

Jeodezik Ölçmeler Kullanılarak Kablosuz Fark Eğim Ölçer Sisteminin Kalibrasyonu ve Doğrulanması

Ahmet USLU^{1*}, Eren GÜL², Ahmet ÇELİK³, Deniz KAPTAN⁴, Bahadır ÇOKÇETİN⁵, Okan ÜZER⁶

¹ Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0001-8745-423X

² Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-7574-8406

³ Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-6288-3182

⁴ Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-6055-5038

⁵ Enformatik Bölümü, Rektörlük, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0002-9652-9050

⁶ Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Tavşanlı Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, 43300, Kütahya, Türkiye. ORCID No: 0000-0003-2375-9207

* ahmet.uslu1@dpu.edu.tr

Özet – Mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) ivmeölçer tabanlı eğim ölçer, lineer ivmeyi, titreşimi ve oryantasyon açılarını ölçmek için oldukça gelişmiş ve yaygın kullanım alanına sahip bir teknolojidir. MEMS tabanlı eğimölçerler; dijital özellikleri, küçük boyutları, düşük ağırlıkları, uygun maliyetleri, yüksek doğrulukları ve düşük güç tüketimleri ile Endüstri 4.0'ın vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir. Bu çalışmada, fizik tedavi ve rehabilitasyon alanında kullanılmak üzere geliştirilen MEMS teknolojisiye dayalı ivmeölçerli bir eğimölçerin kalibrasyonunun yapılması, kalibrasyon işlemi sonrası önerilen tekniğin uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek için doğrulama deneylerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ivmelerden hesaplanan açısal değerler, jeodezik ölçmelerden elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Kalibrasyon için eğriye uydurma (curve fitting) yöntemi kullanılmıştır. Kalibrasyon sonucunda gerçek açıyla ölçülen açı arasındaki en küçük fark 0.012°, en yüksek fark ise 0.356° bulunmuştur. Eğim ölçerin ölçüm hatasını değerlendirmek için Karesel Ortalama Hata (KOH) istatistiki ölçüsü dikkate alınarak doğruluk analizi yapılmış ve KOH 0.163° olarak bulunmuştur. Sonuçlar, eğimölçerin yüksek hassasiyette ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Çalışma MEMS tabanlı eğim ölçerlerin kalibrasyonu ve doğrulama deneyleri üzerine çalışan araştırmacılara ulaşmayı hedeflemekte, sağlık hizmetlerinin önemli bir unsuru olan tıbbi cihazların temininde dışa bağımlılığın azaltılması, yerli ve milli üretimin desteklenmesi açısından referans oluşturabilecek bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada açıklanan yaklaşım, fizik tedavi ve teşhis işlemlerinin yanı sıra pratik mühendislikte yüksek doğruluk elde etmek için çok çeşitli alanlarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler – Fizik tedavi ve rahabilitasyon, Biyomedikal, Eğim ölçer, Jeodezik ölçmeler, Kalibrasyon, Doğrulama

I. GİRİŞ

Mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) ivmeölçer tabanlı eğim ölçer, lineer ivmeyi, titreşimi ve özellikle oryantasyon açılarını ölçmek için oldukça gelişmiş bir teknolojidir ([1]). Bu eğimölçerler; dijital özellikleri, küçük boyutları,

düşük ağırlıkları, uygun maliyetleri, yüksek doğrulukları ve düşük güç tüketimleri ile yaygın kullanım alanlarına sahiptirler ([2],[3]). Bu sensör tipi endüstri, makine, otomotiv, inşaat, jeoloji, jeofizik, askeri, spor bilimleri, ortopedi ve fizik tedavi gibi alanlarda bir eğim ölçer olarak Endüstri

4.0'da vazgeçilmez bir faktör haline gelmiştir ([4]). Düşük maliyetli MEMS ivmeölçer tabanlı eğimölçerler genellikle sensörden sensöre değişken aralıkta sistematik hatalar içermektedir ([5]). Bu nedenle eğimölçerlerin gerçek değerden ne kadar saptığını bulmak ve cihazın doğruluğunu iyileştirmek için bir kalibrasyon testinin yapılması gerekmektedir ([5]).

Literatürde MEMS ivmeölçer tabanlı eğimölçerlerin kalibrasyonu ve doğrulanması üzerine yapılan araştırmaların ana temaları aşağıda özetlenmiştir. Won ve Golnaraghi ([6]) araştırmalarında, yüksek doğrulukla çok basit bir prosedüre sahip, yeni bir üç eksenli ivmeölçer kalibrasyon yöntemini sunmuşlardır. Önerilen üç eksenli ivmeölçer kalibrasyon yöntemi, yerçekimi vektörünü ve kalibrasyon parametrelerinin matematiksel modelini kullanmaktadır. Bu yöntem, altı kalibrasyon parametresini tahmin etmek için yalnızca üç eksenli ivmeölçerin altı farklı eğim açısında sabit olmasını gerektirmekte ve eğim açıları hakkında herhangi bir bilgi gerektirmemektedir. Simülasyon ve deney sonuçları, ilk tahminlerin gerçek değerlere yakın olmamasına rağmen, kazanç faktörlerinin ve önyargıların ayrıldığını göstermiştir. Ayrıca sonuçlar, önerilen yöntemin kazanç faktörlerini ve yanlılıkları üç yineleme adımında tahmin edebildiğini göstermiştir. Ha vd. ([7]) araştırmalarında, MEMS teknolojisine dayalı ivmeölçerli bir eğimölçer ünitesi kullanılarak yapılara uygun bir izleme sistemi geliştirmişlerdir. Ayrıca, ölçüm verilerini bir eğim ölçerden kablosuz olarak aktarmak için kablosuz bir eğim ölçer sensör düğümü geliştirilmiştir. Araştırmada önerilen kablosuz MEMS tabanlı eğim ölçer sensör düğümünün güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini doğrulamak için bir eğim ölçüm deneyi yapılmıştır. Deneyisel sonuçlar, iki sistemin (kablolu ve kablosuz aktarım sistemleri) 1° 'den büyük bir eğim açısında hemen hemen aynı değerleri verdiğini ve eğim açısının 0.76% 'ına karşılık gelen 0.42° 'den küçük bir eğim açısında eşit bir fark gözlemlendiğini göstermiştir. Wang vd. ([8]), ultrason görüntülerinde kemer doğrusal toplama dönüşümü kullanılarak kas fasiküllerinin otomatik tespiti ve pennasyon açısının ölçümü için bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada, Belt Linear Summation (BLS) dönüşümü olarak adlandırılan yeni bir ayrık dönüşüm önerilmiştir. Önerilen yöntem hem bilgisayar simülasyonu hem de klinik veriler

kullanılarak doğrulanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin ham ultrason görüntülerinde fasiküllerin saptanması ve ölçülmesinde iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Jovanovic ve Enright ([9]), göksel seyrüsefer için geniş hareketli çift eksenli inklinometrelerin modellenmesi ve kalibrasyonu amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla ölçüleri elde etmek için MEMS ve elektrolitik sistem teknolojilerine dayalı eğim ölçerler kullanılmıştır. Çalışmada önerilen yöntem ile iki farklı eğim ölçer modellerinin başarıları test edilmiş ve doğrulanmıştır. Zhu vd. ([10]) araştırmalarında, ADXL355 tabanlı bir MEMS eğim ölçeri kalibre etmek için geliştirilmiş bir kalibrasyon tekniği önermişlerdir. Bu teknikte, göreceli açıları doğrudan kalibre etmek için yalnızca bir parametre içeren matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Ayrıca, parametre değerini elde etmek için görüntü işleme tabanlı bir yöntem tasarlamışlardır. Son olarak, önerilen tekniğin uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek için bir karşılaştırma deneyi ile diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

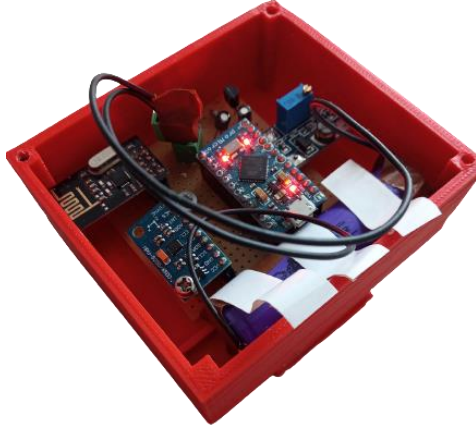
Bu çalışmada, fizik tedavi alanında kullanılmak üzere geliştirilen MEMS teknolojisine dayalı ivmeölçerli bir eğimölçerin kalibrasyonunun yapılması, kalibrasyon işlemi sonrası önerilen tekniğin uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek için doğrulama ve uygulama deneylerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ivmelerden hesaplanan açısal değerler, sensörünün sabitlendiği Nikon DTM 332 Total Station cihazı ile elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma MEMS tabanlı eğim ölçerlerin kalibrasyonu ve doğrulama deneyleri üzerinde çalışan araştırmacılara ulaşmayı hedeflemekte, tıbbi cihaz sektöründe dışa bağımlılığın azaltılması, yerli üretimin desteklenmesi ve geliştirilmesi açısından referans oluşturabilecek bir iş akışı sunmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Çalışmada Kullanılan Materyaller

Bu çalışmada, MEMS teknolojisi tabanlı ivmeölçer kullanan bir eğim ölçer benimsenmiştir. MEMS teknolojisi tabanlı ivmeölçer sensörü, statik ivmeyi ve yerçekiminden kaynaklanan ivmeyi ölçer. Bu durumda, statik ivme ile yerçekimi ivmesi arasındaki açı sensörün eğimine karşılık gelmektedir. Sistem parçadan meydana gelmektedir. Bunlar, 1 adet kablosuz eğim ölçen

devre ve 1 adet kablosuz alıcı devresidir. Eğim ölçen devrenin içerisinde ivmeölçer, mikrodenetleyici, kablosuz iletişim modülü ve batarya bulunmaktadır. Gösterge devresinde ise mikrodenetleyici, kablosuz iletişim modülü ve bilgisayar bağlantı arayüzü bulunmaktadır. Eğimi ölçer devresi Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Eğim ölçer devresi (121E424 nolu proje arşivi)

Şekil 1’de gösterilen devre sensörler yardımıyla eğimi ölçerek kablosuz olarak sinyal alıcı devreye göndermektedir. Bilgisayar sistemine entegre edilmiş sinyal alıcı devre yardımıyla ölçülen değerler kayıt altına alınmaktadır. USB veri yolu yardımıyla bilgisayar sistemine entegre edilmiş sinyal alıcı devre Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Bilgisayar sistemine entegre edilmiş sinyal alıcı devre (121E424 nolu proje arşivi)

Eğimölçerin doğruluğunu test etmek için Nikon DTM 332 Total Station cihazı kullanılmıştır (Şekil 3).



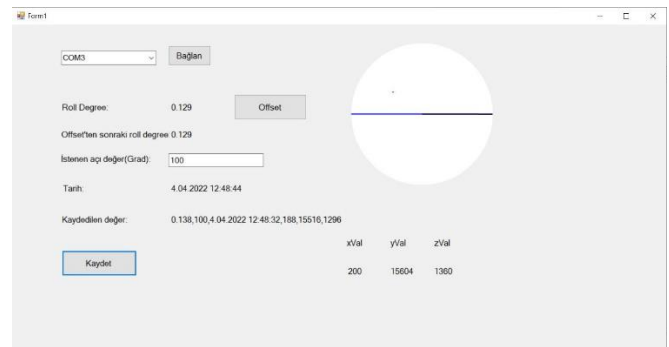
Şekil 3. Nikon DTM 332 Total Station cihazı

Nikon DTM 332 Total Station cihazının özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Nikon DTM 332 Total station cihazının özellikleri ([11])

Özellik	Değer
Boyutlar	168 x 173 x 335 mm
Ağırlık	5.3 kg
Maksimum Ölçüm Mesafesi	4000 m
Açı Ölçümünün Çözünürlüğü	0.0002°
Açı Ölçümünün Doğruluğu	±0.001°

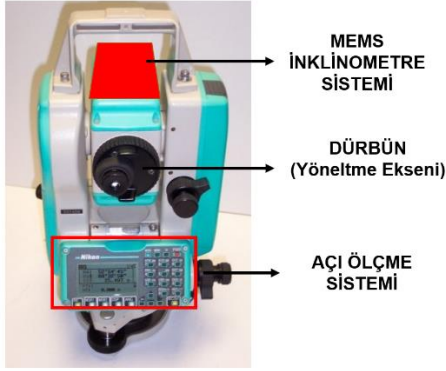
MEMS eğim ölçer cihazından ve Nikon DTM 332 Total Station cihazından alınan ölçümler C# programlama dilinde yazılan bir arayüz programında gösterilmektedir. Bu arayüz programı Şekil 4’te gösterilmektedir.



Şekil 4. Kullanıcı arayüz programı (121E424 nolu proje arşivi)

B. Çalışmanın Yöntemi

Çalışmanın yöntemi üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, ölçüm doğruluğunu geliştirmek için eğim ölçer kalibre edilmiştir. Şekil 5’te doğrulama deneyinin sistem mimarisi gösterilmektedir.

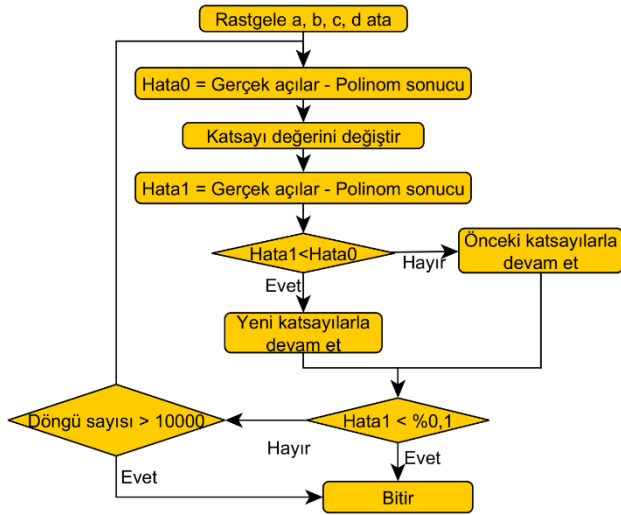


Şekil 5. Total Station ölçümleri ile sağlanan doğruluk kontrolü için sistem tasarımı

Kalibrasyon için eğriye uydurma (curve fitting) yöntemi kullanılmıştır. Eğri olarak 3. Dereceden bir polinom kullanılmıştır. Polinom denklem (1) ile verilmiştir.

$$y=ax^3+bx^2+cx+d \quad (1)$$

Denklem (1)'de x kalibre edilmemiş değeri, y ise kalibrasyondan sonraki değeri göstermektedir. Kalibrasyon için bir arama algoritması (search algorithm) kullanılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan arama algoritmasının akış diyagramı Şekil 6 ile verilmiştir.



Şekil 6. Arama algoritması akış diyagramı

İkinci bölümde, eğim ölçerin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini ve performansını analiz etmek için bir karşılaştırma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Son olarak üçüncü bölümde ise MEMS tabanlı eğim ölçerin doğruluk analizi yapılmıştır. Eğimölçerin doğruluğunu test etmek için ivmelerden hesaplanan açısal değerler, sensörünün

sabitlendiği Nikon DTM 332 Total Station cihazı ile elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. MEMS eğim ölçerin doğruluk analizi karesel ortalama hata (KOH) ile ifade edilmiştir. KOH, aynı bir büyüklüğün ölçülmesi sonucunda elde edilen hataların (V) karelerinin toplamının ([VV]), ölçü sayısının 1 eksiğine (n-1) bölünmesi ve karekökünün alınması ile hesaplanır.

$$m_0 = \sqrt{\frac{[VV]}{n-1}} \quad (2)$$

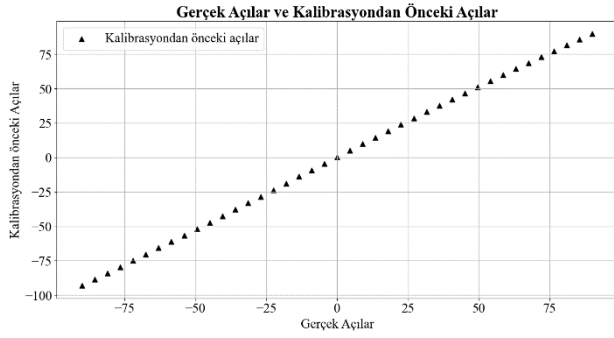
III. BULGULAR

Çalışmada eğimölçer ve Total Station ölçme yöntemleri eşzamanlı kullanılarak, eğim ölçerin kalibrasyonunu ve kalibrasyon işlemi sonrası önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için bir karşılaştırma deneyi gerçekleştirilmiştir. Doğrulama deneyi için öncelikle MEMS eğim ölçer, dürbünün üzerine yapılandırılmıştır (Şekil 5). Total station cihazı küresel ve silindirik düzeç ayarları ile Asal eksenin istasyon noktasından geçen düşey çekül doğrultusu üzerine getirilmiştir. Açı ölçüm sistemi, çözünürlüğü 0.0002° ve doğruluğu ±0.001° olan bir elektronik teodolitten oluşmaktadır. Açı ölçüm sisteminin ölçülen açısı referans göreli açıdır. Doğrulama deneyi, dürbün eğiminin -200° (-180°)'dan +200° (-180°)'a, 5° (4,5°)'lık sabit aralıklarla değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.



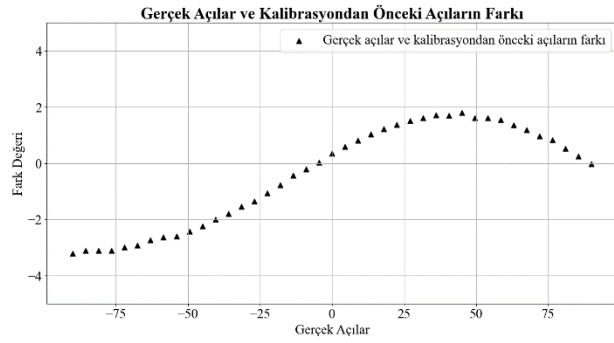
Şekil 6. Eğimölçer ve total station ölçme yöntemlerinin eşzamanlı kullanımı (121E424 nolu proje arşivi)

Şekil 4' te gösterilen arayüz programı aracılığıyla tüm ölçü değerleri ".txt" uzantılı dosyaya kaydedilmiştir. Gerçek açı değerleri ve kalibrasyondan önceki açı değerleri arasındaki farkı gösteren grafik Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Gerçek açılar ve kalibrasyondan önceki açılar grafiği

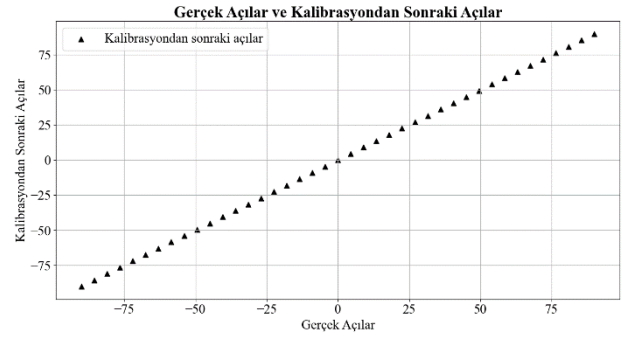
Şekil 7’de yatay eksen gerçek değerleri (Total Station Ölçümleri), üçgen noktalar ise geliştirilen kablosuz eğim ölçer cihazının kalibrasyondan önceki ölçüm değerlerini temsil etmektedir. Şekilde gerçek değerler ile geliştirilen cihazın ölçüm değerleri arasında farklar bulunmaktadır. Bu farkların ayrıntıları Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Gerçek açı ve kalibrasyondan önceki açılar arasındaki fark

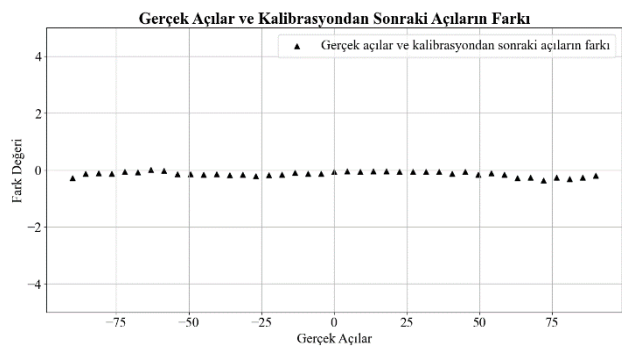
Şekil 8’de fark değerleri 0 değerinden oldukça çok sapmaktadır. Fark değeri en yüksek -3.2° değeri gelmiştir. Yani gerçek değer ile kalibrasyondan önceki değer arasındaki en yüksek fark 3.2°’dir. En küçük fark değeri ise 0.026°’dir.

Kalibrasyon için eğriye uydurma (curve fitting) yöntemi kullanılmıştır. Eğri olarak 3. Dereceden bir polinom kullanılmıştır. Kalibrasyon için bir arama algoritması (search algorithm) kullanılmıştır. Arama algoritması sonucu denklem (1) katsayıları; $a=4.1406 \times 10^{-6}$, $b=2.2255 \times 10^{-4}$, $c=0.9491$ ve $d=-0.3920$ olarak bulunmuştur. Gerçek açılar ve kalibrasyondan sonraki açıları gösteren grafik Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. Gerçek değer ve kalibrasyondan sonraki değerlerin grafiği

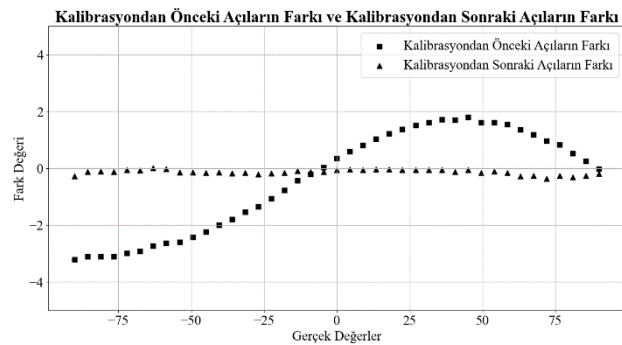
Şekil 9’da yatay eksen gerçek değerleri, üçgen noktalar kalibrasyondan sonraki değerleri temsil etmektedir. Şekilde görüleceği üzere gerçek değerler ve kalibrasyondan sonraki değerler arasında bir fark yoktur ve çizgiler üst üste gelmektedir. Bu farkların ayrıntıları Şekil 10’da gösterilmektedir.



Şekil 10. Gerçek açılar ile kalibrasyondan sonraki açılar arasındaki fark

Şekil 10’da tüm fark değerleri $\pm 0.5^\circ$ aralığındadır. En yüksek fark değeri 0.356°’dir. En küçük fark değeri ise 0.012°’dir. 0 değerinden sapmalar kalibrasyon öncesine göre oldukça küçüktür.

Şekil 11’de kalibrasyondan önceki açı farkları ve kalibrasyondan sonraki açı farklarını birlikte gösteren grafik gösterilmektedir.



Şekil 11. Kalibrasyondan önceki açı farkları ve kalibrasyondan sonraki açı farkları

Grafikler incelendiğinde gerçek değerler ile kalibrasyondan önceki değerler arasındaki farklar oldukça yüksektir. Ancak kalibrasyondan sonraki fark oldukça küçüktür. $3.2''$ 'den, $0.356''$ 'ye inen fark değeri için iyileşme değeri %89 olarak hesaplanmıştır.

Kalibrasyon işleminden sonra MEMS tabanlı eğim ölçerin doğruluk analizi yapılmıştır. Doğruluk analizi, dürbün eğiminin $-200''$ ($-180''$)'dan $+200''$ ($-180''$)'a, $5''$ ($4.5''$)'lık sabit aralıklarla değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. MEMS tabanlı eğim ölçerin doğruluk analizi (121E424 nolu proje arşivi)

MEMS tabanlı eğim ölçerde hesaplanan açısal değerler, sensörünün sabitlendiği Nikon DTM 332 cihazı ile elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Total Station cihazı ile ölçülen açısal değerler kesin değer olarak kabul edilmiştir. Eğim ölçer aracılığıyla elde edilen açısal değerlerden, total Station cihazı ile ölçülen açısal değerlerin farkları alınarak hata değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra ölçü hatalarının karesi ve ölçü sayısı dikkate alınarak Eşitlik 2 yardımıyla KOH $0.163''$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 1 'de doğruluk araştırmasına ilişkin sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2. MEMS eğim ölçerin doğruluk analizi sonuçları

n	(Vmin)	(Vort)	(Vmax)	[VV]	KOH (m0)
41	$0.012''$	$0.137''$	$0.356''$	1.063	$0.163''$

IV. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fizik tedavi ve rehabilitasyon alanında kullanılmak üzere geliştirilen MEMS teknolojisine dayalı ivmeölçerli bir eğimölçerin

kalibrasyonunun yapılması, kalibrasyon işlemi sonrası önerilen tekniğin uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmek için doğrulama deneylerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ivmelerden hesaplanan açısal değerler, jeodezik ölçmeler kullanılarak elde edilen referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre MEMS eğimölçerin eğriye uydurma (curve fitting) yöntemi ile kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonucunda gerçek açıyla ölçülen açı arasındaki en küçük fark $0.012''$, en yüksek fark ise $0.356''$ bulunmuştur. Daha sonra eğim ölçerin ölçüm hatasını değerlendirmek için Karesel Ortalama Hata (KOH) istatistiki ölçüsü dikkate alınarak doğruluk analizi yapılmış ve KOH $0.163''$ olarak bulunmuştur. Sonuçlar, eğimölçerin yüksek hassasiyette ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Çalışmada açıklanan yaklaşım, fizik tedavi ve teşhis işlemlerinin yanı sıra pratik mühendislikte yüksek doğruluk elde etmek için çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Ülkemizde İkili dijital kablosuz fark eğim ölçer cihazlarının yurt dışından temin edildiği ve fiyatlarının maliyetlerine oranla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Gelecekteki araştırmalarda yurt dışından temin edilen eğimölçerlere kıyasla daha uygun maliyetli, daha üstün özelliklerde yerli tasarım ve üretim cihaz geliştirilecektir. Bu sayede sağlık hizmetlerinin yerine getirilmesinde büyük yer tutan tıbbi cihazların üretiminde dışa bağımlılığın önüne geçilmesi, yerli ve milli üretimin desteklenmesi noktasında önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından desteklenen 121E424 nolu proje desteği ile yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Schopp, P., Graf, H., Burgard, W., & Manoli, Y. "Self-calibration of accelerometer arrays." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65.8, pp. 1913-1925, 2016.
- [2] Chae, Junseok, Haluk Kulah, and Khalil Najafi. "An in-plane high-sensitivity, low-noise micro-g silicon accelerometer with CMOS readout circuitry." *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 13.4 pp. 628-635, 2004.
- [3] Laine, Jerome, and Denis Mougenot. "Benefits of MEMS based seismic accelerometers for oil exploration." *TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State*

- Sensors, *Actuators and Microsystems Conference*. IEEE, 2007.
- [4] Hoang, M. L., Carratù, M., Paciello, V., & Pietrosanto, A. "A new Orientation Method for Inclinometer based on MEMS Accelerometer used in Industry 4.0." *2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Vol. 1. pp. 177-181, 2020.
- [5] Cina, Alberto, Ambrogio Maria Manzano, and Iosif Horea Bendea. "Improving GNSS landslide monitoring with the use of low-cost MEMS accelerometers." *Applied Sciences*, vol 9.23, pp. 5075, 2019.
- [6] Won, Seong-hoon Peter, and Farid Golnaraghi. "A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model." *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 59.8, pp. 2144-2153, 2009.
- [7] Ha, D. W., Park, H. S., Choi, S. W., & Kim, Y. "A wireless MEMS-based inclinometer sensor node for structural health monitoring." *Sensors*, vol. 13.12, pp. 16090-16104, 2013.
- [8] Wang, X., Zhao, F., Liu, C., Guo, F., & Guo, J. "Automatic Detection and Pennation Angle Measurement of Muscle Fascicles in Ultrasound Images Using Belt Linear Summation Transform." *IEEE Access* 7, pp.174391-174399, 2019.
- [9] Jovanovic, Ilija, and John Enright. "Modeling and calibration of wide range of motion biaxial inclinometers for celestial navigation." *2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. IEEE, 2020.
- [10] Zhu, J., Wang, W., Huang, S., & Ding, W. "An improved calibration technique for mems accelerometer-based inclinometers." *Sensors*, vol. 20.2 pp. 452, 2020.
- [11] Manual, Instruction. "Total Station DTM-302 Series." (2005).