

UME KIBBLE BALANS KUANTUM ÖLÇÜMLERİ

Recep ORHAN
Hacı AHMEDOV
Beste KORUTLU

ÖZET

UME Kibble Balans ölçüm yaklaşımında, Faraday Endüksiyon Yasası ve Amper Kuvvet Yasası eş zamanlı gerçekleştirilmektedir. Bunlar; mıknatıs devresinin merkezinde yer alan bobinde, mıknatısın salınımlı hareketi ile indüklenen AC Faraday gerilimi ve elektromanyetik kuvvet oluşturmak için bobinin üzerinden geçen DC akımdır. Elektrik ölçümlerinde 10^{-9} mertebesinde bağıl belirsizliğe ulaşılabilmesi için proje kapsamında dinamik tabanlı yeni ölçüm tekniği geliştirilmektedir. Bu iki büyüklüğün, Kuantum Hall Etkisi ile kalibre edilmiş standart dirençler kullanılarak ve iki adet 10 V Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı ile diferansiyel örnekleme tekniğiyle ölçülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, bir adet Programlanabilir Josephson Gerilim (PJGS) sistemi kurulmuştur ve ikinci sistemin kurulum aşaması devam etmektedir. Bu bildirinin amacı UME Kibble Balans dinamik (AC) elektriksel ölçüm tekniklerinin özetlenmesidir.

Anahtar Kelimeler: Kibble Balans, Elektrik Kuantum Standartları.

ABSTRACT

In UME Kibble Balance measurement approach, Faraday Law of Induction and Ampere's Force Law are realized simultaneously. These are; AC Faraday voltage induced by oscillating motion of the magnet in the coil located at the center of the magnet circuit and DC current passing through the coil to generate electromagnetic force. A new dynamic-based measurement technique is being developed within the scope of the project in order to achieve relative uncertainty about 10^{-9} in electrical measurements. It is aimed to measure these two quantities by using standard resistors calibrated with Quantum Hall Effect and differential sampling technique with two 10 V Programmable Josephson Voltage Standards (PJVS). To this end, one PJVS system has been installed and the installation phase of the second one system is in progress. The purpose of this paper is to summarize the UME Kibble Balance dynamic (AC) electrical measurement techniques.

Key Words: Kibble Balance, Electrical Quantum Standards.

1. GİRİŞ

16 Kasım 2018 tarihinde gerçekleştirilen oylamada, kütle birimi kilogramın izlenebilirliğinin, BIPM'de (International Bureau of Weights and Measures) muhafaza edilen Uluslararası Kilogram Standardı'ndan (IPK) Planck sabitine aktarımı oy birliği ile kabul edilmiştir. 20 Mayıs 2019 tarihinden itibaren yeni tanım yürürlüktedir. Makroskopik kütleyi Planck sabitine bağlamakta kullanılan yöntemlerden biri, mekanik gücün, mıknatıs içinde bulunan, mıknatısa göre bağıl hareketi olan ve içinden akım geçen bobin üzerindeki elektromanyetik güce eşitlenmesi prensibine dayanan Kibble Balans sistemleridir. Geleneksel Kibble Balanslarda, bobin üzerinden geçen akım ölçümü ve bobinin hareketi dolayısıyla oluşan Faraday gerilimini sırasıyla tartım ve hareketli faz olarak adlandırılan iki fazda peş peşe ölçmektedir [1]. Bu sistemler, ölçümler farklı zamanlarda alındığı için ortam koşullarına daha hassastır. UME'de geliştirilen Kibble Balans sisteminde ise bobin sabit, mıknatıs hareketlidir ve

mıknatısın salınımı sinüzoidaldir. Böylelikle akım ölçümleri ile Faraday gerilim ölçümleri aynı anda yapılabilmektedir ve bu durum mekanik sistemin kurulumunda birçok avantaj sağlamaktadır [2-5]. UME Kibble Balans deney düzeneğinin en önemli avantajlarından biri, sinüzoidal hareket sebebiyle endüklenen gerilimin AC formda olması ve bu sayede akım ölçümlerinde karşılaşılan DC gerilimle aynı anda ölçüme izin vermesidir. Böylelikle, Faraday Endüksiyon Yasası ve Amper Kuvvet Yasası eş zamanlı olarak test edilebilmektedir. Ölçüm konseptinin avantajlarının yanı sıra, veri analizinde de AC gerilim ve hızın yarım periyot integralleri oranlandığı için manyetik alan ve sıcaklık değişimlerinin sonuca etkisi bastırılmaktadır. Bu sayede mıknatıs ve mekanik sistem daha küçük boyutlarda tasarlanabilmektedir. Sistemin fizibilitesi, kuantum gerilim standartları yerine, yüksek doğruluklu örnekleyiciler ile yapılmış ve 0.3 ppm kararlılık gözlenmiştir. Kuantum standartlarının entegrasyonu tamamlandığında, birkaç ppb doğruluk seviyesi hedeflenmektedir.

2. UME KIBBLE BALANS GERİLİM ÖLÇÜM PROSEDÜRÜ

Kibble Balans ölçüm prosedürü aşağıdaki gibi formülize edilebilir.

$$\frac{h}{h_c} = \frac{\langle F \rangle}{\langle J \rangle} Q \{u | V\} \quad (1)$$

Planck Sabiti, bu denklemde elektrik ölçümlerin Josephson etkisi ve Kuantum Hall etkisine dayanması sebebiyle arka planda kendini göstermektedir. h_c değeri BIPM üye ülkelerinin mutabakatıyla belirlenen Planck sabiti değeridir, h ise deneyin sonucunda elde edilen gerçek Planck sabitidir. Bobinden akan akımın J ve bobinde oluşan lorentz kuvvetinin F ölçüm esnasındaki ortalama değerleri $\langle J \rangle$ ve $\langle F \rangle$ ile gösterilmiştir. Kibble Balans sistemlerinde Lorentz kuvveti test kütleyi yer çekim kuvveti ile dengelenmektedir. Q faktörü manyetik alan ve bobin geometrisine, ısı etkilerine ve diğer doğrusal olmayan etkilere bağlı bir parametredir. Dik yönde hareket eden mıknatısın hızı u ve bu süreçte bobinde oluşan gerilim ise V ile gösterilmiştir.

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

Burada $\Delta u = u - \langle u \rangle$ hız parametresinin ortalama değerinden sapmasıdır. $\langle u \rangle$ hızın bütün ölçüm süresi için ortalamasını temsil etmektedir. $k=1, \dots, 2N$ sinüzoidal hareketin yarı çevrimlerine karşılık gelmektedir. N ölçüm süresindeki toplam periyot sayısıdır. Hem hız hem de Faraday gerilimi tekrarlanabilir sinüs davranışı göstermektedir.

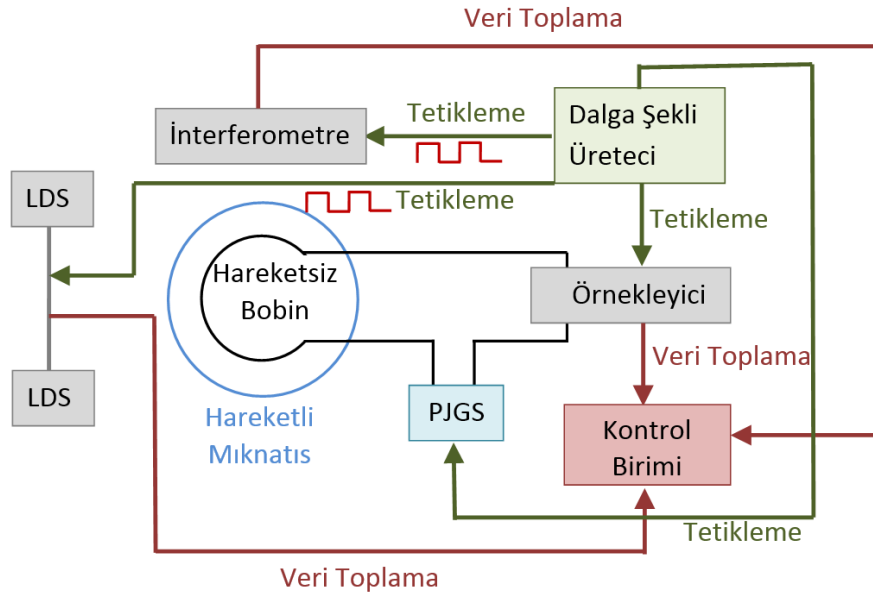
Bu çalışmada Faraday geriliminin ölçüm belirsizliği ele alınacaktır. Bütün diğer büyüklüklerin ideal ölçüldüğü varsayılarak

$$\frac{h_m}{h} = \{V_m | V\} \quad (3)$$

eşitliği elde edilir. Burada h_m ve V_m ölçülen değerler, h ve V gerçek büyüklüklerdir. Referans işaret V için Josephson 1 Hz 1000 adımlı merdiven adım sinüzoidal yaklaşımı kullanılarak Keysight 3458A sayısal multimetrenin dinamik kalibrasyonu yapılmıştır. Bu kalibrasyon sonucunda 3×10^{-7} belirsizlik elde edilmiştir [4-5]. Dolayısıyla, kilogramın gerçekleştirilmesi hedefine ulaşılabilmesi için Josephson gerilim kaynağının ölçüm sitemine entegrasyonu gerekmektedir. 3. Bölüm'de diferansiyel ölçüm deney düzeneği açıklanmıştır. Diferansiyel ölçüm verilerinin analizi 4. Bölüm'de verilmiştir.

3. FARADAY GERİLİMİ ÖLÇÜM DENEY DÜZENEGİ

Şekil 1'de Faraday gerilimi ölçüm düzeneği görülmektedir. Keysight 33512B, dalga şekli üretici cihazların senkronizasyonunu sağlamak için kullanılmaktadır. Bobinin bağlı hızını ölçmek için kullanılan Michelson interferometresinin modeli SIOS AE SP 2000E'dir, her konum örneği Faraday gerilimi ve lazer yerdeğiştirme sensörleri örnekleriyle eş zamanlı alınmaktadır. Keyence LK-HD500 lazer yerdeğiştirme sensörü, mıknatısın yanıl hareketlerini ölçmek için kullanılmaktadır. Faraday gerilimi ve PJGS'nin fark geriliminin örneklenmesinde ise PXI-5922 $\Sigma\Delta$ ADC kullanılmıştır. Faraday gerilimi ölçümleri, PJGS ve Faraday geriliminin senkronlanarak farklarının ölçülmesi prensibine dayanır. Faraday geriliminin frekans ve genlik parametrelerinin kontrolünün çözünürlüğü oldukça düşüktür, ayrıca faz kontrolü imkanı yoktur. Bu sebeple Faraday gerilimi referans işaret olarak alınmıştır ve PJGS dalga şekli üretici yardımıyla Faraday gerilimine senkronlanmıştır.

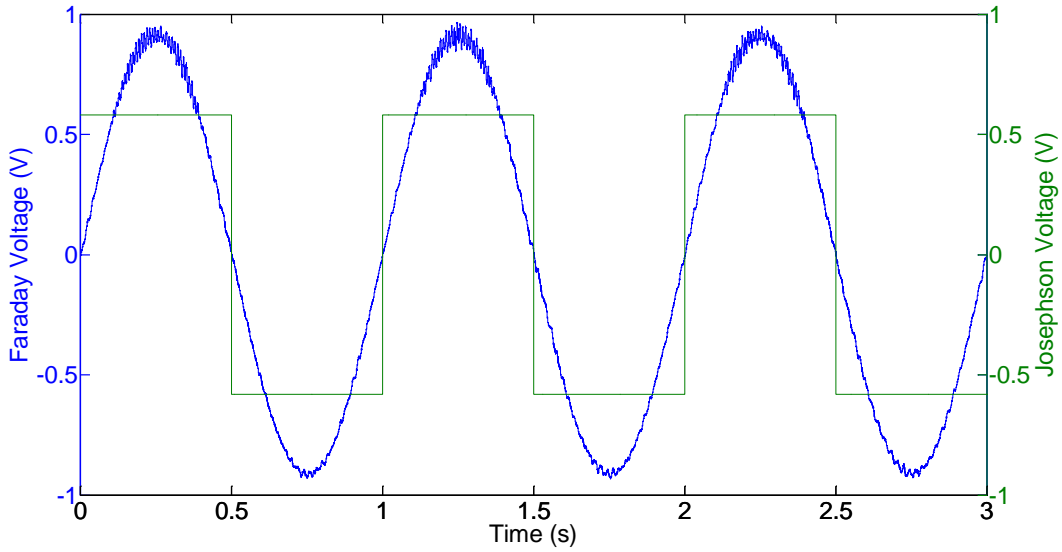


Şekil 1: Faraday gerilim ölçüm şeması

TÜBİTAK UME'de Programlanabilir Josephson Gerilim Standartları (PJGS), Kibble Balans proje çerçevesinde kurulmuştur [6]. PJGS çipi ikilik sistemde, toplam 18 segment olarak düzenlenen eklemlerden oluşmaktadır. SNS teknolojisi ile Supracon firması tarafından üretilen çip, 10 V'a kadar 145 μV çözünürlükle gerilim üretebilmektedir. Çip, mikrodalga gücün iletilmesini sağlayan dalga kılavuzunu ve bias akımını ileten telleri içeren bir probun ucuna monte edilmiştir. Prop, çipin süper iletken faza geçebilmesi için 4,2 K sıcaklığında olan sıvı helyuma daldırılmıştır. Çipin kuantum doğruluğunda gerilim üretebilmesi için, çipe yaklaşık 80 mW gücünde ve 69-71 GHz aralığında belirli bir frekansta RF uygulanması gerekmektedir. Ayrıca, yüksek frekans doğruluğu için RF kaynağın 10 MHz referansının Rubidyum standardına kilitlemesi gerekmektedir. Yine çipten kuantum doğruluğunda gerilim elde edilebilmesi için bias akım kaynağından uygulanan akımın her segment için belirli aralıklarda olması gerekmektedir. Sabit gerilim değeri veren akım platosu Shapiro adımı olarak adlandırılmaktadır. Belirli kuantum gerilim seviyesi elde etmek için aktif segmentler belirlenir ve bu segmentlere Shapiro adımlarının merkezine denk gelen akımlar verilir. PJGS'nin düzgün çalışabilmesi için bias akım kaynağının şebekeden izole olması gerekmektedir. Bu sebeple bias source 12 V'luk akü ile beslenmiştir. Ayrıca dalga üreticinin PJGS için ürettiği tetikleme sinyali optik olarak izole edilmiştir. Bu sayede PJGS şebekeden tamamen izole durumda çalışmaktadır. Fark gerilimi elde edebilmek için örnekleyici de şebekeden izole edilerek 12 V'luk akü ile beslenmiştir, yine PJGS ile aynı şekilde dalga üreticiden gelen tetikleme ve saat sinyalleri optik olarak izole edilmiştir.

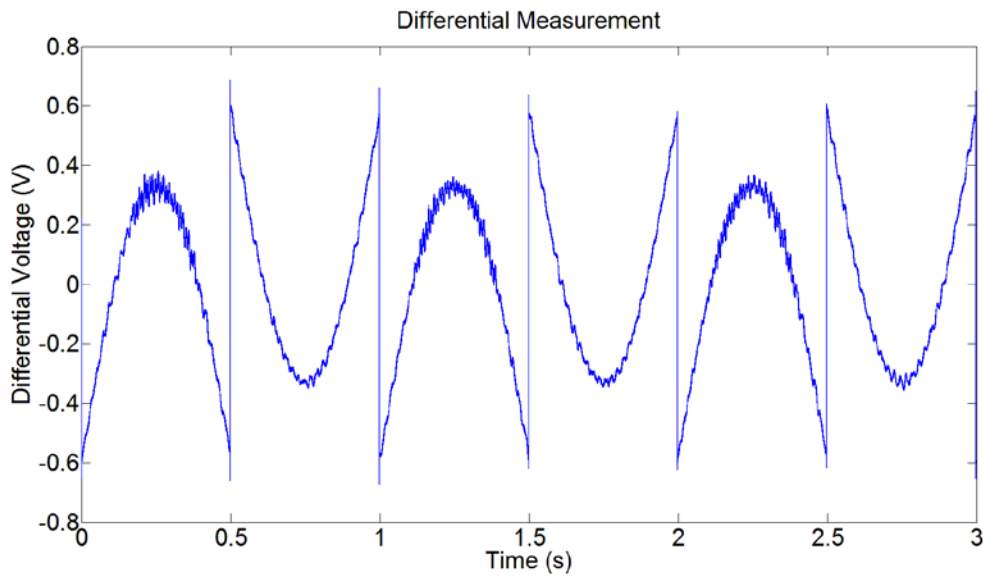
4. VERİLER VE ANALİZ

Klasik kuantum gerilim ölçümlerinde, PJGS çıkış gerilimi çok sayıda adıma sahip merdiven sinüs olarak ayarlanır. Ardından ölçülecek olan gerilimle senkronlanarak fark gerilimi ölçülür ve işaret tekrar oluşturularak parametreleri belirlenir. UME Kibble Balans sisteminde, klasik kuantum ölçümlerinden farklı olarak önemli olan Faraday geriliminin yarım periyot integralidir. Bu yüzden, PJGS ile yarım periyot integrali Faraday geriliminin yarım periyot integraline denk gelecek kare işaret üretmek yeterli olacaktır. Şekil 2'de Faraday gerilimi V_m ve Josephson gerilimi V_j verilmiştir. Bu grafik nominal 1 Hz mıknatis hareket frekansı için senkronizasyonu göstermektedir. Faraday geriliminin frekansı, motorun nominal 1 Hz değeri için 1.001088 Hz olarak bulunmuştur. Gerilimin genliğinin ise 0.91408978 V olduğu sinüs uydurma algoritması [7] ile bulunmuştur. PJGS gerilim adımlarının her biri rastgele dalga üretici ile tetiklenmektedir. Bu yüzden örnekleyici ile tam senkronizasyon için, örnekleyicinin 10 MHz saat girişi dalga üreticinin saatine kilitlemiştir.



Şekil 2: Faraday gerilimi (mavi) ve Josephson gerilimi (yeşil).

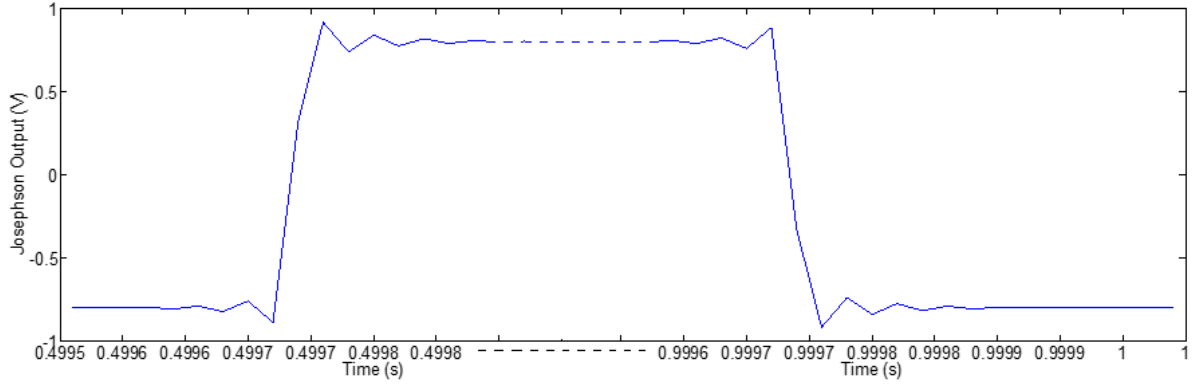
Diferansiyel ölçümlerde Faraday gerilimi ve Josephson standardı ile üretilen gerilim arasındaki fark $V_d=V_m-V_j$ örnekleyici ile ölçülür. Şekil 3'te ise fark gerilimi örneklenmiştir.



Şekil 3: Fark gerilimi.

Şekil 2 ve 3'te örnekleme frekansı 50 kHz olarak seçilmiş ve 600 saniyelik ölçüm alınmıştır. Ardından, ölçüm 60'ar saniyelik 10 sete bölünmüş ve her set için dört parametrelilik sinüs uydurma algoritması uygulanarak Faraday geriliminin frekansı, fazı, genlik ve sabit değer parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerin kararlılığı bu 10 sete göre değerlendirilmiştir. Nominal 1 Hz salınım frekansında kararlılığın 0,5 ppm'den daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca aralarında bir hafta olan ölçümler değerlendirildiğinde, frekans kaymasının ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Frekansın yanında genlik kararlılığı da analiz edilmiş, aynı gün alınan ölçümlerde ortalama değerden sapmanın 50 μV 'un altında olduğu gözlenmiştir. Bu değer, PJGS'nin çözünürlüğünün altında olduğu için, sinüs algoritması ile belirlenmiş olan PJGS parametrelerinin ölçüm esnasında değiştirilmesine gerek olmadığı anlaşılmıştır. Bu şekilde, diferansiyel ölçümler için gerekli olan temel koşullar sağlanmıştır.

PJGS'nin ürettiği kuantum gerilim seviyesi değişimlerinde görülen geçişlerde gerilim değerleri hesaplanabilir değildir. Bu yüzden klasik AC gerilim ölçümlerinde geçiş zamanına denk gelen örnekler silinir. UME Kibble Balans gerilim ölçüm analizi, gerilimin yarım periyodunun entegraline dayandığı için, geçiş bölgelerinin ortalamaya katkısı incelenmiştir. PJGS çıkışı 1,6 V_{p-p} genliğe ve 1 Hz frekansa sahip kare sinyal üretecek şekilde ayarlanmıştır. Çıkış gerilimi 600 sn boyunca PXI-5922 ile 50 kHz örnekleme frekansı ile örneklenmiştir. Ardından ölçüm 60 saniyelik 10 set olacak şekilde parçalanmıştır. Şekil 4'te Josephson kare sinyalinin 1 periyodu gösterilmiştir.



Şekil 4: Josephson kare sinyalinin 1 periyodu.

Bu grafikte yükselen ve düşen kenarlar geçiş gerilimi (V_j^g), olarak tanımlanır ve bu bölgedeki gerilim kuantum doğruluğunda değildir. Kare sinyalin plato bölgesindeki gerilimi V_j^k ise kuantum tabanlıdır. Josephson sinyali bu iki gerilimin toplamı olarak $V_j = V_j^g + V_j^k$ şeklinde ifade edilebilir.

Bu bilgiler ışığında (3) eşitliği

$$\frac{h_m}{h} = \{V_j^k |V\} + \{V_j^g |V\} + \{V_d |V\} \quad (4)$$

şeklinde yazılır. Eşitlik (4) kullanılarak, Faraday gerilim ölçümlerinde oluşabilecek belirsizlik parametrelerini aşağıdaki şekilde sınıflandırabiliriz. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim belirsizliğe katkı vermez. İkinci ve üçüncü terimler ise sırasıyla geçiş bölgesinden kaynaklanan ve cihaz ölçüm kapasitesinden kaynaklanan belirsizlikleri içermektedir. Yapılan deneylerde ikinci terimin büyüklüğü 1×10^{-5} civarında elde edilmiştir. Bu sinyalin tekrarlanabilirliği ise 4 ppb civarındadır. Dolayısıyla, geçiş bölgesinin karakterizasyonu yapılarak bu terimden kaynaklanan belirsizlik katkısı için 4 ppb değeri kullanılabilir. Yapılan ölçümlerde üçüncü terimin $\{V_d/V\}$ büyüklüğünün 1×10^{-4} 'ten daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Gerilim ölçümlerindeki belirsizliğin 3 ppb altında tutulması için örnekleyici cihazın belirsizliğinin 30 ppm olması yeterli olacaktır. Sonuç olarak yapılan çalışmalarda Faraday gerilimi 4 ppb civarında belirsizlikle ölçülmesi mümkündür. Kilogram gerçekleştirme deneyleri için yeterli belirsizliğe ulaşılabilir.

5. SONUÇ

UME Kibble Balans Faraday gerilim ölçümü için kuantum ölçüm sistemi kurulmuştur. Dinamik ölçüm konsepti kullanılarak yapılan fizibilite çalışmaları, bu sistemle gerçekleştirilen elektrik ölçümlerinde 4 ppb'nin altında belirsizliklere ulaşılabileceğini göstermiştir. UME Kibble Balans sistemi kullanılarak kilogram biriminin gerçekleştirilmesi için gereken belirsizliklere ulaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ROBINSON, I. A., "The Kibble Balance and the Forthcoming Revision of the SI", *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. IEEE, 2018.
- [2] Ahmedov, H., "An Oscillating magnet watt balance", *CPEM 2016 Conf. Digest*, 2016.
- [3] AHMEDOV, H., BABAYİĞİT AŞKIN, N., KORUTLU, B., ORHAN, R., "Preliminary Planck constant measurements via UME oscillating - magnet Kibble balance", *Metrologia* 55, 326, 2018.
- [4] 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.
- [5] AHMEDOV, H., KORUTLU, B., Orhan, R., "Optimization Procedure for Faraday's Voltage in UME Kibble Balance." *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. IEEE, 2018.
- [6] ARİFOVIĆ, M., ORHAN, R., KANATOGLU, N., "10 V Programmable Josephson Voltage Standard Established in TÜBİTAK UME", *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*. IEEE, 2018.
- [7] 1057 - IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders, 1994.

ÖZGEÇMİŞ

Recep ORHAN

Recep Orhan 1988 yılında Bayburt'ta doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında TÜBİTAK BİLGEM UEKAE'de araştırmacı olarak işe başlamış, Mobil Verici Yön Tespit Sistemi (MobDF) Projesi'nde yazılım geliştirme ve sistem testlerinin gerçekleştirilmesinde görev almıştır. 2014 yılında UEKAE'den ayrılarak TÜBİTAK UME Gerilim Laboratuvarı'nda Araştırmacı olarak işe başlamıştır. Gerilim cihazları kalibrasyonu, otomatik kalibrasyon programları geliştirmenin yanı sıra Programlanabilir Josephson Gerilim Standardı sisteminin kurulumunda yer almış ve kontrol yazılımını geliştirmiştir. 2018 yılında Elektrodinamik Laboratuvarında göreve başlamış, Kibble Balans deneyine elektrik ölçüm sisteminin kurulumu, kontrol ve analiz yazılımları ile katkıda bulunmuştur. Çalışma alanları; kuantum gerilim standartları, işaret işleme ve ölçüm otomasyonudur. Üniversite giriş sınavında ilk yüz derecesi vardır.

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.