıkışı üretir.

• K5: her bir kural çıkışı birleştirilerek çıkış katmanına gönderilir.



Şekil 2.3. Örnek bir ANFIS ağının yapısı

3. VERİ EDİNİM CİHAZI VE MATLAB ENTEGRASYONU

3.1. MATLAB Yazılımının İncelenmesi

MATLAB, teknik hesaplamalar ve matematiksel problemlerin çözümü ve analizi için tasarlanmış bir yazılım geliştirme aracıdır. “MATrix LABoratoty” kelimesinin kısaltması olan MATLAB, adından da anlaşılacağı üzere matrisler yani diğer bir deyişle çok boyutlu diziler ile çalışır. Özellikle mühendislik alanındaki sistemlerin analizinde kullanılan MATLAB, görüntü işleme, yapay sinir ağları, sayısal işaret işleme, optimizasyon, veri elde etme, veritabanı, süzgeç tasarımı, bulanık mantık, sistem tanımlama, dalgacıklar dönüşümü gibi araçları ile çok geniş bir program geliştirme ortamı sunar.

MATLAB programının nasıl bir yazılım olduğunu anlamak için çok gelişmiş özellikleri olan, programlanabilen bir bilimsel hesap makinesine benzetebiliriz. MATLAB’de yazılan programlar, MATLAB’in kendine özgü dili kullanılarak yazılır ve MATLAB içinden çalıştırılır. Ayrıca yazılan programların DLL ve EXE uzantıları oluşturabildiği gibi C/C++ kodlarına da çevrilebilir.

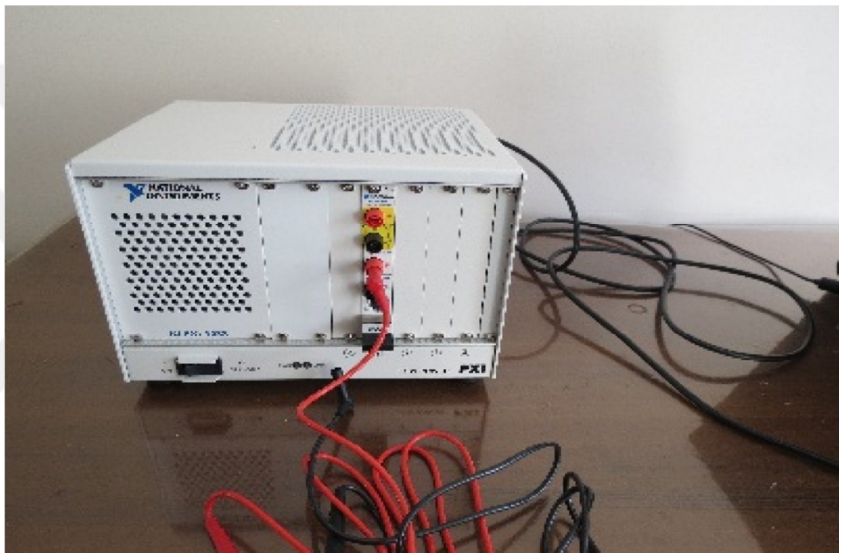
MATLAB’de komut satırında çalışan programlar yazıldığı gibi MATLAB GUI geliştirme aracını kullanarak, formlar ve butonlar gibi nesnelerden oluşan görsel yazılımlar da geliştirebilir.

Yapılan yoğun incelemeler sonucunda bu tezin gerçekleştirilmesi için MATLAB programında kullanılacak araçlar aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- MATLAB ana yazılımı,
- ANFIS’in uygulanabilmesi için Fuzzy Logic Toolbox,
- Veri edinim işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Data Acquisition Toolbox,
- Programın MATLAB yazılımı olmayan bilgisayarlarda da çalışabilmesini sağlamak için MATLAB Compiler.

3.2. Veri Edinim Cihazı ile Dizüstü Bilgisayar Entegrasyonu

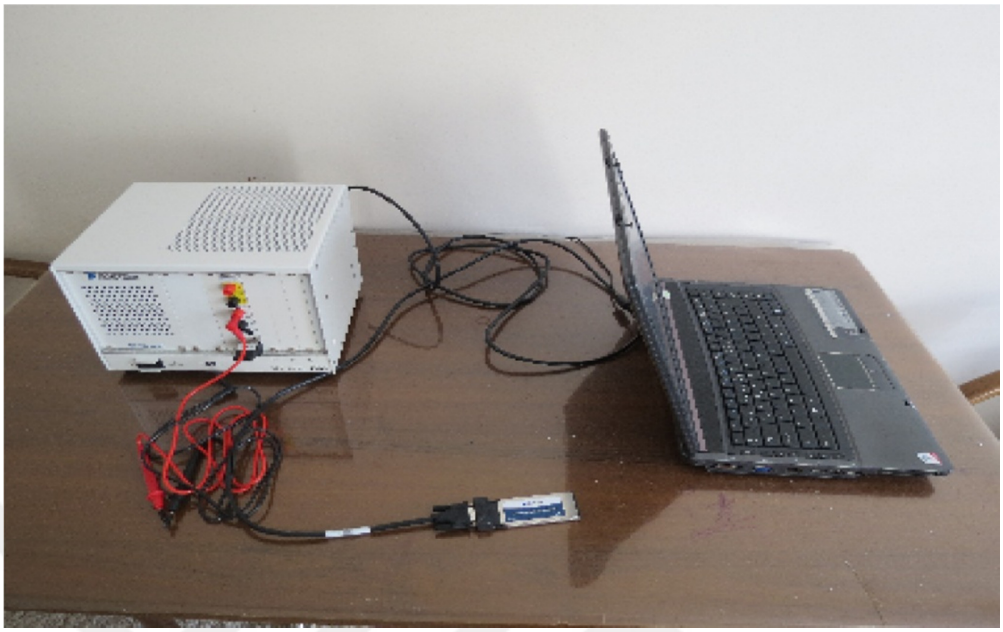
Öncelikle 2010/078 sıra numaralı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi desteği ile alınan National Instruments NI PXI-1033 cihaz şasesine, veri edinimi amaçlı kullanılacak ölçüm otomasyon kaşifi olarak adlandırılan 7,5 digit hasasiyette ölçüm yapabilen NI PXI-4071 sayısal multimetre entegre edilmiştir. Direnç ölçmeye yarayacak problar NI PXI-4071'in üstündeki yerlere yerleştirilmiştir. Bütün parçaları kurulan veri edinim cihazı Şekil 3.1'de sunulmuştur.



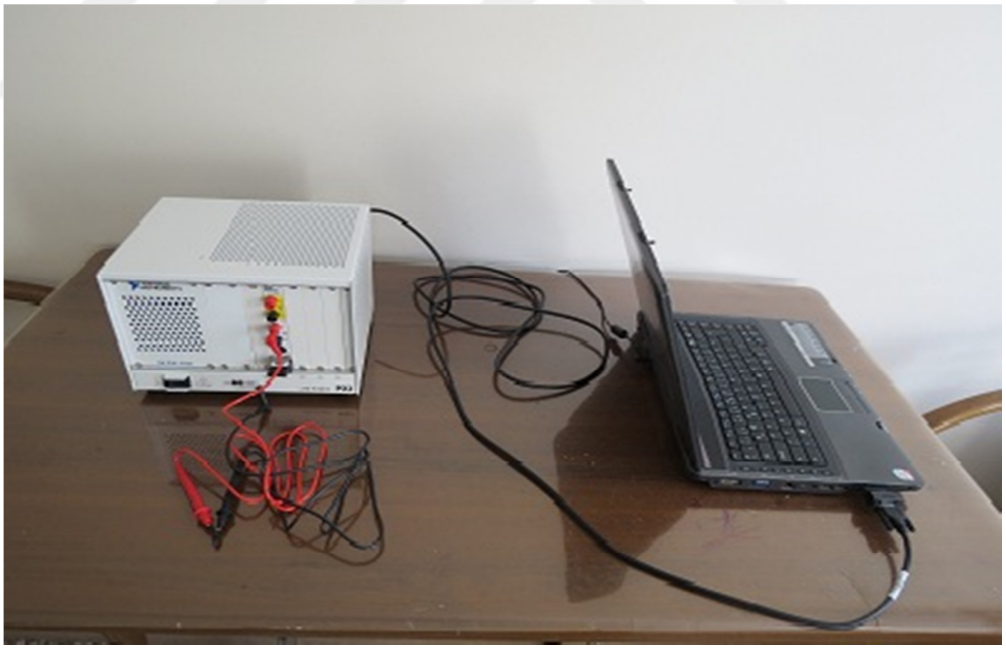
Şekil 3.1. Veri edinim cihazı

Veri edinim cihazının dizüstü bilgisayarla PCI bağlantı entegresini sağlayacak ve NI ExpressCard-8360'a bağlanacak kablo da şaseye bağlanmıştır. Bu kablonun ucuna Şekil 3.2'de gösterildiği gibi PCMCIA entagrasyonunu sağlayan NI ExpressCard-8360 bağlanmıştır. NI ExpressCard-8360 kartının bilgisayara entegre edilmesi Şekil 3.3'de sunulmuştur.

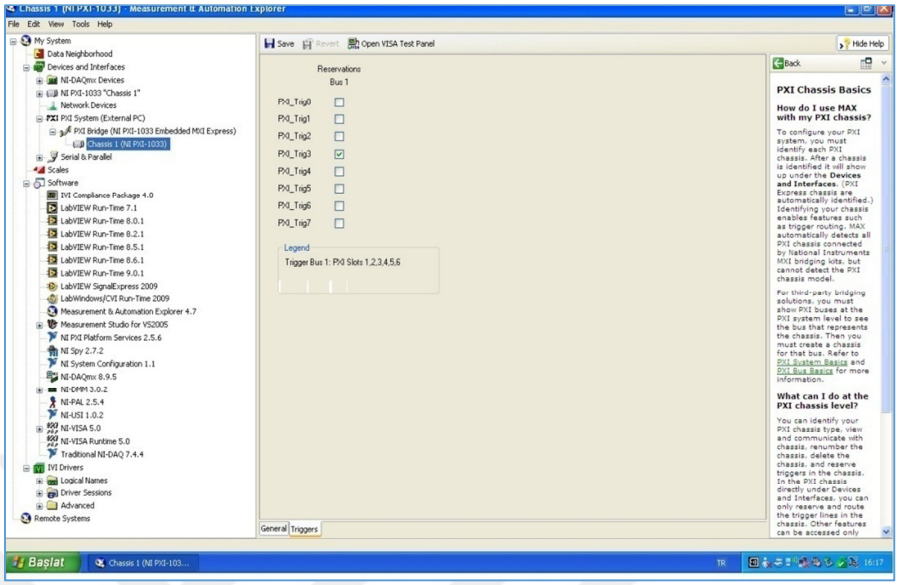
Veri edinim cihazının kurulmasına müteakip cihazın sürücüleri ve programı bilgisayara kurulmuştur. Tüm düzenek çalışırken ve bilgisayara entegre iken bilgisayar çalıştırılmıştır. Measurement & Automation isimli uygulama açıldığında kullanım kılavuzlarında gözüktüğü şekilde veri edinim cihazı entegre edilmiş ve çalıştığı görülmüştür. Ölçüm yapmaya hazır hale getirilen düzeneğin konfigürasyonunu gösteren ekranlar Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



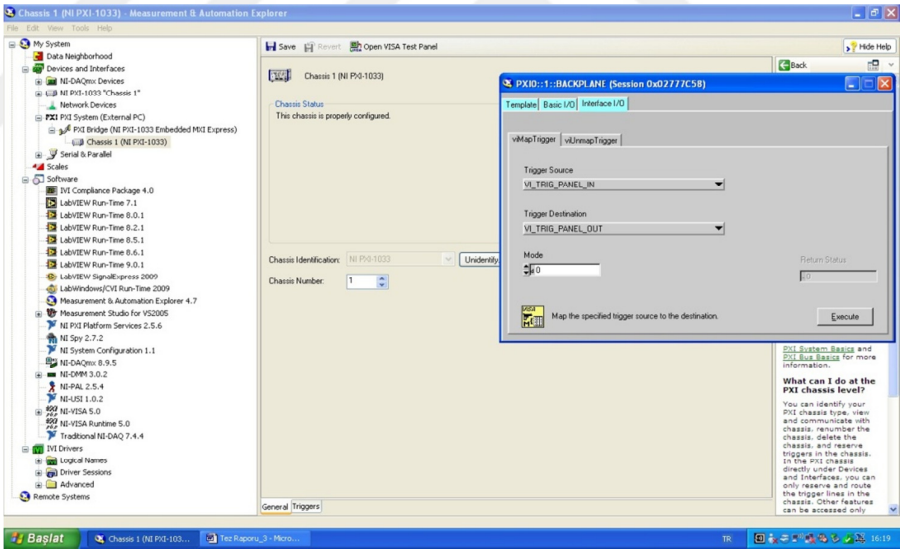
Şekil 3.2. Veri edinim cihazı bağlantıları



Şekil 3.3. NI ExpressCard-8360 kartının bilgisayara entegre edilmesi



Şekil 3.4. Cihazın konfigürasyon ekranı



Şekil 3.5. Cihazın konfigürasyon ekranı ve test panel

3.3. Veri Edinimi Cihazı İle MATLAB Uyuşumu

MATLAB ortamından cihazın veri okumasını sağlamak için öncelikle cihaza ait sürücünün MATLAB programına tanıtılması gerekmektedir. Bunun için MATLAB komut satırına “midedit” ifadesi yazılır ve bu komut ile “MATLAB Instrument Driver Editor” programı açılmaktadır. Açılan bu ekranın “File sekmesinden “Import” seçeneği ile “nidmm” satırı seçilir ve import edilir. Otomatik olarak hazırlanan “.mdd” uzantılı bu dosya kaydedilir. Cihazın bu sürücü yardımıyla bağlantısının

yapılabilmesi için MATLAB'ın “Current Directory” yolu dosyanın kaydedildiği yola ayarlanır. Sonrasında cihaza bağlanmak için Şekil 3.6’da açıklanan komut kullanılır.

```
ictObj = icdevice('nidmm.mdd','******');
connect(ictObj);
disp(ictObj);
```

Şekil 3.6. Cihaza bağlanmak için kullanılan kod

İlk kod satırda birinci parametre cihazın “midedit” komutu ile oluşturulan sürücüsünü, ikinci parametre hangi cihaza bağlanılacağına dair bilgiler içerir. “*****” yazılı kısıma Measurement & Automation Explorer uygulamasında "Devices and Interfaces" sekmesi altında bulunan PXI'ın ismi yazılır. Örneğin; “PXI1Slot3” gibi. Bir sonraki komut olan “connect” fonksiyonu ile ilk kod satırında tanımlı cihaz bağlantı bilgileri ile bağlantı sağlanır. Son satırdaki ifade ile cihazın ne olduğu ve bağlantı durumu MATLAB komut satırında görüntülenebilir.

3.4. Veri Edinimi Cihazı Üzerinden Direncin Okutulması

Cihazın bağlantısı başarılı şekilde yapıldıktan sonra cihazdan veri okumak için Şekil 3.7’de belirtilen kod kullanılmaktadır.

```
format long
ictObj = icdevice('nidmm.mdd','PXI2Slot3');
toplam = 0;
direnc = 0;
connect(ictObj);
range = -1;
measurementFunction = 101;
resolution = 7.5;
configuration = get(ictObj,'configuration');
invoke(configuration, 'configuremeasurementdigits', measurementFunction, range,
resolution);
AutoTimeLimit = -1;
acquisition = get(ictObj, 'acquisition');
firstClock = clock;
for i = 1:50
a(i) = invoke(acquisition, 'read', AutoTimeLimit);
%fprintf(fileID, '%12.8f\r\n' ,a(i));
end
for i = 1:50
toplam = toplam + a(i);
end
direnc = toplam / 50;
%y_sicaklik = evalfis(direnc,out_fis);
fprintf(' direnc = %12.8f\r\n', direnc);
%gecenSure = etime(clock,firstClock);
disconnect(ictObj);
```

Şekil 3.7. Cihazdan veri almak için kullanılan kod

Şekil 3.7'nin ilk satırında cihazdan hangi verinin okuyacağı seçilmektedir. Belirlenen fonksiyonlara göre çıkan değerler farklı birim değerlerini gösterir. Bu tez kapsamında ihtiyaç duyulan değer direnç olduğu için direnç değerini okumak amacıyla fonksiyon değeri "101" seçilir. İkinci satırda okunacak değer aralığının ne olacağı belirtilir. Bu kısımda belirlenen değerin üstüne çıkılan değerler için okunan değerler "Not a Number-NaN" olarak gözlemlenecektir. Bu değerin "-1" olarak belirtilmesi "range" değerini MATLAB'te tanımlı değer okuyacak olan fonksyionun otomatik olarak bu değeri seçeceği anlamına gelmektedir. Sonraki satırda "resolution" olarak tanımlanan değişken değerin ne kadar hassas okunacağını belirtir. Virgülden sonra okunacak basamak sayısı 5,5 ve 6,5 ve 7,5 değerleri arasında değişir. "configuration" parametresi ise cihazın konfigürasyon bilgilerini almak için kullanılmaktadır. Daha sonrasında "invoke" komutu ile mevcut konfigürasyon okunacak değer için hazırlanmaktadır. Cihazdan veri okuma zamanının otomatik olarak belirlenmesi için de "AutoTimeLimit" değeri "-1" olarak ayarlanmaktadır. Değerin okunacağı kısım ise "invoke" metodu ile sağlanmaktadır. Burada belirtilen parametrelere göre okuma yapılır ve okunan değer bir değişkene ayarlanmış olur. En son olarak bulunan değer ekranda standart fonksiyonlar ile gösterilmektedir. Kod içerisinde kullanılan "for" döngüsünün sebebi cihazdan kısa sürede birden çok veri okuyabilmek içindir. Bu sayede okunması istenen direnç değerine yakın bir ortalama değeri çıkarmak için elimizde istediğimiz kadar örnek bulunabilecektir. "fileID" nesnesi ile okunan değerin nereye yazılacağı belirtilmiştir. Döngü sonrasında yazım işleminin bitmesine müteakip "fclose" fonksiyonu ile dosyaya erişim sonlandırılmıştır.

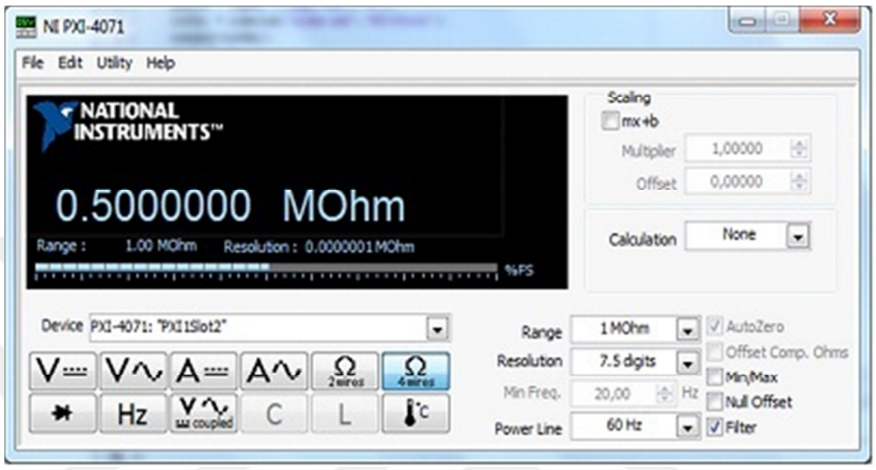
Okuma değeri yapıldıktan sonra cihaza tekrar erişimin aktif olabilmesi için Şekil 3.8'deki kod satırları ile bağlantısının kesilmesi gerekmektedir. Cihaz aynı anda sadece bir uygulamaya hizmet verebilmektedir.

```
disconnect(ictObj);
delete(ictObj);
clear ictObj;
```

Şekil 3.8. Cihazın bağlantısının kesilmesi

Başlangıçta "connect(ictObj)" komutu ile bağlanılan cihazın MATLAB ile bağlantısı "disconnect" ile sonlandırılır. Sonradan kullanılmak üzere oluşturulan "ictObj" nesnesini ise "delete(ictObj)" sildikten sonra "clear ictObj" ile içeriğini de sıfırlamış olur.

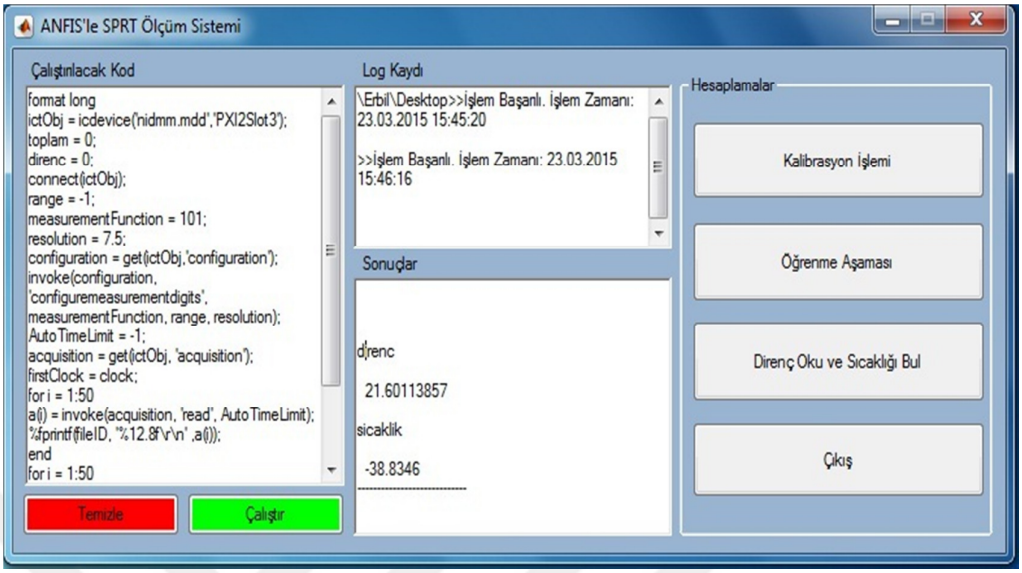
Cihazın okuduğu örnek bir direnç değeri aşağıdaki ekran görüntüsünde gösterilmiştir. Değerin doğruluk payını gösterebilmek adına sanal bir cihaz üzerinden değer okunmuş ve aynı değerin MATLAB komutları ile de bulunabildiği aktarılmıştır. Şekil 3.9'da sanal cihazın o anda okuduğu değer gösterilmektedir.



Şekil 3.9. NI PXI-4071 ölçüm arayüzü ve sanal cihazın ayarlanması

3.5. Uygulama Arayüzünün C#'da Gerçekleştirilmesi ve MATLAB Entegrasyonun Sağlanması

Tez kapsamında görevi PXI 4071 cihazından veri okumak olan uygulama arayüzünde MATLAB imkanlarından en azami şekilde faydalanılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan arayüze bir "Command Window" yeteneği kazandırılmış ve uygulanmak istenen değişiklikler için cihaza MATLAB üzerinden erişim imkanı sağlanmıştır. Üç farklı panele sahip uygulama Şekil 3.10'da belirtildiği gibidir.



Şekil 3.10. Uygulama arayüz temel yapısı

Şekil 3.10'da gösterilen uygulama arayüzünün ilk panelinde "Çalıştırılacak Kod" olarak ifade edilen metin girişi kısmında kullanıcıdan standart bir MATLAB editörünü kullanır gibi kod satırlarını girmesi beklenmektedir. Bu kısımda MATLAB üzerinden yapılabilecek bütün işlemler .NET platformu üzerinden C# dili arka planda işletebilecek şekilde uygulamaya kazandırılmıştır. Kullanıcı bu arayüzden tıpkı MATLAB'ı kullandığı şekilde değer atamaları ve işlemler yapabilmektedir. MATLAB programının grafiksel imkanları da bu arayüz üzerinden kullanılabilmektedir. Aynı zamanda bu arayüz MATLAB ile veri edinim cihazının birbiriyle iletişiminin testi amacıyla da kullanılmaktadır.

Uygulamanın ikinci panelinde ise işlemin log kaydı başlığı altında işlemin yapıldığı zaman, sonuçlar başlığı altında ise veri edinim cihazının okuduğu direnç ile ANFIS tarafından bulunan sıcaklık gösterilmektedir.

Uygulamanın üçüncü paneli olan hesaplar başlığı altında "Kalibrasyon İşlemi", "Öğrenme Aşaması", "Direnç Oku" ve "Sıcaklığı Bul" ve "Çıkış" butonları tasarlanmış ve bu butonların arkasına gerekli işlemleri yapabilecek fonksiyonlara ilişkin kod satırları eklenmiştir. Uygulamanın esas önemli kısmı da burasıdır.

İlk sıradaki buton kalibrasyon işlemi için kullanılacaktır. Yılda bir defa SPRT'lerde kalibrasyon işlemi yapılır. Bu butona basıldığında kalibrasyon yapmak amacıyla o SPRT için hesaplanan a ve b katsayılarının ve SPRT'nin SUN değerinin girilmesi beklenmektedir. Kalibrasyon işleminde bütün öğrenme verilerinin tekrar kalibrasyonu

yapılacak SPRT'ler için düzeltilmesi sağlanmış olacaktır. Yani bütün öğrenme verileri tekrar düzeltilebilecektir.

İkinci buton ANFIS'in öğrenme aşaması için kullanılacaktır. Bu işlemde öğrenme amacıyla oluşturulan veriler kullanılmaktadır. Bu işlemlerin ardından öğrenme işlemine başlanılır. Arka plandaki kodlar içerisinde MATLAB ile bağlantıyı bir nesne yardımıyla sağlayan MLApp kütüphanesi kullanılmıştır. Bunun için kütüphanelerin tanımlandığı kısıma "using MLApp" kod satırı yazılmıştır.

Uygulama içerisinde MLApp nesneleri Şekil 3.11'de belirtildiği şekilde oluşturulmuştur.

```
private MLApp.MLApp matlab;
matlab = new MLApp.MLApp();
```

Şekil 3.11. MLApp nesneleri oluşturulması

Yazılan veya buton arkasına gizlenen MATLAB kodlarını koşturmak için Şekil 3.12'de belirtilen fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon kodların koşulacağı MATLAB çalışma dizinini uyarlamaktadır.

```
matlab_Command("cd C:\\Users\\Erbil\\Desktop");
matlab_Command("pwd");
```

Şekil 3.12. MATLAB kodlarını çalıştırma kodları

Üçüncü buton cihaz üzerinden direncin okunması ve sıcaklığın bulunması amacıyla kullanılacaktır. Cihazın MATLAB üzerinden veri okuması için bağlantı yapmasını ve değer okuma işlemlerini sağlamaktadır. Bu kısımda bağlantısı yapılan cihaz ile direnç değerleri ölçülmektedir. Cihazın tek bir direnç değeri okuması için ortalama sürenin kısa olduğu değerlendirilmiş ve bu değer hesaba katılarak 50 değer ölçülmesi istenmektedir. Kod yapısında belirtildiği şekildeki dizin alanında bir "exp.txt" dosyasına bu değerler yazılmaktadır. Daha sonra MATLAB kodu tarafından bu ortama yazılan değerler C# ile yazılan uygulama içerisinde kullanılmakta ve bir ortalama değer bulunmaktadır. Sonraki işlemler için bu ortalama değer kullanılmakta ve doğru sonuçların ölçülmesi sağlanmaktadır. Bu kısımda MATLAB ve C# arasında farklılık gösteren tek kısım hassas değerlerin yazımında ondalık kısım için "," yerine "." kullanılmasıdır. Bu fark C# kodu içerisinde değerlerin mevcut alanları için yeniden

düzenlenmektedir. Cihazın farklı uygulamalarda kullanıma açık olmasını sağlamak için buton arka planında çalışan mevcut kod satırları sonuna işlem yapıldıktan sonra cihaz ile bağlantıyı kesmesi için “disconnect(ictObj);” şeklinde kod satırı eklenmiştir. Bu sayede olması gerektiği gibi cihaz o sırada yalnızca bir uygulamaya hizmet edecek ve karmaşıklığa sebep olmayacaktır. Cihazın bağlantısı yapılmadığı takdirde bu kısım işlem yapmayacaktır.

Son buton ise uygulamadan çıkış için kullanılmaktadır. Uygulama arayüzünden çıkmak için de “Çıkış” butonu altına Şekil 3.13’de gösterilen kodlar yerleştirilip uygulamadan çıkış sağlanabilmektedir.

```
this.Close();
Application.Exit();
```

Şekil 3.13. Uygulamadan çıkış

Uygulama arayüzünde çalıştırılan kodun akış şeması ve tamamı Ek-1’de sunulmuştur.

4. SPRT'LERİN ANFIS İLE GELİŞTİRİLMESİ

4.1. Veri Edinimi Çalışmaları

Bu çalışma aşamasında TÜBİTAK UME Sıcaklık Grubu Laboratuarı'nda sabit noktalarda ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmada öncelikle değişik SPRT'lerin suyun üçlü noktasındaki ölçümleri alınmıştır. Ayrıca Argonun Üçlü Nokta sıcaklık, (83,8058), Galyumun Ergime Nokta (302,9146 K) ve Kalayın Donma Nokta sıcaklığında (692,677 K) arasında ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda ara sıcaklık değerlerine karşılık gelen dirençler Standart platin direnç termometreler (SPRT) için geçerli olan Uluslararası Sıcaklık Ölçeğinde (ITS-90) belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

4.2. Öğrenme Aşamasında Kullanılan Veriler

Yapılan ölçümler ve SPRT'lerde Ara Sıcaklık Değeri Hesaplaması yöntemlerinin kullanılması ile Tablo 4.1'de verilen 10 değişik suyun üçlü noktası değerine sahip SPRT'ler için Ek-2'de sunulan veriler bulunmuştur. Ek-2'de tüm verilerin sunulmuş olması ileride eğitim ve test amacı ile aynı ya da benzer bir uygulama geliştirmeyi amaçlayan araştırmacılara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Tablo 4.1. Farklı SPRT'ler için suyun üçlü noktası değerleri

SPRT	SÜN Değeri
1	25,391082
2	25,587060
3	25,587105
4	25,586961
5	25,587105
6	25,405650
7	25,268210
8	25,268303
9	25,310005
10	25,456273

Bununla birlikte “0-Zn” yani 273,17 K ile 692,677 K sıcaklık aralığında kalibre etmek için Denklem (4.1);

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 \quad (4.1)$$
$$+ d[W(T_{90}) - W(660{,}323°C)]^2$$

formülü kullanılarak “a” ve “b” katsayıları bulunmuştur. Bu kalibrasyonda, suyun üçlü noktası sıcaklığı, kalayın ve çinkonun donma sabit sıcaklık noktaları kullanılır. “a” ve ”b” katsayılarını formülde yerine koyduğumuzda sapmaların da hesaplandığı sıcaklık değerleri bulunmuş olur.

Aynı şekilde “Ar-0” yani 83,8058 K ile 273,16 K aralığında kalibre etmek için Denklem (4.2);

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1])\ln W(T_{90}) \quad (4.2)$$

formülü kullanılarak “a” ve “b” katsayıları bulunur. Bu kalibrasyonda Argon, Civa ve suyun üçlü noktası sabit sıcaklıkları kullanılır. ”a” ve “b” katsayılarını tekrar yerine koyduğumuzda sapmaların da hesaplandığı sıcaklık değerleri bulunmuş olur.

4.3. Verilerin ANFIS Öğrenme Aşamasında Kullanılması

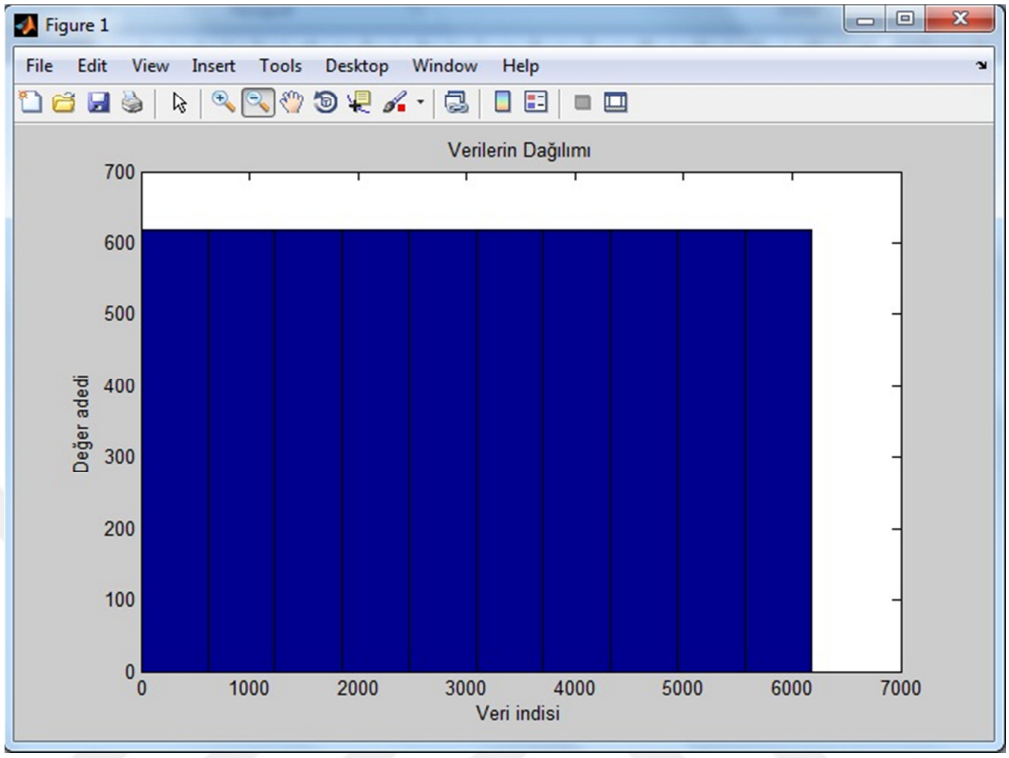
Öncelikle ANFIS’in öğrenme aşamasına geçilebilmesi için MATLAB komutları yazılmıştır. Şekil 4.1’de sunulan MATLAB komutuyla ANFIS’in öğrenme aşaması yapılmıştır.

ANFIS’te üyelik fonksiyonun seçiminde dsigmf, gaussmf, pimf, psigmf, trapmf, trimf, gbellmf üyelik fonksiyonlarının hepsi hem giriş, hem de çıkış üyelik fonksiyonu olarak denenmiştir. En başarılı sonuç veren Gauss eğrisi yerleşik üyelik fonksiyonu (gaussmf) ve genelleştirilmiş çan şeklindeki yerleşik üyelik fonksiyonu (gbellmf) bu programda kullanılmıştır.

```
clc;
clear;
close all;
veris=xlsread('anfis_verixls','sayfa1','a1:c6180');%tümü sırasız
[i,veri]=shuffle(veris);
figure;
hist(i);
if find(diff(sort(i))==0)
   disp('çift üretilmiş değer var...')
   [i,veri]=shuffle(veris);
else disp('SORUN YOK...')
end
x_test = veri(1:2:end,1:2);
y_test = veri(1:2:end,end);
epoch_n = 500;
x = veri(2:2:end,1:2);
y = veri(2:2:end,end);
in_fis = genfis1([x y],4,char('gaussmf','gbellmf'));
%fis = genfis1(data,[3 7],char('pimf','trimf'));
[out_fis,tr] = anfis([x y],in_fis,epoch_n,10);
semilogx(x(:,1),y,'bo',x(:,1),evalfis(x,out_fis),'r*');
grid;
legend('Training Data','ANFIS Output');
y_est=evalfis(x_test,out_fis);
MSE_hata_test = mean(([y_test-y_est]).^2)
MSE_hata_egt = mean(([evalfis(x,out_fis)-y]).^2)
function [j,veri]=shuffle(veris)
indis=1:size(veris,1);
i=1+round(rand*(length(indis)-1));
j=[];
j=[j;i];
indis(i)=0;
veri=[];
veri=[ veri;veris(i,:)];
%veris(i,:)=[]
while find(indis)
   i=1+round(rand*(length(indis)-1));
   if indis(i)~=0
   j=[j;i];
   else
      continue;
   end
   veri=[veri;veris(i,:)];
   % veris(i,:)=[];
   indis(i)=0;
end
```

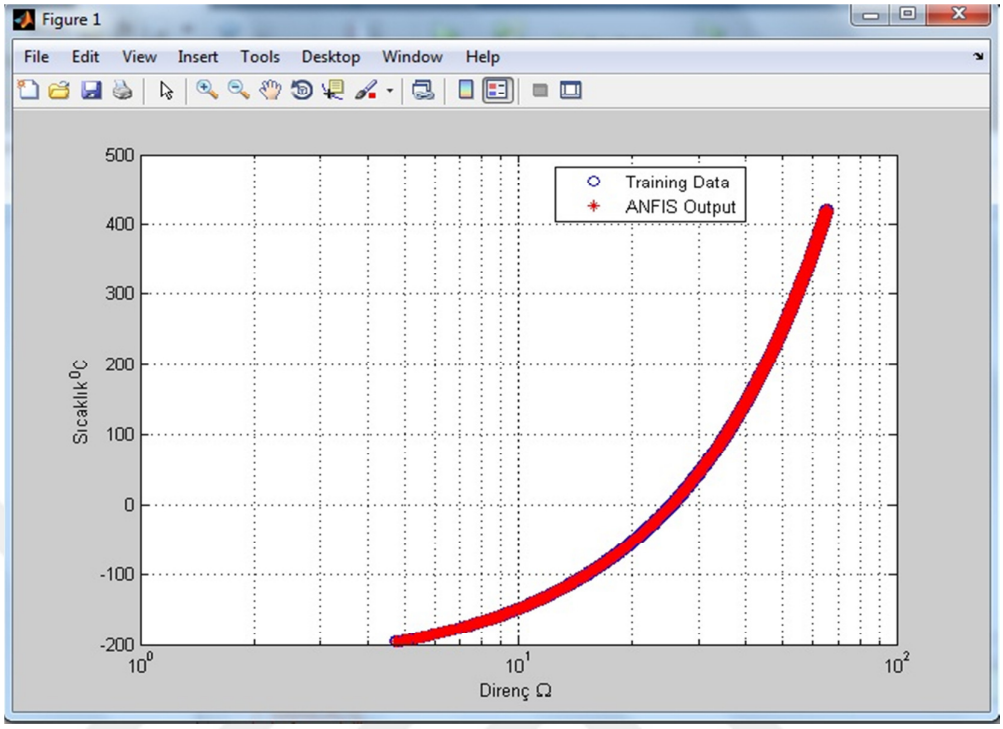
Şekil 4.1. ANFIS öğrenme aşaması kodları

Uygulamanın çalıştırılması ile öncelikle Ek-2'de verilen öğrenme verilerinin yarısı öğrenme amaçlı, yarısı da kontrol amaçlı dağıtılmıştır. Verilerin sırayla sisteme girmesini engellemek için "shuffle" fonksiyonu kullanılarak verilerin rastgele dağıtılması sağlanmıştır. "Shuffle" sonucunda rastgele sırada üretilen verilerin indislerine göre histogramına baktığımızda hepsinin eşit sayıda olduğu Şekil 4.2.'de verildiği gibi görülmüştür.

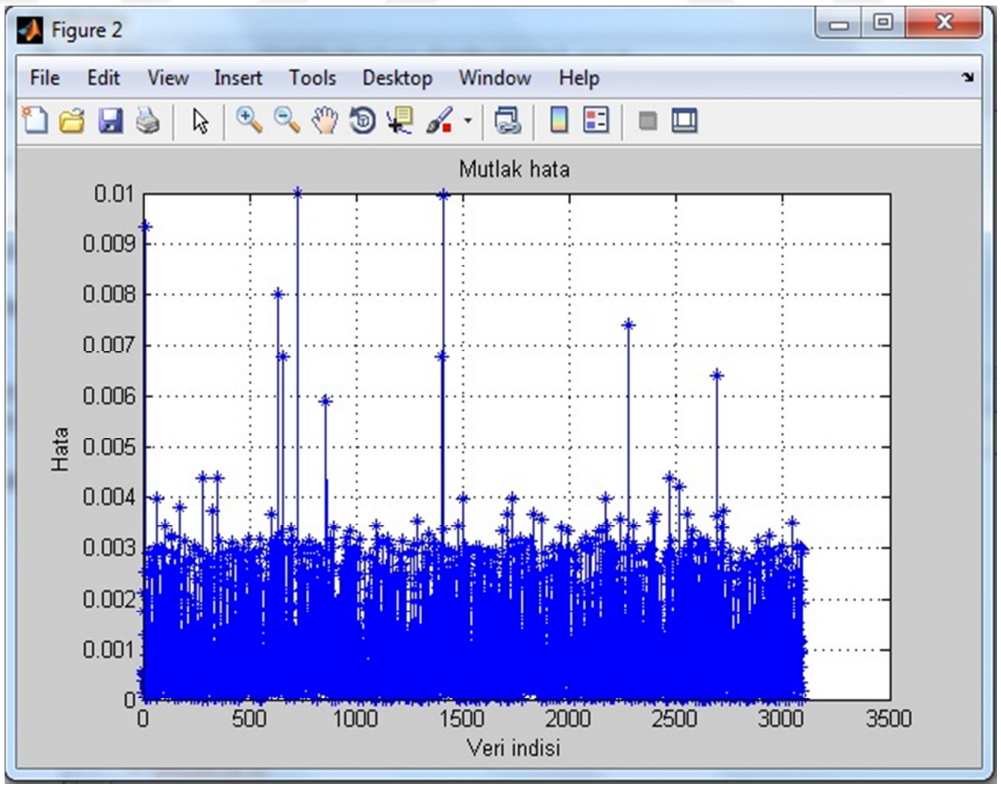


Şekil 4.2. Öğrenme ve kontrol verilerinin dağılımı

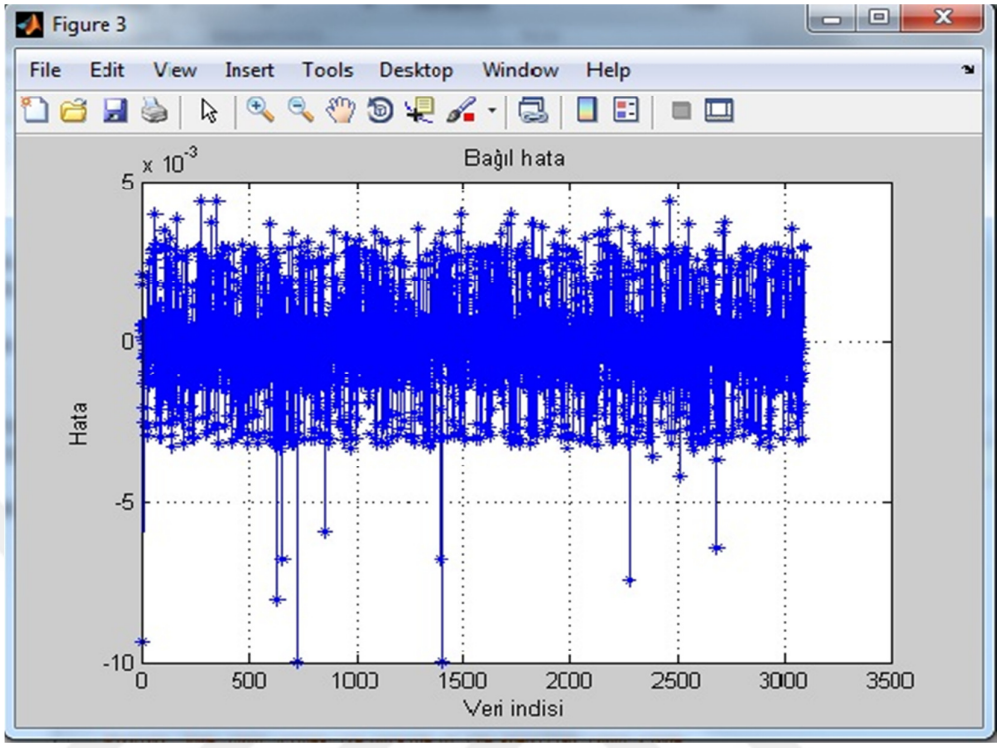
Programın sonucunda öğrenme aşaması çok büyük bir doğrulukla gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlardan eğitilen data ile ANFIS çıkışının karşılaştırılması Şekil 4.3.'de, eğitim verisi için mutlak hatanın gösterimi Şekil 4.4.'de, test verisi için bağıl hatanın gösterimi Şekil 4.5.'de, eğitim verisi için bağıl hatanın gösterimi ise Şekil 4.6.'da sunulmuştur.



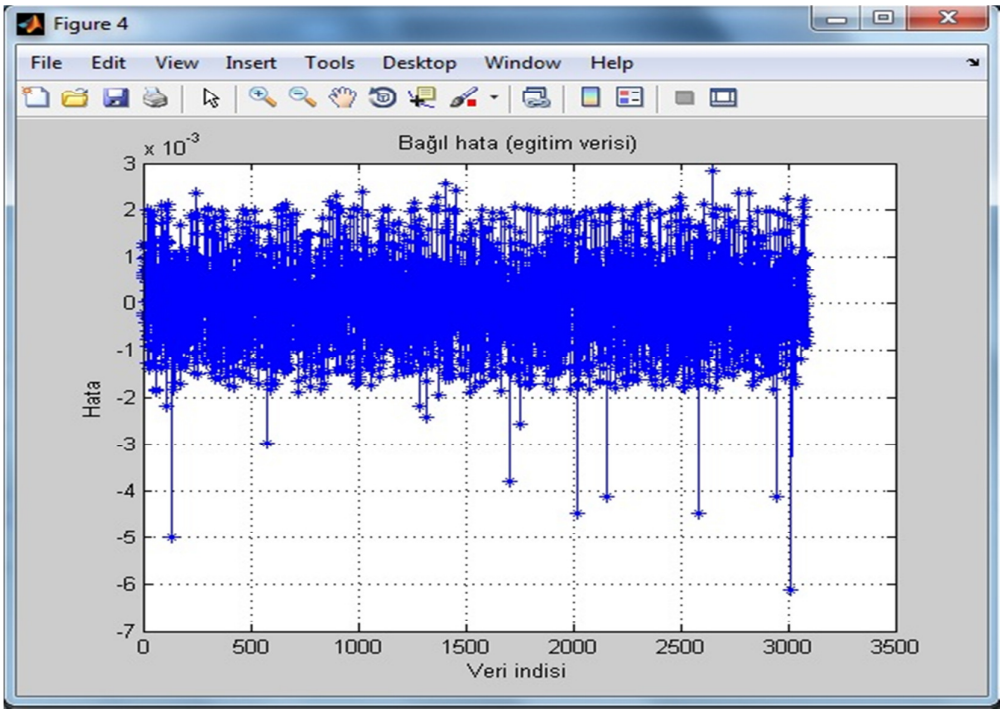
Şekil 4.3. Eğitilen data ile ANFIS çıkışının karşılaştırılması



Şekil 4.4. Eğitim verisi için mutlak hata



Şekil 4.5. Test verisi için bağıl hatanın gösterimi



Şekil 4.6. Eğitim verisi için bağıl hatanın gösterimi

Eğitilen ANFIS modeline ilişkin bilgiler aşağıda sunulmuştur;

Düğüm sayısı : 53

Lineer parametre sayısı : 48

Lineer olmayan parametre sayısı : 20

Toplam parametre sayısı : 68

Eğitilen veri çifti sayısı : 3090

Kontrol edilen veri çifti sayısı : 0

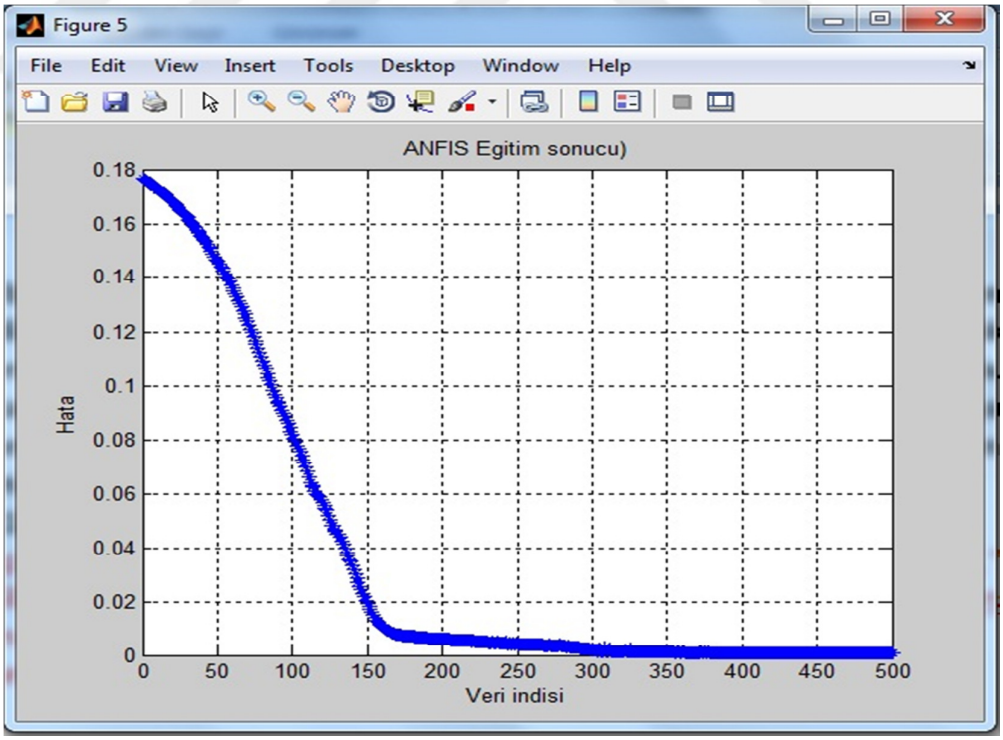
Bulanık çıkartım sistemi kuralları sayısı : 16

Buradan da görüldüğü gibi ANFIS, bulanık çıkartım sistemi 16 adet ihtiyaç duyulan kuralı kendisi üretmiştir. Eğitim sonucunda;

Ortalama Karesel Hata MSE_hata_egt = 8,9820e-007

Ortalama Karesel Hata MSE_hata_test = 9,0488e-007

olarak bulunmuştur. Eğitim sonucunda 500 eğitim epoch sayısı sonucunda eğitimin Ortalama Karesel Hata (OKH) başarımı Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. ANFIS eğitiminde Ortalama Karesel Hata (OKH) sonucu

5. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEMİN TEST EDİLMESİ

Tez kapsamında; ANFIS ile ITS-90'nın geliştirilmesi için TÜBİTAK UME'de kullanılan SPRT'lerde Uyarlamalı Yapay Sinir-Bulanık Çıkartım Sistemi (ANFIS-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) kullanılarak ITS-90 standardının sisteme öğretilmesi sağlanmıştır. Böylece ITS-90'da tanımlanmış ara değerleme hesaplamaları yapılmadan ve Wheatstone köprüsü kullanılmadan, bir veri edinim cihazı ile ölçülen her direnç değerine karşılık gelen sıcaklık değerini yüksek hassasiyette pratik olarak hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir. Dünyada sadece birkaç üreticisi bulunan SPRT için bu araştırma ile birlikte, ülkemizde hassas sıcaklık ölçüm sistemlerinin gelişmesine katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu amaçla bir bilgisayar üzerinde MATLAB® R2014 ve Visual Studio® 2012 kullanarak uygulama yazılımı geliştirilmiş ve MATLAB ile veri edinim cihazının entegrasyonu sağlanmıştır. MATLAB programının eğitim aşaması tamamlanarak sistem, sıcaklık ölçümü yapacak duruma getirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemin doğrululuğunu test edebilmek amacıyla test verilerinin de alındığı TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarı kullanılmıştır.

5.1. TÜBİTAK UME Sıcaklık Laboratuvarında ITS-90'a Göre Yapılan Ölçüm İşlemleri

Birinci derece sıcaklık laboratuvarlarında SPRT'ler ile sıcaklık ölçüm yapabilmek için SPRT'lerin ve diğer ölçüm bileşenlerinin bulunması gerekir. Bu tez kapsamında kullanılan diğer ölçüm bileşenleri; Şekil 5.1'de bir örneği gösterilen sabit noktalar, Şekil 5.2'de resmi gösterilen Wheatstone köprüsü, Şekil 5.3'da gösterilen suyun üçlü noktasının ölçüldüğü ve banyosunun yapıldığı cihazdır. SPRT'lerin kalibre edilecekleri sıcaklık aralıklarına göre sabit noktalar kullanılır. Tez kapsamındaki sıcaklık aralılığındaki ITS-90 sabit nokta sıcaklık değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Galyum bakım banyosu



Şekil 5.2. Wheatstone köprüsü



Şekil 5.3. Suyun üçlü noktası bakım banyosu

Tablo 5.1. ITS-90 sabit nokta sıcaklık değerleri

Sabit Noktalar	**Sıcaklık (°C)**
Argon üçlü nokta sıcaklığı	-189,3442
Civa üçlü nokta sıcaklığı	-38,8344
Suyun üçlü nokta sıcaklığı	0,010
Galyum ergime nokta sıcaklığı	29,7646
İndiyum donma nokta sıcaklığı	156,5985
Kalay donma nokta sıcaklığı	231,928
Çinko donma nokta sıcaklığı	419,527

Kalibrasyona başlamadan önce SPRT'lerin ITS-90 standardına uygun olup olmadıklarına bakılır. Bunun için suyun üçlü noktası sıcaklığındaki direnç değeri ile Galyum sabit noktasındaki direnç değerleri ölçülür. Bu değerler birbirine oranlanarak daha sonra sıcaklık aralığına göre sabit noktalardaki direnç değerleri ölçülür ve direnç değerleri oranlanır.

5.2. Ölçüm İçin Kullanılan SPRT'nin Özellikleri

Ölçüm yapmak amacıyla Fluke marka 5699 tipinde SPRT seçilmiştir. Söz konusu SPRT'nin kalibrasyon sertifikasında belirtilen sabit noktalarda elde edilen direnç oranları belirsizlik değerleriyle birlikte Tablo 5.2'de verilmiştir. Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılımı için yaklaşık %95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.2. Sabit noktalarda ölçülen direnç oranları ve belirsizlik değerleri

t_{90} / °C	W (t_{90})	Belirsizlik / °C
419,527	2,5685870	0,005
231,928	1,8926007	0,005
29,7646	1,1181124	0,003
- 38,8344	0,8441697	0,003
-189,3442	0,2160338	0,005

İlgili kalibrasyon aralığı için 0,01 °C ile 419,527 °C arasında Uluslar arası Sıcaklık Ölçeği ITS-90 tarafından tanımlanmış olan denklem aşağıdaki gibidir;

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]\ln W(T_{90}) \quad (5.1)$$

SPRT'nin kalibrasyon sertifikasında belirtilen -189,3442 °C ile 0,01 °C sıcaklık aralığı için elde edilen kalibrasyon katsayıları Tablo 5.3'de yer almaktadır.

Tablo 5.3. ITS-90'a göre -189,3442 °C ile 0,01 °C aralığı için elde edilen kalibrasyon katsayıları

Katsayı	
a_5	$-1{,}714633 \times 10^{-04}$
b_5	$3{,}298843 \times 10^{-05}$

İlgili kalibrasyon aralığının 0,01 °C ile 419,527 °C arasında Uluslararası Sıcaklık Ölçeği ITS-90 tarafından tanımlanmış olan denklemi aşağıdaki gibidir;

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 \quad (5.2)$$

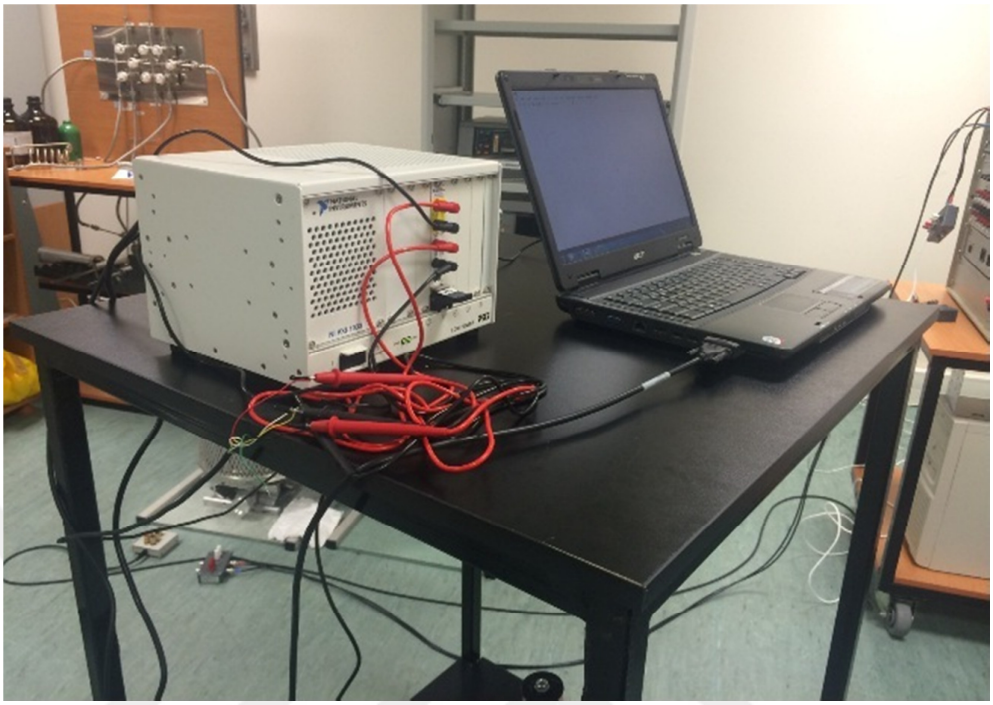
Uluslar arası sıcaklık ölçeği ITS-90'a göre tanımlanan kalibrasyon katsayıları Tablo 5.4'de yer almaktadır.

Tablo 5.4. ITS-90'a göre 0,01 °C ile 419,527 °C aralığı için elde edilen kalibrasyon katsayıları

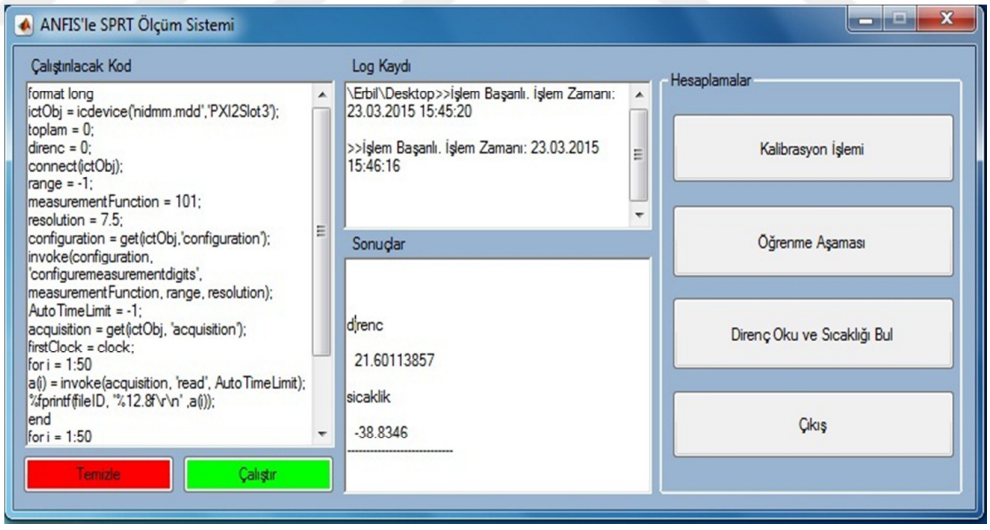
Katsayı	
a_8	$- 2{,}340012 \times 10^{-04}$
b_8	$1{,}493484 \times 10^{-05}$

5.3. Gerçekleştirilen Sistem İle Yapılan Ölçüm İşlemleri

TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarında Şekil 5.4'deki resimde gösterildiği şekilde tez kapsamında oluşturulan sistem kurulmuş ve ölçüm yapmaya hazır hale getirilmiştir. Öncelikle seçilen Fluke 5699 tipindeki SPRT'nin suyun üçlü noktası ölçüm cihazında SÜN değeri bulunmuştur. Daha sonra hem bu SÜN değeri hem de kalibrasyon katsayıları kullanılarak öğrenme verisi düzenlenmiştir. Bu amaçla; Şekil 5.5'te resmi verilen geliştirilen yazılımın "Kalibrasyon İşlemleri" butonu kullanılarak SPRT'nin SÜN değeri ile -189,3442 °C - 0,01 °C sıcaklı aralığı için Tablo 5.3, 0,01 °C - 419,527 °C sıcaklık aralığı için Tablo 5.4'de verilen katsayılar girilmiş ve daha önce hazırlanan öğrenme verileri yazılım vasıtasıyla otomatik olarak düzenlenmiştir. Normalde her bir SPRT için kalibrasyon işlemi yılda bir defa yapılmaktadır.



Şekil 5.4. Bilgisayar ve veri edinim cihazının SPRT ile bağlantısı



Şekil 5.5. Gerçekleştirilen arayüz yazılımı

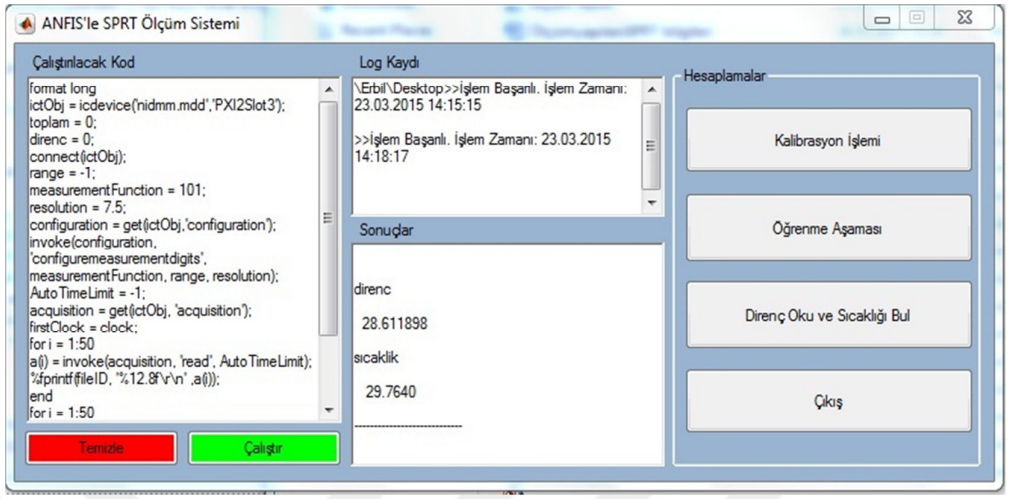
Seçilen SPRT için eğitim verilerinin kalibrasyonunun tamamlanmasına müteakip gerçekleştirilen sistemin eğitim aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla Şekil 5.5'de gösterilen yazılımın "Öğrenme Aşaması" butonu tıklanarak ANFIS'de eğitim aşaması tamamlanmıştır. Eğitim aşamasından sonra tez kapsamında geliştirilen sistemin doğrululuğunu test etme işlemine geçilmiştir. Bu amaçla civa, galyum ve kalayın sabit noktalarında Şekil 5.6'da gösterildiği şekilde ölçümler yapılmıştır.

Öncelikle SPRT, civanın üçlü nokta sıcaklık aracına daldırılarak stabil hale gelmesi beklenir. Daha sonra Şekil 5.5'de gösterilen arayüz yazılımının "Direnç Oku ve Sıcaklık Bul" tuşuna basılarak öncelikle direnç değeri, hemen arkasından sıcaklık değeri yazılım aracılığıyla bulunur. Heman ardından UME Sıcaklık Laboratuvarındaki sistem üzerinden ölçüm yapılarak sonuçlar tablo haline getirilmek üzere kayıt edilmiştiştir. Bu ölçümler diğer referans ölçüm işlemlerinde de tekrarlanmıştır.

Daha sonra galyumun ergime nokta sıcaklığı için galyum sabit noktasına SPRT daldırılıp, Şekil 5.7'de resmi verilen yazılımın arayüzünün "Direnç Oku ve Sıcaklık Bul" tuşuna basılır. Geliştirilen yazılım SPRT üzerinden direnç değerlerini okur. Yazılımda daha önce öğrenme aşaması gerçekleştirildiği için okunan direnç değeri sayesinde sıcaklık değeri bulunur.

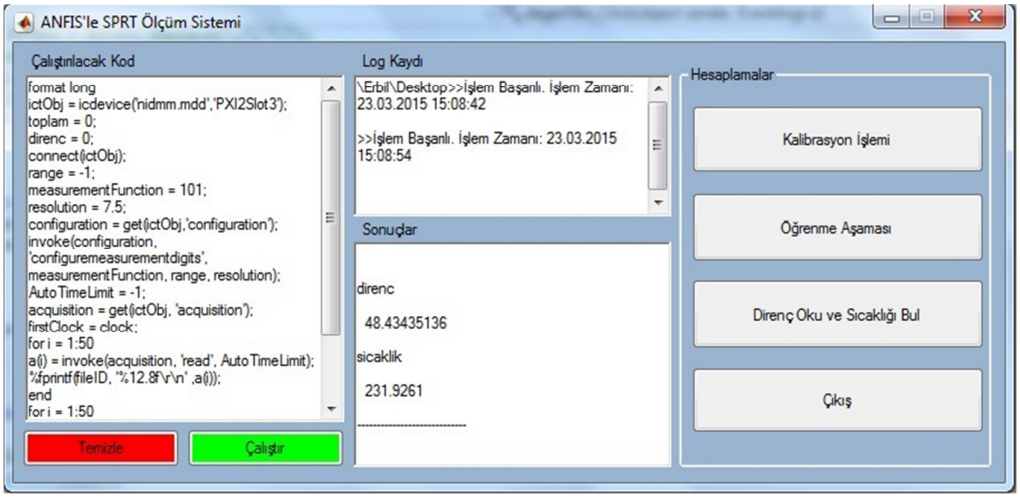


Şekil 5.6. TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarındaki ölçüm işlemleri



Şekil 5.7. Galyumun ergime noktasında direnç ve sıcaklık ölçümü

Son olarak da kalayın donma noktasında ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonucunda yazılımın arayüzünde "Direnç Oku ve Sıcaklık Bul" tuşuna basılarak Şekil 5.8'de resmi verilen sonuçlar bölümünde gösterildiği şekilde öncelikle direnç değeri, hemen arkasından sıcaklık değeri bulunur. Bu sonuçlar bulunurken sabit noktalarda SPRT'nin biraz bekletilmesi ve kararlılığın sağlanmasından sonra ölçüm yapılması gerekir. Ölçüm doğrululuğunun sağlanması için geliştirilen yazılım sayesinde bir ölçüm periyodunda 50 tane anlık ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Burada 50 ölçüm seçilmesinin sebebi ise sistemde ölçüm sırasında ortaya çıkabilecek olumsuz ani değişim etkilerini ortadan kaldırmak amacı ile yapılmıştır.



Şekil 5.8. Kalayın donma noktasında direnç ve sıcaklık ölçümü

Referans hassasiyeti %99,999868 ve SÜN değeri 25,58889 Ohm olan SPRT ile yapılan ölçümler sonucunda; sabit noktalarda civa, galyum ve kalayın referans direnç ve sıcaklıklarıyla ölçüm sonucunda bulunan direnç ve sıcaklık değerleri Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5'de görüldüğü üzere yapılan ölçümlerde doğruluk ve hassasiyet beklenen şekildedir. Tezin başlangıcında hedeflenen 10 mK'den daha düşük hata ile sonuç bulma işlemi böylelikle sağlanmıştır. Bununla birlikte sıcaklık arttıkça doğrululuğun ve hassasiyetinin az da olsa azaldığı görülmektedir.

Tablo 5.5. SPRT'nin referans ve ölçüm değerleri ile aralarındaki fark

Sabit Noktalar	**Rref**	**Ranfis**	**Rfark (mOhm)**	**Cref**	**Canfis**	**Cfark (mK)**
Civa-Hg Üçlü Nokta Sıcaklığı (-38,8344 °C)	21,60115455	21,60113857	0,01598	-38,8344	-38,8346	0,2
Galyum-Ga Ergime Nokta Sıcaklığı (29,7646 °C)	28,61047568	28,61189800	1,42232	29,7646	29,7640	0,6
Kalay-Sn Donma Nokta Sıcaklığı (231,928 °C)	48,42994000	48,43435136	4,41136	231,9280	231,9261	1,9

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Uluslararası ölçüm komitesi tarafından 1990 yılında uluslararası sıcaklık ölçeği (ITS-90) oluşturulmuştur. ITS-90, maddelerin değişmeyen fiziksel özelliklerinden (ergime / donma / üçlü hal sabit sıcaklık nokta değerleri) yararlanılarak oluşturulmuştur. Uluslararası bu sıcaklık standardında aradeğerleme (interpolasyon) aracı olarak Standart Platin Direnç Termometreleri (SPRT) ve sıcaklık ölçeği için özel olarak tanımlanmış fonksiyonlar kullanılmaktadır.

Ülkemizdeki her türlü ölçüm birim sistemine ait fiziksel büyüklükleri en hassas şekilde oluşturmak ve ülke içerisine bu sistemin dağılımını sağlamakla görevlendirilmiş olan TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) kurumudur. UME'de ITS-90 da tanımlı sabit sıcaklık nokta değerlerinin elde edilmesine yönelik, her türlü alt yapı ihtiyacı kurulmuş ve çok çeşitli sabit sıcaklık nokta hücreleri yapılmıştır. Ancak ölçeğe ait ara değerlerin oluşturulması için kullanımı zorunlu olan standart platin direnç termometreleri dünyadaki diğer birçok metroloji enstitüsünde olduğu gibi halen yurt dışından temin edilmektedir.

1990 yılından beri kullanılan ITS-90 ile ilgili ölçüm sisteminin teknolojik imkanlar dahilinde önümüzde geliştirilme fırsatı vardır. Özellikle son zamanlarda gelişen yumuşak hesaplama algoritmaları bu amaçla kullanılabilir. Yazılım dünyasında eskiden süre gelen yöntemlerin başında kesin verilerin kullanıldığı analitik hesaplama gelmekteydi. Ancak, kesin veri olmayan durumlarda da bazı konularda doğru sonuca ulaşabilme ihtiyacı görüldü. Günlük hayatta sıklıkla karşılaştığımız problemler için genel geçerliliği olan basit matematiksel formül bulmanın çoğu zaman mümkün olmaması nedeniyle yumuşak hesaplama yöntemleri gelişti.

Yumuşak hesaplama genel olarak analitik modeller ile yorumlanması güç olan çok değişkenli ve çok parametreli sayısal yapıların analizinde kullanılmaktadır. Şüphe ve belirsizlik ortamlarında, yumuşak hesaplama algoritmaları ile insan beyninin sorgulama ve öğrenme yeteneği taklit edilmektedir. Yumuşak hesaplama algoritmaları ile insan beyninin inanılmaz özellikleri sınırlı düzeyde taklit edilerek, probleme etkisi olan tüm parametrelerin sağlıklı değerlendirilmesi ile başarılı ve düşük maliyetli çözümler elde edilmektedir. Bilgisayarlardaki işlem gücü artarken

işlem maliyetlerinin de azalması oldukça yoğun bir işlem gücü gerektiren bu yaklaşımı giderek daha cazip hale getirmektedir.

Bu çalışmada yumuşak hesaplama algoritmalarından biri olan uyarlamalı yapay sinir-bulanık çıkartım sistemi (ANFIS- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), Standart Platin Direnç Termometreleri (SPRT)'nin geliştirilmesine yönelik ekonomik katkı sağlayacak bir model için kullanılmıştır. ANFIS, bulanık çıkartım sistemi ve eğiticili öğrenme algoritmasına sahip ileri beslemeli yapay sinir ağlarının uyarlamalı bir modelidir. Uyarlamalı model, işlem birimlerini ve bu birimlerin bağlantılarını içeren bir yapay sinir ağı katmanına sahiptir. İşlem birimleri, ağırlıklara sahip olup bir öğrenme algoritmasının öngördüğü hata değerini minimize etmek için bu ağırlıkların nasıl değiştirileceği belli olan uyarlamalı bir yapıdadır. ANFIS modelinde, dereceli azalma (gradient descent) ve/veya zincir kuralı esas alınarak melez (hybrid) öğrenme ile çalışmalar gerçekleştirilir.

Tez çalışmasında; UME'de yapılan SPRT'lerde uyarlamalı yapay sinir-bulanık çıkartım sistemi (ANFIS- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) kullanılarak ITS-90 standardının sisteme öğretilmesi sağlanmıştır. Bunun için öncelikle TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarında ölçümler yapılmış, ölçüm ve hesaplamalar sonucunda hem eğitim hem de test işlemi için kullanılacak veriler elde edilmiştir. Böylece ITS-90 da tanımlanmış ara değerleme hesaplamaları yapılmadan, ölçülen her direnç değerine karşılık gelen sıcaklık değerini pratik olarak hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılıma yılda bir defa yapılan SPRT kalibrasyonları da dahil edilmiştir.

Bununla birlikte tez kapsamında geliştirilen sistemde; maliyeti oldukça pahalı olan Wheatstone köprüsü yerine maliyeti oldukça daha ucuz olan National Instruments NI PXI-1033 veri edinim cihazı olarak kullanılmıştır.

TÜBİTAK UME sıcaklık laboratuarında geliştirilen sistemin kontrolü için yapılan ölçümlerde -189,3442 °C ile 419,527 °C sıcaklık aralığını kapsayacak, 2 mK'den daha düşük doğrulukta ölçüm yapabilecek sıcaklık ölçüm sisteminin gerçekleştirildiği görülmüştür.

Geliştirilen sistemin; 1990 yılından beri kullanılan ITS-90 standardının geliştirilmesine katkı sağlanacağı, ölçüm sırasında ayrıca bir hesaplamaya gerek duyulmayacağı, sistemin maliyetinin oldukça düşeceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak;

- Bugüne kadar ülkemizde bu tez çalışmasında sunulan şekli ile herhangi bir çalışmanın yapılmadığı platin direnç termometrelerinin geliştirilmesine katkı sağlanmış,
- Uyarlamalı yapay sinir-bulanık çıkartım sistemi ilk defa platin esaslı direnç termometrelerin ara değerleme işleminde kullanılmış,
- Sıcaklık ölçüm sisteminde düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli sistem tasarlanmış,
- ANFIS modeli ile ara değerleme yaparak, modelin ölçüm dünyasında kullanımının önü açılmış,
- Geliştirilen sistem ile daha önce yapılan hesaplamalar her seferinde kullanılmadan sonucun bulunması sağlanmıştır.

Önümüzdeki dönemde; TÜBİTAK UME'de ölçümler yapılarak öğrenme verilerinin ITS-90 standardındaki sıcaklık aralılığının tamamını kapsayacak şekilde elde edilmesi ve sisteme uygulanmasının yapılan çalışmaya katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca geliştirilen sistemin bir ölçüm cihazına dönüştürülmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Lee H. H., Iosif I., Shinder I., Wright J., Moldover M., Application of ANFIS Method to the Non-nulling Calibration of Multi-hole Pitot Tube, *Procedia Engineering,* 2014, **79**, 125-132.

[2] Wu B. F., Jen C. L., Chang K. C., Neural Fuzzy Based Indoor Localization by Kalman Filtering with Propagation Channel Modeling, *Systems, Man and Cybernetics*, 2007, **1**, 812-817.

[3] Basterretxea K., Tarela J. M., An Experimental Study on Nonlinear Function Computation for Neural/Fuzzy Hardware Design, *IEEE Transactions on Neural Networks,* 2007, **18**(1), 266-283.

[4] Jang J. S. R., Gulley N., Gain Scheduling Based Fuzzy Controller Design, *Proceedings of the First International Joint Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society Biannual Conference, The Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference, and the NASA Joint Technology*, DOI: 10.1109/IJCF.1994.375142.

[5] Cai C. H., Du D., Liu Z. Y., Battery State-of-Charge (SOC) Estimation Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), *FUZZ '03. The 12th IEEE International Conference on,* 2003, **2,** 1068-1073.

[6] Ahmed A. A. M., Shah S. M. A., Application of Adaptive Neuro-Fuzzy İnference System (ANFIS) to Estimate the Biochemical Oxygen Demand (BOD) of Surma River, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences,* DOI:10.1016/j.jksues.2015.02.001.

[7] Castro J. R., Castillo O., Melin P., Rodríguez-Díaz A., A Hybrid Learning Algorithm for a Class of Interval Type-2 Fuzzy Neural Networks, *Information Sciences,* 2009, **179**(13), 2175-2193.

[8] Qiaoa J., Wang H., A Self-Organizing Fuzzy Neural Network and Its Applications to Function Approximation and Forecast Modeling, *Neurocomputing,* 2008, **71**, 564–569.

[9] Ma L., Wahab A., Ng G. S., Erdoğan S., An Experimental Study of the Extended NRBF Regression Model and Its Enhancement for Classification Problem, *Neurocomputing,* 2008, **72**, 458–470.

[10] Yu W., Li X., Online Fuzzy Modeling Via Clustering and Support Vector Machines, *Information Sciences,* 2008, **178**(22), 4264–4279.

[11] Yu W., Li X., Online Fuzzy Modeling with Structure and Parameter Learning, *Expert Systems with Applications,* 2009, **36**(4), 7484-7492.

[12] Şişman-Yılmaz N. A., Alpaslan F. N., Jain L., ANFIS Unfolded in Time for Multivariate Time Series Forecasting, *Neurocomputing,* 2004, **61**, 139-168.

[13] Buragohain M., Mahanta C., A Novel Approach For ANFIS Modelling Based On Full Factorial Design, *Applied Soft Computing,* 2008, **8**(1), 609–625.

[14] Valenzuela O., Rojas I., Rojas F., Pomares H., Herrera L. J., Guillen A., Marquez L., Pasadas M., Hybridization Of Intelligent Techniques and ARIMA Models for Time Series Prediction, *Fuzzy Sets and Systems,* 2008, **159**(7), 821-845.

[15] Rojas I., Valenzuela O., Rojas F., Guillen A., Herrera L. J., Pomares H., Marquez L., Pasadas M., Soft-Computing Techniques and ARMA Model for Time Series Prediction, *Neurocomputing,* 2008, **71**(4-6), 519–537.

[16] Kholghi M., Hosseini S. M., Comparison of Groundwater Level Estimation Using Neuro-fuzzy and Ordinary Kriging, *Environmental Modeling & Assessment,* 2009, **14**(6), 729-737.

[17] Ozkan C., Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Based Local Ordinary Kriging Algorithm for Scattered Data Interpolation, *Survey Review,* 2009, **41**(314), 395-407.

[18] Erginel N., Modeling And Analysis Of Packing Properties Through a Fuzzy Inference System, *Journal of Intelligent Manufacturing,* 2010, **21**(6), 869-874.

[19] Dimirovski G. M., Complexity Versus Integrity Solution in Adaptive Fuzzy-Neural Inference Models, *International Journal of Intelligent Systems, Spare Parts Classification and Demand Forecasting for Stock Control: Investigating The Gap Between Research And Practice*, 2008, **23**(5), 556-573.

[20] Bodyanskiya Y. V., Kulishova N. Y., Memory-Based Neuro-Fuzzy System for Interpolation of Reflection Coefficients of Printing Inks, *Cybernetics and Systems Analysis,* 2008, **44**(5), 625-632.

[21] Wang H., Modeling of Magnetorheological Damper Using Neuro-Fuzzy System, *Fuzzy Information and Engineering,* 2009, **2**, 1157–1164.

[22] Bacchetti A., Saccani N., Spare Parts Classification and Demand Forecasting for Stock Control: Investigating the Gap Between Research and Practice, *Omega,* 2012, **40**(6), 722-737.

[23] Liu H. C., Liu L., Liu N., Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review, *Expert Systems with Applications,* 2013, **40**(2), 828-838.

[24] Yin X. F., Khoo L. P., Chong Y. T., A Fuzzy C-Means Based Hybrid Evolutionary Approach to the Clustering of Supply Chain, *Computers & Industrial Engineering,* 2013, **66**(4), 768-780.

[25] Preston-Thomas H., The International Temperature Scale of 1990c (ITS-90), *Metrologia,* 1990, **27**, 3-10.

[26] Chields P. R. N., Çeviri: Yalçın C., *Sıcaklık Ölçme Yöntemleri*, Bileşim Yayıncılık, İstanbul, 125-126, 2005.

[27] Isotech, Databook1, http://www.isotech.info/pdfs/databook1.pdf, [Ziyaret tarihi: 15 Haziran 2014).

[28] Tischler M., Platinum Resistance Thermometry: The Conceptual Difference Between Calibration Uncertainty and Measurement Uncertainty, *Metrologia*, 2006, **43**, 45–46.

[29] ASTM E 1137/E 1137M–08, Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers, *ASTM International*, West Conshohocken, 2014.

[30] Childs P. R. N., *Practical Temperature Measurement*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.

[31] Van der Wal C. W, Struik L .C. E., A Direct-Reading Bridge for a Platinum Resistance Thermometer, *Journal of Physics E: Scientific Instruments,* 1969, **2**(2).

[32] Bloembergen P., On the Propagation of the Uncertainty at the Triple Point of Water, Associated with the Calibration of SPRTs According to the ITS-90: A Case Study, *Metrologia,* 1996, **32**, 253-257.

[33] Meyer C. W., Ripple D. C., Determination of the Uncertainties for ITS-90 Realization by SPRTs Between Fixed Points, *Metrologia*, 2006, **43**, 327–340.

[34] Mangum B. W., Furukawa G. T., Meyer C. W., Strouse G. F., Tew W. L., Realization of the ITS-90 at the National Institute of Standards and Technology, *TEMPMEKO: 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science,* 1996, **5**, 33-38.

[35] Mangum B. W., Furukawa G. T., Kreider K. G., Meyer C. W., Ripple D. C., Strouse G. F., Tew W.L., Moldover M. R., Carol Johnson B., Yoon H. W., Gibson C. E., Saunders R. D., The Kelvin and Temperature Measurements, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology,* 2001, **1**, 106.

[36] Tew W. L., Strause G. F., *Standard Platinum Resistance Thermometers, 13.8033 K to 429.7485 K*, NIST Special Publication, Maryland, 2001.

[37] Zhiru K., Jingbo L., Zhenguo L., An Extrapolation Formula for the Standard Platinum Resistance Thermometer in the Temperature Range 419,527 °C to 660,323 °C, *Metrologia,*1996, **33**, 427-431.

[38] Zhiru K., Jingbo L., Xiaoting L., Study of the ITS-90 Non-uniqueness for the Standard Platinum Resistance Thermometer in the Sub-range 0°C to 419.527 °C, *Metrologia*, 2002, **39**, 127-133.

[39] Strouse G. F., *Standard Platinum Resistance Thermometer Calibrations from the Ar TP to the Ag FP*, NIST Special Puplication, Maryland, 2008.

[40] White D. R., Strouse G. F., Observations on Sub-range Inconsistency in the SPRT Interpolations of ITS-90, *Metrologia*, 2009, **46**, 101–108.

[41] Lira I., Camarano D., Paredes V. J., Santiago F., Expression of the Uncertainty of Measurement in the Calibration of Thermometers, Part I: Standard Platinum Resistance Thermometers, *Metrologia*, 1999, **36**, 107-111.

[42] Fernicola V. C., Iacomini L., Approximating the ITS-90 Temperature Scale with Industrial Platinum Resistance Thermometers, *Int. J. Thermophys*, 2008, **29**(5), 1817–1827.

[43] IEC 60751:2008, Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors, *International Electrotechnical Commission*, 2008.

[44] ASTM E644-11, Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers, *ASTM International*, West Conshohocken, 2011.

[45] 5608/5609 Platinum Resistance Thermometer User's Guide, *Fluke Hart Scientific*, USA, 2005.

[46] Supplementary Information for the ITS-90, Monograph, BIPM, http://www.bipm.org/en/about-us/, (Ziyaret tarihi : 29 Ekim 2013).

[47] Ancsin J., Oxidation of Platinum Resistance Thermometers, *AIP*, 2003, **7**, 345-349

[48] Sandwell D. T., Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data, *Geophysical Research Letters*, 1987, **14**(2), 139-142.

[49] Sağıroğlu Ş., Erler M., Beşdok E., *Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları I: Yapay Sinir Ağları*, Ufuk Kitabevi, Kayseri, 2003.

[50] Öztemel E., *Yapay Sinir Ağları*, Papatya, Istanbul, 2006.

[51] Elmas Ç., *Yapay Zeka Uygulamaları*, *Yapay Sinir Ağları–Bulanık Mantık–Genetik Algoritma*, Seçkin Yayinevi, Ankara, 2012.

[52] Şen Z., *Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme*, Su Vakfı, İstanbul, 2009.

[53] Shukla A., Tiwari R., Kala R., *Real Life Applications of Soft Computing.,* CRC Press, Boca Raton FL, 2010.

[54] Shleeg A. A., Ellabib I. M., Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Interference Systems for the Breast Cancer Risk, *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2013, **7**(10).

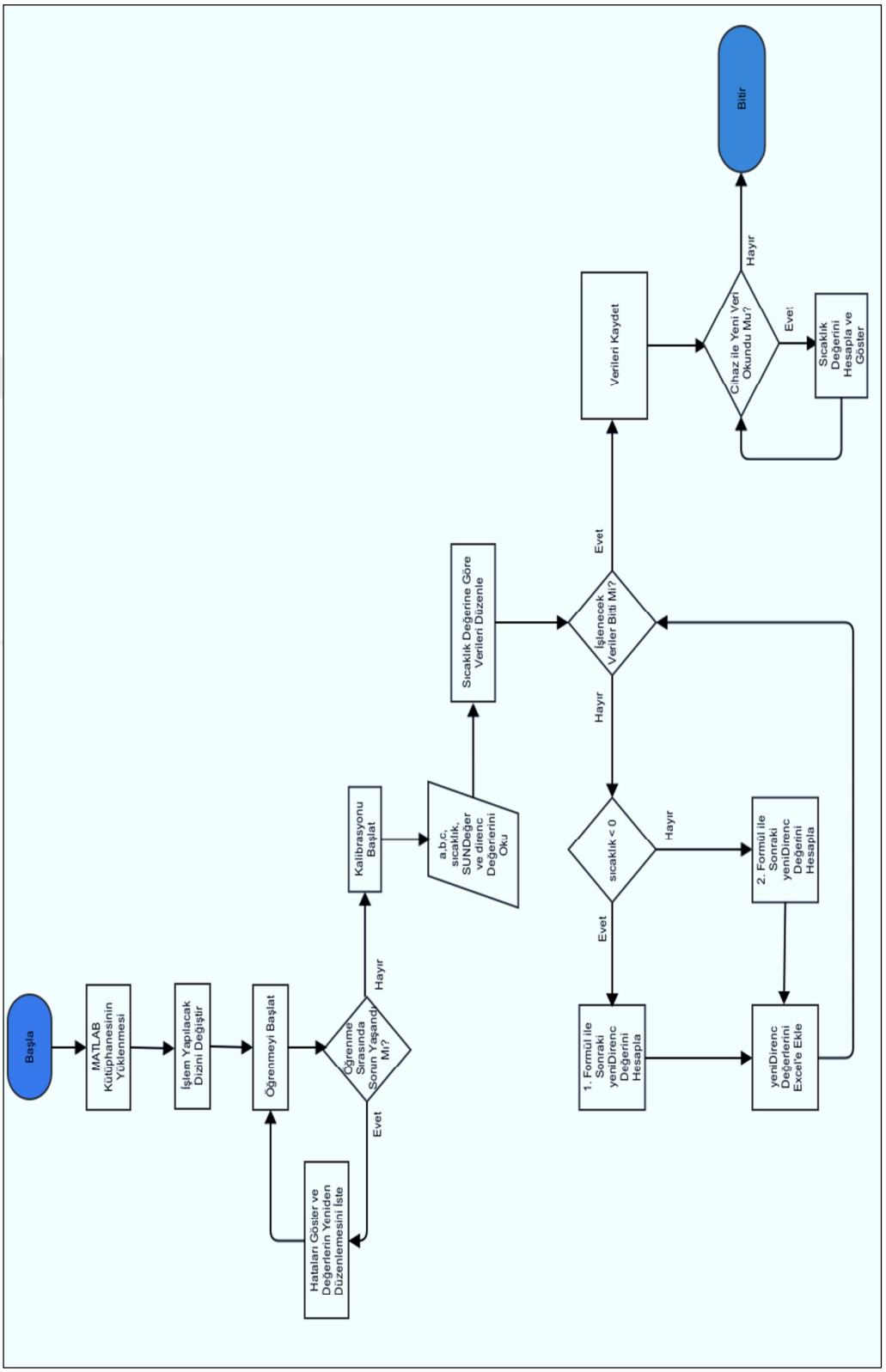
[55] Özçalık H. R., Uygur A. F., Dinamik Sistemlerin Uyumlu Sinirsel-Bulanık Ağ Yapısına Dayalı Etkin Modellenmesi, *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2003, **6**(1), 36-44.

[56] Jang J. S. R., Sun C. T., Mizutani E., *Neuro Fuzzy and Soft Computing a Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, New Jersey, 1997.

[57] Jang J. S. R., ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, *Systems, Man and Cybernetics*, 1993, **23**(3), 665–685.

EKLER

Ek-A Geliştirilen Uygulamanın Akış Şeması ve Kodları



```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Diagnostics;
using System.IO;
using MLApp;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;
namespace MATLABToCSharp
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private MLApp.MLApp matlab;
        public double sunDeger;
        //private Stopwatch stopwatch;
        private String matlab_Command(String cmd)
        {
            //stopwatch.Start();
            String ans = matlab.Execute(cmd);
            //stopwatch.Stop();
            matlabLog.AppendText("-----------------------------");
            matlabLog.AppendText("\n Yeni işlem - " + DateTime.Now.ToString() +
"\n\n");
            //stopwatch.Reset();
            //matlabLog.AppendText(cmd + "\n");
            matlabLog.AppendText("\n" + ans);
            //matlabLog.AppendText("\n" + stopwatch.ElapsedMilliseconds.ToString() +
"ms sürdü.\n");
            matlabLog.AppendText("-----------------------------");
            return ans;
        }
        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            //autoScrool.AppendText("Creating MATLAB object...\n");
            matlab = new MLApp.MLApp();
            //autoScrool.AppendText("MATLAB object created.\n");
            //autoScrool.AppendText("Creating Stopwatch object...\n");
            //stopwatch = new Stopwatch();
            //autoScrool.AppendText("Stopwatch object created.\n");
            autoScrool.AppendText("Changing MATLAB working dir to
C:\\Users\\Erbil\\Desktop");
            matlab_Command("cd C:\\Users\\Erbil\\Desktop");
            matlab_Command("pwd");
        }
        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
```

```
        {
            tbIslem.Text = String.Empty;
        }
        private void Calıstır_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            try
            {
                string a = tbIslemVisibleFalse.Text;
                matlab_Command(a);
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarılı. İşlem Zamanı:
"+DateTime.Now.ToString()+"\n\n");
            }
            catch
            {
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarısız. İşlem Zamanı:
"+DateTime.Now.ToString()+"\n\n");
            }
        }
        private void matlabLog_TextChanged(object sender, EventArgs e)
        {
            ((RichTextBox)sender).ScrollToCaret();
        }
        private void autoScrool_TextChanged(object sender, EventArgs e)
        {
            ((RichTextBox)sender).ScrollToCaret();
        }
        private void degerOku_Click(object sender, EventArgs e)
        {
           string cihazdanOku = File.ReadAllText(Path.GetFullPath(@"cihaz.txt"));
           //if (direnc.Contains(","))
           //direnc = direnc.Replace(",", ".");
           matlab_Command(cihazdanOku);
            string ab = File.ReadAllText(Path.GetFullPath(@"sunDeger.txt"));
            if (ab.Contains(","))
                ab = ab.Replace(",", ".");
            try
            {
                string a = "sicaklik = evalfis([direnc; " + ab + "], out_fis); disp(sicaklik)";
                matlab_Command(a);
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarılı. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
            }
            catch
            {
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarısız. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
            }
        }
        private void cikis_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            this.Close();
            Application.Exit();
        }
        private void ogrenmeBaslat_Click(object sender, EventArgs e)
```

```
        {
            try
            {
                string a = File.ReadAllText(Path.GetFullPath(@"tez1.txt"));
                matlab_Command(a);
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarılı. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
                degerOku.Enabled = true;
            }
            catch
            {
                autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarısız. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
            }
        }
        private void kalibrasyonBaslat_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            string a = null;
            string b = null;
            string c = null;
            string d = null;
            string bayrak = null;
            string[] formulDegerler = null;
            degerGir Form2 = new degerGir();    //taking a and b values!
            if (Form2.ShowDialog(this) == DialogResult.OK)
            {
                a = Form2.Parameter1;
                b = Form2.Parameter2;
                c = Form2.Parameter3;
            }
            if (a != "" || b != "" || c != "")  //a ve b değerleri girilmmemiş ise işlem yapma!
            {
                System.IO.File.WriteAllText(@"sunDeger.txt", Form2.Parameter3);
                double WrT90 = 0;
                double Wt90 = 0;
                List<Double> direnc = new List<double>();  //aslında 6180 row
                List<Double> SUNDeger = new List<double>();
                List<Double> sicaklik = new List<double>();
                double yeniDirenc = 0;
                Excel.ApplicationClass excelApp = null;
                Excel.Workbook myWorkBook = null;
                Excel.Worksheet mySheet = null;
                excelApp = new Excel.ApplicationClass();
                myWorkBook =
excelApp.Workbooks.Open(Path.GetFullPath(@"anfis_veri_1.xls"));
                mySheet = (Excel.Worksheet)myWorkBook.Sheets["Sayfa1"];
                for (int row = 1; row <= 6180; row++)
                {
                    direnc.Add(Convert.ToDouble(mySheet.get_Range("A" + row,
Type.Missing).Value2));
                    SUNDeger.Add(Convert.ToDouble(mySheet.get_Range("B" + row,
Type.Missing).Value2));
                    sicaklik.Add(Convert.ToDouble(mySheet.get_Range("C" + row,
Type.Missing).Value2));
```

```
            }
            if (a.Contains(","))
                a = a.Replace(",", ".");
            if (b.Contains(","))
                b = b.Replace(",", ".");
            for (int row = 0; row <= 6179; row++)
            {
                WrT90 = direnc[row] / SUNDeger[row];
                string WrT90Degeri = WrT90.ToString().Replace(",", ".");

                if (sicaklik[row] < 0)
                {
                    try
                    {
                        d = "[x] = solve('" + a + "*(x-1)+" + b + "*(x-1)*log(x)+" +
WrT90Degeri + "-x = 0'); disp(x)";
                        bayrak = matlab_Command(d).Replace(".", ",");
                        bayrak = bayrak.Replace(" ", string.Empty);
                        int uKacinci = bayrak.IndexOf(',');
                        Wt90 = Convert.ToDouble(bayrak.Substring(0, uKacinci + 10));
                        yeniDirenc = SUNDeger[row] * Wt90;
                        mySheet.get_Range("A" + (row + 1),
Type.Missing).set_Value(Type.Missing, yeniDirenc);
                        autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarılı. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
                    }
                    catch
                    {
                        MessageBox.Show(matlab_Command(d).Replace(".",
",").Substring(0, 10));
                        autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarısız. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
                    }
                }
                else
                {
                    try
                    {
                        d = "[x] = solve('" + a + "*(x-1)+" + b + "*((x-1)^2)+" + WrT90Degeri
+ "-x = 0'); disp(x)";
                        bayrak = matlab_Command(d).Replace(".", ",");
                        formulDegerler = bayrak.Split(' ');
                        bayrak = formulDegerler[2].Replace(" ", string.Empty);
                        bayrak = bayrak.Replace("*", string.Empty);
                        bayrak = bayrak.Replace("i", string.Empty);
                        int uKacinci = bayrak.IndexOf(',');
                        Wt90 = Convert.ToDouble(bayrak.Substring(0, uKacinci + 10));
                        //MessageBox.Show(bayrak);
                        Wt90 = Convert.ToDouble(matlab_Command(d).Replace(".",
",").Substring(0, 10));
                        yeniDirenc = SUNDeger[row] * Wt90;
                        mySheet.get_Range("A" + (row + 1),
Type.Missing).set_Value(Type.Missing, yeniDirenc);
```

```
                    autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarılı. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
                }
                catch
                {
                    autoScrool.AppendText(">>İşlem Başarısız. İşlem Zamanı: " +
DateTime.Now.ToString() + "\n\n");
                }
            }
        }
        myWorkBook.Save();
        myWorkBook.Close();
        excelApp.Workbooks.Close();
        excelApp.Quit();
        kalibrasyonBaslat.Enabled = false;
      }
    }
    private void tbIslemVisibleFalse_TextChanged(object sender, EventArgs e)
    {
    }
  }
}
```

Ek-B Veri Edinimi Çalışmalarında Elde Edilen Öğrenme ve Test Verileri

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-189,344	0,21585975	5,48091	5,52322	5,52323	5,52320	5,52323	5,48406	5,45439	5,45441	5,46341	5,49498
-196	0,18700636	4,74829	4,78494	4,78495	4,78492	4,78495	4,75102	4,72532	4,72533	4,73313	4,76048
-195	0,19133309	4,85815	4,89565	4,89566	4,89563	4,89566	4,86094	4,83464	4,83466	4,84264	4,87063
-194	0,19566366	4,96811	5,00646	5,00647	5,00644	5,00647	4,97096	4,94407	4,94409	4,95225	4,98087
-193	0,19999746	5,07815	5,11735	5,11736	5,11733	5,11736	5,08107	5,05358	5,05360	5,06194	5,09119
-192	0,20433392	5,18826	5,22831	5,22831	5,22828	5,22831	5,19124	5,16315	5,16317	5,17169	5,20158
-191	0,20867252	5,29842	5,33932	5,33933	5,33930	5,33933	5,30146	5,27278	5,27280	5,28150	5,31202
-190	0,21301275	5,40862	5,45037	5,45038	5,45035	5,45038	5,41173	5,38245	5,38247	5,39135	5,42251
-189	0,21735418	5,51886	5,56146	5,56146	5,56143	5,56146	5,52202	5,49215	5,49217	5,50124	5,53303
-188	0,22169638	5,62911	5,67256	5,67257	5,67254	5,67257	5,63234	5,60187	5,60189	5,61114	5,64356
-187	0,22603897	5,73937	5,78367	5,78368	5,78365	5,78368	5,74267	5,71160	5,71162	5,72105	5,75411
-186	0,23038160	5,84964	5,89479	5,89480	5,89477	5,89480	5,85299	5,82133	5,82135	5,83096	5,86466
-185	0,23472394	5,95989	6,00590	6,00591	6,00587	6,00591	5,96331	5,93105	5,93108	5,94086	5,97520
-184	0,23906569	6,07014	6,11699	6,11700	6,11696	6,11700	6,07362	6,04076	6,04078	6,05075	6,08572
-183	0,24340657	6,18036	6,22806	6,22807	6,22803	6,22807	6,18390	6,15045	6,15047	6,16062	6,19622
-182	0,24774634	6,29055	6,33910	6,33911	6,33908	6,33911	6,29416	6,26011	6,26013	6,27046	6,30670
-181	0,25208477	6,40070	6,45011	6,45012	6,45008	6,45012	6,40438	6,36973	6,36975	6,38027	6,41714
-180	0,25642164	6,51082	6,56108	6,56109	6,56105	6,56109	6,51456	6,47932	6,47934	6,49003	6,52754
-179	0,26075676	6,62090	6,67200	6,67201	6,67197	6,67201	6,62469	6,58886	6,58888	6,59975	6,63790
-178	0,26508996	6,73092	6,78287	6,78288	6,78285	6,78288	6,73478	6,69835	6,69837	6,70943	6,74820
-177	0,26942109	6,84089	6,89369	6,89371	6,89367	6,89371	6,84482	6,80779	6,80781	6,81905	6,85846
-176	0,27374999	6,95081	7,00446	7,00447	7,00443	7,00447	6,95480	6,91717	6,91720	6,92861	6,96865
-175	0,27807654	7,06066	7,11516	7,11517	7,11513	7,11517	7,06471	7,02650	7,02652	7,03812	7,07879
-174	0,28240063	7,17046	7,22580	7,22581	7,22577	7,22581	7,17457	7,13576	7,13578	7,14756	7,18887
-173	0,28672216	7,28019	7,33638	7,33639	7,33635	7,33639	7,28436	7,24496	7,24498	7,25694	7,29888
-172	0,29104102	7,38985	7,44689	7,44690	7,44686	7,44690	7,39409	7,35409	7,35411	7,36625	7,40882

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-171	0,29535714	7,49944	7,55732	7,55733	7,55729	7,55733	7,50374	7,46315	7,46317	7,47549	7,51869
-170	0,29967044	7,60896	7,66769	7,66770	7,66766	7,66770	7,61332	7,57214	7,57216	7,58466	7,62849
-169	0,30398087	7,71840	7,77798	7,77799	7,77795	7,77799	7,72283	7,68105	7,68108	7,69376	7,73822
-168	0,30828836	7,82778	7,88819	7,88821	7,88816	7,88821	7,83227	7,78990	7,78992	7,80278	7,84787
-167	0,31259287	7,93707	7,99833	7,99835	7,99830	7,99835	7,94162	7,89866	7,89869	7,91173	7,95745
-166	0,31689437	8,04629	8,10840	8,10841	8,10836	8,10841	8,05091	8,00735	8,00738	8,02060	8,06695
-165	0,32119280	8,15543	8,21838	8,21839	8,21835	8,21839	8,16011	8,11597	8,11600	8,12939	8,17637
-164	0,32548816	8,26450	8,32829	8,32830	8,32825	8,32830	8,26924	8,22450	8,22453	8,23811	8,28572
-163	0,32978041	8,37348	8,43811	8,43813	8,43808	8,43813	8,37828	8,33296	8,33299	8,34674	8,39498
-162	0,33406954	8,48239	8,54786	8,54787	8,54782	8,54787	8,48725	8,44134	8,44137	8,45530	8,50417
-161	0,33835553	8,59121	8,65752	8,65754	8,65749	8,65754	8,59614	8,54964	8,54967	8,56378	8,61327
-160	0,34263838	8,69996	8,76711	8,76712	8,76707	8,76712	8,70495	8,65786	8,65789	8,67218	8,72230
-159	0,34691808	8,80863	8,87662	8,87663	8,87658	8,87663	8,81368	8,76600	8,76603	8,78050	8,83124
-158	0,35119463	8,91721	8,98604	8,98605	8,98600	8,98605	8,92233	8,87406	8,87409	8,88874	8,94011
-157	0,35546804	9,02572	9,09538	9,09540	9,09535	9,09540	9,03090	8,98204	8,98207	8,99690	9,04889
-156	0,35973831	9,13414	9,20465	9,20466	9,20461	9,20466	9,13938	9,08994	9,08998	9,10498	9,15760
-155	0,36400544	9,24249	9,31383	9,31385	9,31379	9,31385	9,24779	9,19777	9,19780	9,21298	9,26622
-154	0,36826945	9,35076	9,42293	9,42295	9,42290	9,42295	9,35612	9,30551	9,30554	9,32090	9,37477
-153	0,37253036	9,45895	9,53196	9,53197	9,53192	9,53197	9,46438	9,41318	9,41321	9,42875	9,48323
-152	0,37678817	9,56706	9,64090	9,64092	9,64086	9,64092	9,57255	9,52076	9,52080	9,53651	9,59162
-151	0,38104290	9,67509	9,74977	9,74978	9,74973	9,74978	9,68064	9,62827	9,62831	9,64420	9,69993
-150	0,38529457	9,78305	9,85856	9,85857	9,85852	9,85857	9,78866	9,73570	9,73574	9,75181	9,80816
-149	0,38954321	9,89092	9,96727	9,96728	9,96723	9,96728	9,89660	9,84306	9,84310	9,85934	9,91632
-148	0,39378883	9,99872	10,07590	10,07592	10,07586	10,07592	10,00446	9,95034	9,95038	9,96680	10,02440
-147	0,39803145	10,10645	10,18446	10,18447	10,18442	10,18447	10,11225	10,05754	10,05758	10,07418	10,13240
-146	0,40227111	10,21410	10,29294	10,29295	10,29290	10,29295	10,21996	10,16467	10,16471	10,18148	10,24032
-145	0,40650781	10,32167	10,40134	10,40136	10,40130	10,40136	10,32759	10,27173	10,27176	10,28871	10,34817

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-144	0,41074160	10,42917	10,50967	10,50969	10,50963	10,50969	10,43516	10,37871	10,37874	10,39587	10,45595
-143	0,41497248	10,53660	10,61793	10,61794	10,61788	10,61794	10,54264	10,48561	10,48565	10,50296	10,56365
-142	0,41920050	10,64395	10,72611	10,72613	10,72607	10,72613	10,65006	10,59245	10,59249	10,60997	10,67128
-141	0,42342568	10,75124	10,83422	10,83424	10,83418	10,83424	10,75740	10,69921	10,69925	10,71691	10,77884
-140	0,42764804	10,85845	10,94226	10,94228	10,94221	10,94228	10,86468	10,80590	10,80594	10,82377	10,88633
-139	0,43186761	10,96559	11,05022	11,05024	11,05018	11,05024	10,97188	10,91252	10,91256	10,93057	10,99374
-138	0,43608442	11,07266	11,15812	11,15814	11,15808	11,15814	11,07901	11,01907	11,01911	11,03730	11,10108
-137	0,44029850	11,17966	11,26595	11,26596	11,26590	11,26596	11,18607	11,12556	11,12560	11,14396	11,20836
-136	0,44450988	11,28659	11,37370	11,37372	11,37366	11,37372	11,29306	11,23197	11,23201	11,25055	11,31556
-135	0,44871858	11,39345	11,48139	11,48141	11,48134	11,48141	11,39999	11,33832	11,33836	11,35707	11,42270
-134	0,45292463	11,50025	11,58901	11,58903	11,58896	11,58903	11,50684	11,44460	11,44464	11,46352	11,52977
-133	0,45712806	11,60698	11,69656	11,69658	11,69652	11,69658	11,61363	11,55081	11,55085	11,56991	11,63678
-132	0,46132890	11,71364	11,80405	11,80407	11,80400	11,80407	11,72036	11,65696	11,65700	11,67624	11,74371
-131	0,46552718	11,82024	11,91147	11,91149	11,91143	11,91149	11,82702	11,76304	11,76308	11,78250	11,85059
-130	0,46972292	11,92677	12,01883	12,01885	12,01878	12,01885	11,93362	11,86906	11,86910	11,88869	11,95739
-129	0,47391616	12,03324	12,12612	12,12614	12,12607	12,12614	12,04015	11,97501	11,97506	11,99482	12,06414
-128	0,47810691	12,13965	12,23335	12,23337	12,23330	12,23337	12,14662	12,08091	12,08095	12,10089	12,17082
-127	0,48229521	12,24600	12,34052	12,34054	12,34047	12,34054	12,25302	12,18674	12,18678	12,20689	12,27744
-126	0,48648108	12,35228	12,44762	12,44764	12,44757	12,44764	12,35937	12,29251	12,29255	12,31284	12,38400
-125	0,49066455	12,45850	12,55467	12,55469	12,55461	12,55469	12,46565	12,39822	12,39826	12,41872	12,49049
-124	0,49484564	12,56467	12,66165	12,66167	12,66160	12,66167	12,57187	12,50386	12,50391	12,52455	12,59693
-123	0,49902439	12,67077	12,76857	12,76859	12,76852	12,76859	12,67804	12,60945	12,60950	12,63031	12,70330
-122	0,50320081	12,77681	12,87543	12,87545	12,87538	12,87545	12,78414	12,71498	12,71503	12,73602	12,80962
-121	0,50737493	12,88280	12,98223	12,98226	12,98218	12,98226	12,89019	12,82046	12,82050	12,84166	12,91587
-120	0,51154679	12,98873	13,08898	13,08900	13,08893	13,08900	12,99618	12,92587	12,92592	12,94725	13,02207
-119	0,51571639	13,09460	13,19567	13,19569	13,19562	13,19569	13,10211	13,03123	13,03128	13,05278	13,12822
-118	0,51988376	13,20041	13,30230	13,30232	13,30225	13,30232	13,20798	13,13653	13,13658	13,15826	13,23430

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-117	0,52404894	13,30617	13,40887	13,40890	13,40882	13,40890	13,31380	13,24178	13,24183	13,26368	13,34033
-116	0,52821193	13,41187	13,51539	13,51541	13,51534	13,51541	13,41957	13,34697	13,34702	13,36905	13,44631
-115	0,53237277	13,51752	13,62186	13,62188	13,62180	13,62188	13,52528	13,45211	13,45216	13,47436	13,55223
-114	0,53653148	13,62311	13,72827	13,72829	13,72821	13,72829	13,63093	13,55719	13,55724	13,57961	13,65809
-113	0,54068807	13,72866	13,83462	13,83464	13,83456	13,83464	13,73653	13,66222	13,66227	13,68482	13,76390
-112	0,54484258	13,83414	13,94092	13,94094	13,94087	13,94094	13,84208	13,76720	13,76725	13,78997	13,86966
-111	0,54899501	13,93958	14,04717	14,04719	14,04711	14,04719	13,94757	13,87212	13,87217	13,89507	13,97537
-110	0,55314540	14,04496	14,15337	14,15339	14,15331	14,15339	14,05302	13,97700	13,97705	14,00011	14,08102
-109	0,55729376	14,15029	14,25951	14,25953	14,25945	14,25953	14,15841	14,08182	14,08187	14,10511	14,18662
-108	0,56144010	14,25557	14,36560	14,36563	14,36555	14,36563	14,26375	14,18659	14,18664	14,21005	14,29217
-107	0,56558446	14,36080	14,47165	14,47167	14,47159	14,47167	14,36904	14,29131	14,29136	14,31495	14,39767
-106	0,56972685	14,46598	14,57764	14,57766	14,57758	14,57766	14,47428	14,39598	14,39603	14,41979	14,50312
-105	0,57386729	14,57111	14,68358	14,68360	14,68352	14,68360	14,57947	14,50060	14,50065	14,52458	14,60852
-104	0,57800579	14,67619	14,78947	14,78949	14,78941	14,78949	14,68461	14,60517	14,60523	14,62933	14,71387
-103	0,58214238	14,78122	14,89531	14,89534	14,89525	14,89534	14,78970	14,70970	14,70975	14,73403	14,81918
-102	0,58627707	14,88621	15,00111	15,00113	15,00105	15,00113	14,89475	14,81417	14,81423	14,83868	14,92443
-101	0,59040987	14,99115	15,10686	15,10688	15,10679	15,10688	14,99975	14,91860	14,91866	14,94328	15,02963
-100	0,59454082	15,09603	15,21255	15,21258	15,21249	15,21258	15,10469	15,02298	15,02304	15,04783	15,13479
-99	0,59866991	15,20088	15,31821	15,31823	15,31814	15,31823	15,20960	15,12732	15,12737	15,15234	15,23990
-98	0,60279717	15,30567	15,42381	15,42383	15,42375	15,42383	15,31445	15,23161	15,23166	15,25680	15,34497
-97	0,60692261	15,41042	15,52937	15,52939	15,52931	15,52939	15,41926	15,33585	15,33590	15,36121	15,44999
-96	0,61104625	15,51513	15,63488	15,63490	15,63482	15,63490	15,52403	15,44005	15,44010	15,46558	15,55496
-95	0,61516810	15,61978	15,74035	15,74037	15,74028	15,74037	15,62874	15,54420	15,54425	15,56991	15,65989
-94	0,61928818	15,72440	15,84577	15,84579	15,84570	15,84579	15,73342	15,64831	15,64836	15,67419	15,76477
-93	0,62340650	15,82897	15,95114	15,95117	15,95108	15,95117	15,83805	15,75237	15,75242	15,77842	15,86961
-92	0,62752307	15,93349	16,05647	16,05650	16,05641	16,05650	15,94263	15,85639	15,85644	15,88261	15,97440
-91	0,63163792	16,03797	16,16176	16,16179	16,16169	16,16179	16,04717	15,96036	15,96042	15,98676	16,07915

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-90	0,63575104	16,14241	16,26700	16,26703	16,26694	16,26703	16,15167	16,06429	16,06435	16,09086	16,18385
-89	0,63986246	16,24680	16,37220	16,37223	16,37214	16,37223	16,25612	16,16818	16,16824	16,19492	16,28851
-88	0,64397218	16,35115	16,47736	16,47738	16,47729	16,47738	16,36053	16,27203	16,27208	16,29894	16,39313
-87	0,64808022	16,45546	16,58247	16,58250	16,58240	16,58250	16,46490	16,37583	16,37589	16,40291	16,49771
-86	0,65218659	16,55972	16,68754	16,68757	16,68747	16,68757	16,56922	16,47959	16,47965	16,50685	16,60224
-85	0,65629131	16,66395	16,79257	16,79259	16,79250	16,79259	16,67351	16,58331	16,58337	16,61074	16,70673
-84	0,66039438	16,76813	16,89755	16,89758	16,89749	16,89758	16,77775	16,68699	16,68705	16,71458	16,81118
-83	0,66449581	16,87227	17,00250	17,00252	17,00243	17,00252	16,88195	16,79062	16,79068	16,81839	16,91559
-82	0,66859562	16,97637	17,10740	17,10743	17,10733	17,10743	16,98610	16,89422	16,89428	16,92216	17,01995
-81	0,67269381	17,08042	17,21226	17,21229	17,21219	17,21229	17,09022	16,99777	16,99783	17,02588	17,12428
-80	0,67679040	17,18444	17,31708	17,31711	17,31701	17,31711	17,19430	17,10128	17,10134	17,12957	17,22856
-79	0,68088540	17,28842	17,42186	17,42189	17,42179	17,42189	17,29833	17,20476	17,20482	17,23321	17,33280
-78	0,68497882	17,39235	17,52660	17,52662	17,52653	17,52662	17,40233	17,30819	17,30825	17,33682	17,43701
-77	0,68907066	17,49625	17,63130	17,63132	17,63122	17,63132	17,50629	17,41158	17,41165	17,44038	17,54117
-76	0,69316093	17,60011	17,73595	17,73598	17,73588	17,73598	17,61020	17,51494	17,51500	17,54391	17,64529
-75	0,69724966	17,70392	17,84057	17,84060	17,84050	17,84060	17,71408	17,61825	17,61832	17,64739	17,74938
-74	0,70133683	17,80770	17,94515	17,94518	17,94508	17,94518	17,81792	17,72153	17,72159	17,75084	17,85342
-73	0,70542247	17,91144	18,04969	18,04972	18,04962	18,04972	17,92172	17,82476	17,82483	17,85425	17,95743
-72	0,70950659	18,01514	18,15419	18,15422	18,15412	18,15422	18,02547	17,92796	17,92803	17,95762	18,06139
-71	0,71358918	18,11880	18,25865	18,25868	18,25858	18,25868	18,12920	18,03112	18,03119	18,06095	18,16532
-70	0,71767026	18,22242	18,36307	18,36310	18,36300	18,36310	18,23288	18,13424	18,13431	18,16424	18,26921
-69	0,72174984	18,32601	18,46746	18,46749	18,46738	18,46749	18,33652	18,23733	18,23739	18,26749	18,37306
-68	0,72582792	18,42956	18,57181	18,57184	18,57173	18,57184	18,44013	18,34037	18,34044	18,37071	18,47687
-67	0,72990452	18,53307	18,67611	18,67614	18,67604	18,67614	18,54370	18,44338	18,44345	18,47389	18,58065
-66	0,73397964	18,63654	18,78038	18,78041	18,78031	18,78041	18,64723	18,54635	18,54642	18,57703	18,68439
-65	0,73805328	18,73997	18,88462	18,88465	18,88454	18,88465	18,75072	18,64929	18,64935	18,68013	18,78809
-64	0,74212546	18,84337	18,98881	18,98884	18,98874	18,98884	18,85418	18,75218	18,75225	18,78320	18,89175

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-63	0,74619619	18,94673	19,09297	19,09300	19,09289	19,09300	18,95760	18,85504	18,85511	18,88623	18,99537
-62	0,75026547	19,05005	19,19709	19,19712	19,19701	19,19712	19,06098	18,95787	18,95794	18,98922	19,09896
-61	0,75433330	19,15334	19,30117	19,30121	19,30110	19,30121	19,16433	19,06065	19,06072	19,09218	19,20251
-60	0,75839970	19,25659	19,40522	19,40525	19,40514	19,40525	19,26764	19,16340	19,16347	19,19510	19,30603
-59	0,76246466	19,35980	19,50923	19,50926	19,50915	19,50926	19,37091	19,26612	19,26619	19,29798	19,40951
-58	0,76652821	19,46298	19,61321	19,61324	19,61313	19,61324	19,47415	19,36880	19,36887	19,40083	19,51295
-57	0,77059034	19,56612	19,71714	19,71718	19,71706	19,71718	19,57735	19,47144	19,47151	19,50365	19,61636
-56	0,77465106	19,66923	19,82105	19,82108	19,82097	19,82108	19,68051	19,57405	19,57412	19,60642	19,71973
-55	0,77871038	19,77230	19,92491	19,92494	19,92483	19,92494	19,78364	19,67662	19,67669	19,70916	19,82306
-54	0,78276831	19,87533	20,02874	20,02877	20,02866	20,02877	19,88674	19,77916	19,77923	19,81187	19,92636
-53	0,78682484	19,97833	20,13254	20,13257	20,13246	20,13257	19,98979	19,88166	19,88173	19,91454	20,02963
-52	0,79087999	20,08130	20,23630	20,23633	20,23622	20,23633	20,09282	19,98412	19,98420	20,01718	20,13286
-51	0,79493376	20,18423	20,34002	20,34005	20,33994	20,34005	20,19581	20,08655	20,08663	20,11978	20,23605
-50	0,79898616	20,28712	20,44371	20,44374	20,44363	20,44374	20,29876	20,18895	20,18902	20,22234	20,33921
-49	0,80303719	20,38998	20,54736	20,54740	20,54728	20,54740	20,40168	20,29131	20,29139	20,32488	20,44233
-48	0,80708686	20,49281	20,65098	20,65102	20,65090	20,65102	20,50456	20,39364	20,39372	20,42737	20,54542
-47	0,81113518	20,59560	20,75457	20,75460	20,75448	20,75460	20,60741	20,49594	20,49601	20,52984	20,64848
-46	0,81518215	20,69836	20,85812	20,85815	20,85803	20,85815	20,71023	20,59820	20,59827	20,63226	20,75150
-45	0,81922777	20,80108	20,96163	20,96167	20,96155	20,96167	20,81301	20,70042	20,70050	20,73466	20,85449
-44	0,82327206	20,90377	21,06511	21,06515	21,06503	21,06515	20,91576	20,80261	20,80269	20,83702	20,95744
-43	0,82731501	21,00642	21,16856	21,16860	21,16848	21,16860	21,01847	20,90477	20,90485	20,93935	21,06036
-42	0,83135663	21,10904	21,27198	21,27201	21,27189	21,27201	21,12115	21,00690	21,00697	21,04164	21,16324
-41	0,83539694	21,21163	21,37535	21,37539	21,37527	21,37539	21,22380	21,10899	21,10906	21,14390	21,26609
-40	0,83943592	21,31419	21,47870	21,47874	21,47861	21,47874	21,32641	21,21104	21,21112	21,24613	21,36891
-39	0,84347359	21,41671	21,58201	21,58205	21,58193	21,58205	21,42899	21,31307	21,31315	21,34832	21,47169
-38	0,84750996	21,51919	21,68529	21,68533	21,68520	21,68533	21,53154	21,41506	21,41514	21,45048	21,57444
-37	0,85154502	21,62165	21,78854	21,78857	21,78845	21,78857	21,63405	21,51702	21,51710	21,55261	21,67716

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-36	0,85557878	21,72407	21,89175	21,89178	21,89166	21,89178	21,73653	21,61895	21,61902	21,65470	21,77985
-35	0,85961125	21,82646	21,99493	21,99496	21,99484	21,99496	21,83898	21,72084	21,72092	21,75677	21,88250
-34	0,86364243	21,92882	22,09807	22,09811	22,09799	22,09811	21,94140	21,82270	21,82278	21,85879	21,98512
-33	0,86767232	22,03114	22,20119	22,20122	22,20110	22,20122	22,04378	21,92453	21,92461	21,96079	22,08770
-32	0,87170094	22,13343	22,30427	22,30430	22,30418	22,30430	22,14613	22,02632	22,02640	22,06276	22,19026
-31	0,87572828	22,23569	22,40732	22,40735	22,40723	22,40735	22,24844	22,12809	22,12817	22,16469	22,29278
-30	0,87975434	22,33791	22,51033	22,51037	22,51024	22,51037	22,35073	22,22982	22,22990	22,26659	22,39527
-29	0,88377914	22,44011	22,61331	22,61335	22,61322	22,61335	22,45298	22,33152	22,33160	22,36845	22,49772
-28	0,88780268	22,54227	22,71626	22,71630	22,71617	22,71630	22,55520	22,43319	22,43327	22,47029	22,60015
-27	0,89182495	22,64440	22,81918	22,81922	22,81909	22,81922	22,65739	22,53482	22,53490	22,57209	22,70254
-26	0,89584597	22,74650	22,92207	22,92210	22,92198	22,92210	22,75955	22,63643	22,63651	22,67387	22,80490
-25	0,89986574	22,84856	23,02492	23,02496	23,02483	23,02496	22,86167	22,73800	22,73808	22,77561	22,90723
-24	0,90388425	22,95060	23,12774	23,12778	23,12765	23,12778	22,96377	22,83954	22,83962	22,87731	23,00952
-23	0,90790152	23,05260	23,23053	23,23057	23,23044	23,23057	23,06583	22,94105	22,94113	22,97899	23,11179
-22	0,91191755	23,15457	23,33329	23,33333	23,33320	23,33333	23,16786	23,04253	23,04261	23,08064	23,21402
-21	0,91593233	23,25651	23,43602	23,43606	23,43592	23,43606	23,26985	23,14397	23,14406	23,18225	23,31622
-20	0,91994588	23,35842	23,53871	23,53875	23,53862	23,53875	23,37182	23,24539	23,24547	23,28383	23,41839
-19	0,92395820	23,46030	23,64138	23,64142	23,64128	23,64142	23,47376	23,34677	23,34686	23,38539	23,52053
-18	0,92796928	23,56214	23,74401	23,74405	23,74391	23,74405	23,57566	23,44812	23,44821	23,48691	23,62264
-17	0,93197914	23,66396	23,84661	23,84665	23,84651	23,84665	23,67753	23,54945	23,54953	23,58840	23,72472
-16	0,93598777	23,76574	23,94918	23,94922	23,94908	23,94922	23,77938	23,65074	23,65082	23,68986	23,82676
-15	0,93999517	23,86749	24,05172	24,05176	24,05162	24,05176	23,88119	23,75200	23,75208	23,79128	23,92877
-14	0,94400135	23,96922	24,15422	24,15426	24,15413	24,15426	23,98297	23,85323	23,85331	23,89268	24,03076
-13	0,94800631	24,07091	24,25670	24,25674	24,25660	24,25674	24,08471	23,95442	23,95451	23,99404	24,13271
-12	0,95201005	24,17257	24,35914	24,35918	24,35904	24,35918	24,18643	24,05559	24,05568	24,09538	24,23463
-11	0,95601258	24,27419	24,46155	24,46159	24,46146	24,46159	24,28812	24,15673	24,15682	24,19668	24,33652
-10	0,96001388	24,37579	24,56394	24,56398	24,56384	24,56398	24,38977	24,25783	24,25792	24,29796	24,43838

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
-9	0,96401397	24,47736	24,66629	24,66633	24,66619	24,66633	24,49140	24,35891	24,35900	24,39920	24,54020
-8	0,96801285	24,57889	24,76861	24,76865	24,76851	24,76865	24,59299	24,45995	24,46004	24,50041	24,64200
-7	0,97201051	24,68040	24,87090	24,87093	24,87079	24,87093	24,69456	24,56097	24,56106	24,60159	24,74376
-6	0,97600695	24,78187	24,97315	24,97319	24,97305	24,97319	24,79609	24,66195	24,66204	24,70274	24,84550
-5	0,98000218	24,88332	25,07538	25,07542	25,07528	25,07542	24,89759	24,76290	24,76299	24,80386	24,94720
-4	0,98399620	24,98473	25,17757	25,17761	25,17747	25,17761	24,99906	24,86382	24,86391	24,90495	25,04888
-3	0,98798900	25,08611	25,27974	25,27978	25,27964	25,27978	25,10050	24,96472	24,96481	25,00601	25,15052
-2	0,99198059	25,18746	25,38187	25,38191	25,38177	25,38191	25,20191	25,06558	25,06567	25,10703	25,25213
-1	0,99597095	25,28878	25,48397	25,48401	25,48387	25,48401	25,30329	25,16641	25,16650	25,20803	25,35371
0	0,99996010	25,39007	25,58604	25,58608	25,58594	25,58608	25,40463	25,26720	25,26729	25,30900	25,45526
0	0,99996011	25,39007	25,58604	25,58608	25,58594	25,58608	25,40463	25,26720	25,26730	25,30900	25,45526
1	1,00394804	25,49133	25,68808	25,68812	25,68798	25,68812	25,50595	25,36797	25,36806	25,40993	25,55678
2	1,00793475	25,59255	25,79009	25,79013	25,78999	25,79013	25,60724	25,46871	25,46880	25,51083	25,65826
3	1,01192024	25,69375	25,89207	25,89211	25,89196	25,89211	25,70849	25,56942	25,56951	25,61171	25,75972
4	1,01590452	25,79491	25,99401	25,99406	25,99391	25,99406	25,80971	25,67009	25,67018	25,71255	25,86114
5	1,01988757	25,89605	26,09593	26,09597	26,09582	26,09597	25,91090	25,77074	25,77083	25,81336	25,96254
6	1,02386941	25,99715	26,19781	26,19785	26,19771	26,19785	26,01207	25,87135	25,87144	25,91414	26,06390
7	1,02785003	26,09822	26,29966	26,29971	26,29956	26,29971	26,11320	25,97193	25,97203	26,01489	26,16523
8	1,03182943	26,19927	26,40149	26,40153	26,40138	26,40153	26,21430	26,07248	26,07258	26,11561	26,26653
9	1,03580762	26,30028	26,50328	26,50332	26,50317	26,50332	26,31536	26,17301	26,17310	26,21630	26,36780
10	1,03978459	26,40126	26,60503	26,60508	26,60493	26,60508	26,41640	26,27350	26,27359	26,31695	26,46904
11	1,04376035	26,50220	26,70676	26,70681	26,70666	26,70681	26,51741	26,37396	26,37405	26,41758	26,57025
12	1,04773489	26,60312	26,80846	26,80850	26,80835	26,80850	26,61838	26,47439	26,47448	26,51818	26,67143
13	1,05170821	26,70401	26,91013	26,91017	26,91002	26,91017	26,71933	26,57479	26,57488	26,61874	26,77257
14	1,05568032	26,80487	27,01176	27,01180	27,01165	27,01180	26,82024	26,67515	26,67525	26,71927	26,87369
15	1,05965122	26,90569	27,11336	27,11341	27,11325	27,11341	26,92113	26,77549	26,77559	26,81978	26,97477
16	1,06362090	27,00649	27,21494	27,21498	27,21483	27,21498	27,02198	26,87580	26,87590	26,92025	27,07582

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
17	1,06758937	27,10725	27,31648	27,31652	27,31637	27,31652	27,12280	26,97607	26,97617	27,02069	27,17685
18	1,07155663	27,20798	27,41799	27,41803	27,41788	27,41803	27,22359	27,07632	27,07642	27,12110	27,27784
19	1,07552268	27,30868	27,51947	27,51951	27,51936	27,51951	27,32435	27,17653	27,17663	27,22148	27,37880
20	1,07948751	27,40936	27,62092	27,62096	27,62080	27,62096	27,42508	27,27672	27,27682	27,32183	27,47973
21	1,08345113	27,51000	27,72233	27,72238	27,72222	27,72238	27,52578	27,37687	27,37697	27,42215	27,58063
22	1,08741354	27,61061	27,82372	27,82376	27,82361	27,82376	27,62645	27,47700	27,47709	27,52244	27,68150
23	1,09137474	27,71119	27,92508	27,92512	27,92496	27,92512	27,72708	27,57709	27,57719	27,62270	27,78233
24	1,09533473	27,81173	28,02640	28,02644	28,02629	28,02644	27,82769	27,67715	27,67725	27,72293	27,88314
25	1,09929351	27,91225	28,12769	28,12774	28,12758	28,12774	27,92826	27,77718	27,77728	27,82312	27,98392
26	1,10325108	28,01274	28,22896	28,22900	28,22884	28,22900	28,02881	27,87718	27,87728	27,92329	28,08466
27	1,10720743	28,11319	28,33019	28,33023	28,33007	28,33023	28,12932	27,97715	27,97725	28,02343	28,18537
28	1,11116258	28,21362	28,43139	28,43143	28,43127	28,43143	28,22981	28,07709	28,07719	28,12353	28,28606
29,7646	1,11813889	28,39076	28,60989	28,60994	28,60978	28,60994	28,40704	28,25337	28,25347	28,30010	28,46365
30	1,11906926	28,41438	28,63370	28,63374	28,63358	28,63374	28,43068	28,27688	28,27698	28,32365	28,48733
31	1,12302078	28,51471	28,73480	28,73485	28,73469	28,73485	28,53107	28,37673	28,37683	28,42366	28,58792
32	1,12697110	28,61502	28,83588	28,83593	28,83577	28,83593	28,63143	28,47654	28,47665	28,52364	28,68848
33	1,13092020	28,71529	28,93693	28,93697	28,93681	28,93697	28,73176	28,57633	28,57643	28,62360	28,78901
34	1,13486810	28,81553	29,03794	29,03799	29,03783	29,03799	28,83206	28,67609	28,67619	28,72352	28,88951
35	1,13881480	28,91574	29,13893	29,13897	29,13881	29,13897	28,93233	28,77581	28,77592	28,82341	28,98998
36	1,14276028	29,01592	29,23988	29,23993	29,23976	29,23993	29,03257	28,87551	28,87561	28,92327	29,09042
37	1,14670457	29,11607	29,34080	29,34085	29,34068	29,34085	29,13277	28,97517	28,97528	29,02310	29,19082
38	1,15064764	29,21619	29,44169	29,44174	29,44158	29,44174	29,23295	29,07481	29,07491	29,12290	29,29120
39	1,15458951	29,31628	29,54256	29,54260	29,54244	29,54260	29,33309	29,17441	29,17452	29,22267	29,39155
40	1,15853017	29,41633	29,64339	29,64343	29,64327	29,64343	29,43321	29,27399	29,27409	29,32240	29,49186
41	1,16246963	29,51636	29,74418	29,74423	29,74406	29,74423	29,53329	29,37353	29,37363	29,42211	29,59214
42	1,16640788	29,61636	29,84495	29,84500	29,84483	29,84500	29,63335	29,47304	29,47315	29,52179	29,69240
43	1,17034493	29,71632	29,94569	29,94574	29,94557	29,94574	29,73337	29,57252	29,57263	29,62144	29,79262

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
44	1,17428077	29,81626	30,04640	30,04645	30,04628	30,04645	29,83336	29,67198	29,67208	29,72105	29,89281
45	1,17821541	29,91616	30,14707	30,14712	30,14695	30,14712	29,93333	29,77140	29,77150	29,82064	29,99297
46	1,18214884	30,01604	30,24772	30,24777	30,24760	30,24777	30,03326	29,87079	29,87090	29,92019	30,09310
47	1,18608107	30,11588	30,34833	30,34838	30,34821	30,34838	30,13316	29,97015	29,97026	30,01972	30,19320
48	1,19001210	30,21569	30,44892	30,44896	30,44879	30,44896	30,23303	30,06948	30,06959	30,11921	30,29327
49	1,19394192	30,31548	30,54947	30,54952	30,54935	30,54952	30,33287	30,16878	30,16889	30,21868	30,39331
50	1,19787054	30,41523	30,64999	30,65004	30,64987	30,65004	30,43268	30,26805	30,26816	30,31811	30,49332
51	1,20179796	30,51495	30,75048	30,75053	30,75036	30,75053	30,53246	30,36729	30,36740	30,41751	30,59330
52	1,20572418	30,61464	30,85094	30,85099	30,85082	30,85099	30,63220	30,46649	30,46660	30,51688	30,69324
53	1,20964919	30,71430	30,95137	30,95142	30,95125	30,95142	30,73192	30,56567	30,56578	30,61623	30,79316
54	1,21357300	30,81393	31,05177	31,05182	31,05165	31,05182	30,83161	30,66482	30,66493	30,71554	30,89305
55	1,21749561	30,91353	31,15214	31,15219	31,15201	31,15219	30,93126	30,76394	30,76405	30,81482	30,99290
56	1,22141702	31,01310	31,25248	31,25253	31,25235	31,25253	31,03089	30,86302	30,86314	30,91407	31,09273
57	1,22533722	31,11264	31,35278	31,35283	31,35266	31,35283	31,13049	30,96208	30,96219	31,01329	31,19252
58	1,22925623	31,21215	31,45306	31,45311	31,45293	31,45311	31,23005	31,06111	31,06122	31,11248	31,29228
59	1,23317403	31,31162	31,55330	31,55335	31,55318	31,55335	31,32959	31,16010	31,16022	31,21164	31,39201
60	1,23709064	31,41107	31,65352	31,65357	31,65339	31,65357	31,42909	31,25907	31,25918	31,31077	31,49172
61	1,24100604	31,51049	31,75370	31,75375	31,75357	31,75375	31,52856	31,35800	31,35812	31,40987	31,59139
62	1,24492025	31,60987	31,85385	31,85391	31,85373	31,85391	31,62801	31,45691	31,45702	31,50894	31,69103
63	1,24883325	31,70923	31,95398	31,95403	31,95385	31,95403	31,72742	31,55578	31,55590	31,60798	31,79064
64	1,25274505	31,80855	32,05407	32,05412	32,05394	32,05412	31,82680	31,65463	31,65474	31,70698	31,89022
65	1,25665566	31,90785	32,15413	32,15418	32,15400	32,15418	31,92615	31,75344	31,75356	31,80596	31,98977
66	1,26056506	32,00711	32,25416	32,25421	32,25403	32,25421	32,02547	31,85223	31,85234	31,90491	32,08929
67	1,26447327	32,10634	32,35416	32,35421	32,35403	32,35421	32,12476	31,95098	31,95109	32,00382	32,18878
68	1,26838028	32,20555	32,45413	32,45418	32,45400	32,45418	32,22402	32,04970	32,04982	32,10271	32,28823
69	1,27228608	32,30472	32,55407	32,55412	32,55393	32,55412	32,32325	32,14839	32,14851	32,20157	32,38766
70	1,27619070	32,40386	32,65397	32,65403	32,65384	32,65403	32,42245	32,24706	32,24717	32,30039	32,48706

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
71	1,28009411	32,50297	32,75385	32,75390	32,75372	32,75390	32,52162	32,34569	32,34581	32,39919	32,58643
72	1,28399632	32,60206	32,85370	32,85375	32,85356	32,85375	32,62076	32,44429	32,44441	32,49795	32,68576
73	1,28789734	32,70111	32,95351	32,95356	32,95338	32,95356	32,71987	32,54286	32,54298	32,59669	32,78507
74	1,29179716	32,80013	33,05330	33,05335	33,05316	33,05335	32,81894	32,64140	32,64152	32,69539	32,88434
75	1,29569578	32,89912	33,15305	33,15310	33,15292	33,15310	32,91799	32,73992	32,74003	32,79407	32,98359
76	1,29959320	32,99808	33,25277	33,25283	33,25264	33,25283	33,01701	32,83840	32,83851	32,89271	33,08280
77	1,30348943	33,09701	33,35247	33,35252	33,35233	33,35252	33,11599	32,93685	32,93697	32,99132	33,18198
78	1,30738446	33,19591	33,45213	33,45218	33,45200	33,45218	33,21495	33,03527	33,03539	33,08991	33,28114
79	1,31127830	33,29477	33,55176	33,55182	33,55163	33,55182	33,31387	33,13366	33,13378	33,18846	33,38026
80	1,31517094	33,39361	33,65136	33,65142	33,65123	33,65142	33,41277	33,23202	33,23214	33,28698	33,47935
81	1,31906238	33,49242	33,75093	33,75099	33,75080	33,75099	33,51163	33,33035	33,33047	33,38548	33,57841
82	1,32295263	33,59120	33,85047	33,85053	33,85034	33,85053	33,61047	33,42865	33,42877	33,48394	33,67744
83	1,32684168	33,68995	33,94998	33,95004	33,94985	33,95004	33,70927	33,52692	33,52704	33,58237	33,77644
84	1,33072953	33,78866	34,04946	34,04952	34,04932	34,04952	33,80805	33,62516	33,62528	33,68077	33,87541
85	1,33461619	33,88735	34,14891	34,14896	34,14877	34,14896	33,90679	33,72336	33,72349	33,77914	33,97435
86	1,33850166	33,98601	34,24833	34,24838	34,24819	34,24838	34,00550	33,82154	33,82167	33,87748	34,07326
87	1,34238593	34,08463	34,34771	34,34777	34,34758	34,34777	34,10418	33,91969	33,91981	33,97579	34,17214
88	1,34626901	34,18323	34,44707	34,44713	34,44693	34,44713	34,20284	34,01781	34,01793	34,07408	34,27099
89	1,35015089	34,28179	34,54640	34,54645	34,54626	34,54645	34,30146	34,11590	34,11602	34,17233	34,36981
90	1,35403157	34,38033	34,64569	34,64575	34,64555	34,64575	34,40005	34,21396	34,21408	34,27055	34,46860
91	1,35791107	34,47883	34,74496	34,74501	34,74482	34,74501	34,49861	34,31198	34,31211	34,36874	34,56735
92	1,36178937	34,57731	34,84419	34,84425	34,84405	34,84425	34,59714	34,40998	34,41011	34,46690	34,66608
93	1,36566647	34,67575	34,94340	34,94345	34,94325	34,94345	34,69564	34,50795	34,50807	34,56503	34,76478
94	1,36954239	34,77416	35,04257	35,04262	35,04243	35,04262	34,79411	34,60589	34,60601	34,66312	34,86344
95	1,37341711	34,87255	35,14171	35,14177	35,14157	35,14177	34,89255	34,70379	34,70392	34,76119	34,96208
96	1,37729063	34,97090	35,24082	35,24088	35,24068	35,24088	34,99096	34,80167	34,80180	34,85923	35,06069
97	1,38116297	35,06922	35,33991	35,33996	35,33976	35,33996	35,08934	34,89952	34,89964	34,95724	35,15926

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
98	1,38503411	35,16751	35,43896	35,43901	35,43881	35,43901	35,18769	34,99734	34,99746	35,05522	35,25781
99	1,38890406	35,26578	35,53798	35,53803	35,53783	35,53803	35,28601	35,09512	35,09525	35,15317	35,35632
100	1,39277281	35,36401	35,63697	35,63702	35,63682	35,63702	35,38430	35,19288	35,19301	35,25109	35,45480
101	1,39664038	35,46221	35,73593	35,73598	35,73578	35,73598	35,48255	35,29061	35,29073	35,34897	35,55326
102	1,40050675	35,56038	35,83486	35,83491	35,83471	35,83491	35,58078	35,38830	35,38843	35,44683	35,65168
103	1,40437193	35,65852	35,93375	35,93381	35,93361	35,93381	35,67898	35,48597	35,48610	35,54466	35,75008
104	1,40823592	35,75663	36,03262	36,03268	36,03248	36,03268	35,77715	35,58360	35,58373	35,64246	35,84844
105	1,41209872	35,85471	36,13146	36,13152	36,13131	36,13152	35,87528	35,68121	35,68134	35,74023	35,94677
106	1,41596033	35,95276	36,23027	36,23033	36,23012	36,23033	35,97339	35,77879	35,77891	35,83796	36,04507
107	1,41982074	36,05078	36,32904	36,32910	36,32890	36,32910	36,07147	35,87633	35,87646	35,93567	36,14334
108	1,42367997	36,14877	36,42779	36,42785	36,42764	36,42785	36,16951	35,97385	35,97398	36,03335	36,24159
109	1,42753801	36,24673	36,52651	36,52656	36,52636	36,52656	36,26753	36,07133	36,07146	36,13099	36,33980
110	1,43139485	36,34466	36,62519	36,62525	36,62504	36,62525	36,36551	36,16879	36,16892	36,22861	36,43798
111	1,43525051	36,44256	36,72385	36,72391	36,72370	36,72391	36,46347	36,26621	36,26634	36,32620	36,53613
112	1,43910497	36,54043	36,82247	36,82253	36,82232	36,82253	36,56139	36,36361	36,36374	36,42375	36,63425
113	1,44295825	36,63827	36,92107	36,92112	36,92092	36,92112	36,65929	36,46097	36,46111	36,52128	36,73234
114	1,44681034	36,73608	37,01963	37,01969	37,01948	37,01969	36,75715	36,55831	36,55844	36,61878	36,83040
115	1,45066123	36,83386	37,11816	37,11822	37,11801	37,11822	36,85499	36,65562	36,65575	36,71624	36,92843
116	1,45451094	36,93161	37,21666	37,21672	37,21651	37,21672	36,95279	36,75289	36,75302	36,81368	37,02643
117	1,45835946	37,02932	37,31514	37,31520	37,31499	37,31520	37,05057	36,85014	36,85027	36,91109	37,12440
118	1,46220680	37,12701	37,41358	37,41364	37,41343	37,41364	37,14831	36,94735	36,94748	37,00846	37,22234
119	1,46605294	37,22467	37,51199	37,51205	37,51184	37,51205	37,24602	37,04454	37,04467	37,10581	37,32024
120	1,46989789	37,32230	37,61037	37,61043	37,61022	37,61043	37,34371	37,14169	37,14183	37,20312	37,41812
121	1,47374166	37,41990	37,70872	37,70878	37,70857	37,70878	37,44136	37,23882	37,23895	37,30041	37,51597
122	1,47758424	37,51746	37,80704	37,80710	37,80689	37,80710	37,53899	37,33591	37,33605	37,39766	37,61379
123	1,48142563	37,61500	37,90533	37,90539	37,90518	37,90539	37,63658	37,43298	37,43311	37,49489	37,71158
124	1,48526584	37,71251	38,00359	38,00365	38,00344	38,00365	37,73414	37,53001	37,53015	37,59209	37,80933

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
125	1,48910486	37,80998	38,10182	38,10188	38,10167	38,10188	37,83167	37,62702	37,62715	37,68925	37,90706
126	1,49294269	37,90743	38,20002	38,20008	38,19987	38,20008	37,92918	37,72399	37,72413	37,78639	38,00476
127	1,49677933	38,00485	38,29819	38,29825	38,29803	38,29825	38,02665	37,82094	37,82107	37,88349	38,10242
128	1,50061479	38,10223	38,39633	38,39639	38,39617	38,39639	38,12409	37,91785	37,91799	37,98057	38,20006
129	1,50444906	38,19959	38,49443	38,49450	38,49428	38,49450	38,22150	38,01474	38,01487	38,07761	38,29767
130	1,50828214	38,29692	38,59251	38,59257	38,59236	38,59257	38,31889	38,11159	38,11173	38,17463	38,39524
131	1,51211404	38,39421	38,69056	38,69062	38,69040	38,69062	38,41624	38,20842	38,20856	38,27161	38,49279
132	1,51594476	38,49148	38,78858	38,78864	38,78842	38,78864	38,51356	38,30521	38,30535	38,36857	38,59030
133	1,51977428	38,58871	38,88656	38,88662	38,88641	38,88662	38,61085	38,40198	38,40212	38,46549	38,68779
134	1,52360263	38,68592	38,98452	38,98458	38,98436	38,98458	38,70811	38,49871	38,49885	38,56239	38,78524
135	1,52742979	38,78309	39,08244	39,08251	39,08229	39,08251	38,80534	38,59542	38,59556	38,65926	38,88267
136	1,53125576	38,88024	39,18034	39,18040	39,18018	39,18040	38,90254	38,69210	38,69223	38,75609	38,98006
137	1,53508055	38,97736	39,27820	39,27827	39,27805	39,27827	38,99972	38,78874	38,78888	38,85290	39,07743
138	1,53890415	39,07444	39,37604	39,37610	39,37588	39,37610	39,09686	38,88536	38,88550	38,94967	39,17476
139	1,54272657	39,17150	39,47384	39,47391	39,47368	39,47391	39,19397	38,98194	38,98208	39,04642	39,27207
140	1,54654781	39,26852	39,57162	39,57168	39,57146	39,57168	39,29105	39,07850	39,07864	39,14313	39,36934
141	1,55036786	39,36552	39,66936	39,66943	39,66920	39,66943	39,38810	39,17502	39,17516	39,23982	39,46659
142	1,55418673	39,46248	39,76708	39,76714	39,76692	39,76714	39,48512	39,27152	39,27166	39,33647	39,56380
143	1,55800441	39,55942	39,86476	39,86482	39,86460	39,86482	39,58211	39,36799	39,36813	39,43310	39,66099
144	1,56182091	39,65632	39,96241	39,96248	39,96225	39,96248	39,67907	39,46442	39,46456	39,52970	39,75814
145	1,56563623	39,75320	40,06003	40,06010	40,05987	40,06010	39,77600	39,56083	39,56097	39,62626	39,85526
146	1,56945037	39,85004	40,15763	40,15769	40,15747	40,15769	39,87290	39,65720	39,65735	39,72280	39,95236
147	1,57326332	39,94686	40,25519	40,25525	40,25503	40,25525	39,96977	39,75355	39,75369	39,81930	40,04942
148	1,57707509	40,04364	40,35272	40,35279	40,35256	40,35279	40,06661	39,84987	39,85001	39,91578	40,14645
149	1,58088568	40,14040	40,45022	40,45029	40,45006	40,45029	40,16343	39,94615	39,94630	40,01222	40,24346
150	1,58469509	40,23712	40,54769	40,54776	40,54753	40,54776	40,26021	40,04241	40,04256	40,10864	40,34043
151	1,58850331	40,33382	40,64514	40,64520	40,64497	40,64520	40,35696	40,13864	40,13878	40,20503	40,43737

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
152	1,59231036	40,43048	40,74255	40,74261	40,74238	40,74261	40,45368	40,23484	40,23498	40,30138	40,53429
153	1,59611622	40,52712	40,83993	40,83999	40,83976	40,83999	40,55037	40,33100	40,33115	40,39771	40,63117
154	1,59992090	40,62372	40,93728	40,93734	40,93711	40,93734	40,64703	40,42714	40,42729	40,49401	40,72802
155	1,60372440	40,72030	41,03460	41,03466	41,03443	41,03466	40,74366	40,52325	40,52339	40,59027	40,82485
156	1,60752672	40,81684	41,13189	41,13196	41,13172	41,13196	40,84026	40,61933	40,61947	40,68651	40,92164
157	1,61132786	40,91336	41,22915	41,22922	41,22898	41,22922	40,93683	40,71537	40,71552	40,78272	41,01840
158	1,61512782	41,00984	41,32638	41,32645	41,32621	41,32645	41,03337	40,81139	40,81154	40,87889	41,11513
159	1,61892660	41,10630	41,42358	41,42364	41,42341	41,42364	41,12988	40,90738	40,90753	40,97504	41,21184
160	1,62272420	41,20272	41,52075	41,52081	41,52058	41,52081	41,22636	41,00334	41,00349	41,07116	41,30851
161	1,62652062	41,29912	41,61789	41,61795	41,61772	41,61795	41,32281	41,09927	41,09942	41,16725	41,40515
162	1,63031587	41,39548	41,71500	41,71506	41,71483	41,71506	41,41923	41,19517	41,19532	41,26330	41,50177
163	1,63410993	41,49182	41,81208	41,81214	41,81191	41,81214	41,51562	41,29104	41,29118	41,35933	41,59835
164	1,63790281	41,58812	41,90912	41,90919	41,90896	41,90919	41,61198	41,38688	41,38702	41,45533	41,69490
165	1,64169452	41,68440	42,00614	42,00621	42,00597	42,00621	41,70831	41,48269	41,48283	41,55130	41,79142
166	1,64548504	41,78065	42,10313	42,10320	42,10296	42,10320	41,80461	41,57846	41,57861	41,64723	41,88792
167	1,64927439	41,87686	42,20009	42,20016	42,19992	42,20016	41,90088	41,67421	41,67437	41,74314	41,98438
168	1,65306256	41,97305	42,29702	42,29709	42,29685	42,29709	41,99713	41,76994	41,77009	41,83902	42,08081
169	1,65684955	42,06920	42,39392	42,39398	42,39374	42,39398	42,09334	41,86563	41,86578	41,93487	42,17721
170	1,66063537	42,16533	42,49078	42,49085	42,49061	42,49085	42,18952	41,96129	41,96144	42,03069	42,27359
171	1,66442000	42,26142	42,58762	42,58769	42,58745	42,58769	42,28567	42,05692	42,05707	42,12648	42,36993
172	1,66820347	42,35749	42,68443	42,68450	42,68426	42,68450	42,38179	42,15252	42,15267	42,22224	42,46624
173	1,67198575	42,45353	42,78121	42,78127	42,78103	42,78127	42,47788	42,24809	42,24824	42,31797	42,56253
174	1,67576685	42,54953	42,87795	42,87802	42,87778	42,87802	42,57394	42,34363	42,34378	42,41367	42,65878
175	1,67954678	42,64551	42,97467	42,97474	42,97450	42,97474	42,66997	42,43914	42,43930	42,50934	42,75500
176	1,68332554	42,74146	43,07136	43,07143	43,07118	43,07143	42,76598	42,53463	42,53478	42,60498	42,85119
177	1,68710312	42,83737	43,16802	43,16808	43,16784	43,16808	42,86195	42,63008	42,63023	42,70059	42,94736
178	1,69087952	42,93326	43,26464	43,26471	43,26447	43,26471	42,95789	42,72550	42,72566	42,79617	43,04349

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
179	1,69465474	43,02912	43,36124	43,36131	43,36106	43,36131	43,05380	42,82090	42,82105	42,89172	43,13959
180	1,69842880	43,12494	43,45781	43,45788	43,45763	43,45788	43,14968	42,91626	42,91641	42,98724	43,23567
181	1,70220167	43,22074	43,55434	43,55441	43,55417	43,55441	43,24554	43,01159	43,01175	43,08273	43,33171
182	1,70597337	43,31651	43,65085	43,65092	43,65067	43,65092	43,34136	43,10690	43,10705	43,17819	43,42772
183	1,70974390	43,41225	43,74733	43,74740	43,74715	43,74740	43,43715	43,20217	43,20233	43,27363	43,52371
184	1,71351325	43,50796	43,84377	43,84384	43,84360	43,84384	43,53291	43,29742	43,29757	43,36903	43,61966
185	1,71728143	43,60363	43,94019	43,94026	43,94001	43,94026	43,62865	43,39263	43,39279	43,46440	43,71558
186	1,72104843	43,69928	44,03658	44,03665	44,03640	44,03665	43,72435	43,48782	43,48797	43,55974	43,81148
187	1,72481426	43,79490	44,13293	44,13300	44,13276	44,13300	43,82002	43,58297	43,58313	43,65506	43,90734
188	1,72857891	43,89049	44,22926	44,22933	44,22908	44,22933	43,91567	43,67810	43,67826	43,75034	44,00318
189	1,73234239	43,98605	44,32556	44,32563	44,32538	44,32563	44,01128	43,77319	43,77335	43,84559	44,09898
190	1,73610470	44,08158	44,42182	44,42189	44,42164	44,42189	44,10686	43,86826	43,86842	43,94082	44,19476
191	1,73986584	44,17708	44,51806	44,51813	44,51788	44,51813	44,20242	43,96330	43,96346	44,03601	44,29050
192	1,74362580	44,27255	44,61426	44,61434	44,61409	44,61434	44,29794	44,05831	44,05847	44,13118	44,38621
193	1,74738459	44,36799	44,71044	44,71051	44,71026	44,71051	44,39344	44,15328	44,15344	44,22631	44,48190
194	1,75114221	44,46340	44,80659	44,80666	44,80641	44,80666	44,48890	44,24823	44,24839	44,32142	44,57755
195	1,75489865	44,55878	44,90270	44,90278	44,90252	44,90278	44,58434	44,34315	44,34331	44,41649	44,67318
196	1,75865393	44,65413	44,99879	44,99886	44,99861	44,99886	44,67974	44,43804	44,43820	44,51154	44,76877
197	1,76240803	44,74945	45,09485	45,09492	45,09467	45,09492	44,77512	44,53290	44,53306	44,60656	44,86434
198	1,76616096	44,84474	45,19087	45,19095	45,19069	45,19095	44,87046	44,62773	44,62789	44,70154	44,95988
199	1,76991272	44,94000	45,28687	45,28694	45,28669	45,28694	44,96578	44,72253	44,72269	44,79650	45,05538
200	1,77366331	45,03523	45,38284	45,38291	45,38265	45,38291	45,06107	44,81730	44,81746	44,89143	45,15086
201	1,77741272	45,13043	45,47877	45,47885	45,47859	45,47885	45,15632	44,91204	44,91220	44,98632	45,24630
202	1,78116097	45,22560	45,57468	45,57475	45,57450	45,57475	45,25155	45,00675	45,00692	45,08119	45,34172
203	1,78490805	45,32075	45,67056	45,67063	45,67037	45,67063	45,34675	45,10143	45,10160	45,17603	45,43711
204	1,78865395	45,41586	45,76640	45,76648	45,76622	45,76648	45,44191	45,19609	45,19625	45,27084	45,53246
205	1,79239869	45,51094	45,86222	45,86229	45,86204	45,86229	45,53705	45,29071	45,29087	45,36562	45,62779

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
206	1,79614225	45,60600	45,95801	45,95808	45,95782	45,95808	45,63216	45,38530	45,38547	45,46037	45,72309
207	1,79988465	45,70102	46,05376	46,05384	46,05358	46,05384	45,72724	45,47987	45,48003	45,55509	45,81835
208	1,80362587	45,79601	46,14949	46,14956	46,14930	46,14956	45,82228	45,57440	45,57457	45,64978	45,91359
209	1,80736593	45,89098	46,24519	46,24526	46,24500	46,24526	45,91730	45,66891	45,66907	45,74444	46,00880
210	1,81110482	45,98591	46,34085	46,34093	46,34067	46,34093	46,01229	45,76338	45,76355	45,83907	46,10398
211	1,81484254	46,08082	46,43649	46,43657	46,43631	46,43657	46,10725	45,85783	45,85799	45,93367	46,19913
212	1,81857909	46,17569	46,53210	46,53217	46,53191	46,53217	46,20218	45,95224	45,95241	46,02825	46,29425
213	1,82231447	46,27054	46,62768	46,62775	46,62749	46,62775	46,29708	46,04663	46,04679	46,12279	46,38933
214	1,82604868	46,36535	46,72322	46,72330	46,72304	46,72330	46,39195	46,14099	46,14115	46,21730	46,48439
215	1,82978173	46,46014	46,81874	46,81882	46,81855	46,81882	46,48679	46,23531	46,23548	46,31178	46,57942
216	1,83351361	46,55489	46,91423	46,91431	46,91404	46,91431	46,58160	46,32961	46,32978	46,40624	46,67442
217	1,83724432	46,64962	47,00969	47,00976	47,00950	47,00976	46,67638	46,42388	46,42405	46,50066	46,76939
218	1,84097386	46,74432	47,10512	47,10519	47,10493	47,10519	46,77113	46,51812	46,51829	46,59506	46,86433
219	1,84470224	46,83899	47,20051	47,20059	47,20032	47,20059	46,86586	46,61233	46,61250	46,68942	46,95924
220	1,84842945	46,93362	47,29588	47,29596	47,29569	47,29596	46,96055	46,70651	46,70668	46,78376	47,05412
221	1,85215549	47,02823	47,39122	47,39130	47,39103	47,39130	47,05521	46,80066	46,80083	46,87806	47,14898
222	1,85588036	47,12281	47,48653	47,48661	47,48634	47,48661	47,14984	46,89478	46,89495	46,97234	47,24380
223	1,85960407	47,21736	47,58181	47,58188	47,58162	47,58188	47,24445	46,98887	46,98904	47,06659	47,33859
224	1,86332661	47,31188	47,67706	47,67713	47,67687	47,67713	47,33902	47,08293	47,08310	47,16081	47,43335
225	1,86704799	47,40637	47,77228	47,77235	47,77208	47,77235	47,43356	47,17696	47,17713	47,25499	47,52808
226	1,87076820	47,50083	47,86747	47,86754	47,86727	47,86754	47,52808	47,27097	47,27114	47,34915	47,62279
227	1,87448725	47,59526	47,96263	47,96270	47,96243	47,96270	47,62256	47,36494	47,36511	47,44328	47,71746
228	1,87820513	47,68966	48,05775	48,05783	48,05756	48,05783	47,71702	47,45889	47,45906	47,53738	47,81210
229	1,88192184	47,78403	48,15285	48,15293	48,15266	48,15293	47,81144	47,55280	47,55297	47,63145	47,90672
230	1,88563739	47,87837	48,24792	48,24800	48,24773	48,24800	47,90584	47,64669	47,64686	47,72549	48,00130
231	1,88935177	47,97269	48,34296	48,34304	48,34277	48,34304	48,00021	47,74054	47,74071	47,81950	48,09585
232	1,89306499	48,06697	48,43798	48,43805	48,43778	48,43805	48,09454	47,83437	47,83454	47,91348	48,19038

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
233	1,89677705	48,16122	48,53296	48,53303	48,53276	48,53303	48,18885	47,92816	47,92834	48,00744	48,28487
234	1,90048794	48,25545	48,62791	48,62798	48,62771	48,62798	48,28313	48,02193	48,02211	48,10136	48,37934
235	1,90419767	48,34964	48,72283	48,72291	48,72263	48,72291	48,37738	48,11567	48,11584	48,19525	48,47378
236	1,90790623	48,44380	48,81772	48,81780	48,81752	48,81780	48,47159	48,20938	48,20955	48,28912	48,56818
237	1,91161363	48,53794	48,91258	48,91266	48,91238	48,91266	48,56578	48,30306	48,30323	48,38295	48,66256
238	1,91531986	48,63204	49,00741	49,00749	49,00721	49,00749	48,65994	48,39671	48,39688	48,47676	48,75691
239	1,91902493	48,72612	49,10221	49,10229	49,10202	49,10229	48,75407	48,49033	48,49050	48,57053	48,85122
240	1,92272884	48,82017	49,19699	49,19706	49,19679	49,19706	48,84817	48,58392	48,58409	48,66428	48,94551
241	1,92643159	48,91418	49,29173	49,29181	49,29153	49,29181	48,94224	48,67748	48,67766	48,75799	49,03977
242	1,93013317	49,00817	49,38644	49,38652	49,38624	49,38652	49,03628	48,77101	48,77119	48,85168	49,13400
243	1,93383359	49,10213	49,48112	49,48120	49,48092	49,48120	49,13030	48,86452	48,86469	48,94534	49,22820
244	1,93753285	49,19606	49,57578	49,57586	49,57558	49,57586	49,22428	48,95799	48,95817	49,03897	49,32237
245	1,94123094	49,28995	49,67040	49,67048	49,67020	49,67048	49,31823	49,05143	49,05161	49,13256	49,41650
246	1,94492787	49,38382	49,76499	49,76507	49,76479	49,76507	49,41215	49,14485	49,14503	49,22613	49,51061
247	1,94862364	49,47766	49,85956	49,85964	49,85936	49,85964	49,50605	49,23824	49,23841	49,31967	49,60470
248	1,95231825	49,57147	49,95409	49,95417	49,95389	49,95417	49,59991	49,33159	49,33177	49,41318	49,69875
249	1,95601170	49,66525	50,04860	50,04868	50,04839	50,04868	49,69374	49,42492	49,42510	49,50667	49,79277
250	1,95970398	49,75900	50,14307	50,14315	50,14287	50,14315	49,78755	49,51822	49,51839	49,60012	49,88676
251	1,96339510	49,85273	50,23752	50,23760	50,23731	50,23760	49,88132	49,61148	49,61166	49,69354	49,98072
252	1,96708507	49,94642	50,33193	50,33201	50,33173	50,33201	49,97507	49,70472	49,70490	49,78693	50,07465
253	1,97077387	50,04008	50,42632	50,42640	50,42611	50,42640	50,06879	49,79793	49,79811	49,88030	50,16856
254	1,97446151	50,13371	50,52067	50,52075	50,52047	50,52075	50,16247	49,89111	49,89129	49,97363	50,26243
255	1,97814799	50,22732	50,61500	50,61508	50,61480	50,61508	50,25613	49,98426	49,98444	50,06694	50,35628
256	1,98183331	50,32089	50,70930	50,70938	50,70909	50,70938	50,34976	50,07738	50,07756	50,16021	50,45009
257	1,98551746	50,41444	50,80356	50,80364	50,80336	50,80364	50,44336	50,17048	50,17066	50,25346	50,54387
258	1,98920046	50,50795	50,89780	50,89788	50,89759	50,89788	50,53693	50,26354	50,26372	50,34667	50,63763
259	1,99288230	50,60144	50,99201	50,99209	50,99180	50,99209	50,63047	50,35657	50,35675	50,43986	50,73136

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
260	1,99656298	50,69489	51,08618	51,08627	51,08598	51,08627	50,72398	50,44958	50,44976	50,53302	50,82505
261	2,00024249	50,78832	51,18033	51,18041	51,18013	51,18041	50,81746	50,54255	50,54273	50,62615	50,91872
262	2,00392085	50,88172	51,27445	51,27453	51,27424	51,27453	50,91091	50,63550	50,63568	50,71925	51,01236
263	2,00759805	50,97509	51,36854	51,36862	51,36833	51,36862	51,00433	50,72841	50,72860	50,81232	51,10596
264	2,01127409	51,06843	51,46260	51,46268	51,46239	51,46268	51,09772	50,82130	50,82148	50,90536	51,19954
265	2,01494897	51,16173	51,55663	51,55671	51,55642	51,55671	51,19108	50,91416	50,91434	50,99837	51,29309
266	2,01862269	51,25501	51,65063	51,65071	51,65042	51,65071	51,28442	51,00699	51,00717	51,09135	51,38661
267	2,02229525	51,34826	51,74460	51,74468	51,74439	51,74468	51,37772	51,09979	51,09997	51,18430	51,48010
268	2,02596665	51,44149	51,83854	51,83862	51,83833	51,83862	51,47100	51,19255	51,19274	51,27723	51,57356
269	2,02963690	51,53468	51,93245	51,93253	51,93224	51,93253	51,56424	51,28530	51,28548	51,37012	51,66699
270	2,03330598	51,62784	52,02633	52,02641	52,02612	52,02641	51,65746	51,37801	51,37819	51,46298	51,76039
271	2,03697391	51,72097	52,12018	52,12027	52,11997	52,12027	51,75064	51,47069	51,47087	51,55582	51,85376
272	2,04064067	51,81407	52,21400	52,21409	52,21379	52,21409	51,84380	51,56334	51,56353	51,64863	51,94711
273	2,04430628	51,90715	52,30780	52,30788	52,30759	52,30788	51,93693	51,65596	51,65615	51,74140	52,04042
274	2,04797073	52,00019	52,40156	52,40164	52,40135	52,40164	52,03002	51,74856	51,74875	51,83415	52,13370
275	2,05163403	52,09321	52,49529	52,49538	52,49508	52,49538	52,12309	51,84112	51,84131	51,92687	52,22696
276	2,05529616	52,18619	52,58899	52,58908	52,58878	52,58908	52,21613	51,93366	51,93385	52,01956	52,32018
277	2,05895714	52,27915	52,68267	52,68275	52,68246	52,68275	52,30914	52,02617	52,02635	52,11222	52,41338
278	2,06261696	52,37208	52,77631	52,77640	52,77610	52,77640	52,40212	52,11864	52,11883	52,20485	52,50654
279	2,06627562	52,46497	52,86993	52,87001	52,86971	52,87001	52,49507	52,21109	52,21128	52,29745	52,59968
280	2,06993313	52,55784	52,96351	52,96360	52,96330	52,96360	52,58799	52,30351	52,30370	52,39002	52,69278
281	2,07358947	52,65068	53,05707	53,05715	53,05685	53,05715	52,68088	52,39590	52,39609	52,48256	52,78586
282	2,07724466	52,74349	53,15059	53,15068	53,15038	53,15068	52,77375	52,48826	52,48845	52,57507	52,87891
283	2,08089870	52,83627	53,24409	53,24417	53,24387	53,24417	52,86658	52,58059	52,58078	52,66756	52,97193
284	2,08455157	52,92902	53,33755	53,33764	53,33734	53,33764	52,95938	52,67289	52,67308	52,76001	53,06491
285	2,08820329	53,02174	53,43099	53,43108	53,43078	53,43108	53,05216	52,76516	52,76535	52,85244	53,15787
286	2,09185385	53,11443	53,52440	53,52448	53,52418	53,52448	53,14490	52,85741	52,85760	52,94483	53,25080

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
287	2,09550326	53,20709	53,61778	53,61786	53,61756	53,61786	53,23762	52,94962	52,94981	53,03720	53,34370
288	2,09915150	53,29973	53,71112	53,71121	53,71091	53,71121	53,33030	53,04181	53,04200	53,12954	53,43657
289	2,10279860	53,39233	53,80444	53,80453	53,80423	53,80453	53,42296	53,13396	53,13415	53,22184	53,52942
290	2,10644453	53,48491	53,89773	53,89782	53,89751	53,89782	53,51559	53,22609	53,22628	53,31412	53,62223
291	2,11008931	53,57745	53,99099	53,99108	53,99077	53,99108	53,60819	53,31818	53,31838	53,40637	53,71501
292	2,11373293	53,66997	54,08422	54,08431	54,08400	54,08431	53,70075	53,41025	53,41044	53,49859	53,80776
293	2,11737540	53,76245	54,17742	54,17751	54,17720	54,17751	53,79329	53,50229	53,50248	53,59078	53,90049
294	2,12101671	53,85491	54,27059	54,27068	54,27037	54,27068	53,88580	53,59430	53,59449	53,68294	53,99318
295	2,12465686	53,94734	54,36373	54,36382	54,36351	54,36382	53,97828	53,68628	53,68647	53,77508	54,08585
296	2,12829586	54,03973	54,45684	54,45693	54,45662	54,45693	54,07074	53,77823	53,77842	53,86718	54,17848
297	2,13193370	54,13210	54,54992	54,55001	54,54970	54,55001	54,16316	53,87015	53,87035	53,95925	54,27109
298	2,13557039	54,22444	54,64298	54,64306	54,64276	54,64306	54,25555	53,96205	53,96224	54,05130	54,36366
299	2,13920592	54,31675	54,73600	54,73609	54,73578	54,73609	54,34791	54,05391	54,05410	54,14331	54,45621
300	2,14284029	54,40903	54,82899	54,82908	54,82877	54,82908	54,44025	54,14574	54,14594	54,23530	54,54873
301	2,14647351	54,50128	54,92196	54,92204	54,92173	54,92204	54,53255	54,23755	54,23774	54,32726	54,64122
302	2,15010557	54,59351	55,01489	55,01498	55,01467	55,01498	54,62483	54,32932	54,32952	54,41918	54,73367
303	2,15373648	54,68570	55,10779	55,10788	55,10757	55,10788	54,71707	54,42107	54,42127	54,51108	54,82610
304	2,15736623	54,77786	55,20067	55,20076	55,20045	55,20076	54,80929	54,51279	54,51298	54,60295	54,91850
305	2,16099482	54,87000	55,29351	55,29360	55,29329	55,29360	54,90147	54,60448	54,60467	54,69479	55,01087
306	2,16462227	54,96210	55,38633	55,38642	55,38611	55,38642	54,99363	54,69613	54,69633	54,78660	55,10322
307	2,16824855	55,05418	55,47911	55,47920	55,47889	55,47920	55,08576	54,78776	54,78796	54,87838	55,19553
308	2,17187368	55,14622	55,57187	55,57196	55,57165	55,57196	55,17786	54,87936	54,87956	54,97013	55,28781
309	2,17549766	55,23824	55,66460	55,66469	55,66437	55,66469	55,26993	54,97094	54,97113	55,06186	55,38006
310	2,17912047	55,33023	55,75730	55,75738	55,75707	55,75738	55,36197	55,06248	55,06268	55,15355	55,47229
311	2,18274214	55,42218	55,84996	55,85005	55,84974	55,85005	55,45398	55,15399	55,15419	55,24521	55,56448
312	2,18636265	55,51411	55,94260	55,94269	55,94238	55,94269	55,54596	55,24547	55,24567	55,33685	55,65664
313	2,18998200	55,60601	56,03521	56,03530	56,03498	56,03530	55,63791	55,33693	55,33713	55,42846	55,74878

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
314	2,19360020	55,69788	56,12779	56,12788	56,12756	56,12788	55,72983	55,42835	55,42855	55,52003	55,84089
315	2,19721724	55,78972	56,22034	56,22043	56,22011	56,22043	55,82173	55,51975	55,51995	55,61158	55,93296
316	2,20083313	55,88153	56,31286	56,31295	56,31263	56,31295	55,91359	55,61112	55,61132	55,70310	56,02501
317	2,20444787	55,97332	56,40535	56,40544	56,40512	56,40544	56,00543	55,70246	55,70266	55,79459	56,11703
318	2,20806145	56,06507	56,49781	56,49790	56,49758	56,49790	56,09723	55,79376	55,79397	55,88605	56,20901
319	2,21167387	56,15679	56,59024	56,59033	56,59001	56,59033	56,18901	55,88504	55,88525	55,97748	56,30097
320	2,21528514	56,24849	56,68264	56,68273	56,68241	56,68273	56,28075	55,97629	55,97650	56,06888	56,39290
321	2,21889525	56,34015	56,77501	56,77511	56,77479	56,77511	56,37247	56,06752	56,06772	56,16025	56,48480
322	2,22250421	56,43179	56,86736	56,86745	56,86713	56,86745	56,46416	56,15871	56,15891	56,25159	56,57667
323	2,22611201	56,52339	56,95967	56,95976	56,95944	56,95976	56,55582	56,24987	56,25007	56,34291	56,66852
324	2,22971866	56,61497	57,05195	57,05205	57,05172	57,05205	56,64745	56,34100	56,34121	56,43419	56,76033
325	2,23332416	56,70652	57,14421	57,14430	57,14398	57,14430	56,73905	56,43211	56,43231	56,52545	56,85211
326	2,23692850	56,79803	57,23643	57,23652	57,23620	57,23652	56,83062	56,52318	56,52339	56,61667	56,94386
327	2,24053168	56,88952	57,32863	57,32872	57,32840	57,32872	56,92216	56,61423	56,61443	56,70787	57,03559
328	2,24413371	56,98098	57,42079	57,42088	57,42056	57,42088	57,01367	56,70525	56,70545	56,79904	57,12728
329	2,24773458	57,07241	57,51293	57,51302	57,51270	57,51302	57,10515	56,79623	56,79644	56,89017	57,21895
330	2,25133430	57,16381	57,60503	57,60513	57,60480	57,60513	57,19661	56,88719	56,88740	56,98128	57,31058
331	2,25493287	57,25519	57,69711	57,69720	57,69688	57,69720	57,28803	56,97812	56,97833	57,07236	57,40219
332	2,25853028	57,34653	57,78916	57,78925	57,78893	57,78925	57,37943	57,06902	57,06923	57,16341	57,49376
333	2,26212653	57,43784	57,88118	57,88127	57,88094	57,88127	57,47079	57,15989	57,16010	57,25443	57,58531
334	2,26572163	57,52912	57,97316	57,97326	57,97293	57,97326	57,56213	57,25073	57,25094	57,34543	57,67683
335	2,26931557	57,62038	58,06512	58,06522	58,06489	58,06522	57,65343	57,34155	57,34175	57,43639	57,76832
336	2,27290836	57,71160	58,15705	58,15714	58,15682	58,15714	57,74471	57,43233	57,43254	57,52732	57,85978
337	2,27650000	57,80280	58,24895	58,24904	58,24872	58,24904	57,83596	57,52308	57,52329	57,61823	57,95121
338	2,28009048	57,89396	58,34082	58,34091	58,34059	58,34091	57,92718	57,61381	57,61402	57,70910	58,04261
339	2,28367980	57,98510	58,43266	58,43275	58,43243	58,43275	58,01837	57,70451	57,70471	57,79995	58,13398
340	2,28726797	58,07621	58,52447	58,52457	58,52424	58,52457	58,10952	57,79517	57,79538	57,89076	58,22532

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
341	2,29085498	58,16729	58,61625	58,61635	58,61602	58,61635	58,20066	57,88581	57,88602	57,98155	58,31663
342	2,29444084	58,25834	58,70800	58,70810	58,70777	58,70810	58,29176	57,97642	57,97663	58,07231	58,40791
343	2,29802554	58,34935	58,79973	58,79982	58,79949	58,79982	58,38283	58,06700	58,06721	58,16304	58,49917
344	2,30160909	58,44035	58,89142	58,89151	58,89118	58,89151	58,47387	58,15755	58,15776	58,25374	58,59039
345	2,30519148	58,53131	58,98308	58,98318	58,98284	58,98318	58,56488	58,24807	58,24828	58,34441	58,68158
346	2,30877272	58,62224	59,07472	59,07481	59,07448	59,07481	58,65587	58,33856	58,33877	58,43505	58,77275
347	2,31235280	58,71314	59,16632	59,16641	59,16608	59,16641	58,74682	58,42902	58,42923	58,52566	58,86388
348	2,31593172	58,80401	59,25789	59,25799	59,25765	59,25799	58,83775	58,51945	58,51966	58,61624	58,95499
349	2,31950949	58,89486	59,34944	59,34953	59,34920	59,34953	58,92864	58,60986	58,61007	58,70680	59,04607
350	2,32308611	58,98567	59,44095	59,44105	59,44071	59,44105	59,01951	58,70023	58,70044	58,79732	59,13711
351	2,32666157	59,07645	59,53244	59,53253	59,53220	59,53253	59,11034	58,79058	58,79079	58,88782	59,22813
352	2,33023587	59,16721	59,62389	59,62399	59,62365	59,62399	59,20115	58,88089	58,88111	58,97828	59,31912
353	2,33380902	59,25794	59,71532	59,71542	59,71508	59,71542	59,29193	58,97118	58,97139	59,06872	59,41008
354	2,33738101	59,34863	59,80672	59,80681	59,80648	59,80681	59,38268	59,06144	59,06165	59,15912	59,50101
355	2,34095184	59,43930	59,89808	59,89818	59,89784	59,89818	59,47340	59,15167	59,15188	59,24950	59,59191
356	2,34452152	59,52994	59,98942	59,98952	59,98918	59,98952	59,56409	59,24187	59,24208	59,33985	59,68278
357	2,34809004	59,62055	60,08073	60,08083	60,08049	60,08083	59,65475	59,33204	59,33225	59,43017	59,77362
358	2,35165741	59,71113	60,17201	60,17211	60,17177	60,17211	59,74538	59,42218	59,42239	59,52046	59,86443
359	2,35522362	59,80168	60,26326	60,26335	60,26301	60,26335	59,83598	59,51229	59,51250	59,61072	59,95522
360	2,35878867	59,89220	60,35448	60,35457	60,35423	60,35457	59,92655	59,60237	59,60259	59,70095	60,04597
361	2,36235257	59,98269	60,44567	60,44576	60,44542	60,44576	60,01710	59,69243	59,69264	59,79116	60,13669
362	2,36591531	60,07315	60,53683	60,53692	60,53658	60,53692	60,10761	59,78245	59,78266	59,88133	60,22739
363	2,36947689	60,16358	60,62796	60,62805	60,62771	60,62805	60,19810	59,87244	59,87266	59,97147	60,31805
364	2,37303732	60,25399	60,71906	60,71915	60,71881	60,71915	60,28855	59,96241	59,96263	60,06159	60,40869
365	2,37659658	60,34436	60,81013	60,81023	60,80988	60,81023	60,37898	60,05235	60,05256	60,15167	60,49929
366	2,38015470	60,43470	60,90117	60,90127	60,90093	60,90127	60,46937	60,14225	60,14247	60,24173	60,58987
367	2,38371165	60,52502	60,99218	60,99228	60,99194	60,99228	60,55974	60,23213	60,23235	60,33175	60,68041

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
368	2,38726745	60,61530	61,08316	61,08326	61,08292	61,08326	60,65008	60,32198	60,32220	60,42175	60,77093
369	2,39082209	60,70556	61,17412	61,17422	61,17387	61,17422	60,74038	60,41180	60,41202	60,51172	60,86142
370	2,39437557	60,79579	61,26504	61,26514	61,26479	61,26514	60,83066	60,50159	60,50181	60,60166	60,95188
371	2,39792790	60,88598	61,35593	61,35603	61,35569	61,35603	60,92091	60,59135	60,59157	60,69157	61,04231
372	2,40147906	60,97615	61,44680	61,44690	61,44655	61,44690	61,01113	60,68108	60,68130	60,78145	61,13271
373	2,40502907	61,06629	61,53763	61,53773	61,53739	61,53773	61,10132	60,77078	60,77100	60,87130	61,22308
374	2,40857792	61,15640	61,62844	61,62854	61,62819	61,62854	61,19148	60,86046	60,86068	60,96112	61,31342
375	2,41212562	61,24648	61,71921	61,71931	61,71896	61,71931	61,28161	60,95010	60,95032	61,05091	61,40373
376	2,41567215	61,33653	61,80996	61,81006	61,80971	61,81006	61,37172	61,03972	61,03994	61,14067	61,49401
377	2,41921753	61,42655	61,90067	61,90077	61,90042	61,90077	61,46179	61,12930	61,12952	61,23041	61,58426
378	2,42276175	61,51654	61,99136	61,99146	61,99111	61,99146	61,55183	61,21886	61,21908	61,32011	61,67448
379	2,42630480	61,60650	62,08202	62,08212	62,08177	62,08212	61,64185	61,30838	61,30860	61,40979	61,76468
380	2,42984670	61,69644	62,17264	62,17274	62,17239	62,17274	61,73183	61,39788	61,39810	61,49943	61,85484
381	2,43338745	61,78634	62,26324	62,26334	62,26299	62,26334	61,82178	61,48735	61,48757	61,58905	61,94498
382	2,43692703	61,87621	62,35381	62,35391	62,35356	62,35391	61,91171	61,57679	61,57701	61,67864	62,03508
383	2,44046545	61,96606	62,44435	62,44445	62,44409	62,44445	62,00161	61,66620	61,66642	61,76819	62,12515
384	2,44400271	62,05587	62,53485	62,53495	62,53460	62,53495	62,09147	61,75558	61,75580	61,85772	62,21520
385	2,44753882	62,14566	62,62533	62,62543	62,62508	62,62543	62,18131	61,84493	61,84515	61,94722	62,30522
386	2,45107376	62,23541	62,71578	62,71588	62,71553	62,71588	62,27112	61,93425	61,93447	62,03669	62,39520
387	2,45460755	62,32514	62,80620	62,80630	62,80595	62,80630	62,36090	62,02354	62,02377	62,12613	62,48516
388	2,45814017	62,41484	62,89659	62,89669	62,89634	62,89669	62,45064	62,11281	62,11303	62,21554	62,57509
389	2,46167163	62,50451	62,98695	62,98705	62,98670	62,98705	62,54036	62,20204	62,20226	62,30492	62,66499
390	2,46520194	62,59414	63,07728	63,07738	63,07703	63,07738	62,63005	62,29125	62,29147	62,39427	62,75485
391	2,46873108	62,68375	63,16758	63,16768	63,16733	63,16768	62,71971	62,38042	62,38064	62,48360	62,84469
392	2,47225906	62,77333	63,25785	63,25795	63,25760	63,25795	62,80934	62,46957	62,46979	62,57289	62,93450
393	2,47578588	62,86288	63,34809	63,34819	63,34784	63,34819	62,89894	62,55868	62,55891	62,66215	63,02428
394	2,47931154	62,95240	63,43830	63,43840	63,43805	63,43840	62,98852	62,64777	62,64800	62,75139	63,11403

t/°C	Wt	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
395	2,48283604	63,04189	63,52848	63,52859	63,52823	63,52859	63,07806	62,73683	62,73705	62,84059	63,20375
396	2,48635938	63,13135	63,61864	63,61874	63,61838	63,61874	63,16757	62,82586	62,82608	62,92977	63,29344
397	2,48988155	63,22079	63,70876	63,70886	63,70850	63,70886	63,25705	62,91485	62,91508	63,01891	63,38310
398	2,49340256	63,31019	63,79885	63,79895	63,79859	63,79895	63,34651	63,00382	63,00405	63,10803	63,47274
399	2,49692241	63,39956	63,88891	63,88902	63,88866	63,88902	63,43593	63,09276	63,09299	63,19712	63,56234
400	2,50044110	63,48891	63,97895	63,97905	63,97869	63,97905	63,52533	63,18168	63,18190	63,28618	63,65191
401	2,50395863	63,57822	64,06895	64,06905	64,06869	64,06905	63,61469	63,27056	63,27079	63,37521	63,74145
402	2,50747499	63,66750	64,15892	64,15903	64,15866	64,15903	63,70403	63,35941	63,35964	63,46420	63,83097
403	2,51099019	63,75676	64,24887	64,24897	64,24861	64,24897	63,79333	63,44823	63,44846	63,55317	63,92045
404	2,51450423	63,84598	64,33878	64,33888	64,33852	64,33888	63,88261	63,53703	63,53725	63,64211	64,00991
405	2,51801711	63,93518	64,42866	64,42877	64,42841	64,42877	63,97186	63,62579	63,62602	63,73103	64,09933
406	2,52152882	64,02434	64,51852	64,51862	64,51826	64,51862	64,06107	63,71452	63,71475	63,81991	64,18873
407	2,52503936	64,11348	64,60834	64,60845	64,60808	64,60845	64,15026	63,80323	63,80346	63,90876	64,27809
408	2,52854875	64,20259	64,69814	64,69824	64,69788	64,69824	64,23942	63,89191	63,89214	63,99758	64,36743
409	2,53205697	64,29167	64,78790	64,78801	64,78764	64,78801	64,32855	63,98055	63,98078	64,08637	64,45673
410	2,53556402	64,38071	64,87764	64,87774	64,87738	64,87774	64,41765	64,06917	64,06940	64,17514	64,54601
411	2,53906991	64,46973	64,96734	64,96745	64,96708	64,96745	64,50672	64,15776	64,15799	64,26387	64,63526
412	2,54257464	64,55872	65,05702	65,05712	65,05676	65,05712	64,59576	64,24631	64,24655	64,35258	64,72447
413	2,54607820	64,64768	65,14667	65,14677	65,14640	65,14677	64,68477	64,33484	64,33508	64,44125	64,81366
414	2,54958059	64,73661	65,23628	65,23639	65,23602	65,23639	64,77375	64,42334	64,42357	64,52990	64,90282
415	2,55308182	64,82551	65,32587	65,32597	65,32560	65,32597	64,86270	64,51181	64,51205	64,61851	64,99195
416	2,55658188	64,91438	65,41542	65,41553	65,41516	65,41553	64,95162	64,60025	64,60049	64,70710	65,08105
417	2,56008078	65,00322	65,50495	65,50506	65,50469	65,50506	65,04051	64,68866	64,68890	64,79566	65,17012
418	2,56357851	65,09203	65,59445	65,59455	65,59418	65,59455	65,12937	64,77705	64,77728	64,88418	65,25915
419	2,56707508	65,18081	65,68391	65,68402	65,68365	65,68402	65,21821	64,86540	64,86563	64,97268	65,34816
420	2,57057048	65,26957	65,77335	65,77346	65,77309	65,77346	65,30701	64,95372	64,95395	65,06115	65,43714

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **KIZILDAŞ E.**, Kritik Yol Metodu (CPM) ile Proje Planlamasında Teknolojinin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli, 1999.

[2] **KIZILDAŞ E.**, İlaç Bilişim Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2004, 2004Y2976.

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Ankara'nın Çankaya ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. Lise öğrenimini İstanbul Deniz Lisesinde ve üniversite öğrenimini Deniz Harp Okulu Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamlayarak 1995 yılında teğmen olarak mezun oldu. 1996-1999 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi'nde Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Organizasyon Bölümü'nde Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı. 1995-1996 yıllarında Derince Eğitim Merkezi K.lığında Harekat Elektronik Kursu alarak 1996-1997 yıllarında savaş gemilerinde elektronik subaylığı yaptı. 1997-1998 yılları arasında Boğaziçi Üniversitesi'nde OBİ kursuna katıldı. 2001-2004 yılları arasında Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 1998-2007 yılları arasında Genelkurmay Başkanlığı, 2007-2010 yılları arasında Envanter Kontrol Merkezi K.lığı ve 2010 yılından günümüze kadar Deniz Kuvvetleri K.lığında bilgi sistemleri kadrolarında çalıştı. Bu çalışmaları sırasında; proje yöneticiliği, siber güvenlik, ERP yazılımları, network ve sistem yöneticiliği görevlerinde bulunmuştur. Halen Deniz Kuvvetleri K.lığında Bilgi Sistemleri İşletme Şube Müdürü olarak görev yapmaktadır.