

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERE YAKIN YÖRÜNGE UYDULARI İÇİN
MANYETOMETRE KALİBRASYONU YÖNTEMLERİNİN
KIYASLANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Deniz Can ÇELİK**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği (Disiplinlerarası)

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERE YAKIN YÖRÜNGE UYDULARI İÇİN
MANYETOMETRE KALİBRASYONU YÖNTEMLERİNİN
KIYASLANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Deniz Can ÇELİK
(511061031)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Çingiz Hacıyev (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Turgut Berat Karyot (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat Ergenç (İTÜ)**

OCAK 2010

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında moral desteğini hissettiğim çok kişi oldu. Özellikle benim için ellerinden geleni yapan sevgili annem ve babamın hayatım boyunca gösterdikleri sıcak sevgi ve desteğini daima hissettim. En sıkıntılı anlarımda bana destek olan ve moral veren arkadaşlarım Elgiz Başkaya, Tuğba Tan ve Ahmet Sofyalı'ya da birer teşekkür borçluyum.

Ancak bir kişiden burada ayrıca bahsedeceğim. Bu kişi elbette sevgili Hasan Abi'den başkası değil. Bana nasıl çalışkan olunacağını ve disiplini gösteren sana ne kadar teşekkür etsem azdır. Büyük ihtimalle bu satırları okumayacaksın, ama yıllar boyunca desteğe ihtiyacım olan her an boyunca hiç itiraz etmeden yanımda oldun ve bana yardımcı olmak için elinden geleni yaptın. Acaba senin bana yaptığın iyilikleri ben de ileride bir başkasına yapabilecek miyim? Umarım yapabilirim.

Son olarak tez danışmanım Profesör Çingiz Hacıyev'den değerli zamanını verimsizce harcadığımı ve ona layık bir öğrenci olamadığımı için özür diliyorum.

Ocak 2010

Deniz Can Çelik

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Taraması.....	1
2. DÜNYA MANYETİK ALAN REFERANS YÖNÜNÜN İNCELENMESİ.....	9
2.1. Manyetometreler.....	9
2.2. Dünya Manyetik Alan Gerilim Vektörünün Hesaplanması.....	10
3. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MANYETOMETRE KALİBRASYONU.....	15
3.1. Sinir Ağları.....	15
3.2. Yapay Sinir Hücreleri.....	16
3.2.1. Aktivasyon Fonksiyonları.....	16
3.2.1.1. Eşik Fonksiyonu.....	16
3.2.1.2. Doğrusal Fonksiyon.....	17
3.2.1.3. Sigmoid Fonksiyon.....	17
3.2.1.4. Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu.....	18
3.2.2. Önde Gelen Yapay Sinir Ağı Tipleri.....	18
3.2.2.1. Tek Katmanlı İleri Beslemeli YSA.....	18
3.2.2.2. Çok Katmanlı İleri Beslemeli YSA.....	18
3.2.3. Geri Yayılma Algoritması.....	19
3.2.3.1. Gizli Katman Nöronlarının Ağırlıklarının Hesaplanması.....	21
4. MANYETOMETRENİN KESTİRİM YÖNTEMLERİYLE KALİBRASYONU.....	25
4.1. En Küçük Kareler Yöntemi.....	25
4.2. Kalman Filtresi.....	27
4.3. Genişletilmiş Kalman Filtresi.....	32
5. SİMÜLASYONLAR.....	35
5.1. Yapay Sinir Ağlarıyla Elde Edilen Sonuçlar.....	35
5.2. Kestirim Yöntemleriyle Elde Edilen Sonuçlar.....	39
5.2.1 En Küçük Kareler Yönteminin Probleme Uygulanması.....	40
5.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresinin Probleme Uygulanması.....	42
6. SONUÇLAR.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR

EKK	: En Küçük Kareler
GKF	: Geniştirilmiş Kalman Filtresi
KF	: Kalman Filtresi
ÖK	: Ölçek Katsayısı
YSA	: Yapay Sinir Ağı/Ağları
YYY	: Yere Yakın Yörünge

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Yönelme belirleme algılayıcıları arasındaki belli başlı farklar.....	10
Çizelge 5.1 Kalibre edilmiş istikamet açısının hata değerleri.....	38
Çizelge 5.2 10 deneme sonunda, kullanılan kestirim yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Çizelge 5.3 Jiroskop hatalarının eklenmesi durumunda 10 deneme sonunda kullanılan kestirim yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması.....	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Dünya manyetik alan vektörünün M_x bileşeni.....	11
Şekil 2.2 Dünya manyetik alan vektörünün M_y bileşeni.....	12
Şekil 2.3 Dünya manyetik alan vektörünün M_z bileşeni.....	12
Şekil 2.4 Üç eksenli manyetometre kullanarak istikamet açısını bulmak.....	13
Şekil 3.1 Gerçek bir nöron ve bölümleri.....	15
Şekil 3.2 Yapay bir nöron.....	16
Şekil 3.3 Eşik fonksiyonu.....	17
Şekil 3.4 Doğrusal fonksiyon.....	17
Şekil 3.5 Sigmoid fonksiyon.....	17
Şekil 3.6 Hiperbolik tanjant fonksiyonu.....	18
Şekil 3.7 Çok girişli çok çıkışlı bir yapay nöron.....	19
Şekil 3.8 Tek girişli tek çıkışlı bir yapay nöron.....	20
Şekil 3.9 Tek girişli çok çıkışlı bir yapay nöron.....	22
Şekil 4.1 En küçük kareler yöntemiyle yapılmış bir doğru uydurma örneği.....	26
Şekil 4.2 Kalman filtresinin çevrimi.....	31
Şekil 5.1 2B manyetik alan vektörünün YSA ile eğitilmiş değerlerinin hedef değerler ve ölçülen değerlerle karşılaştırılması.....	36
Şekil 5.2 Hedef, ölçülen ve eğitilmiş alfa açısının 360 derece boyunca değişimi.....	37
Şekil 5.3 Hedef, ölçülen ve eğitilmiş istikamet açılarının 360 derece boyunca değişimi.....	37
Şekil 5.4 Hedeflenen ve eğitilmiş istikamet açılarının arasındaki hatanın 360 derece boyunca değişimi.....	38
Şekil 5.5 F_i 'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	46
Şekil 5.6 Teta'nın ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	46
Şekil 5.7 Psi'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	47
Şekil 5.8 Omega X'in ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	47
Şekil 5.9 Omega Y'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	48
Şekil 5.10 Omega Z'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreç grafiği.....	48
Şekil 5.11 P matrisinin köşegen elemanlarının iterasyona bağlı değişimi.....	49
Şekil 5.12 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda F_i 'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata.....	50
Şekil 5.13 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Teta'nın ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata.....	50

Şekil 5.14	Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Psi'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata.....	51
Şekil 5.15	Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega X'in ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci.....	51
Şekil 5.16	Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega Y'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci.....	52
Şekil 5.17	Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega Z'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci.....	52

SEMBOL LİSTESİ

δ	Eğilme açısı, geomanyetik eksenin Dünya'nın dönme eksenine olan açısı.
ε	Hata
λ^*	Başlangıç ($\lambda_o - \xi_D$) veya küçük aralıklarda ortalama açısı.
ω_x	X eksenini etrafındaki açısal hız
ω_y	Y eksenini etrafındaki açısal hız
ω_{yor}	Uydunun yörünge hızı
ω_z	Z eksenini etrafındaki açısal hız
b	(3x1)'lik sapma vektörü
i	Eğim açısı
x_k	Sistemin n boyutlu durum vektörü
v_k	Gözlemin (ölçümün) s boyutlu bozuntu vektörü
w	Yapay sinir ağının girişlerinin ağırlığı
w_k	Sistemin r boyutlu bozuntu vektörü
z_k	Gözlem (ölçüm) vektörü
Δt	Ayrık zaman dilimi
θ	Yunuslama açısı
ϕ	Yalpalama açısı
ψ	Sapma açısı
A	Durum vektörünün önceki adım $k-1$ ile şimdiki adım k arasındaki ilişkiyi sağlayan $n \times n$ boyutlu transfer matrisi
B	İsteğe bağlı $n \times l$ boyutundaki kontrol girişi
G	Sistemin bozuntusunun $n \times r$ boyutlu transfer matrisi
F_u	Durum vektörünün jakobyen matrisi
H	Sistemin durum denklemiyle gözlem arasındaki ilişkiyi sağlayan $m \times n$ boyutlu gözlem matrisi
H_u	Gözlem (ölçüm) vektörünün jakobyen matrisi
H_m	Momentum tekerleklerinin momentleri

I	Birim matris
J_x	X eksenindeki atalet momenti
J_y	Y eksenindeki atalet momenti
J_z	Z eksenindeki atalet momenti
K	Kalman kazancı
M_D	Dünya'nın manyetik alan momenti
M_x	Dünya'nın manyetik alan vektörünün X bileşeni
M_{xH}	Dünya'nın manyetik alan vektörünün 2B düzleme izdüşümünün X bileşeni
M_y	Dünya'nın manyetik alan vektörünün Y bileşeni
M_{yH}	Dünya'nın manyetik alan vektörünün 2B düzleme izdüşümünün Y bileşeni
M_z	Dünya'nın manyetik alan vektörünün Z bileşeni
$Moment_x$	X eksenindeki dış etken momenti
$Moment_y$	Y eksenindeki dış etken momenti
$Moment_z$	Z eksenindeki dış etken momenti
P_k	Sistemin tahmin hatası kovaryansı
Q	Süreç gürültüsü
R	Ölçüm hatasının korelasyon matrisi

YERE YAKIN YÖRÜNGE UYDULARI İÇİN MANYETOMETRE KALİBRASYONU YÖNTEMLERİNİN KIYASLANMASI

ÖZET

Manyetometreler ekonomik oluşlarının sağladığı avantajla yere yakın yörünge uydularında kullanılan bir yönelme belirleme çözümüdür. Özellikle de günümüzde yüksek bütçeli devlet kuruluşlarının yanı sıra üniversitelerin ve görece olarak daha düşük bütçeye sahip olan diğer bazı kuruluşların tasarladığı küçük uydularda sıklıkla kullanılmaktadır. Buna rağmen manyetometrelerden elde edilen sonuçlar, manyetometrelerin içinde bulundukları uydudaki elektromanyetik kuvvetlerden, elektrik akımlarından veya fırlatma anındaki elektriksel yüklerden etkilenir. Bu durumun üstesinden gelinebilmesi için bu manyetometrenin kalibrasyona tabi tutulması gerekir. Bu çalışmada kalibrasyon işlemi için üç değişik yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi son yıllarda sıklıkla kullanılan yapay sinir ağları yöntemidir. Bu yöntemde manyetometre ölçümlerindeki sapma ve ölçek katsayısı değerlerinin kestirilmesine ihtiyaç duyulmadan kalibrasyon işlemi yapılabilmektedir. Diğer yöntemler ise, en küçük kareler yöntemi ve genişletilmiş Kalman filtresidir. Özellikle, Kalman filtresinin doğrusal olmayan durumlar için uyarlanmış versiyonu olan genişletilmiş Kalman filtresi, kontrol alanında sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak kendini göstermiştir. Çalışmada ilk olarak daha önce gerçekleştirilen tez çalışmaları hakkında bir literatür taraması yapılmış, ardından manyetometreler hakkında kısa bir bilgi verildikten sonra, Dünya'nın manyetik alan referans yönü incelenerek, yapay sinir ağları, en küçük kareler yöntemi ve Kalman filtreleriyle ilgili teorik bilgi verilmiş, en son da yapılan simülasyon çalışmaları gösterilmiştir. Sonuçlar bölümünde bu yöntemler birbirleriyle kıyaslanmış ve gelecekte aynı konu üzerinde yapılabilecek çalışmalar hakkında bazı tavsiyelerde bulunulmuştur.

COMPARING MAGNETOMETER CALIBRATION METHODS FOR LOW EARTH ORBIT SATELLITES

SUMMARY

Given that they are economical, magnetometers are used as attitude determination solutions in low Earth orbit satellites. Especially today, magnetometers are used frequently by universities and other low budget organizations other than high budget government associations. However, the results gained from magnetometers are highly affected by the electromagnetic forces in the satellite, electrical currents or electric charges during launch. To overcome this situation, the magnetometers should be calibrated. In this work, three different calibration methods are used. The first one is the artificial neural networking method that is frequently used recently. In this method one can do the calibration without estimating the bias and the scale factor values. Other methods are, the least squares method and the extended Kalman filter. Especially, the extended Kalman filter, which is a modified version of the Kalman filter for non linear conditions, has shown itself as a frequently used and respectable method in control theory. In the work, first a literature review has been done to review the previous works, then after giving a brief introduction about magnetometers, Earth's magnetic field reference vector is examined and the theory behind artificial neural networking, the least squares method and Kalman filtering is given and lastly the simulation studies are shown. In discussion, these methods are compared among themselves and the possible future studies on the topic are recommended to the reader.

1. GİRİŞ

Uzay araçlarında kullanılan manyetometreler genellikle iki tür hatadan dolayı hatalı ölçüm yaparlar. Bunlardan birincisi algılayıcıların koordinat eksenine göre yanlış hizalanmasından oluşan hatadır. İkincisi ise uzay aracı içinde bulunan elektronik bileşenler ve bunların yarattığı elektromanyetik alandan ileri gelir. Örnek vermek gerekirse, 1970’li yılların başlarında kullanılan IMP-7 ve HEOS-2 uydularındaki manyetometrelerde oluşan elektronik akım nanoTesla seviyesindeydi [1, 2]. Bu sebepten dolayı meydana gelebilecek aksiliklerin önlenmesi için manyetometrelerin uçuş sırasında kalibre edilmeleri gerekir [3].

Bu çalışmada bir yere yakın yöründe uydusunda kullanılabilecek manyetometrelerin değişik yöntemlerle kalibrasyonu yapılmış ve bu yöntemler incelenmiştir.

Birinci bölümde konu üzerinde daha önceden yapılmış olan çalışmaların incelenmesi için bir literatür taraması yapılmış, ikinci bölümde Dünya’nın manyetik alan referans yönü incelenerek çalışma içerisinde kullanılacak olan manyetik alan gerilim vektörü tanıtılmış, üçüncü bölümde ilk yöntem olan yapay sinir ağlarının ve geri yayılma yönteminin teorisi anlatılmış, dördüncü bölümde ise kestirim yöntemleri tanıtılarak en küçük kareler yöntemi ve genişletilmiş Kalman filtresinin teorisi açıklanmaya çalışılmıştır. Simülasyonlar kısmında çalışmada bu yöntemlerin nasıl kullanıldığına dair bilgi verilmiş ve elde edilen sonuçlar okuyucuyla paylaşılmıştır. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar üzerinde durulmuş ve ileride yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmuştur.

1.1 Literatür Taraması

Uydu manyetometrelerinin kalibrasyonu ve uydunun yönünü doğru bulma ihtiyacı üzerine daha önce bolca araştırma yapıldığı söylenebilir. Bu konuda çalışma yapacaklar için günümüzde geniş bir kaynak kütüphanesi mevcuttur.

Alonso ve Shuster, uçuş sırasında yönelme bilgisi olmadan sapmaların (İng. *bias*) saptamasını yapacak bir algoritma geliştirdiler. Bu algoritma, o tarihten önceki

benzer algoritmaların açıklarını kapatan, öncekilerden daha hızlı yakınsayan, istatistikleri en iyi şekilde kullanan ve veri harcamayan bir yöntem olarak kendinden sonraki birçok çalışma için örnek ve bir çıkış noktası teşkil etti [4].

Farrel ve diğerleri, kendi eksenini etrafında dönen bir uydu üzerindeki manyetik akımlı pusula için açısız kaymaları (İng. *offset*) ve yavaşça değişen sürüklemeleri anlattılar. Bu tarz manyetometreler IMP-8, DE-1 ve ISTPIGEOTAIL gibi uydularda kullanılmıştır. Bunun sonucunda algılayıcının yanlış geometrik hizalamaları ölçüm sinyalinde hatalara neden olacaktır. Bu yanlış hizalamalar pertürbasyon teorisi kullanılarak belirlenebilir. Mevzubahis teknik, kendi eksenini etrafında dönen uyduların manyetometrelerine uygulanabilmektedir. Bunun yanında, uzun zaman periyotların sonucunda manyetometre, elektronik bileşenler üzerinde küçük sürüklemeler meydana getirebilir ve bunların miktarı da veri analiz sürecinde belirlenebilir [5].

Sıfır düzeyi saptama yöntemi, uydu üzerinde yapılan manyetometre gözlemlerinin işlenmesinde önemlidir. Aletlerin kayma sürüklemesi (İng. *offset drift*) ve uydunun yerel manyetik alanı sonucu böylesi bir sıfır düzeyi saptama, uçuş öncesi yapılan kalibrasyonun dışında uçuş sırasında gerçekleştirilecek çeşitli yöntemleri de gerektirir. Markgraf ve diğerleri, bu amaçta kullanılacak iki farklı yöntem üzerinde çalışmış ve manyetometre dışındaki aletler tarafından yapılan gözlemlerin faydalarından yararlanmışlardır. Bu yöntemlerden birincisi, aslen elektrik alanları ölçmek için tasarlanan elektron sürüklenmesi aletleri tarafından gerçekleştirilen ölçümlere dayanırken, ikincisi ise, basınç eşyönsüzlüğünün (anizotropisinin) manyetik alanın yönünün belirlenmesi için kullanıldığı parçacık basıncı tansör ölçümlerine dayanmaktadır [6].

Hashmall ve diğerleri, yere yakın yörüngede bulunan uydulardan elde edilen bilgilere dayanarak, iyi kalibre edilmiş, bağımsız ve doğru yönelme tahminleri kullanarak yapılan manyetik alan ölçüm çalışmalarının doğruluğunu araştırmışlardır. Sonuçlara göre, bu çok pahalı olmayan yönelme algılayıcıları, manyetik alan modellerindeki sapmaları (İng. *deviation*) belirleyebilir ve manyetik alan parametrelerini yaratan verileri sağlamakta kullanılabilir [7].

Lohr ve diğerlerinin en önemli amacı, Dünya'nın yakınındaki Eros astreoidinin bir *body-wide* manyetik alanı olup olmadığını araştırmaktır. Üç eksenli NEAR (Near

Earth Asteroid Rendezvous - Yere Yakın Asteroid Buluşması) manyetometresi, yüksek kazançlı antene bağlı bir algılayıcı barındırmaktadır. GSFC (Goddard Space Flight Center – Goddard Uzay Uçuş Merkezi) ve APL (Applied Physics Laboratory – Uygulamalı Fizik Laboratuvarı) arasındaki müşterek bir donanım çalışması olan NEAR MFI'nin (Magnetic Facility Instrument) meydana getirdiği tasarimsal ve manyetik yaklaşım, program bütçesini etkilemeyecek, düşük maliyetli ve ileri mühendislik çözümlerini zorunlu kılmıştır. Bu manyetometrenin amacı 5 nT içinde kalan güvenilir manyetik alan ölçümleri yapmaktır. Bahsedilen ölçümler çok yoğun bir uydu manyetik müdahale modeli gerektirir, ama bu ölçümler bir tam yılın yörünge veri setiyle elde edilebilir. NEAR MF1, NASA'nın Discovery görevlerindeki ilk uçuşunda kendisinden istenen manyetik alan ölçümlerini sağlayarak başarıya ulaşmıştır [8].

Oran belirlemek için *strap-down* jiroskoplarla kullanıldığında, manyetometre verilerinden çok doğru yönelme tahminleri alınabilir. Elde edilebilecek bu doğruluk, jiroskobun kalitesine, manyetometrenin kalibrasyonuna, kullanılan veri setine ve yörünge detaylarına bağlıdır. Bununla beraber, algılayıcı verilerinin doğru olması bile Dünya'nın referans manyetik alan modelindeki ufak hatalardan kaynaklanan sistematik değişimleri önleyemeyebilir. Bu değişimlerin durum vektörüne dahil edilmesi, filtre performansını arttıracak bir yoldur. Sedlak, bu referans alan hatalarını (yönelme ve jiroskop kaymalarıyla beraber) kestirebilmek için iki filtre geliştirmiştir. Bu filtreleri kullanarak elde edilen sonuçlara göre yönelme kestirimlerinde %40'lık bir iyileşme görülmüştür. Sonuç olarak, manyetometre ve jiroskop kullanan otonom bütünleşik yönelme kontrolü sistemleri, bu iyileşmelerle farklı görev türleri için daha elverişli duruma gelmiştir [9].

Bir vektör manyetometresinde parametrelerin kalibrasyonu sadece skaler referans manyetometre kullanılarak kestirilir. Merayo ve diğerleri, doğrusallaştırılan parametrisasyonu sayesinde daha öncekilerden ayrılan yeni bir yöntem ortaya koydular. Bu yöntem, bir manyetik alanın yokluğunda üç kaymanın veya sinyalin, eksenlerin normalizasyonu için üç ölçü faktörünü ve algılayıcıda ortogonal bir sistem oluşturan üç 'ortogonal olmayan açının' tespit edilmesini sağladı. Diğerleriyle karşılaştırıldığında bu yöntemin avantajı, doğrusal en küçük kareler kestiriminde yatmaktadır. Böylece Dünya'nın manyetik alan ortamında bir manyetometreyi çok masraflı olmayan bir şekilde çalıştırmak mümkün olmuştur.

Parker ve Gee, krayojenik bir düz geçiş manyetometrenin kalibrasyonunda kullanılan deneysel prosedürü anlatmışlardır. Bu prosedür, manyetometrenin hassaslığını, konumun bir fonksiyonu olarak tanımlamak üzere tasarlanmıştır. Ardından, daha önceki bir makaleden alınan bir teori geliştirilerek hatalı gözlemlerde de kullanılabilecek şekilde genişletilmiş ve eldeki veri setine uygulanmıştır. Bu teori, pürüzsüz, harmonik ve tutarlı bir fonksiyonun, manyetometrenin cevap tansörünün bütün bileşenlerini hesaplamasına izin vermektedir. Bu fonksiyonla birlikte, her yön ve konumdaki dipol kaynağına verilen cevap hesaplanabilmekte ve her çeşit örnekten alınan manyetometre sinyali kestirilebilmektedir. Ayrıca, hassaslık konumundan kaynaklanan değişim, bir dizi düzlem üzerinde gösterilmiştir. Görülmüştür ki, gerekli düzeltmeler yapılmadıkça manyetizasyon yönündeki farklılıklar, manyetik yoğunluktaki değişimler olarak ortaya çıkabilir ve tersi olarak, manyetizasyon kuvvetindeki düzensiz değişimler, eğilme açısı ve eğim açısında sallanmalara yol açabilir. Yapılan önçalışmada, özellikle eğilme açısında düzeltilmeyen enstrümantal etkilerden ileri gelen büyük bozunmalar meydana gelmiştir [10].

Orsted geomanyetik eşleştirme uydusundaki kompakt küresel bobinli vektör geri beslemeli manyetometre, uçuş öncesi bir dizi yoğun kalibrasyondan ve verifikasyondan geçmiştir. Risbo ve diğerleri ‘ince kabuk’ kalibrasyon prosedürünü kullanmışlardır. Makalede, Orsted uydusunda ve muhtelif test merkezlerinde geliştirilen küresel harmonik modelleme tekniği geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Makalede ayrıca bir Overhauser mutlak skaler proton manyetometresi kullanılarak, test bobininin verifikasyonu açıklanmış ve kalibrasyonun sonuçları sunulmuştur. Bunun yanında ısı kalibrasyonu da gerçekleştirilmiş ve açıklanmıştır. Kullanılan kalibrasyon modelinin standart sapması 100 pT olarak verilmiştir. Sonuç olarak, çalışmada, kompakt küresel bobin ve Overhauser manyetometresi arasındaki bir *RF* arabiriminin tartışması yapılmıştır [11].

Crassidis ve diğerleri, üç eksenli manyetometre kalibrasyonu için gerçek zamanlı yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemler, merkezi algoritma, genişletilmiş Kalman Filtresi ve sezgili filtredir. Birbirlerine karşı artıları ve eksileri olan bu üç farklı alternatif yol sayesinde yörüngede manyetometre kalibrasyonu gerçekleştirilebilmesi mümkün olmuştur [12].

Huang ve Jing, ilk defa bir yere yakın yörünge uydusunun geomanyetik navigasyon sistemine, gerçek zamanlı üç eksenli manyetometre kalibrasyonu entegre ettiler.

Manyetometre kaymalarının, ölçek katsayılarının ve yörünge doğruluğundaki ortogonal olmayan düzeltmelerin etkilerini ortadan kaldırmak için, durum-hız vektörünü, sürüklenme katsayısını ve bütün kalibrasyon parametrelerini kestirebilen bir genişletilmiş Kalman filtresi kullanılmıştır. Bu filtrede, gövde ölçümlerinden ve geomanyetik referans vektörlerinden çevrilen bir yönelmeden bağımsız ölçüm kullanılmış ve filtrenin geçerliliğinin test edilmesi için bir dizi bilgisayar simülasyonu yapılmıştır [13].

Lee, Rhee ve Ahn, oluşan manyetik bozunumu (İng. *disturbance*) düzeltmek için bir yol geliştirdiler. Bu çalışmada manyetik alan düzeltmesi yörünge geometrisine dayandırılarak, algoritma geomanyetik alan modelinden hariç tutuldu. Mevzubahis manyetik alan düzeltilmesi, averaj yöntemine dayanan statik kestirimle ve bir tahmin yasasına dayanan dinamik kestirim ile gerçekleştirildi. Önerilen yöntemin kullanışlılığı KOMPSAT-1 uydusu üzerinde hem simülasyon hem de telemetri verileriyle araştırıldı [14].

Manyetik pusulalar, Dünya'nın manyetik alanını ölçerek yön tayin edebilirler. Bununla birlikte, manyetometrelerin, pratikte istenmeyen bir yerel manyetik alanının bulunması, önceden kalibrasyon yapılmasını zorunlu kılar. Günümüzdeki kalibrasyon yöntemleri, ölçümlerin manyetik karışıklıklar ve gürültülerle bozulduğu, pek isabetli olmayan manyetometre hata kestirimleriyle sınırlandırılmıştır. Wang ve Gao, yapay sinir ağları kullanarak ve pusula istikameti ve gerçek istikamet arasındaki doğrusal olmayan bağı modelleyerek yeni bir kalibrasyon algoritması yaratmışlardır. Harici bir istikamet referansının kullanılabilir olduğu bir durumda, yapay sinir ağları, manyetik karışıklıklar mevcutken bile pusula istikametini gerçek istikamete çevirmekte de kullanılabilir. Bu algoritma ne eğilme açısı bilgisi, ne de manyetometre kayması ve ölçek katsayısı kestirimi gerektirir. Test ve simülasyon sonuçlarına göre, kullanılan bu kalibrasyon yöntemi sağlamdır ve kalibrasyon performansı, eğitilen verilerin kalitesiyle doğru orantılıdır [15].

Gebre-Egziabher ve diğerleri, manyetik alan içindeki *strap-down* manyetometrelerin kalibre edilmesi için bir algoritma geliştirdiler. Bir dizi istikamet düzeltme parametresi hesaplayan ve bu yüzden kullanımı iki eksenli sistemlerle sınırlı kalan geleneksel pusula salınımı yönteminden farklı olarak, bu algoritma, manyetometre çıktı hatalarını doğrudan kestirebilmektedir. Böylece geliştirilen algoritma, üç eksenli manyetometre kalibrasyonunda kullanılabilecek hale gelmiştir. Kalibrasyon

algoritması, başlangıcı iki adımlı doğrusal olmayan bir kestirici ile verilmiş bir en küçük kareler kestirimi kullanır. Yapılan simülasyonlar sonucu, 1-2 derece arası hatalar verdiği görülmüştür [16].

Uydulardan yapılan Dünya manyetik eşleştirmesi, uydunun kendi manyetik alanından kaynaklanan ölçüm hatasını azaltmak için bir çubuk üzerinde manyetik algılayıcıyla birleştirilmiş olan bir uydu manyetik alan kontrol programı gerektirir. Manyetik eşleştirme görevleri (Magsat, Oersted, CHAMP, SAC-C MMP ve ESA Swarm projeleri gibi), vektör manyetometresinin ölçü değerlerinin uçuş kalibrasyonu ve *inter-axe* açılarının ve kaymalarının zamana göre değişimini izlemek için vektör ve mutlak skaler manyetometreler taşır. Bu iş manyetometre çıktıları karşılaştırarak yapılır. Primdahl ve diğerleri, uydunun manyetik alanının incelenmesini sağlayan klasik çifte vektör algılayıcı tekniğine uygun olarak Orsted uydusundaki skaler ve vektörel algılayıcıların ölçümlerini kullanıp benzer bir birleşik skaler/vektörel gradyometri tekniği geliştirmişlerdir [17].

Gebre-Egziabher, küçük hava araçlarının yön bulmasında kullanılan manyetometrelerin kalibrasyonu için bir otokalibrasyon algoritması geliştirip, performansını test etti. Bu algoritma, 12 kalibrasyon parametresini test etmektedir. Eşleştirme, ölçek katsayısı sapmalarını ve ortogonal olmayan etkilerden kaynaklanan manyetometre çıktı hatalarını düzeltir. Genellikle kalibrasyon algoritmalarında yumuşak demir hataların ve algılama eksenlerinin ortogonal olmaması, gözlemlenemeyen hatalara neden olabilir. Makalede bu koşulların belirlenmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu durumlarda otokalibrasyon algoritması 12 parametreden dokuzunu kestirebilse bile, üçlü akselometreler ve bir GPS alıcısı ile birlikte harici ölçümlerin hata kestiriminde gerekli bilgileri verebildikleri gösterilmiştir [18].

Bir manyetik alanın modülünü kestirebilmek için üç eksenli bir manyetometre kullanıldığında, farklı yönelmeler için farklı sonuçlar elde edilir. Wang, yapay sinir ağları kullanarak, manyetometrenin oyalayıcı (İng. *diversionary*) hatalarına odaklanarak yeni bir adaptif kalibrasyon yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışmada oyalayıcı hatalar ve manyetometrelerin sistem parametreleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Makalede verilen yapay sinir ağları örneğinde, manyetik alanın modülünün kestiriminde kullanılacak olan yeni bir adaptif kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Simülasyon ve deneylerden elde edilen sonuçlar öyle gösteriyor ki, üç

eksenli manyetometrenin oyalayıcı hataları 500 nT'den 10 nT'ye çekilebilir. Bu sayede pahalı, karmaşık ve özel ekipman gereksinimi olmadan, üç eksenli manyetometre kalibrasyonu mümkün kılınmıştır [19].

2. DÜNYA MANYETİK ALANI REFERANS YÖNÜNÜN İNCELENMESİ

2.1 Manyetometreler

Manyetometreler, ortamdaki manyetik alan kuvvetini ve bu kuvvetin yönünü ölçmeye yarayan aletlerdir. Manyetometreler uzay araçlarının yönünü bulmak için de sıklıkla kullanılmaktadır.

Gerçekte uzay araçlarında yön bulma amacıyla kullanılan tek alet manyetometre değildir. Güneş algılayıcıları, yıldız algılayıcıları, ufuk algılayıcıları ve jiroskoplar gibi değişik seçenekler de kendilerine özgü avantaj ve dezavantajlarıyla kullanıcı bulmaktadır.

Özetle, uzay araçlarında kullanılacak bir yönelme belirleme algılayıcısından istenen özellikler şunlardır:

- 1) Düşük enerji tüketimi
- 2) Düşük ağırlık
- 3) Küçük hacim
- 4) Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmesi
- 5) Dayanıklılık ve güvenilirlik
- 6) Düşük maliyetli olması

Buna göre değişik yönelme belirleme algılayıcıları arasındaki mevcut farklar aşağıdaki çizelgeyle gösterilebilir:

Çizelge 2.1 Yönelme belirleme algılayıcıları arasındaki belli başlı farklar [20]

Kullanılan Alet	Referans	Hassasiyet	Notlar
Güneş Algılayıcısı	Güneş	1 açısal dakika	Basit, güvenilir ve düşük maliyetlidir, ancak Güneş her zaman görünmeyebilir.
Ufuk Algılayıcısı	Dünya	0.1 derece	Sadece yere yakın yörüngede çalışır, genellikle taramaya gereksinim duyar ve daha pahalıdır.
Manyetik Algılayıcı	Manyetik Alan	1 derece	Sadece yere yakın yörüngede çalışır, ekonomiktir, ama hassasiyeti düşüktür.
Yıldız Takipçisi/Kamera	Yıldızlar	0.001 derece	Ağır ve karmaşıktır, ancak en hassas ölçümleri gerçekleştirir.
Jiroskoplar	Atalet eksen takımı	0.01 derece/saat	Sadece açısal hız içindir, kısa süreli görevler için iyidir, ama ağır olabilir, yüksek güce gereksinim duyar ve dönen parçalar içerir.

2.2 Dünya Manyetik Alan Gerilim Vektörünün Hesaplanması

Dünyanın manyetik alan vektörünün üç boyutlu halinin bulunması aşağıdaki formülle gerçekleşir:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \frac{M_D}{r_D^3} \begin{bmatrix} a_1 \cdot \cos(u) + a_2 \cdot \sin(u) \\ a_3 \\ -2(a_1 \cdot \sin(u) - a_2 \cdot \cos(u)) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada,

Dünya'nın manyetik momenti: $M_D = 7,86 \times 10^{15} \text{ wb.m}$

Uydunun irtifasının yarıçapı: $r_D = r + h = 6378,140 \text{ km} + 550 \text{ km} = 6928,140 \text{ km}$

u: 1 ila 360 arasında değişen değerler.

$$a_1 = \sin(i) \cdot \cos(\delta) - \cos(i) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\lambda^*)$$

$$a_2 = \sin(\delta) \cdot \sin(\lambda^*)$$

$$a_3 = \sin(i) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\lambda^*) + \cos(i) \cdot \cos(\delta)$$

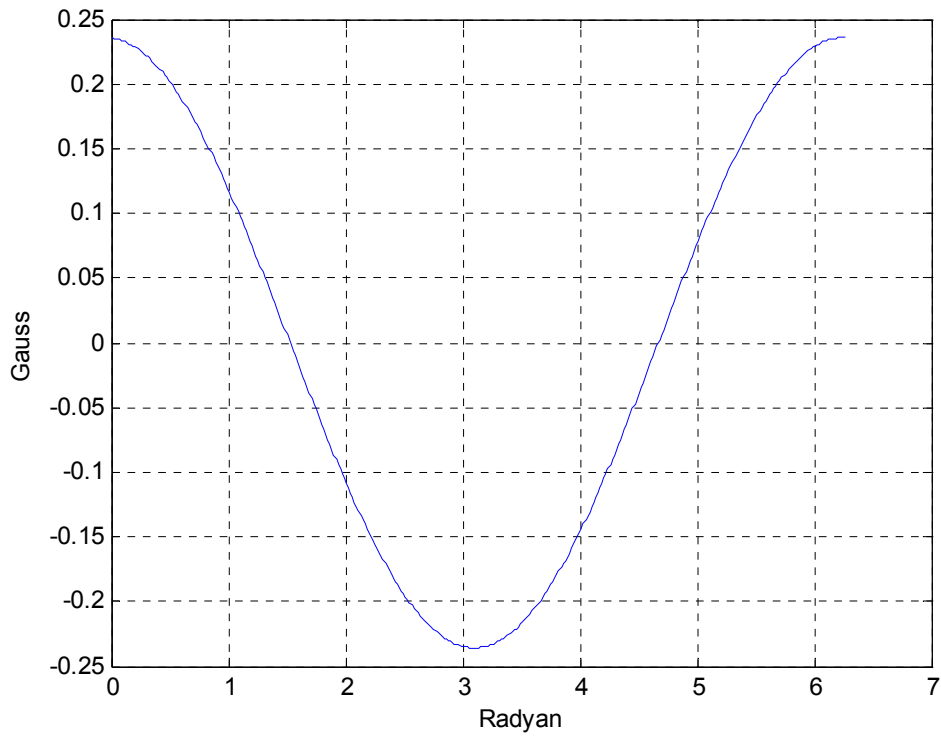
Bu çalışmada, A değerlerinin içinde geçen değerler, $\lambda^* = 15^\circ$, $\delta = 11,4^\circ$ ve $i = 80 + n = 85^\circ$ olarak alınacaktır. Burada,

i : Eğim açısı.

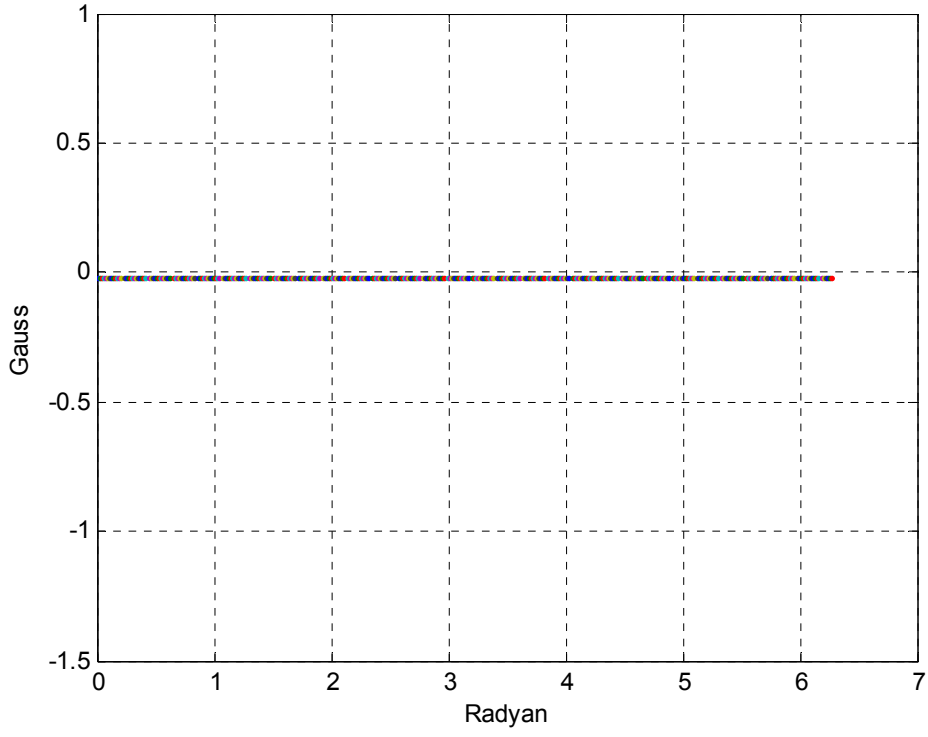
δ : Eğilme açısı, geomanyetik eksenin Dünya'nın dönme eksenine olan açısı.

λ^* : Başlangıç ($\lambda_o - \xi_D$) veya küçük aralıklarda ortalama açısı.

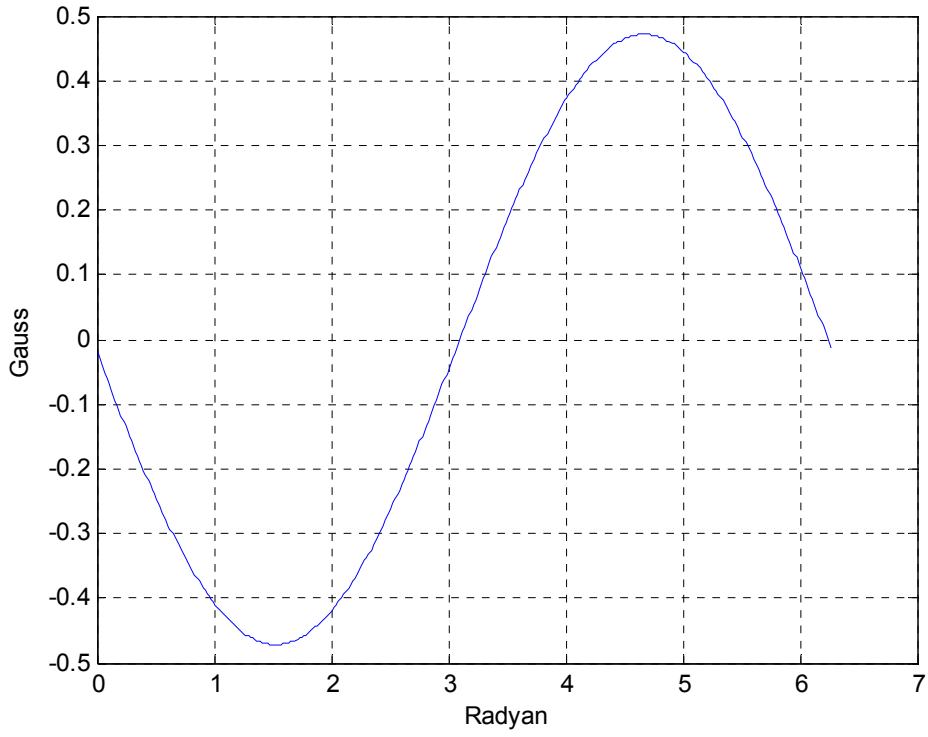
Bu verilere göre 1 ila 360 derece arasındaki değerler için (2.1) denkleminin sol tarafındaki Dünya manyetik alan vektörü sırasıyla aşağıdaki bileşenlere sahip olur.



Şekil 2.1 Dünya manyetik alan vektörünün M_x bileşeni



Şekil 2.2 Dünya manyetik alan vektörünün M_y bileşeni

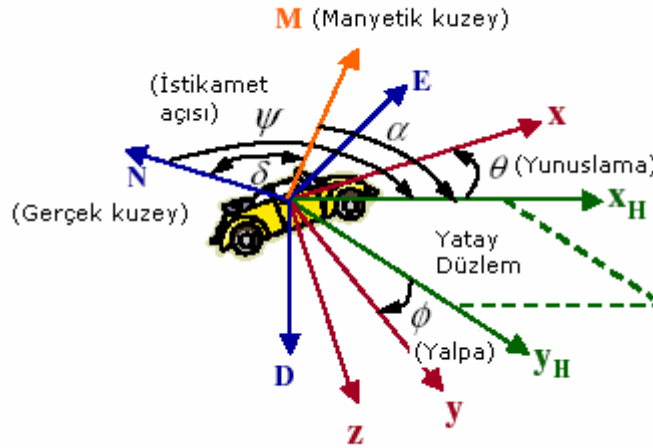


Şekil 2.3 Dünya manyetik alan vektörünün M_z bileşeni

(2.1) numaralı denklemde bulunan Dünya'nın manyetik alan vektörünü iki boyutlu bir yüzeye yansıtmak için, ϕ yalpa ve θ ise yunuslama açısı olmak üzere aşağıdaki denklem kullanılır:

$$\begin{bmatrix} M_{xH} \\ M_{yH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \sin\phi & -\cos\phi \sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Burada x, z eksenleri sırasıyla aracın ileri gidiş yönü ve aracın yol yüzeyine yani aşağıya doğru olan yönüdür. Y eksenini ise x ve z eksenlerinin oluşturduğu yüzeye dik çapraz bir eksenidir. X_H ve y_H eksenleri ise bu üç eksenin yatay olarak oluşturdukları izdüşümün x ve y eksenleridir.



Şekil 2.4 Üç eksenli manyetometre kullanarak istikamet açısını bulmak

Şekil 2.4'teki kısaltmalar araca göre şu anlamlarda kullanılmıştır:

x: İleri

y: Çapraz

z: Yere dik

X_H : (Yatay düzlemde) ileri

Y_H : (Yatay düzlemde) çapraz

N: Gerçek kuzey

E: Doğu

D: (Yatay düzlemde) yere dik

M: Manyetik kuzey

Aracın x_H eksenini ve manyetik kuzeyin arasındaki α açısı ise aşağıdaki tabloya göre bulunur.

$$\alpha = \begin{cases} 90, M_{xH} = 0, M_{yH} < 0 \\ 270, M_{xH} = 0, M_{yH} > 0 \\ 180 - \arctan\left(\frac{M_{yH}}{M_{xH}}\right) \times \frac{180}{\pi}, M_{xH} < 0 \\ -\arctan\left(\frac{M_{yH}}{M_{xH}}\right) \times \frac{180}{\pi}, M_{xH} > 0, M_{yH} < 0 \\ 360 - \arctan\left(\frac{M_{yH}}{M_{xH}}\right) \times \frac{180}{\pi}, M_{xH} > 0, M_{yH} > 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Buradan da uygun δ açısının gerçek kuzeye eklenmesi veya çıkartılmasıyla istikamet açısı ψ bulunabilir.

Manyetometrelerin yakınında bulunan elektronik aletlerin neden olduğu sapmalar ve ölçek katsayılarının eklenmesiyle birlikte, (2.2) numaralı denklemde elde edilen M_{xH} ve M_{yH} değerlerinin şöyle modellenmesi gerçeğe daha uygun olur:

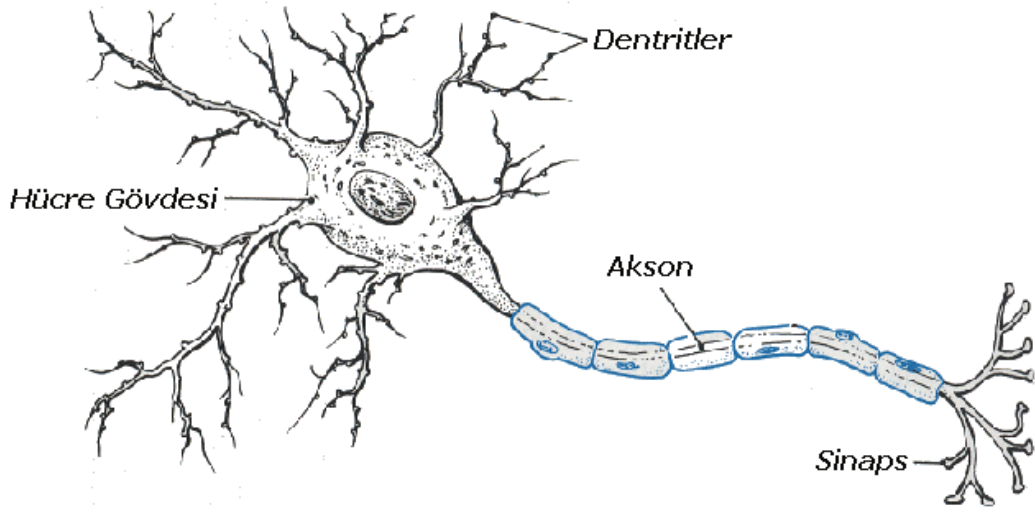
$$\begin{aligned} \hat{M}_{xH} &= \hat{O}K_{xH} \times M_{xH} + S_{xH} \\ \hat{M}_{yH} &= \hat{O}K_{yH} \times M_{yH} + S_{yH} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Burada $\hat{M}_{xH}$ ve $\hat{M}_{yH}$, Dünya'nın manyetik alanının yatay düzlem üzerine izdüşümünün gerçek değerleridir. $\hat{O}K$ ve S değerleri ise sırasıyla x_H ve y_H eksenlerindeki ölçek katsayıları ve sapmalardır.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MANYETOMETRE KALİBRASYONU

3.1 Sinir Ağları

Sinir ağları, nöronların birleşmesinden meydana gelen yapılardır. Nöronlar ise beyin fonksiyonlarının yerine gelmesini sağlayan temel bilgi işleme birimleridir.



Şekil 3.1 Gerçek bir nöron ve bölümleri [21]

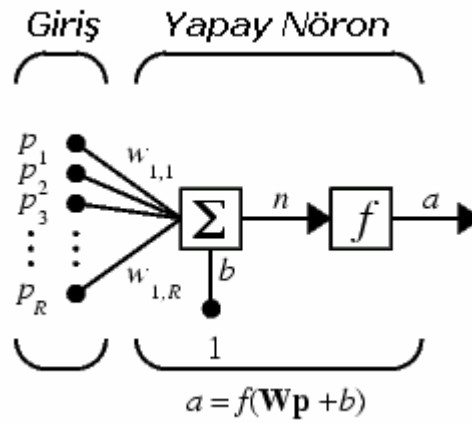
Şekil 1’de insan beyinde bulunan bir nöron örneği gösterilmiştir. İnsan beyindeki toplam nöron sayısı hakkında farklı fikirler bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar bu sayının 10^{11} ila 10^{14} arasında olduğunu savunurken, bazıları ise 86 milyar civarında olduğunu iddia etmiştir [22, 23]. İşte, birinin sinapsının diğerinin dentriti ile temasta olduğu bu nöron dizisi, birbirleri üzerinden çeşitli sinyaller ileterek beyin fonksiyonlarının işlemlerini sağlar.

Bir önceki nörondan alınan bilgi, dentritler tarafından alınarak hücre gövdesinde toplanır. Burada, eldeki sinyalin yeterince güçlü olup olmamasına bağlı olarak bir sonraki nörona iletilip iletilmeyeceğine karar verilir. Akson denilen hat boyunca çeşitli elektriksel yüklere sahip sıvıların arasından geçen bilgi sinyali, son olarak nöronun ucundaki sinapslara ve oradan da bir sonraki nörona iletilir. Sinapslarla

dentritler arasındaki boşluklarda mevcut farklı elektriksel değerler yapay sinir ağlarına ışık tutan öğrenme olgusunun temelini oluşturur.

3.2 Yapay Sinir Hücreleri

Yapay sinir ağları da tıpkı gerçek nöronlar gibi birbirine bağlı olarak çalışan temel birimleri baz alır. Aşağıda, matematiksel hesaplamalarda kullanılan basit bir yapay sinir hücresi (nöron) gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Yapay bir nöron

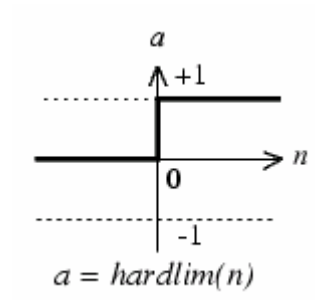
Şekil 2’de istenilen kadar verilen p girişlerinin her biri kendine ait olan w ağırlık çarpanıyla (ki bu ağırlık çarpanı pozitif veya negatif değer taşıyabilir) çarpılarak toplanır. Elde edilen bu toplam değer ise bir aktivasyon fonksiyonuyla çarpılarak hücrenin çıkış değerini oluşturur.

3.2.1 Aktivasyon Fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonunun kullanım amacı, yapay sinir hücresinden elde edilen çıkış değerlerinin normalize edilmiş genliklerinin $[0,1]$ veya $[-1,1]$ aralıklarında ifade edilmesidir [24]. Aktivasyon fonksiyonlarının doğrusal olan ya da olmayan çeşitleri bulunmaktadır. Aşağıda bunlardan en sık kullanılanlar açıklanmıştır.

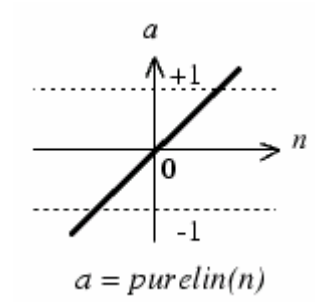
3.2.1.1 Eşik Fonksiyonu

$$a = f(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$



Şekil 3.3 Eşik fonksiyonu

3.2.1.2 Doğrusal fonksiyon



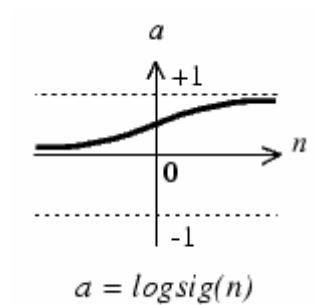
Şekil 3.4 Doğrusal fonksiyon

3.2.1.3 Sigmoid Fonksiyon

Sigmoid fonksiyon, türevi alınabilir olmasının da getirdiği avantajla yapay sinir ağlarında en sıkça kullanılan bir aktivasyon fonksiyonu olmuştur.

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-an}}$$

$$\dot{f}(n) = \alpha \cdot f(n) \cdot [1 - f(n)]$$



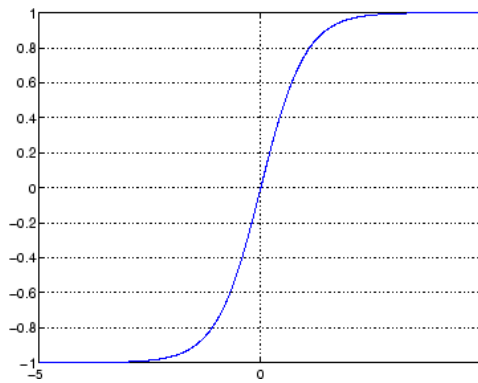
Şekil 3.5 Sigmoid fonksiyon

3.2.1.4 Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu

Aslında sigmoid fonksiyona çok benzeyen hiperbolik tanjant fonksiyonu, daha çok sigmoid fonksiyondan gerekli negatif değerlerin alınamadığı durumlarda kullanılır. Sigmoid fonksiyon sadece 0 ile 1 arasındaki değerleri verirken, hiperbolik tanjant fonksiyonu -1 ile 1 arasındaki değerleri verebilir.

$$f(n) = \frac{e^{an} - e^{-an}}{e^{an} + e^{-an}}$$

$$\dot{f}(n) = \alpha [1 - (f(n))^2]$$



Şekil 3.6 Hiperbolik tanjant fonksiyonu

3.2.2 Önde Gelen Yapay Sinir Ağları Tipleri

Günümüzde yapay sinir ağları alanında kullanılan belli başlı iki tip mevcuttur.

3.2.2.1 Tek Katmanlı İleri Beslemeli YSA

Özetle, sadece bir giriş ve bir çıkış katmanı olan yapay sinir ağlarına ‘tek katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı’ denir. Bu tip ağlarda giriş katmanından elde edilen bilgi, ileri beslemeli bir şekilde doğrudan çıkış katmanına gider ve sonucu oluşturur. Tek katmanlı denilmesinin sebebi, giriş katmanı üzerinde herhangi bir hesaplama işlemi yapılmaması dolayısıyla sadece çıkış katmanının sayılmasıdır.

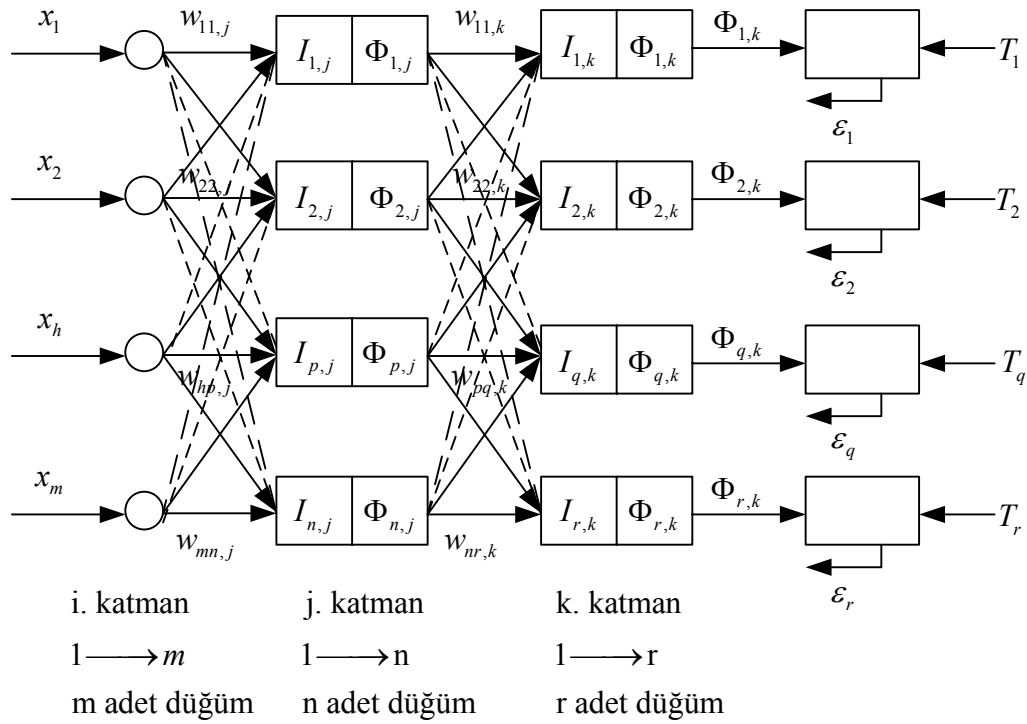
3.2.2.2 Çok Katmanlı İleri Beslemeli YSA

Çıkış katmanının haricinde bir ya da daha fazla gizli katman bulunduran yapay sinir ağlarına ‘çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı’ denir. Bu gizli katmanlarda, giriş ve çıkış katmanları haricinde bazı faydalı hesaplamalar yapılır. Gizli katmanların sayısı arttıkça elde edilen çıkışın kalitesi de artacaktır.

Çok katmanlı ileri beslemeli bir yapay sinir ağında, bir katmanda bulunan nöronlar, bir sonraki katmandaki nöronların hepsine bağlıysa bu ağa ‘tam bağlantılı ağ’ denir. Aksi takdirde ağ ‘kısmi bağlantılı ağ’ olarak adlandırılır.

3.2.3 Geri Yayılma Algoritması

1980’lerin ortalarında ortaya çıkan geri yayılma algoritması, yapay sinir ağlarında sıklıkla kullanılan bir algoritmadır. Amacı, hatanın karesini minimize etmektir. Bunu yapmak için de giriş katmanındaki değerlerin ağırlıklarını, çıkış katmanından elde edilen sonuçlara göre uygun şekilde ayarlamak gerekir. Yapılan iterasyonlar sonucunda istenen hata seviyelerine ulaşıncaya, geri yayılma algoritması başarılı olmuş demektir.



Şekil 3.7 Çok girişli çok çıkışlı bir yapay nöron

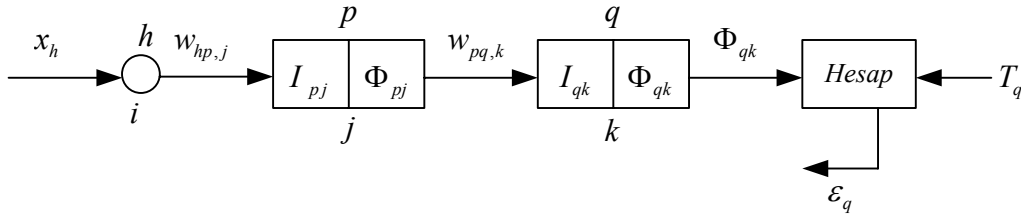
Geri yayılma yöntemi kullanılan bir yapay sinir ağında eğitim prosedürü aşağıdaki gibidir [25]:

1. Ağırlıklar, pozitif veya negatif rastgele küçük sayılar olarak atanır.
2. Giriş vektörü yapay sinir ağının girişine uygulanır.
3. Çıkış değerleri hesaplanır.
4. İstenen çıkış ve elde edilen çıkış arasındaki hata hesaplanır.

5. Yapay sinir ağının ağırlıkları bu hatayı minimize edecek şekilde yeniden ayarlanır.

6. İkinci ve beşinci maddeler arasındaki adımlar, hata istenen seviyenin altına düşene dek tekrarlanır.

Aşağıdaki şekilde j ve k katmanlar, p ve q nöronlar, $\Phi_{p,j}$ ve $\Phi_{q,k}$ çıkışlar, $w_{hp,j}$ ve $w_{pq,k}$ giriş ağırlıkları ve T_q da hedef değerimiz olsun.



Şekil 3.8 Tek girişli tek çıkışlı bir yapay nöron

$$\varepsilon = \varepsilon_q = [T_q - \Phi_{q,k}]$$

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_q^2 = [T_q - \Phi_{q,k}]^2$$

Delta kuralına göre ağırlıktaki değişim, hatanın karesindeki değişimle doğru orantılıdır. Yani,

$$\Delta w_{pq,k} = -\eta_{pq} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial w_{pq,k}} \quad (3.1)$$

Burada η_{pq} , öğrenme oranı adı verilen bir sabittir. Bu kısmi türevi zincir kuralı ile açarsak aşağıdaki sonucu elde ederiz.

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial w_{pq,k}} = \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Phi_{q,k}} \frac{\partial \Phi_{q,k}}{\partial I_{q,k}} \frac{\partial I_{q,k}}{\partial w_{pq,k}} \quad (3.2)$$

Bu denklemin sağ tarafındaki elemanların her biri de aşağıdaki gibi açılabilir.

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \Phi_{q,k}} = -2[T_q - \Phi_{q,k}] \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \Phi_{q,k}}{\partial I_{q,k}} = \alpha \cdot \Phi_{q,k} [1 - \Phi_{q,k}] \quad (3.4)$$

Şekil (3.7)'ye baktığımızda $I_{q,k}$ 'nin orta katmandaki bütün değerlerin bir toplamı olduğunu görürüz. Buna bakarak,

$$I_{q,k} = \sum_{p=1}^n w_{pq,k} \Phi_{p,j} \quad (3.5)$$

...yazılabilir. Bu denklemde $w_{pq,k}$ 'ye göre kısmi türev alırsak, şunu elde ederiz:

$$\frac{\partial I_{q,k}}{\partial w_{pq,k}} = \Phi_{p,j} \quad (3.6)$$

Elde ettiğimiz bu üç değeri denklem (3.2)'de yerine koyarsak, aşağıdaki sonucu buluruz.

$$\frac{\partial \varepsilon_q^2}{\partial w_{pq,k}} = -2\alpha \cdot [T_q - \Phi_{q,k}] \cdot \Phi_{q,k} \cdot [1 - \Phi_{q,k}] \cdot \Phi_{p,j} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_q^2}{\partial w_{pq,k}} = -\delta_{pq,k} \cdot \Phi_{p,j} \quad (3.8)$$

Burada $\delta_{pq,k}$, aşağıdaki gibidir.

$$\delta_{pq,k} = 2\alpha \cdot [T_q - \Phi_{q,k}] \cdot \Phi_{q,k} \cdot [1 - \Phi_{q,k}] \quad (3.9)$$

$$\delta_{pq,k} = 2\varepsilon_q \cdot \frac{\partial \Phi_{q,k}}{\partial I_{q,k}} \quad (3.10)$$

Böylece aşağıdaki sonuç elde edilir.

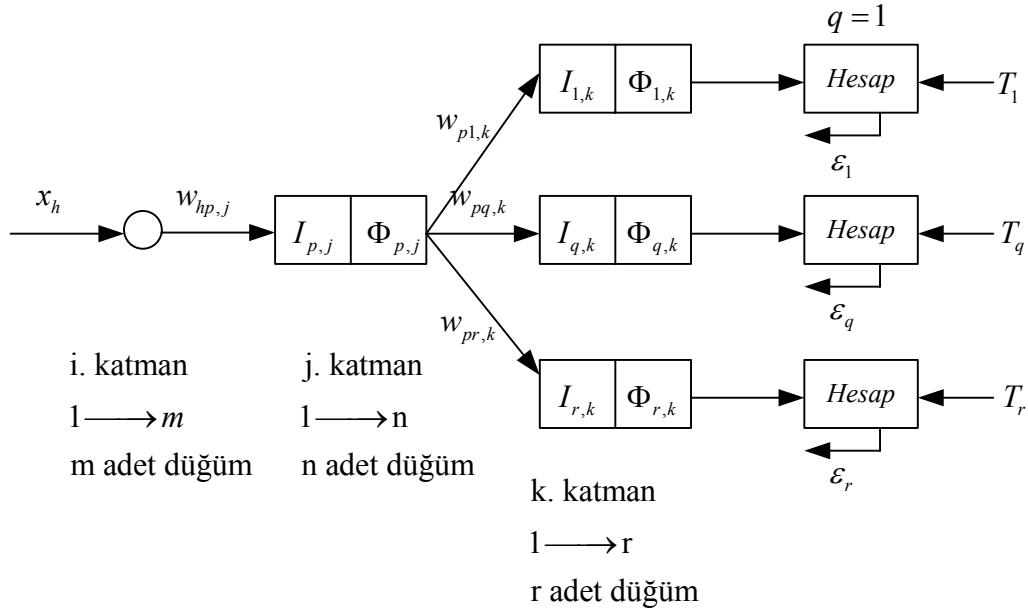
$$\Delta w_{pq,k} = -\eta_{p,q} \frac{\partial \varepsilon_q^2}{\partial w_{pq,k}} = -\eta_{p,q} \cdot \delta_{pq,k} \cdot \Phi_{p,j} \quad (3.11)$$

(3.11) denklemi, bilgisayar hesaplamalarında kullanılmak için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$w_{pq,k}(n+1) = w_{pq,k}(n) - \eta_{p,q} \cdot \delta_{pq,k} \cdot \Phi_{p,j} \quad (3.12)$$

3.2.3.1 Gizli Katman Nöronlarının Ağırlıklarının Hesaplanması

Aşağıdaki şekilde $w_{hp,j}$ 'nin yeni değerlerini bulmak amacıyla geri yayılma algoritmasıyla hesaplanan ε_1 , ε_q ve ε_r hata değerleri görülmektedir.



Şekil 3.9 Tek girişli çok çıkışlı bir yapay nöron

Böylece,

$$\Delta w_{hp,j} = -\eta_{h,p} \frac{\partial \mathcal{E}^2}{\partial w_{hp,j}} = -\eta_{h,p} \sum_{q=1}^r \frac{\partial \mathcal{E}_q^2}{\partial w_{hp,j}} \quad (3.13)$$

...olur. Hatanın karesi de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathcal{E}^2 = \sum_{q=1}^r \mathcal{E}_q^2 = \sum_{q=1}^r \left[T_d - \Phi_{q,k} \right]^2 \quad (3.14)$$

Aynı yukarıda denklem (3.2)'de yaptığımız gibi, denklem (3.13)'ün son elemanını da zincir kuralı ile açabiliriz.

$$\frac{\partial \mathcal{E}^2}{\partial w_{hp,j}} = \sum_{q=1}^r \frac{\partial \mathcal{E}_q^2}{\partial \Phi_{q,k}} \cdot \frac{\partial \Phi_{q,k}}{\partial I_{q,k}} \cdot \frac{\partial I_{q,k}}{\partial \Phi_{p,j}} \cdot \frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} \cdot \frac{\partial I_{p,j}}{\partial w_{hp,j}} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_q^2}{\partial \Phi_{q,k}} = -2(T_q - \Phi_{q,k}) = -2\mathcal{E}_q \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \Phi_{q,k}}{\partial I_{q,k}} = \alpha \cdot \Phi_{q,k} (1 - \Phi_{q,k}) \quad (3.17)$$

$$I_{q,k} = \sum_{p=1}^n w_{pq,k} \cdot \Phi_{p,j} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} = w_{pq,k} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} = \alpha \cdot \Phi_{p,j} [1 - \Phi_{p,j}] \quad (3.20)$$

Tıpkı denklem (3.6)'daki gibi $I_{p,j}$ için aşağıdakini yazabiliriz.

$$I_{p,j} = \sum_{h=1}^m w_{hp,j} \cdot x_h \quad (3.21)$$

Bu son denklemin kısmi türevini aldığımızda ise aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$\frac{\partial I_{p,j}}{\partial w_{hp,j}} = x_h \quad (3.22)$$

Böylece şu sonucu elde etmiş oluruz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial w_{hp,j}} &= \sum_{q=1}^r (-2) \cdot \alpha \cdot (T_q - \Phi_{q,k}) \cdot [\Phi_{q,k} (1 - \Phi_{q,k})] \cdot w_{pq,k} \cdot \alpha \cdot [\Phi_{p,j} (1 - \Phi_{p,j})] \cdot x_h \\ &= - \sum_{q=1}^r \delta_{pq,k} \cdot w_{pq,k} \frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} \cdot x_h \end{aligned} \quad (3.24)$$

(3.24) denkleminde $\delta_{pq,k} \cdot w_{pq,k} \frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} \equiv \delta_{hp,j}$ dersek, denklemi şu halde tekrar

yazabiliriz:

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial w_{hp,j}} = - \sum_{q=1}^r \delta_{hp,j} \cdot x_h \quad (3.25)$$

Bunun sonucunda artık $\Delta w_{hp,j}$ 'yi rahatça hesaplayabiliriz.

$$\begin{aligned} \Delta w_{hp,j} &= -\eta_{h,p} \cdot \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial w_{hp,j}} \\ &= \eta_{h,p} \cdot \sum_{q=1}^r \delta_{pq,k} \cdot w_{pq,k} \cdot \frac{\partial \Phi_{p,j}}{\partial I_{p,j}} \cdot x_h \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\Delta w_{hp,j} = \eta_{h,p} \cdot x_h \cdot \sum_{q=1}^r \delta_{hp,j} \quad (3.27)$$

Tıpkı (3.12) denklemi gibi, (3.27) denklemi de bilgisayar hesaplamalarında kullanılmak için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$w_{hp,j}(n+1) = w_{hp,j}(n) + \eta_{h,p} \cdot x_h \cdot \sum_{q=1}^r \delta_{hp,j} \quad (3.28)$$

4. MANYETOMETRENİN KESTİRİM YÖNTEMLERİYLE KALİBRASYONU

4.1 En Küçük Kareler Yöntemi

“Verilerde önemli hatalar olduğunda polinom interpolasyonu uygun değildir ve ara değerleri tahmin etmek için kullanıldığında tatmin edici sonuçlar vermez. Bu gibi durumlar için çok daha uygun bir strateji, her noktaya uyması gerekmeksizin, verilerin genel eğilimine veya şekline uyan bir yaklaşım fonksiyonu üretmektir. Bunu yapmanın bir yolu, veri noktaları ve eğri arasındaki farklılıkları en aza indiren bir eğri türetmektir” [26]. Buna en küçük kareler regresyonu denir. En küçük kareler yönteminin doğrusal regresyon, polinom regresyonu, çoklu doğrusal regresyon, genel doğrusal en küçük kareler ve doğrusal olmayan regresyon gibi çeşitleri bulunsa da bu çalışmada sadece doğrusal regresyon kısmına değinilecektir.

Elimizde aşağıdaki gibi bir dizi sayı çifti olduğunu varsayalım.

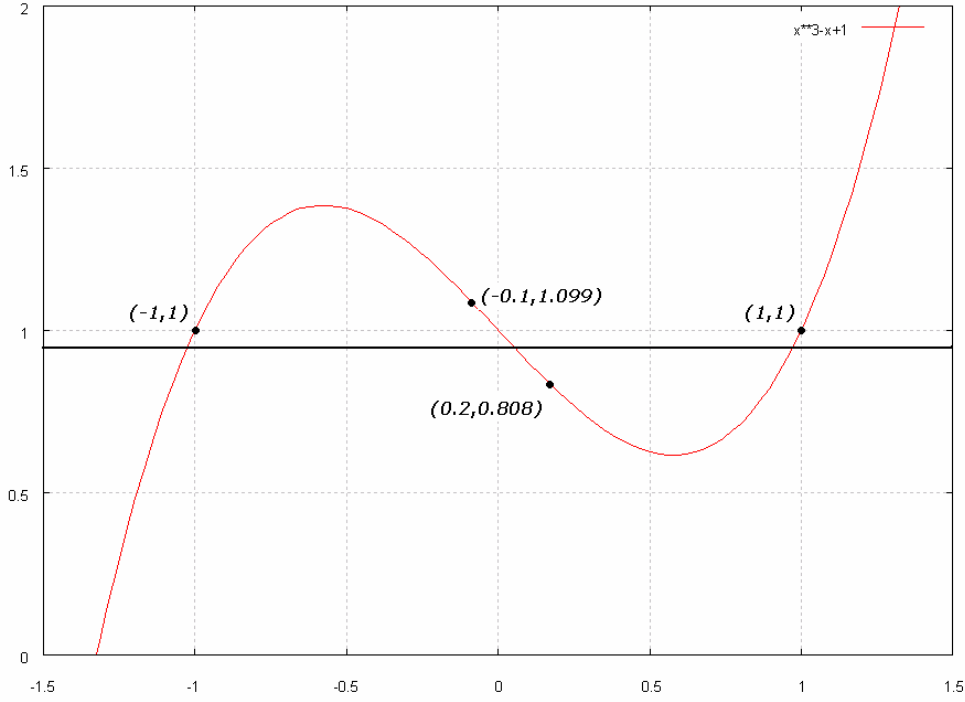
$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

Bu sayı çiftlerinin, ikincisi birincisinin bir fonksiyonu olacak şekilde oluşturulduğunu düşünelim. Yani,

$$f(x_j) \approx y_j, j = 1, \dots, n$$

...olsun. Bu noktalardan geçecek olan fonksiyonun tipi genellikle polinom, sinüs/kosinüs veya üstel fonksiyonlar olur. Ancak bazı durumlarda elimizdeki probleme uyan çözüm bu fonksiyonlar olmayabilir.

Aşağıdaki dört nokta çiftini düşünelim.



Şekil 4.1 En küçük kareler yöntemiyle yapılmış bir doğru uydurma örneği.

Şekil 4.1’de $f(x) = x^3 - x + 1$ polinomuna denk gelen eğri grafiği görülmektedir. Ancak verilen dört noktaya dikkatlice bakıldığında sanki bir doğrunun üzerindeymiş hissine kapılabiliriz. Bu sebepten dolayı, eğer bu değerler bir deneyde elde edilmişler ve bu deney noktalarının doğrusal bir ilişki içinde olduklarını işaret ediyorsa, mevzu bahis noktaların bir doğruya uydurulmaları daha yerinde olur. İşte bu uydurma işlemi matematikte en küçük kareler yöntemi ile gerçekleştirilir.

En küçük kareler yöntemi şunu der: $y = a + bx$ doğrusu, $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ noktaları arasına öyle bir konumda yerleştirilmelidir ki, bu noktaların doğruya olan uzaklıklarının karesinin toplamı en az olmalıdır. (Burada uzaklık dikey ekseninde ölçülmektedir.)

Bu doğru üzerindeki bir noktanın apsisi x_j , ordinatı $a + bx_j$ ’dir ve (x_j, y_j) noktasına olan uzaklığı da $|y_j - a - bx_j|$ ’dir. Bu durumda karelerin toplamı şöyle gösterilebilir:

$$q = \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2 \quad (4.1)$$

Şimdi q ’nun a ve b ’ye göre kısmi türevlerini alalım ve bunları sıfıra eşitleyelim.

$$\begin{aligned}\frac{\partial q}{\partial a} &= -2 \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j) = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial b} &= -2 \sum_{j=1}^n x_j (y_j - a - bx_j) = 0\end{aligned}\tag{4.2}$$

Böylece q 'yu en küçük hale getireceğiz. Toplama sembolünü basitleştirerek yazarsak (Bundan itibaren aksi belirtilmediği sürece toplamalar $j=1$ 'den n 'ye kadar olacaktır.):

$$\begin{aligned}\sum y_j - \sum a - \sum bx_j &= 0 \\ \sum x_j y_j - \sum ax_j - \sum bx_j^2 &= 0\end{aligned}\tag{4.3}$$

Burada $\sum a$ yerine na yazarak elimizdeki denklemleri iki bilinmeyenli bir denklem setine dönüştürelim.

$$\sum y_j = na + b \sum x_j \tag{4.4a}$$

$$\sum x_j y_j = a \sum x_j + b \sum x_j^2 \tag{4.4b}$$

En küçük kareler yönteminde (4.4) numaralı denklem çiftine ‘normal denklemler’ denir. Bunları eşzamanlı olarak çözdüğümüzde ise aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$b = \frac{n \sum x_j y_j - \sum x_j \sum y_j}{n \sum x_j^2 - (\sum x_j)^2} \tag{4.5}$$

(4.5) numaralı denklemi (4.4a) ile birlikte çözersek, şu sonucu elde ederiz:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \tag{4.6}$$

Bu (4.6) numaralı denklemde $\bar{y}$ ve $\bar{x}$ değerleri sırasıyla y ve x 'in ortalaması anlamında kullanılmıştır.

4.2 Kalman Filtresi

İlk kez 1960 yılında, Rudolf Emil Kalman'ın yayınladığı ünlü makalesinde duyurulan Kalman filtresi, havacılık ve uzay mühendisliği alanında sıkça kullanılan bir yöntemdir [27]. Bu filtre vasıtasıyla eldeki gürültülü veya eksik sinyaller daha kullanışlı bir hale dönüştürülebilir.

Kalman filtresi aşağıdaki amaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılır:

1. Ölçüm parametrelerinin küçültülmesi ve ölçüm hatalarının daha doğru değerlerinin bulunması
2. Çeşitli bilgi kaynaklarının kompleksleştirilmesi
3. Uçağın veya uzay aracının ölçülmeyen durum vektörünün ölçülmeyen parametrelerinin belirlenmesi
4. Uçakta veya uzay aracında meydana gelen bozuntuların teşhisi [28]

Lineer ayrık zamanlı dinamik sistemler için sistemin durum ve gözlem denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Gw_k \quad (4.7)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.8)$$

Bu denklemlerdeki w_k ve v_k değişkenleri sistemin ve gözlemin sırasıyla r ve s boyutlu bozuntu vektörleridir. Bu vektörlerin birbirinden bağımsız, beyaz renkli ve normal dağılımda (Gauss dağılımında) olduğunu kabul edelim.

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (4.9)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (4.10)$$

(4.7) numaralı denklemde,

x_{k-1} : Sistemin n boyutlu durum vektörüdür.

A : Durum vektörünün $n \times n$ boyutlu transfer matrisidir ve önceki adım $k-1$ ile şimdiki adım k arasındaki ilişkiyi sağlar.

B : İsteğe bağlı $n \times l$ boyutundaki kontrol girişidir.

G : Sistemin bozuntusunun $n \times r$ boyutlu transfer matrisidir.

(4.8) numaralı denklemde,

H : Sistemin $m \times n$ boyutlu gözlem matrisidir ve durum denklemiyle gözlem arasındaki ilişkiyi sağlar.

Durum vektörümüz $\hat{x}_k^- \in \mathcal{R}^n$, bizim k anındaki *a priori* (yani bir önceki) durum vektörü tahminimiz olsun (eksi üst indisine dikkat edelim). Bunu k anından önce verilen bilgilerle elde ettiğimizi düşünelim. $\hat{x}_k \in \mathcal{R}^n$ ise k adımında z_k gözlemiyle

elde edilen *a posteriori* (yani bir sonraki) durum vektörü tahminimiz olsun. Buna dayanarak *a priori* ve *a posteriori* tahmin hatalarını şöyle yazabiliriz:

$$e_k^- \equiv x_k - \hat{x}_k^- \quad (4.11)$$

$$e_k \equiv x_k - \hat{x}_k \quad (4.12)$$

Böylece *a priori* ve *a posteriori* tahmin hatası kovaryansları sırasıyla aşağıdaki gibi olur:

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (4.13)$$

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (4.14)$$

Şimdi Kalman filtresi algoritmasının denklemlerini çıkaralım. $\hat{x}_k$ 'nin *a posteriori* değerini bulmak için *a priori* $\hat{x}_k^-$ değeri ve gözlem vektörü gerçek değeri z_k ve tahmini değeri $H\hat{x}_k^-$ arasındaki farktan oluşan bir fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.15)$$

Yukarıdaki denklemde $(z_k - H\hat{x}_k^-)$ değeri, Kalman filtresinin innovasyon sürecini göstermektedir.

(4.15) numaralı denklemdeki Kalman kazancı K , (4.14) numaralı denklemdeki *a posteriori* hata kovaryansını minimize etmektedir. Bu minimizasyon işlemi gerçekleştirmek için (4.15) numaralı denklemi (4.12) numaralı denklemde yerine koyalım. Ardından bunu (4.14) numaralı denkleme yerleştirip P_k matrisinin izinin K 'ye göre türevini alıp sıfıra eşitlemek ve buradan K 'yi çekmek gerekir.

$$\begin{aligned} e_k &= x_k - \hat{x}_k \\ &= x_k - \left(\hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \right) \\ &= x_k - \left(\hat{x}_k^- + K(Hx_k + v_k - H\hat{x}_k^-) \right) \\ &= (I - KH)(x_k - \hat{x}_k^-) - Kv_k \\ e_k &= (I - KH)e_k^- - Kv_k \end{aligned}$$

Şimdi bunu (4.14) nolu denklemde yerine koyalım.

$$\begin{aligned}
P_k &= E[e_k e_k^T] \\
&= E\left[\left((I - KH)e_k^- - Kv_k\right)\left((I - KH)e_k^- - Kv_k\right)^T\right]
\end{aligned} \tag{4.16}$$

(4.16) numaralı denklemde v_k değeri e_k^- 'den bağımsızdır ve ortalaması sıfırdır. Yani $E[v_k] = 0$ 'dır. Dolayısıyla birinci dereceden v_k 'li terimleri sıfıra eşitleyebiliriz [29].

$$\begin{aligned}
P_k &= E\left[\left((I - KH)e_k^-\right)\left((I - KH)e_k^-\right)^T\right] + E\left[(Kv_k)(Kv_k)^T\right] \\
&= (I - KH) \cdot \underbrace{E[e_k^- e_k^{-T}]}_{P_k^-} \cdot (I - KH)^T + K \cdot \underbrace{E[v_k v_k^T]}_R \cdot K^T \\
&= (I - KH) \cdot P_k^- \cdot (I - KH)^T + K \cdot R \cdot K^T \\
P_k &= P_k^- - P_k^- \cdot H^T \cdot K^T - K \cdot H \cdot P_k^- + K(H \cdot P_k^- \cdot H^T + R)K^T
\end{aligned}$$

Son olarak P_k 'nin izinin türevini alalım ve sıfıra eşitleyelim.

$$\frac{\partial \text{tr}(P_k)}{\partial K} = -2(H \cdot P_k^-)^T + 2K(H \cdot P_k^- \cdot H^T + R) = 0 \tag{4.17}$$

(4.17) numaralı denklemde K 'yi çekersek aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$K = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} = \frac{P_k^- \cdot H^T}{H P_k^- H^T + R} \tag{4.18}$$

(4.18) numaralı denklemde R sıfıra gittikçe, Kalman kazancı K , innovasyon sürece daha çok etki eder. Yani,

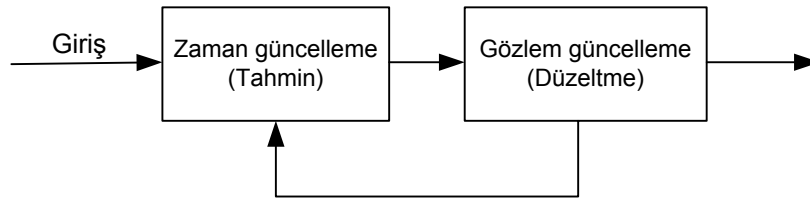
$$\lim_{R_k \rightarrow 0} K = H^{-1} \tag{4.19}$$

Ancak *a priori* tahmin hatası kovaryansı P_k^- sıfıra yakınlaştıkça K kazancı innovasyon sürece daha az etki eder. Yani,

$$\lim_{P_k^- \rightarrow 0} K = 0 \tag{4.20}$$

Bu, başka bir deyişle şöyle özetlenebilir: R sıfıra yakınlaştıkça gerçek gözlem vektörü z_k 'ye daha çok, tahmini gözlem $H\hat{x}_k^-$ 'ye ise daha az güvenilir. *A priori* tahmin hatası kovaryansı P_k^- sıfıra yaklaşıırken ise tam tersi olarak gerçek gözlem z_k 'ye daha az, tahmini gözlem $H\hat{x}_k^-$ 'ye ise daha çok güvenilir.

Kalman Filtresi'ni oluşturan denklemleri zamanı güncelleyen denklemler (tahmin denklemleri) ve gözlemi güncelleyen denklemler (düzeltme denklemleri) olarak iki grupta ele alabiliriz. Zamanı güncelleyen denklemler, durum vektörünü ve hata kovaryansı kestirimlerini zamanda ileriye doğru öteleyerek bir sonraki zaman adımında gerekli olacak *a priori* değerleri yaratırlar. Gözlemi güncelleyen denklemler ise geri besleme yaratarak daha iyi bir *a posteriori* değer elde edilmesine yardımcı olur.



Şekil 4.2 Kalman filtresinin çevrimi.

Kalman filtresinin adımları aşağıdaki gibidir:

Durum vektörünün *a priori* kestirimi:

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (4.21)$$

A priori hata kovaryansı:

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4.22)$$

Kalman kazancı:

$$K = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (4.23)$$

Durum vektörünün güncellenmesi:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.24)$$

Hata kovaryansının güncellenmesi:

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (4.25)$$

Yukarıda (4.21) ve (4.22) numaralı denklemler zamanı, gerisi ise gözlemi güncellemektedir. Zaman güncelleme yani tahmin kısmında durum vektörü ve hata kovaryansının *a priori* değeri kestirilir ve ardından gözlem güncelleme yani düzeltme aşamasına girilir. Burada (4.23) numaralı denklemde Kalman kazancı

hesaplandıktan sonra (4.24) numaralı denklemde durum vektörü ve (4.25) numaralı denklemde hata kovaryansının *a posteriori* değerleri bulunur.

4.3 Genişletilmiş Kalman Filtresi

Doğrusal sistemlerde başarıyla uygulanan Kalman filtresi, maalesef gerçek hayatta karşımıza çıkan örneklerle daha yakın olan doğrusal olmayan modellerde aynı verimle çalışmamaktadır. Bu sebepten dolayı Kalman filtresinin bu doğrusal olmayan sistemler için modifiye edilmesi gerekir.

4.2 numaralı bölümde olduğu gibi sistemimizin durum ve gözlem denklemlerinin sırasıyla aşağıdaki gibi olduğunu varsayalım.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \quad (4.26)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (4.27)$$

Bu denklemlerde w ve v değerleri sırasıyla süreç ve gözlem gürültüsüdür. Burada f ve h fonksiyonları bir öncesi tahminlerden durum vektörünü ve gözlemi bulmaya çalışır. Ancak bunların algortimada kullanılabilmesi için birinci mertebeden kısmi türevlerinin alınması gerekir.

$$F_u = \left. \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \quad (4.28)$$

$$H_u = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \quad (4.29)$$

Böylece, başlangıç $\hat{x}_{k-1}$ ve P_{k-1} değerlerinin girilmesiyle genişletilmiş Kalman filtresinin adımları aşağıdaki gibi olur:

Durum vektörünün *a priori* kestirimi:

$$x_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \quad (4.30)$$

A priori hata kovaryansı:

$$P_k^- = F_{u_k} P_{k-1} F_{u_k}^T + Q_{k-1} \quad (4.31)$$

Kalman kazancı:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4.32)$$

Durum vektörünün güncellenmesi:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-)) \quad (4.33)$$

Hata kovaryansının güncellenmesi:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (4.34)$$

Tıpkı doğrusal Kalman filtresinde olduğu gibi burada da (4.30) ve (4.31) nolu denklemler zamanı, gerisi ise gözlemi güncellemektedir.

5. SİMÜLASYONLAR

5.1 Yapay Sinir Ağlarıyla Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde yapay sinir ağları yardımıyla Dünya'nın hatalı ölçülen manyetik alanının düzeltilmesi ve istikamet açısının tahmini üzerinde durulacaktır. YSA simülasyonu için Wang ve Gao'nun [15] numaralı kaynakta işaret edilen makalesindeki yöntemden yararlanılmış ve bu yöntemin simülasyonu MATLAB'in içinde yer alan *Neural Network Toolbox* vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan yapay sinir ağı, geri yayılım algoritmasıyla çalışan, gizli katmanında 5 nöron bulunan iki katmanlı bir ağıdır. Doğrusal bir dönüşüm işlemi gerçekleştiren bu YSA'nın transfer fonksiyonu olarak, varsayılan hiperbolik tanjant fonksiyon yerine doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. YSA'nın giriş ve çıkışları olarak bölüm 2.2'de anlatılan $\hat{M}_{xH}$ ve $\hat{M}_{yH}$ değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bu “eğitilmiş” manyetik alan değerleriyle istikamet açısının gerçek değerleri modellenmiş ve gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar sırasında verilere uygulanan sapma ve ölçek katsayısı değerleri her seferinde rasgele olarak verilmiştir. Bunlardan x ve y için olan sapma değerleri, Dünya'nın manyetik alanının M_{xH} ve M_{yH} değerlerinin rasgele küçük katlarıdır. Ölçek katsayıları ise x ve y eksenleri için her ölçümde 0,5 ila 1,0 sayıları arasında değişmektedir. Gürültü olarak, x ekseninde %3,5'lik bir standart sapma ayrıca eklenmiştir. En son olarak da elde edilen alfa açısı (α) değerlerine rasgele bir eğilme açısı (δ) eklenerek hatalı istikamet açıları bulunmuştur. Kullanılan YSA'nın amacı bu rasgele eklenen eğilme açılarını düzelterip mümkün olan en doğru istikamet açılarını elde etmektir.

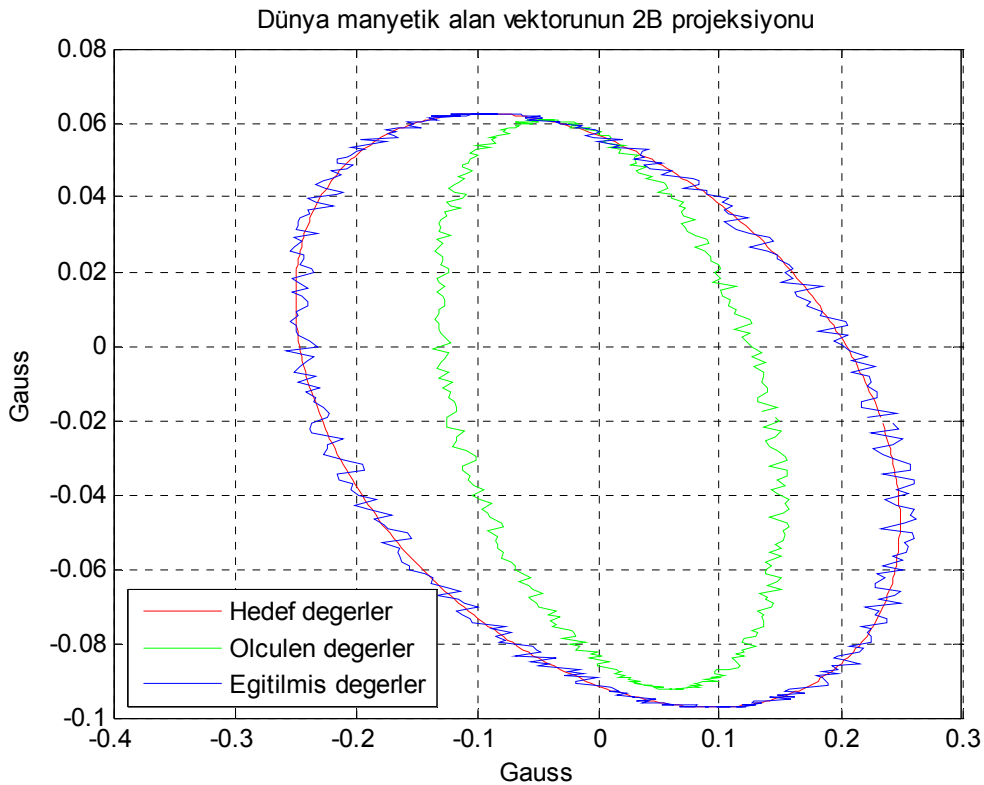
İlk olarak Dünya'nın manyetik alan değerlerinin iki boyutlu düzleme projeksiyonu çizdirilmiştir. Yatay düzlemde, belli sapma, ölçek katsayısı ve gürültü değerleriyle yaratılan ve Şekil 5.1'de yeşil renk ile gösterilen manyetik alan, düzeltmek istediğimiz hatalı ölçümleri oluşturur. Şekil 5.1'de kırmızı renk ile gösterilen değerler ise Dünya'nın gerçek manyetik alanıdır. Mavi ile gösterilen değerler ise YSA ile elde edilen eğitilmiş sonuçlardır.

Şekil 5.2’de ise alfa açısının 360 derece boyunca değişimleri verilmiştir. Burada sözü geçen değişimler, alfanın eğitilmiş, hedef (gerçek) ve hatalı ölçümlü değerlere göre hangi değerleri aldığını göstermektedir.

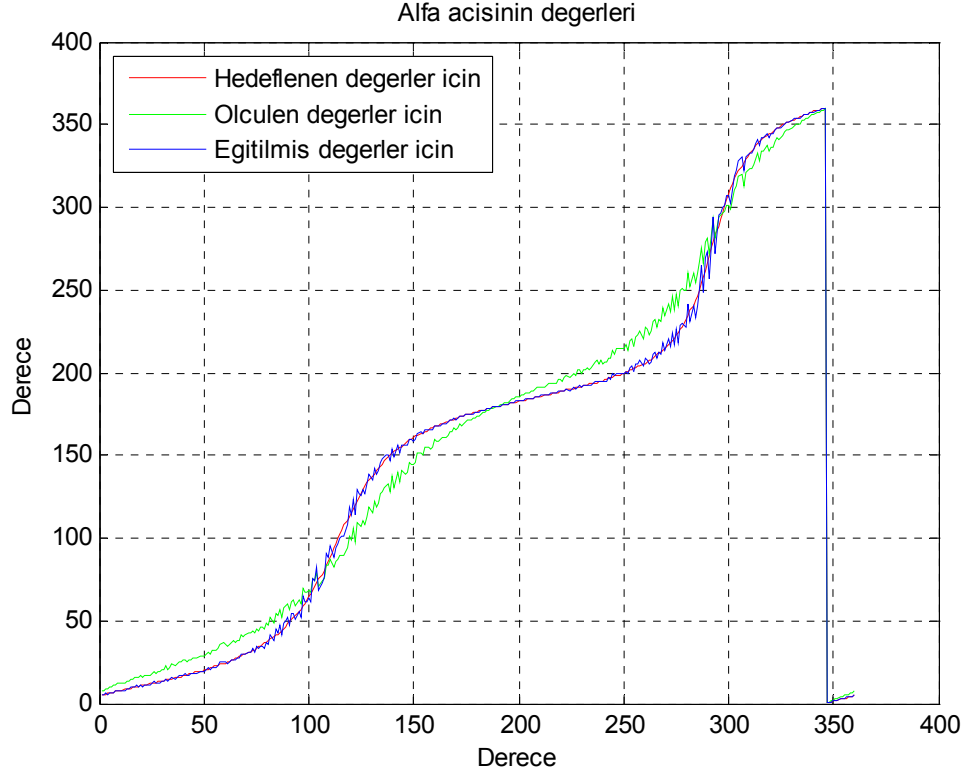
2.2 numaralı bölümden hatırlanacağı üzere, (2.3) numaralı denklemden elde edilen alfa açısı uygun eğilme açısı ile toplanarak ya da çıkartılarak uydunun istikamet açısını vermekteydi. Şekil 5.3’te ise istikamet açısının 360 derece boyunca değişimi verilmiştir.

Aşağıdaki örnek grafikler için kullanılan x ve y sapma değerleri sırasıyla $6,2945 \cdot 10^{-4}$ ve $8,1158 \cdot 10^{-4}$, x ve y ölçek katsayısı değerleri ise sırasıyla 0,5635 ve 0,9567’dir. Hesaplamalar sırasında ayrıca $-9,59^\circ$ ’lik bir hatalı eğilme açısı kullanılmıştır.

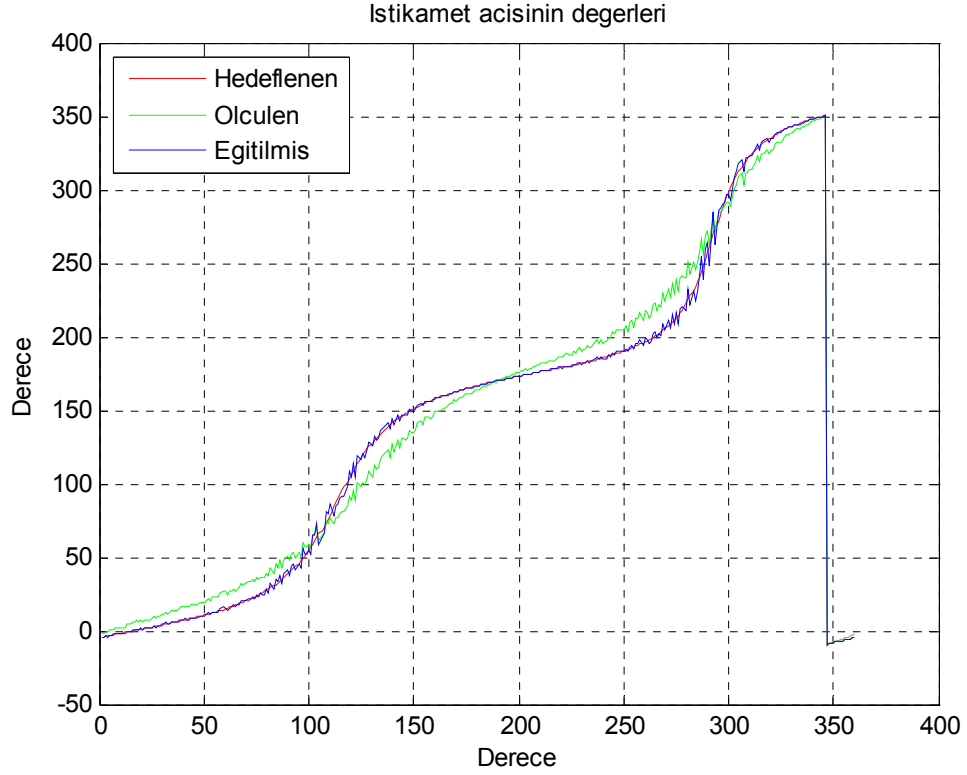
Üç boyutlu manyetik alan vektörünün 2B düzleme projeksiyonu için kullanılan açı değerleri ise $\theta = 11,7$ ve $\varphi = 9,76$ ’dır.



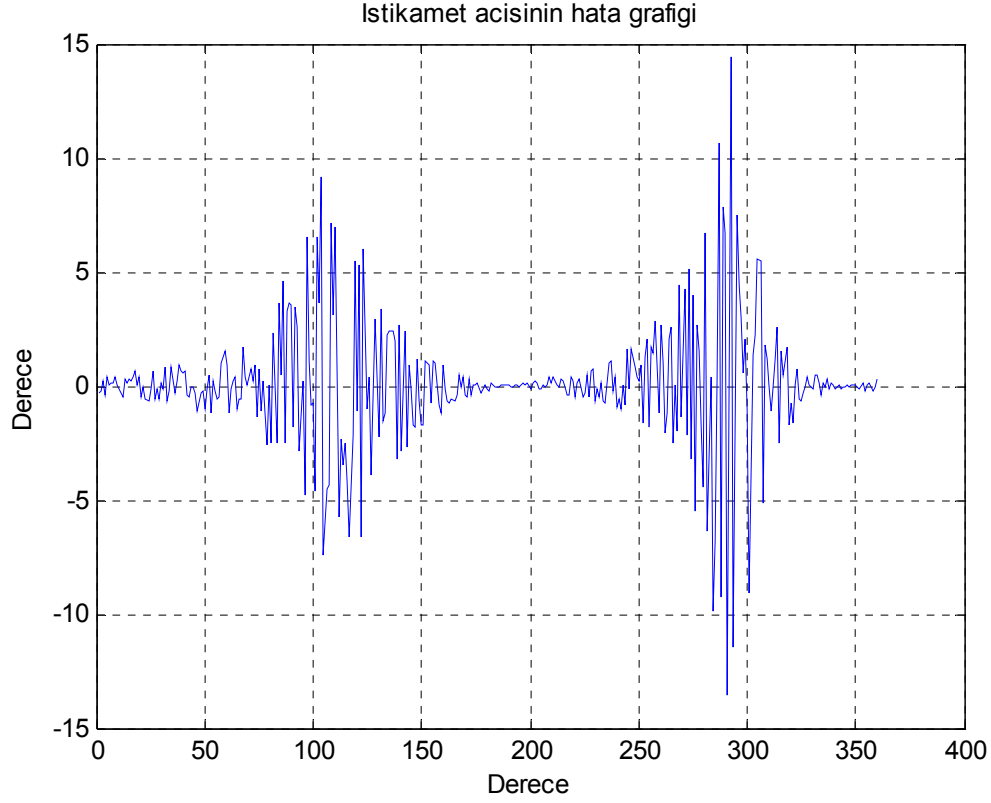
Şekil 5.1 2B manyetik alan vektörünün YSA ile eğitilmiş değerlerinin, hedef değerler ve ölçülen değerler ile karşılaştırılması



Şekil 5.2 Hedef, ölçülen ve eğitilmiş alfa açısının 360 derece boyunca değişimi



Şekil 5.3 Hedef, ölçülen ve eğitilmiş istikamet açılarının 360 derece boyunca değişimi



Şekil 5.4 Hedeflenen ve eğitilmiş istikamet açılarının arasındaki hatanın 360 derece boyunca değişimi

Aşağıda, Çizelge 5.1’de YSA yöntemiyle elde edilen ortalama ve karekök ortalama hatalarını görülebilir. 10 testin ardından elde edilen ortalama istikamet açısı hatası -0,05909° ve karekök ortalama hatası ise 2,48567° olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.1 Kalibre edilmiş istikamet açısının hata değerleri

	Sapma-x (10 ⁻⁴)	Sapma-y (10 ⁻⁴)	Ölçek Katsayısı-x	Ölçek Katsayısı-y	Eğilme Açısı	Ortalama Hata	Karekök Ortalama
1	-5,3602	1,678	0,5071	0,7043	-11,1278	-0,1947	3,0436
2	5,4376	6,9573	0,6848	0,8384	-24,3844	-0,2315	5,1284
3	-4,3933	-3,4561	0,8492	0,6577	-7,0139	0,0587	1,6497
4	-8,5361	6,1545	0,5427	0,9477	-10,7719	0,2602	2,7031
5	8,6427	5,2731	0,9483	0,8675	-1,4689	-0,0951	1,7271
6	-7,6975	7,0056	0,9894	0,7656	7,2697	-0,1629	2,2474
7	-5,8534	-7,2501	0,9333	0,8875	21,4470	0,0153	1,4950
8	-2,4736	-5,5239	0,9637	0,6823	0,0786	-0,0282	1,6565
9	-8,2829	-4,7913	0,8830	0,9175	2,2540	-0,0947	1,7888
10	4,2572	-8,7681	0,5226	0,9651	4,9751	-0,1180	3,4171
						<u>-0,05909</u>	<u>2,48567</u>

5.2. Kestirim Yöntemleriyle Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada manyetometre kalibrasyonu için iki değişik kestirim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler en küçük kareler yöntemi ve genişletilmiş Kalman filtresidir. Yapılan ilk kestirimde EKK ile elde edilen sapma formülü, herhangi bir filtreleme kullanılmadan, sadece yapılan “ölçüm simülasyonu” ile kullanılmış, yapılan ikinci ve üçüncü kestirimlerde de aynı sapma formülü bu kez ölçüm simülasyonu sonucu GKF’den elde edilen değerlerle kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci ve üçüncü kestirimlerin farkı, yapılan ölçümlere sırasıyla durum vektörünün bütün elemanlarının ve sadece son üç elemanın (açısal hızların) girmesidir.

Bu kestirim yöntemlerinde kullanılan model, bir yere yakın yörünge uydusunun kütle merkezi etrafında açısal hareketinin simülasyonu için kullanılan modeldir ve aşağıdaki denklemlerden oluşur.

$$\begin{aligned}
 \varphi_{i+1} &= \varphi_i + \Delta t \left(\omega_{x_i} \cos \psi_i - \omega_{y_i} \sin \psi_i \right) \\
 \theta_{i+1} &= \theta_i + \Delta t \left(\omega_{x_i} \frac{\sin \psi_i}{\cos \varphi_i} + \omega_{y_i} \frac{\cos \psi_i}{\cos \varphi_i} - \omega_{yor_i} \right) \\
 \psi_{i+1} &= \psi_i + \Delta t \left[\tan \varphi_i \left(\omega_{x_i} \sin \psi_i + \omega_{y_i} \cos \psi_i \right) + \omega_{z_i} \right] \\
 \omega_{x_{i+1}} &= \omega_{x_i} + \frac{\Delta t}{J_x} \left[\omega_{z_i} \omega_{y_i} (J_y + J_z) + Moment_x + H_m \omega_{z_i} \right] \\
 \omega_{y_{i+1}} &= \omega_{y_i} + \frac{\Delta t}{J_y} \left[\omega_{x_i} \omega_{z_i} (J_z + J_x) + Moment_y \right] \\
 \omega_{z_{i+1}} &= \omega_{z_i} + \frac{\Delta t}{J_z} \left[\omega_{x_i} \omega_{y_i} (J_x + J_y) + Moment_z + H_m \omega_{x_i} \right]
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Burada,

φ : Yalpalama açısı

θ : Yunuslama açısı

ψ : Sapma açısı

ω_x , ω_y ve ω_z : X, Y ve Z eksen etrafındaki açısal hız

H_m : Momentum tekerleklerinin momenti

ω_{yor} : Uydunun yörünge hızı

J_x , J_y ve J_z : X, Y ve Z eksenlerindeki atalet momentleri

Δt : Ayrık zaman dilimi

$Moment_x$, $Moment_y$ ve $Moment_z$: X, Y ve Z eksenlerindeki dış etken momentler

Bu formüllerde kullanılacak sabit değerler ve başlangıç değerleri ise aşağıda verilmiştir.

$$H_m = 0,85 \text{ N.m}$$

$$\omega_{yor} = 0,00111 \text{ rad/s}$$

$$J_x = 983 \text{ kg.m}^2$$

$$J_y = 985 \text{ kg.m}^2$$

$$J_z = 84 \text{ kg.m}^2$$

$$\Delta t = 2,5 \text{ s}$$

$$Moment_x = 0,000001 \text{ N.m}$$

$$Moment_y = -0,000001 \text{ N.m}$$

$$Moment_z = 0,0005 \text{ N.m}$$

$$\varphi_0 = -0,02 \text{ rad}$$

$$\theta_0 = 0,02 \text{ rad}$$

$$\psi_0 = 0,006 \text{ rad}$$

$$\omega_{x_0} = \omega_{y_0} = \omega_{z_0} = 0,0002 \text{ rad/s}$$

(5.1) eşitliğindeki denklemler ışığında, kullanılacak durum vektörümüzü de aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$x = [\varphi \quad \theta \quad \psi \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$$

5.2.1 En Küçük Kareler Yönteminin Probleme Uygulanması

En küçük kareler yöntemini uygulamak için öncelikle üç boyutlu manyetik alan vektörünü bir transfer matrisinden geçirip, ölçüm manyetik alan vektörünü bulmamız

gerekir. Belirli bir anda bir uydunun etrafındaki manyetik alan ölçümünün değerini bulmak için şu eşitlik kullanılır:

$$M_{ölçüm} = A \cdot M + b + v \quad (5.2)$$

Bu denklemde,

A: Yörünge eksen takımından cisim eksen takımına geçişi sağlayan (3x3)'lük transfer matrisi

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi & -\sin\theta \\ -\sin\varphi\cos\psi + \sin\psi\sin\theta\cos\varphi & \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & \sin\psi\cos\theta \\ \sin\psi\sin\varphi + \sin\theta\sin\psi\cos\varphi & -\cos\varphi\sin\psi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix}$$

M: Dünya'nın (3x1) boyutundaki manyetik alan vektörü (x, y ve z bileşenlerinden oluşur.)

b: (3x1)'lik sapma vektörü (Dünya'nın manyetik alan vektörünün ilk değerlerinin %10'u kadar verilmiştir.)

v: (3x1)'lik rasgele bozuntu vektörüdür. Bu vektörü yaratmada MATLAB'ın *randn* komutu kullanılmıştır. (*Randn*, ortalaması sıfır, standart sapması bir olan rasgele sayılar üreten bir komuttur.)

(5.2) denklemine göre uygun en küçük karelerin toplamı aşağıdaki gibi bulunur:

$$t = \sum_{i=1}^n (M_{ölçüm} - A \cdot M - b)^2 \quad (5.3)$$

Kestirim yöntemleri çalışırken (5.2) denkleminin tahmin edilecek tek elemanı *b* olduğu için, başka bir deyişle (5.2) denkleminde sadece bir bilinmeyen olduğu için EKK yöntemiyle elde edeceğimiz denklem sayısı da bir olacaktır. Buradan hareketle *t*'nin *b*'ye göre kısmi türevini alıp sıfıra eşitlediğimizde sapma değeri *b*'yi aşağıdaki gibi buluruz.

$$\frac{\partial t}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (M_{ölçüm} - A \cdot M - b) = 0$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ölçüm} - \sum_{i=1}^n A \cdot M}{n} \quad (5.4)$$

(5.4) denklemi bu çalışmada kullanılan kestirim yöntemlerinde sapma değeri b 'yi elde etme formülü olarak kullanılacaktır.

5.2.2 Genişletilmiş Kalman Filtresinin Probleme Uygulanması

Bölüm 4.2'de anlatılan genişletilmiş Kalman filtresi için bu çalışmada aşağıdaki matrisler kullanılmıştır.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{bmatrix}$$

Ölçüm hatasının korelasyon matrisi R , varyansların karelerinin (σ^2) köşegen boyunca yerleşmesinden oluşur.

$$R = \begin{bmatrix} (0,0289)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (0,0289)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (0,0289)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (0,0069)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (0,0069)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (0,0069)^2 \end{bmatrix}$$

Birbirlerine eşit olan G ve I matrisleri ise (6x6)'lık bir birim matristir.

$$G = I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Durum vektörünün başlangıç koşulları ise aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$x_0 = [-0,02 \quad 0,02 \quad 0,006 \quad 0,0002 \quad 0,0002 \quad 0,0002]^T$$

Doğrusal olmayan modelimizi doğrusallaştırmak için kısmi türev matrisi (jakobyen)

F_u 'yu bulmamız gerekmektedir.

$$F_u = \frac{\partial f(x_{k-1}, u_{k-1})}{\partial x} \bigg|_{x=\hat{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \omega_z} \\ \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \omega_z} \\ \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \omega_z} \\ \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\omega}_x}{\partial \omega_z} \\ \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\omega}_y}{\partial \omega_z} \\ \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \phi} & \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \theta} & \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \psi} & \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \omega_x} & \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \omega_y} & \frac{\partial \hat{\omega}_z}{\partial \omega_z} \end{bmatrix}$$

$$F_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta t \left(\omega_x(i) \cdot \cos[\psi(i)] + \omega_y(i) \cdot \sin[\psi(i)] \right) & \Delta t \cdot \cos[\psi(i)] & -\Delta t \cdot \sin[\psi(i)] & 0 \\ \Delta t \left(\omega_x(i) \cdot \sin[\psi(i)] + \omega_y(i) \cdot \cos[\psi(i)] \right) \cdot \frac{\tan[\varphi(i)]}{\cos[\varphi(i)]} & 1 & \Delta t \left(\omega_x(i) \cdot \frac{\cos[\psi(i)]}{\cos[\varphi(i)]} - \omega_y(i) \cdot \frac{\sin[\psi(i)]}{\cos[\varphi(i)]} \right) & \Delta t \cdot \frac{\sin[\psi(i)]}{\cos[\varphi(i)]} & \Delta t \cdot \frac{\cos[\psi(i)]}{\cos[\varphi(i)]} & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{1}{\cos^2[\varphi(i)]} \left(\omega_x(i) \cdot \sin[\psi(i)] + \omega_y(i) \cdot \cos[\psi(i)] \right) & 0 & 1 + \Delta t \cdot \tan[\varphi(i)] \cdot \left(\omega_x(i) \cdot \cos[\psi(i)] + \omega_y(i) \cdot \sin[\psi(i)] \right) & \Delta t \cdot \tan[\varphi(i)] \cdot \sin[\psi(i)] & \Delta t \cdot \tan[\varphi(i)] \cdot \cos[\psi(i)] & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{\Delta t}{J_x} \cdot \omega_z(i) \cdot (J_y - J_z) & \frac{\Delta t}{J_x} \cdot \left[\omega_y(i) \cdot (J_y - J_z) + H_m \right] \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta t}{J_y} \cdot \omega_z(i) \cdot (J_z - J_x) & 1 & \frac{\Delta t}{J_y} \cdot \omega_x(i) \cdot (J_z - J_x) \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\Delta t}{J_z} \cdot \left[\omega_y(i) \cdot (J_x - J_y) + H_m \right] & \frac{\Delta t}{J_z} \cdot \omega_x(i) \cdot (J_x - J_y) & 1 \end{bmatrix}$$

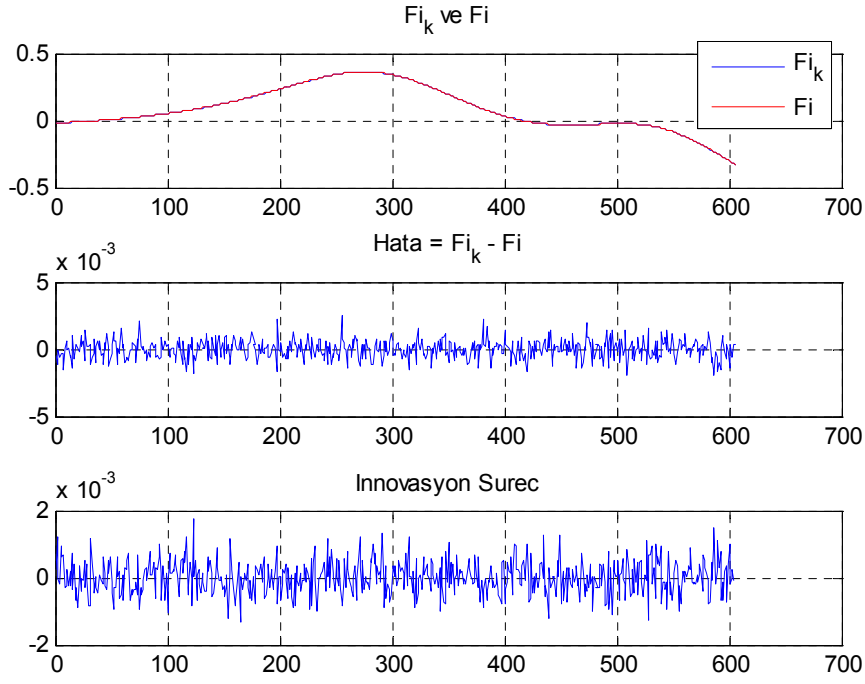
GKF algoritmasını çalıştırmadan önce yapılacak olan son şey innovasyon sürecini hesaplamak olacaktır. Innovasyon süreci ölçümler ile ekstrapolasyon değeri arasındaki farka eşittir. Ölçümlerin simülasyonu yapıldığında durum vektörünün her bir elemanı kendisine karşılık gelen varyans değerinin $randn$ ile çarpımıyla toplanır.

$$z_k(i) = x_k(i) + \sigma \times randn$$

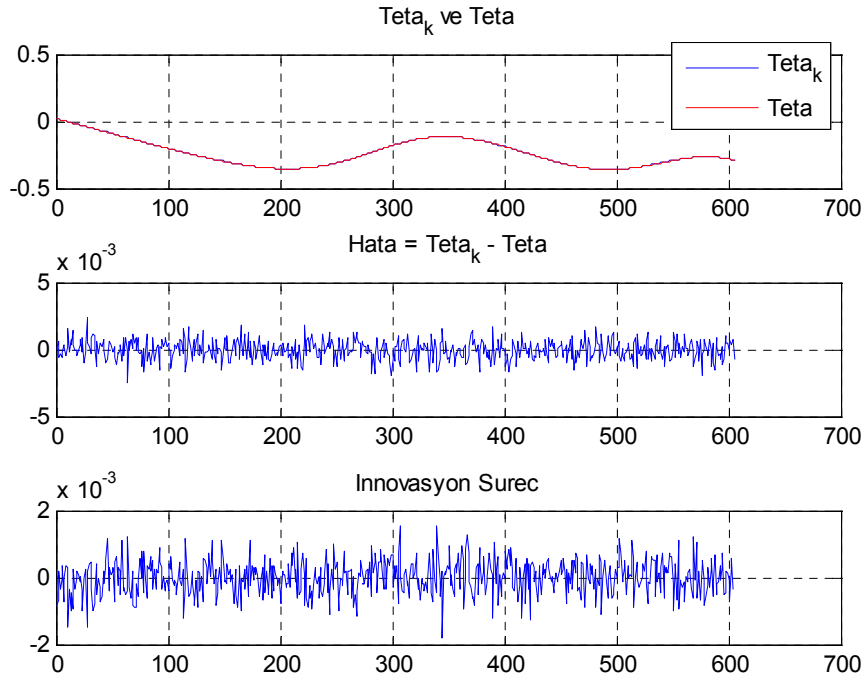
Elde edilen z_k matrisi ölçüm matrisi olmak üzere $z_k - x_k^-$ değeri innovasyon sürecini belirler.

Verilen bu değerleri kullanarak GKF algoritmasını çalıştırılır.

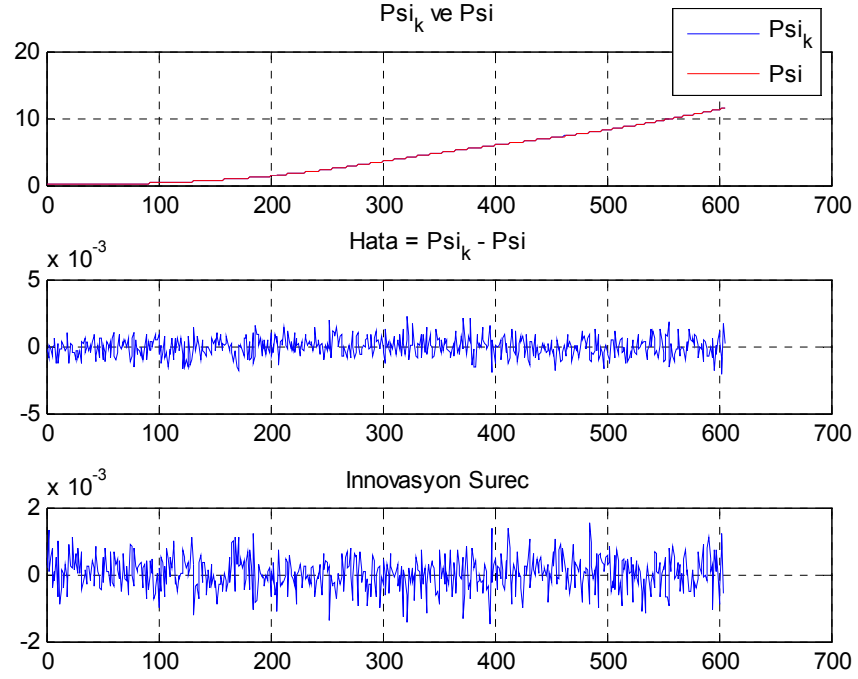
Şekil 5.5 ile Şekil 5.10 arasında da genişletilmiş Kalman filtresinde durum vektörünü oluşturan altı elemanın GKF'den önceki ve GKF ile kestirilmiş değerleri, bunların arasındaki hatalar ve her birinin innovasyon sürecinin iterasyona bağlı değişimi grafiklerle gösterilmiştir.



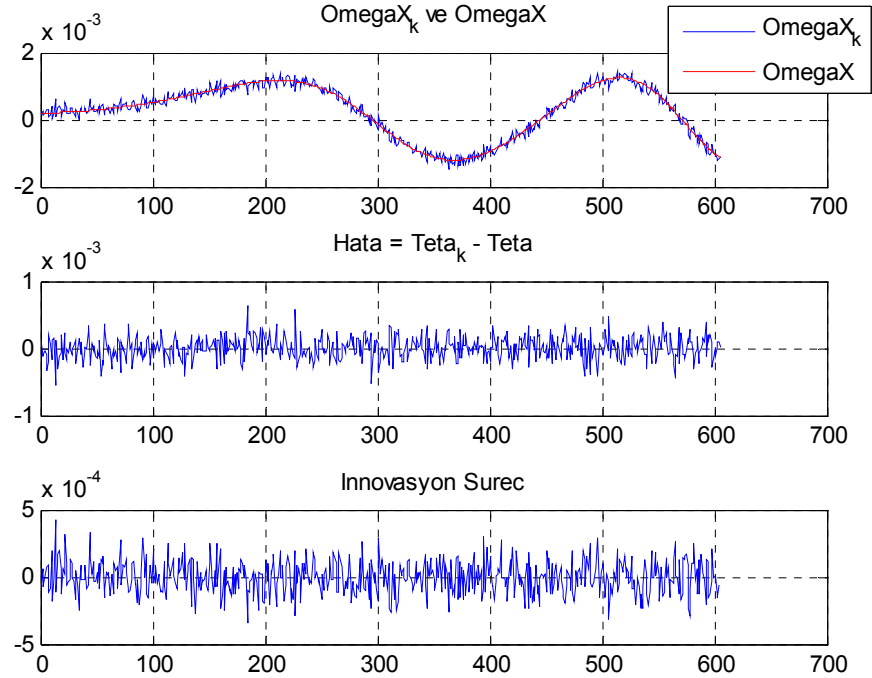
Şekil 5.5 Fi'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği



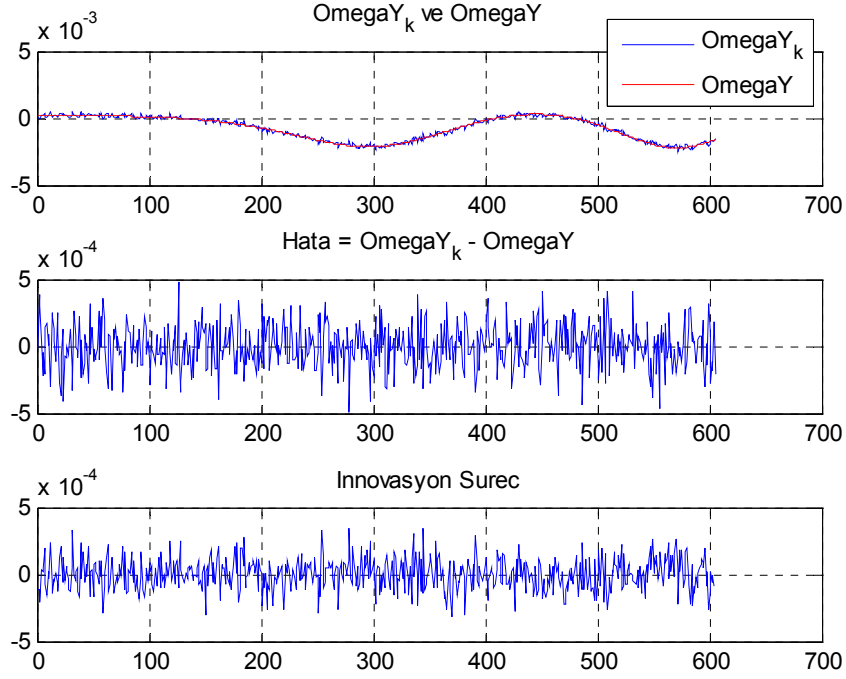
Şekil 5.6 Teta'nın ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği



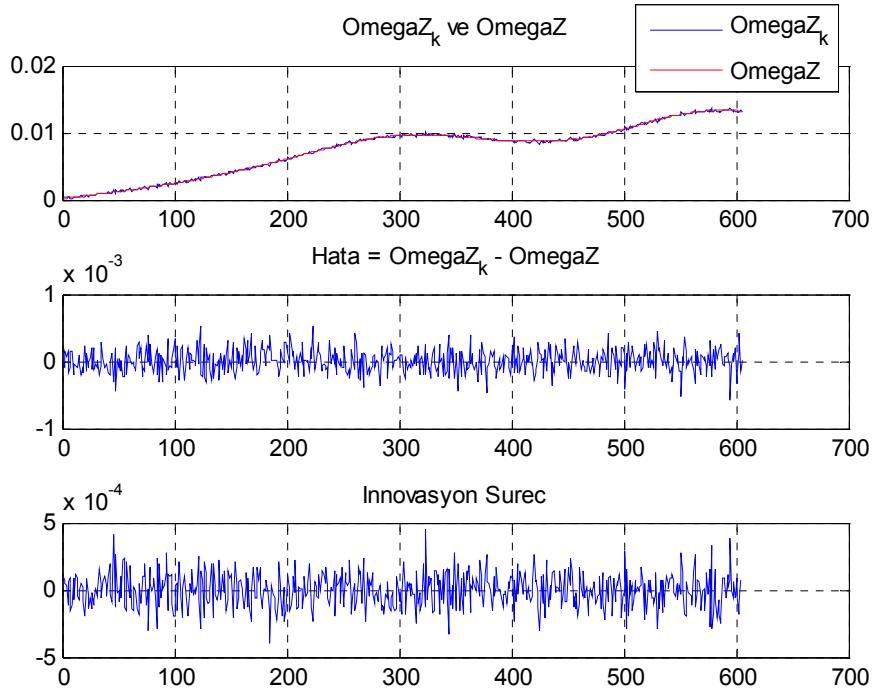
Şekil 5.7 Psi'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği



Şekil 5.8 Omega X'in ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği

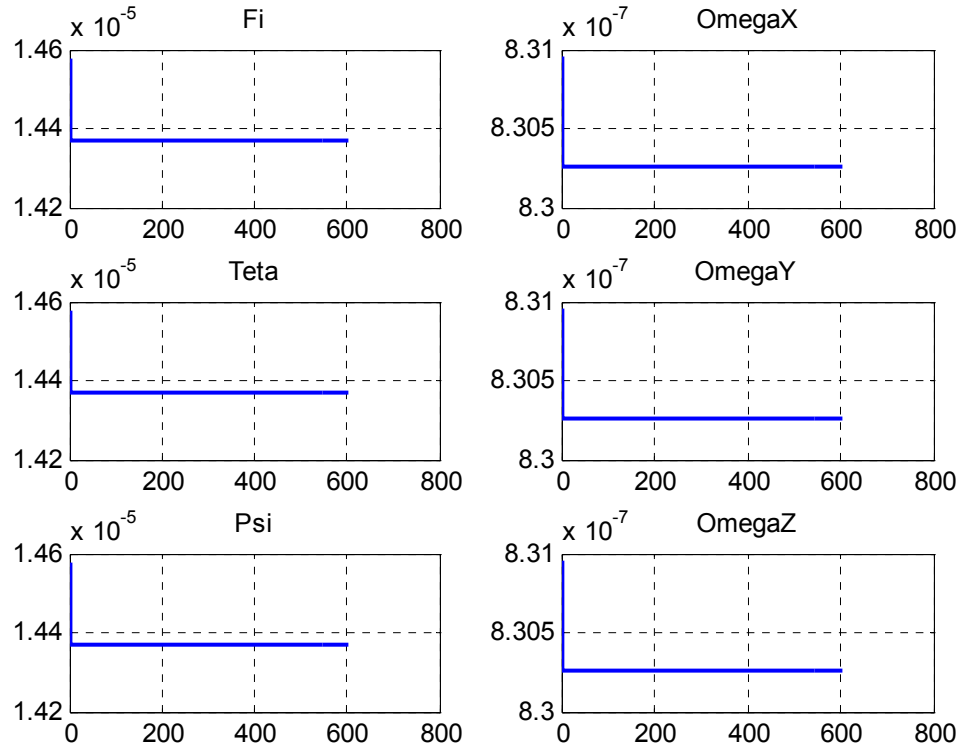


Şekil 5.9 Omega Y'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği



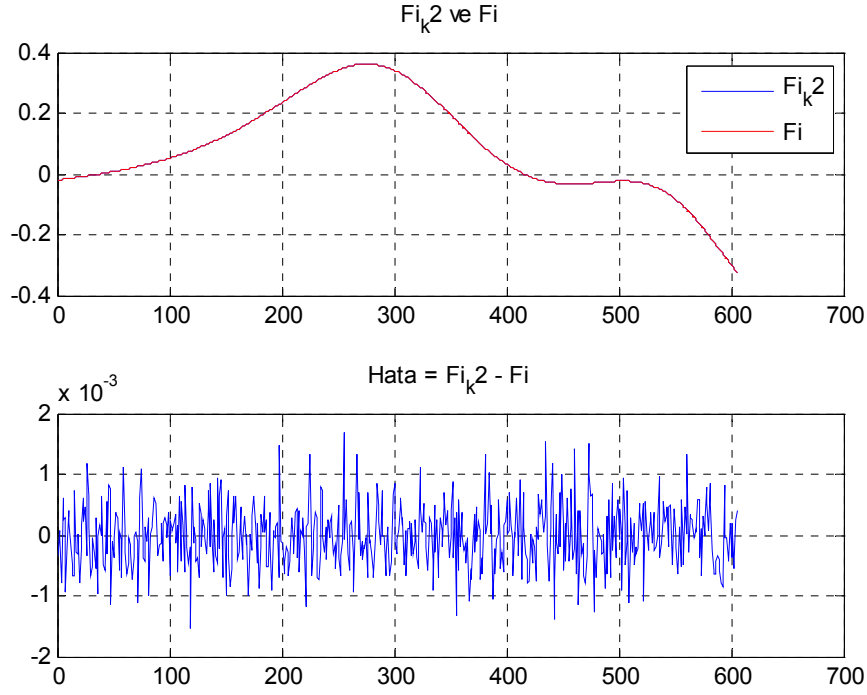
Şekil 5.10 Omega Z'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci grafiği

GKF'nin P matrisinin, yani filtreleme hatasının korelasyon matrisinin köşegenindeki elemanların iterasyona bağlı değişimi de aşağıda Şekil 5.11'de gösterilmektedir. Bu grafikte, her bir elemanın ilk iterasyonlardan itibaren sıfıra yakınsadığı görülebilir.

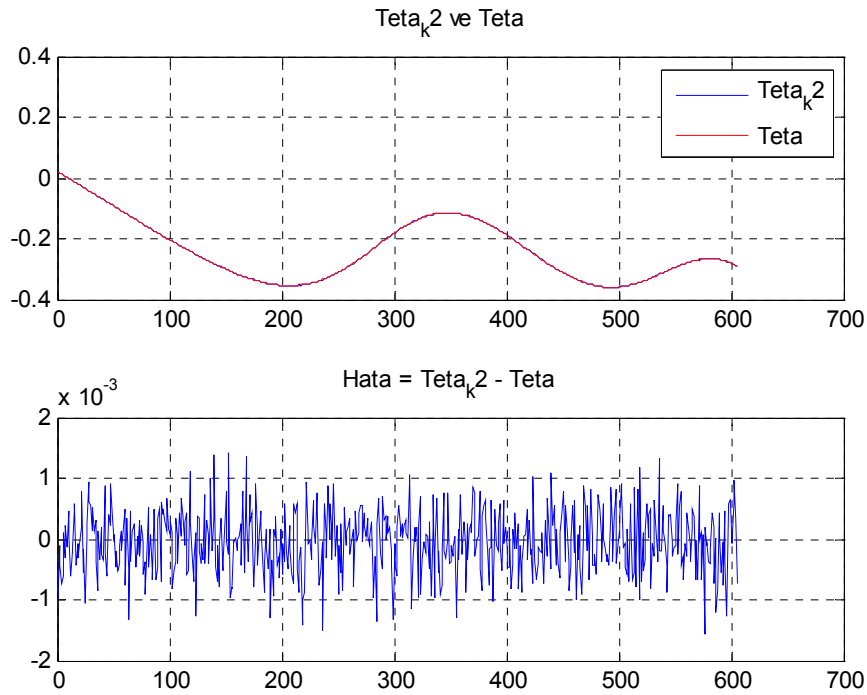


Şekil 5.11 P matrisinin köşegen elemanlarının iterasyona bağlı değişimi

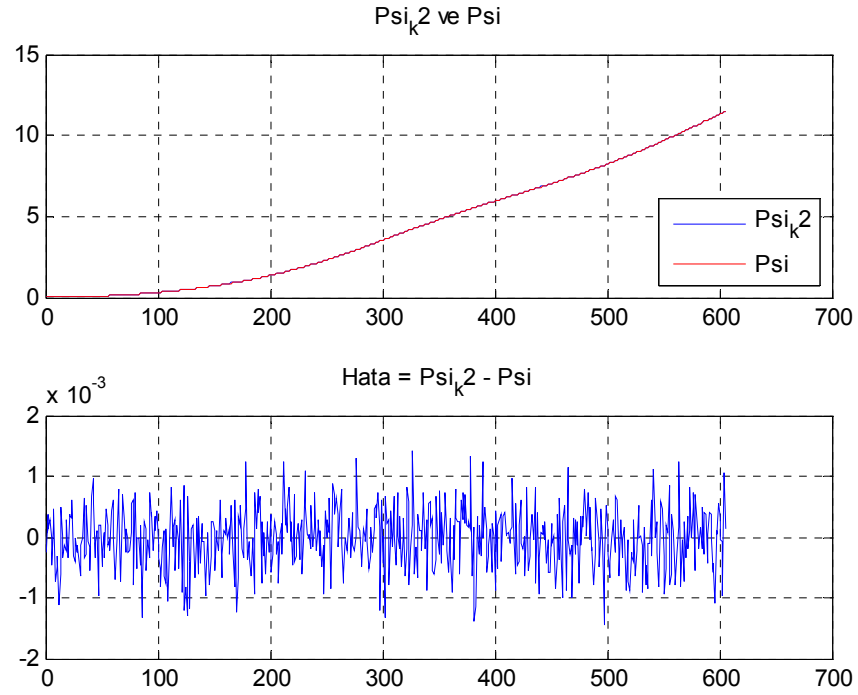
Elde edilen bu sonuçların ardından genişletilmiş Kalman filtresi bu sefer sadece durum vektörünün son üç elemanını oluşturan açısal hızların ölçme simülasyonlarının yapılmasıyla çalıştırılmıştır. Böylece iki farklı yöntemin verdiği sonuçlar kıyaslanabilecektir. Genişletilmiş Kalman filtresinde sadece açısal hızların ölçülmesi nedeniyle innovasyon süreç grafikleri de sadece bu son üç eleman için verilebilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 5.12 ile Şekil 5.17 arasında görülebilir.



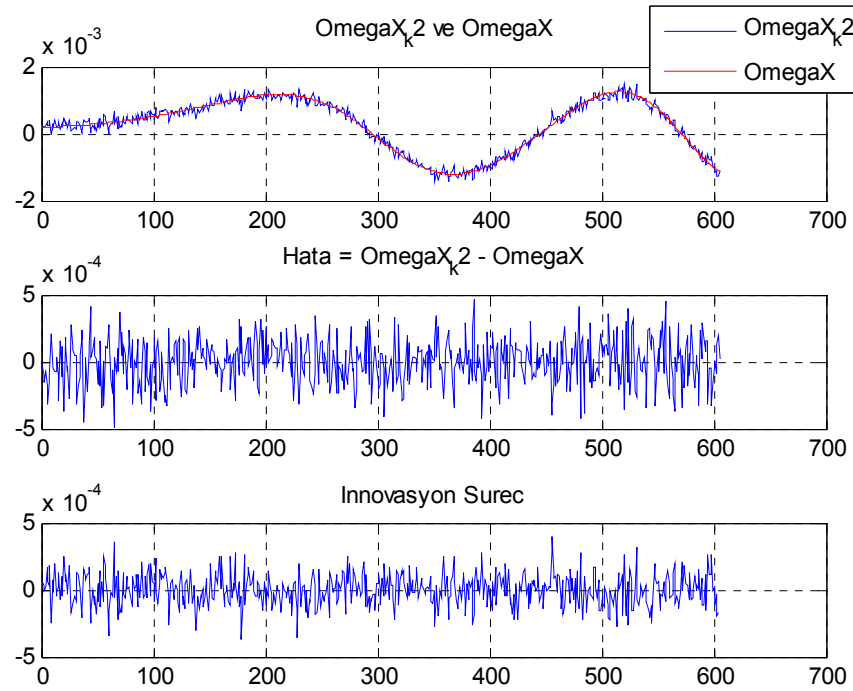
Şekil 5.12 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda F_i 'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata



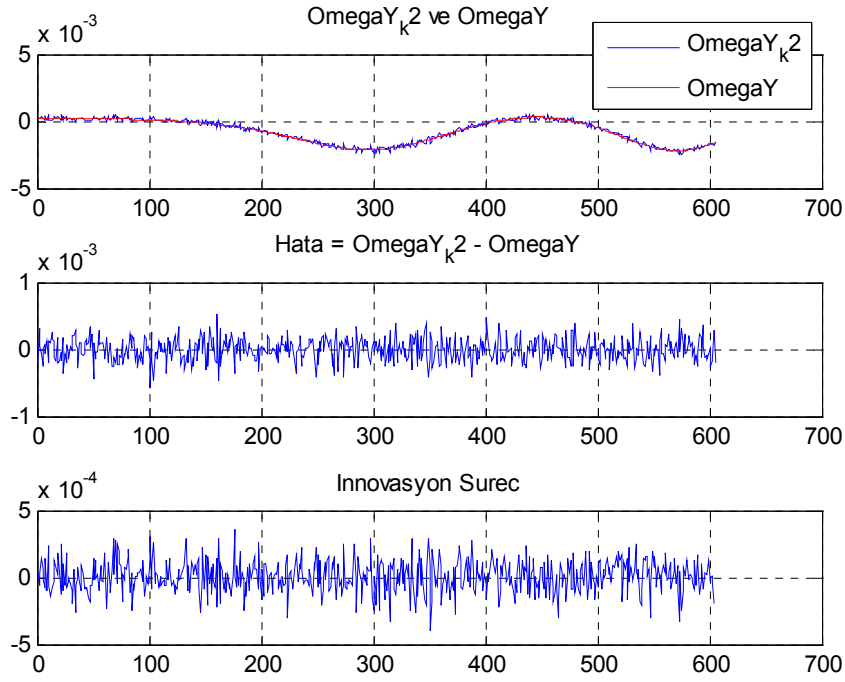
Şekil 5.13 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda $Teta$ 'nın ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata



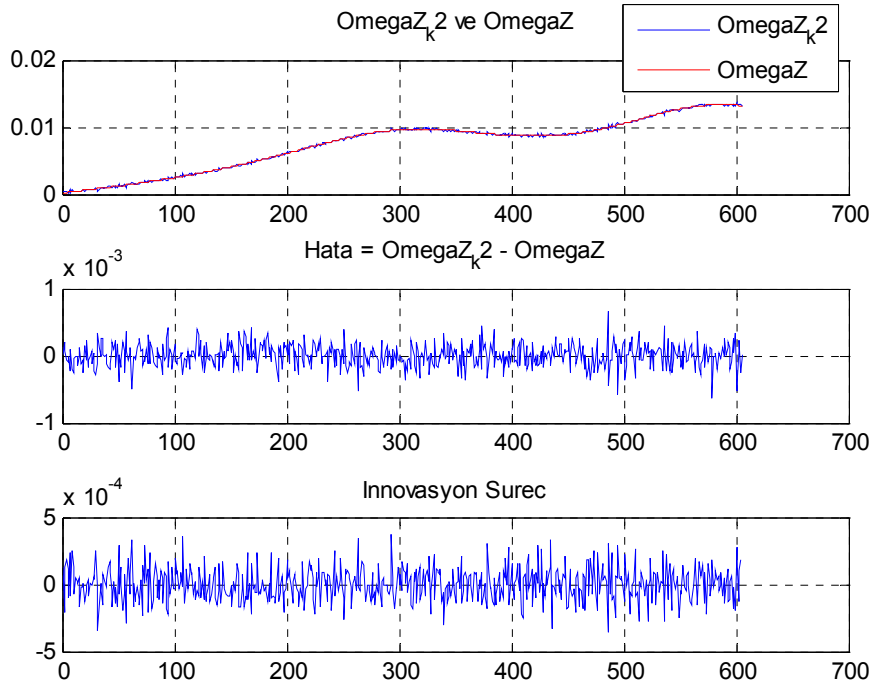
Şekil 5.14 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Psi'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması ve aralarındaki hata



Şekil 5.15 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega X'in ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci



Şekil 5.16 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega Y'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci



Şekil 5.17 Sadece açısal hızların ölçüme katılması durumunda Omega Z'nin ölçülmüş ve kestirilmiş değerlerinin karşılaştırılması, aralarındaki hata ve innovasyon süreci

Bir sonraki sayfada, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te 600 iterasyon süren 10 deneme sonunda EKK ve GKF yöntemleriyle bulunan sonuçların ortalaması alınarak sonuçlar karşılaştırılmaya tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.2'de üç yöntemle b_x , b_y ve b_z değerleri kestirilmiş ve 10 denemenin sonunda ortalama değerler alınarak karşılaştırma yapılmıştır. JİRO+EKK kullanılarak gerçekleştirilen yöntem, ölçümlere durum vektörünün bütün elemanlarının katıldığı GKF1+EKK yönteminden genel olarak daha iyi sonuçlar vermemesine karşılık, bozuntuların azlığı sebebiyle yine de yakın değerler üretebilmiştir. Ancak tablodan da anlaşılabileceği üzere özellikle GKF1+EKK yöntemi çoğu denemede ulaşılmak istenen gerçek değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Ölçümlere sadece açisal hızların katıldığı GKF2+EKK yöntemi ise GKF1+EKK'den daha zayıf kestirimler yapmıştır.

Çizelge 5.3'te yine üç yöntemle b_x , b_y ve b_z değerleri kestirilmiş ve 10 denemenin sonunda ortalama değerler alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Ancak bu sefer Euler açılarına $\sqrt{0,0289} \times randn$ derecelik jiroskop hatalarının da eklenmesiyle hesaplamalardaki bozuntu miktarı arttırılmıştır. Bunun sebebi genişletilmiş Kalman filtresi kullanılan yöntemlerin daha yüksek bozuntularda JİRO+EKK yönteminden daha sağlıklı sonuçlar vereceğinin düşünülmesidir. Gerçekten de 10 denemenin sonunda GKF1+EKK ve GKF2+EKK yöntemleri JİRO+EKK'den daha iyi ortalama sonuçlar vermişlerdir. Bu iki yöntemden bütün durum vektörü elemanlarının ölçümlere katıldığı GKF1+EKK yöntemi, sapma vektörünün üç değeri için de diğerine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar bulmuştur.

Çizelge 5.2 10 deneme sonunda, kullanılan kestirim yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması

Ölçüm		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama	Gerçek	Hata
JIRO + EKK	b_x	0,0181	0,03	0,0257	0,0218	0,0163	0,0314	0,0149	0,0189	0,0255	0,0187	0,02213	0,0227	0,00057
	b_y	0,0033	0,0018	0,0103	0,0097	0,0059	-0,0043	0,006	0,0035	0,0151	0,0052	0,00565	0,0065	0,00085
	b_z	-0,0008	0,0006	-0,0026	0,0091	0,0011	-0,0084	0,0009	0,0001	0,0036	0,0061	0,00097	0,0016	0,00063
GKF1 + EKK	b_x	0,0255	0,0269	0,0208	0,0208	0,0245	0,0199	0,0209	0,0258	0,0191	0,0239	0,02281	0,0227	-0,00011
	b_y	0,0064	0,0146	0,0154	0,0087	0,0072	0,0102	-0,0002	0,0044	0,0017	0,0067	0,00751	0,0065	-0,00101
	b_z	-0,0009	0,0044	0,0009	0,0049	0,0005	-0,0059	0,0013	0,0074	-0,0004	0,0091	0,00213	0,0016	-0,00053
GKF2 + EKK	b_x	0,0167	0,0308	0,0177	0,0238	0,0199	0,0192	0,025	0,0247	0,0249	0,018	0,02207	0,0227	0,00063
	b_y	-0,0032	0,0061	0,0059	0,0092	0,0047	-0,0001	0,0014	0,0072	0,0013	0,0057	0,00382	0,0065	0,00268
	b_z	-0,0007	0,0003	0,0054	-0,0041	0,0043	0,0061	0,0005	0,0055	0,0069	-0,0026	0,00216	0,0016	-0,00056

Çizelge 5.3 Jiroskop hatalarının eklenmesi durumunda 10 deneme sonunda kullanılan kestirim yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması

Ölçüm		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama	Gerçek	Hata
JIRO + EKK	b_x	0,0217	0,0237	0,0215	0,0216	0,0202	0,0205	0,0194	0,0216	0,0238	0,0263	0,02203	0,0227	0,00067
	b_y	0,0083	0,0081	0,0055	0,0066	0,0064	0,0072	0,0055	0,0077	0,0067	0,0088	0,00708	0,0065	-0,00058
	b_z	0,0001	0,0009	0,0026	0,0011	0,0027	0,0034	0,0045	0,0035	0,0018	0,0001	0,00207	0,0016	-0,00047
GKF1 + EKK	b_x	0,0221	0,0217	0,0216	0,0229	0,0226	0,0223	0,0227	0,0241	0,0234	0,0227	0,02261	0,0227	9E-05
	b_y	0,0049	0,0066	0,0077	0,0086	0,0113	0,0045	0,0062	0,0066	0,0056	0,0052	0,00672	0,0065	-0,00022
	b_z	-0,0008	0,0076	0,0022	0,0014	-0,0007	0,002	0,0024	0,0015	0,0024	0,0023	0,00203	0,0016	-0,00043
GKF2 + EKK	b_x	0,0271	0,0222	0,0214	0,0241	0,0216	0,0218	0,0229	0,0218	0,0237	0,0239	0,02305	0,0227	-0,00035
	b_y	0,0017	0,0057	0,0075	0,0079	0,0056	0,0092	0,0047	0,0111	0,0067	0,0069	0,0067	0,0065	-0,0002
	b_z	0,0012	0,0024	0,0004	0,0032	-0,0004	0,0035	0,0003	-0,0001	-0,0029	0,0014	0,0009	0,0016	0,0007

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir yere yakın yörünge uydusunun manyetometre kalibrasyonunu gerçekleştirecek başlıca üç yöntem üzerinde durulmuştur. Bunlar, yapay sinir ağları, en küçük kareler yöntemi ve genişletilmiş Kalman filtresidir.

YSA ile yapılan simülasyonda 10 denemenin ardından elde edilen ortalama istikamet açısı hatası 0.05909° , karekök ortalama hatası ise $2,48567^\circ$ olmuştur. Bu değerlerden, sonuçların gerçek sonuçlara olabildiğine yakın ve yüksek doğruluk gösteren sonuçlar olduğu anlaşılmaktadır.

Kestirim yöntemleri olarak kullanılan en küçük kareler ve genişletilmiş Kalman filtresi yöntemleri bu çalışma içinde üç farklı kombinasyon ile kullanılmıştır. Bunlardan ilki sadece ölçmeler ile EKK'nin kullanımı (JİRO+EKK), ikincisi ölçümlere durum vektörünün bütün elemanlarının katıldığı GKF1+EKK, üçüncüsü ise ölçümlere sadece açısal hızların katıldığı GKF2+EKK yöntemlerdir. Bu yöntemlerde uydu denklemlerinin doğrusal olmayan özellik taşıması nedeniyle tercih edilen genişletilmiş Kalman filtresi düzgün çalışmakta ve durum denkleminin gerçek değerlerine uygun sonuçlar bulabilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada, jiroskop bozuntuları arttıkça GKF1+EKK ve GKF2+EKK yöntemlerinin kendilerini daha iyi gösterdiği görülmüştür. Bozuntuların daha az olduğu durumlarda JİRO+EKK yöntemi diğer iki yönteme yakın sonuçlar verebilmektedir, ancak bozuntuların arttığı durumlarda özellikle GKF1+EKK yönteminin gerçeğe en yakın sonuçları verdiği ve b_x b_y ve b_z değerlerini diğer yöntemlerden daha iyi kestirebildiği görülmüştür.

Bozuntuların artması GKF2+EKK yönteminin de kendini daha fazla göstermesini sağlamış, ancak bu yöntem genel olarak GKF1+EKK kadar iyi kestirimler yapamamıştır. Ölçümlere Euler açılarının yerine sadece açısal hızların katılması GKF'nin performansını hissedilir derecede düşürmüştür.

Sadece en küçük kareler yönteminin kullanılması GKF1+EKK veya GKF2+EKK yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar vermese de, yere yakın yörüngede kullanılacak

bir uydunun bilgisayarının hesaplama kapasitesi göz önüne alındığında uyduya en az hesaplama yükünü getirecek yöntemin bu olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Yapay sinir ağları yöntemi ise gerçeğe olabildiğince yakın sonuçlar vermesine rağmen bilgisayara diğer yöntemlere göre nispeten daha fazla bir hesaplama yükü getirebilmektedir. Bilgisayarın her bir YSA düğümünü ayrı ayrı hesaplamaya çalışması, özellikle çok sayıda veriyle çalışan büyük YSA'larda hız sorunlarına neden olabilir. Yine de son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler bu sorunu nispeten bertaraf edebilmektedir. YSA'ların doğrusal olmayan modellere bile yüksek bir uyum sağlaması ve modelleme konusunda güvenilir olması bu yöntemi mevcut uygulamalar için çekici kılmaktadır.

Gelecekte yapılabilecek olası bir çalışma olarak, bu çalışmada kullanılan YSA ve genişletilmiş Kalman filtresi yöntemleri birleştirilip kullanılabilir. Böylece çalışmada kullanılan filtreleme bir adım daha ileri götürülüp hatalar daha da azaltılabilir. Ayrıca genişletilmiş Kalman filtresinin durum vektörüne b_x , b_y ve b_z değerleri de dahil edilebilir ve bu değerlerin de GKF dahilinde ölçümleri yapılabilir.

Son olarak bu çalışmada yapılan simülasyonlar kullanım kolaylığı nedeniyle MATLAB'da kodlandığından bunların çalışmasında düşük seviyeli dillere göre belli bir yavaşlık olabilir. Eğer aynı çalışma C gibi daha düşük seviyeli veya Fortran gibi daha performanslı programlama dillerinde gerçekleştirilirse cevaplar daha hızlı elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mish, W. H., Lepping, R. P. (1976). *Magnetic-Field Experiment Data Processing Systems, Explorers 47 and 50*. Rapor. NASA/GSFC.
- [2] Hedgecock, P. C. (1975). A correlation technique for magnetometer zero-level determination. *Spure. Sri. Inst.*, 1, 83-90.
- [3] Farrell, W. M. ve diğerleri (1995, Mart). A method of calibrating magnetometers on a spinning spacecraft. *IEEE Transactions on Magnetism*, 31, 966-972.
- [4] Alonso, R. ve Shuster, M. D. (1994). A new algorithm for attitude-independent magnetometer calibration. *Flight Mechanics/Estimation Symposium* (s. 513-527).
- [5] Farrell, W. M., ve diğerleri (1995). A method of calibrating magnetometers on a spinning spacecraft. *IEEE Transactions On Magnetism*, 31(2), 966-972.
- [6] Markgraf, S. ve diğerleri (1996). Some method for magnetometer zero-level determination. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 34(3), 739-746.
- [7] Hashmall, J. A. ve diğerleri (1997). The on orbit use of spacecraft attitude magnetometers for refining near-Earth magnetic fields. *Adv. Space Res.*, 20(3), 437-440.
- [8] Lohr, D. A. ve diğerleri (1997). NEAR magnetic field investigation, instrumentation, spacecraft magnetism and data access. *Space Science Reviews*, 87, 255-281.
- [9] Sedlak, J. E. (1997). *Improves spacecraft attitude filter using a sequentially correlated magnetometer noise model*. 28 Ocak 2009'da indirilmiştir.
- [10] Parker, R. L. ve Gee, J. S. (2002). Calibration of the pass-through magnetometer. *Geophys. J. Int.*, 2002(150), 140-152.
- [11] Risbo, T. ve diğerleri (2003). Orsted pre-flight magnetometer calibration mission. *Measurement Science and Technology*, 14(2003), 674-688.
- [12] Crassidis, J. L. ve diğerleri (2003). *Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration*.
- [13] Huang, L. ve Jing, W. (2004). *Attitude independent geomagnetic navigation using onboard complete three axis magnetometer calibration*.
- [14] Lee, S., Rhee, S. ve Ahn, H. (2004). Slowly varying bias correction of magnetometer based on orbit geometry. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(3), 1020-1030.

- [15] Wang, J. ve Gao, Y. (2005). A new magnetic compass calibration algorithm using neural networks. *Measurement Science and Technology*, 17(2006), 153-160.
- [16] Gebre-Egziabher, D. ve diğerleri (2006, Nisan). Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain. *Journal of Aerospace Engineering*, 87-102.
- [17] Primdahl, F. ve diğerleri (2006). In-flight spacecraft magnetic field monitoring using scalar/vector gradiometry. *Measurement Science and Technology*, 17(2006), 1563-1569.
- [18] Gebre-Egziabher, D. (2007). Magnetometer autocalibration leveraging measurement locus constraints. *Journal of Aircraft*, 44(4), 1361-1368.
- [19] Wang, X. (2007). Research on adaptive calibration of tri-axial magnetometer based on ANN. *World Congress on Intelligent Control and Automation* (s. 7587-7592).
- [20] Yarım, C. (2006). *Spacecraft systems design*. Ders notları.
- [21] http://www.mindcreators.com/Images/NB_Neuron.gif. 18 Kasım 2009'daki haliyle.
- [22] Williams, R.W. & Herrup, K. (1988). The control of neuron number. *Annual Review of Neuroscience*, 11, 423-53.
- [23] Azevedo, F. A., Carvalho, L. R., Grinberg, L. T., ve diğerleri (Nisan 2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *The Journal of Comparative Neurology*, 513(5), 532-41.
- [24] Çetin, F. (2003). *Yapay sinir ağları ile rüzgâr şiddeti tahmini*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [25] Şeker, S. (2008). *Artificial neural networks for system identification and control*. Ders notları.
- [26] Chapra, S. C., Canale, R. P. (2003). *Mühendisler için sayısal yöntemler* (Çev. H. Heperkan, U. Kesgin). İstanbul: Literatür Yayınları.
- [27] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Transactions*, Series D: *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- [28] Hacıyev, Ç. (1999). *Radyo navigasyon*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü.
- [29] Yumuşak, S. (2008). *Asenkron motorda genişletilmiş kalman filtresi ile sensörsüz doğrudan moment kontrolü*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [30] Haykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice Hall.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Deniz Can Çelik

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1982

Lisans: İ.T.Ü. uzay mühendisliği (2006)