

# UME KIBBLE BALANS ÖLÇÜM KONSEPTİ

**Hacı AHMEDOV**  
**Beste KORUTLU**

## ÖZET

20 Mayıs 2019 tarihi itibarıyla kilogram biriminin yeni tanımı yürürlüğe girmiştir. Bu yeni tanımda kilogram el yapımı bir nesne olan Uluslararası Kilogram Prototipi (IPK) yerine, evrensel bir sabit olan Planck sabiti kullanılarak gerçekleştirilecektir. Dünya çapında bu kapsamda yürütülen çalışmalara TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), mekanik gücün elektriksel güce eşitlenmesi prensibine dayanan UME Salımlı Mıknatıs Kibble Balans Deneyi ile katkı sağlamaktadır. 2014 yılının ikinci yarısında başlatılan projede, dinamik tabanlı yeni bir ölçüm konsepti geliştirilmiştir. Bu çalışmada, Dünya'nın önde gelen metroloji enstitülerinin elde ettiği belirsizlik değerlerine çok daha kısa zaman içerisinde ve daha düşük maliyetle ulaşılmasına olanak sağlayan bu dinamik ölçüm konsepti, bu konseptin elektrik, yer değiştirme ve dış manyetik alan ölçümlerinde nasıl uygulandığı açıklanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Kilogram, Kibble Balans, Dinamik Ölçüm Konsepti.

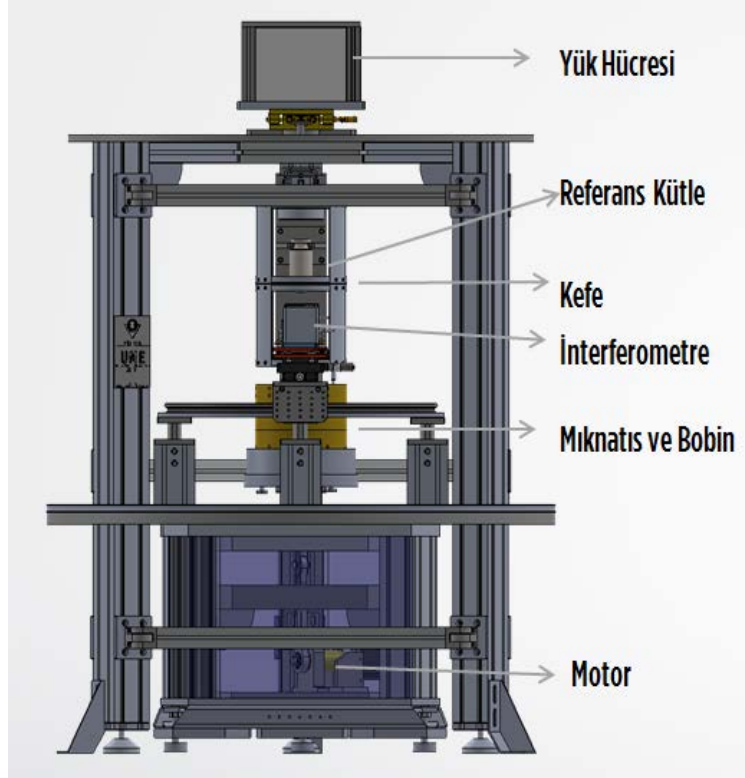
## ABSTRACT

The new definition of kilogram came into force in May 20<sup>th</sup>, 2019. In this new definition, kilogram will be realized by Planck constant, a universal constant, instead of an artifact, the International Prototype of Kilogram (IPK). TÜBİTAK National Metrology Institute (UME) makes contribution to the ongoing worldwide research with the UME Oscillating Magnet Kibble Balance Experiment where the electrical power is equated to the mechanical one. A dynamical measurement procedure has been developed within the scope of the project, initiated in the second half of 2014. In this study, the dynamical measurement procedure and the application of the procedure on electrical, displacement and external magnetic field measurements are explained which makes it possible to reach the uncertainties achieved by the leading metrology institutes in a shorter span of time and with less owing cost.

**Key Words:** Kilogram; Kibble Balance, Dynamical Measurement Concept.

## 1. GİRİŞ

16 Kasım 2018 tarihinde, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nun (BIPM) ev sahipliğinde, Fransa'nın Versailles kentinde gerçekleştirilen 26. Ağırlıklar ve Ölçüler Genel Konferansı'nda (CGPM), kütle birimi kilogramın tanımında radikal bir değişikliğe gidilmesi kararı, 57 ülkeden temsilcinin katılımıyla gerçekleşen oylamayla kabul edildi. 20 Mayıs 2019 tarihinde yürürlüğe giren bu yeni tanımda, Uluslararası Birim Sistemi (SI) kilogram biriminin gerçekleştirilmesinde son 130 yıldır kullanımda olan platin ve iridyumdan alaşımından silindirik yapıda üretilmiş Uluslararası Kilogram Prototipi (IPK) yerini, evrensel bir sabit olan Planck sabitine bıraktı. Dünyanın önde gelen metroloji enstitülerinde bu kapsamda sürdürülen çalışmalara TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Salımlı Mıknatıs Kibble Balans Deneyi ile katkı sağlamaktadır. Deney düzeneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. UME Salınlı Mıknatıs Kibble Balans Deney Düzeneği.

Kilogram biriminin elektronik olarak Planck sabiti cinsinden istenilen belirsizliklerde tanımlanmasına olanak sağlayan Kibble Balans prensibi mekanik gücün elektriksel güce eşitlenmesini temel alır [1]. Bu eşitlik Faraday Endüksiyon Yasası ve Amper Kuvvet Yasasının birlikte çözülmesinden elde edilir. Kilogram birimi ile Planck sabiti arasındaki ilişki ise elektriksel gücün makroskopik kuantum etkiler olan Josephson Etkisi [2] ve Kuantum Hall Etkisi [3] kullanılarak ölçülmesiyle sağlanır. Dünyanın önde gelen metroloji enstitülerinde farklı geometriler ve farklı ölçüm yöntemleri kullanılarak oluşturulan Kibble Balans deneylerinde  $2 \times 10^{-8}$  hedef bağıl belirsizlik değerine ulaşmanın mümkün olduğu görülmüştür. UME Salınlı Mıknatıs Kibble Balans deneyi için dinamik tabanlı yeni bir ölçüm konsepti geliştirilmiştir [4-6]. Bu sistemin ve geliştirilen ölçüm konseptinin sunduğu avantajlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- **Tek fazda ölçüm:** Geleneksel Kibble Balans deneylerinde iki ayrı fazda test edilen Faraday Endüksiyon Yasası ve Amper Kuvvet Yasası, UME Salınlı Mıknatıs Kibble Balans deneyi için geliştirilen dinamik ölçüm konsepti yardımıyla eş zamanlı olarak test edilebilir. Böylece iki deney fazı arasında ortam şartlarında oluşabilecek olası değişimlere bağımlılık ve maliyeti oldukça yüksek olan sıcaklık kontrollü kabinlere ihtiyaç ortadan kalkar. Eş zamanlı ölçümün sunduğu bir avantaj da iki deney fazı arasındaki uyumu yakalamak için oldukça karmaşık hale gelen mekanik yapının sade bir şekilde tasarlanmasına olanak sağlamasıdır.
- **Kompakt Yapı:** Geleneksel Kibble Balans deneylerinde sabit hızla hareket eden bobin kullanılmaktadır. UME Kibble Balans deneyinde bunun yerine salınım hareketi yapan mıknatıs kullanımı ısı değişimlerine duyarlılığını azaltır. Bu da mıknatıs devresinin ve dolayısıyla tüm deney düzeneğinin ebatlarının küçültülmesine ve maliyetin düşmesine olanak sağlamaktadır.
- **Kompakt Vakum:** Geleneksel sistemlerde optik ölçümlerin gereken hassasiyetlerde yapılabilmesi için bütün deney düzeneğinin vakum altına alınması ihtiyacı, salınlı mıknatıs tasarımıyla ortadan kalkar. Bu tasarımda optik ölçümler hava kırılma endeksinin sabit tutulduğu kompakt bir vakum yardımıyla yapılabilir. Kütle ölçümlerinde vakum kullanılmıyor olması ek bir avantaj daha sağlamaktadır. Çünkü standart kütle yüzeyinde vakum-hava geçişleri sırasında oluşan kontaminasyon toplam belirsizliği arttırmaktadır.

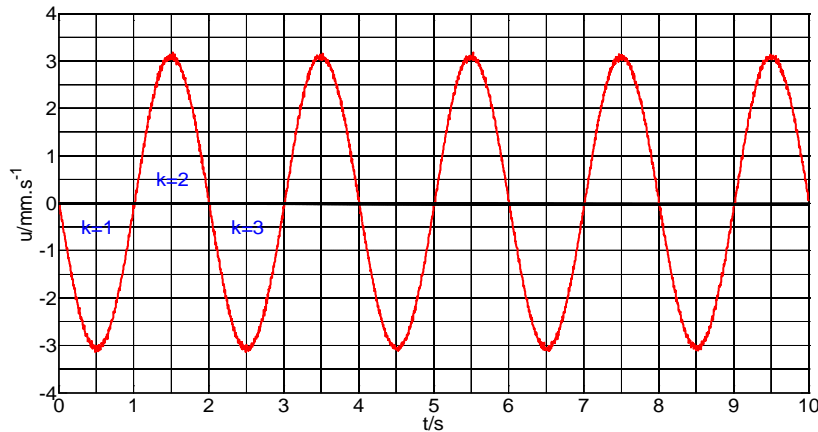
Bunların dışında, Faraday Endüksiyon ve Amper Kuvvet Yasalarının tek fazda test edilebiliyor olması elektrik ölçümlerini kompleks hale getirmektedir. İlaveten, hareketli mıknatıs devresi tasarımı, Faraday Endüksiyon ve Amper Kuvvet yasalarına dış manyetik alan kaynaklı bir asimetri getirir [7, 8]. Bunlar sistemin dezavantajları olarak sayılabilir. Fakat dinamik ölçüm konseptinin uygulanmasıyla elde edilen avantajların, dezavantajlara kıyasla üstünlüğü hedeflenen belirsizliklere, kısa zamanda ulaşılmasıyla gösterilmiştir. Aşağıda UME Kibble Balans Deneyi için geliştirilmiş dinamik ölçüm konsepti ve uygulamalarına yer verilmiştir.

## 2. DİNAMİK ÖLÇÜM KONSEPTİ

UME Kibble Balans sisteminde hareketsiz bir bobin etrafında yerçekimi ivmesi yönünde salınımlı hareket yapan bir mıknatıs devresi yer almaktadır. Detaylar için bkz. [4-6]. Böyle bir sistemde, Amper Kuvvet Yasası ve Faraday Endüksiyon Yasası'nın ortak çözümü Kibble Balans denklemini verir.

$$\frac{h}{h_c} V(t) J(t) = F(t) u(t) \quad (1)$$

Burada  $V(t)$  bobinin uçlarındaki gerilim,  $J(t)$  bobinin üzerinden geçen DC akım,  $F(t)$  bobin üzerinde oluşan Lorentz kuvveti,  $u(t)$  ise mıknatısın bobine göre bağıl hızıdır. Denklemin sol tarafında görülen  $h/h_c$  oranı ( $h_c$  Planck sabitinin mutabakat değeri,  $h$  Planck sabitinin gerçek değeridir), gerilim ve direnç ölçümlerinde kullanılan Josephson sabiti ( $K_J=2e/h_c$ ) ve Klitzing sabitinin ( $R_K=h_c/e^2$ ) Planck sabitinin mutabakat değeriyle tanımlanmasından kaynaklanır. Mıknatısın zamana göre salınımlı hareketi sebebiyle (1) eşitliğinde görülen dinamik parametrelerin ölçümü için dinamik ölçüm konsepti geliştirilmiştir. Şekil 2'de mıknatısın bobine göre bağıl hız grafiği verilmiştir.



**Şekil 2.** Mıknatısın bobine göre bağıl hız grafiği. Yarı çevrimler her bir yarı çevrim  $k$ 'ya atanan değerler ile belirtilmiştir.

Ölçüm konseptinin adımları aşağıda verilmiştir.

- 1) Ölçülen fiziksel büyüklüklerin statik (ortalama değer) ve dinamik (ortalama değerden sapma) özellikleri ayrıştırılır. Herhangi bir  $p$  dinamik parametre için, ortalama değerden sapma

$$\Delta p = p - \langle p \rangle \quad (2)$$

ile bulunur. Burada  $\langle p \rangle$ ,  $p$  dinamik parametresi için  $\tau$  integrasyon zamanı süresince elde edilen ortalama değerdir. İntegrasyon zamanı  $\tau=NT$ , salınım periyodu  $T$ 'nin  $N$  tam katı olacak şekilde seçilmiştir.

- 2) İntegrasyon zamanını,  $2N$  adet yarı çevrime bölünür. Şekil 2'de her bir yarı çevrim,  $k$ 'ya atanan değerler ile belirtilmiştir. Yarı çevrimlerin başlangıç koşulları mıknatısın bağıl hızının ortalama değerden sapsmasının sıfıra en yakın olduğu değer olarak seçilir.
- 3) Dinamik parametrenin  $k$  yarı çevrimindeki ortalaması

$$\langle p \rangle_k = \frac{2}{T} \int_{t_k}^{t_{k+1}} p(t) dt \quad (3)$$

ile hesaplanır.

- 4)  $p$  dinamik parametresinin  $u$  mıknatıs bağıl hızının  $2N$  yarı çevrimleri üzerinden ortalaması

$$\{p | u\} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^{2N} \frac{\langle \Delta p \rangle_k}{\langle \Delta u \rangle_k} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır. Mıknatıs bağıl hızının minimum değerleri, Faraday geriliminin minimum değerleri ile çakışır. Bu sebeple  $p$  dinamik değeri için (4) eşitliğinde verilen ortalama alma prosedürü,  $\{p|V\}$  şeklinde  $V$  Faraday geriliminin  $2N$  yarı çevrimleri üzerinden de alınabilir.

- 5) Bütün bu bilgiler ışığında eşitlik (1)

$$\frac{h}{h_c} = \frac{\langle F \rangle}{\langle J \rangle} Q \{u | V\} \quad (5)$$

olarak yeniden düzenlenir. Burada  $Q$  manyetik devrenin homojen olmayan etkileri, bobinin kusurları, ısı etkileri ve lineer olmayan etkileri barındırır.

## 2.1. Elektrik Ölçümleri

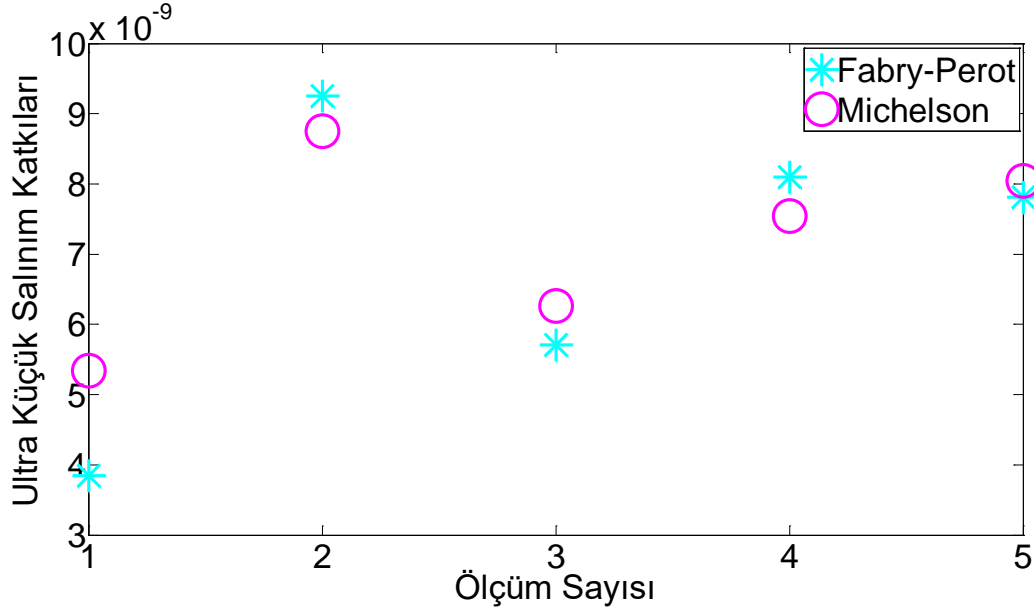
Yukarıda da belirtildiği üzere, UME Salınımlı Mıknatıs Kibble Balans deney düzeneğini geleneksel Kibble Balans sistemlerinden ayıran en belirgin özellik mıknatıs devresi hareketi sebebiyle bobinin uçlarında indüklenen AC Faraday geriliminin ve akım kaynağıyla bobinin üzerinden geçirilen DC akımın eş zamanlı ölçülebilmesidir. Bobinin çıkış gerilimi, AC Faraday gerilimi ve DC akımdan kaynaklı ohmik gerilimin toplamıdır. Faraday gerilimi AC, ohmik gerilimin ise DC olduğundan bu iki gerilimin birbirinden yüksek doğrulukta ayırt edilmesi mümkündür [5].

Josephson gerilim standardı kullanarak HP 3458 sayısal voltmetrenin dinamik kalibrasyonu yapılmıştır ve Faraday gerilimi ölçümlerinde  $3 \times 10^{-7}$  doğruluk elde edilmiştir. [6]. Kilogram'ın yeni tanımının istenilen belirsizliklerde ( $2 \times 10^{-8}$ ) gerçekleştirilebilmesi için Josephson gerilim standardının ölçüm sistemine entegre edilmesi gerekmektedir. Faraday gerilim ölçümleri, Josephson kare sinyali kullanılarak fark alma yöntemiyle gerçekleştirilir. Fizibilite çalışmaları bu tür ölçümlerde 4 ppb doğruluk elde edilebildiğini göstermiştir. [9, 10]. Akım ölçümleri bobine seri bağlı, iki adet paralel Tinsley 5658A  $100 \Omega$  standart direnç üzerinden DC gerilim ölçülerek yapılır. DC gerilim ölçümlerinde, Josephson gerilim kaynağı kullanarak 2 ppb doğruluk elde edilmesi mümkündür [11].

## 2.2. Optik Ölçümler

UME Salınımlı Mıknatıs Kibble Balans sistemi için geliştirilmiş olan dinamik ölçüm konsepti, yer değiştirme ölçümlerini gerçekleştirirken, çevresel faktörleri elimine etmek için ekstra önlemler almaya ihtiyaç kalmadan, ticari ürün şeklinde minyatür boyutlarda üretilmiş Michelson Enterferometre kullanımına olanak sağlamaktadır. Bunun temel sebebi, dinamik ölçüm konseptinin, sistemin çalışma frekansından daha düşük frekanslarda kendini gösteren ısı değişimleri ya da titreşim etkileri gibi parazitsel etkileri elimine etmesidir. UME Kibble Balans deneyinde mıknatısın bobine göre yer değiştirme ölçümlerinde SIOS AE SP 2000E Michelson Enterferometre (MI) kullanılmıştır. Cihazın

çözünürlüğünden kaynaklı belirsizlik katkısının belirlenebilmesi için, ultra küçük genlikli salınım hareketi yapan piezoelektrik güç çeviriciye (PZT) bağlı, sırt sırta yapıştırılmış iki ayna üzerinde, MI ile eş zamanlı olacak şekilde, UME yapımı Fabry-Perot Enterferometre (FPI) ile ölçümler alınmıştır. PZT salınım frekansı, UME Kibble Balans mıknatıs salınım frekansı olan 1 Hz değerine, salınım genliği ise, firmanın MI çözünürlüğü olarak beyan ettiği değer olan 10 pm değerine ayarlanmıştır. Şekil 3'te MI ve FPI ile ölçülen ultra küçük salınımların Planck sabiti oranına katkıları 500 s süren 5 ölçüm seti için verilmiştir. Dinamik ölçüm konsepti kullanıldığında, katkıların kilogram biriminin gerçekleştirilmesi için hedeflenen bağıl belirsizlikten ( $2 \times 10^{-8}$ ) daha düşük olduğu görülmektedir [12].



**Şekil 3.** MI (mor halka) ve FPI (cam göbeği yıldız) ile ultra küçük salınımlar için gerçekleştirilen yer değiştirme ölçümlerinin  $h_c/h$  oranına katkıları.

### 2.3. Dış Manyetik Alan Ölçümleri

Dış manyetik alan Faraday Endüksiyon Yasası ve Amper Kuvvet Yasası arasında bir asimetri yaratır. Mıknatıs devresi ferromanyetik malzemeden üretilmiştir. Dolayısıyla dış manyetik alanı ekranlar. Dolayısıyla, dış manyetik alan Amper Kuvvet Yasasına katkı vermez. Diğer taraftan, dış manyetik alanın mıknatıs devresi üzerinde oluşturduğu magnetizasyon sebebiyle, hareketli mıknatıs devresi bobinin uçlarında ek Faraday gerilimi oluşturur. Hareketli mıknatıs devresi kullanarak kilogram biriminin yeniden tanımlanması Joule Balans sistemi ile katkı veren Çin Ulusal Metroloji Enstitüsü NIM bu sorunu kompensasyon bobini kullanarak çözmüştür [13]. UME Kibble Balans sisteminde ise, ticari Bartington tek eksenli, dikey komponent fluxgate gradiometre ve dinamik ölçüm konsepti kullanarak farklı bir çözüm getirilmiştir [7, 8].

## SONUÇ

UME Salınımlı Mıknatıs Kibble Balans deneyi için geliştirilmiş olan dinamik ölçüm konsepti, sistemin salınım frekansından daha düşük frekanslarda kendini gösteren ısı değişimleri ya da titreşim etkileri gibi parazitsel etkileri elimine eder. Mekanik sistemin daha sade bir yapıda imalatına izin veren bu durum sayesinde kilogram biriminin yeni tanımında daha düşük maliyetlerde ve daha kompakt sistemler kullanılabilir. Bu avantajlar, dünyanın önde gelen metroloji enstitülerinin ulaştığı belirsizlik seviyelerine çok daha kısa zaman zarfı içerisinde ulaşılmasına olanak sağlamıştır. Gerçekleştirilen optik ve elektrik ölçümlerde elde edilen 5 ppb civarındaki belirsizlikler, konseptin kilogram biriminin yeni tanımında uygulanabilirliğini göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] KIBBLE, B. P., "Feasibility study for a moving coil apparatus to relate the electrical and mechanical SI units", Technical Report DES, vol. 40, NPL, 1977.
- [2] JOSEPHSON, B. D., "Possible new effects in superconductive tunnelling", Phys. Lett. 1, 251-3, 1962.
- [3] von KLITZING K., DORDA G., PEPPER M. "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance", Phys. Rev. Lett. 45, 494-7, 1980.
- [4] Ahmedov, H., "An Oscillating magnet watt balance", CPEM 2016 Conf. Digest, 2016.
- [5] AHMEDOV, H., BABAYİĞİT AŞKIN, N., KORUTLU, B., ORHAN, R., "Preliminary Planck constant measurements via UME oscillating - magnet Kibble balance", Metrologia 55, 326, 2018.
- [6] AHMEDOV, H., KORUTLU, B., Orhan, R., "Optimization Procedure for Faraday's Voltage in UME Kibble Balance", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1-4, 2019.
- [7] AHMEDOV, H., KORUTLU, B., DOROSINSKIY, L., ORHAN, R., "Measurement Procedure for External Magnetic Field in UME Kibble Balance", accepted as poster presentation in 24th IMEKO TC4 International Symposium, 2019.
- [8] AHMEDOV, H., KORUTLU, B., DOROSINSKIY, L., ORHAN, R., "External Magnetic Field in UME Oscillating Magnet Kibble Balance", Digest 2018 Conf. on Precision Electromagnetic Measurements (Paris, France), 2018.
- [9] ORHAN, R., AHMEDOV, H., KORUTLU, B., "Kibble Balans Kuantum Ölçümleri", Ölçübilim Sempozyumu ve Sergisi / 20-22 Kasım 2019.
- [10] AHMEDOV, H., "Recent Developments in UME Kibble balance" 17th CCM meeting, 2019.
- [11] ROBINSON, I., "Towards the redefinition of the kilogram: A measurement of the Planck constant using the NPL Mark II watt balance", Metrologia 49(1):113, 2011.
- [12] AHMEDOV, H., ÇELİK, M., ORHAN, R., KORUTLU, B., HAMİD, R., ŞAHİN, E., "Displacement Measurements in UME Oscillating-Magnet Kibble Balance", accepted as oral presentation in 24th IMEKO TC4 International Symposium, 2019.
- [13] ZHANG, Z., ve diğerleri., "Coils and the Electromagnet Used in the Joule Balance at the NIM", IEEE Trans. Instrum. Meas., 64, 1539 – 1545, 2015.

## ÖZGEÇMİŞ

### Hacı AHMEDOV

Hacı AHMEDOV 1971 yılında Bakü, Azerbaycan'da doğdu. Yüksek Lisans derecesini 1994 yılında Moskova Rusya'da bulunan Moscow State Üniversitesi Fizik Bölümü'nden, Doktora derecesini 1998 yılında Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü'nden aldı. 1998 – 2012 yılları arasında TÜBİTAK Feza Gürsey Enstitüsü'nde uzman araştırmacı olarak çalıştı. 2014 yılından beri başuzman araştırmacı olarak çalıştığı TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'nde fikir öncüsü olduğu Kibble Balans projesini koordine etmektedir. Plazma Metrolojisi ve Uygulamaları Projesi'nin de yürütücüsüdür. Elektrodinamik Laboratuvarı'nın sorumlusudur. Uluslararası hakemli dergilerde, ulusal ve uluslararası konferanslarda 40 üzerinde bilimsel makale ve bildirisi vardır. Araştırma konuları, kuantum alan teorisi, matematiksel fizik, genel rölativite, kuantum metroloji ve matematiksel istatistiktir. 2003 yılında TÜBA, GEBİP üstün başarılı genç bilim insanı ödülüne layık görüldü.

### Beste KORUTLU

Beste Korutlu, 1982 yılında Eskişehir'de doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Fizik Bölümü'nden yüksek lisans derecesini 2007 yılında tamamlayarak mezun oldu. Doktora derecesini 2012 yılında Montreal, Kanada'da bulunan Concordia Üniversitesi Fizik Bölümü'nden aldı. 2006-2009 yılları arasında Çankaya Üniversitesi, Matematik ve Bilgisayar Bölümü'nde uzman olarak görev yaptı. 2009-2012 yılları arasında Concordia Üniversitesi Fizik Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2013-2015 yılları arasında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde doktora sonrası araştırmacı olarak çalıştı. 2015 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'nde uzman araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Elektrodinamik Laboratuvarı Laboratuvar Sorumlusu Vekilidir. Araştırma konuları

standart model ötesi fenomenoloji odaklı teorik yüksek enerji fiziği, kütle metrolojisi ve kuantum metrolojidir. Uluslararası hakemli dergilerde, ulusal ve uluslararası konferanslarda 20 üzerinde makale ve bildirinin yazarıdır. 2012 yılında Concordia Accelerator Ödülüne layık görüldü. TÜBİTAK 2232 - Yurda Dönüş Araştırma Burs Programı kapsamında finanse edilen İki Higgs Dublet Modeli'nde Vektör Benzeri Fermiyonlar (Proje No: 113C002) başlıklı projenin yürütücülüğünü yaptı.