

## GNSS Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması

Engin GÜLAL<sup>1</sup>, N. Onur AYKUT<sup>2</sup>, Burak AKPINAR<sup>2</sup>, S. Özgür UYGUR<sup>3</sup>

### Özet

Günümüzde GNSS kullanılarak yüksek doğrulukta hassas konumlama yapmak mümkün olmaktadır. Özellikle yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, ulusal ve uluslararası referans ağlarının konumlarının belirlenmesi, mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesinde hassas konumlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. GNSS ile yüksek doğruluk elde edebilmek ancak uygun ölçme yönteminin seçilmesi, hata kaynaklarının giderilmesi ve gözlemlerin uygun modeller yardımıyla değerlendirilmesi ile mümkün olmaktadır. Hassas konumlama için dikkate alınması gereken unsurlardan biri de anten faz merkezi değişimidir. Anten faz merkezi değişimi uygun kalibrasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmekte ve kullanıcıya sunulmaktadır. Bu çalışmada Yıldız Teknik Üniversitesi, Kalibrasyon Laboratuvarı kapsamında gerçekleştirilen anten faz merkezi ve değişiminin belirlenmesine yönelik olarak yapılan araştırmalar ile sonuçları sunulmaktadır.

### Anahtar Sözcükler

GNSS, Hassas konumlama, Anten Faz Merkezi, Kalibrasyon.

### Abstract

#### Research of Phase Center and Variations of the GNSS Antenna

Today it is possible to make positioning with high accuracy by using GNSS. Precise positioning is required especially for the national and international reference networks, monitoring crustal movements and deformation of the engineering structures. Getting high accuracy observations through GNSS is only possible by choosing the correct measuring method, eliminating the error sources and using the suited models for evaluating the observations. Another fact that should be considered for precise positioning is the antenna phase center variations. The antenna phase center variation is determined by using suitable calibration methods and delivered to the user. This labor includes the research and the results for defining the antenna phase center and determining it's variation scoped by Yıldız Technical University, Calibration Laboratory.

### Key Words

GNSS, Accurate positioning, Antenna Phase Center, Calibration.

### 1. Giriş

GPS'in ortaya çıkışı ve kullanım hikâyesi 35 yıla uzanmaktadır. Jeodezik amaçlı hassas konum belirleme çalışmaları ise 80'li yılların ortasından itibaren başarı ile gerçekleştirilmektedir. Bu zamandan günümüze GPS/GNSS sistemi teknik, yöntem ve gözlemlerin modellenmesindeki algoritmalar olarak sürekli geliştirildi ve hassaslaştırıldı. Örneğin santimetre doğruluğa ulaşabilmek için gerekli olan gözlem zamanı bazı uygulamalarda saatlerden birkaç dakikaya kadar indirildi. Uygun ölçme ve değerlendirme yöntemlerini kullanarak milimetreler mertebesinde hassas konum belirlemek sıradan uygulamalara dönüştü. Diğer taraftan iletişim tekniklerindeki gelişmeler ve veri iletişiminin ucuzlaması gerçek zamanlı konum belirleme çalışmalarının önünü açmıştır. Referans istasyonu ile gezici alıcı arasında mesafe kısıtlamasının olduğu klasik RTK uygulamaları, bu gelişmelerin ışığı altında yerini istasyonlar arasındaki mesafelerin yaklaşık 100km'ye dayandığı ağ RTK uygulamalarına bırakmıştır. Tüm dünyada ve ülkemizde TUSAGA-Aktif, İSKİ-UKBS gibi referans istasyon ağları kurulmaktadır. Uluslararası GNSS Servisi (IGS) global GNSS ağı global referans sisteminin tanımlanmasına katkıda bulunmakta ve hassas istasyon koordinatlarını ve uydu yörünge bilgilerini hesaplamaktadır. IGS ağı istasyon gözlemleri ve IGS ürünleri internet aracılığı ile tüm kullanıcılara ücretsiz olarak açıktır. Kıtalararası ve ulusal seviyede kurulan GNSS referans istasyonları ağları IGS ağına sıklaştırılması olarak da işlev kazanmakta ve global ve bölgesel jeodinamik araştırmalarda yerini almaktadır. Kabuk deformasyonlarının izlenmesinin yanında hassas konumlamamanın önem kazandığı alanlardan bir diğeri de mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesidir. Ulusal ve uluslararası referans istasyonları ile ağlarının konumlarının belirlenmesi, yer kabuğu hareketlerinin ve mühendislik yapılarının izlenmesi, hassas konumlamamanın öne çıktığı başlıklar olarak sıralayabiliriz. GNSS ile yüksek doğruluğa ulaşabilmesi ancak uygun ölçme yönteminin seçilmesi, hata kaynaklarının elimine edilmesi ve ölçülerin uygun modeller ile modellenmesi ile mümkün olmaktadır.

GNSS ile hassas konum belirlemede hata kaynakları, mesafeye bağımlı hatalar ve istasyon kaynaklı hatalar olmak üzere iki grupta toplanır. Mesafeye bağımlı hata kaynakları iyonosferik ve troposferik etki ile uydu yörünge hatasıdır. Ölçü yapılan istasyona bağlı olan hatalar ise çoklu yansıma hatası, anten faz merkezi değişimi ve ölçülerdeki gürültülerdir. Görüldüğü üzere anten faz merkezi ve değişiminin belirlenmesi hassas konum belirleme uygulamalarında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

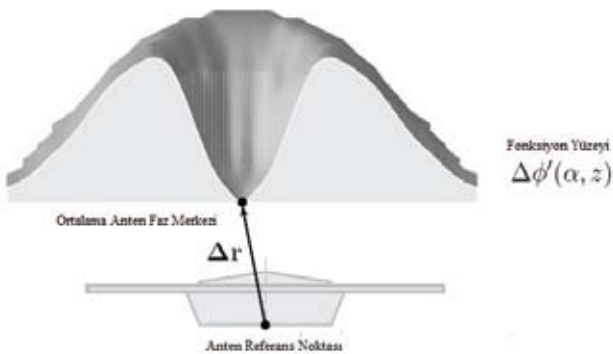
<sup>1</sup> Doç. Dr., <sup>2</sup> Arş. Gör. Dr. Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul

<sup>3</sup> Arş. Gör. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

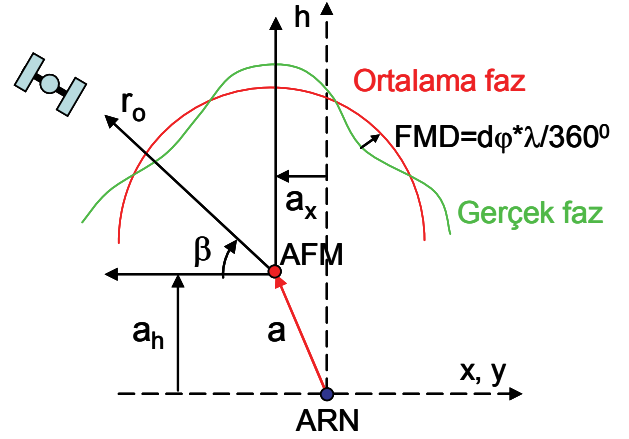
## 2. Faz Merkezi Ofseti ve Faz Merkezi Değişimi

GNSS antenlerinin faz merkezi fiziksel bir nokta değildir. Herhangi bir GNSS anteni için faz merkezi uydudan antene gelen sinyalin doğrultusu ile değişir. Anten kalibrasyonu ile anten referans noktasına göre elektriksel faz merkezi ve bu noktanın yükseklik ve azimuta bağımlı değişimi belirlenmektedir. Bir antende sadece bir mekanik anten referans noktası (ARN) tanımlanabildiği için anten yüksekliği gibi tüm merkezleştirme elemanları bu noktaya dayanmaktadır. Uluslararası GNSS Servisi tanımlamasına göre ARN aletin düşey ekseninde ve altında bulunmaktadır. Faz merkezi ofseti (FMO) olarak, anten referans noktası (ARN) ile anten faz merkezi (AFM) arasındaki vektör tanımlanır. Ortalama bir anten faz merkezine göre anten faz merkezi değişimleri  $L_1$  ve  $L_2$  sinyalleri için özdeş değildir. Ayrıca birçok istasyonda GNSS alıcı antenlerini yansıma ve çevresel etkilerden korumak için kullanılan radomların da anten faz merkezi değişimleri üzerinde etkisi bulunmaktadır (Şekil 1).

Anten faz merkezi ofseti ve faz merkezi değişimi gibi anten özelliklerinin değerlendirilmeye katılmaması özellikle hassas konum belirleme uygulamalarında yanıltıcı sonuçlara neden olabilir. Anten faz merkezi ofsetinin değerlendirmeye katılmaması çözüm sonuçlarını milimetre seviyesinde ve hatta özellikle yükseklik bileşeninde santimetre değerlerinde değiştirmektedir. Anten faz merkezi değişimi yükseklik açısına ve azimuta bağlı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Yükseklik açısına bağlı değişimin etkisi azimuta bağımlı bileşenden çok daha büyüktür. Aynı yapı elemanlarından oluştuğu kabul edilen aynı tip antenin kullanılması ve aynı yöne yönlendirilmeleri durumunda kısa baz mesafelerinde faz merkezi hatası elimine olmaktadır. Faz merkezi hatasının etkisi GNSS ölçülerinde farklı anten tiplerinin kullanılması ve antenlerin farklı yönlere yönlendirilmeleri durumunda ortaya çıkmaktadır. Uzun baz mesafelerinde yerin küreselliği nedeniyle antenlerin aynı yöne yönlendirilmeleri mümkün olmamaktadır, (GÜLAL vd. 2010).



Şekil 1: Azimut ve yükseklik açısına bağlı anten faz merkezi değişimi.



Şekil 2: Anten faz merkezi ofseti ve faz merkezi değişimi, (CAMPBELL vd. 2004).

a faz merkezi ofseti ve doğrultuya bağımlı faz merkezi hatasının ölçülen uzunluğa etkisi aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır: 
$$dr(\alpha, \beta) = a \cdot r_0 + \lambda \cdot d\phi(\alpha, \beta) \quad (1)$$

a = Anten referans merkezine göre faz merkezi öteleme vektörü

$r_0$  = Yükseklik açısı  $\beta$ , azimut açısı  $\alpha$  olan uydu yönündeki birim vektör

$d\phi(\alpha, \beta)$  = Doğrultuya bağlı faz merkezi değişimi

$\lambda$  = Sinyalin taşıyıcı dalga boyu

## 3. Kalibrasyon Yöntemleri

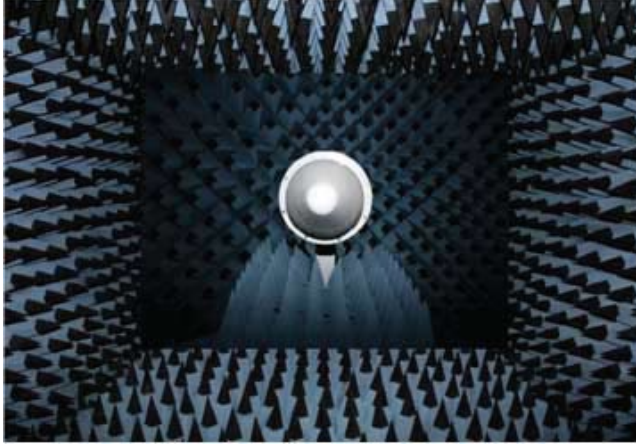
GNSS antenlerinin kalibrasyonu bağıl ve mutlak yöntemler olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bağıl GNSS anten kalibrasyonu arazide gerçekleştirilmekte olup daha önceden mutlak kalibrasyonu gerçekleştirilmiş olan bir referans antenine ihtiyaç duyulur. Bağıl kalibrasyonun temel prensibi koordinat değerleri olarak bilinen kısa bir bazı uzun süre ölçülmesine dayanmaktadır. Bazın bir noktasında referans anteni diğer ucunda kalibre edilecek anten bulunmaktadır. Baz mesafesinin kısa olması (birkaç metre) nedeniyle uydu yörünge hatası ile iyonosfer ve troposferin etkileri göz ardı edilebilecek kadar küçük olmaktadır. Bu yöntemde tüm uydu geçişlerinin gözlenmesi ve sinyal yansımasının etkisini büyük ölçüde elimine etmek için en az 24 saatlik uzun süreli gözlem yapılmaktadır. GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinden elde edilen değerler ile önceden hassas olarak belirlenmiş baz uzunluğu ve koordinat değerlerinden olan fark, bağıl faz merkezi hatası olarak kabul edilir. Farkların koordinat düzleminde alınması ile anten faz merkezi ofseti (FMO), gözlem düzleminde hesaplanması ile de faz merkezi değişimi (FMD) elde edilir.

Mutlak kalibrasyon referans antenine bağıl olmadan gerçekleştirilir. Mutlak kalibrasyon ekosuz odada ve robot yardımı ile arazide olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Robot yardımı ile gerçekleştirilen mutlak kalibrasyon yönteminin temel prensibi, istasyona bağımlı sinyal yansıması ve AFM hata bileşenlerinin etkilerini birbirinden ayırarak

sinyal yansıması hatasını elimine etmektir, (WUBBENA, G. vd. 2006).

Diğer bir mutlak kalibrasyon yöntemi ise laboratuvar ortamında ekosuz bir odada gerçekleştirilmektedir. Özel olarak tasarlanmış olan ekosuz odada GNSS sinyali yapay olarak

üretilmekte ve tam karşısında bulunan kalibre edilecek anten kaydırılarak ve döndürülerek ölçüler yapılmaktadır. Başlangıç konumuna göre olan farklardan ortalama anten faz merkezi elde edilir, (ZEIMETZ, P. vd. 2009).



Şekil 3: Ekosuz oda ve robot kalibrasyon ölçümleri.

#### 4. Yıldız Teknik Üniversitesi'nde Anten Kalibrasyonu

YTÜ Harita Mühendisliği Bölümü Ölçme Tekniği Anabilim Dalı bünyesinde faaliyet gösteren Kalibrasyon Laboratuvarında Elektronik Uzunluk Ölçer, Elektronik Takeometreler, Nivelolar ve GNSS Antenlerinin kontrol ve kalibrasyonu konularında çalışmalar yürütülmektedir.

GNSS antenlerinin kalibrasyonu ile ilgili olarak Davutpaşa Yerleşkesi İnşaat Fakültesi D blok üzerinde anten kalibrasyonu deney düzeneği kurulmuştur. Ölçme Tekniği Anabilim Dalına emeği geçen emekli öğretim üyeleri adına 5 adet metal pilye şeklinde sabit istasyon tesis edilmiştir. Bu istasyonlardan aralarındaki mesafe 5 metre olan GNSS ve UZEL istasyonları GNSS antenlerinin kalibrasyonunda kullanılmaktadır. GNSS istasyonu referans anten istasyonu, UZEL istasyonu ise kalibre edilecek antenlerin monte edildiği istasyondur. Bu iki istasyon arasındaki mesafe hassas elektronik uzunluk ölçerler ile ölçülmüş, koordinatları tekrarlı uzun süreli GNSS ölçülerinin değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Ayrıca pilyeler arasındaki yükseklik farkı hassas sayısal nivo ile belirlenmiştir.

Referans istasyonunda Dorne-Margolin elemanlı Ash-tech GNSS Choke Ring anten kullanılmaktadır. Referans anteninin mutlak kalibrasyonu Almanya'da Geo<sup>++</sup> firmasında robot ile gerçekleştirilerek kalibrasyon parametreleri mutlak olarak belirlenmiştir.

Üniversite bünyesinde bulunan 2005429663 seri numaralı Thales Z-MAX GNSS anteninin kurulan düzeneğe ile mutlak kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kalibrasyon parametrelerinin doğruluğunu test etmek için kalibrasyon prosedürü aynı seri numaralı anten ile 3 kez tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir kalibrasyon için prosedür, referans anteni sabit kalırken kalibre edilecek antenin 4 yönde (kuzey, doğu, güney ve batı) çevirerek 24 saatlik tekrarlı ölçülerin yapılmasıdır.



Şekil 4: GNSS kalibrasyon istasyonları

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta anten yüksekliklerinin en az 1mm hassasiyetle belirlenmesidir. Aynı marka farklı seri numaralı antenlerdeki parametre değişimlerini belirlemek için kalibrasyon prosedürü bir kez de yine üniversite bünyesinde bulunan 2004468661 seri numaralı Thales antenine uygulanmıştır.



Şekil 5: Anten kalibrasyonu



Tablo 1. Ölçüm bilgileri.

Ölçü No	Ölçü Tarihi	Alıcı Tipi	Alıcı Anten Tipi	Anten Seri Numarası
1	08.11.2010-12.11.2010	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
2	31.01.2011-04.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
3	08.02.2011-12.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
4	14.02.2011-18.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2004468661

Ölçülerin değerlendirilmesinde Dresden Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen Wasoft yazılımı kullanılmıştır. Wasoft yazılımı iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül olan Wa1, Rinex formatında olan tek ve çift frekanslı GNSS kod ve faz ölçülerini değerlendirerek baz çözümleri yapmaktadır. Wa1 dört gün tekrarlı olan 24 saatlik baz çözümlerini her bir gün için gerçekleştirmektedir. İlk adımda ölçülerdeki çoklu yansımalar ve gürültüler mümkün olduğunca elimine

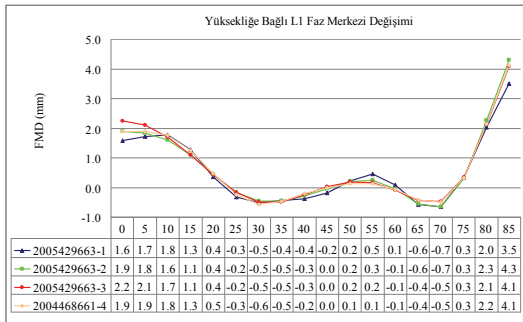
edilmektedir. İkinci modül Wa1ANT dört günlük ölçülerin değerlendirmesinden elde edilen sonuçları kullanarak anten faz merkezi ofsetini (FMO) ve anten faz merkezi değişimini (FMD) belirlemektedir. Sonuç ürün olarak kalibrasyon parametreleri ANTEX ve NGS formatlarında sunulmaktadır. Aşağıdaki tabloda Thales antenlerine ait L1 ve L2 frekansları için elde edilen faz merkezi ofseti değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Thales Z-Max antenleri FMO değerleri.

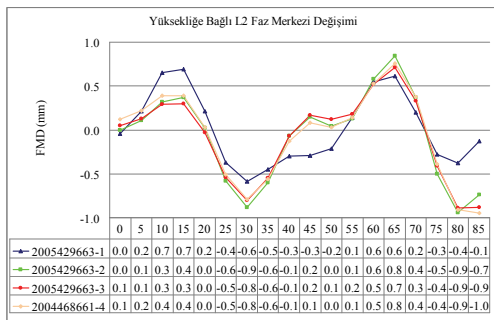
	THALES 1 (2005429663)			THALES 2 (2005429663)			THALES 3 (2005429663)			THALES 4 (2004468661)		
	N (mm)	E (mm)	H (mm)	N (mm)	E (mm)	H (mm)	N (mm)	E (mm)	H (mm)	N (mm)	E (mm)	H (mm)
L1	0.5	-2.3	342.1	0.7	-2.2	342.3	0.9	-3.5	342.6	0.7	-2.8	342.5
L2	0.6	-0.6	349.6	0.7	-0.4	350.0	1.0	-1.6	350.1	1.3	-1.0	349.8

Gerçekleştirilen tekrarlı ölçülerden elde edilen FMO'nun üç bileşeninin (kuzey, doğu ve yükseklik) birbirleri ile uyumlu olduğu ve aralarında anlamlı bir değişimin bulunmadığı görülmektedir. Tekrarlılıklar arasındaki farklar 1mm'den küçüktür.

Şekil 6 ve Şekil 7'de gerçekleştirilen dört test ölçüsü için L1 ve L2 frekansları için yüksekliğe bağlı FMD verilmektedir.



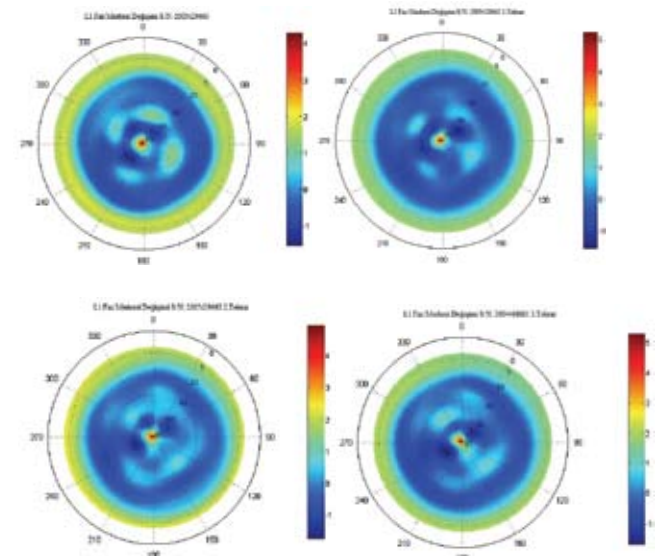
Şekil 6: Yükseklik açısına bağlı L1 faz merkezi değişimi.



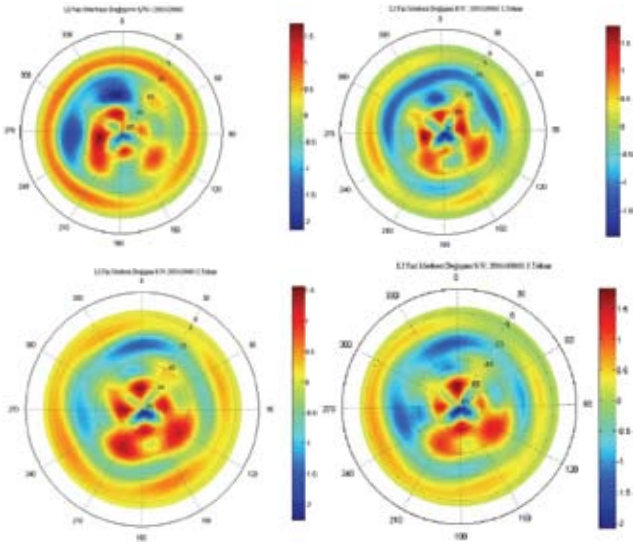
Şekil 7: Yükseklik açısına bağlı L2 faz merkezi değişimi.

Yükseklik açısına bağlı olarak belirlenen faz merkezi değişimleri grafikleri incelendiğinde, gerek L1 frekansı gerekse L2 frekansı için tekrarlı ölçüler ve farklı seri numaralı antenler arasında milimetrenin ondalığında değişimler izlenmektedir.

Hem yükseklik açısına hem de azimuta bağlı olarak belirlenen faz merkezi değişimlerinin kutupsal grafikleri (Şekil 8 ve Şekil 9) incelendiğinde gerek L1 frekansı gerekse L2 frekansı için tekrarlı ölçüler ve farklı seri numaralı antenler arasında anlamlı bir değişim izlenmemektedir.



Şekil 8: Azimut ve yükseklik açısına bağlı L1 faz merkezi değişimleri.



Şekil 9: Azimut ve yükseklik açısına bağlı L2 faz merkezi değişimleri.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada GNSS antenlerinin kalibrasyonu konusunda güncel durum verilmiş ve YTÜ Kalibrasyon Laboratuvarında gerçekleştirilen araştırmalar ve sonuçları irdelenmiştir. Günümüzde GNSS antenlerinin kalibrasyonu mutlak olarak laboratuvar ortamında ekosuz odada ve azimut ve yükseklik açısına bağlı dönebilen robot yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bağıl olarak da sahada gerçek ölçü koşullarında bilinen bir kısa baz ile gerçekleştirilmektedir. Kısa bazda yapılan uygulama dört gün ölçü süresi olmak üzere yaklaşık bir haftalık bir işlem ile diğer yöntemlere göre daha zahmetli bir çalışmadır. YTÜ Kalibrasyon laboratuvarında GNSS antenlerinin kalibrasyonu yapılmaktadır.

Thales Z-MAX anteninde yapılan deneyler sonuçların oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle hassas konum belirleme uygulamalarında kalibrasyon parametrele-

ri mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Kısa bazlarda aynı tip antenler kullanılması ve aynı yöne yönlendirme ile faz merkezi hatası elimine edilmesine karşın aynı tip antenler içerisinde montaj hatalarının olabileceği unutulmamalıdır. Uzun baz ölçümlerinde ise antenler aynı tip olsalar dahi yerin küreselliği nedeni ile birbirlerine paralel olarak kuzeye yönlendirilmeleri mümkün olmayacaktır. Bu uygulamalarda faz merkezi ve değişiminin belirlenmesi ayrı bir önem taşımaktadır. Ülkemizde kurulmuş olan TUSAGA AKTİF (CORS-TR) ve İSKİ-UKBS gibi sürekli gözlem yapan referans istasyonlarında kullanılan antenlerin kalibrasyon parametrelerinin belirlenerek tanımlanması bu ağlar yardımı ile gerçekleştirilecek hassas konumlama uygulamaları için dikkat edilmesi gereken bir noktadır.

#### Teşekkür

Değerlendirmeden kullanılan WaSoft yazılımını üniversitemizin kullanımına sunan Dresden Teknik Üniversitesi'nden Prof.Dr. Lambert Wanninger'e teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- CAMPBELL, J, VD.: **Zur Genauigkeit der GPS Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren**, AVN Heft 1, s:1-11,2004
- GÜLAL E., AYKUT O., AKPINAR B.: **GPS Antenlerinin Kalibrasyonu**, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 5. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 20-22 Ekim 2010, ZKÜ – Zonguldak.
- WÜBBENA, G., SCHMITZ, M., BOETTCHER, G.,SCHUMANN, C.: **Neue Aspekte bei der Roborter Kalibrierung**, 6. GPS-Antennen-Workshop, 21. September Bonn, 2006
- ZEİMETZ, P., KUHLMANN, H., ELSNER, C.: **Antennenmesskammer Bonn: Entwicklungsstand, Aufgaben, Vorhaben und Möglichkeiten**, 7. GNSS-Antennenworkshop 19./20. März 2009, Geodätisches Institut, TU Dresden.