

# PLATİN KÖKENLİ DİRENÇ TERMOMETRE (PRT) KALİBRASYONLARINDA MODEL FONKSİYONUN KALİBRASYON ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİNE ETKİSİ

**Eyüp BİLGİÇ**  
**Murat KALEMCI**  
**Mücahit KORKMAZ**  
**Melda PATAN ALPER**  
**Mehmet K. TORUN**  
**Ahmet T. İNCE**

## ÖZET

Uluslararası sıcaklık ölçeğine (ITS-90) göre Standart Platin Direnç Termometreleri (SPRT) ve Pt-100 olarak adlandırılan direnç termometreleri, kontak sıcaklığı alanındaki endüstriyel kalibrasyon uygulamalarında referans niteliği taşıyan termometrelerdir. Bu tip termometrelerin elektriksel direnci (R), maruz kaldıkları sıcaklık (t) ile değişmektedir. Kalibrasyonları kısaca, değeri bilinen sıcaklıklara karşılık gelen direnç değerlerinin ölçülmesi, ölçülen direnç değerinin belirli bir model fonksiyona uyarlanması (fit edilmesi) şeklinde tanımlanabilir. Pt-100 termometreler için ITS-90'na izlenebilir sıcaklık değerlerinin elde edilmesinde kullanılan model fonksiyonlar, 0 °C'nin altındaki ve 0 °C'nin üstündeki sıcaklıklar için tanımlanmış Callendar-Van Dusen denklemleridir. Bu bildiride PRT'lerin tekrarlanabilir kalibrasyonları sırasında elde edilen sıcaklık ve direnç verilerinin, Callendar-Van Dusen ve farklı dereceli polinomlara Matlab yazılım kullanılarak fit edilmeleri, uygulanan model fonksiyona göre maksimum ve minimum artık değerlerin (residual) bulunması, bu değerlerin kalibrasyon belirsizliği üzerindeki etkileri sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Sıcaklık, Direnç, PRT Kalibrasyonu, Callendar-Van Dusen Denklemi, Ölçüm, Belirsizlik.

## ABSTRACT

Standard Platinum Resistance Thermometers (SPRT) and resistance thermometers called Pt-100 according to international temperature scale (ITS-90) are the reference thermometers for industrial calibration applications in the field of contact temperature. The electrical resistance (R) of such thermometers varies with the temperature (t) to which they are subjected. Their calibration method can be briefly defined as measuring resistance values corresponding to known temperatures and fitting the measured resistance value to a particular model function. The model functions used in accordance traceable temperature to the ITS-90 for the Pt-100 thermometers are the Callendar-Van Dusen equations defined for temperatures below 0 °C and above 0 °C. In this paper, fitting the temperature and the resistance values obtained during the repeatable calibration of the PRTs to Callendar-Van Dusen and different grade polynomials using Matlab software, the maximum and minimum residual values according to the model function fitted and their effects on the calibration uncertainty is presented.

**Key Words:** Temperature, Resistance, Calibration of PRT, Callendar-Van Dusen Equation, Measurement, Uncertainty.

## 1. GİRİŞ

Standart direnç sensörlü termometrelerin (SPRT ve PRT'ler) kalibrasyonları sabit noktalar ya da karşılaştırma yöntemi kullanılarak yapılır [1-4]. Sıcaklık-Direnç bağımlılığı, ITS-90, Calendar Van-Dusen (CVD) veya farklı dereceden polinomlar kullanılarak değerlendirilir. Endüstriyel tipteki PRT'lerde sıcaklık-direnç bağımlılığı genel olarak, sıcaklığın 0 °C'den küçük olduğu  $t < 0$  °C ve sıcaklığın 0 °C'den büyük olduğu  $t > 0$  °C iki ayrı bölgede değerlendirilmektedir [5], ayrıca yapılan kalibrasyonlardaki ölçüm belirsizlikleri üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır [6, 7]. Dahası PRT'ler, zamanla ve kullanımla ilişkili olarak kararlılıkları değişkenlik gösteren elamanlar olduklarından, literatürde PRT'lerin ömür tahminlerine yönelik yapılan çalışmalara da rastlanılmaktadır [8]. Endüstriyel tipteki PRT'lerin kalibrasyonunda kullanılacak denklemler, nominal katsayılar, sıcaklıklara karşılık gelen direnç değerleri vb değerler standartlaştırılmıştır [9]. Teknik özelliklerin belirlenmesine yönelik test metotları yeterince detaylandırılarak standart hale getirilmiştir [10].

Bu çalışmada, -60 °C ile 650 °C arasında sıcaklık ve direnç değerlerine eğri uydurması yaparak, elde edilen katsayılarla sıcaklık direnç değerlerinin eğri uydurması yaparak, sonrasında ise hangi eğri uydurma polinomunun, bize ölçülen gerçek değerlere göre az/fazla kalıntı değerleri oluşturduğunu belirlemek amaçlanmıştır. Sonuç olarak hangi dereceli polinomunun, ölçüm belirsizliği açısından yararlı olabileceği yönünde değerlendirme yapılmıştır. Bu kapsamda farklı sıcaklık aralıklarında kalibrasyonları yapılmış PRT'lerin sıcaklık-direnç verilerinin CVD ve farklı dereceli polinomlara uydurmak için Matlab yazılımı kullanılarak bir kod yazılması amaçlanmıştır. Benzer çalışmalara rastlanılmakla birlikte, sıcaklık-direnç verilerinin  $t < 0$  °C ve  $t > 0$  °C aralıklarını kapsayan tek bir bölge için eğri uydurması pek yaygın olarak çalışılmamıştır. Diğer bir farklılık ise  $t < 0$  °C bölgesindeki ölçüm veri sayısının yapılan eğri uydurma sonucuna etkisi incelenmiştir.

## 2. PRT'LER İÇİN SICAKLIK-DİRENÇ İLİŞKİSİ ve YAZILIM DOĞRULAMASI

Platin direnç termometreleri (PRT) hassas sıcaklık ölçümlerinde kullanılırlar. Bu kapsamda, sıcaklık etkisi altında platin malzemedeki yapılmış olan direnç elemanının direnç değişiminin, hassas olarak ölçülmesi bir gerekliliktir. Direnç ölçümleri, içerisinde yüksek kararlılığa sahip referans nitelikli dirençler içeren köprüler kullanılarak yapılır. Sıcaklık aralıklarına bağlı olarak PRT'lerin direnç değeri, farklı dereceli polinomlarla ifade edilmektedir. Endüstriyel tip PRT'lerin direnç değerleri için CVD eşitliği yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna göre:

(  $t \leq 0$  °C ) sıcaklık bölgesi için bölgesi için:

$$R(t) = R(t=0) \cdot [ 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t-100) \cdot t^3 ] \quad (\text{ohm}) \quad (1)$$

(  $t \geq 0$  °C ) sıcaklık bölgesi için bölgesi için:

$$R(t) = R(t=0) \cdot [ 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 ] \quad (\text{ohm}) \quad (2)$$

eşitlikleri kullanılmaktadır. (1) ve (2) eşitliklerinde  $R(t=0)$ , PRT'nin 0 °C'deki direnç değeridir. A, B ve C parametreleri ise PRT'nin maruz kaldığı t sıcaklığında ölçülen  $R(t)$  değerini sağlayan polinom, sıcaklık metrolojisindeki kullanımlarına yönelik olarak CVD katsayılarıdır. Dikkat edilirse  $R(t=0)$  değerinin bilinmesi durumunda, (  $t \leq 0$  °C ) bölgesi için kullanılan eşitlik 4. dereceden ancak 3 katsayılı polinom, (  $t \geq 0$  °C ) bölgesi için kullanılan eşitlik 2. dereceden 2 katsayılı polinomdur. Yüksek dereceli polinom kullanmanın sıcaklık-direnç ilişkisini daha iyi tanımladığı düşünülebilir. Bu durumu değerlendirmek için aşağıda verilen polinomlar da dikkate alınmıştır.

$$R(t) = R(t=0) \cdot [ 1 + A \cdot t ] \quad (\text{ohm}) \quad (3)$$

$$R(t) = R(t=0) \cdot [ 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 ] \quad (\text{ohm}) \quad (4)$$

$$R(t) = R(t=0) \cdot [ 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 + D \cdot t^4 ] \quad (\text{ohm}) \quad (5)$$

Direnç bazlı termometrelerin sıcaklık–direnç ilişkilerinin incelemesinde lineer bir fonksiyon kullanılması işin doğasına aykırı olsa da buradaki kullanım amacı, lineer fonksiyon kullanarak elde edilen eğri uydurma sonuçlarının, daha yüksek dereceli polinomlar kullanılarak elde edilen sonuçlarla, sayısal verilere dayanarak karşılaştırmasının yapılmasıdır.

Kalibrasyonlar sırasında elde edilen verilerin, doğru elde edilip edilmedikleri, bu veriler kullanılarak yapılan hesaplamaların doğru ve her zaman aynı veriler için aynı sonucu vermesi, akredite kalibrasyon laboratuvarları için TS EN ISO/IEC 17025 standardının bir gerekliliğidir. Laboratuvarlardan, bu kapsamlarda kendi geliştirdikleri yazılımların, hesaplamalarda kullandıkları MS Office Excel çalışma sayfalarının doğrulamalarının yapılması beklenir. Buradan yola çıkarak öncelikle, eğri uydurması için kullanılacak yazılımın doğrulaması yapılmalıdır. Yazılım doğrulamasında kullanılacak sıcaklık-direnç veri seti, (1) – (5) numaralı eşitliklerle verilen polinomlar kullanılarak elde edilmiştir. Veri setlerinin elde edilmesinde tamamen rastgele olarak seçilen ancak sıcaklık ve direnç aralığı ile uyum sağlayan katsayılar kullanılmıştır. Bazı kaynaklarda nominal direnci 100 ohm olan PRT için A, B ve C katsayıları ve 0 °C ile 850 °C sıcaklık aralığındaki hesaplanan direnç değerlerinin verildiği görülmektedir [9]. Bu çalışmada ise -60 °C ve 550 °C sıcaklık aralığındaki sıcaklık-direnç değerlerinin hesaplamalarında, polinom katsayıları için  $R(t=0) = 100$  ohm,  $A = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $B = -5 \cdot 10^{-7}$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-10}$  ( $C_{CVD} = -2 \cdot 10^{-10}$ ) ve  $D = -5 \cdot 10^{-15}$  değerleri kullanılmıştır.  $C_{CVD}$  (1) nolu CVD eşitliğindeki C katsayısı yerine kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılmak üzere ortaya konulan yazılım, Matlab yazılımı kullanılarak yazılmış bir koddur. Kod, tanımlanan bir dizinde bulunan MS Office Excel çalışma sayfasında yer alan sıcaklık-direnç veri seti değerlerinin okunması,  $t \leq 0$  °C ve  $t \geq 0$  °C sıcaklık aralıkları için verilerin gruplanması,  $t \geq 0$  °C için gruplanan veri setinin sırası ile 1., 2. ve 3. dereceden polinomlara uydurulması,  $t \leq 0$  °C için gruplanan veri setinin sırası ile 1., 2., 3., 4. derece polinomlara ve VDC denkleminde uydurulması, ayrıca veri setinin tüm sıcaklık aralığı için sırası ile 1., 2., 3., 4. derece polinomlara ve VDC denkleminde uydurulması yapılmıştır. 1. - 4. dereceli polinomların eğri uydurmasında kullanılan Matlab kodunun doğrulaması, Matlab yazılımının “polyfit” özelliği kullanılması, VDC denkleminde eğri uydurma in doğrulaması, en küçük kareler (least square fit) yöntemine göre elde edilen analitik çözümün nümerik hesaplanması şeklinde yapılmıştır. Eğri uydurma sonrasında elde edilen  $R(t=0)$ , A, B, C ve D katsayıları, doğrulamada kullanılan veri setlerinin oluşturulmasında kullanılan  $R(t=0)$ , A, B, C ve D katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Yazılan kodun doğrulaması, -60 °C ve 550 °C sıcaklık aralığında direnç değerlerinin hesaplanmasında kullanılan  $R(t=0)$ , A, B, C ve D katsayıların tekrar edilebilmesi ve bu katsayılardaki bağıl hatanın yeterince küçük olabilmesine bağlı olarak yapılmıştır. Doğrulama hesaplamalarından elde edilen sonuçlar Tablo 1 – Tablo 5’te verilmiştir. Tablolarda verilen “ $R(t=0)$  °C Hesaplanan” değeri, eğri uydurma sonrasında  $t = 0$  °C için hesaplanan direnç değeri, “ $R(t=0)$  °C Bağıl Hata” değeri ise eğri uydurma sonrasında elde edilen direnç değerinin, eğri uydurma için kullanılan veri setinin elde edilmesinde kullanılan direnç değerine göre bağıl hatadır. Bağıl hata eşitlik (6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Bağıl Hata} = ( R(t=0)_{\text{fit}} - R(t=0)_{\text{veriseti}} ) / R(t=0)_{\text{veriseti}} * 100 \quad (6)$$

Tablolarda verilen A, B, C ve D polinom katsayılarına yönelik tanımlamalar,  $R(t=0)$  °C için verilen tanımlamaların benzerleridir. Tablolardaki “Maks. Kalıntı” değeri, eğri uydurması yapılan sıcaklık aralığında, eğri uydurması ile elde edilen direnç değerlerinin eğri uydurmada kullanılan veri seti arasındaki farkın (residual) en büyük değeridir.

**Tablo 1.** 1. Derece Polinom için Doğrulama Verileri

Skala	Veri Sayısı	$R(t=0)$ °C, $\Omega$ Hesaplanan	Maks Kalıntı [ohm]	A Hesaplanan
		$R(t=0)$ °C Bağıl Hata		A Bağıl Hata
$t < 0$ °C	6	100	1,42E-14	5,00E-03
		0,00E+00		-3,47E-14
$t > 0$ °C	9	100	5,68E-14	5,00E-03
		1,42E-14		-1,73E-14
Tüm Bölge	14	100	5,68E-14	5,00E-03
		-2,84E-14		6,94E-14

**Tablo 2.** 2.Derece Polinom için Doğrulama Verileri

Skala	Veri Sayısı	R(t=0 °C), Ω	Maks Kalıntı [ohm]	A	B	
		Hesaplanan		Hesaplanan	Hesaplanan	Hesaplanan
		R(t=0 °C)				
		Bağlı Hata			A	B
				Bağlı Hata	Bağlı Hata	Bağlı Hata
t < 0 °C	6	100	5,68E-14	5,00E-03	-5,00E-07	
		-1,42E-14		-1,21E-13	5,05E-11	
t > 0 °C	9	100	1,71E-13	5,00E-03	-5,00E-07	
		0,00E+00		6,94E-14	2,03E-12	
Tüm Bölge	14	100	5,68E-14	5,00E-03	-5,00E-07	
		-2,84E-14		8,67E-14	1,44E-12	

**Tablo 3.** 3.Derece Polinom için Doğrulama Verileri

Skala	Veri Sayısı	R(t=0 °C), Ω	Maks Kalıntı [ohm]	A	B	C
		Hesaplanan		Hesaplanan	Hesaplanan	Hesaplanan
		R(t=0 °C)				
		Bağlı Hata			A	B
				Bağlı Hata	Bağlı Hata	C
				Bağlı Hata	Bağlı Hata	Bağlı Hata
t < 0 °C	3	100	0,00E+00	0,00E+00	-2,51E-04	-2,78E-06
		0,00E+00		-1,00E+02	5,00E+04	-5,56E+05
	4	100	1,42E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		0,00E+00		-8,67E-14	7,09E-12	1,58E-10
	6	100	4,26E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		-1,42E-14		2,60E-13	-2,62E-10	4,08E-09
t > 0 °C	9	100	5,68E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		4,26E-14		-1,21E-13	-4,30E-12	-6,25E-12
	9	100	5,68E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		4,26E-14		-1,21E-13	-4,30E-12	-6,25E-12
	9	100	5,68E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		4,26E-14		-1,21E-13	-4,30E-12	-6,25E-12
Tüm Bölge	11	100	5,68E-14	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		-1,42E-14		1,39E-13	5,74E-12	6,95E-12
	12	100	1,14E-13	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		2,84E-14		1,04E-13	6,33E-12	5,50E-12
	14	100	1,14E-13	5,00E-03	5,00E-07	5,00E-10
		-2,84E-14		6,94E-14	-1,80E-12	-5,31E-12

**Tablo 4.** 4.Derece Polinom için Doğrulama Verileri

Skala	Veri Sayısı	R(t=0 °C), Ω	Maks Kalıntı [ohm]	A	B	C	D	
		Hesaplanan		Hesaplanan	Hesaplanan	Hesaplanan		
		R(t=0 °C)						
		Bağlı Hata			A	B	C	D
				Bağlı Hata	Bağlı Hata	Bağlı Hata	Bağlı Hata	Bağlı Hata
t < 0 °C	4	100	4,26E-14	0,00E+00	-4,59E-04	-1,25E-05	-1,04E-07	
		0,00E+00		-1,00E+02	9,17E+04	-2,50E+06	2,08E+09	
	6	100	1,42E-14	5,00E-03	-5,00E-07	5,00E-10	-5,00E-15	
		1,42E-14		1,34E-12	-1,14E-09	3,06E-08	-2,54E-05	
Tüm Bölge	12	100	5,68E-14	5,00E-03	-5,00E-07	5,00E-10	-5,00E-15	
		-2,84E-14		3,47E-14	-6,54E-12	-2,43E-11	-2,26E-09	
	14	100	1,14E-13	5,00E-03	-5,00E-07	5,00E-10	-5,00E-15	
		0,00E+00		6,94E-14	-3,94E-12	-2,95E-11	-3,56E-09	

**Tablo 5.** CDV Eşitliği için Doğrulama Verileri

Skala	Veri Sayısı	R(t=0 °C), $\Omega$ Hesaplanan	Maks Kalıntı [ohm]	A Hesaplanan	B Hesaplanan	C Hesaplanan
		R(t=0 °C) Bağıl Hata		A Bağıl Hata	B Bağıl Hata	C Bağıl Hata
t < 0 °C	3	100	2,84E-14	2,03E-02	6,84E-04	-4,48E-08
		1,42E-14		3,06E+02	-1,37E+05	2,24E+06
	4	100	5,68E-14	5,00E-03	-5,00E-07	-2,00E-12
		2,84E-14		2,46E-12	-9,10E-10	1,33E-08
	6	100	2,84E-13	5,00E-03	-5,00E-07	-2,00E-12
		-1,28E-13		-1,24E-11	4,87E-09	-7,64E-08
Tüm Bölge	11	100	1,71E-13	5,00E-03	-5,00E-07	-2,00E-12
		-2,84E-14		-4,68E-13	-2,18E-11	1,40E-11
	12	100	2,13E-13	5,00E-03	-5,00E-07	-2,00E-12
		-5,68E-14		5,03E-13	1,13E-11	-3,09E-12
	14	100	3,69E-13	5,00E-03	-5,00E-07	-2,00E-12
		8,53E-14		7,81E-13	3,53E-11	-2,06E-11

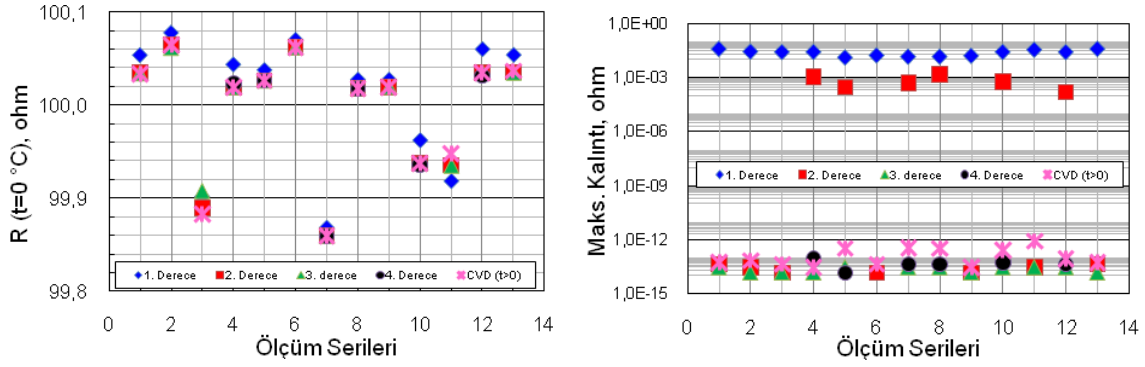
### 3. PRT KALİBRASYONLARINDA ELDE EDİLEN SICAKLIK-DİRENÇ VERİLERİNİN ANALİZİ

Farklı dönemlerde yapılan 14 adet PRT kalibrasyonundan elde edilen sıcaklık-direnç verilerinin analizi yapılmıştır. Bu kalibrasyonlardan elde edilen veriler, Ölçüm serileri S1, ..., S14 olarak adlandırılmıştır ve sıcaklık aralıkları, ölçüm bölgelerine göre mevcut veri sayıları Tablo 6'da verilmiştir. Kalibrasyonlar, gelen talepler doğrultusunda farklı sıcaklık aralıklarında ve farklı veri sayılarında yapılmış oldukları anlaşılmaktadır.

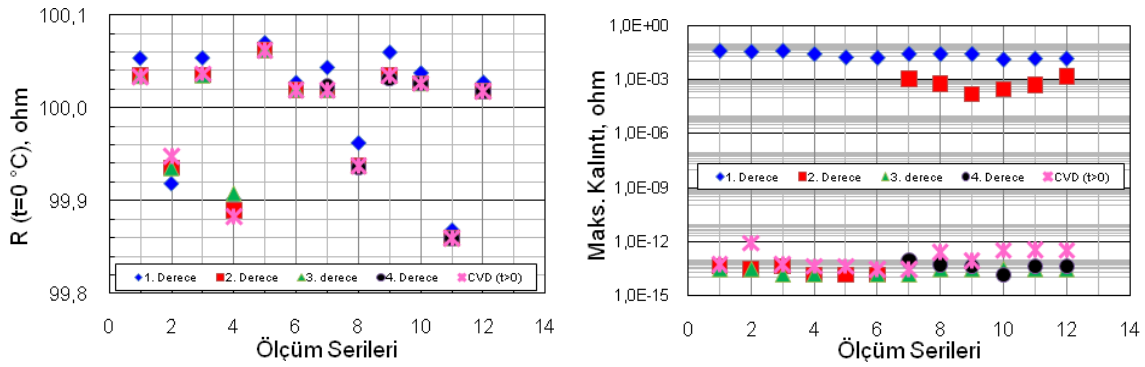
**Tablo 6.** Kalibrasyonlarda elde edilen ölçüm serilerine ait parametrik özellikler

Parametre	Ölçüm Serileri													
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
t < 0 °C için alt sıcaklık	-60	-50	-40	-60	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-60	-60	-60	-60
Veri Sayısı	3	3	3	4	4	3	3	4	4	3	4	3	4	3
t > 0 °C için üst sıcaklık	550	400	500	650	540	400	420	450	400	400	550	550	550	500
Veri Sayısı	8	5	7	8	7	6	6	9	6	6	8	8	8	7
Toplam Veri Sayısı	11	8	10	11	11	9	9	13	10	9	12	11	12	10

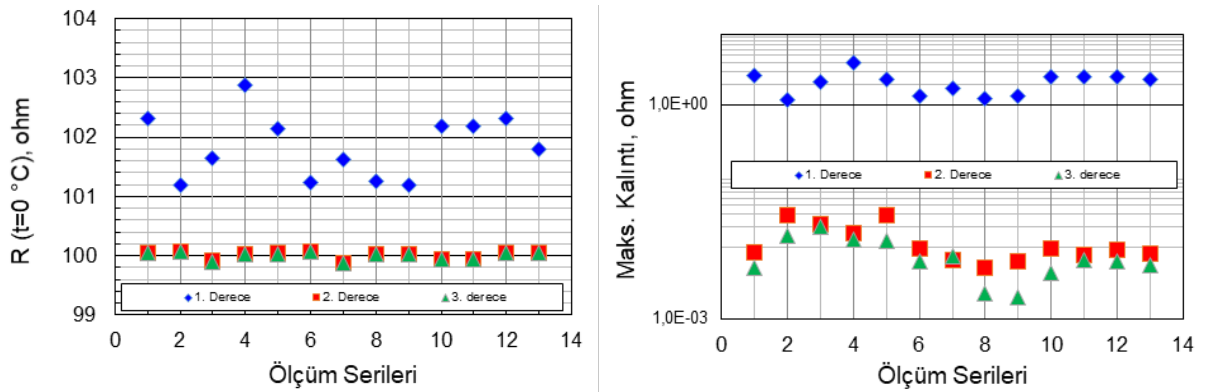
Eğri uydurma sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere, S1,...,S14 ölçüm serilerinin sıcaklık bölgeleri ve veri sayıları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre t<0 °C bölgesi alt sıcaklık değerleri, -60 °C, -50 °C ve -40 °C'dir. Bu bölgelerde ölçüm yapılmış olan sıcaklık değerleri (veri sayısı) 3 ve 4'tür. Aynı değerlendirme t>0 °C bölgesi için de yapılabilir. Sıcaklık aralıkları ve veri sayısı parametrelerinin aynı olduğu ölçüm serileri gruplandırıldığında, t<0 °C bölgesi için aynı grup içinde yer alan ölçüm serilerinin "S1, S12, S14", "S3, S6, S10", "S4, S11, S13" ve "S5, S8, S9" oldukları görülür. t>0 °C bölgesi için aynı grup içindeki ölçüm serileri "S1, S11, S13", "S3, S5, S14" ve "S6, S9, S10"dir. Kalibrasyonlarda elde edilen sıcaklık-direnç verileri, Matlab yazılımı kullanılarak yazılan ve doğrulaması yapılan kod ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları Şekil 1- 6'da verilmiştir.



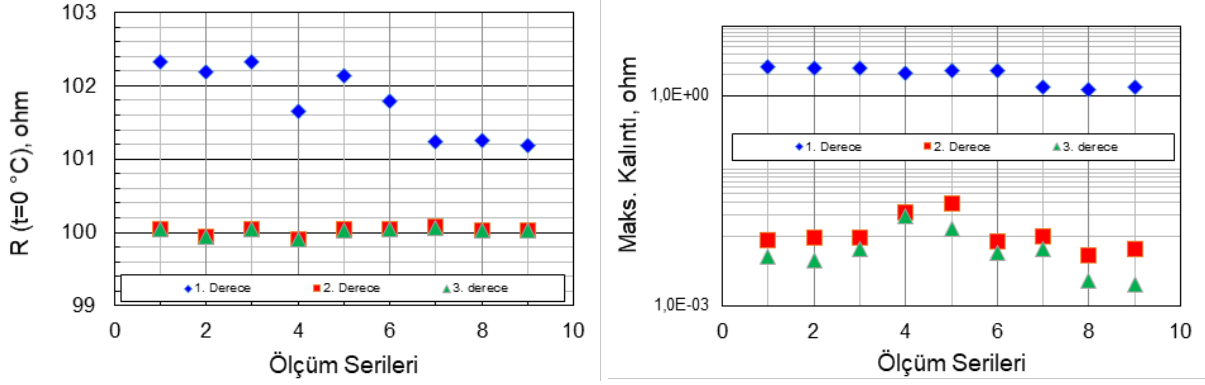
**Şekil 1.**  $t < 0$  °C bölgesinde sırası ile (S1,...,S6,S8,...,S14) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri,



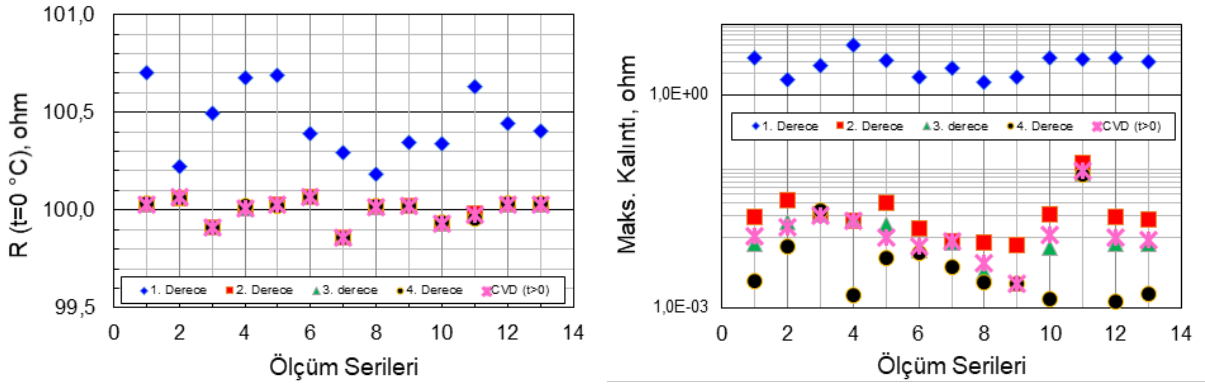
**Şekil 2.**  $t < 0$  °C bölgesinde benzer sıcaklık ve veri aralıklı sırası ile (S1,S12,S14), (S3,S6,S10), (S4,S11,S13) ve (S5,S8,S9) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri



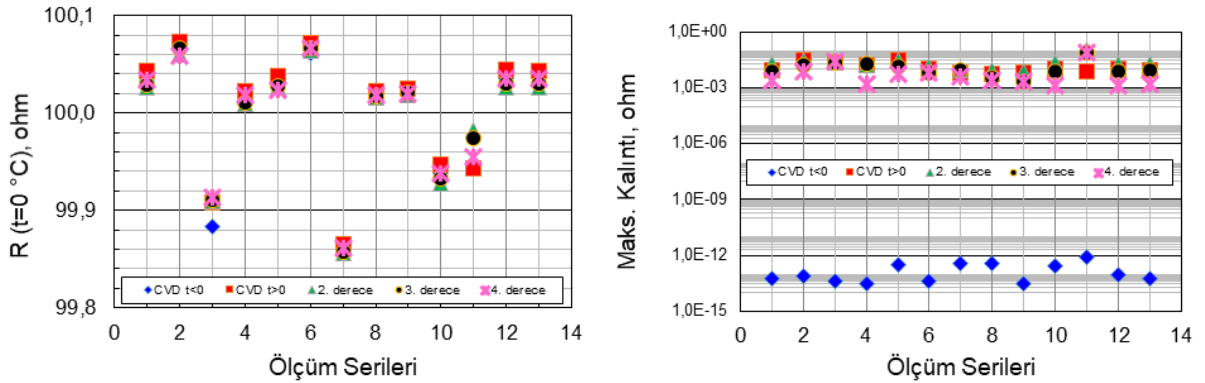
**Şekil 3.**  $t > 0$  °C bölgesinde sırası ile (S1,...,S6,S8,...,S14) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri



**Şekil 4.**  $t > 0$  °C bölgesinde benzer sıcaklık ve veri aralıklı sırası ile (S1,S11,S13), (S3,S5,S14) ve (S6,S9,S10) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri



**Şekil 5.**  $(-60 < t < 650)$  °C bölgesi içinde bulunan sırası ile (S1,...,S6,S8,...,S14) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri



**Şekil 6.** (S1,...,S6,S8,...,S14) serileri için 0 °C sıcaklık değerine karşılık gelen direnç değeri ve maksimum kalıntı (residual) grafikleri

- CVD  $t < 0$ °C, negatif sıcaklık bölgesi için,
- CVD  $t > 0$ °C, pozitif sıcaklık bölgesi için,
- 2., 3. ve 4. derece, negatif ve pozitif sıcaklıkları aralığındaki tüm bölgeler

Tablo 6'dan görüleceği üzere S4 kodlu ölçüm serisi, en geniş sıcaklık aralığını oluşturmaktadır  $(-60 < t < 650)$  °C. Örnek olması amacı ile bu sıcaklık aralığındaki direnç kalıntı değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Kalibre edilen PRT'lerin, 0 °C civarında ölçülen ve uygulana model fonksiyona bağlı olarak elde edilen  $R(t=0)$  direnç değerleri kullanılarak hesaplanan bağıl hata ve PRT sıcaklık katsayısı ( $\alpha$ ) parametreleri Tablo 7'de verilmiştir. PRT sıcaklık katsayısı, eğri uydurma sonucu elde edilen değerlerden eşitlik (7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\alpha = (R_{100} - R_0) / (R_0 * 100 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (^\circ\text{C}^{-1}) \quad (6)$$

**Tablo 7.** PRT'lerin 0 °C civarında ölçülen ve eğri uydurma ile hesaplanan  $R(t=0)$  direnci için bağıl hata ve fit verileri ile hesaplanan sıcaklık katsayısı,  $\alpha$  parametreleri

Parametre	Ölçüm Serileri													
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
$dR/R$ ( $\mu\Omega/\Omega$ )	4,8	-17,9	54,9	-41,0	-20,4	47,7	9,5	18,5	9,9	4,4	14,9	192,1	40,5	4,9
$\alpha$ ( $\times 10^{-3}$ )	3,926	3,929	3,928	3,844	3,861	3,924	3,852	3,928	3,927	3,927	3,846	3,841	3,926	3,926

## SONUÇ

Matlab yazılımı kullanılarak yazılan hesaplama kodunun doğrulama hesaplama sonuçları, Tablo 1 – Tablo 5, incelendiğinde;  $R(t=0)$  direnç değerinin (1) – (5) eşitlikleri ile belirlenen değerindeki en büyük bağıl hata değerinin  $1,2 \cdot 10^{-13}$  mertebesinde olduğu görülür. Eğri uydurma ile hesaplanan ve (1) – (5) eşitlikleri ile hesaplanan direnç değerleri arasındaki fark olarak tanımlanan kalıntı değerlerindeki maksimum değer  $1,2 \cdot 10^{-13}$  ohm mertebesinde. Bu değerlerin, direnç ölçümlerinden kaynaklan belirsizlikler dikkate alındığında ihmal edilebilir düzeyde oldukları, böylelikle yazılan kodun doğrulaması yapılmış olduğu teyit edilmiş olur.

13 adet kalibrasyon sonucunun değerlendirilmesinin yapıldığı Şekil 1 – Şekil 6 verilerinden,  $R(t=0)$  direncinin belirlenmesiyle hesaplanan maksimum kalıntının 1. dereceden polinomdan geldiği görülmektedir.

Şekil 1 ve 2'den  $t < 0$  °C bölgesi için 2 ve daha yüksek dereceli polinomlar için maksimum kalıntı  $1 \cdot 10^{-13}$  ohm mertebesinde olup, 4. derece polinom CVD' ye göre daha 10 mertebesi kadar daha küçük kalıntı sağlamıştır.

Şekil 3 ve 4'ten  $t > 0$  °C bölgesi için maksimum kalıntı değerinin 2. dereceden polinom için 30 m $\Omega$ , 3. dereceden polinom için 20 m $\Omega$  mertebelerinde olduğu görülmüştür. Bu bölgede elde edilebilen minimum kalıntı değerleri, 2. derece polinom için 5 m $\Omega$ , 3. derece polinom için 2 m $\Omega$  mertebelerindedir. 13 kalibrasyon sonucu için eğri uydurmanın standart sapma değeri, maksimum kalıntı için 6,8 m $\Omega$ , minimum kalıntı için 2,3 m $\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5 ve 6 incelendiğinde tüm ölçümlerin yapıldığı tüm sıcaklık bölgesi için, maksimum kalıntı değerleri, 2. derece polinom için 110 m $\Omega$ , 3. derece polinom için 80 m $\Omega$ , 4. derece polinom için 75 m $\Omega$ , CVD eşitliği için 90 m $\Omega$  mertebelerindedir. Minimum kalıntı değerlerinin, 2. derece polinom için 8 m $\Omega$ , 3. derece polinom ve CVD için 2 m $\Omega$ , 4. derece polinom için 1 m $\Omega$  mertebelerindedir. Sadece 3 ve 4. dereceli polinomlar dikkate alındığında 13 kalibrasyon sonucu için eğri uydurmanın standart sapma değeri, maksimum kalıntı için 6,7 m $\Omega$ , minimum kalıntı için 0,5 m $\Omega$  olarak hesaplanmıştır.

$t < 0$  °C,  $t > 0$  °C ve  $t_1 < 0$  °C  $< t_2$  ölçüm bölgelerindeki sonuçların birbirleri ile karşılaştırmaları dikkate alınır, PRT'lerin sıcaklık-direnç ilişkilerinin belirlenmesinde,  $t < 0$  °C ve  $t > 0$  °C bölgeleri için ayrı polinom kullanılması, eğri uydurma sonuçlarında  $t_1 < 0$  °C  $< t_2$  bölgesinden elde edilen değerlere göre daha küçük kalıntı değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Nominal direnç değerleri aynı olan her bir PRT genel olarak benzer davranış gösterse de kalıntı analizinin yapılması kalibrasyon ölçüm belirsizlik değerlendirmelerine katkı sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] LOS, J.M., "The Calibration of Platinum Resistance Thermometers in the Temperature Range 11 K to 90 K", Canadian Journal of Physics Vol. 29, pp 142-150.
- [2] MOISEEVA, N. P., "Individual Calibration Of Resistance Thermometers for Measuring Temperature Difference", Measurement Techniques, Vol. 53, No. 9, 2010.
- [3] VAN DUSEN, M. S., "Platinum-Resistance Thermometry at Low Temperatures", <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01679a007>
- [4] FERNICOLA, V. C., "Approximating the ITS-90 Temperature Scale with Industrial Platinum Resistance Thermometers", Int J Thermophys (2008) 29:1817–1827 DOI 10.1007/s10765-008-0463-4
- [5] YANG, I., "Interpolating Equation Of Industrial Platinum Resistance Thermometers in The Temperature Range Between 0 °C And 500 °C", Meas. Sci. Technol. 26 (2015) 035104 (7pp), doi:10.1088/0957-0233/26/3/035104.
- [6] BOJKOVSKI, J., "Practical Limits of Measurement Uncertainties in Calibration of Standard Platinum Resistance Thermometers by Comparison", XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, September 6-11, 2019.
- [7] RIBERIO, A. S., "Uncertainty Evaluation and Validation of a Comparison Methodology to Perform In-house Calibration of Platinum Resistance Thermometers using a Monte Carlo Method", Int J Thermophys (2008) 29:902–914. DOI 10.1007/s10765-008-0409-x
- [8] Zand, M., "A New Experimental Procedure for Estimating and Predicting of a Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT) Lifetime in a Case Study", 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 2011.
- [9] BS EN 60751, "Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors", 2008
- [10] ASTM E644-11, "Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers", 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

### Eyüp BİLGİÇ

1966 yılı Ankara doğumludur. 1988 yılında Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Mühendislik Bölümünü bitirmiştir. 1993 yılında Anadolu Üniversitesi'nden Bilim Uzmanı (Yüksek Lisans), 2005 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden Doktor ünvanı almıştır. 1991 yılından itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Akustik Laboratuvarında çalışmaktadır. Halen Akustik Laboratuvarı sorumlusu, TÜRKAK akreditasyon faaliyetlerinde Baş denetçi, teknik alanda denetçi olarak görev yapmaktadır.

### Murat KALEMCI

1972 yılı İzmir doğumludur. Bornova Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra girdiği Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nden 1996 yılında mezun olmuştur. 1996 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü'nden Bilim Uzmanı (Yüksek Lisans), 2011 yılında ise Yeditepe Üniversitesi'nden Doktor ünvanı almıştır. 1998 yılından itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Sıcaklık Laboratuvarında çalışmaktadır. 2011 yılından bu yana Sıcaklık Laboratuvarı sorumlusu olup TÜBİTAK UME'nin EURAMET TC-T ve BIPM CCT nezdinde temsilcisi yapmaktadır. Ayrıca TÜRKAK akreditasyon faaliyetlerinde denetçi olarak görev yapmaktadır.

### Mücahit KORKMAZ

1994 yılı Manisa doğumludur. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Akhisar Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Programcılığı Bölümünden 2014 yılında mezun olmuştur. 2014 yılında Vestel Beyaz Eşya A.Ş. Test ve Ar-Ge Laboratuvarı'nda test teknikeri olarak göreve başlamıştır. 2017 yılı Ocak ayından itibaren UME Sıcaklık Laboratuvarında teknisyen olarak görev yapmaktadır.

**Melda PATAN ALPER**

1981 yılı İstanbul doğumludur. 2004 yılında Yeditepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü, 2007 yılında Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Yüksek Lisansını, 2019 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında doktorasını tamamlamıştır. 2004-2006 yılları arasında Simkal Kalibrasyon Merkezinde Sıcaklık Kalibrasyon Laboratuvarı sorumlusu ve kalite yönetim sistemi vekili olarak görev almıştır. 2006 yılından bu yana Yeditepe Üniversitesi Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı kalite sistem yöneticisi, sıcaklık kalibrasyon laboratuvarı sorumlusu, Fizik Bölümü öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2008 yılından buyana TÜRKAK sıcaklık kalibrasyonları alanı denetçisi ve 2014 yılı itibarı ile başdenetçi olarak görevini sürdürmektedir.

**Mehmet K. TORUN**

1976 yılı İstanbul doğumludur. 2001 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri bölümünü, 2006 yılında Yeditepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansını ve 2017 yılında Yeditepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Doktorasını tamamlamıştır. 2007 yılından 2011 yılına kadar Yeditepe Üniversitesi Metroloji ve Kalibrasyon laboratuvarı Kalite Sistem Yönetici vekili, 2007 yılından günümüze Yeditepe Üniversitesi Fizik Bölümü PHYS 102, PHYS 308 ve PHYS 319 derslerinin laboratuvar sorumlusu, 2011 yılından 2017 yılına kadar Yeditepe Üniversitesi Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı Sıcaklık Laboratuvar yardımcısı ve 2018 yılından günümüze Boyut Laboratuvar sorumlusu olarak görevini sürdürmektedir.

**Ahmet T. İNCE**

1962 yılı Zira-Sivas doğumludur. 1992 yılında, İngiltere, Manchester Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, Enstrümantasyon ve Analitik Bilim bölümünden (DIAS-UMIST) doktorasını almıştır. 1992-1994 yılları arasında doktora sonrası çalışmalarında Londra Üniversitesinde devam etmiştir. 1993-1998 yılları arasında TÜBİTAK UME' de Fizik grup Başkanı ve Sıcaklık Laboratuvarı sorumlusu olarak çalışmıştır. 1997 yılında Doçentlik ve 2002 yılında da Profesörlük ünvanını almıştır. 1998 yılında Yeditepe Üniversitesi Fizik Bölüm Başkanı olarak çalışmaya başlamıştır. 2002-2005 yılları arası Yeditepe Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Dekan yardımcılığı görevini yapmıştır. 2005 yılından bu yana ise aynı fakültenin dekanlık görevini sürdürmektedir. 2016-2018 yılları arasında Yeditepe Üniversitesi Rektör Yardımcılığı görevinde bulunmuştur. 2012 yılından bu yana TÜBİTAK-UME Sıcaklık laboratuvarının danışmanlığını yapmaktadır. Ayrıca, TÜRKAK denetçisi, Baş Denetçisi olarak görev almakta olup, yaklaşık 8 yıl TÜRKAK Sektör Komitesi Başkanlığı yapmıştır.