

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**J-TİP ISIL ÇİFT KALİBRASYONUNDA SICAKLIK KUYUSU ISI
DAĞILIMI KAYNAKLI BELİRSİZLİĞİN AZALTILMASI**

ZEYNEP ERBİL ÇAKIR

Yüksek Lisans Tezi

2017

**J-TİPİ ISIL ÇİFT KALİBRASYONUNDA SICAKLIK KUYUSU
ISI DAĞILIMI KAYNAKLI BELİRSİZLİĞİN AZALTILMASI**

**REDUCING TEMPERATURE WELL INHOMOGENEITY
BASED UNCERTAINTY IN J-TYPE THERMOCOUPLE
CALIBRATION**

ZEYNEP ERBİL ÇAKIR

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
KALİTE Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2017

'J-Tipi Isıl Çift Kalibrasyonunda Sıcaklık Kuyusu Isı Dağılımı Kaynaklı Belirsizliğin Azaltılması' başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 13/09/2017 tarihinde, **KALİTE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Kumru Didem ATALAY

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Üye : Yrd. Doç Dr. Salih TEKİN

ONAY

/09/2017

Prof. Dr. Murat Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü



BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 20 / 09 / 2017

Öğrencinin Adı, Soyadı : Zeynep ERBİL ÇAKIR
Öğrencinin Numarası : 21510347
Anabilim Dalı : Kalite Mühendisliği Anabilim Dalı
Program : Kalite Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı
Danışmanın Adı, Soyadı : Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ
Tez Başlığı : J-Tipi Isıl Çift Kalibrasyonunda Sıcaklık Kuyusu Isı Dağılımı
Kaynaklı Belirsizliğin Azaltılması

Yukarıda belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmasının; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 84 sayfalık kısmına ilişkin, 20 / 09 / 2017 tarihinde şahsım tarafından 'Turnitin' adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtremeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik %13'dür.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

'Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami oranlarına tez çalışmasının herhangi bir intihal içemediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek ger türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrencinin İmzası

Onay
20/09/2017

Öğrenci Danışmanı
Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ

TEŐEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında büyük emeği olan, tecrübe ve zamanını benimle paylaőarak yol gösterici değerli hocam ve tez danıőmanım Doç. Dr. Yusuf Tansel İ' e;

Tez çalıőmalarımnda beni destekleyen anneme, babama, kardeőime, Sn. Ahmet DALKILIN' a, Sn. Erbir EKER' e ve Sn. Merve AYGIN' a;

Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen eőim Kağan ÇAKIR' a teőekkürü borç bilirim.

ÖZ

J-TİPİ ISIL ÇİFT KALİBRASYONUNDA SICAKLIK KUYUSU ISI DAĞILIMI KAYNAKLI BELİRSİZLİĞİN AZALTILMASI

Zeynep ERBİL ÇAKIR

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Kalite Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmada, J tipi ısı çift kalibrasyonunu iyileştirme amacıyla, sıcaklık kuyusu ısı dağılımı kaynaklı belirsizliği düşürmek için Taguchi yöntemi ile deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ısı dağılımını etkilediği düşünülen parametreler belirlenmiş, sıcaklık kuyusu ve uygun uçlar (insertler) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

J-tipi ısı çift kalibrasyonu, sıcaklık kuyusu, kuyu içindeki hazneye yerleştirilen ve ısı transferini sağlayan uç ve standart ısıölçer ile gerçekleştirilmektedir. Isıl çift de standart ısıölçer gibi uç içinde kendine ayrılan haznelere birine yerleştirilmektedir. Deney kapsamında, sıcaklık kuyusu istenen sıcaklığa ayarlanmakta, sıcaklık istikrarlı hale geldiğinde ısı çift ve standart ısıölçerden sıcaklık okuması yapılmaktadır. Standart değerine göre ısı çift kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Uç ise taşıma ve iletim mekanizmalarıyla sıcaklık kuyusu ile standart ısıölçer ve ısı çift arasındaki ısı transferini gerçekleştirilmektedir.

Isı dağılımındaki sıcaklık salınımının, ısınan havanın yükselerek uç ile ısı çift arasında kalan boşluklardan kaçması sonucu olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, sıcaklık salınımını düşürebilmek için belirlenen deney parametreleri ile Taguchi yöntemi kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan parametreler sırasıyla, uç malzemesi, ısı çift daldırma derinliği ve ucun içindeki haznenin geometrisidir.

Çalışma sonucunda ısı çift kalibrasyonunda sıcaklık kuyusu ısı dağılımını en az seviyeye indiren parametre değerleri elde edilmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Deney Tasarımı, Taguchi, Isıl Çift, Kalibrasyon, Belirsizlik

DANIŞMAN: Doç. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi, Kalite Mühendisliği Anabilim Dalı

ABSTRACT

REDUCING TEMPERATURE WELL INHOMOGENEITY BASED UNCERTAINTY IN J-TYPE THERMOCOUPLE CALIBRATION

Zeynep ERBİL ÇAKIR

Baskent University Institute of Science

Department of Quality Engineering

In this study, design of experiments by Taguchi method have been performed in order to reduce temperature oscillation arised uncertainty during calibration of J-type thermocouples. Within the scope of this study, parameters which are assumed to effect temperature oscillations have been determined and necessary experiments have been conducted using temperature well and proper inserts.

Calibration of a J-type thermocouple is performed using a temperature well, an insert located inside the temperature well and standard thermometer which is further located inside the hole in the insert. Thermocouple is also located inside the insert. During the experiment, temperature well is adjusted to the desired temperature at which the calibration is performed and readings from both the thermocouple and standard thermometer are acquired when the temperature inside the temperature well is stabilized. Calibration process is finalized based on the readings from both the thermocouple and the thermometer. Moreover, the insert inside the temperature well provides the heat transfer between the walls of the temperature well and standard thermometer and the thermocouple which is being calibrated.

The reason of the temperatue oscillations during calibration is assumed to be the heat flux between the temperature well, insert and thermocouple. Therefore, a series of controlled experiments has been conducted in order to reduce the temperature oscillations by using proper independant parameters and Taguchi orthogonal array (L_9) . The variables are insert material, thermocouple immersion depth and the geometry of the receptacles inside the insert.

As a result of the study, values for parameters which results in best possible temperature homogeneity for temperature well is achieved.

KEYWORDS: Design of Experiments, Taguchi, Thermocouple, Calibration, Uncertainty

SUPERVISOR: Assoc. Prof. Dr. Yusuf Tansel İC, Baskent University, Department of Quality Engineering

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
ÇİZELGELER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2 KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Isıl Çift	4
2.1.1 Isıl çift EMK değerinin ölçülmesi	6
2.1.2 Referans bağlantı noktası.....	7
2.1.3 Isıl çiftlerin üretimi ve kullanılan malzemeler	8
2.1.4 Isıl çift türleri ve özellikleri	9
2.2 Isıl Çift Kalibrasyonları.....	11
2.2.1 Endüstriyel ölçüm cihazları için kalibrasyonun önemi.....	11
2.2.2 Isıl çift kalibrasyon metodu	12
2.2.3 Kalibrasyon ölçümleri	13
2.3 Ölçüm Belirsizliği	14
2.3.1 Belirsizliğin hesaplanması.....	18
2.3.1.1 <u>Ölçümün modellenmesi</u>	18
2.3.1.2 <u>Standart belirsizliğin A-tipi hesaplanması</u>	18
2.3.1.3 <u>Standart belirsizliğin B-tipi hesaplanması</u>	20
2.3.1.4 <u>Bileşik belirsizliğin hesaplanması</u>	21
2.3.1.5 <u>Genişletilmiş belirsizliklerin belirlenmesi</u>	22
2.3.1.6 <u>Sonuçların raporlanması</u>	22
2.4 Taguchi Metodu	22
2.4.1 Taguchi tasarım aşamaları	22
3 LİTERATÜR	26

4	MALZEME VE METOT	31
4.1	Materyaller ve Özellikleri	31
4.2	Metot	40
4.2.1	Isıl çift karşılaştırmalı kalibrasyon metodu	40
4.2.2	Isı dağılımı hesaplama deneyleri Taguchi metodu	41
5	UYGULAMA	42
5.1	Isıl Çift Kalibrasyonu.....	42
5.1.1	Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı	44
5.1.2	Suyun üçlü noktası ölçümü.....	47
5.1.3	Isıl çift kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi.....	49
5.1.4	Belirsizliğin hesaplanması	51
5.2	Isı Dağılımı için Taguchi Deneyleri.....	58
5.2.1	Varyans Analizi.....	64
6	SONUÇLAR	65
7	KAYNAKLAR LİSTESİ.....	68
8	EKLER LİSTESİ	71
9	EKLER.....	72-81

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Termoelektrik Devre 4
Şekil 2.2	Seeback Voltajı..... 5
Şekil 2.3	J-Tipi ısı çiftin voltmetreye bağlanması 6
Şekil 2.4	Buz noktasının referans noktası olarak kullanılması 7
Şekil 2.5	Karşılaştırmalı yöntemle göre ısı çift kalibrasyon düzeneği..... 12
Şekil 2.6	Toplam belirsizliğin kapsadığı aralığın gösterimi 17
Şekil 2.7	Dikdörtgen dağılımı 20
Şekil 4.1	Isıl Çift Kalibrasyonu Malzemeleri 31
Şekil 4.2	Suyun Üçlü Noktası Deneyi Malzemeleri 32
Şekil 4.3	Isıl Çift rulosu..... 33
Şekil 4.4	Isıl Çift Rulosu 33
Şekil 4.5	Isıl Çift Hazırlanması 34
Şekil 4.6	Isıl Çift Ucuna Kaynak Yapılması..... 34
Şekil 4.7	Standart Platin Direnç Termometresi..... 35
Şekil 4.8	Suyun Üçlü Noktası Grafiği 36
Şekil 4.9	Suyun Üçlü Noktası Hücresi..... 36
Şekil 4.10	Nano volt/mikro ohm metre 37
Şekil 4.11	Kalibratör 37
Şekil 4.12	Sıcaklık Kuyusu 38
Şekil 4.13	Uç Çeşitleri..... 38
Şekil 4.14	Detaylı İncert Çizimi 39
Şekil 5.1	Çalışmanın Akış Şeması..... 43
Şekil 5.2	Sıcaklık Kuyusu Isı Dağılımı Test Düzeneği..... 44
Şekil 5.3	Isıl Çift Daldırma Yöntemleri (a) U Tipi Daldırma (b) Standart Daldırma (c) Teflon Kaplama ile Daldırma 45
Şekil 5.4	Suyun Üçlü Noktasının Hazırlanması 47
Şekil 5.5	Suyun Üçlü Noktasının Oluşturulması 48
Şekil 5.6	Suyun Üçlü Noktasında Ölçümlerin Yapılması 48

Şekil 5.7	Isıl Çift Kalibrasyon Düzenegi.....	50
Şekil 5.8	Belirsizlik faktörlerinin balık kılçığı modeli gösterimi	57
Şekil 5.9	Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi (a) Faktör –A Uç malzemesi (b) Faktör – B Daldırma tipi (c) Daldırma derinliği.....	61

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1	Sık kullanılan ısı çift tipleri..... 9
Çizelge 2.2	Taguchi L ₉ Ortogonal Dizaynı 23
Çizelge 4.1	Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri 40
Çizelge 5.1	1.Deney Sonuçları 46
Çizelge 5.2	Referans SPRT Ölçümleri 50
Çizelge 5.3	Isıl Çift Ölçümleri..... 51
Çizelge 5.4	Belirsizlik Tablosu 56
Çizelge 5.5	L ₉ ortogonal dizaynında faktör ve seviyeler 59
Çizelge 5.6	Taguchi ortogonal tasarımına göre yapılan ısı dağılımı testlerinin sonuçları ve S/N değerleri 60
Çizelge 5.7	Parametre seviyelerinin S/N oranları 61
Çizelge 5.8	İyileştirmeden sonraki belirsizlik tablosu 63
Çizelge 5.9	Anova tablosu 64
Çizelge 6.1	Başlangıç ve Optimum tasarımın karşılaştırılması 65

SİMGELER VE KISALTMALAR

σ	Gerçek standart sapma
μ	Ortalama
s	Standart sapma
ν	Serbestlik derecesi
p	Güvenilirlik derecesi
u_c	Bileşik belirsizlik
U	Genişletilmiş belirsizlik
$u(x)$	Belirsizlik
S/N	Sinyal/Gürültü Oranı
s^2	Varyans
n	Bir denemede test sayısı
y_i	Performans yanıtının i. gözlem değeri
V	Gerilim
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
x_i	i. ölçüm sonucu
\bar{x}	Değerlendirilen n adet sonucu aritmetik ortalaması
ε	Rastgele hata
β	Sistematik hata
EMK	Elektro Motor Kuvvet
ASTM	American Society of Testing and Materials
IEC	International Electrotechnical Commission
SPRT	Standard Platinum Resistance
SÜN	Suyun Üçlü Noktası
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
NIST	National Institute of Standards and Technology
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü
TÜRKAK	Türkiye Akreditasyon Kurumu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

Bu çalışmada amaç, sanayinin çeşitli dallarında sıcaklık ölçümü için sıklıkla kullanılan ısı çiftlerinin kalibrasyonu sırasında kullanılan sıcaklık kuyusundaki ısı dağılım homojenitesine bağlı ölçüm belirsizliğinin iyileştirilmesidir.

Isıl çiftler pek çok üretim prosesinde, üretilen parçanın süreç anında sıcaklığını okumak için kullanılan en kullanışlı malzemedir. Örneğin kompozit yapıları bir parçanın üretiminde, otoklavdaki pişirme işlemi süresince her bir dakikada parçanın pek çok noktasındaki sıcaklığın derecesi çok önemlidir. Prosesi ilerletip sağlıklı bir şekilde sonlandıracak olan bu sıcaklık değeridir. Bunun yanında ısı işlem fırınları, boya kurutma fırınları, sıcak presler gibi parça üretimindeki ısıtmalı tezgâhlar ayrıca buzdolabı, dondurucu gibi soğutmalı tezgâhlar bunun yanı sıra pek çok kimyasal tank tezgâhını içeren süreçlerde ısı çifti kullanılmaktadır. Isıl çiftler hem içerisinde veya üzerinde buldukları ortamın sıcaklığını ölçerler hem de tezgâhların kontrol ya da kayıt ünitesinin çalışabilmesi için gerekli okumayı yaparlar. Isıl çiftlerin başka bir kullanım alanı da ısı dağılımı, sistem doğruluk testi, cihaz doğruluk testi gibi kalibrasyonlarda da kullanılması zorunlu elemanlar olmalarıdır.

Isıl çiftler, yukarıda belirtilen hangi alanda ve hangi şekilde kullanılırsa kullanılsın, bir kalite gereksinimi olarak kalibrasyona ihtiyacı duyarlar. Isıl çift kalibrasyonunda kullanıcı, kullanılan sıcak değerini ya da aralığı belirtir. Kullanıcı ısı çifti seçerken, sürecin bulunması gereken sıcaklık basamaklarını dikkate almalıdır. Çünkü ısı çiftlerinin türüne göre optimum kullanım aralığı değişmektedir. Kalibrasyonda o sıcaklık değerinde ya da değerlerinde yapılır. Isıl çiftlerin kullanıldığı prosesin gereksinimine göre tolerans değeri belirlenir. Belirlenen tolerans değerinin içinde olup olmadığı hesaplanarak kalibrasyon sonrasında hazırlanan sertifikada "hata" değeri belirtilir. Sertifikada ayrıca kullanılan standart cihazların neler olduğu marka, model, seri numarası bilgisi, kalibrasyonu yapan firmanın adı, kalibrasyon yöntemi, kalibrasyonu yapan yetkilinin adı soyadı ünvanı, kalibrasyon tarihi, eğer firmaya bilgisi verilmişse kalibrasyonun son geçerlilik süresi, kalibre edilen cihazın marka, model, seri numarası bilgisi, kalibrasyonun yapıldığı laboratuvarın nem ve sıcaklık değeri ve bunların yanında belirsizlik değeri olmalıdır.

Belirsizlik değeri sertifikalarda mutlaka belirtilmelidir. Bu değer “ \pm değer” şeklinde verilmelidir. Belirsizlik değeri başka bir anlamda ölçümün kalitesini belirten sayısal bir göstergedir. Bu göstergeden faydalanarak kişiler sonucun güvenilirliğini tayin edebilmektedir. Bu değer ölçümün gerçek değer etrafında bulunabileceği aralığı tanımlayan değerdir. Belirsizlik hemen hemen her kalibrasyonda bulunmaktadır. Ortam şartları, yöntemdeki bazı eksiklikler, ölçülen değerle ilgili anlaşılamayan noktalar, analog cihazların okumasında personelin belli yöndeki eğilimi, cihazların sonlu çözünürlüğü, referans cihazın belirsizliğinin tam olarak bilinmemesi gibi birçok faktör buna sebep olmaktadır.

Isıl çiftlerin kalibrasyonundaki belirsizlik değerinde, kullanılan referans standardın belirsizliği ve yıllık kayması, kullanılan referans standardın tekrarlanabilirliği ve buz noktasındaki değişimi, referans standardı okumada faydalanılan cihazın belirsizliği ve çözünürlüğü, kalibre edilen ısıl çiftin tekrarlanabilirliği ve buz noktasındaki değişimi, ısıl çift okumada faydalanılan kalibratörün belirsizliği ve çözünürlüğü, son olarak da kalibrasyonda kullanılan sıcaklık kuyusunun homojenitesi etkilidir.

Isıl çift kalibrasyon ölçümlerinde; ölçüm şartları ve/veya çevre koşullarındaki değişim, ölçüm cihazlarının sonlu çözünürlüğü, ölçüm standartlarının ve referans malzemelerin tam olarak bilinmemesi gibi bir çok nedenden ötürü ölçümde belirsizlikler oluşur. Kalibrasyonun doğruluğu bu belirsizliklerin düşürülmesi ile doğru orantılıdır. Tez çalışması kapsamında ısıl çiftlerin kalibrasyonunda kullanılan sıcaklık kuyusunun ısı dağılımı kaynaklı belirsizliğin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. İyileştirme yöntemi olarak bir deney tasarımı metodu olan ‘Taguchi Metodu’ kullanılmıştır.

Bu çalışmada ilk önce ısıl çift kalibrasyonu yapılmış, ardından belirsizlik bütçesi hazırlanmış, sonrasında da bütçe elemanlarının teker teker belirsizlikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu belirsizliklerden bir tanesi sıcaklık kuyusu ısı dağılımından gelen belirsizliktir. Bunun için ısı dağılımı testi yapılarak bulunan belirsizlik değeri hesaplanmıştır. Ardından belirsizlik değerini düşürme amacıyla bu faktörde iyileştirme yapılarak toplam belirsizlik değeri düşürülmüştür. Tezin ikinci bölümünde çalışmada kullanılan kuramsal temeller açıklanmıştır. Üçüncü bölümde literatüre yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ısıl çift kalibrasyonu, sıcaklık

kuyusu ısı dağılımı testleri ile ilgili malzeme, metot, deney düzenekleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde yapılan çalışmanın uygulaması ve ulaşılan sonuçlar yer almaktadır. Altıncı bölüm olan sonuç bölümünde ise çalışmada elde edilen sonuçlar tartışılmış, değerlendirilmiş ve öneriler verilmiştir.

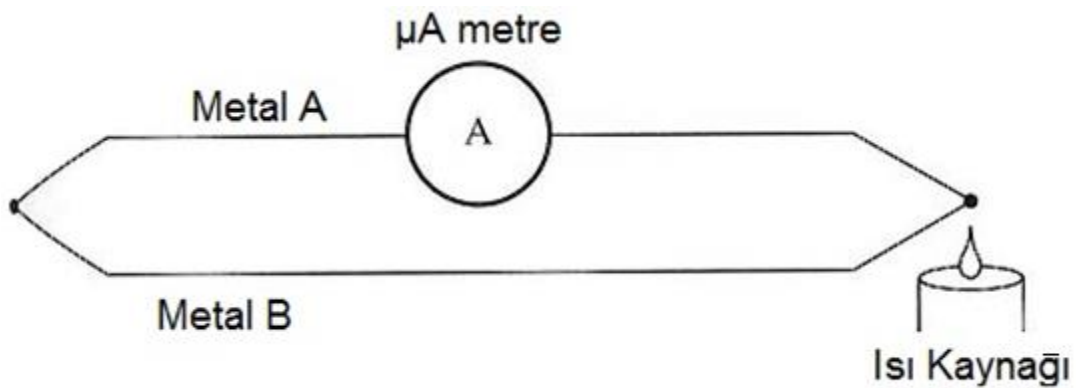
2 KURAMSAL TEMELLER

2.1 Isıl Çift

Isıl çiftler genellikle endüstriyel kullanımda geniş bir uygulama alanına sahip olan sıcaklık sensörleridir. Bu sensörler kullanımdaki basitlikleri, fiziksel dirençlerinin iyi olması, düşük maliyetleri, fiziksel büyüklüklerinin küçük olması, kullanımlarındaki sıcaklık aralığının geniş olması ($-270^{\circ}\text{C} - 1500^{\circ}\text{C}$) ve uygun elektriksel çıktılara sahip olmaları nedeniyle büyük işletmelerde, farklı endüstriyel alanlarda, teknolojik ve bilimsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

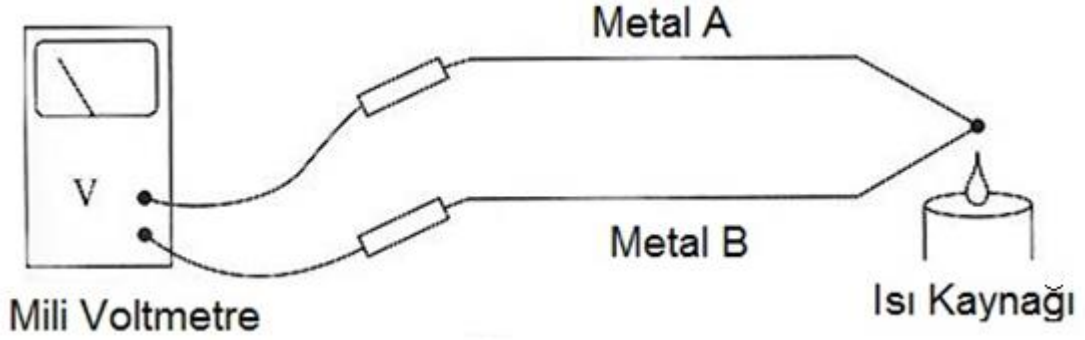
Bütün iletkenler ısıtıldıklarında içinde bulunan elektronlarda sıcak uçta kinetik enerjisi artan serbest elektronlar nedeniyle bir hareketlenme meydana gelir. Ancak bu hareketlenme çeşitli iletkenler arasında farklılık gösterebilir. Bu maddenin ayırt edici özelliklerinden biridir. Hatta aynı tipteki ısı çiftinin yüksek sıcaklıkta tavlama ve/veya gerilme olmasına göre Elektro Motor Kuvveti (EMK) değeri değişim gösterir. Bu gerilim sıcaklığın değil, iki uç arasındaki sıcaklık dağılımının bir fonksiyonudur ve etkisi iletkenin bileşimine ve metalürjik yapısına bağlıdır. İletkenlerin bu farklarından yararlanarak sıcaklık ölçümü yapılır [2].

İki farklı metal tel her iki ucundan birbirine bağlanırsa ve bağlanan uçlardan bir tanesi ısıtılır ise oluşan bu termoelektrik devreden ısıtma işlemi süresince bir elektrik akımı dolaşır. Şekil 2.1'de bir termoelektrik devre gösterilmiştir. Thomas Seebeck bu keşfi 1821 yılında yapmıştır [1].



Şekil 2.1 Termoelektrik Devre

Eğer termoelektrik devre ısıtılmayan bağlantı noktasında ayrılırsa Şekil 2.2’ de gösterildiği gibi, açık devrenin net potansiyel farkı kullanılan metal tellerin cinsine ve ısıtılan bağlantı noktasının sıcaklığına bağlıdır. Oluşan bu EMK değerine ‘*Seeback Voltajı*’ ismi verilir [1].



Şekil 2.2 Seeback Voltajı

Birbirinden farklı tüm metal tel birleşimlerinde Seeback etkisi gözlemlenebilir. Bu şekilde oluşturulan sıcaklık sensörüne ‘*ısıl çift (thermocouple)*’ ismi verilir.

Sıcaklıktaki küçük değişimler Seeback voltajı ile doğru orantılıdır. Bu orantı Eşitlik 2.1 ile verilmiştir.

$$dE = S(T) \cdot dT \quad (2.1)$$

Burada dE Seeback voltajı, dT sıcaklık farkı, S(T) telin kendine özgü Seeback katsayısıdır.

dT’ nin sıcaklık farkından değil, sıcaklık dağılımından kaynaklanması önemli bir noktadır. Bu tel boyunca sıcaklığın değiştiğini gösterir. Dolayısıyla Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2 şeklinde gösterilebilir.

$$dE = S(T_x) \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (2.2)$$

Telin her bir parçasının fiziksel ve kimyasal olarak aynı ortamda, özdeş olduğu varsayımı ile, aşağıdaki iki teoremi kullanılabilir [1]:

- a) Eğer sıcaklık dağılımı yok ise, $dT/dx=0$ (izotermal çevre durumu), Seeback gerilimi oluşmayacaktır.

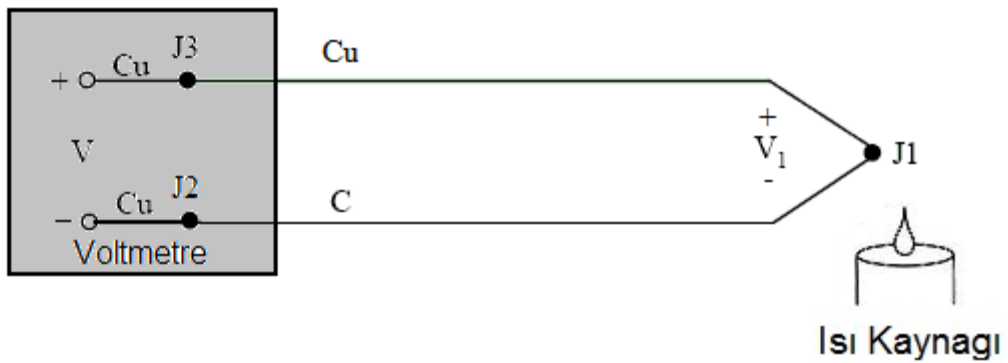
b) Eğer tel homojen ise, $S(T,x)=S(T)$ olur, o zaman Seebeck gerilimi telin iki ucundaki sıcaklıkların fonksiyonudur.

Yine de tellerin ideal bir şekilde özdeş olduklarını söylemek zordur. Malzemedeki yapısal değişiklikler ve sertleşme, atomların yer değiştirmesi nedeniyle malzeme yapısının değişimi, teldeki aşınma, oksitlenme ve telin çapındaki değişiklikler özdeşliğin bozulmasının en önemli nedenleridir.

2.1.1 Isıl çift EMK değerinin ölçülmesi

Isıl çift EMK değeri doğrudan ölçülemez, çünkü ölçme işlemini gerçekleştirmek için ısı çiftin voltmetreye bağlanması gereklidir. Isıl çiftlerdeki temel sorun ölçme ve bağlantı amaçlı temas noktalarında da gerilim oluşumu sebebiyle hatalı ölçüme sebep olabilmeleridir. Hatalı ölçüme sebebiyet verilmemesi açısından kompanzasyon yapılması zorunludur [2].

Şekil 2.3'de T-tipi (bakır-konstantan) ısı çifti voltmetrenin kendisi ile yeni bir termoelektrik devre oluşturmaktadır. J_1 , J_2 ve J_3 bağlantı noktalarını belirtmektedir.



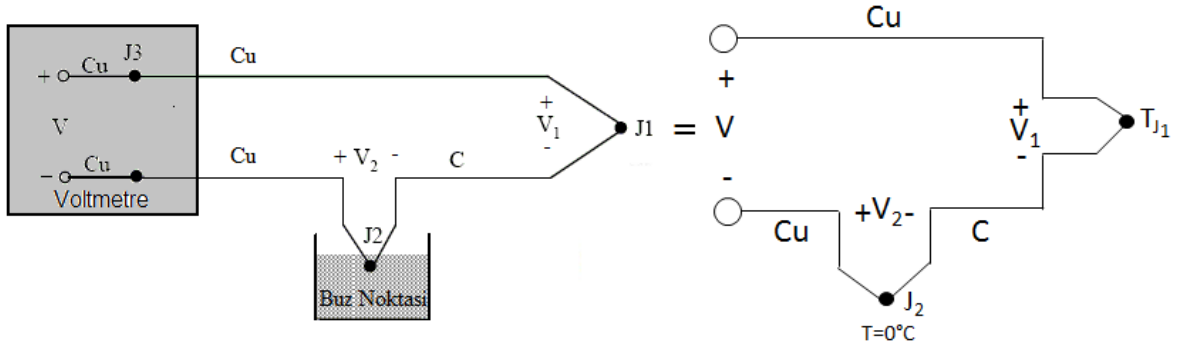
Şekil 2.3 J-Tipi ısı çiftin voltmetreye bağlanması

Ölçüm sırasında V_1 EMK değeri ölçülmek istenir, fakat Şekil 2.3'de de görüldüğü gibi J_2 ve J_3 bağlantı noktaları meydana gelmiştir. J_3 bakır – bakır bağlantı noktasıdır. Bu nedenle herhangi bir EMK değeri ölçülemez ($V_3=0$). Bununla birlikte J_2 bağlantı noktası bakır-konstantan birleşiminden oluşmaktadır ve bu nedenle voltmetreden okunan değere V_1 EMK değerine ters bir etkisi vardır (V_2). Görüldüğü gibi voltmetreden okunan değer (V), J_1 ve J_2 bağlantı noktaları

arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Başka bir deyişle, J_2 noktasındaki sıcaklık ölçülemediği sürece J_1 noktasındaki sıcaklık bilinemez.

2.1.2 Referans bağlantı noktası

Kompanzasyon yöntemlerinden biri ve en yaygını J_2 bağlantı noktasını buz noktasının içine yerleştirmektir. Sulu buzun derecesi sıfırdır. Sıfır derecede ısı çiftler sıfır volt çıkış verirler. Bu nedenle J_2 noktasındaki V_2 gerilimi sıfır olacağından ölçüm elemanı sadece ısı çift gerilimini okur [2]. Şekil 2.4'de görüldüğü üzere sıcaklığı 0°C olan J_2 bağlantı noktasına referans bağlantı noktası ve sıcaklığına da referans noktası ismi verilir.



Şekil 2.4 Buz noktasının referans noktası olarak kullanılması

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi voltmetre terminalleri ile ısı çiftin bağlantıları bakır-bakır olduğu için bu bağlantılarda okunan değer EMK değerine katkısı yoktur. Şekil 2.4'de voltmetreden okunan potansiyel farkı V değeri ise J_1 ve J_2 bağlantı noktaları arasındaki sıcaklık farkı ile doğru orantılıdır ve Eşitlik 2.3 ile verilmiştir.

$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha(t_{j_1} - t_{j_2}) \quad (2.3)$$

Burada α Seeback Katsayısı

Böylece EMK değeri aşağıda gösterildiği gibi sadece T_{j_1} sıcaklığına bağımlı olur. Buna göre Eşitlik 2.3,

$$V = \alpha(T_{j_1} - T_{j_2}) \cong \alpha(T_{j_1} - 0) \quad (2.4)$$

$$V = \alpha(T_{j_1}) \quad (2.5)$$

biçimine dönüşür.

Voltmetreden okunan EMK değerine referans bağlantı noktasındaki EMK değeri eklenerek 'V' değerinin 0°C referansa göre değeri bulunmuş olur. Bu metot en düşük belirsizliğe sahiptir çünkü buz noktası sıcaklığı kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Günümüzde kullanılan ısı çift EMK değerlerine karşılık sıcaklık değerlerini gösteren tablolar buz noktasına göre hazırlanmaktadır. Böylece bu tablolar kullanılarak V değeri T_j , sıcaklığına çevrilebilmektedir [3].

Entegre edilmiş ve programlanmış bir sistemle de kompanzasyon yapılabilir. Önemli olan sıcaklığa bağlı hatalı olarak oluşan gerilimlerden gerçek ısı çift değerini ayıklamaktır.

2.1.3 Isıl çiftlerin üretimi ve kullanılan malzemeler

Pratikte ısı çiftler birbirinden farklı iki metal telden oluşurlar, genellikle bu teller izolasyonlu olup bir uçları ölçen bağlantı noktasını oluşturabilmek ve kapalı termoelektrik devreyi oluşturabilmek için birbirine bağlanmıştır. Tel çapları genellikle 0,2 mm ile 3 mm arasında değişmektedir; ancak bazı endüstriyel kullanımlarda ve bazı özel koşullarda tel çapları daha kalın veya daha ince olabilir. Temel metal grubuna ait ısı çiftlerin (K, J, T tipi vb.) ölçen bağlantı noktalarının oluşturulmasında genellikle argon atmosferinde elektrik kaynağı kullanılmaktadır. Bununla birlikte platin ısı çiftlerde (B, S, R tipi gibi) küçük oksijen-hidrojen alev kaynağı ile de kaynatılıp bağlantı noktası oluşturulabilir. Temel metal telleri genellikle yeterli miktarda tavllanmış olarak alınabilir ve ek bir tavlama işlemi gerektirmeden kullanılabilir. Buna rağmen platin metal telleri kullanılmadan önce mutlaka tavlmalıdır. Platin tel 1100 °C'de 15 dakika ve platin alaşımlı tel ise aynı süre ile 150 °C'de tavlmalıdır. Genellikle tavlama işlemi 0,5 mm çapındaki teller için 12-13 Amper akım geçirerek yapılır. Tavlama işlemine bir transformatör kullanılarak, devreden geçirilen akımın bir kaç dakika içerisinde düşürülmesiyle son verilir. Platin ısı çift tellerinin seramik izolasyon içerisinden geçirilmesinden sonra da 1100 °C'de tavlama yapılmalıdır [3].

2.1.4 Isıl çift türleri ve özellikleri

Isıl çiftler çeşitli metallerden üretilir. ASTM – American Society for Testing and Materials tarafından kullanılan metal birleşimlerinin tanımı yapılmıştır. Uluslararası standart IEC 584-1/1995 ısı çiftlerinden 8 tanesini standartlaştırılmış ve bunlar ile ilgili referans tabloları vermiştir. Standart hale gelmiş bu ısı çiftleri genellikle alfabetik bir karakter ile adlandırılırlar. Bu sistemin avantajı ısı çiftleri oluşturan metalleri ve oranlarını tek karakter altında toplamasıdır. Isıl çift terminolojisinde pozitif element başta yazılır [3].

En sık kullanılan standart ısı çiftlerinin tanımları ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır. Günümüzde, farklı metal çiftlerini bir araya getiren birçok farklı türde ısı çifti kullanılmaktadır. Bunların en yaygın olanları Çizelge 2.1’de gösterilen K, J, T, E ve N tipleridir.

Çizelge 2.1 Sık kullanılan ısı çift tipleri

Tip	Malzeme		Renk Kodu	Aralık (°C)	
	Artı Tel	Eksi Tel		Minimum	Maksimum
J	Demir	Konstantan		0	750
K	Kromel	Alumel		-200	1250
T	Bakır	Konstantan		-200	350
E	Kromel	Konstantan		-200	900
N	Nikrosil	Nisil		-270	1290

J-Tipi – Demir/Bakır-Nikel

1910 yılında kullanılmaya başlanan J-tipi ısı çiftleri *Demir/Konstantan* diye de bilinir. Bu ısı çifti ortamdan oksijen alan başka bir deyişle atmosferde güvenli olarak kullanılabilen birkaç ısı çiftinden bir tanesidir. J-tipi ısı çifti aynı zamanda vakum ya da asal gaz atmosferinde kullanılabilir. En yüksek ve sürekli olarak

kullanılabileceği sıcaklık 800 °C civarındır. Kısa süreli kullanımlarda ise 1000 °C'ye kadar çıkabilirler. Oksitlenmenin olabileceği ortamlarda demir elementi 550 °C'nin üzerinde hızlı bir şekilde oksitlenir. Bazı standart tabloların J-tipi ısı çifti için -210 °C'ye inmelerine karşın kullanımda çok dikkat gösterilmesi gerekmektedir [3].

K-Tipi – Nikel-Krom/Nikel-Alüminyum

1906 yılında kullanılmaya başlanana kadar K-tipi ısı çiftinin diğer bir ismi de *Kromel-Alumel*'dir. Günümüzde endüstride en yaygın kullanılan ısı çiftidir. K-tipi ısı çifti 1100 °C'ye kadar sürekli, 1200 °C'ye kadar ise kısa süreli olarak kullanılabilir. Bu ısı çifti aynı zamanda -250 °C'ye kadar olan krayojenik ortamlar ile oksitlenmeye müsait ortamlarda da kullanılabilir. 800°C'nin üzerindeki kullanımlarda hızlı oksitlenme yeniden kalibrasyona yol açabilir. K-tipi ısı çiftleri yaygın olarak kullanılan ısı çiftleriyle karşılaştırıldığında diğerleri kadar kararlı değildir. Bu ısı çiftinin Nikel-Krom ayağındaki metalürjik kararsızlıklar 300°C ile 550°C sıcaklık aralığında bir kaç derecelik hatalara sebep olabilir. Bu ısı çifti nükleer çalışma alanlarında özellikle tercih edilir. Günümüzde bu amaç için N-tipi ısı çifti de tercih edilmektedir [3].

T-Tipi – Bakır/Bakır-Nikel

T-tipi ısı çifti diğer adı ile *Bakır/Konstantan* -250°C ile 400 °C sıcaklık aralığında kullanılır. Yukarı sıcaklık limiti bakır ayağındaki hızlı oksitlenmeden dolayı düşüktür. -200 °C ile 200 °C arasında ± 0.1 °C tekrarlanabilirliğe sahiptir. Karşılaştırmalı kalibrasyonda yağ banyosu standart ısı çifti olarak kullanılabilir. T-tipi ısı çiftinin bakır ayağındaki yüksek ısı iletkenliği kullanımlarda göz önüne alınmalıdır [3].

E-Tipi - Nikel-Krom/Bakır-Nikel

E-tipi başka bir deyişle *Nikrom/Konstantan* ısı çifti, kullanılan ısı çiftleri içinde en yüksek EMK değerine (400 °C ile 600 °C sıcaklıkları arasında 82 $\mu V/^\circ C$) sahiptir. Bu ısı çiftiyle çalışma sıcaklığını, oksitlenmeye müsait ortamlarda veya asal gaz ortamlarda 900 °C'ye kadar çıkarmak mümkündür. E-tipi ısı çifti aynı zamanda -250 °C'ye kadar olan düşük sıcaklık uygulamalarında da kullanılabilir. K-tipi ısı

çiftten daha karardır. Bu yüzden hassas çalışmalarda kullanılması daha uygundur [3].

N-Tipi - Nikel-Krom-Silikon/Bakır-Nikel-Silikon

K-tipi ısı çiftte meydana gelen sapmalardan dolayı yeni bir ısı çift için değişik metal ve metal bileşikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda *Nikrosil* ve *Nisil* ısı çifti ortaya çıkmıştır. Metal kararlılığı K-tipine kıyasla çok daha fazladır ve yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeden dolayı meydana gelen kaymalara karşı daha dirençlidir. Kılıflı N-tipi ısı çift yine kılıflı K tipi ısı çiftte kıyasla oksitlenmeye karşı daha dirençlidir. Isıl çiftler için maksimum kullanım sıcaklığı genellikle ısı çift tellerinin çapına da bağlıdır [3].

Bu tez çalışmasında J tipi ısı çift kullanılmıştır. J tipi ısı çift yaygın kullanılan tiplerden biridir. Özellikle kompozit malzeme pişirme süreçlerinde kullanılan otoklavlar genellikle 50 °C ile 400°C arasındaki sıcaklık değerlerinde kullanılır. Bu cihazların üretim aşamasında, cihaz üzerine monte edilmiş okuma yapan ısı çift ve soket tipi J tipi tercih edilmektedir. Bu da bu cihazlara sahip olan firmaları otoklavda kullanılmış olan ısı çift cinsine yönlendirmektedir. Çünkü işlem görecekle parçaya sıcaklığı okumak üzere bağlı olan ısı çiftin diğer ucu, otoklav üzerindeki sokete bağlanacaktır ve burada da doğru okuma yapılabilmesi için aynı tip olması gerekmektedir. Kalibrasyon testleri açısından değerlendirecek olursak otoklav, sıcak pres, boya kurutma, alüminyum yaşlandırma proseslerinin yapıldığı fırınlarda J tipi ısı çift tercih edilmektedir. Ekipmanların üzerlerinde bulunan kontrol ve kayıt alma cihazlarının bağlantılarının genellikle J tipi olması ısı dağılımı ve sistem doğruluk testi için bağlayıcı olmasa da bu ekipmanlara yapılan cihaz doğruluk testi için aynı tip ısı çift seçmeyi zorunlu kılar. Özetle bu çalışmada J tipi ısı çift seçilmesinin nedeni, bu cihazın endüstride bir çok cihazda yaygın olarak kullanılmasıdır

2.2 Isıl Çift Kalibrasyonları

2.2.1 Endüstriyel ölçüm cihazları için kalibrasyonun önemi

Üretimde kullanılan cihazların gerektiği şekilde kullanılabilmesi, cihaz kalitesinin sağlanabilmesi, ürün kalitesinin korunabilmesi ve arttırılabilmesi için ölçümlerin

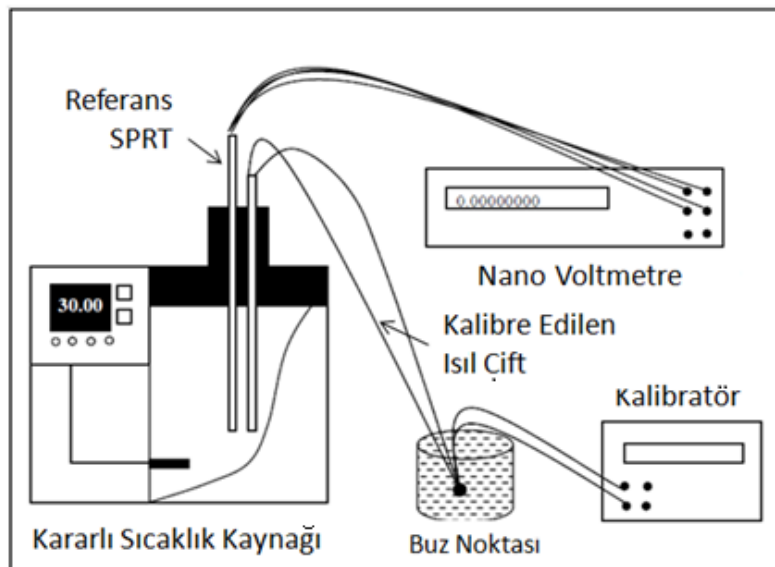
yapılması şarttır. Verimli ve kaliteli bir üretimde makinelerin ve ölçüm cihazlarının bakımı ve kalibreli olması ön koşuldur. Kalibrasyon olmadan üretimde kaliteden bahsetmek mümkün değildir. Bu kapsamda, endüstride kullanılan ısı çiftlerinin belirli aralıklarla kalibre edilmesi gerekmektedir [3].

2.2.2 Isıl çift kalibrasyon metodu

Isıl çift kalibrasyonları temel olarak, karşılaştırma metoduyla yapılmaktadır. Kalibre edilmek istenen ısı çifti ile doğruluğundan emin olunan, bir üst laboratuvarında kalibre edilmiş ve kalibre edilen ısı çiftinden daha hassas olan standart termometre ile karşılaştırılarak yapılmaktadır [3].

Kalibrasyona başlamadan önce, özellikle yarı platin bazlı ısı çiftleri (SPRT) için mutlaka yapılması gereken bir diğer işlem de tavlama işlemidir. Tavlama sıcaklığı 1100°C olup, ısı çiftinin 16 saat boyunca bu sıcaklığa maruz bırakılmasını içerir. Tavlamanın önemi, ısı çifti tellerindeki gerek termal şoklar gerekse mekanik darbeler sonucunda oluşmuş olan gerilmelerin giderilmesinde yatar. Ayrıca telin fiziksel yapısının kararlı olmasını da sağlar [3].

SPRT'nin her kalibre öncesinde ve sonrasında 'Suyun Üçlü Noktası (SÜN)' olan 0,01°C sıcaklıktaki değeri ölçülür. Bu ölçüm kalibre istenen ısı çifti içinde yapılmalıdır. Kalibrasyon öncesinde ve sonrasında yapılan ölçümler hazırlanan belirsizlik tablosuna etki edecektir [3].



Şekil 2.5 Karşılaştırmalı yöntemle ısı çifti kalibrasyon düzeni

Kalibrasyon sırasında, Şekil 2.5'de gösterilen düzene kurularak şu adımlar takip edilir [3]:

- Uygun uç kalibrasyon fırının merkezine yerleştirilir. Kalibre edilen ve referans ısı çift aynı yükseklikte veya derinlikte olacak ve tabana değmeyecek şekilde fırının içine yerleştirilir. Fırın içindeki sıcaklık dağılımına bağlı olarak bir kaç santimetrelilik bir sapma ciddi ölçüm hatalarına yol açabilir. Bu nedenle fırın içerisindeki ısı çift bir kaç santimetre ileri-geri alınarak bu değişim hata payı olarak gözlenir.
- Isıl çiftler uçların içerisine yerleştirilir. Ölçümler yapılırken uçların fırın içerisine daldırma derinlikleri değil de ısı çiftlerin daldırma derinlikleri göz önüne alınmaktadır. Bu nedenle ısı çiftlerin uçların içerisine yerleştirme derinlikleri mutlaka bilinmelidir.
- Eğer gerekli ise buz noktası kompanzasyon bağlantıları ve bakır tellerin voltmetre ya da kalibratör bağlantıları yapılır.

Burada üzerinde durulması gereken bir başka nokta ise voltmetre seçimidir. Eğer sağlıklı ve belirsizliği düşük bir ölçüm isteniyorsa, seçilen voltmetrenin kalibreli olması ve çözünürlüğünün bilinmesi gerekir. Platin bazlı ısı çiftlerin ölçümünde voltmetre kararlılığının nanovoltlar düzeyinde olması önemli bir avantaj sağlarken, ısı çiftlerin kendi belirsizliklerinin çok yüksek olması nedeniyle diğer ısı çift türleri için bu derece hassas cihazlara gerek yoktur.

2.2.3 Kalibrasyon ölçümleri

Kalibrasyon ölçümleri aşağıda belirtilen basamaklar uyarınca gerçekleştirilir:

- Kalibrasyona başlamadan önce müşteri isterleri ya da kullanım sıcaklığı değerlendirilerek kalibrasyon sıcaklık aralığı veya noktası belirlenir. Eğer kalibre edilecek birden çok sıcaklık noktası varsa en düşük değerinden başlanır. Kalibrasyon fırını kalibrasyon sıcaklığına ayarlanır. Stabilizasyondan sonra ölçümlere başlanır.
- Referans termometrenin değeri sayısal nanovoltmetreden okunur.
- Test edilen ısı çiftin değeri bağlı olduğu kalibratörden okunur.

- Bu döngü en az 10 defa tekrarlandıktan sonra, bu kalibrasyon noktasındaki ölçümlere son verilir. Ancak ölçümler esnasında dikkat edilmesi gereken unsurlardan biri buz noktasının değerini korumasıdır.
- Yukarıda sözü geçen ölçümler her kalibrasyon sıcaklığı için tekrarlanır ve ısı çift kalibrasyon formuna kayıt edilir.

2.3 Ölçüm Belirsizliği

Kalibre edilen cihazın kullanıcılarının, kalibrasyon işleminin ne derece güvenilir olduğunu anlayabilmeleri için kalibrasyon sonucunun niceliksel şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Eğer sayısal bir ifade olmazsa kalibrasyon işlemi sonucu herhangi bir sertifika ya da standartlarla mukayese edilemez. Kısacası ölçüm sonuçlarının değerlendirmesinin efektif olması, ölçümün ne derece kaliteli olduğunu ayırt edebilen bir özelliğinin bulunması ve herkes tarafından uygun görülmesi gerekmektedir [4]. Bundan dolayıdır ki, kalibrasyon sonucunda yapılan belirsizlik hesabı ve bu hesabın açıklanması kalibrasyonda kalitenin olmazsa olmazıdır.

Belirsizlik hesabı ve bu hesabın açıklanması için optimal nitelikler aşağıdaki kavramları içermelidir [4]:

Evrensellik: Kullanılan metot bütün ölçümlere ve bütün ölçümlerin içerdiği verilere tatbik edilebilir olmalıdır.

Kendi içinde tutarlılık: Belirsizliğin elde edilmesinde bağımsız olması çok önemlidir. Bu da her bir bileşenden ve bunların gruplanma biçimlerinden ya da alt bileşenlerine bağlı olmadan sağlanabilmesidir.

Taşınabilirlik: İki farklı ölçümde birinin sonucunun diğerinde kullanılması durumunda, ilk sonucun belirsizliği diğerinde direk olarak kullanılabilir.

Belirsizliklerin hesaplanmasında kullanılan birkaç kavram aşağıdadır [5].

Ölçüm: Bir büyüklüğün değerinin belirlenmesine ilişkin işlemler serisidir.

Ölçüm metodu: Belirli ilkelere göre ortaya konulan ölçüm çalışmalarısıyla ilişkili kuramsal ve pratikte yapılabilen işlemler serisi.

Ölçüm hatası: Ölçülen büyüklüğün değeri ile referans değeri arasındaki farktır.

Bağıl hata: Mutlak hatanın değerinin gerçek büyüklük değerine bölünmesiyle elde edilen orandır.

Rastgele hata: Tesadüfi şekilde ortaya çıkan ve ne yönde etki ettiği belli olmayan hatalardır.

Sistemik hata: Bir büyüklük için ölçüm süresince aynı değerde olan ya da ölçüm öncesinde kestirilebilir olan hata bileşenidir.

Düzeltilme faktörü: Önceden tahmin edilebilen sistemik hatayı düzeltmek için, ölçümün sahip olduğu düzeltilmemiş sonuçla çarpılan etkendir.

Ölçümün doğruluğu: Gerçek büyüklük değeri ve yapılan ölçümün sonucu arasındaki birbirleri ile uyuma ölçüsüdür.

Ölçüm sonuçlarının tekrarlanabilirliği: Aşağıda belirtilen şartlara uygun ve aynı büyüklüğün art arda yapılan ölçme işlemi sonuçları arasındaki uyumadır.

- Ölçüm yönteminin aynı olması,
- Gözlemcinin aynı olması,
- Ölçme cihazının aynı olması,
- Konumun aynı olması,
- Kullanım koşullarının aynı olması,
- Belli bir zaman sonra tekrar edilebilir olması.

tekrarlanabilirlik açısından önemli kriterlerdir.

Ölçüm sonuçlarının tekrar gerçekleştirilebilirliği: Aşağıdaki belirtilen şartlar değiştiğinde, tekrarlanan ölçüm sonuçlarının birbirleri arasındaki uyumdur.

- Ölçüm yöntemi
- Gözlemci
- Ölçme aleti
- Konum
- Kullanım şartları
- Zaman

gerçekleştirilebilirlik için ele alınan faktörlerdir.

Deneysel standart sapma: Ölçüm sonuçlarının dağılımını ayırt eden “s”, deneysel standart sapma olup Eşitlik 2.6 ile verilmiştir.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.6)$$

Burada, x_i : i. ölçüm sonucu ve

\bar{x} : değerlendirilen n adet sonucun aritmetik ortalamasıdır.

Ölçüm belirsizliği: Ölçüm sonucunun gerçek değerini içine alan tahmin edilen değerdir.

A-tipi belirsizlik hesabı: Gözlem serilerinin belirsizlik hesaplarının istatistiksel analiz yöntemidir. Gözlem serileri sonuçlarına göre istatistiksel analize dayalı belirsizlik hesaplama yöntemidir.

B-tipi belirsizlik hesabı: Gözlem serileri sonuçlarına göre istatistiksel analizden farklı yollarla yapılan belirsizlik hesaplama yöntemidir.

Birleşik standart belirsizlik: Bir kalibrasyon ölçümünde pek çok standart belirsizlik değeri elde edilmiştir. Bunların varyanslarının toplamının pozitif karekökü bileşik belirsizlik değerini vermektedir. Burada her bir belirsizlik değerinin sonuç üzerindeki etkisi mutlaka değerlendirilmelidir.

Genişletilmiş belirsizlik: Ölçülen büyüklüğün istenilene göre ölçüm sonucu büyüklüklerinin büyük bir kısmını içine alan aralıktır.

Kapsam faktörü: Genişletilmiş belirsizliği bulmak için bileşik belirsizlik değeriyle çarpılan sayısal faktördür. Uygulamada, kapsam faktörünün büyüklüğü 2 ve 3 arasında bulunmaktadır.

Aritmetik ortalama: Büyüklüklerin toplamının, kaç adet ise, o rakama bölünmesi ile elde edilen değerdir.

Varyans: Sapmanın bir ölçümüdür. Ölçüm ortalamasından sapmasının karesinin gözlem adedinin bir eksiğine bölünmesiyle bulunur. N adet gözlem x_1, x_2, \dots, x_n için, n tane x 'in aritmetik ortalaması;

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (2.7)$$

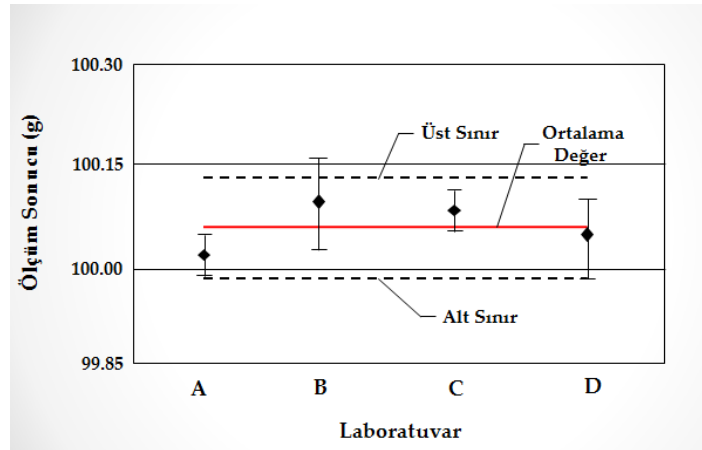
eşitliği ile bulunur. Varyans ise,

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.8)$$

ile hesaplanır.

Güven katsayısı: Güven aralığı ya da istatistiksel olarak saptanmış kapsam aralığıyla ilgili olasılık değeridir.

Belirsizlik: Ölçülen büyüklüklerin belli bir olasılıkla, ortalama büyüklük etrafında bulunduğu aralığı ifade eder. Çoğunlukla belirsizlik rakam olarak gösterilirken, göreceli ya da mutlak şekilde de açıklanabilir.



Şekil 2.6 Toplam belirsizliğin kapsadığı aralığın gösterimi

Şekil 2.6'da bir örnek üzerinden belirsizlik anlatımı yapılmıştır. Çeşitli laboratuvarlarda yapılan örnek ölçümlerin belirsizlikleri grafiksel olarak gösterilmiştir [4]. Burada A laboratuvarı ölçüm sonucu 100,02°C ve belirsizliği 0,03°C; B laboratuvarı ölçüm sonucu 100,10°C ve belirsizliği 0,06°C; C

laboratuvarı ölçüm sonucu 100,08°C ve belirsizliği 0,04°C; D laboratuvarı ölçüm sonucu 100,04°C ve belirsizliği 0,05°C'dir. Nominal ölçüm 100°C'dür.

Şekil 2.6 incelendiğinde belirsizliğin önemi açıkça görülmektedir. Belirsizlik büyüdükçe tolerans dışına çıkma ihtimali artmaktadır. Bu da yapılan ölçüm sonucunun güvenilirliğini direk olarak etkilemektedir.

2.3.1 Belirsizliğin hesaplanması

2.3.1.1 Ölçümün modellenmesi

Bir sistem veya matematiksel modelin belirsizliğini hesaplamak için model fonksiyonun belirlenmesi gerekmektedir. Ölçümlerdeki girdi değerleri ile çıktı değerleri (sonuç) arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel bağıntıya 'Model Fonksiyon' denir.

X_1 , X_2 ,....., X_N girdi değerleri, Y çıktı değeri olarak kabul edilirse, Eşitlik 2.9'da belirtilen bağıntının kurulması mümkündür [5].

$$Y = F(X_1 , X_2 ,....., X_N) \quad (2.9)$$

Bağımlı olmayan değişkenler ve onların değişimleri incelendiğinde ısı çift kalibrasyonu için belirsizlik modeli Eşitlik 2.10'da verilmiştir [4].

$$t_c = t_r + \delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6 + \delta t_7 + \delta t_8 + \delta t_9 + \delta t_{10} + \delta t_{11} \quad (2.10)$$

Burada verilen modelin içerdiği her bir belirsizlik etkeni birer birer hesaplanmalı ve denklemdeki yerini almalıdır.

2.3.1.2 Standart belirsizliğin A-tipi hesaplanması

A-tipi hesaplama, gözlem sonucu elde edilen verinin belirsizlik hesaplarının istatistiksel analiz yöntemleri ile hesaplanmasıdır. Bu hesaplama yöntemi genellikle tekrarlanan gözlem verilerinin belirsizlik hesaplarında kullanılır. A-tipi varyans ve A-tipi belirsizlik bu tip belirsizlikler için kullanılan terimlerdir ve asıl kastedilen hesaplama yöntemidir.

Q rastgele değişkeni için n adet bağımsız gözlem sonucunda ve aynı gözlem koşullarında elde edilen en doğru tahmin, n adet gözlem verisinin aritmetik ortalamasıdır.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_k \quad (2.11)$$

Her bir q_k değeri, etmenlerin ve ortam koşullarının rastgele değişimleri yüzünden farklılıklar gösterir. Girdi büyüklüğündeki rastgele hatalar kaynaklı belirsizliklerin ifade edilebilmesinde deneysel standart sapma kullanılmalıdır.

q için olasılık dağılımının varyansı aynı zamanda her bir gözlem değerinin deneysel varyansı, s^2 ile ifade edilir ve aşığıdaki eşıtlilik ile belirlenir.

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (2.12)$$

Varyansın tahmini değeri ve deneysel standart sapma olarak ifade edilen pozitif karekökü, gözlemlenen değerlerin ortalamadan sapmalarını karakterize eder ve başka bir ifadeyle onların farklılıklarını gösterir. Başka bir deyişle deneysel varyans tüm gözlem sonuçlarının dağılımına ait bir değerdir. Eşıtlilik 2.13 ile verilmiştir.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (2.13)$$

ve standart sapması,

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (2.14)$$

eşıtliliğiyle verilir. Ortalamanın deneysel varyansı $s^2(\bar{q})$ ve onun pozitif karekökü olarak hesaplanan ortalamanın deneysel standart sapması $s(\bar{q})$, \bar{q} ölçüm verilerinin beklenen değeri ne derece temsil ettiğinin bir ölçütüdür ve her ikisi de q' nun içerdii belirsizliği ölçmek için kullanılırlar [5].

Bu çalışmada da kalibre edilen ısı çift ve standart termometrenin tekrarlanabilirliğinden kaynaklanan belirsizliği hesaplamada kullanılmıştır.

2.3.1.3 Standart belirsizliğin B-tipi hesaplanması

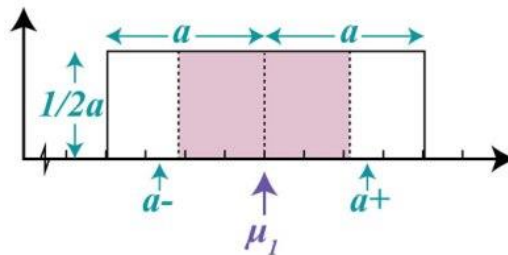
B-Tipi belirsizlik hesabında, istatistiksel olmayan yöntemler kullanılarak, olabilecek bütün farklı değerler göz önüne alınır ve elde edilen bütün bilgiler kullanılır [4]. Bunlar;

- İmalatçının ifade ettiği özellikler,
- İlgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki daha önce edinilmiş deneyim ve bilgiler,
- Kalibrasyon sonucu veya sertifikalar sonucu elde edilen bulunan veriler,
- Daha önce yapılan ölçümler ile elde edilen veriler,
- El kitaplarında verilen referans veriler ile ilgili belirsizliklerdir.

Bu şekilde hesaplanan $u^2(x_i)$ ve $u(x_i)$ değerleri kısaca B-tipi varyans ve B-tipi standart belirsizlik olarak belirtilir. Asıl olarak, B-tipi sadece hesaplama yöntemini ifade etmektedir.

Eğer x_i tahmini değeri başka bir kaynak kullanılarak elde edilmişse ve kaynakta belirsizlik standart sapmanın belli bir çarpanı olarak ifade ediliyorsa, standart belirsizlik $u(x_i)$ kısaca, ilgili değer bu çarpana bölümü, kestirilen varyans $u^2(x_i)$ ise bölme sonucunda elde edilen değer karesidir [5].

Şekil 2.7'de gösterilen dikdörtgen dağılım, B-tipi belirsizlik hesaplama yönteminde sıklıkla kullanılan dağılım yöntemidir. Bir büyüklüğün değişim gösterebileceği aralık bilindiği takdirde dikdörtgen dağılım kullanılmalıdır.



Şekil 2.7 Dikdörtgen dağılımı

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15' de ifade edilen denklik dikdörtgen dağılım için kullanılır.

Literatürde bulunan belirsizlik çalışmaları incelendiğinde sıcaklık kuyusu ısı dağılımı, banyoların sıcaklık dağılımları, sıcaklık kaymaları, çözünürlük gibi etmenlerde belirsizlik değeri hesaplanırken dikdörtgen dağılım kullanıldığı görülmüştür [3] [4] [5].

2.3.1.4 Bileşik belirsizliğin hesaplanması

Ölçülebilir büyüklük Y 'nin tahmin edilen değeri y ise, girdi değerlerinin tahmin edilen değerleri $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ standart belirsizliklerin uygun kombinasyonu ile elde edilebilir. Bu yöntemle belirlenen belirsizlik bileşik olarak adlandırılır ve $u_c(y)$ olarak gösterilir [5].

Aşağıda verilen ifade ile, bileşik standart belirsizlik, hesaplanan bileşik standart varyansın pozitif karekökü olarak ifade edilir.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.16)$$

Burada, f fonksiyonu, 2.9 eşitliğinde verilen ölçüm modelini belirleyen fonksiyondur. $U(x_i)$ değerlerinin her biri A-tipi belirsizlik hesaplama metodu veya B-tipi belirsizlik hesaplama metodu ile gösterildiği şekilde hesaplanır. $u_c(y)$ bileşik standart belirsizlik olarak adlandırılır.

Eşitlik 2.16'da;

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (2.17)$$

hassasiyet katsayısıdır.

Denklem 2.16 ve Denklem 2.17 'den faydalanılarak bileşik belirsizlik denklemi

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir.

2.3.1.5 Genişletilmiş belirsizliklerin belirlenmesi

Genişletilmiş belirsizlik U , bileşik standart belirsizlik $u_c(y)$ ve kapsam etkeni k 'nın çarpımı ile bulunur. k kapsam faktörü değeri güven düzeylerine göre değişmektedir. Belli bir güven düzeyindeki toplam belirsizlik değerini hesaplamak için kullanılır. Eşitlik 2.19 ile gösterilmektedir [7].

$$U = k \times u_c(y) \quad (2.19)$$

2.3.1.6 Sonuçların raporlanması

Ölçülmüş değer ve genişletilmiş belirsizlik değeri $y \pm U$ şeklinde verilmelidir. Ek olarak, güven aralığı ve kapsam etkeni değerleri de belirtilmelidir.

Belirsizlikler hesaplanırken kullanılan yöntemler ve bileşenlerin değerleri mutlaka ölçüm raporlarında birer birer yazılı şekilde bulunmalıdır. Ayrıca, kullanılan sabitlerin değerleri ve düzeltme değerleri de verilmelidir.

2.4 Taguchi Metodu

Taguchi metodu üründe ve proseste, kontrol edilemeyen ve değişkenliğe sebep olan faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonlarını seçerek, ürün ve procesteki değişikliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur. Bu metod ile hem kalitede iyileşme hem de deney tasarımına göre daha az deney ile sonuca ulaşma imkânı vardır. Ayrıca felsefe olarak, kalitenin tasarım ve proseste sağlanmasını öngörmektedir [9].

2.4.1 Taguchi tasarım aşamaları

Taguchi metodunda benimsenen tasarım aşamaları aşağıdaki gibidir [9].

- Sistem tasarımı: Kavram oluşturma aşamasıdır.
- Parametre tasarımı: Ürün ve süreç için hedef oluşturma aşamasıdır.
- Tolerans tasarımı: Sonucu istenen hedefe ulaşamadığında yapılan ilave çalışmalardır.

Sistem tasarımı

Taguchi metodu için ilk adımdır. Burada amaç, problem doğmadan engellemektir, tasarımı hata vermeyecek şekilde oluşturmaktır. Ayrıca en az maliyetle en iyi ürün tasarımı önceliklidir. Bununla birlikte müşteri memnuniyetinin en yüksek seviyede olması her zaman hedeflenmektedir. Bu aşamada eldeki bütün materyaller değerlendirilir. Bilim ve teknolojiye gerçekleşen yenilikler araştırılıp, deney yapılacak olan sistemde kullanılıp kullanılmayacağı analiz edilir.

Parametre tasarımı

Bu basamakta sistem parametrelerinin spesifik değerleri belirlenir. Bu aşamanın önemi; üretilecek ya da geliştirilecek olan ürünün istenilen özelliklere sahip olabilmesi için üretimde kullanılan parametrelerin iyileştirilmesini sağlar. Analizi yapılan ilgili proses için belirlenen parametreler arasından değerlendirme yapılarak gerekli olan, Taguchi tasarımına dahil edilmek istenilen parametreler belirlenir. Ürün kalitesini olumsuz etkileyecek kontrol edilemeyen parametreler en aza indirgenir. Parametreler belirlendikten sonra ilgili parametreler için deneylerde kullanılacak olan seviyeler belirtilir. Buradan mevcut duruma en uygun tasarım seçilir. Bu çalışmada Çizelge 2.2'de gösterilen L_9 ortogonal dizisi kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2 Taguchi L_9 Ortogonal Dizaynı

Deney	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Yine bu aşamanın içerisinde S/N gürültü oranı hesaplanmaktadır.

Taguchi yöntemine göre dizayn edilen tasarımdan elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürülmekte ve desibel (dB) olarak ifade edilmektedir.

Taguchi tasarımında S/N oranı hesaplamak için 3 yaklaşım vardır. Bunlar şu şekildedir: [9] [10] [11].

- “En küçük en iyi” durumu için (2.20) eşitliği kullanılmaktadır. Bu duruma örnek olarak aşınma, gürültü, zararlı maddeler ve kirlenmenin en aza indirilmesi verilebilir.

$$\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2.20)$$

“En büyük en iyi” durumu için (2.21) eşitliği kullanılmaktadır. Bu duruma örnek olarak mukavemet, hava geçirgenliği ve güç değerinin en büyüklemesi verilebilir.

$$\frac{S}{N} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2.21)$$

- “Nominal en iyi” durumu için (2.22) eşitliği kullanılmaktadır. Bu duruma örnek olarak ürün boyutu, nem değeri, sıcaklık değeri, elektrik voltajının belirli bir değere ayarlanması verilebilir.

$$\frac{S}{N} = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \quad (2.22)$$

Eşitliklerde,

y_i : Performans yanıtının i. gözlem değeri

n : Bir denemedeki test sayısı

\bar{y} : Gözlem değerlerinin ortalaması

s^2 : Gözlem değerlerinin varyansı

anlamına gelmektedir. Bu çalışmada hedeflenen sıcaklık değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır. Dolayısıyla “nominal iyidir” yaklaşımı kullanılmıştır.

Tolerans Tasarımı

Eğer ürün hedef değerden sapma gösterirse, bu sapmanın yarattığı kayıplar bulunarak sapmalar bu aşamada azaltılmaktadır. Tasarım toleransları uygulamaya konulur. Parametre tasarımıyla elde edilen azaltılmış değişkenlik eğer istenilen kadar değilse tolerans tasarımı uygulanmaktadır [10].

Yöntemin gerek geniş kullanım alanına sahip olması, gerekse daha az deney yaparak hem zaman kazancı hem de daha az maliyetle sonuçların elde edilmesine imkân sağlaması Taguchi yönteminin tercih edilirliliğini arttırmaktadır. Bu çalışmada da bu sebeplerle bu yöntem seçilmiştir.

3 LİTERATÜR

Literatürde ısı çift, kalibrasyon ve belirsizlik konularında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Kalibrasyon ve belirsizlik ilgili dünyaca kabul görmüş standart kabul edilen yayınlar incelenmiştir. TÜRKAK, TÜBİTAK UME, GUM, NIST gibi çok önemli kuruluşların yayınlarında kalibrasyon, belirsizlik gibi konular detaylandırılmaktadır.

Sadıkho, Kangı ve Uğur [5], TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü bünyesinde belirsizlik kurallarını, hesapların nasıl yapılacağını çeşitli anlardaki kalibrasyon örnekleriyle ayrıntılı bir şekilde ortaya koymuşlardır.

Altın [13], çalışmasında cam termometre, ısı çift ve dijital termometre kalibrasyonu yapıp hepsi için ayrı ayrı belirsizlik değerlerini hesaplamış ve belirsizliği en düşük olanı tespit etmeye çalışmıştır.

Başka bir çalışmada Hill ve Gee [14], ısı çiftin kendi homojensizliği ile ilişkili kalibrasyon belirsizliğini sayısallaştırmıştır. Isıl çiftteki belirsizlik bütçesinin büyük bir kısmı, Seebeck katsayısının ısı çift boyunca olan homojensizliği belirlediğini ayrıca kalibrasyon sürecinin kendisi ısı çiftte zaman, sıcaklık, alaşım kompozisyonu, kılıf yapısı, kılıf yapısının karmaşık bir fonksiyonu olan geri dönüşü olan ve olmayan değişikliklere neden olduğunu, 250 °C'deki tuz banyosu sırasında yaptıkları çalışmalarında ortaya koymuşlardır.

Pearce ve diğerleri [15] çalışmalarında ısı çift kalibrasyon için yapılan interpolasyon verisi kaynaklı belirsizliklerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmada kalibrasyon sıcaklık aralığı içindeki ısı çift kalibrasyon belirsizliğini değerlendirmek için kullanılan iki metot sunulmuştur. Sıcaklık sabit olduğunda belirsizlik değeri hassas bir şekilde hesaplanabilirken, sabit sıcaklıklar arasındaki interpolasyon kaynaklı belirsizliği hassas olarak belirlemek mümkün değildir. Bu çalışmada 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)' dokümanında tarif edilen geleneksel metod ile sayısal tabanlı Monte Carlo metodu karşılaştırılmıştır

Meyer ve Garrity [16], ısı çift kalibrasyonları için güncellenmiş belirsizlik bütçeleri üzerine yaptıkları çalışmalarında 'National Institute of Standards and Technology

(NIST)' ısıt çift kalibrasyon laboratuvarında kullanılan belirsizlik bütçelerinde yapılan güncellemeler sunulmuştur. Güncellemelerin amacı 1)Mevcut kalibrasyon alt yapı ve metotlarını yansıtacak şekilde ilgili belirsizlik etkenlerinin tahmini değerlerini güncellemek, 2)Sunulan her standart kalibrasyon hizmeti için belirsizlik bütçelerini sağlamak ve 3)Bütün belirsizlikleri emk yerine sıcaklık birimi ($^{\circ}\text{C}$) cinsinden ifade ederek belirsizlik bütçelerini müşteriler tarafından daha anlaşılabilir kılmaktır

Zvizdic ve diğerleri [17] çalışmalarında ısıt çiftlerin karşılaştırmalı kalibrasyonundaki belirsizliklerin tahmin edilmesi konusuna değinmişlerdir. Bu makalenin amacı Hırvatistan da bulunan proses ölçüm laboratuvarı ve Fransa'da bulunan ulusal metroloji kurumunda gerçekleştirilen karşılaştırmalı ısıt çift kalibrasyonu sırasında gözlenen ölçüm belirsizliklerini belirlemede kullanılan metotları sunmaktır. Metot, nadir metal ve endüstriyel metal ısıt çiftlerin -20°C ile 660°C sıcaklık aralığında standart platin dirençli termometre ve 600°C - 1050°C aralığında standart ısıt çiftler ile karşılaştırılmalı kalibrasyonuna uygulanmıştır.

Godina ve Vuherer [6], çalışmalarında farklı malzemelere sahip masterların kalibrasyonlarında ortaya çıkan belirsizliğin mekanik karşılaştırma yöntemi ile azaltılması konusunu işlemişlerdir. Ölçüm kabiliyetini geliştirebilmek için master malzemelerinin davranışı üzerine araştırmalar yapılmış; bu amaçla piyasanın önde gelen üreticilerinden tedarik edilen farklı master setleri ile deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş ve malzeme farklılıklarının belirsizlik bütçesi üzerindeki etkileri anlaşılmalı çalışılmıştır. Çalışma sonunda, analitik ve deneysel araştırmaların sonucu olarak farklı malzemelerden yapılmış olan masterların kalibrasyonlarında ortaya çıkan belirsizlik miktarında gözlenen kayda değer iyileştirme oranı sunulmuştur.

Bitou ve diğerleri [18] çalışmalarında master komparatör kalibrasyonunda kullanılan referans standartlar kaynaklı belirsizliğin düşürülmesi üzerine bir metot sunmuşlardır. Çalışmada, mekanik komparatörlerde uzunluk farkının referans değerine bağlı hata oranının iki farklı referans değerinin ortalaması alınarak düşürülebileceği önerilmektedir. 3 masterın uygun şekilde kombine edilmesi ile uzunluk farkı için iki referans değer elde edilmiştir. Referans masterlar kaynaklı hatalar birbirlerini götürmüş ve bu hataların ortalama değerleri hesaplanmıştır.

Gerçek bir mekanik komparatör kullanılarak hata azaltma etkisi başarılı bir şekilde gösterilmiştir.

Kadis'in [19] ölçüm belirsizliğini konu alan çalışmasında doğrusal kalibrasyon kaynaklı belirsizlik odaklı olarak yapılan genel hatalara değinilmiştir. Analitik ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan asıl strateji, hassasiyet ve verimlilik gibi 'tam performans' verisini ile bu veri tarafından yeterince kapsanmayan belirsizlik bileşenlerinin uygun şekilde kombine edilmesi ile ortaya çıkmaktadır. Çalışma, bu strateji ışığında gerçekleştirilen belirsizlik hesaplamaları sırasında karşılaşılan hataların altını çizmektedir. Genellikle dikkate alınan belirsizlik bileşenlerinin listesi tartışılmış ve verimlilik belirsizlikleri üzerine yanlış inanışlar not edilmiştir. Normalde kullanılan doğrusal kalibrasyon kaynaklı belirsizliğe de dikkat çekilmiştir. Doğrusal kalibrasyon sonucu elde edilen bir analitik sonucun standart sapması için iyi bilinen bir formülün kullanılmasının belirsizlik bütçesine etki eden hassasiyet katkısının iki kere sayılmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, doğrusal kalibrasyondan gelen göreceli belirsizliğin toplam bütçedeki etkisinin olduğundan fazla tahmin edildiği ve bileşik belirsizlik içinde en fazla paya sahipmiş gibi görüldüğü literatür verisine dayanan örnek bir hesaplama ile gösterilmiştir.

Badocco, ve diğerleri [20], çalışmalarında çoklu hata kaynaklarının kalibrasyon belirsizliği üzerine etkisini incelemişlerdir. İçme suyunda bulunan zerre seviyesindeki metallerin belirlenmesine yönelik kalibrasyon belirsizliği, sinyaller, cihaz hataları ve işletme koşulları olmak üzere iki hatanın etkisi altında iken tahmin edilmiştir. Kalibrasyon belirsizliği, deneysel kalibrasyon süreçlerinde olduğu üzere, J konsantrasyon seviyesinde I kere ölçüm alınarak bulunmuştur. Cihaz hatalarının karakteristik olarak rastgele olduğu varsayılmış iken işletme koşulları hatasının her bir konsantrasyon seviyesinde sistematik fakat J seviyelerinde rastgele olduğu varsayılmıştır. Bu iki hata koşulunun varlığı ya da yokluğu F-testi ile belirlenmiştir. Teori önce 30 element barındıran bir çözeltide uygulanmış, daha sonra ise bor, kalsiyum, lityum, baryum ve mangan içeren içme suyu örneği için kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın kalibrasyon sürecinden kullanılma ihtiyacı tüm analiz sonuçlarında değerlendirilmiştir.

Reis ve diğeri [21], çalışmalarında rüzgar tünellerinde test edilen modelin üzerine etkiyen kuvvet ve momentleri ölçmek için kullanılan harici aerodinamik balansların kalibrasyon belirsizliğini ele almışlardır. Bu çalışma, çok bileşenli harici aerodinamik balansların kalibrasyon belirsizliği için yeni bir metot önermektedir. Balans sensör cevabi ve aerodinamik yükler arasında numerik bir bağıntı elde edebilmek için balansa bilinen yükler uygulanarak kalibrasyon gerçekleştirilir. Hem uygulanan yüklerin hem de sensör okumalarının belirsizlikleri dikkate alınmıştır. Veri azaltımı, kalibrasyon katsayılarının tahminini ve aerodinamik yük bileşenlerine ve karşılık gelen belirsizliklere ayarlanan değerleri kapsamaktadır.

Gentan ve diğeri [22], çalışmalarında lazer tarama cihazının belirsizlik hesabı için kalibrasyon prosedürünü ele almışlardır. Çalışma, 3D tarayıcıların kalibrasyonu ve belirsizliklerinin hesaplanması için yeni bir metot önermektedir. Önerilen prosedür referans bir küresel plakanın kullanımına dayanmakla beraber üçgenleme tipi tarama yapan 3D tarayıcı üzerinde tecrübe edilmiştir. Deneysel sonuçlar, sistematik hataları düzelterek ve cihazın ölçüm belirsizliklerini azaltan kalibrasyon prosedürünün uygulanması ile cihazın ölçüm performansının artırılabilirliğini göstermektedir.

Godina ve Acko [23] master kalibrasyonlarında ölçüm belirsizliği üzerine yaptıkları çalışmada olabilecek en düşük belirsizlik değerine sahip mekanik karşılaştırmalı bir kalibrasyon süreci üzerinde durmuşlardır. Bu makalede, analitik ve deneysel araştırmalar sonucu elde edilen, masterların mekanik kalibrasyon süreçlerine ait belirsizlik bütçeleri detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışma sonucunda çok düşük ölçüm belirsizlikleri elde edilmiş, ve geliştirilen prosedür, kalibrasyon ve ölçüm kabiliyeti olarak BIPM veri tabanına eklenmiştir.

Santolaria ve Gine [24], robot kinematik hareket kalibrasyonu üzerine yaptıkları bu çalışmada, daha önce belirlenen kinematik parametreler ile hesaplanan pozisyon ve oryantasyon hatası cinsinden ifade edilen robot kalibrasyon prosedürlerinin aksine dairesel nokta analiz metodu kullanılan yeni bir teknik anlatılmıştır. Geliştirilen bu metot, 'Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement' dokümanında önerilen olasılık dağılım hesaplaması ile Monte Carlo yöntemine dayanmaktadır. Metot, her bir robot parametresinin tanımlanmasında kullanılan belirsizliğin hesaplanmasını ve dolayısıyla kalibrasyon belirsizliğine bağlı robot

pozisyon belirsizliğinin belirlenmesini mümkün kılar. Ayrıca bu teknik, hangi parametrelerin mümkün olan en düşük kalibrasyon belirsizliğine sahip olabileceğini belirlemede kullanılan veri elde etme testi için gerekli olan olabilecek en iyi koşulların kurgulanmasına izin vermektedir.

Caja ve diğerleri [25], optik ölçüm cihazının kalibrasyon parametrelerinin belirsizlik hesabı üzerine yaptıkları çalışmalarında, dijital optik cihazların görüntü alt sistemlerinin kalibrasyonu için yeni bir prosedür önermekte ve tanımlamaktadırlar. Bu metot sayesinde, görüntü alt sistemi ile ilişkili olan kalibrasyon parametrelerinin hesaplanması Monte Carlo metodu sistematize edilebilir. Bu çalışma iki ayrı alt çalışmaya bölünmüştür. Birinci kısım görüntü alt sisteminin matematik modelinin geliştirilmesi ve parametrelerinin belirsizliklerinin belirlenmesine odaklanırken, ikinci kısım, birinci kısımda geliştirilen teoriye dayanarak ölçüm belirsizliğinin ölçülmesi ve hesaplanması ile ilgili bir örnek çözüm sunar.

Kessel ve diğerleri [26] menzil kalibrasyonu için belirsizlik bütçelendirme üzerine yaptıkları çalışmalarında GUM dokümanının tarif ettiği tek bir sonuç kullanarak ölçüm belirsizliğini belirlemeye çalışan genel yöntemin aksine bir aralık içinde bulunan birden fazla değerin kullanılarak kalibrasyon belirsizliğinin belirlendiği yeni bir yöntem önermektedirler. Bu prosedür, kalibrasyon sonuçları ile ilintili olan kalibre edilmekte olan cihaz ile elde edilen ardışık ölçümlerin belirsizliğinin hesabını içermektedir. Bu amaçla genelde regresyon analizi kullanılmaktadır. Bu çalışmada regresyon analizlerinin zayıflıklarından bahsedilmiş ve alternatif bir yöntem tarif edilmiştir. Doğrusal yanıt fonksiyonuna sahip cihazlar için regresyon yerine 2-noktalı kalibrasyon tekniği kullanılabileceği gösterilmiştir. Prosedürün anlatılmasında basınç sensörü kalibrasyonu kullanılmıştır. Bu yaklaşım, doğrusal olan ve olmayan yanıt fonksiyonuna sahip cihazlar ve ölçüm prosedürleri için kullanılabilir.

Yukarıda özetlendiği üzere, şimdiye kadar ısı çift konusu dahil olmak üzere pek çok cihazın kalibrasyonu ve kalibrasyon belirsizliği ile ilgili bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma, ilk defa Taguchi yöntemini kullanarak ısı çift kalibrasyonundaki belirsizliğin azaltılmasını hedeflemiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın detayları, ileriki bölümlerde sunulmuştur.

4 MALZEME VE METOT

4.1 Materyaller ve Özellikleri



Şekil 4.1 Isıl Çift Kalibrasyonu Malzemeleri

Çalışmada kullanılan malzemeler;

- Referans standart platin dirençli termometre
- Kalibrasyonu yapılmak istenilen ısı çifti
- Standart platin dirençli termometre okuması alacak olan nano volt/mikro ohm metre
- Isıl çift okuması alacak olan kalibratör
- Sıcaklık kuyusu
- Buz noktası oluşturmak için buz ve kova
- Ortamın nem ve sıcaklığını ölçen sensör olup kullanılan malzeme ve cihazlar Şekil 4.1'de verilmiştir.

Bunların her biri ayrıntılı olarak aşağıda açıklanmıştır. Ayrıca kalibrasyon öncesinde ve sonrasında yapılan suyun üçlü noktası deneyi malzemeler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Suyun Üçlü Noktası Deneyi Malzemeleri

Bu deneyde kullanılan malzemeler;

- Suyun üçlü noktası hücresi
- Bir kase kuru buz
- Kaşık
- Hücrenin sonuna kadar gidebilecek uzunlukta tel
- 4 damla alkol
- Test edilecek standart platin direnç termometresi
- Termometre okumasında kullanılacak olan nanovolt/microohm meter

Bu malzemeler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Isıl çift

Isıl çift iki farklı metal alaşımının uçlarının kaynaklanması ile elde edilen bir sıcaklık ölçü elemanıdır. Kaynatılan nokta sıcak nokta, açık kalan iki uç soğuk nokta olarak adlandırılır. Isıl çift soğuk nokta ile sıcak nokta arasındaki sıcaklık farkından oluşur. Sıcaklık farkına orantılı olarak soğuk nokta uçlarında mV değerinde gerilim üretilir. Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkına orantılıdır.

Bu çalışmada J tipi ısıl çift kalibrasyonu yapılmıştır. J tipi ısıl çiftler demir ve bakır-nikel bileşenlerine sahiptir. Sıcaklık değer aralığı 0 °C - 750 °C'dir. Burada test

edilecek olan ısıl çift bir rulodan kesilmiştir. Satın alınan rulo Şekil 4.3'de gösterildiği gibidir.



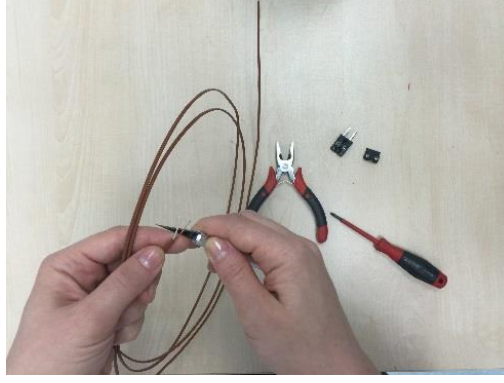
Şekil 4.3 Isıl Çift rulosu

Bu rulusunun markası Omega'dır. Rulo için firmanın sağladığı bilgiler Şekil 4.4'deki gibidir.



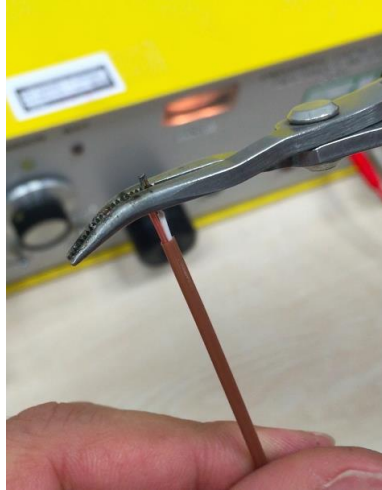
Şekil 4.4 Isıl Çift Rulosu

Bu rulodan istenilen uzunlukta ısıl çift kablosu kesilir. Kesilen kablodan ısıl çift elde etmek için Şekil 4.5'deki gibi uçları soyulur ve metal kısımları gerekli miktarda dışarı çıkartılır.



Şekil 4.5 Isıl Çift Hazırlanması

Ucu soyulan ısı çift metal telleri burmadan, sadece uç noktalarını birbirlerine dokundurarak Şekil 4.6' da görüldüğü gibi kaynak yapılır.



Şekil 4.6 Isıl Çift Ucuna Kaynak Yapılması

Isıl çiftin kaynak yapılmayan diğer ucuna kendi tipiyle uyumlu yani J tipi bir konnektör bağlanır. Bu kalibrasyon sırasında okuma almayı kolaylaştıracaktır.

Bu çalışmada sıcaklık kuyusu ısı dağılım testinde daha önceden kalibre edilmiş, hatası bilinen bir ısı çift kullanılmıştır. Kullanılan ısı çiftin tipi J tipidir ve hatası 200 °C'de 0°C'dir.

Standart Platin Direnç Termometresi

Yüksek saflıkta dirence sahip platin telin özel sarım teknikleri kullanılarak sarılması ile Platin direnç sensörler elde edilir ve bu sensörler koruyucu tüp içine

yerleştirilerek muhafaza edilir. Bu termometreler 2,3 veya 4 direnç teli ile uzatma yapılarak okuma cihazına bağlanabilir [13].

Platin Direnç Termometre elementinin direnci, diğer sensör tiplerine göre, sıcaklık ile en doğrusal değişimi gösterir. Standart Platin Direnç Termometresi (SPRT), Ulusal Standart Laboratuvarları ve sanayide, Sıcaklık Skalası 1990 (ITS-90)'a göre izlenebilir yüksek doğrulukta, sıcaklık ölçümlerinde kullanılır. PRT ile sıcaklık ölçülmek için, sensör elementinin direnci ile sıcaklık değişiminin korelasyonu, doğrusal denklemler ve katsayılar kullanarak sağlanır. Genellikle termometre göstergelerinin birçoğu bu denklemleri destekler, böylece direnç değerinden sıcaklık değerinin hesaplanması otomatik olarak yapılır [3] [31] [32].

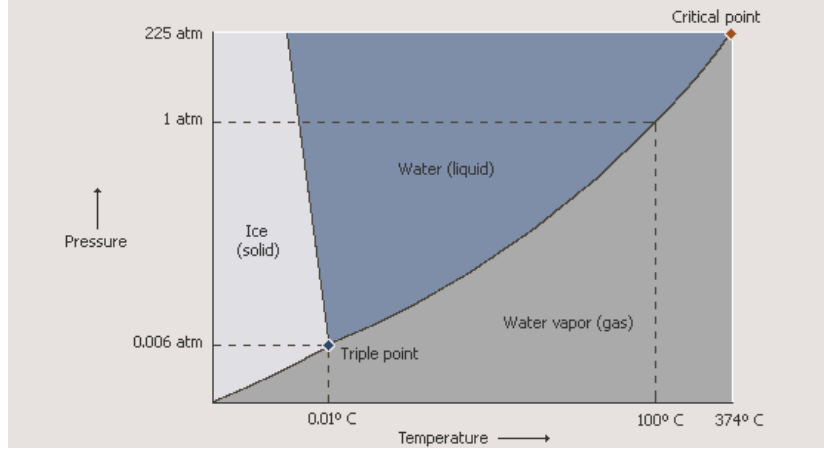
Bu çalışmada kullanılan standart platin direnç termometresi Şekil 4.7' de gösterilmektedir. İlgili termometrenin markası 'Isotech' dir.



Şekil 4.7 Standart Platin Direnç Termometresi

Suyun Üçlü Noktası Hücresi

Şekil 4.8' de gösterilen suyun üçlü noktasının sıcaklığı; saf suyun, buzun ve buharın termal dengede bulunduğu sıcaklıktır.



Şekil 4.8 Suyun Üçlü Noktası Grafiği

Suyun üçlü noktası (SÜN) 1990 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği' nin (ITS-90) temel olarak tanımlanmış sabit noktasıdır. Aynı zamanda Kelvin Termodinamik Sıcaklık Ölçeğinde de tanımlanmış noktalardan biridir. Bu sıcaklık ITS-90 ölçeğinde 0.01°C , Kelvin Termodinamik Sıcaklık Ölçeğinde 273.16 K olarak kabul edilmiştir. SÜN hücreleri, Uluslararası Sıcaklık Ölçeği (ITS-90) uyumlu Standart Platin Direnç termometrelerin (SPRT ve/veya PRT) kalibrasyonunda, bu termometrelerin ara kontrollerinde, ısıl çift kaymalarına bakmak için kullanılır [31].

Bu çalışmada kullanılacak olan suyun üçlü noktası hücresi 'Fluke' firması tarafından üretilmiştir. Düzenek Şekil 4.9'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.9 Suyun Üçlü Noktası Hücresi

Nano volt/mikro ohm metre

Bir devrenin herhangi iki noktası arasındaki potansiyel farkını (gerilimi) ölçmek için kullanılan cihazdır. Bu çalışmada bu cihazla SPRT okuması yapılacağı için

voltmetre yerine nanovoltmetre tercih edilmiştir. Bu daha hassas bir ölçüm yapılmasına imkân sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan nanovoltmetre Şekil 4.10'de gösterilen Hewlett Packard marka 34420A model olan cihazdır.



Şekil 4.10 Nano volt/mikro ohm metre

Bu cihaz Standart Platin Dirençli Termometre okuması yapılırken kullanılmıştır. Referans termometre bu cihaza bağlandığında, cihaz okumayı otomatik olarak °C cinsinden yapmaktadır.

Kalibratör

Cihazın markası Beamex, modeli MC6'dır. Şekil 4.11'da bu çalışmada kullanılan kalibratör gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Kalibratör

Cihazın pek çok parametre için okuma yapma ve gereken sinyali kalibre edilmek istenen cihaza verme gibi özellikleri mevcuttur. Bu çalışmada kalibre edilen ısı çiftten okuma almak için kullanılmıştır. Cihaz kendisi buz noktasındaki okumayı hesaplayarak doğru değeri göstermektedir.

Sıcaklık Kuyusu (Kuru Fırın)

Sıcaklık kuyusu ısıl çift kalibrasyonunda ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.12 Sıcaklık Kuyusu

Bu çalışmada kullanılan sıcaklık kuyusu Şekil 4.12'deki 'Fluke' marka kuyudur. Bu kuyu içerisinde termometre, ısıl çift gibi sıcaklık okuma elemanlarının sıcaklığı algıladığı bölgeleri yerleştirilen uç bölümü bulunmaktadır. Kısacası ısıl çift ya da termometre ucun içerisine, uç ise sıcaklık kuyusunun içerisine yerleştirilmektedir.

Uçlar

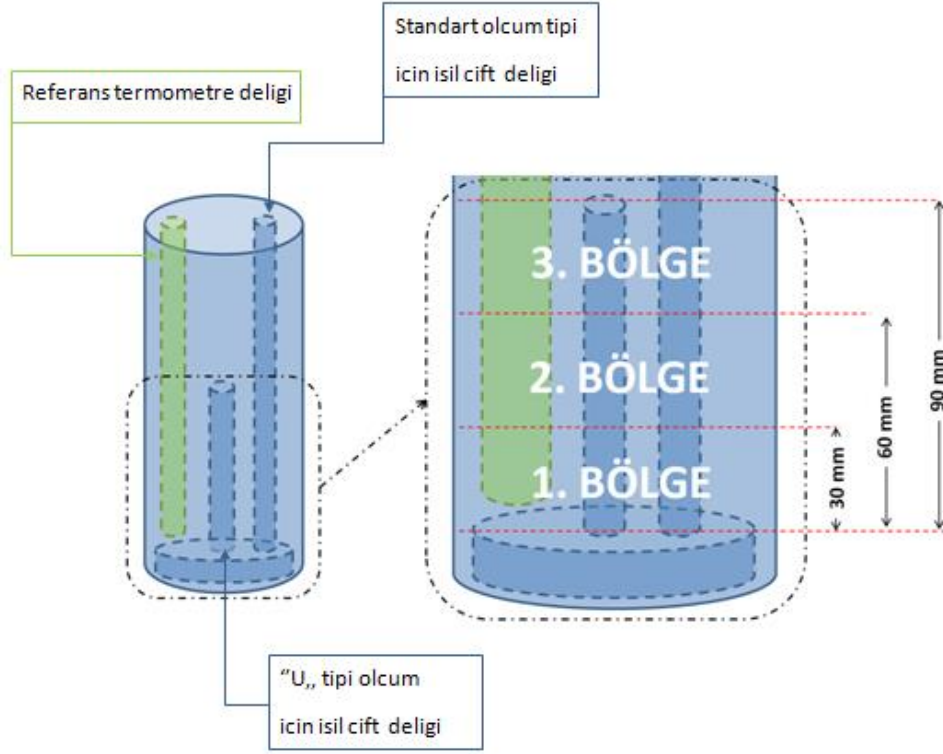
Taguchi yöntemiyle yapılacak olan iyileştirme deneyleri için 3 ayrı malzemeden uç tasarımı yapılmıştır. Bu malzemeler pirinç, paslanmaz çelik ve alüminyumdur. Bu tasarımların her birinde 3 farklı ısıl çift daldırma yöntemi için hazırlanmış delikler bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan uç çeşitleri Şekil 4.13'deki gibidir.



Şekil 4.13 Uç Çeşitleri

Çalışmada kullanılan uç malzemeleri; çelik (ASTM 316 östenitik Cr-Ni paslanmaz çelik), alüminyum (AMS-QQ-A-250/11 7075), pirinç (C360 pirinç alaşımı CuZn36Pb3)dur.

Şekil 4.14' de tasarlanan uçların detaylı çizimi gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Detaylı İnsert Çizimi

Şekil 4.14 'de de detaylı olarak incelendiğinde yöntemler şu şekilde açıklanabilir:

- Standart Daldırma Yöntemi: Düz bir boru şeklindeki delikle yapılan standart daldırma yöntemidir.
- Sızdırmaz Kapamalı Daldırma Yöntemi: Standart daldırma yöntemi için yapılan deliğin üzerine teflon malzeme kapatılarak elde edilen sızdırmaz kapamalı daldırma yöntemidir.
- U tipi daldırma yöntemi: Deliklerin altına açılan bir yoldan geçirilecek U şeklindeki bir boruya dönüşen deliğin kullanıldığı yöntemdir.

Bu yöntemlerin hepsinin üzerinde bulunduğu fonksiyonel deney ucu pirinç, çelik ve alüminyum olmak üzere üç ayrı malzemeden yapılmıştır.

Şekil 4.14'de görüldüğü üzere insert 3 bölgeye ayrılmıştır. Bunlar:

- Bölge 1 : Orta noktası 15mm olan, 0 mm ile 30 mm arasındaki bölge.
- Bölge 2 : Orta noktası 45 mm olan, 30 mm ile 60 mm arasındaki bölge.
- Bölge 3 : Orta noktası 75mm olan, 60 mm ile 90 mm arasındaki bölge.

Özet bir çizelge yapacak olunursa Taguchi deneyi için kullanılacak faktör ve seviyeler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A-İnsert Malzemesi	Pirinç	Paslanmaz çelik	Alüminyum
B-Isıl Çift Daldırma Yöntemi	Standart	U Tipi	Sızdırmaz Teflon Kapama
C-Isıl Çift Daldırma bölgesi [mm]	Bölge1	Bölge2	Bölge3

4.2 Metot

4.2.1 Isıl çift karşılaştırmalı kalibrasyon metodu

Bu çalışmada karşılaştırmalı kalibrasyon metodu kullanılmıştır. Bu metoda göre süreç şu şekilde ilerlemelidir:

- Kalibrasyonda kullanılacak olan referans termometre suyun üçlü noktası hücresi ile test edilerek, değerler kaydedilir.
- Kalibre edilmek istenilen ısıl çift istenilen uzunlukta rulodan kesilerek hazırlanır. Şekil 4.6 'deki gibi kaynak yapılır.
- Ardından ısıl çift kalibrasyon düzeneği kurulur.
- Sıcaklık kuyusu istenilen sıcaklığa ayarlanır ve set noktasına ulaşip stabil olması beklenir.

- Sıcaklık stabil olunca içerisinde referans ve kalibre edilecek ısı çift yerleştirilir.
- Referans ve kalibre edilen ısı çiftten 10 'ar okuma alınarak, bu değerler kayıt edilir.
- Kalibrasyon sonucunda hata ve belirsizlik değerleri hesaplanır.

4.2.2 Isı dağılımı hesaplama deneyleri Taguchi metodu

- Taguchi deneyi için seçilen Çizelge 2.2' de gösterilen L_9 ortogonal dizisine uygun olarak 9 adet deney yapılacaktır.
- İlk olarak bu deneylerde kullanılmak üzere Şekil 4.13'de gösterilen uçların üretimi gerçekleştirilir. Bu uçların her biri standart, u tipi ve sızdırmaz kapamalı olarak adlandırılan daldırma yöntemi deliklerine sahiptir.
- Deney düzeneği kurulur.
- Sıcaklık kuyusu istenilen değere ayarlanır.
- Ayarlanan değere geldiğinde, stabil olması beklenir.
- İlgili uç seçilir ve sıcaklık kuyusuna yerleştirilir.
- Isıl çift belirtilen daldırma yöntemi girişinden belirtilen yükseklikte daldırılır.
- Isıl çiftin bağlı olduğu kalibratörden okuma yapılır. 10 adet data alınarak kaydedilir.
- Bu datalarla S/N değerleri hesaplanır. Hesaplanan S/N değerlerinden en iyi deney tespit edilir.
- Tespit edilen en iyi parametre değerleriyle deney tekrarlanarak, o deneydeki ısı dağılımından kaynaklı belirsizlik hesaplanır ve başlangıç durumuna göre iyileşme düzeyi hesaplanır.

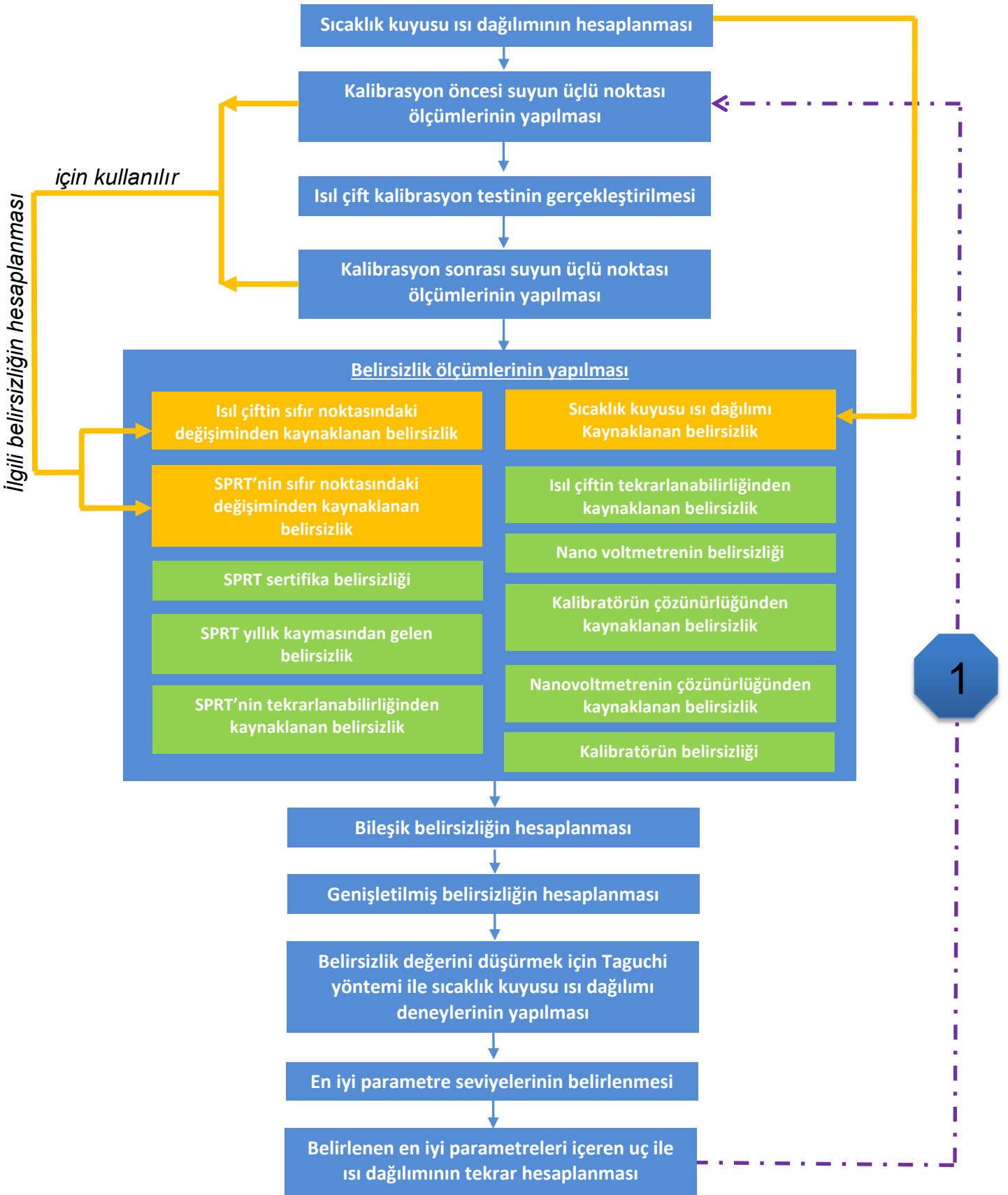
5 UYGULAMA

5.1 Isıl Çift Kalibrasyonu

Bilindiği üzere her kalibrasyon işlemi sonunda hata ve belirsizlik hesabı yapılmaktadır. Belirsizlik hesabı içinde belirsizlik bütçesi faktörleri teker teker belirlenerek hesaplanır. Bu çalışmada deneye ısı çift kalibrasyonuna başlamadan önce sıcaklık kuyusunun homojenite testi yapılır ve ilgili ölçüm değerleri ısı çift kalibrasyonu sonucunda hesaplanmış olan belirsizlik tablosuna eklenir.

Ardından ısı çift kalibrasyonuna başlamadan önce yapılan referans termometrenin suyun üçlü noktasındaki testi yapılır. İlgili ölçüm değerleri kayıt edilir ve kalibrasyon sonundaki belirsizlik hesabına eklenir.

Bu çalışmada farklı deney ve hesaplamalar yapılmıştır. İşlemlerin sıralamasının daha açıklayıcı olması için akış şeması Şekil 5.1'de sunulmaktadır.

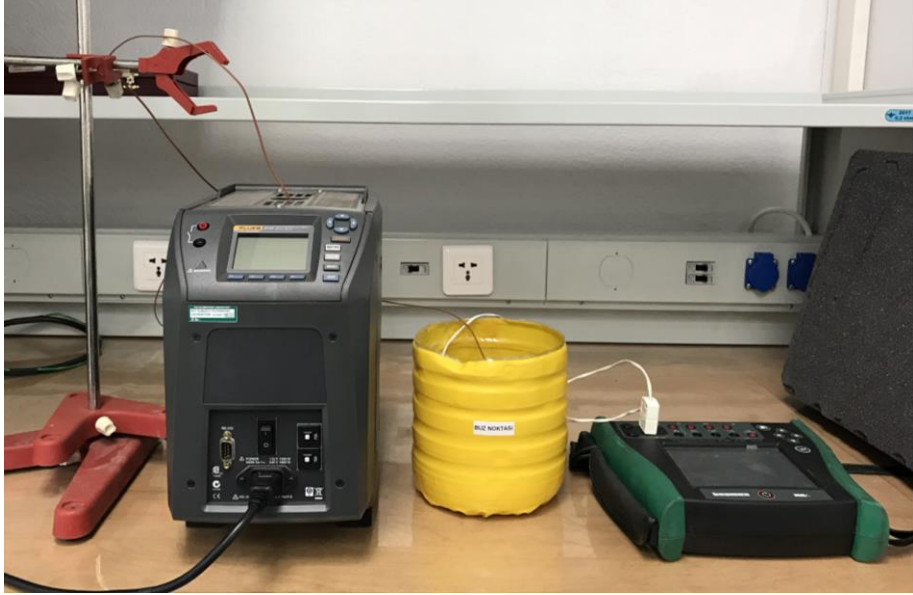


Şekil 5.1 Çalışmanın Akış Şeması

Şekil 5.1'de gösterilen 1 numaralı süreç akışı 'Kalibrasyon öncesi suyun üçlü noktası ölçümlerinin yapılması' basamağına geri dönme işlemini göstermektedir. Bu işlem 'Genişletilmiş belirsizliğin hesaplanması' basamağı ile sonlanmaktadır.

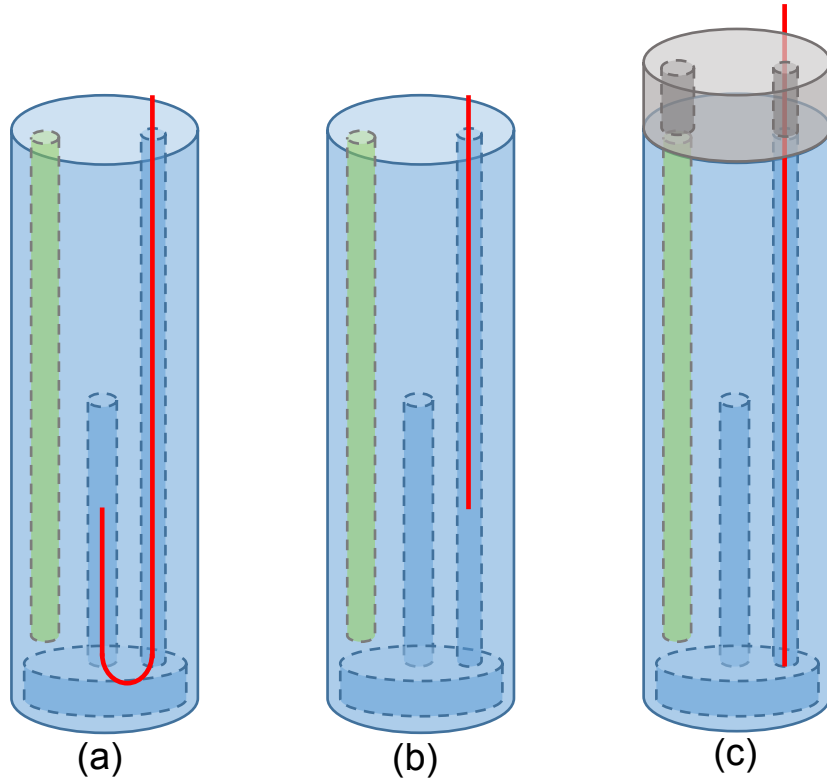
5.1.1 Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı

Sıcaklık kuyusuna yerleştirmek üzere Şekil 4.13'de gösterilen ve Şekil 4.14'de detaylandırılan uç çeşitlerinden pirinç uç seçilir ve sıcaklık kuyusuna yerleştirilir. Isı dağılımı testi yapmak için Şekil 5.2'deki deney düzeneği hazırlanır.



Şekil 5.2 Sıcaklık Kuyusu Isı Dağılımı Test Düzeneği

Isı dağılımı için sıcaklık kuyusu 200°C'ye ayarlanır. Kuyu 200°C'ye geldikten sonra yaklaşık 10 dakika stabil olması beklenir. Ardından Şekil 5.3'de görüldüğü üzere ucun standart daldırma yöntemi için olan deliğine J tipi ısı çifti daldırılır. Şekil 5.3'de ısı çifti kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Isıl Çift Daldırma Yöntemleri (a) U Tipi Daldırma (b) Standart Daldırma (c) Teflon Kaplama ile Daldırma

Her zaman kullanılan bölge olan birinci bölge yani 5 mm- 30 mm arasındaki bölge seçilen yüksekliklerde, her yükseklikten her 1 dakikada 1 adet ölçüm olmak üzere toplam 10 adet ölçüm alınmıştır. İlgili yükseklikteki stabil ısı değerinin 10 ölçümün ortalaması olduğu kabul edilmiştir. 5 mm – 30 mm arasında kabul edilen 1. bölgede orta nokta 15. mm olmak üzere her 5 mm’de bir toplam 6 yükseklikte ölçüm gerçekleştirilmiştir. Her bir yüksekliğe ait ortalama sıcaklık değerlerinin standart sapması hesaplanarak 1. bölgenin yüksekliğe bağlı sıcaklık homojenitesi bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu deney aynı zamanda Taguchi deneylerinden 1.Deney yani başlangıç deneyidir.

Çizelge 5.1 1.Deney Sonuçları

Okuma No Daldırma Derinliği[mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama	
5	198,7	198,68	198,7	198,71	198,66	198,71	198,75	198,68	198,74	198,68	198,701	
10	198,69	198,71	198,67	198,57	198,57	198,62	198,68	198,71	198,62	198,56	198,64	
15	199,11	199,05	199,02	198,88	198,81	198,89	199,04	199,11	198,98	198,88	198,977	
20	200,5	200,53	200,39	200,15	200,17	200,22	200,46	200,52	200,45	200,21	200,36	
25	199,55	199,6	199,38	199,12	199,06	199,28	199,48	199,61	199,45	199,21	199,374	
30	200,36	200,32	200,12	199,84	199,77	199,99	200,3	200,31	200,22	199,86	200,109	
											Standart sapma	0,666°C
											Ortalama	199,36°C

- Kullanılan insert malzemesi : Pirinç
- Kullanılan daldırma yöntemi : Standart
- Kullanılan daldırma bölgesi : Orta noktası 15 mm olan, 5 mm ile 30 mm arasındaki bölge

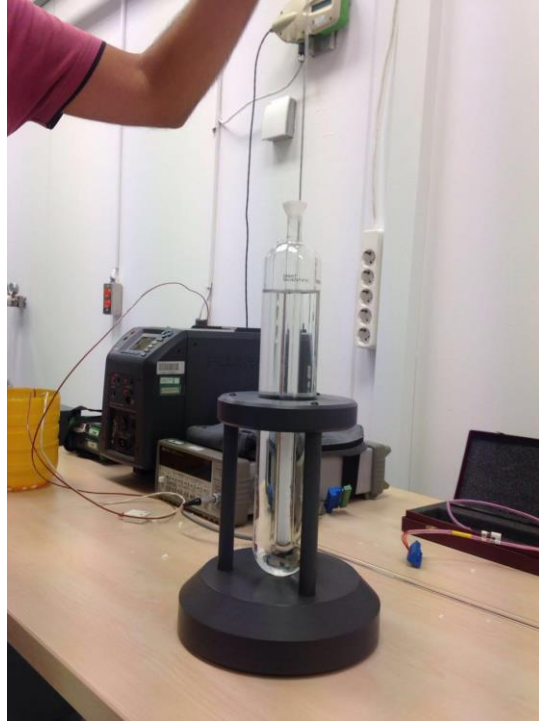
Yukarıdaki veriler kullanılarak ısı çift kalibrasyonu sonunda hesaplanacak olan belirsizlik değerine sıcaklık kuyusu ısı dağılımının katkısı hesaplanmıştır.

Sıcaklık kuyusu ısı dağılımının standart sapma değeri $0,666^{\circ}\text{C}$ 'dir. 2.15 eşitliği kullanılarak kısmi belirsizlik değeri hesaplanmıştır. Buradan hesaplanan belirsizlik değeri $0,3811$ 'dir.

5.1.2 Suyun üçlü noktası ölçümü

Isıl çift kalibrasyonunda kalibrasyona başlamadan önce referans olarak kullanacağımız termometre ile kalibrasyonu yapılacak olan ısı çiftin suyun üçlü noktasında ölçümü yapılır. Kalibrasyon öncesinde ve sonrasında yapılan bu ölçüm belirsizlik hesabına yansiyacaktır.

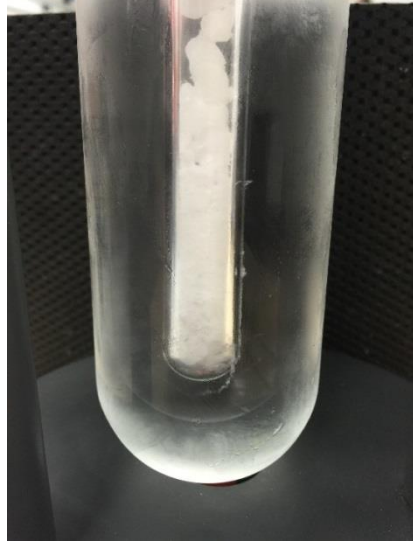
Suyun üçlü noktası hücrenin içerisine 4 damla alkol damlatılır. Ardından kuru buz hücrenin içerisine dökülür ve Şekil 5.4'deki gibi uzun bir tel ile karıştırılır.



Şekil 5.4 Suyun Üçlü Noktasının Hazırlanması

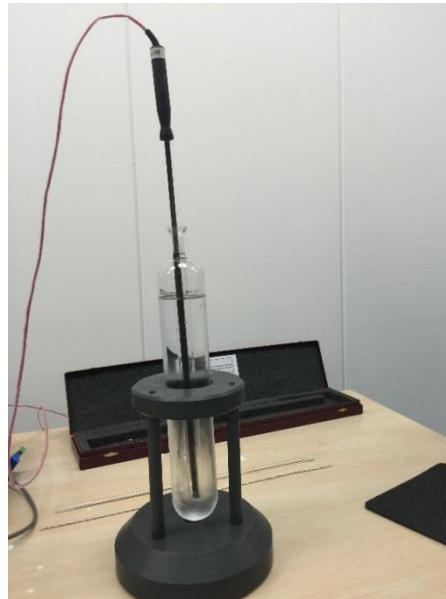
Kuru buz döküldükten sonra buz köprüsü oluşumu görülmeye başlanır. Suyun içerden dışarıya doğru donmaya başladığı gözlemlenir. Bu durumda suyun üçlü

noktası hücresi avuç içi ile kavranarak ısıtılır. Suyun üçlü noktası hücresinin kalibrasyona hazır hale gelmesi için içerideki buz kütesinin kalınlığının Şekil 5.5'de olduğu gibi yaklaşık 8mm 'ye ulaşması gerekir.



Şekil 5.5 Suyun Üçlü Noktasının Oluşturulması

Bu durumda hücre düzenekten ayrılarak su dolu beherin içerisine yerleştirilir. Suyun üçlü noktası kalibrasyon yapmak için hazırdır. Sonrasında içerisine sırasıyla Şekil 5.6'deki gibi referans termometreyi ve kalibre edilecek ısıl çifti daldırarak ölçüm alınır.



Şekil 5.6 Suyun Üçlü Noktasında Ölçümlerin Yapılması

Bu işlem kalibrasyon başlamadan önce ve sonra olmak üzere hem referans termometre hem de kalibre edilecek ısı çift için tekrarlanır. Bu değerler belirsizlik hesabında kullanılır.

Referans Standart Platin Dirençli Termometre için değerler aşağıdaki gibidir;

- İlk buz, ısı çiftinin kalibrasyon başlangıcında buz noktasındaki değeridir ve 0,014 °C olarak ölçülmüştür.
- Son buz, ısı çiftinin kalibrasyon bitiminde buz noktasındaki değeridir ve 0,000 °C olarak ölçülmüştür.
- İlk buz – Son buz = 0,014 °C olarak hesaplanır.
- Kısmi belirsizlik değeri 2.15 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Belirsizlik değeri 0,0081 °C bulunmuştur.

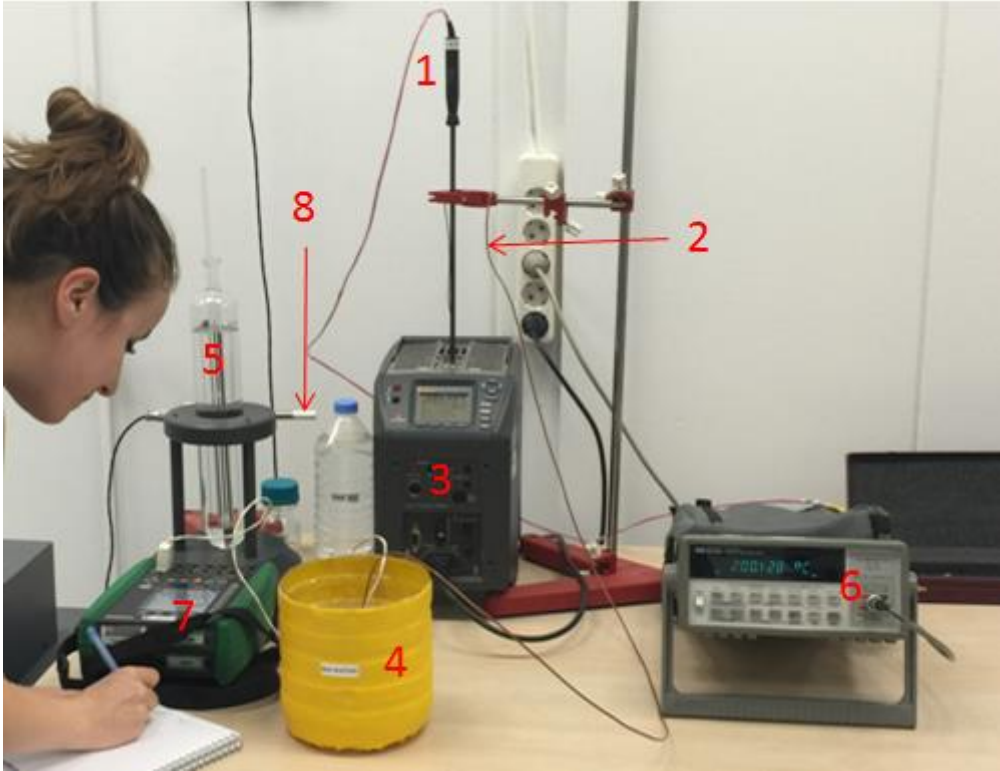
Kalibre Edilen Isıl Çift için değerler;

- İlk buz, ısı çiftinin kalibrasyon başlangıcında buz noktasındaki değeridir ve -0,10 °C olarak ölçülmüştür.
- Son buz, ısı çiftinin kalibrasyon bitiminde buz noktasındaki değeridir ve -0,11 °C olarak ölçülmüştür.
- İlk buz – Son buz = 0,01 °C olarak hesaplanır.
- Kısmi belirsizlik değeri 2.15 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Belirsizlik değeri 0,0058 °C olarak bulunmuştur.

5.1.3 Isıl çift kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi

Isıl çift kalibrasyonuna başlamadan önce laboratuvar ortamının nem ve sıcaklık bilgisi kayıt edilir. Laboratuvar ortamının sıcaklığı 22,2 °C ve nemi %35 rh'dir.

Isıl çift kalibrasyon düzeneği Şekil 5.7'deki gibi kurulur. Şekil 5.7' de 1 numara SPRT, 2 numara kalibre edilen ısı çifti, 3 numara sıcaklık kuyusu, 4 numara buz noktası, 5 numara SÜN, 6 numara nanovoltmetre, 7 numara kalibratör ve 8 numara ortam nem ve sıcaklığını ölçen sensördür.



Şekil 5.7 Isıl Çift Kalibrasyon Düzeneği

Sıcaklık kuyusuna pirinç uç yerleştirilir. Standart daldırma yöntemi için olan deliğine kalibre edilmek istenen ısıl çift birinci bölgenin orta noktası olan 15mm yüksekliğe kadar daldırılır. Referans termometre deliğinde de standart termometre daldırılır ve sıcaklık kuyusu 200°C'ye ayarlanır. Sıcaklık set noktasına gelince yaklaşık 10 dakika stabil olması beklenir. Ardından her iki sensörden de 10'ar adet ölçüm alınır. Alınan referans SPRT ve kalibre edilen ısıl çift ölçümleri Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Referans SPRT Ölçümleri

1	2	3	4	5
200,128°C	200,112°C	200,101°C	200,122°C	200,141°C
6	7	8	9	10
200,175°C	200,190°C	200,182°C	200,171°C	200,177°C

Referans SPRT ölçümleri için ortalama değer 200,1499°C olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3 Isıl Çift Ölçümleri

1	2	3	4	5
199,80°C	199,76°C	199,73°C	199,69°C	199,76°C
6	7	8	9	10
199,73°C	199,70°C	199,74°C	199,81°C	199,73°C

Kalibre edilen ısı çifti için ortalama değer 199,745°C olarak hesaplanmıştır.

Her kalibrasyonun sonucunda hata değeri ve belirsizlik değeri hesaplanmaktadır. Hata, ölçüm sonucundan, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sonuçtur.

$$Hata = \text{Ölçüm sonucu} - \text{Gerçek değer} \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1 kullanılarak hesaplanan hata değeri -0,4049°C'dir.

Isıl çiftler sıcaklık değerini milivolt şeklinde iletirler. Telin birleşen ucunda oluşan sıcaklık, milivolt şeklinde telin diğer ucunda okunur. Burada kast edilen hata değeri, telin içindeki elektronların durumundan kaynaklı olarak henüz üretim aşamasında meydana gelen hata değeridir.

5.1.4 Belirsizliğin hesaplanması

Bir ölçüm sonucu raporlandığında, sonucun kalitesini ve güvenilirliğini belirten sayısal bir gösterge olmalıdır. Ölçüm kalitesinin ve sonuçlarının güvenilirliğinin göstergesi belirsizlik değeridir. Ölçülen büyüklüğün gerçek değer etrafında bulunabileceği aralığı tanımlayan değerdir.

Belirsizlik değerinin hesaplanması için model fonksiyon belirlenmelidir. Bu çalışmadaki model fonksiyon 2.10 eşitliği ile verilmektedir. Model fonksiyonda belirtilen her bir belirsizlik faktörünün ne olduğu açıklanır ve değeri hesaplanır.

Belirsizlik faktörlerini ayrıntılı olarak aşağıda ifade edilmiştir.

- Isıl çift okuması (t_c), kalibrasyonu yapılan ısı çiftinin ölçtüğü değerdir. Bu değer Çizelge 5.3'deki 10 ölçümün ortalamasıdır.

$t_c = 199,745^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Referans SPRT okuması (t_r), izlenebilirliği olan referans standart platin dirençli termometrenin okuduğu değerdir. Bu değer Çizelge 5.2'deki 10 ölçümün ortalamasıdır.

$t_r = 200,149^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Referans SPRT sertifika değerinden gelen belirsizlik (δt_1) için kalibrasyonda kullanılan referans cihazın sertifikasındaki belirsizlik değeri göz önüne alınmalıdır. Sertifikada $0,05^\circ\text{C}$ olarak belirtilen belirsizlik değeri, $k=2$ (%95 güvenilirlik seviyesi için) için 2'ye bölünmelidir.

$u\delta t_1 = 0,025^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Referans SPRT yıllık kaymasından gelen belirsizlik (δt_2), kullanılan referans termometrenin son kalibrasyonundaki hatası ile bir önceki kalibrasyonundaki hatası arasındaki farktan hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında 200°C 'deki değerler referans alınmıştır.

- Son kalibrasyondaki hatası : $- 0,08^\circ\text{C}$
- Bir önceki kalibrasyondaki hatası : $- 0,06^\circ\text{C}$
- Farkları : $- 0,02^\circ\text{C}$

Kısmi belirsizlik değerini hesaplamak için 2.15 eşitliği kullanılmıştır.

$u\delta t_2 = 0,0115^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Referans SPRT'nin tekrarlanabilirliğinden gelen belirsizlik (δt_3) hesaplamasında kalibrasyon yapılırken alınan 10 adet verinin standart sapması hesaplanır. Çizelge 5.2' de verilen ölçüm sonuçlarının ortalaması $200,1499^\circ\text{C}$, standart sapma değeri ise $0,0327^\circ\text{C}$ ' dir.

Burada kullanılan standart sapma ortalamasının standart sapmasıdır. Kısmi belirsizlik değerini bulmak için 2.14 eşitliği kullanılmıştır. 10 ölçüm yapıldığı için n değeri 10'dur.

$u\delta t_3 = 0,0327 / \sqrt{10} = 0,0103^\circ\text{C}$ olarak bulunmaktadır.

- Referans SPRT'nin sıfır noktasındaki değişiminden kaynaklanan belirsizlik (δt_4), kalibrasyon başlangıcında ve bitiminde referans termometrenin buz noktasında alınan değeri arasındaki farktan hesaplanmaktadır.
 - İlk buz, ısı çiftin kalibrasyon başlangıcında buz noktasındaki değeridir ve $0,014^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür.
 - Son buz, ısı çiftin kalibrasyon bitiminde buz noktasındaki değeridir ve $0,000^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür.
 - İlk buz – Son buz değeri $0,014^\circ\text{C}$ olarak hesaplanır.

Kısmi belirsizlik değeri 2.15 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$u\delta t_4 = 0,0081^\circ\text{C}$ olarak bulunmuştur.

- Nanovoltmetrenin (SPRT okuması alınan) belirsizlik değeri (δt_5) için ilgili cihazın kalibrasyon sertifikasına bakılmalıdır. Sertifikada verilen belirsizlik değeri $2,01\text{E}-06^\circ\text{C}$ 'dir. Sertifika değeri $k=2$ için verilmiştir. Kısmi belirsizlik değeri için 2'ye bölünür.

$u\delta t_5 = 1,005\text{E}-06^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Isıl çiftin tekrarlanabilirliğinden kaynaklanan belirsizlik (δt_6) için kalibrasyon yapılırken alınan 10 adet verinin standart sapması hesaplanmıştır. Referans SPRT ölçümleri için ortalama değer $200,1499^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.
- Çizelge 5.3'de verilen ölçüm sonuçlarının ortalaması $199,745^\circ\text{C}$, standart sapma değeri ise $0,0367^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır.

Burada kullanılması gereken standart sapma ortalamasının standart sapmasıdır. Kısmi belirsizlik değerini bulmak için 2.14 eşitliği kullanılmıştır. 10 adet ölçüm yapıldığı için n değeri 10'dur.

$u\delta t_6 = 0,0367 / \sqrt{10} = 0,0116^\circ\text{C}$ olarak bulunmaktadır.

- Kalibratörün (ısı çift okumasında alınan) belirsizliği (δt_7) için sertifikasında belirtilen belirsizlik değeri kullanılmalıdır. Çalışma kapsamında kullanılan cihazın sertifikasında "measurement" fonksiyonu için 200°C 'deki belirsizliği

"0,1°C+0,007% x RDG" olarak belirtilmiştir. Burada RDG cihaz tarafından alınan okuma değeridir.

Bu durumda belirsizlik değeri, 0,11401°C olacaktır. Sertifikada belirsizlik değeri k=2 olarak verildiği için değer 2'ye bölünmelidir.

$u\delta t_7 = 0,05701^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Kalibratörün (ısı çift okuması alınan) çözünürlüğü (δt_8) 0,01°C' dir. Dikdörtgen dağılım söz konusu olduğundan ilgili değer 2.15 eşitliğinde ifade edildiği gibi $\sqrt{3}$ 'e bölünür.

$u\delta t_8 = 0,0058^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Nanovoltmetrenin (SPRT okuması alınan) çözünürlüğü (δt_9) 0,001°C'dir. Dikdörtgen dağılım söz konusu olduğundan ilgili değer 2.15 eşitliğinde ifade edildiği gibi $\sqrt{3}$ 'e bölünür.

$u\delta t_9 = 0,0006^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Isıl çiftin sıfır noktasındaki değişiminden kaynaklanan belirsizlik (δt_{10}) kalibrasyonun başlangıcında ve bitiminde ısı çiftin buz noktasında alınan değeri arasındaki farktan hesaplanmaktadır.

➤ İlk buz, ısı çiftin kalibrasyon başlangıcında buz noktasındaki değeridir ve -0,10 °C olarak ölçülmüştür.

➤ Son buz, ısı çiftin kalibrasyon bitiminde buz noktasındaki değeridir ve -0,11°C olarak ölçülmüştür.

➤ İlk buz – Son buz değeri 0,01°C olarak hesaplanır.

Kısmi belirsizlik değeri 2.15 eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$u\delta t_{10} = 0,0058^\circ\text{C}$ olarak bulunmuştur.

- Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı (δt_{11}), kullanılan sıcaklık kuyusundan gelen belirsizlik değeridir. Sıcaklık kuyusu ısı dağılımının standart sapma değeri 0,666°C'dir. Buradaki 2.15 eşitliği kullanılarak kısmi belirsizlik değeri hesaplanmıştır.

$u\delta t_{11} = 0,3811^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Bileşik belirsizlik (u_c) için ayrı ayrı hesaplanan kısmi belirsizlik değerleri ve 2.18 eşitliği kullanılır.

$u_c = 0,386^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

- Genişletilmiş ölçüm belirsizliği 2.19 eşitliğinde verilen şekilde hesaplanmaktadır. Bu çalışmada bileşik belirsizlik değeri %95 güvenilirlik düzeyi için $k=2$ kapsam faktörüyle çarpılmaktadır. U genişletilmiş belirsizlik değerini göstermektedir. $U=0,774^\circ\text{C}$ olarak bulunur.

Kalibrasyon raporu sonrasında belirsizlik değeri $y \pm U$ şeklinde belirtilmelidir. Bu çalışmanın sonucundaki belirsizlik değeri; $199,745^\circ\text{C} \pm 0,774^\circ\text{C}$ olarak bulunur

Bu çalışmada yapılan belirsizlik hesaplamaları Çizelge 5.4'de özetlenmiştir.

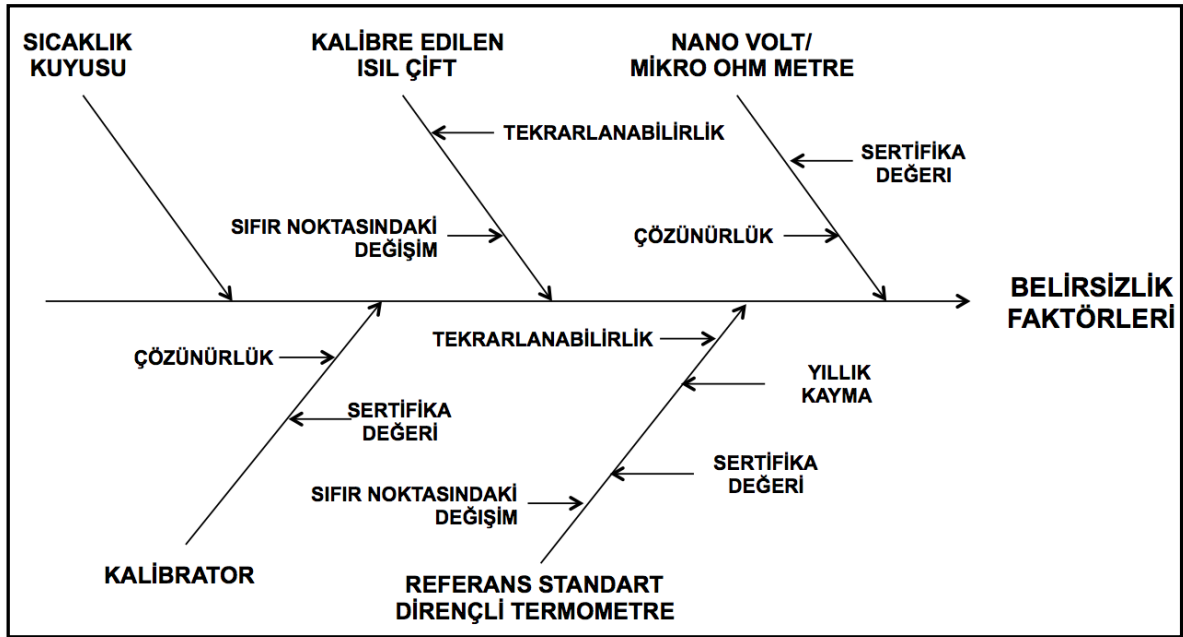
Çizelge 5.4 Belirsizlik Tablosu

Belirsizlik Kaynakları	Sembol	Tahmini Değer	Kısmi Belirsizlikler							Kısmi Varyanslar		
			Sembol	Değer	Birim	Dağılım Tipi	Bölen	Duyarlılık Katsayısı	Değeri	Karesi	Birim	
Isıl çift okuması	t_c	199.745 °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Referans SPRT Okuması	t_r	200.149 °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SPRT Sertifika Değeri	δt_1	-	$u\delta t_1$	0,05	°C	Normal	2	1	0,025000	0,000625	°C ²	
SPRT Yıllık Kayması	δt_2	-	$u\delta t_2$	0,02	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,011547	0,000133	°C ²	
SPRT'nin tekrarlanabilirliği	δt_3	-	$u\delta t_3$	0,0103	°C	Normal	1	1	0,010300	0,000106	°C ²	
SPRT'nin sıfır noktasındaki değişimi	δt_4	-	$u\delta t_4$	0,014	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,008083	6,53333E-05	°C ²	
Nanovoltmetrenin (SPRT okuması alınan) belirsizliği	δt_5	-	$u\delta t_5$	2,01E-06	°C	Normal	2	1	0,000001	1,01003E-12	°C ²	
Isıl çiftin tekrarlanabilirliği	δt_6	-	$u\delta t_6$	0,0116	°C	Normal	1	1	0,0116	0,000134	°C ²	
Kalibratörün (Isıl çift okuması alınan) belirsizliği	δt_7	-	$u\delta t_7$	0,11401	°C	Normal	2	1	0,057005	0,003249	°C ²	
Kalibratörün çözünürlüğü	δt_8	-	$u\delta t_8$	0,01	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,005773	3,33333E-05	°C ²	
Nanovoltmetrenin (SPRT okuması alınan) çözünürlüğü	δt_9	-	$u\delta t_9$	0,001	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,000577	3,33333E-07	°C ²	
Isıl çiftin sıfır noktasındaki değişimi	δt_{10}	-	$u\delta t_{10}$	0,01	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,005774	3,33333E-05	°C ²	
Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı	δt_{11}	-	$u\delta t_{11}$	0,66	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,381051	0,1452	°C ²	
Model fonksiyon: $t_c = t_r + \delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6 + \delta t_7 + \delta t_8 + \delta t_9 + \delta t_{10} + \delta t_{11}$							Bileşik Belirsizlik			0,386756	°C	
							Genişletilmiş Belirsizlik (k=2,%95)			0,773513		

Çizelge 5.4'deki verilerden öne çıkanlar şu şekildedir;

- Referans sıcaklık değeri = 200,149°C
- Ölçülen sıcaklık değeri = 199,745°C
- Hata = - 0,4049°C
- Genişletilmiş belirsizlik (U) = 0,7735°C

Genişletilmiş belirsizlik değeri 0,7735°C olarak hesaplanmıştır. Bu değer ne kadar küçük olursa, kalibrasyonun güvenilirliği o kadar fazla olur. Belirsizlik faktörleri Şekil 5.8' deki 'Balık Kılıçığı' modelinde incelenmiştir.



Şekil 5.8 Belirsizlik faktörlerinin balık kılıçığı modeli gösterimi

Şekil 5.8'deki balık kılıçığı modeli incelendiğinde belirsizlik kaynaklarının SPRT, kalibratör, nanovoltmetre, kalibre edilen ısı çift ve sıcaklık kuyusu ana başlıklarında toplandığı rahatlıkla gözlemlenmektedir. Kalibre etmek istediğimiz ısı çift, deneyimizin odak noktasında olan kalibre edilmek istenen nesne olduğundan onu değiştirmek gibi bir durum söz konusu değildir. Onun harici ana maddelerin tamamı laboratuvara belli bir yatırım yapılarak alınmış cihazlardır. Bu cihazlarda değişiklik yapmak söz konusu değildir. Sıcaklık kuyusu hem üzerinde küçük değişiklikler yaparak iyileşme yapmak için uygundur hem de belirsizlik kalemleri arasındaki en yüksek belirsizlik değerine sahip olan maddedir. Kısacası sıcaklık

kuyusundan gelen belirsizlik değerinin indirgenmesi sonucu en fazla etkileyecek değişim olacaktır. Sonuç olarak bu tez kapsamında belirsizlik değerini azaltmak için kalibrasyonu yapılan sistemde iyileştirme yapılmıştır. Sıcaklık kuyusu ısı dağılımında yapılan iyileşme çalışmalarında Taguchi deney tasarımı metodu kullanılmıştır.

5.2 Isı Dağılımı için Taguchi Deneyleri

Bu çalışmada Taguchi metodu yardımıyla sıcaklık kuyusunun ısı dağılımında iyileşme meydana getirerek, ısı çift kalibrasyonundaki belirsizlik değeri düşürülmeye çalışılmıştır.

Çalışmada ısı dağılımını ölçmek için kullanılan ısı çift J tipi, kalibreli ve 200°C'deki hatası yaklaşık olarak 0°C'dir. Kullanılan bütün ısı çiftler aynı rulodan kesilerek hazırlanmıştır.

Çizelge 5-5'de ise L₉ ortogonal dizaynına faktör ve seviyelerin yerleştirilmiş hali görülmektedir.

Çizelge 5.5 L₉ ortogonal dizaynında faktör ve seviyeler

DENEY NO	Uç malzemesi	Daldırma yöntemi	Daldırma bölgesi
1	Pirinç	Standart	1. Bölge
2	Pirinç	U tipi	2. Bölge
3	Pirinç	Sızdırmaz teflon	3. Bölge
4	Çelik	Standart	2. Bölge
5	Çelik	U tipi	3. Bölge
6	Çelik	Sızdırmaz teflon	1. Bölge
7	Alüminyum	Standart	3. Bölge
8	Alüminyum	U tipi	1. Bölge
9	Alüminyum	Sızdırmaz teflon	2. Bölge

Bu çalışmada istenilen sıcaklık kuyusunun her bir noktada ölçülen sıcaklık değerinin kuyunun ayarlandığı 200°C 'ye olabildiğince yakın olmasıdır. Dolayısıyla burada istenilen ne büyük değere ne küçük değere ulaşmaktır. İstenilen hedeflenen değere ulaşmaktır. Kısacası bu çalışma için uygun olan yöntem “nominal değer iyi” yaklaşımıdır. 2.22 eşitliği kullanılmıştır.

Çizelge 5-5'deki deneyler sırayla Şekil 5.2'deki gibi gerçekleştirilmiştir.

Isı dağılımı; A ve B faktörlerinden oluşan uç seçilerek ve C faktöründe belirtilen bölge boyunca ısı çiftle tarama yapılarak elde edilmiştir. Sıcaklık kuyusu 200°C'ye ayarlanmış, stabil olması beklenmiştir. Her bir tarama stabilizasyondan sonra başlayacak şekilde dakikada 1 ölçüm yapılarak toplamda her bir yükseklikte 10 adet ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümlerin ortalaması alınarak ilgili yükseklikteki sıcaklık değeri kaydedilmiştir. Önceki bölümde detaylı olarak anlatılan ve sonuçları Çizelge 5.1'de verilen deneye ek olarak Ekler 1-8'de diğer deneyler ve sonuçları sunulmaktadır. Ölçümleri Çizelge 5.1'de ve Ekler 1-8'de verilen deneylerin sonuçları Çizelge 5.6'da sunulmuştur.

Çizelge 5.6 Taguchi ortogonal tasarımına göre yapılan ısı dağılımı testlerinin sonuçları ve S/N değerleri

	Faktörler			Sıcaklık Kuyusu Isı Dağılımı (°C)						S/N (dB)
	Seviyeler			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	
Deney No	Uç malzemesi	Daldırma yöntemi	Daldırma bölgesi							
1	1	1	1	198,701	198,64	198,977	200,36	199,374	200,109	49,525
2	1	2	2	199,961	199,991	200,114	200,575	200,309	200,565	58,045
3	1	3	3	199,339	199,313	199,536	200,29	199,773	200,201	54,245
4	2	1	2	198,539	198,458	198,857	200,301	199,262	200,008	49,048
5	2	2	3	199,847	199,828	199,945	200,305	200,089	200,062	61,766
6	2	3	1	200,134	200,13	200,277	200,901	200,491	200,807	56,306
7	3	1	3	198,316	198,288	198,662	200,188	199,145	199,875	48,644
8	3	2	1	200,31	200,248	200,437	201,167	200,707	201,06	55,016
9	3	3	2	199,065	198,994	199,24	200,168	199,525	199,989	52,993

Bu tabloda;

Y₁:İlgili deney sonuçları tablosundaki birinci derinliğin ortalama sıcaklık değeri,
Y₂:İlgili deney sonuçları tablosundaki ikinci derinliğin ortalama sıcaklık değeri,
Y₃:İlgili deney sonuçları tablosundaki üçüncü derinliğin ortalama sıcaklık değeri,
Y₄:İlgili deney sonuçları tablosundaki dördüncü derinliğin ortalama sıcaklık değeri,
Y₅:İlgili deney sonuçları tablosundaki beşinci derinliğin ortalama sıcaklık değeri,
Y₆:İlgili deney sonuçları tablosundaki altıncı derinliğin ortalama sıcaklık değerini göstermektedir.

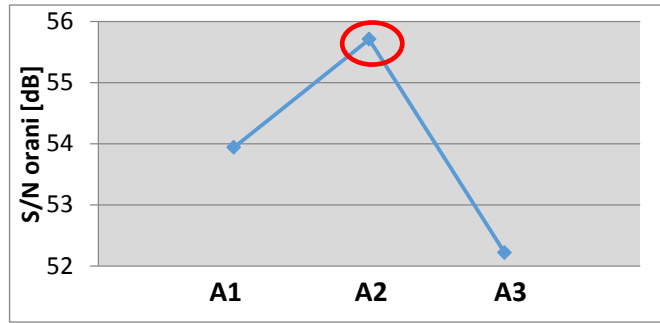
Bir sonraki aşamada ise her faktörün her seviyedeki etkisinin araştırılması gerekir. Bunun için Çizelge 5.7’de verilen S/N oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınır. Çizelge 5.7’de bulunan parametrelerin en büyük değerinin sahip olduğu seviye, o parametrenin en iyi seviyesine yani

homojenitenin en iyi olduğu deney sonucuna işaret etmektedir. Çizelge 5.7’de optimum parametre seviyeleri “ * ” işareti ile işaretlenmiştir.

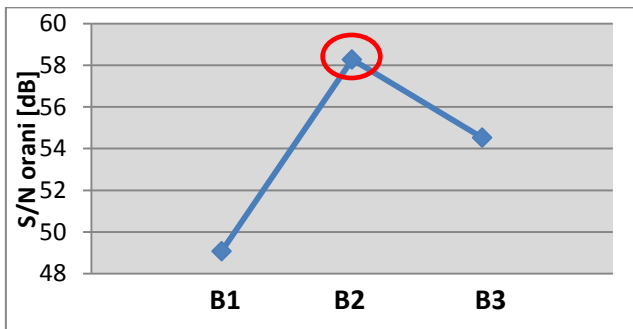
Çizelge 5.7 Parametre seviyelerinin S/N oranları

FAKTÖRLER	Ortalama S/N (dB)		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A-Uç Malzemesi	53,931	55,691*	52,217
B-Daldırma Tipi	49,102	58,237*	54,500
C-Daldırma Derinliği	53,592	53,361	54,885*

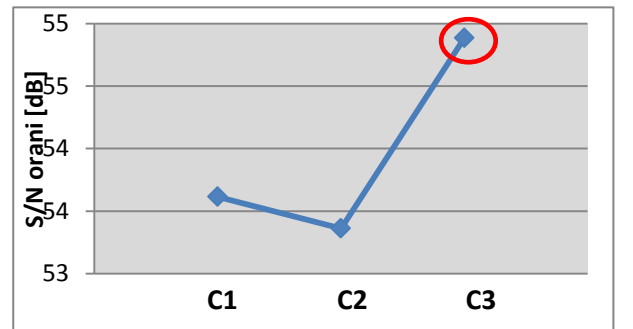
Hesaplanan bu değerler her bir parametre için Şekil 5.9’da grafiksel olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.9 Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi (a) Faktör –A Uç malzemesi (b) Faktör – B Daldırma tipi (c) Daldırma derinliği

Taguchi deneylerinin sonuçları incelendiğinde, optimum tasarımın A2B2C3 yani U-tipi daldırma yöntemi-çelik-üçüncü bölge olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle A2B2C3 tasarımında ısı dağılımı için ölçülen değerler ayar noktası olan 200°C 'ye yani hedef değere en yakındır. Bu da homojenitenin en iyi olduğu deneyin olduğunu göstermektedir.

A2B2C3 optimum deneyi Taguchi deneylerinden 5.Deney'i işaret etmektedir. Bu deney, optimum deneyin tespitinden sonra tekrarlanarak elde edilen sonuçlarla tekrar ısı dağılım testi yapılmıştır. Deneyin sonuçları Ek 9.'da verilmiştir. Doğrulama deneyinin sonuçları ile Taguchi deneylerinden 5 numaralı deneyin sonuçları hemen hemen aynı çıkmıştır. Deneylerden sonra yapılan doğrulama deneyinde de ısı dağılımındaki iyileşme gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadaki hedef, ısı çift kalibrasyonunda belirsizliğin azaltılmasıdır. Şekil 5.7 'de gösterilen ısı çift kalibrasyonu optimum tasarım olan A2B2C3 uç tasarımı ile tekrarlandı ve Çizelge 5.8'de gösterilen yeni belirsizlik tablosu oluşturulmuştur.

Oluşturulan yeni tabloda belirsizlik faktörlerinden olan referans standart platin dirençli termometrenin sertifika değerinden gelen belirsizlik, referans standart dirençli termometrenin yıllık kaymasından gelen belirsizlik, referans standart dirençli termometrenin tekrarlanabilirliğinden gelen belirsizlik, referans standart dirençli termometrenin sıfır noktasındaki değişiminden kaynaklanan belirsizlik, nanovoltmetrenin sertifika belirsizliği, ısı çiftin tekrarlanabilirliğinden gelen belirsizlik, kalibratörün sertifika belirsizliği, kalibratörün çözünürlüğünden kaynaklı belirsizlik değeri, nanovoltmetrenin çözünürlüğünden gelen belirsizlik, ısı çiftin sıfır noktasındaki değişiminden gelen belirsizlik değeri ilk ısı çift kalibrasyonu belirsizlik tablosundaki değerleriyle aynıdır. Değişimin olup iyileşmenin gözlemlendiği belirsizlik maddesi sıcaklık kuyusu ısı dağılımından gelen belirsizliktir (δt_{11}).

Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı (δt_{11}) için yapılan deneyde standart sapma değeri 0,161°C'dir. Buradaki dağılım dikdörtgen dağılım olduğu için 2-15'de verilen eşitlik kullanıldığında değer $\sqrt{3}$ 'e bölünerek kısmi belirsizlik değeri hesaplanmıştır.

$u\delta t_{11}=0,093^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.8 İyileştirmeden sonraki belirsizlik tablosu

Belirsizlik Kaynakları	Sembol	Tahmini Değer	Kısmi Belirsizlikler							Kısmi Varyanslar		
			Sembol	Değer	Birim	Dağılım Tipi	Bölen	Duyarlılık Katsayısı	Degeri	Karesi	Birimi	
Isıl çift okuması	t_c	199.741 °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SPRT Okuması	t_r	200.1491 °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SPRT Sertifika Değeri	δt_1	-	$u\delta t_1$	0,05	°C	Normal	2	1	0,025000	0,000625	°C ²	
SPRT Yıllık Kayması	δt_2	-	$u\delta t_2$	0,02	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,011547	0,000133	°C ²	
SPRT'nin tekrarlanabilirliği	δt_3	-	$u\delta t_3$	0,0103	°C	Normal	1	1	0,010300	0,000106	°C ²	
SPRT'nin buz noktasındaki değişimi	δt_4	-	$u\delta t_4$	0,014	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,008083	6,53333E-05	°C ²	
Nanovoltmetrenin (SPRT okuması alınan) belirsizliği	δt_5	-	$u\delta t_5$	2,01E-06	°C	Normal	2	1	0,000001	1,01003E-12	°C ²	
Isıl çiftin tekrarlanabilirliği	δt_6	-	$u\delta t_6$	0,0116	°C	Normal	1	1	0,0116	0,000134	°C ²	
Kalibratörün (Isıl çift okuması alınan) belirsizliği	δt_7	-	$u\delta t_7$	0,1140	°C	Normal	2	1	0,057005	0,003249	°C ²	
Kalibratörün çözünürlüğü	δt_8	-	$u\delta t_8$	0,01	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,005773	3,33333E-05	°C ²	
Nanovoltmetrenin (SPRT okumasından) çözünürlüğü	δt_9	-	$u\delta t_9$	0,001	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,000577	3,33333E-07	°C ²	
Isıl çiftin buz noktasındaki değişimi	δt_{10}	-	$u\delta t_{10}$	0,01	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,005774	3,33333E-05	°C ²	
Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı	δt_{11}	-	$u\delta t_{11}$	0,161	°C	Dikdörtgen	$\sqrt{3}$	1	0,092953	0,008640	°C ²	
Model fonksiyon: $t_c = t_r + \delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6 + \delta t_7 + \delta t_8 + \delta t_9 + \delta t_{10} + \delta t_{11}$									Bileşik Belirsizlik		0,114110	°C
									Genişletilmiş Belirsizlik (k=2, %95)		0,228221	°C

5.2.1 Varyans Analizi

İstatistik bilim dalında varyans analizi veya ANOVA gözlenen varyansı çeşitli kısımlara ayırma yöntemiyle bazı değişkenlerin başka bir değişken üzerindeki etkisini incelemeye yarayan bir grup modelleme türüdür. Elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliğini test etmek ve kontrol faktörlerinin ısı dağılımını ne ölçüde etkilediğini tespit etmek için S/N oranlarından faydalanılarak ANOVA tablosu hazırlanmıştır. Tablo, Çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 Anova tablosu

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	% Etki
Uç Malzemesi	2	18,258	9,129	65,1199	11,61
Daldırma Tipi	2	128,474	64,237	458,4405	81,67
Daldırma Derinliği	2	3,994	1,998	28,5197	2,54
Artık	47	6,586	0,140129		
Toplam	53 (9x6-1)	157,316			
Modelin R ² Değeri: 0,95					

Çizelge 5.9'daki Anova tablosu incelendiğinde; yüzde etki kolonuna bakıldığında B faktörünün yani daldırma tipinin en yüksek oranda etkilediği, onu sırasıyla malzeme ve derinlik faktörlerinin takip ettiği açıkça gözlemlenmektedir. Tablodaki F değerinin yorumlanabilmesi için tablodan kritik F değerini bulup, deney için hesaplanan değerleri onunla karşılaştırmak gerekmektedir. %95 güvenilirlik seviyesi için $F_{0,05;2;47}$ değeri yaklaşık 3,20'dir. Tabloya bakıldığında her bir faktörün F değerinin 3,20'nin üzerinde olduğu görülmektedir. Değerlerden en büyük farklılığın B faktöründe olması daldırma tipinin bu çalışmadaki önemini ayrıca vurgulamaktadır.

6 SONUÇLAR

Bu çalışmada Taguchi metodu yardımıyla sıcaklık kuyusunun ısı dağılımının iyileşmesi için uç tasarımları yapılmıştır. Yapılan tasarımlardan optimum tasarımın A2B2C3 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu optimum dizayn şöyledir:

Optimum tasarım : A2B2C3

- İncert malzemesi : Çelik
- Daldırma Tipi : U tipi
- Daldırma derinliği : 60 mm ile 90 mm arasındaki bölge (3.bölge)

Çizelge 6.1 Başlangıç ve Optimum tasarımın karşılaştırılması

AÇIKLAMA	BAŞLANGIÇ TASARIM	OPTİMUM TASARIM	% İYİLEŞME
Uç malzemesi	Pirinç	Paslanmaz çelik	-
Daldırma tipi	Standart	U tipi	-
Daldırma derinliği	5 mm ile 30 mm arası (birinci bölge)	60 mm ile 90 mm arası (üçüncü bölge)	-
S/N değeri	49,546	61,766	24,6
Sıcaklık kuyusunun maksimum deviasyonu	1,720°C	0,477°C	72,3
Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı standart sapması	0,666°C	0,163°C	75,5
Kalibrasyon belirsizliğine katkısı	0,3811	0,093	75,6
Kalibrasyonun genişletilmiş belirsizliği	0,774	0,228	70,5

Bu çalışmada sıcaklık kuyusu ısı dağılımı iyileştirilmeye çalışılmıştır. İyileşme düzeyini göstermek için Çizelge 6.1 hazırlanmıştır. Hedef değer olan 200°C'ye, ölçülen bütün değerlerin olabildiğince yakın olması ısı dağılımının iyi olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla burada ilgili bölge için her bir noktadaki sıcaklığın hedef değere olan yakınlığı önemlidir. Metot olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Çizelge 6.1, başlangıç tasarımı ile optimum tasarım arasındaki iyileşmeyi açıkça göstermektedir.

Sonuç detaylandırıldığında, Taguchi deneylerinde kullanılan üç faktörden deneyleri en çok etkileyenin daldırma tipi olduğu en az etkileyenin ise daldırma derinliği olduğu gözlemlenmiştir. Bu faktörler ayrı ayrı incelendiğinde;

Uç malzemeleri değerlendirildiğinde: Faktörlerin etkilerini değerlendirildiğinde ikinci sırada gelmektedir. Kullanılan malzemeler; alüminyum, çelik ve pirinçtir. Bu sonucu yorumlarken ısı iletkenlikleri farkının etkisi olabileceği düşünülebilir. Isı iletkenliği olarak alüminyum en yüksek, çelik ise en düşük iletkenliğe sahiptir. Sıcaklık kuyusu ısı dağılımı için; ısı iletimi düşük olan çeliğin ısıyı yavaş iletterek daha kararlı bir dağılıma katkıda bulunduğu söylenebilir.

Daldırma tipi değerlendirildiğinde: İyileşmeye en yüksek etkiyi yakaladığımız faktör budur. S/N değerleri arasındaki farklar standart tipi ucun ısı dağılımını belirgin bir şekilde kötü etkilediğini göstermektedir. U tipi uç ısının en az salınımına sebep olmuştur ve ısıl çift kalibrasyonlarında tercih edilmesi yerinde olacaktır. Fakat bu tip bir uç rulodan kesilerek hazırlanmış ısıl çiftler için kullanışlı olacaktır. Kaplaması farklı yani sert, bükülmesi mümkün olmayan malzemelerden yapılanlar için bu kullanışlı olmayacaktır. Eğer kalibrasyonu yapılacak ısıl çift bu şekildeyse ya da termometre ise S/N oranı buna yakın olan ve ikinci sırada gelen sızdırmaz kapama kullanılabilir. Standart uç, ucun ağzının açık olmasından kaynaklı olarak ısı kaybı çok fazladır ve bu da ısı dağılımını olumsuz etkilemektedir. Diğer iki tasarımda ısı hapsolmüştür ve kayıp azaltılmıştır.

Daldırma derinliği değerlendirildiğinde: İyileşmeyi en az etkileyen faktördür. Bütün S/N değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Burada L9 tablosuna ayrıntılı bakıldığında derinlikten en fazla etkilenen tasarımın standart tasarım olduğu görülmektedir. Standart tasarımda yükseklik değeri arttıkça, ucun hava girişi olan tarafına yaklaşıldığı için salımın artmıştır. Diğer 2 tasarımda ısı kaybının engellenmiş olması, derinlik faktörünün etkisini azaltmıştır.

Taguchi deneyi tamamladıktan sonra optimum tasarım olan A2B2C3 yani çelik – U tipi uç kullanılan ve ısıl çiftin 3. bölgeye daldırıldığı ısıl çift kalibrasyonu tekrarlanmıştır. Burada sıcaklık kuyusundan gelen belirsizlik değeri tekrar hesaplanmış ve belirsizlik bütçesinde bu değer girilmiştir.

Çizelge 6.1’de kalibrasyon belirsizliğinde meydana gelen iyileşme açıkça görülmektedir. Yapılan bu çalışmanın belirsizliği azaltmaya katkısı %70,5 olarak hesaplanmıştır. Kalibrasyonlarda belirsizlik yapılan kalibrasyon işleminin kalitesini ve güvenilirliğinin bir işaretidir. Bu değeri küçültmüş olmak hem kalibrasyonu yapılan cihaz üretimde kullanırken prosesin kalitesini direk artırmakta hem de kalibre edilen cihazın kullanıcısı yapılan kalibrasyona daha çok güvenmektedir. Üretimde kalite isterlerini sağlayan bir ürün ortaya koymak için özellikle havacılık sektörü gibi dar isterli alanlarda düşük belirsizlik önemli bir parametredir. Çünkü tezgâhın ya da cihazın durumu ürün ve prosesi direk etkilemektedir.

7 KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Kinzie,P.A., Thermocouple Temperature Measurement, A Wiley&Sons
- [2] Lenk, J.D.,Abc's of Thermocouples, Howard W. Sams & Co.
- [3] Anonim, Isıl Çift Sıcaklık Sensörlerinin Karşılaştırmalı Kalibrasyon Yöntemi ile Kalibrasyonları, Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü
- [4] Anonim, Ölçüm ve Kalibrasyonlarda Belirsizlik Hesapları, Eğitim Dokümanı, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü
- [5] Sadikhov E., Kangı R., Uğur S., Ölçüm Belirsizliği, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü,1995
- [6] Godina, T. Vuherer, B. Acko, Possibilities for minimising uncertainty of dissimilar materials gauge blocks calibration by mechanical comparison, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, 2011
- [7] Anonymous, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999
- [8] Dieck, R. H., Measurement Uncertainty : Methods and Applications Fourth Edition, ISA
- [9] Canıyılmaz, E., Kutay, F., Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım, Gazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt:18,2003
- [10] Arifoviç N., Derelioğlu A., Kuru Fırın Ölçümlerinde Belirsizlik Hesabı, VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi
- [11] Şirvancı, M., Kalite İçin Deney Tasarımı Taguçi Yaklaşımı, Literatür Yayınları, İstanbul, 2011
- [12] Murphy, R.B., Quality of Observation, Materials Research & Standards, 1961
- [13] Altın, M., Hassas Sıcaklık Ölçümünde Ölçüm Belirsizliği İçin Farklı Modellemeler ve Deneysel Karşılaştırmalar, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [14] Hill K.D., Gee D.J., Quantifying the Calibration Uncertainty Attributable to Thermocouple Inhomogeneity, National Research Council of Canada, 2013
- [15] Pearce J.V., Harris P.M.,Greenwood J.C.,Evaluating Uncertainties in Interpolations Between Calibration Data for Thermocouples, 2010, UK
- [16] Meyer C.W., Garrity K.M., Updated Uncertainty Budgets for NIST Thermocouple Calibrations.,USA
- [17] Zvizdic D., Serfezi D.,Bermanec L.G., Bonnier G.,Renaot E., Estimation of Uncertainties in Comparison Calibration of Thermocouples, France

- [18] Bitou Y.A., Hosoya H B, Mashimo K.B., Uncertainty reducing method for the reference standards in gauge block comparator calibration, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), National Metrology Institute of Japan (NMIJ), 2014
- [19] Kadis R., Evaluation of the measurement uncertainty: Some common mistakes with a focus on the uncertainty from linear calibration, Department of State Measurement Standards in Physico-Chemical Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology, 2017
- [20] Badocco D., Lavagnini I., Mondin A., Pastore P., Effect of Multiple Error Sources on the Calibration Uncertainty, Department of Chemical Sciences, University of Padua, Italy 2013
- [21] Reis M.L.C.C., Castro R.M., Mello O.A.F, Calibration uncertainty estimation of a strain-gage external balance, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, Brazil, 2012
- [22] Genta G., Minetola P., Barbato G., Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation, Department of Management and Production Engineering, Politecnico di Torino, 2016
- [23] Godina A., Measurement Uncertainty Analysis for Calibration of Gauge Blocks, Bojan University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia, 2000
- [24] Santolaria J., Gine M., Uncertainty estimation in robot kinematic calibration, Department of Design and Manufacturing Engineering, Universidad de Zaragoza, Spain, 2011.
- [25] Caja J., Gómez E., Maresca P., Optical measuring equipments. Part I: Calibration model and uncertainty estimation, Department of Mechanical and Construction Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, Spain, 2014
- [26] Kessel R., Kacker B., Sommer K. D., Uncertainty budgeting for range calibration, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany 2011.
- [27] Karagöz, N., Taguchi Metodunun Hava Aracı Kanat Tasarımı Sürecine Uygulanması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014
- [28] Mezarıcıöz, S., Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Orthogonal Dizaynına Göre Optimizasyonu, Çukurova Üniversitesi Tekstil Dergisi, Sayı:4 ,2010.
- [29] Durmaz, S., Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2008
- [30] Özçelik B., Özbay A., Plastik Enjeksiyon Kalıp Makinelerinin Polipropilen Ürünün Mekanik Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [31] Davut A., Standart Platin Direnç Termometrelerinde Suyun Üçlü Noktası Ölçümleri ve Kalibrasyonun Geçerliliği, TSE Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı

- [32] Kartal A., Kuyruklu Yıldız A.C., İnce A.T., Uluslararası Sıcaklık Ölçeği 1990 (ITS-90)'a Göre Karşılaştırmalı Kalibrasyonların Yapılması, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü
- [33] Benedict ,R.P., Uncertainty in Measurement, Elektro - Technohol,1964
- [34] Anonim, Kalibrasyonda Ölçüm Belirsizliğinin Değerlendirilmesi, TÜRKAK,EA-4/02 M: 2013
- [35] Anonymous, The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)
- [36] Anonymous, Evaluation of Measurement Data - Guide to the of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008 GUM with Minor Corrections, BIPM
- [37] Anonymous, G104 - Guide for Estimation of Measurement Uncertainty In Testing, American Association for Laboratory Accreditation, 2014
- [38] Anonymous, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European Co-operation for Accreditation, EA-4/02
- [39] Taylor B.T. and Kuyatt C.E., Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST,1994
- [40] Besterfield D.H., Besterfield C., Total Quality Management, Prentice Hall Inc., New Jersey,1995.
- [41] Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiment, John Wiley& Sons, Newyork,1991
- [42] Lunani M., Nair V.N., Wasserman G.S., Graphical Methods for Robust Design with Dynamic Characteristics, Journal of Quality Technology.
- [43] Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen M., Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu, İTÜ Mühendislik Dergisi, 2004,Cilt: 3, Sayı:6
- [44] Saat, M., Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı, Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 2 Sayı 3, Ankara, 2000
- [45] Taguchi G.,Chowdhury S.,Wu Y.,Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley
- [46] Dietrich, C. F., Uncertainty Calibration and Probability, John Wiley

8 EKLER LİSTESİ

Ek 1 İkinci deney ölçüm sonuçları

Ek 2 Üçüncü deney ölçüm sonuçları

Ek 3 Dördüncü deney ölçüm sonuçları

Ek 4 Beşinci deney ölçüm sonuçları

Ek 5 Altıncı deney ölçüm sonuçları

Ek 6 Yedinci deney ölçüm sonuçları

Ek 7 Sekizinci deney ölçüm sonuçları

Ek 8 Dokuzuncu deney ölçüm sonuçları

Ek 9 Optimum deney olan A2B2C3 için ısı dağılım testi sonuçları

9 EKLER

Ek 1. İkinci deney ölçüm sonuçları

Daldırma Okuma No Derinliği [mm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y)
35	200	199,97	199,96	199,95	199,91	199,98	200,04	199,96	199,93	199,91	199,961
40	200,04	200	200,03	199,93	199,84	199,98	200,07	200,11	200,02	199,89	199,991
45	200,27	200,2	200,12	200,01	199,97	200,03	200,17	200,27	200,1	200	200,114
50	200,71	200,73	200,53	200,39	200,4	200,45	200,71	200,71	200,66	200,46	200,575
55	200,48	200,53	200,33	200,12	200	200,14	200,44	200,5	200,38	200,17	200,309
60	200,78	200,8	200,59	200,23	200,22	200,46	200,75	200,84	200,68	200,3	200,565
STANDART SAPMA											0,251°C
ORTALAMA											200,253°C

- Kullanılan uç malzemesi : Pirinç
- Kullanılan daldırma yöntemi : U tipi
- Daldırma bölgesi : İkinci Bölge

Ek 2. Üçüncü deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y _i)
65	199,36	199,4	199,36	199,3	199,29	199,35	199,41	199,3	199,36	199,26	199,339
70	199,41	199,41	199,22	199,25	199,23	199,28	199,39	199,44	199,27	199,23	199,313
75	199,63	199,59	199,52	199,42	199,42	199,5	199,63	199,71	199,53	199,41	199,536
80	200,39	200,45	200,3	200,15	200,15	200,15	200,39	200,45	200,35	200,12	200,29
85	199,93	199,95	199,84	199,5	199,46	199,72	199,95	199,97	199,77	199,64	199,773
90	200,41	200,43	200,21	199,95	199,88	200,11	200,33	200,48	200,26	199,95	200,201
STANDART SAPMA											0,388°C
ORTALAMA											199,742 °C

- Kullanılan insert malzemesi : Pirinç
- Kullanılan daldırma yöntemi : Sızdırmaz teflon kapama
- Daldırma bölgesi : Üçüncü Bölge

Ek 3. Dördüncü deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y _i)
35	198,58	198,57	198,54	198,51	198,44	198,51	198,62	198,54	198,54	198,54	198,539
40	198,51	198,51	198,43	198,34	198,39	198,42	198,49	198,56	198,55	198,38	198,458
45	199,01	198,94	198,81	198,72	198,72	198,76	198,98	198,98	198,85	198,8	198,857
50	200,44	200,46	200,3	200,11	200,1	200,23	200,44	200,44	200,35	200,14	200,301
55	199,43	199,46	199,24	199,08	199,04	199,16	199,39	199,49	199,29	199,04	199,262
60	200,21	200,18	200,02	199,77	199,71	199,84	200,14	200,28	200,11	199,82	200,008
										STANDART SAPMA	0,703°C
										ORTALAMA	199,238°C

- Kullanılan uç malzemesi : Çelik
- Kullanılan daldırma yöntemi : Standart
- Daldırma bölgesi : İkinci Bölge

Ek 4. Beşinci deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y)
65	199,9	199,84	199,87	199,82	199,74	199,81	199,89	199,91	199,87	199,82	199,847
70	199,84	199,88	199,85	199,73	199,75	199,77	199,9	199,96	199,86	199,74	199,828
75	199,99	200	199,98	199,75	199,74	199,83	199,98	200,01	199,97	200,2	199,945
80	200,44	200,47	200,3	200,1	200,11	200,18	200,38	200,51	200,37	200,19	200,305
85	200,29	200,31	200,02	199,85	199,77	199,98	200,19	200,33	200,2	199,95	200,089
90	200,54	200,54	199,7	200,02	200	199,7	200,46	200,53	200,33	198,8	200,062
										STANDART SAPMA	0,163°C
										ORTALAMA	200,013°C

- Kullanılan uç malzemesi : Çelik
- Kullanılan daldırma yöntemi : U tipi
- Daldırma bölgesi : Üçüncü Bölge

Ek 5. Altıncı deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y _i)
5	200,19	200,18	200,19	200,05	200,04	200,12	200,13	200,23	200,16	200,05	200,134
10	200,2	200,22	200,07	200,01	200	200,15	200,23	200,16	200,15	200,11	200,13
15	200,38	200,38	200,24	200,13	200,14	200,23	200,35	200,42	200,32	200,18	200,277
20	200,98	201,11	200,9	200,77	200,67	200,82	200,93	201,08	200,94	200,81	200,901
25	200,66	200,71	200,48	200,24	200,22	200,42	200,66	200,67	200,51	200,34	200,491
30	201,03	201,01	200,78	200,54	200,46	200,65	201,04	201,06	200,89	200,61	200,807
STANDART SAPMA											0,307°C
ORTALAMA											200,457°C

- Kullanılan uç malzemesi : Çelik
- Kullanılan daldırma yöntemi : Sızdırmaz teflon kapama
- Daldırma bölgesi : Birinci Bölge

Ek 6. Yedinci deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y _i)
65	198,29	198,37	198,29	198,24	198,34	198,24	198,38	198,34	198,3	198,37	198,316
70	198,3	198,36	198,31	198,11	198,23	198,29	198,31	198,42	198,3	198,25	198,288
75	198,75	198,69	198,57	198,62	198,55	198,65	198,74	198,86	198,7	198,49	198,662
80	200,33	200,31	200,17	200,08	199,98	200,11	200,37	200,32	200,21	200	200,188
85	199,31	199,35	199,07	198,94	198,92	198,95	199,31	199,35	199,27	198,98	199,145
90	200,1	200,13	199,83	199,53	199,55	199,71	200,01	200,09	200,05	199,75	199,875
										STANDART SAPMA	0,736°C
										ORTALAMA	199,079°C

- Kullanılan uç malzemesi : Alüminyum
- Kullanılan daldırma yöntemi : Standart
- Daldırma bölgesi : Üçüncü Bölge

Ek 7. Sekizinci deney ölçüm sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y)
5	200,34	200,34	200,3	200,22	200,26	200,33	200,35	200,34	200,32	200,3	200,31
10	200,34	200,33	200,24	200,08	200,2	200,26	200,24	200,37	200,3	200,12	200,248
15	200,58	200,48	200,4	200,26	200,25	200,38	200,53	200,57	200,52	200,4	200,437
20	201,4	201,31	201,2	201,04	200,9	201,02	201,28	201,31	201,27	200,94	201,167
25	200,94	200,85	200,7	200,52	200,48	200,54	200,87	200,92	200,77	200,48	200,707
30	201,22	201,24	201,13	200,87	200,7	201	201,3	201,3	201,07	200,77	201,06
STANDART SAPMA											0,356°C
ORTALAMA											200,655°C

- Kullanılan uç malzemesi : Alüminyum
- Kullanılan daldırma yöntemi : U tipi
- Daldırma bölgesi : Birinci Bölge

Ek 8. Dokuzuncu deney ölçüm sonucu

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y)
35	199,13	199,11	199,1	199,05	198,98	199,07	199,12	199	199,03	199,06	199,065
40	198,99	199,08	198,93	198,89	198,87	199,01	199,03	199,12	199,09	198,93	198,994
45	199,27	199,43	199,18	199,05	199,12	199,17	199,26	199,42	199,3	199,2	199,24
50	200,36	200,23	200,13	199,96	199,97	200,12	200,27	200,39	200,23	200,02	200,168
55	199,68	199,67	199,56	199,36	199,19	199,47	199,63	199,77	199,54	199,38	199,525
60	200,19	200,21	199,99	199,69	199,69	199,81	200,13	200,24	200,12	199,82	199,989
STANDART SAPMA											0,447°C
ORTALAMA											199,497°C

- Kullanılan uç malzemesi : Alüminyum
- Kullanılan daldırma yöntemi : Sızdırmaz teflon kapama
- Daldırma bölgesi : İkinci Bölge

Ek 9. Optimum deney olan A2B2C3 için ısı dağılım testi sonuçları

Daldırma Derinliği [mm] \ Okuma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama (y _i)
65	199,81	199,78	199,84	199,92	199,90	199,86	199,82	199,92	199,83	199,86	199,851
70	199,75	199,77	199,80	199,91	200,00	199,86	199,72	199,83	199,88	199,85	199,834
75	199,73	199,77	199,82	200,01	200,00	199,99	200,23	199,98	200,02	200,01	199,953
80	200,14	200,10	200,21	200,36	200,49	200,36	200,18	200,43	200,46	200,34	200,304
85	199,84	199,75	200,02	200,18	200,32	200,20	199,93	200,32	200,30	200,05	200,088
90	200,01	199,99	199,82	200,45	200,55	200,32	198,83	200,53	200,56	199,68	200,071
										STANDART SAPMA	0,161°C
										ORTALAMA	200,017°C

