

ISILÇİFT SENSÖRLÜ SAYISAL TERMOMETRELERİN BENZETİM YÖNTEMİ İLE KALİBRASYONU VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN İFADESİ

A. Tayfun GÜR

Arçelik A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Ölçme ve Kalibrasyon lab.

Engin DEMİRCİ

*İstanbul Üniversitesi, Elektrik Elektronik
Müh.Böl.*

Hüsnü DERNEK

*İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik
Müh. Böl.*

1. GİRİŞ

Sıcaklık hiç şüphesiz enerji ile dolaylı bağı bulunan bir kavramdır. Sıcaklık, bir malzeme içindeki yüksek enerjili moleküllerin sayısına değil, çok enerjili moleküllerle daha az enerjili moleküller arasındaki orana bağlıdır. Endüstriyel, bilimsel ve günlük etkinliklerin çok büyük bir bölümünde sıcaklık ölçümünün önemli bir rolü vardır. Sıcaklık, hemen hemen tüm endüstriyel işlemlerde zorunlu ve çoğu kez ürün kalitesini belirleyen önemli ve temel bir unsurdur. Enerji kaynaklarının verimli kullanılması, sağlık, güvenlik ve çevre şartlarının izlenmesinde sıcaklık önemli bir bilgidir. Pekçok mekanik, optik ve elektriksel ölçümlerde ölçüm sonuçlarını etkileyen önemli bir parametredir. Termodinamik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, kimya ve fizik gibi bilim dallarının da temel değişkenlerinden birisidir.

Bu kadar geniş gereksinimleri karşılayabilmek için, ölçümü yapılmak istenen sıcaklık aralığına, istenen doğruluğa, işlemin gereksinimlerine, kolaylık ve ucuzluk unsurlarına göre çok değişik metodlar ve ölçüm cihazları kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçümleri bazı fiziksel prensiplerden hareket ederek altı bölüme ayrılabilir. Bunlar: Termal genleşme, termoelektrik etki, radyasyon ısı emisyonu, resistans değişimi, frekans rezonansının değişimi ve ses yoğunluğunun değişimidir. Cisimlerin ısıtılması ve soğutulması anında fiziki değişimlere paralel olarak elektriki ve mekaniki direncinin de değiştiği bilinmektedir. Isının maddeler üzerindeki bu değişiklikleri bazı algılayıcıların yapılabilmesine imkan vermiştir. Isı algılamasında kullanılan Isılçift, direnç termometresi, termistör gibi algılayıcılar ile beraberinde okuma işlemini kolaylaştırması açısından bir takım ölçme aletleri ve cihazlarında kullanılmasını gerektirmektedir. Örneğin, ısılçift ile birlikte bir voltmetreye ve termistör ile birlikte bir ohmmetreye duyulan ihtiyaç gibi.

2. AMAÇ

Sıcaklık kalibrasyonu, bir sıcaklık algılayıcısının çıkışının, sıcaklık standardına göre yeterli sıcaklık noktaları kullanılarak kabul edilebilir bir ifade ile istenilen sıcaklık aralığında ve istenilen belirsizlikle belirlenmesidir. Termometre kalibrasyonunun sıcaklık alanında uygulanması ise önceden belirlenmiş özel koşullar altında bir dizi işlemler sonucunda elde edilen sonuçlar ile ilişkili olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık ölçümlerinde ve kalibrasyon işleminde iki farklı metod kullanılmaktadır. Bu metodlar, sabit noktalar ile gerçekleştirilen kalibrasyon ve karşılaştırma yöntemine göre yapılan kalibrasyon metodlarıdır. Bir de sabit noktaları kullanarak karşılaştırma yöntemine göre yapılan bir metod daha vardır ki buna da *Hybrid metodu* denir. [1]

Sabit noktalar kullanılarak yapılan kalibrasyon işleminde Uluslararası Sıcaklık Skalası ITS-90 ölçeğini oluşturan sabit noktalar kullanılır. Bu sabit noktaların bazıları ITS-90 Ölçeğine göre; Oksijenin kaynama noktası -182.962°C , suyun üçlü noktası 0.01°C , Galyum' un donma noktası 29.7646°C , Kalay' ın donma noktası 231.928°C ve Çinko' nun donma noktası 419.527°C ' dir.[1]

Kalibrasyonu yapılacak termometrenin algılayıcısı denge durumundaki bu sabit noktalara sırasıyla daldırılır ve gerekli termometrik parametreler ölçülür (direnç değerleri, emk, v.s). Bu metod çok küçük belirsizlik değerine sahip ve yatırım maliyeti çok yüksek olduğundan dolayı primer seviyedeki metroloji laboratuvarlarında kullanılır.

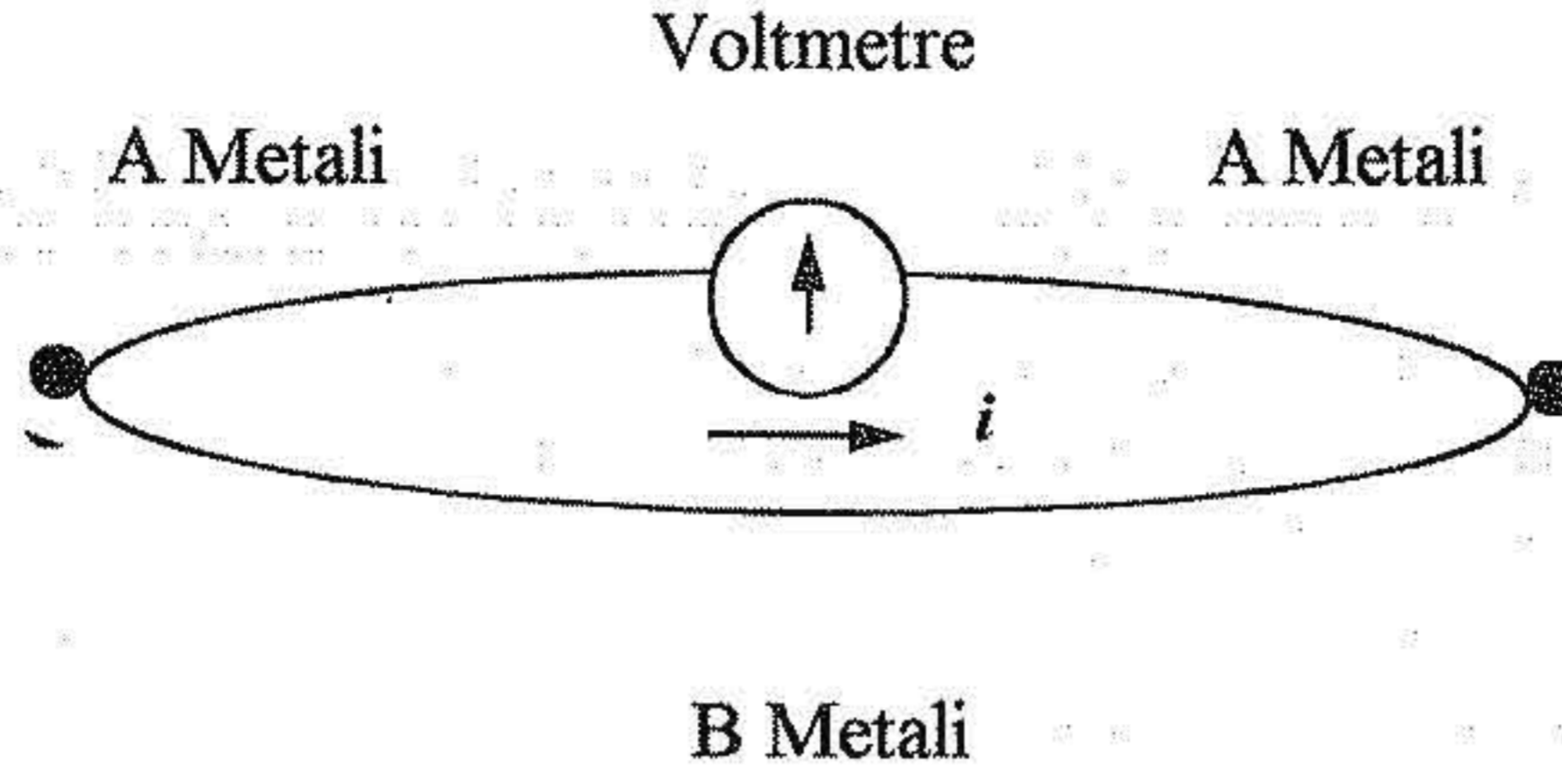
Karşılaştırma metodu ile yapılan kalibrasyon işlemleri ise genellikle sıvı banyoları, fırınlar ve standart bir termometre kullanılarak yapılır. Kalibrasyonu yapılacak test termometresi belli bir sıcaklığa ayarlanmış sıvı banyolarına standart termometre ile birlikte daldırılır. Ard arda alınan ölçüm sonuçları standart termometre ile alınan ölçümler karşılaştırılarak test termometresi için gerekli düzeltme faktörü ve hata değerleri bulunur. Bu yöntem sabit noktalar ile yapılan kalibrasyon işlemine göre daha kolay ve daha az bir yatırım maliyetine sahip olduğundan ikinci seviye kalibrasyon laboratuvarlarında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.

Bu çalışmanın amacı ise, yukarıda anlatılan her iki yöntemden farklı ancak aynı çalışma prensipleri temel alınarak gerçekleştirilen termoelektrik etki sınıfına giren ısı çift sensörlü sayısal termometrelerin benzetim yolu ile kalibrasyon işlemini anlatmaktadır.

3. ISIL ÇİFTLERİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Endüstride ısı değişikliklerinin hissedilmesinde (algılanması) çok yaygın biçimde kullanılan transdüserlerden biri de ısı çiftlerdir. Isı çiftler, direnç termometrelerine oranla daha geniş ölçüm aralığına sahip, kullanımları basit ve mekanik şoklara daha dayanıklı olmalarından dolayı endüstriyel kullanımı daha yaygın sıcaklık algılayıcılarıdır. Ölçüm aralığı -200°C ile $+2500^{\circ}\text{C}$ arasında değişen ısı çiftler birbirinden farklı iki metalin bir tam kapalı devre oluşturacak şekilde birleştirilmesi ile oluşturulurlar. Her iki metalin iki ucu birbirinden farklı sıcaklıkta olduğunda kapalı devrede bir elektro motor kuvveti (emf) oluşur. Bu emk' e *Seebeck etkisi* adı verilir.

Metallerde bulunan serbest elektronlar hem metali meydana getiren malzemelere hem de metalin ısısına bağlıdır. Şekil 1' de görüldüğü gibi iki farklı metal birleştirilip birleşme noktalarından biri ısıtılacak olursa devreden bir akım geçer.



Şekil. 1 Seebeck etkisinin oluşumu.

Bu devre ikiye bölünecek olursa açığa kalan iki uçta gerilim oluşur. Oluşan bu gerilimin değeri birleşme noktasına uygulanan ısıya ve metalleri oluşturan malzemeye bağlıdır. Isı artıkça gerilim de artar (Tablo.1).

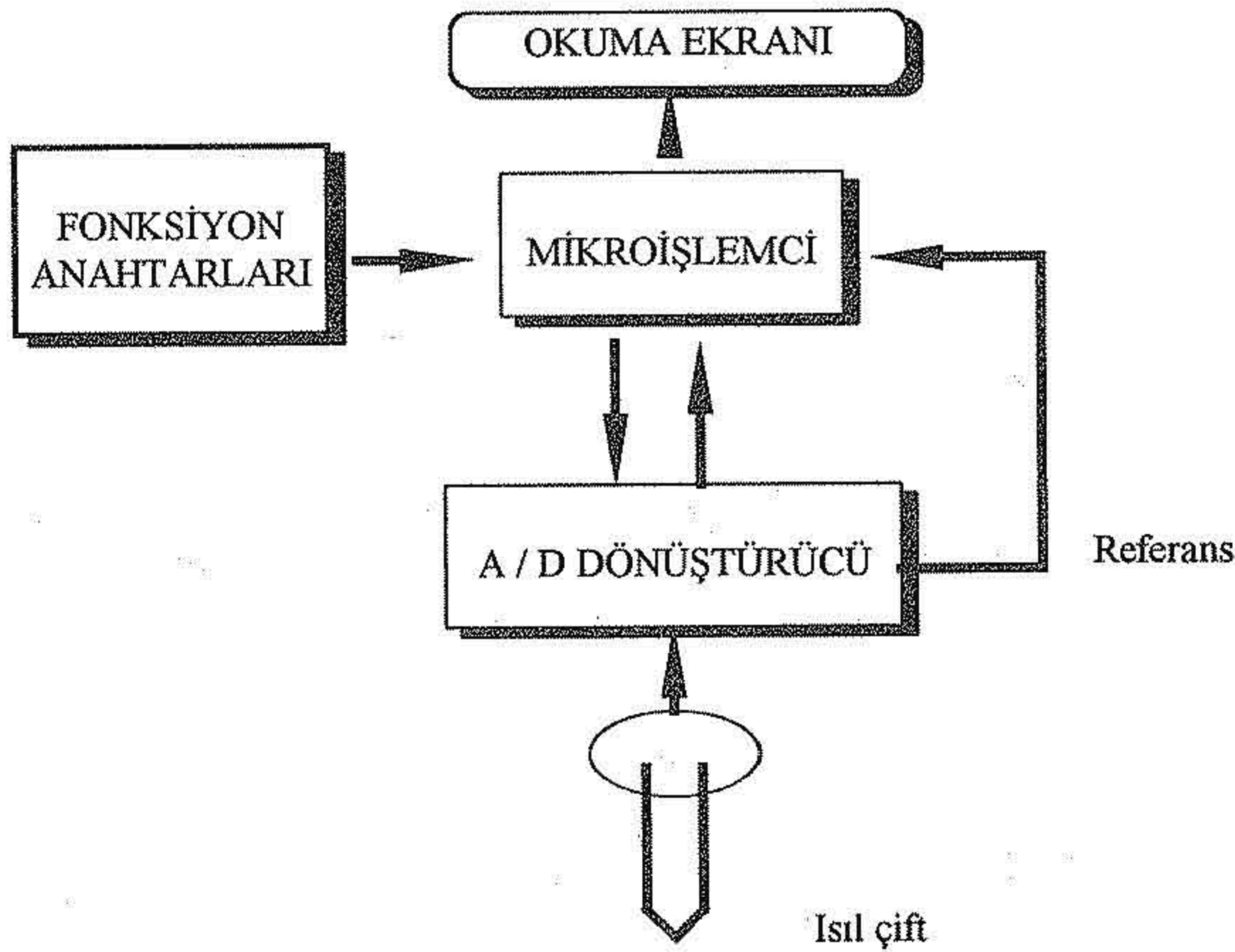
Tablo. 1 0 °C referans sıcaklığına göre termoelemanların termogerilimleri [2].

Sembol	J	K	E	T/	S	R
+ Kutup	Demir	Kromel	Kromel	Bakır	Pt10%Rh	Pt13%Rh
- Kutup	Konstantan	Alumel	Konstantan	Konstantan	Pt	Pt
(°C)	mV	mV	mV	mV	mV	mV
-200	-7.890	-5.891	-8.824	-5.603		
-100	-4.632	-3.553	-5.237	-3.378		
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	5.268	4.096	6.318	4.278	0.645	0.647
200	10.778	8.138	13.421	9.288	1.440	1.468
300	16.327	12.208	21.036	14.861	2.323	2.400
400	21.848	16.397	28.946	20.872	3.259	3.407
500	27.392	20.644	37.005		4.233	4.471
600	33.102	24.905	45.093		5.238	5.582
700	39.132	29.129	53.112		6.275	6.741
800		33.275	61.017		7.344	7.949
900		37.325	68.786		8.449	9.203
1000		41.275	76.372		9.587	10.503
1100		45.118			10.756	11.846
1200		48.838			11.950	13.224

4. ISILÇİFT SENSÖRLÜ SAYISAL TERMOMETRELERİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Isıl çift sensörlü sayısal termometreler ısı değişiminden dolayı ısı çiftte oluşan doğrusal olmayan bu gerilimleri sıcaklık skalasına dönüştüren birer microvoltmetredirler. Bu cihazların çalışma prensipleri incelendiğinde ısı çiftten elde edilen gerilimi doğrusallaştırmak ve referans noktasına göre kompensasyon işlemi yapabilmek için microvoltmetreye ilave olarak bazı elektronik devrelerin eklendiği görülmektedir.

Bir sayısal termometrenin fonksiyonel çalışma şeması Şekil. 2' de görülmektedir. Bu cihazların en önemli elektronik parçası hiç kuşkusuz ısı çiftten elde edilen analog sinyali sayısal sinyale çeviren analog-sayısal dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücülerin çalışma aralığı -10 mV ile +55mV aralığındadır. Diğer önemli olan elektronığı ise analog-sayısal dönüştürücüden aldığı sayısal değerleri kompanze ederek doğrusallaştıran ve Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) gibi çevrimleri yapabilen ve bu işlemleri bir okuma ekranına gönderebilen mikroişlemcisidir.



Şekil. 2 Isılçift sensörlü sayısal termometrelerin fonksiyonel çalışma şeması [3].

5. KALİBRASYON İŞLEMİ

Bu prosedürün amacı FLUKE / 51 Modeli Isılçift sensörlü sayısal termometre cihazının kalibrasyon testleri işlemini tanımlamaktır.

5.1 KALİBRASYON İÇİN GEREKLİ CİHAZLAR

Cihazın adı	Firma/Model	Belirsizliği
DC Kalibratör	Fluke 5500A	\pm (Uyg. Değ. 0.006%+3 μ V)
Sayısal Termometre	Fluke 51/52	\pm (Oku. Değ. 0.1%+0.7 °C)
Termos		
Referans cam termometre	Cole Parmer	0 \pm 0.1 °C

5.2 ORTAM ŞARTLARI

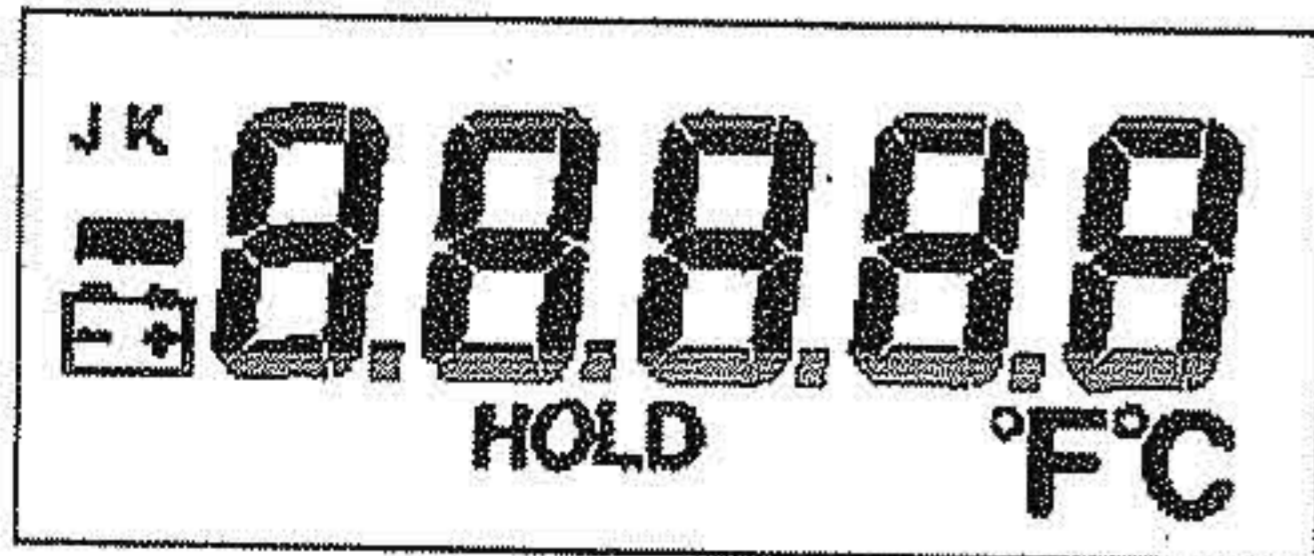
Kalibrasyon işlemi için ortam şartları Sıcaklık 23 \pm 5 °C ve bağıl nem %60 \pm 15 olmalıdır[3].

5.3 BUZ NOKTASININ HAZIRLANMASI

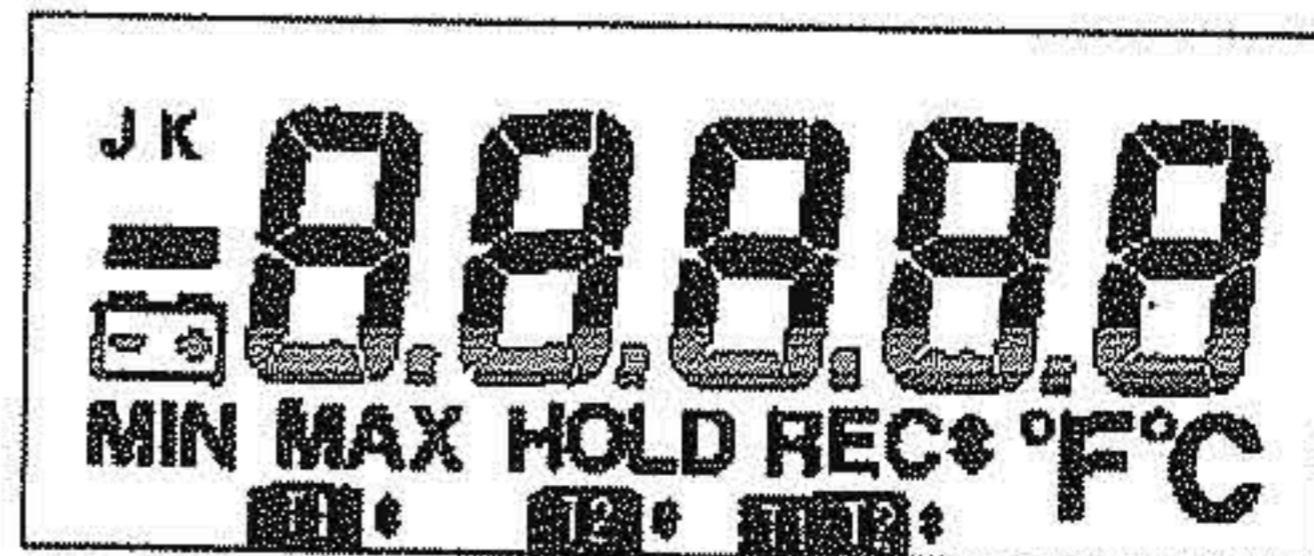
Buz noktasını hazırlamak için küçük boyutta kırılmış buz termosun içine taşınca kadar doldurulur. Bir miktar saf su veya deiyonize edilmiş su ilave edilir ve karıştırılır. Buz ve su karışımı açık gri renk oluncaya kadar bu işleme devam edilir. Su ve buz karışımının gri renk olması demek karışım sıcaklığının 0 °C olması demektir.

5.4 MEKANİK VE ELEKTRONİK KONTROLLER

Kalibrasyon işlemine başlamadan önce Fluke 51/52' nin ekranını kontrol ederek ekran fonksiyonlarının doğru çalışıp çalışmadığını kontrol ediniz (Şekil.3).



a. Fluke 51 ekranı

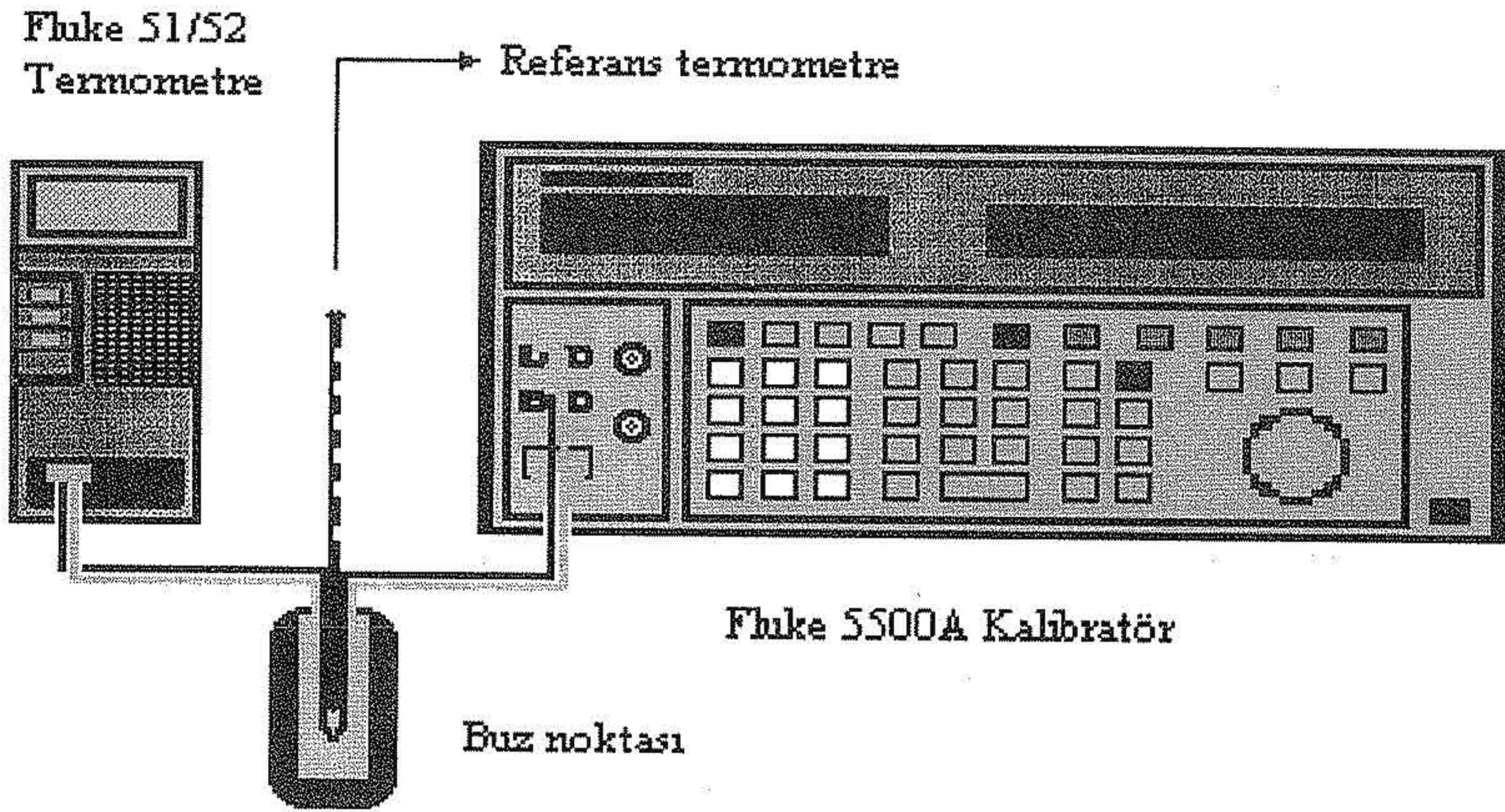


b. Fluke 52 ekranı

Şekil. 3 Fluke 51 / 52 Digital termometrelerin ekran fonksiyonları [3].

5.5 PERFORMANS TESTLERİ

Performans testleri için Şekil 4' deki bağlantı kurulumu yapılır. Fluke 51 / Fluke 52 Termometre K Tipi ısı çifti kullandığından Tablo 1'deki K Tipi ısı çifti için termoelektrik emk değerleri sırasıyla uygulanır ve okunan değerler Tablo.2' deki gibi kaydedilir.



Şekil. 4 Fluke 51/52 termometrenin Fluke / 5500 Kalibratör' e bağlantı şeması.

Tablo.2 Performans testi sonucu okunan ortalama değerler.

Ölçüm sayısı	DC (Fluke Kalibratör 5500A)		Fluke 51/52 Oku. değerler (°C)	Buz Noktası (mV.)	Toplam Belirsizlik (°C)	Sonuç
	Uyg. deęer (mV.)	Uyg. Sıcaklık (°C)				
1	-5.891 ± 0.001	-200.0	- 199.9 0.1	0.039 0.001		
2	0.000 ± 0.002	0.00	0.0 ± 0.1	0.040 ± 0.001		
3	8.138 ± 0.002	200.0	200.1 ± 0.1	0.041 ± 0.001	± 0.87° C	200.1 ± 0.9°C
4	16.397 ± 0.001	400.0	399.9 ± 0.2	0.040 ± 0.001		
5	24.905 ± 0.002	600.0	600.1 ± 0.2	0.041 ± 0.001		
6	33.275 ± 0.001	800.0	799.9 ± 0.1	0.039 ± 0.001		
7	41.275 ± 0.002	1000.0	999.9 ± 0.1	0.040 ± 0.001		
8	52.410 ± 0.001	1300.0	1300.1 ± 0.1	0.038 ± 0.001		

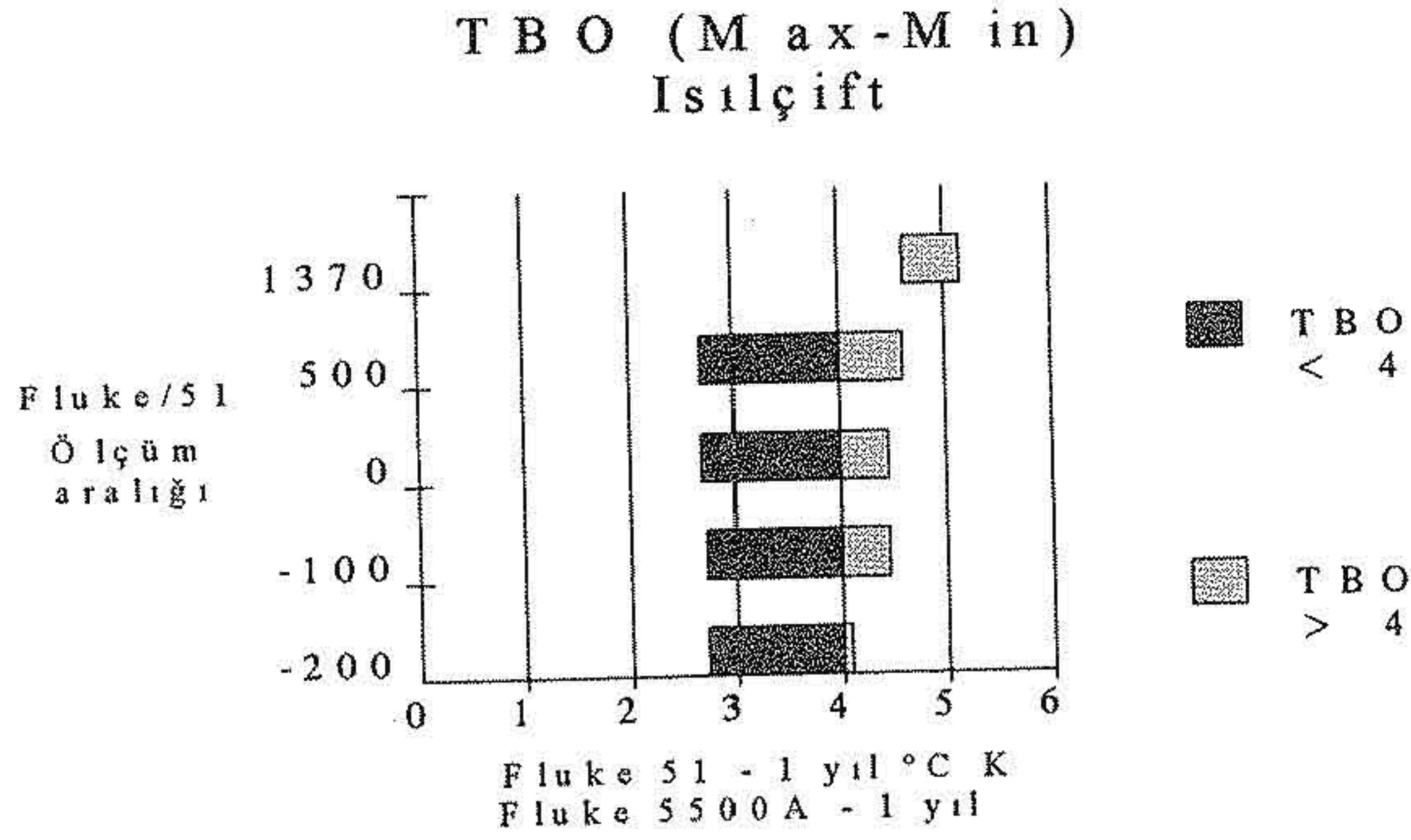
6. TEST BELİRSİZLİK ORANI (TBO)

Bu oran test edilen cihazın belirsizlik değerinin, kalibre eden cihazın belirsizlik değerine oranıdır.

$$\text{Test Belirsizlik oranı (TBO)} = \pm u_1 \text{ Kalibre edilen cihaz} / \pm u_2 \text{ Kalibratör}$$

Bu oran < 4 (1/4) olmalıdır. Standard cihaz veya kalibratör olarak kullanılan cihazların da belirsizlik değerleri dahilinde çalıştıkları düşünülecek olursa, kalibrasyon işlemi sonucunda da bir

belirsizlik içerdiğini söylemek gerekir. Standard cihaza göre spektrum içinde olduğu tespit edilen bir cihaz, gerçek hayatta ancak söz konusu belirsizlik değerleri dahilinde spektrum içindedir (Şekil. 5).

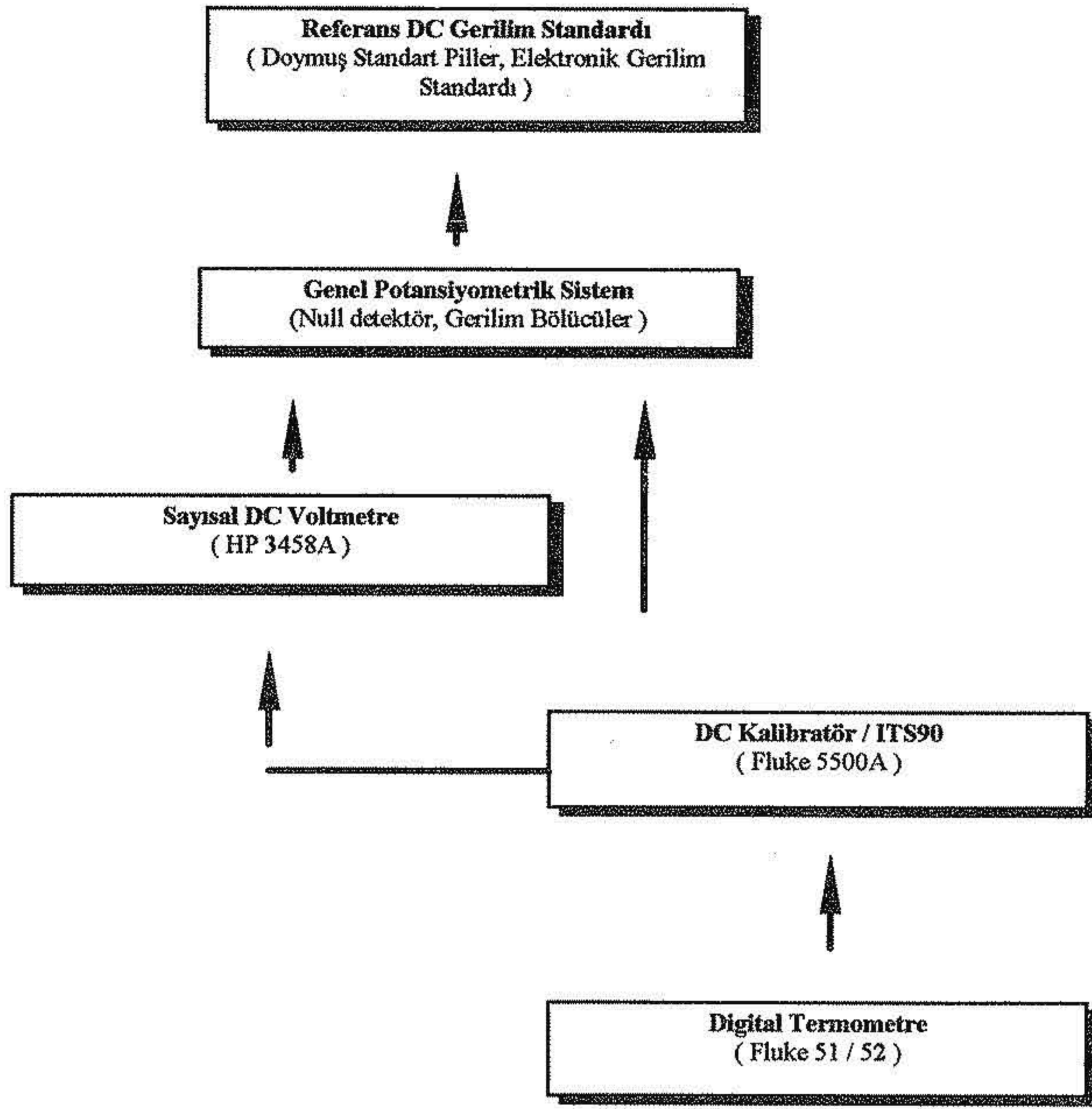


Şekil. 5 Fluke 51/52 termometre ile Fluke 5500A Kalibratör arasındaki Test Belirsizlik Oranı' nı gösteren Min / Max Gantt şeması.

7. İZLENEBİLİRLİK

İzlenebilirlik, ölçüm sonucunun uygun standartlara, genel olarak da uluslararası veya ulusal standartlara, kesintisiz bir karşılaştırma zinciri boyunca bağlanabilmesi özelliğidir.

Bu çalışmada yapılan ölçümlerin izlenebilirliği yukarıdaki tanıma uygun olarak Şekil. 6' de verilmiştir.



Şekil. 6 İzlenebilirlik hiyerarşisi.

8. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNİN İFADESİ

Ölçüm belirsizliği, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin içinde bulunduğu değerler aralığını karakterize eden tahmini değerdir.

Ölçüm belirsizliği, genel olarak birçok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bir kısmı, ölçüm serileri sonuçlarının istatistiksel dağılımına bakılarak tahmin edilebilir ve deneysel standard sapma yardımıyla karakterize edilebilir. Diğer bileşenlerin tahmini ise sadece tecrübeye veya diğer bilgilere dayandırılmalıdır. Bir ölçüm işlemi için belirsizlik paketi bütün belirsizlik kaynakları, karşılık gelen varyansları, hesaplama ve tahmin metodlarını içermelidir. Tekrarlanan ölçümler için n ölçüm sayısı ifade edilmelidir. Belirsizliğin sayısal değeri, en son ifadede en anlamlı iki digit ile verilmelidir. Ölçülen sayısal değeri son ifadede belirsizlikteki en önemsiz değere yuvarlatılmalıdır. Kalibrasyon protokolüne ölçüm sonucu y ve tüm belirsizlik u ($y \pm u$) şeklinde yazılmalıdır.

Bu çalışmada her bir ölçüm noktası için belirsizlik hesapları ayrı ayrı yapılmıştır. Aşağıdaki örnekte bu ölçüm noktalarından sadece birine ait hesaplama yöntemi anlatılmıştır. Her bir nokta için bu yöntem tekrarlanmalıdır.

Tablo. 3 Ölçüm belirsizliği kaynakları

Belirsizlik kaynağı	Belirsizliği	Dağılım	Bölücü	Belirsizlik
DC Kalibratör	\pm (Uyg. Değ. 0.006%+3mV.)	Normal	2	0.051
Digital Termometre	\pm (Oku. Değ. 0.1%+0.7°C.)	Normal	2	0.85
Cam Termometre	0.05 °C	Normal	2	0.05
Buz noktasının tekrarnabilirliliği	-	Normal	-	0.001
Dig. Termometrenin tekrarnabilirliliği	-	Normal	-	0.1

Tablo 3' de verilen değerler 200°C için hesaplanmış ölçüm belirsizliği değerleridir. Bu toplodaki değerler kullanılarak ölçüm belirsizliğini hesaplırsak;

$$\pm u = k \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + \left(\frac{B_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{B_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{B_3}{2}\right)^2}$$

$$\pm u = 2 \sqrt{0.001^2 + 0.1^2 + \left(\frac{0.051}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.85}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{2}\right)^2}$$

$$\pm u = 0.8746^\circ C$$

Ölçüm sonucunun rapor edilmesi ise aşağıdaki gibidir.

$$y = 200.1 \pm 0.87^\circ C \quad (\text{Bkz. Tablo.2})$$

Rapor edilen bu belirsizlik, genişletilmiş belirsizlik olup bileşik belirsizlikten kapsam faktörü k=2.0 kullanılarak elde edilmiştir.

9. SONUÇ

İsılçift sensörlü digital termometrelerin benzetim yöntemi ile kalibrasyon işlemi aşağıdaki avantajları sağlar.

Sıcaklık kalibrasyonunda kullanılan diğer yöntemlere oranla daha az mali yatırım ve kullanım maliyetine sahip olan bu yöntemin daha ekonomik olduğu anlaşılmaktadır. Eğer, elektriksel büyüklükler için yapılmış bir kalibrasyon yatırımı var ise ayrı bir yatırıma gerek kalmayacaktır. Kalibrasyon işleminin diğer yöntemlere oranla daha kısa sürede yapılabilecek olması da, adam/saat maliyetlerini ve sarf malzeme kullanım maliyetlerini düşürücü yönde olumlu bir etki olarak düşünülebilir.

Sıcaklık kalibrasyonunda kullanılan sabit sıcaklık noktaları, sabit sıcaklık banyoları ve fırınlarının ölçüm aralığı sınırlıdır. Tüm ölçüm aralığında kalibrasyon işleminin yapılabilmesi için sistemden sisteme geçiş sözkonusu olacaktır. Bu yöntemde ise ölçüm aralığı sınırlı değildir ve tüm ölçüm aralığında istenilen noktalarda kalibrasyon işlemi yapılabilir. Böylelikle tüm ölçüm aralığında ölçüm noktalarının fazlalığı ölçüm sonucunu daha iyi karakterize etmemize olanak tanıyacaktır.

SI sıcaklık birimlerinden olan °K, °C ve °F' nin diğer SI birimlerinden türetilmiş olan DC mV' a dönüştürülmesi izlenebilirlik zincirinin daha kısa ve güvenilir yoldan ulusal ve/veya uluslararası standartlara bağlanabilmesi imkanını tanır.

Bu sistemin kurulma ve kullanma kolaylığı, normal kalibrasyon periyodları dışında günlük doğrulama ölçümlerinde de büyük avantajlar sağlayacaktır.

Bu ölçüm ve kalibrasyon yönteminin dezavantajı ise, DC Kalibratörün çıkış sinyalinin empedansı ile digital termometrenin giriş empedansı arasındaki uyum sorunudur. DC Kalibratörün çıkış sinyalinin empedansı digital termometrenin giriş sinyali empedansından büyük olması gerekir. Yeterince büyük olmaması durumunda sürülen bir devre konumundaki termometre algıladığı sinyali göstergesine iletebilmesi için DC Kalibratörden daha fazla akım çekecektir. Bu da DC kalibratörün çıkış sinyalinin kararlılığını bozacaktır.

Bu dezavantajı giderebilmek için ise, DC Kalibratörün çıkış sinyali bir tampon devre ile izole edilebilir veya tampon filtreleme yöntemi ile çıkış sinyali bir takım gürültülerden arındırılabilir.

KAYNAKÇA

1. Ulusal Metroloji Enstitüsü, TÜBİTAK., "Platin Direnç ve Sayısal Termometrelerin karşılaştırmalı metoda göre kalibrasyonları" eğitim notları 1996, Gebze - Kocaeli
2. Ulusal Metroloji Enstitüsü, TÜBİTAK., "K, J, T, B, E, N ve S tipi Isılçiftler için ITS 90' a göre referans fonksiyonları ve tablo değerleri" UME 93-10 1993, Gebze-Kocaeli.
3. Fluke Co., "Fluke 51/52 Digital K/J Thermometer" Service Manual, PN768234 USA, February 1986 rev. 1, 6 / 95
4. MORRIS, S. Alan., "Measurement & Calibration for quality assurance" Department of Control Engineering University of Sheffield., Prentice Hall International, UK., 1991
5. Fluke Co., "Calibration: Philosophy in practice" Second edition., USA., 1994
6. Ulusal Metroloji Enstitüsü, TÜBİTAK., "Ölçüm belirsizliğinin ifadesi" 1996, Gebze - Kocaeli
7. B.N. Taylor, and C.E. Kuyatt "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST measurement Results" NIST Tech. Note 1297 USA., 1994