

Elektriksel Sıcaklık Kalibratörlerinin Isıl-çift İşlevi Kalibrasyonu ve Kalibrasyon Sonucunun Kullanılması

Calibration of Thermo-couple Function of Electrical Temperature Calibrators and Exploit the Calibration Result

Tezgül COŞKUN ÖZTÜRK, Saliha TURHAN, Narcisa ARİFOVİÇ

¹TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü

tezgul.ozturk@tubitak.gov.tr, saliha.turhan@tubitak.gov.tr, narcisa.arifovic@tubitak.gov.tr

Özet

TÜBİTAK UME, sıcaklık simülatörü ve göstergelerin elektriksel standartlarla kalibrasyonu alanındaki hizmetlerini ikinci seviye laboratuvarlara aktararak durdurmuş olmasına rağmen, halen bu alanda ikinci seviye laboratuvarların kabiliyetlerinden daha düşük belirsizlik talebi ile başvurular almaktadır. Bu makalede ısı-çift sensörlü sıcaklık simülatörü ve göstergelerinin kalibrasyon yöntemi, belirsizlik bütçesi ile bu cihazların kalibrasyon sertifikalarında belirtilen sonuçların kullanımına dair bilgiler verilerek kalibrasyon laboratuvarlarının ve kullanıcıların bilgilendirilmesi hedeflenmiştir.

Abstract

Although TÜBİTAK UME has withdrawn from the service in the field of the calibration of temperature simulators and indicators by electrical simulation and measurement, by transferring to the secondary level calibration laboratories, UME still receives requests about the calibration of these devices with a better uncertainty supplied by the secondary level calibration laboratories. In this paper, the users and calibration laboratories are aimed to be informed by giving information about calibration methods for temperature indicators & simulators with thermocouple sensors, model functions of the measurements and the use of calibration results.

1. Giriş

Sıcaklık göstergesi, temelde DC gerilim veya direnç büyüklüklerini ölçen bir ölçüm cihazıdır. Terminallerine bağlanan sıcaklık sensörü ile birlikte kullanıldığında ise sıcaklık ölçen bir sayısal termometrenin işlevini gerçekleştirir. Sıcaklık sensörü olarak, sıcaklıkla direnci değişen sensörler ve/veya üzerine uygulanan sıcaklık farkıyla orantılı DC gerilim üreten değişik tipteki ısı-çiftler kullanılabilir. Bu nedenle sıcaklık göstergeleri birer gerilim ölçer ve/veya direnç ölçer olmanın yanında direnç-sıcaklık, gerilim-sıcaklık dönüşümlerini de yapan ölçüm cihazlarıdır. Standartlara uygun olarak üretilen sıcaklık sensörlerinin, gerilim-sıcaklık ve direnç-sıcaklık dönüşüm fonksiyonları yine standartlarda belirtilmiştir [1][2].

Sıcaklık göstergeleri, birçok sıcaklık sensörü ile birlikte kullanılabilir. Bu durumda göstergenin, sıcaklık sensörlerinden bağımsız olarak doğru çalıştığından emin

olunmalıdır. Bu sebeple göstergeler periyodik olarak kalibre edilerek göstergenin gerilim/direnç-sıcaklık dönüşümünün standartlarda belirtilen dönüşüm fonksiyonlarından sapması belirlenir.

Bir sıcaklık göstergesi için akla ilk gelen kalibrasyon yöntemi, kalibreli ve karakterize edilmiş sıcaklık sensörleri kullanarak, değeri belirlenen fiziksel sıcaklıklarda gösterge sapmasının belirlenmesidir. Bir diğer yöntem ise, sıcaklık sensörlerinin üretmesi beklenen elektriksel büyüklükleri elektriksel standartlar kullanarak göstergeye uygulamak ve göstergenin sapmasını belirlemektir. Elektriksel standartlar kullanılarak gerçekleştirilen ikinci yöntem daha hızlı ve daha verimli oluşu nedeniyle tercih edilmektedir.

Sıcaklık göstergeleri ve simülatörlerinin elektriksel standartlar kullanılarak kalibrasyonu ile ilgili Avrupa Metroloji Enstitüleri Birliği (EURAMET) tarafından bir rehber doküman yayınlamıştır [3].

Göstergelerin kalibrasyonunu kolaylaştırmak için sıcaklık simülatörleri üretilmiştir. Sıcaklık simülatörleri, çeşitli sıcaklık sensörleri için, seçilen sıcaklık değerlerine karşılık gelen elektriksel büyüklüğü üreten kaynaklardır. Sıcaklık simülatörleri, göstergelerin elektriksel standartlar ile kalibrasyonunu mümkün kılmının yanı sıra, kullanıcıları eşdeğer elektriksel büyüklükleri standart tablolarda arama zorluğundan da kurtarmaktadır.

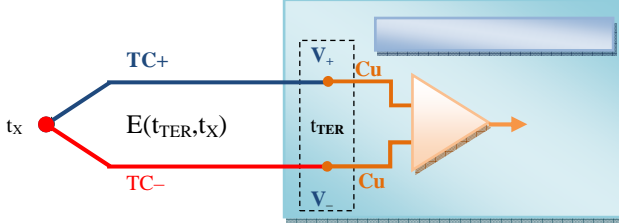
Simülatörleri kalibre etmek üzere yüksek doğruluklu sıcaklık göstergeleri de piyasada mevcuttur. Cihaz üreticileri, daha da ileriye giderek doğruluk seviyeleri birbirine çok yakın olan gösterge ve simülatörü tek bir cihaz altında toplamışlardır. Sıcaklık kalibratörü olarak adlandırılan bu cihazlar kalibrasyon laboratuvarlarında referans cihaz olarak kullanılmaktadır.

Bu cihazların kalibrasyonu ile ilgili bilgi vermeden önce, bu cihazların önemli bir fonksiyonu olan referans eklem düzeltilmesi veya diğer bir ifade ile soğuk eklem düzeltilmesi (cold junction compensation-CJC) üzerinde durulması gereklidir.

1.1.Referans Eklem Düzeltmesi

Isıl-çiftler soğuk ve sıcak uçları arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı DC gerilim üreten sensörlerdir. Bu sensörlere ait standart sıcaklık dönüşüm fonksiyonları oluşturulurken ısı-çiftin bir ucu kalibrasyonun yapıldığı sıcaklıkta diğer ucu ise buz noktası olarak adlandırılan sabit sıcaklıkta (0,0 °C) tutulur [2].

Sıcaklık göstergeleri ile yapılan ölçümlerde ısıl-çiftler, Şekil 1'de gösterildiği gibi doğrudan göstergelerin terminallerine bağlanır. Böyle bir bağlantıda ısıl-çiftin üzerine uygulanan sıcaklık farkı, gösterge terminalleri ile ısıl-çiftin sıcak ucu arasındaki fark kadardır. Bu durumda sıcaklık göstergeleri, sensör çıkışında oluşan gerilime, giriş terminal sıcaklığına karşılık gelen büyüklükteki gerilimi ekleyerek sıcaklığa dönüştürmektedirler. Gösterge terminal sıcaklığının sebep olduğu bu sistematik hatanın ortadan kaldırılması için yapılan düzeltilmeye Referans Eklem Düzeltmesi (RED) veya Soğuk Eklem Düzeltmesi denilmektedir.



Şekil 1: Bir ısıl-çift ve ısıl-çift göstergesinin çalışması

Benzer şekilde göstergeleri kalibre etmek üzere üretilen simülasyonlarda da, terminal sıcaklıklarına karşılık gelen gerilim çıkarılarak düzeltme yapılmaktadır. Çoğu sıcaklık göstergesi, simülasyonu ve kalibratöründe RED işlevi pasif veya aktif olacak şekilde seçilebilir.

1.2. RED Seçimli Olmayan Elektriksel Sıcaklık Kalibratörlerinin Elektriksel Standartlarla Kalibrasyonu

Isıl-çift sensörlü gösterge ve simülasyonların RED aktif iken buz noktası kullanılarak elektriksel standartlar ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Bu ölçümler için model fonksiyonlar da sırasıyla eşitlik (1) ve eşitlik (2)'de verilmiştir. Eşitliklerde kullanılan semboller Çizelge 1'de tanımlanmıştır.

Gösterge ve simülasyonların bu yöntem ile kalibrasyonu, cihazların bütün sıcaklık aralığında ve tüm ısıl-çift tipleri için gerçekleştirilmelidir. Buna bağlı olarak kalibrasyonun ölçüm süresi uzundur. Ayrıca, kalibrasyon için her tip ısıl-çiftin bulundurulması ve izlenebilirliklerinin sağlanması da gereklidir.

Elektriksel standartlar kullanılarak E ve J tipi ısıl-çift sensörlü bir göstergenin kalibrasyonu için TÜBİTAK UME'nin kalibrasyonu ve ölçüm kabiliyeti Çizelge 2'de verilmiştir.

1.3. RED Seçimli Olan Elektriksel Sıcaklık Kalibratörlerinin Elektriksel Standartlarla Kalibrasyon

Bölüm 1.2.'de anlatılan yöntem birçok sıcaklık noktasında ve birçok ısıl çift için yapıldığında uzun, zahmetli ve maliyetlidir. Elektronik sıcaklık göstergesi ve simülasyonlarının elektriksel standartlarla kalibrasyonu RED opsiyonu seçilebilir ise basitleştirilebilir. Bu yöntem ile kalibrasyonu iki aşamaya ayırabiliriz:

Çizelge 1: (1)-(5) Eşitliklerinde kullanılan semboller

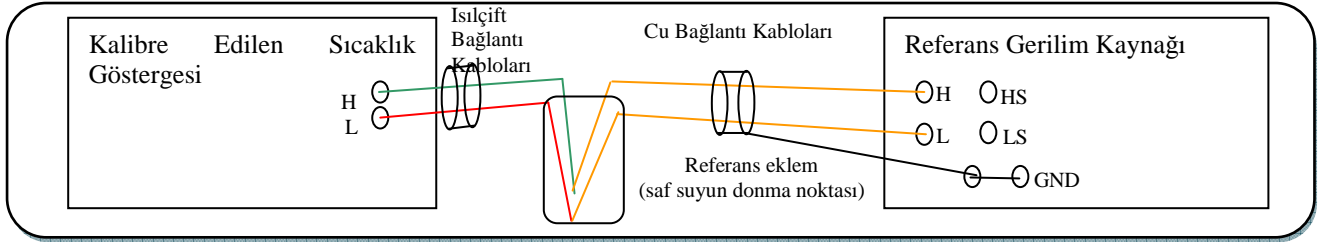
t_x	Kalibre edilen sıcaklık göstergesine uygulanan gerçek değer veya kalibre edilen simülatörden uygulanan gerçek değer
P_V	Gerilim-Sıcaklık dönüşüm fonksiyonu (ITS 90 / IPTS 68 tablolarının ters fonksiyonu)
V_{STD}	t_x sıcaklığına karşılık gelen ve standart tablolardan elde edilen gerilim değeri
δV_{KAL}	Referans gerilim kaynağının son kalibrasyonunda tespit edilen düzeltmesi
δV_{KAL-K}	Referans gerilim kaynağının son kalibrasyonundan beri kaymasından kaynaklanan düzeltmesi
V_{DMM}	DC gerilim ölçer ile ölçülen gerilim değeri
δV_{DMM}	DC gerilim ölçerin son kalibrasyonunda tespit edilen düzeltmesi
δV_{DMM-K}	DC gerilim ölçerin kaymasından kaynaklanan düzeltme
δt_0	Buz noktası sıcaklığının 0°C 'den sapmasından kaynaklanan sıcaklık düzeltmesi
S_0	Isıl-çiftin sıfır sıcaklığındaki duyarlılık/hassasiyet (Seebeck) katsayısı
t_{TER}	Gösterge terminallerinin sıcaklığı / Simülasyon terminallerinin sıcaklığı
$\delta E(0^\circ\text{C}, t_{TER})$	Isıl-çiftin t_{TER} sıcaklığın ait gerilim cinsinden düzeltmesi (kalibrasyon ve son kalibrasyonundan beri kaymasını içerir)
t_i	Sıcaklık göstergesinin gösterge değeri
δt_i	Sıcaklık göstergesinin çözünürlüğünden kaynaklanan düzeltme
δt_s	Sıcaklık simülasyonunun terminal sıcaklığını düzeltme hatası
δt_{SG}	Isıl-çift kablolarının gösterge ve terminal sıcaklıkları arasındaki farkı ortadan kaldırma düzeltmesi
δt_G	Göstergenin terminal sıcaklığını düzeltme hatası
S_{IS}^{kal}	Simülasyonun CJC kalibrasyonun yapıldığı sıcaklık ve kalibrasyonda kullanılan ısıl-çifte ait "Seebeck" katsayısı
S_{IG}^{kal}	Göstergenin CJC kalibrasyonunun yapıldığı sıcaklık ve kalibrasyonda kullanılan ısıl-çifte ait "Seebeck" katsayısı
S_{UYG}	Anma sıcaklığındaki "Seebeck" katsayısı

Çizelge 2: TÜBİTAK UME'nin kalibrasyon ve ölçüm kabiliyeti (E ve J tipi ısıl-çift göstergesi kalibrasyonu için RED aktif)

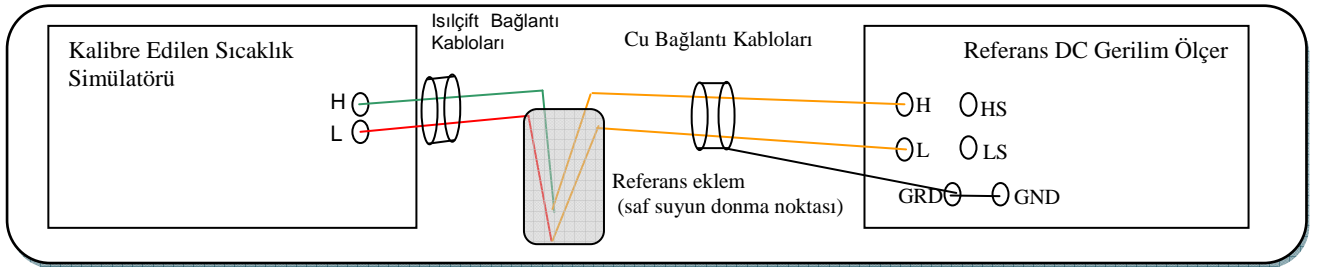
Isıl-Çift Türü	Ölçüm Noktası	Ölçüm Şartları	Belirsizlik
E Tipi Isıl-Çift	-200 °C	RED AKTİF (ON)	0,17 °C
	-100 °C		0,08 °C
	1000 °C		0,08 °C
J Tipi Isıl-Çift	-210 °C	RED AKTİF (ON)	0,16 °C
	-100 °C		0,09 °C
	1200 °C		0,09 °C

$$\Delta t = t_X - t_i - \delta t_i = P_V(V_{STD}) + (\delta V_{KAL} + \delta V_{KAL-K} + \delta V_P + \delta t_0 \cdot S_0 - \delta E(0^\circ C, t_{TER}))/S_{UYG} - t_i - \delta t_i \quad (1)$$

$$t_X = P_V(V_{STD}) + (V_{DMM} - V_{STD} + \delta V_{DMM} + \delta V_{DMM-K} - \delta E(0^\circ C, t_{TER}) + \delta t_0 \cdot S_0 + \delta V_P)/S_{UYG} \quad (2)$$



Şekil 1: Isıl-çift sensörlü sıcaklık göstergelerinin elektriksel standartlar ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED aktif)



Şekil 2: Isıl-çift sensörlü sıcaklık simülatörlerinin elektriksel standartlar ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED aktif)

1.3.1. RED Pasif Konumunda Dönüşüm Tablolarının Doğruluk Kalibrasyonu

RED pasif konumunda iken sıcaklık göstergeleri, giriş terminallerinde ölçtüğü gerilimi, bir düzeltme yapmadan, doğrudan sıcaklığa dönüştürmektedir. Bu durumda, gerilim kaynağından test sıcaklığına eşdeğer gerilim bakır kablo kullanılarak doğrudan gösterge terminallerine uygulanabilir. Basit bir gerilim ölçer kalibrasyonuna dönüşen bu ölçüm düzeneği ile her ısı-çift tipi için gerilim-sıcaklık dönüşüm fonksiyonlarından sapmalar belirlenebilir. Bu ölçüme ait model fonksiyon eşitlik (3)'de verilmiştir.

Benzer şekilde, simülatörler RED pasif konumunda iken, simülatörden uygulanan gerilimler standart tablolardaki gerilim değerleridir. Bu durumda simülatör çıkışındaki gerilimler bakır kablo kullanılarak bir voltmetre ile ölçülebilir. Basit bir gerilim kaynağı kalibrasyonuna dönüşen ölçüm düzeneği ile her ısı-çift tipi için gerilim sıcaklık dönüşüm fonksiyonlarından sapmalar belirlenebilir. Bu ölçüme ait model fonksiyon eşitlik (4)'de verilmiştir.

Çizelge 3'de bu yöntemle E ve J tipi için gösterge ve simülatörlere verilebilecek en iyi belirsizlikler verilmiştir.

1.3.2. Isıl-Çift ile Buz Noktasında RED Kalibrasyonu

Referans eklem düzeltmesi seçilerek kullanılan bir gösterge şu şekilde çalışır: Gösterge, girişlerine uygulanan gerilimi ölçer ve bu gerilime terminal sıcaklığına karşılık gelen gerilimi ekler. Gösterge, terminal sıcaklığını, terminallerine monte edilmiş izotermal bir blok içinde bulunan bir sensör ile (genellikle bir RTD) tespit eder. Göstergenin RED kalibrasyonu, bu sıcaklık sensörünün hatasının bulunması işlemidir. Sıcaklık simülatörlerinin içinde de benzer şekilde

terminal sıcaklığını sezen bir sensör mevcuttur.

Çizelge 3: TÜBİTAK UME'nin kalibrasyon ve ölçüm kabiliyeti (E ve J tipi ısı-çift göstergesi için RED pasif)

Isıl-Çift Türü	Ölçüm Noktası	Ölçüm Şartları	Belirsizlik
E Tipi Isıl-Çift	-200 °C	RED "PASİF"	0,09 °C
	-100 °C		0,04 °C
	1000 °C		0,07 °C
J Tipi Isıl-Çift	-210 °C	RED "PASİF"	0,06 °C
	-100 °C		0,04 °C
	1200 °C		0,07 °C

Günümüzde kalibrasyon amaçlı üretilmiş simülatörler ile göstergeler bir gövde içinde birleştirilmişlerdir. Bu cihazların giriş ve çıkış terminalleri çoğunlukla aynı sıcaklık bloğu üzerindedir. Bu durumda RED kalibrasyonunun sadece gösterge için yapılması yeterlidir.

RED kalibrasyonu bir sayısal termometre kalibrasyonu gibi yapılabilir ve RED kalibrasyonunun sadece bir noktada yapılması yeterlidir. Kalibrasyonun buz noktası sıcaklığında yapılması pratik olur. Bu kalibrasyon için seçilecek ısı-çiftin t_{TER} sıcaklığında (yaklaşık olarak oda sıcaklığında) yüksek çıkış gerilimi üretenlerden (J ve E tipi gibi) seçilmesi kalibrasyon belirsizliğini düşürecektir. Yine bölüm 1.2.'deki gibi burada kullanılan ısı-çiftin oda sıcaklığındaki düzeltmesi bilinmelidir. (5) numaralı eşitlik ile RED kalibrasyonu için kullanılacak model fonksiyon verilmiştir.

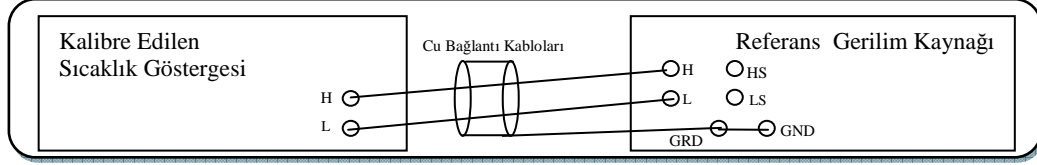
(1) numaralı eşitlikte $V_{STD} = 0$ V alınarak ve gerilim kaynağına ait düzeltmeler kaldırılarak (5) numaralı eşitlik elde edilir. Bu kalibrasyona ait kalibrasyon sonucu Çizelge 4'deki gibi

kalibrasyon sertifikasında beyan edilir.

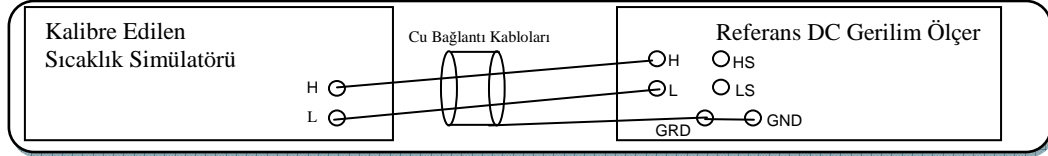
$$\Delta t = t_X - t_i - \delta t_i = P_V(V_{STD}) + \delta V_P/S_{UYG} + \delta V_{KAL}/S_{UYG} + \delta V_{KAL-K}/S_{UYG} - t_i - \delta t_i \quad (3)$$

$$t_X = P_V(V_{STD}) + (V_{DMM} - V_{STD})/S_{UYG} + \delta V_P/S_{UYG} + \delta V_{DMM}/S_{UYG} + \delta V_{DMM-K}/S_{UYG} \quad (4)$$

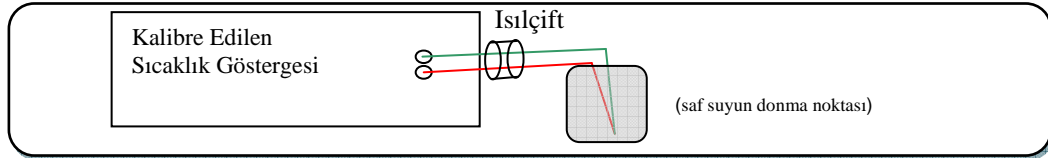
$$\Delta t = t_X - t_i - \delta t_i = P_V(0 V) + (\delta V_P + \delta t_0 \cdot S_0 - \delta E(0^\circ C, t_{TER}))/S_{UYG} - t_i - \delta t_i \quad (5)$$



Şekil 3 Isıl-çift sensörlü sıcaklık göstergelerinin elektriksel standartlar ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED Pasif)



Şekil 4: Isıl-çift sensörlü sıcaklık simülatörlerinin elektriksel standartlar ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED Pasif)



Şekil 5: Referans eklem düzeltmesi kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED Aktif)

Çizelge 4: J tipi ısıl-çift ile referans eklem düzeltmesi kalibrasyonun sertifikada beyanı

Referans Sıcaklık	Ölçülen Sıcaklık	Düzeltilme Değeri	Belirsizlik
0,01 °C	0,00 °C	0,01 °C	0,04 °C

1.4. Kalibrasyon Sonucunun Kullanılması

Bölüm 1.3.'deki yöntemle kalibre edilmiş bir sıcaklık göstergesi veya simülatörünü RED "Aktif" konumunda iken bir simülatör veya gösterge kalibrasyonunda referans cihaz olarak kullanmayı istediğimizi düşünelim: Ölçüm sistemleri, referans simülatör ile gösterge kalibrasyonu için Şekil 6'da, referans gösterge ile simülatör kalibrasyonu için Şekil 7'de verilmiştir. Her iki düzenekte de referans ve kalibre edilen cihazların terminalleri arasında ısıl-çift bağlantı kabloları kullanılmıştır. Bunda amaç cihazların terminal sıcaklıkları arasındaki farkı ortadan kaldırmaktır. Buradaki ısıl-çift kablolarının getirdiği hata terminaller arasındaki sıcaklık farkının düşük olması (< 5 °C) sebebiyle oldukça düşüktür. İki cihazın terminalleri arasındaki sıcaklığın 5 °C olduğu ve %1 doğruluklu ısıl-çift kablosunun kullanıldığı durumda bile ısıl-çiftin hatası 0,05°C'den küçük olacaktır [5].

Şekil 6'da verilen sistem ile kalibre edilen sıcaklık göstergesi için model fonksiyon Eşitlik (6) ile verilmiştir. Eşitlikteki δE_S simülatörün çıkışında t_S anma sıcaklığı ayarlandığı durumda, simülatörün bölüm 1.3.1'de belirtilen yöntem ile kalibrasyonu sonucunda elde edilen düzeltmenin gerilim cinsinden ifadesidir. δt_{S-K} ise simülatörün zamanla kaymasından kaynaklanan düzeltmenin sıcaklık cinsinden ifadesidir.

Kaymanın da gerilim cinsinden verilmesi durumunda S_{UYG} 'a bölünerek sıcaklık cinsinden ifadesi bulunabilir. δt_{SG} simülatör ile gösterge arasındaki sıcaklık farkını düzelten ısıl-çift bağlantı kablolarının 0 °C'deki hatasını temsil eder. δt_{SG} düzeltme değerini 0 °C kabul edilir ve bir önceki paragrafta anlatılan nedenlerle bu kabulün maksimum belirsizliği 0,05 °C'dir. İki cihazın terminalleri arasındaki sıcaklık farkının birkaç derece olduğu dikkate alınarak, bu aralıkta Seebeck katsayısı sabit kabul edilebilir. Bu durumda ısıl-çifte ait 0 °C'deki S_0 katsayısı ile δt_{SG} düzeltmesi çarpılarak, düzeltme gerilime dönüştürülür. Bu gerilim düzeltmesi daha sonra t_S anma sıcaklığına ait S_{UYG} katsayısına bölünerek t_S sıcaklığındaki düzeltme sıcaklık cinsinden bulunur.

δt_S , simülatörün terminal sıcaklığını ölçme hatasını düzeltir ve RED kalibrasyonu sonucunda elde edilir, kalibrasyon sertifikasında (Çizelge 4) beyan edilen düzeltme değeridir. Bu düzeltme değeri RED kalibrasyonunda kullanılan ısıl-çiftin RED kalibrasyonunun yapıldığı sıcaklığa ait $S_{t_S}^{kal}$ katsayısı ile çarpılarak gerilime dönüştürülür. Çizelge 4'deki kalibrasyona ait $S_{t_S}^{kal} = S_{t_S}^{tipi_{0C}}$ olarak ifade edilebilir ve değeri $S_{t_S}^{tipi_{0C}} = 52 \mu V/^\circ C$ alınabilir. δV_P ölçüm sistemini etkileyen istenmeyen ısıl ve elektromanyetik etkileşim nedeniyle oluşan parazit gerilimleri temsil eder. Eşitlik (6)'da bu gerilimin değerini 0 μV olarak kabul edilir ve belirsizlik bütçesinde bu kabulün maksimum belirsizliği 0,5 μV alınabilir.

Bölüm 1.2'de açıklanan yöntem ile kalibre edilmiş bir sıcaklık simülatörünün sıcaklık göstergesi kalibrasyonunda kullanılması durumunda ise (6) numaralı eşitlikte bulunan δt_S parametresi olmayacaktır. Buna karşın δE_S aynı zamanda RED kaynaklı hatayı da düzeltecektir.

Eşitlik (7), referans sıcaklık göstergesi kullanılarak sıcaklık

simülâtörünün kalibrasyonuna ait model fonksiyondur. Burada δt_i bölüm 1.3.1'de anlatılan kalibrasyon sonucunda bulunan düzeltmedir. S_{ikal}^{kal} , δt_i düzeltmesine ait Seebeck katsayısıdır. $\delta t_{i,K}$ göstergenin kayması, δt_G bölüm 1.3.2'deki kalibrasyon sonucunda Çizelge 4'de verilen düzeltme değeridir. Bölüm 1.2'de anlatılan sistem ile kalibre edilmiş bir sıcaklık göstergesinin δt_G parametresi olmayacaktır ve δt_i düzeltmesi aynı zamanda RED düzeltmesini de içerecektir.

Bölüm 1.3.'de anlatıldığı şekilde kalibre edilen gösterge/simülâtörün kalibrasyonundan gelen belirsizliklerinin tümünü bulmanın yolu Çizelge 3'de verilen belirsizliklerle Çizelge 4'de verilen belirsizlikleri uygun şekilde birleştirmektir.

Çizelge 4'de RED kalibrasyonu için verilen örnek kalibrasyon sonucunda beyan edilen belirsizlik 0,04 °C'dir. Bu belirsizliğin duyarlılık katsayısı (6) ve (7) numaralı eşitliklerden de görüldüğü gibi :

$$S_{iG}^{kal}/S_{UYG} \quad (8)$$

olmaktadır. (8) ile bulunan duyarlılık katsayılarının 0,04 °C ile çarpımı RED kalibrasyonunun belirsizlik katkısını verecektir.

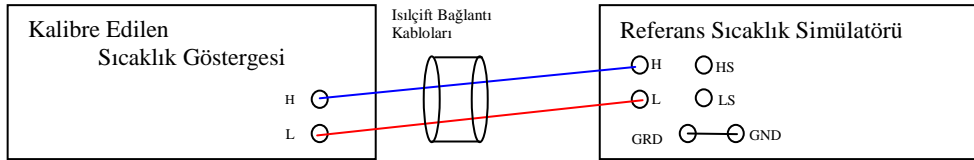
$$\Delta t = t_X - t_i - \delta t_i = t_S + \delta E_S/S_{UYG} + \delta t_{S,K} + (-\delta t_{SG} \cdot S_0 - \delta t_S \cdot S_{iS}^{kal} + \delta V_P)/S_{UYG} - t_i - \delta t_i \quad (6)$$

$$t_X = t_i + \delta t_i \times S_{ikal}^{kal}/S_{UYG} + \delta t_{i,K} + (-\delta t_{SG} \cdot S_0 - \delta t_G \cdot S_{iG}^{kal} + \delta V_P)/S_{UYG} \quad (7)$$

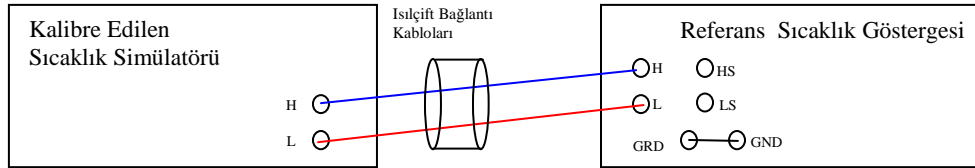
Bu belirsizlik katkısını [4] dokümanına uygun şekilde birleştirdiğimizde Çizelge 5'de verilen sonuçlar görülmektedir. Çizelge 5'de verilen belirsizliklerle Çizelge 2'de verilen belirsizliklerin örneklenen ölçüm noktaları için aynı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5: Bölüm 1.3'deki Metolla Kalibreli Referans Göstergenin Toplam Kalibrasyon Belirsizliği

Isıl-Çift Türü	Ölçüm Noktası	Ölçüm Şartları	RED Kalib.'nun Belirsizlik Katkısı	Toplam Kalibrasyon Belirsizliği
E Tipi Isıl-Çift	-200 °C -100 °C 1000 °C	RED "AKTİF"	0,08 °C 0,05 °C 0,03 °C	0,12 °C 0,06 °C 0,08 °C
J Tipi Isıl-Çift	-210 °C -100 °C 1200 °C	RED "AKTİF"	0,11 °C 0,05 °C 0,04 °C	0,12 °C 0,06 °C 0,08 °C



Şekil 6 : Sıcaklık göstergesinin sıcaklık simülâtörü ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED aktif)



Şekil 7 : Sıcaklık simülâtörünün sıcaklık göstergesi ile kalibrasyonu için ölçüm sistemi (RED aktif)

2. Sonuçlar

RED seçili (aktif) konumdayken, elektriksel sıcaklık kalibratörlerinin düşük belirsizlikle kalibrasyonu, referans ısı-çift, buz noktası ve elektriksel standartlar kullanılarak gerçekleştirilir ve [3] standardında bu yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, ölçümler her ısı-çift tipi için her ölçüm sıcaklığında gerçekleştirildiğinde oldukça zahmetlidir. Her tip ısı-çifte sahip olmayı ve bu ısı-çiftlerin izlenebilirliklerinin sağlanmasını gerektirir. Ayrıca buz banyosu kullanmak ölçüm süresini uzatır.

Göstergenin RED kalibrasyonu, göstergenin terminal sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörünün hatasının bulunmasıdır. Bu hatanın tek bir sıcaklık noktasında belirlenmesi yeterlidir. Tek bir noktada belirlenen bu hata, eşitlik (6) ve (7)'de verilen model fonksiyonlardan yararlanarak tüm ölçüm sonuçlarından düzeltilebilir.

Sıcaklık göstergesi ve simülâtörlerinin sadece tek bir noktada RED kalibrasyonunu yapmak ve diğer noktalarda sadece elektriksel standartlar kullanarak kalibre etmek, kalibrasyon süreci ve maliyeti açısından çok daha uygundur.

Bu makalede sadece E ve J tipi ısı-çiftler için iki farklı

yöntem ile yapılan kalibrasyonun arasındaki fark sunulmuştur. Benzer şekilde diğer ısı-çift tipleri için de analiz yapılabilir. Bu analiz sonucunda da, her noktada bölüm 1.2'de verilen yöntem ile kalibre edilen göstergenin kalibrasyonundan gelen belirsizlik ile bölüm 1.3'de anlatılan yöntem ile kalibre edilen göstergenin kalibrasyonundan gelen belirsizlik arasında önemli bir fark olmadığı görülecektir.

3. Kaynaklar

- [1] IEC 60751: 2008, "Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors", Edition 2.0
- [2] IEC 60584-1:1995, "Thermocouples - Part 1 : Reference tables", Edition 2.0
- [3] EURAMET cg-11, "Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement", Version 2.0, March 2011
- [4] ISO " Guide To The Expression Of Uncertainty In Measurement", First Edition 199
- [5] Robin E. Bentley, "An Example in Applying the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", CSIRO Australia, 20