



HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Abdullah VARLIK

yaz
yayınları

Harita Mühendisliği Alanında Bilimsel Araştırmalar

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Abdullah VARLIK

yaz
yayınları

2026

Harita Mühendisliği Alanında Bilimsel Araştırmalar

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Abdullah VARLIK

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8574-72-2

Mart 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Yersel Fotogrametrik Kameralar İçin Kendi Kendine Kalibrasyon Yöntemi Üzerine Bir Uygulama.....	1
--	----------

Aycan Murat MARANGOZ, Ahmet YAŞAYAN

Yerel Jeoid Belirlemede Enterpolasyon Yöntemleri.....	21
--	-----------

Birol KURU, Mustafa YILMAZ

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

YERSEL FOTOGRAMETRİK KAMERALAR İÇİN KENDİ KENDİNE KALİBRASYON YÖNTEMİ ÜZERİNE BİR UYGULAMA¹

Aycan Murat MARANGOZ²

Ahmet YAŞAYAN³

1. GİRİŞ

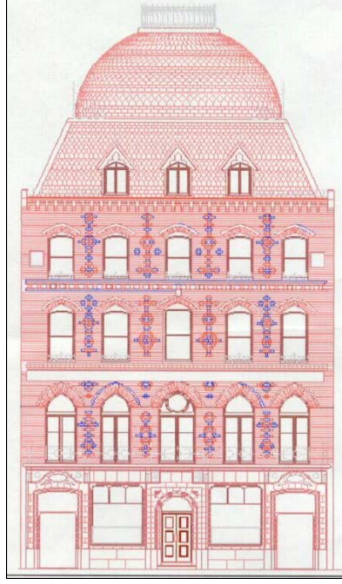
Bir insan topluluğunu millet yapan değerlerin başında o toplumun kültürü gelir. Kültürün önemli bir bölümünü o milletin geçmişte yapmış olduğu eserler oluşturur. Kültürel mirasların daha sonraki nesillere sağlıklı bir şekilde kalabilmesi için bakım ve korunmaya ihtiyaçları vardır. Bu yüzden günümüzde, önemli ve korunması gereken tarihi eserlerin korunup kayıt altına alınması ve dokümantasyonunun yapılması büyük bir amaç haline gelmiştir. Tarihi eserlerin yeniden oluşturulması için kullanılan yersel fotogrametri metotları, tarihi yapıların, tarihi yerleşim merkezlerinin ve arkeolojik alanların kayıt altına alınmasında geniş uygulama alanı bulmaktadır (Şekil 1) (Yılmaz vd. 2000). Kültürel mirasın üç boyutlu (3B) modellenebilmesi ve görselleştirilmesi için kullanılan fotogrametrik yaklaşımlar, nesnenin 3B olarak yeniden oluşturulmasında daha doğru sonuçlar üretmektedirler. Alınan veriler, bilgi sistemlerine entegre edilerek çalışmalarda kullanılabilir (Visnovcova vd. 2001).

¹ Bu kitap bölümü, yazarın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

² Dr. Öğr. Üyesi., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, ORCID: 0000-0003-4409-6000.

³ Emekli - Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Müh. Bölümü, İstanbul. Bu çalışma, 2015 yılında aramızdan ayrılan ve yazarın kıymetli tez danışmanı Sayın Prof. Dr. Ahmet YAŞAYAN'ın aziz hatrasına ithaf edilmiştir.

Şekil 1. Mimari Röleve Çalışması (Yılmaz vd. 2000)



Kültürel mirasın korunması ve kayıt altına alınması için kullanılan yersel fotogrametri yaklaşımında, görüntü verisi elde etmek için öncelikle özel olarak üretilen, pahalı ve kullanımı zor olan profesyonel fotogrametrik kameralara (metrik kameralara), değerlendirme alet ve donanımlarına ihtiyaç duyulur. Günümüzde, bu metrik kameraların yerine ucuz, basit ve piyasada bol bulunan metrik olmayan kameralar da kullanılabilmektedir. Fakat burada önemli olan sorun, metrik olmayan kameraların iç yöneltme elemanlarının bilinmemesidir. Bunun yanında, bu kameralar yüksek teknoloji içeren optik ve mekanik sistemlerden meydana gelmektedirler. Bünyelerinde bulunan optik sisteminin fazla hareketli yapıda olması, bu sistemin zamanla fabrika ayarlarından sapmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı bu kameraların test laboratuvarlarında sık sık kalibre edilmeleri bir zorunluluk olmaktadır. Kalibrasyon işlemi fotogrametrik nokta belirleme işleminin tersi olarak kabul edilir. Fotogrametrik konum belirlemesinde iç yöneltme elemanları bilinmekte olup cisim

noktalarının koordinatları aranır. Kamera kalibrasyonunda ise cisim noktalarının koordinatları bilinmekte olup, fotoğraf iç yöneltme elemanlarının koordinatları aranmaktadır. Fotoğraf iç yöneltme elemanları fotoğraf çerçeve işaretleri ile tanımlanan koordinat sisteminde, (fotoğraf koordinat sisteminin başlangıcı olarak) asal noktanın konumu ile asal uzaklığıdır.

2. KAMERALARIN KALİBRASYONU

Fotogrametrik Kamera kalibrasyonu, bir ölçüm sisteminin yapısal karakteristikleri ile bu özelliklerin birbirleriyle olan etkileşimlerini tanımlayan numerik modellerin geliştirilmesi sürecidir. Bu sürecin hassasiyeti, doğrudan sistemden beklenen performans ve kullanım amacına göre şekillenir. Özellikle fotogrametrik değerlendirmeler söz konusu olduğunda, kalibrasyon işlemi sistemin geometrik ve uzaysal bağıntılarını yansıtan, yüksek doğruluk derecesine sahip sayısal veriler üretmek zorundadır. Sistemin teorik olarak mümkün olan en yüksek uzaysal doğruluk kapasitesine ulaşabilmesi için, iç parametrelerin yanı sıra çevresel faktörlerin sistem üzerindeki etkileri de modellemeye dahil edilmelidir. Bu gereklilikler doğrultusunda, fotogrametrik amaçla kullanılan kameralar belirli periyotlarla kontrollü laboratuvar koşullarında kalibrasyon testlerine tabi tutulur (Wolf vd. 2014).

Kalibrasyon, bir görüntüleme sisteminin geometrik özelliklerini en hassas biçimde tanımlayan iç yöneltme parametrelerinin sayısal olarak belirlenmesi sürecidir. Bu süreçte; projeksiyon merkezinin fotoğraf düzlemine olan dik uzaklığı (odak uzaklığı veya kamera sabiti, c), fotoğraf koordinat sistemindeki eksenlerin yönelimleri, dönüklükleri ve mercekten kaynaklanan optik bozulma değerleri matematiksel bir modelle ifade edilir.

Kavramsal bir perspektiften bakıldığında, kamera kalibrasyonu, geleneksel fotogrametrik nokta belirleme sürecinin matematiksel tersi (inverse) olarak tanımlanabilir:

- **Fotogrametrik Nokta Belirleme:** Bu işlemde kameranın iç yöneltme elemanları veri (bilinen) olarak kabul edilir ve görüntüler üzerinden cisim noktalarının koordinatları (bilinmeyen) hesaplanır.
- **Kamera Kalibrasyonu:** Bu süreçte ise cisim noktalarının koordinatları (test alanı veya kalibrasyon levhası sayesinde) önceden bilinir; bu verilerden hareketle kameranın karakteristik iç yöneltme elemanları (bilinmeyen) aranır.

2.1. Mercek Distorsiyonları

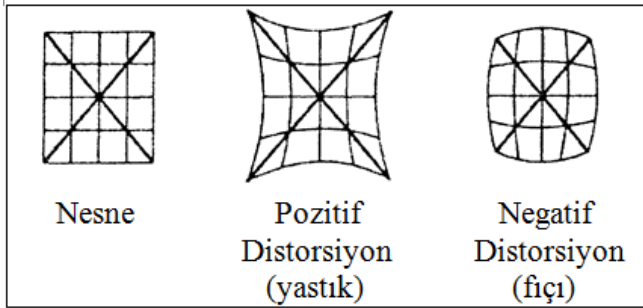
Fotogrametri biliminde kullanılan kamera mercekleri, kendilerine has karmaşık fiziksel özelliklere sahiptir. İdeal bir merkezi izdüşüm modelinde ışınların doğrusal bir hat izlemesi beklense de, merceklerin optik ve fiziksel yapısı bu izdüşüm sürecinde fotoğraf düzleminin farklı noktalarında geometrik sapmalara yol açar. Mercek yapısından kaynaklanan ve optik izdüşümün ideal geometrisinden sapmasına neden olan bu fiziksel etkilere genel literatürde distorsiyon (bozulma) adı verilir. Distorsiyon, görüntünün kenarlarına doğru gidildikçe artan veya azalan bir karakter sergileyerek, resim düzlemi üzerindeki nokta konumlarının gerçekteki yerlerinden farklılaşmasına neden olur (Ergün 1999). Mercek distorsiyonu, bir objenin fotoğraf düzlemi üzerindeki izdüşüm noktasının, ideal geometrik konumundan sapması olarak tanımlanır. Fotoğraf üzerinde gerçekleştirilecek her türlü metrik ölçümün doğruluğu, bu sapmaların ne ölçüde kontrol altına alındığına bağlıdır. Bu nedenle, herhangi bir geometrik distorsiyonun varlığı fotogrametri uzmanları için kritik bir öneme sahiptir. Hassas bir ölçü veya modelleme yapılmadan önce, söz konusu distorsiyonların kameranın geometrik kalibrasyonu aracılığıyla

titizlikle modellenmesi ve ölçüm sürecinde bu hataların elimine edilmesi zorunludur (Büyüksalih 1999). Kameralarda iki ana mercek distorsiyonu söz konusudur. Bunlar, radyal ve teğetsel distorsiyonlardır.

Eksen dışında kalan bir objenin görüntü düzlemindeki konumu, asal noktadan (ana nokta) dışarıya doğru itilmiş veya içeriye doğru çekilmişse, bu durum radyal distorsiyon olarak tanımlanır. Bu sapma, görüntünün merkezinden dışarıya doğru ışımsal (radyal) bir hat üzerinde gerçekleşir. Bu geometrik distorsiyonun karakteri, nesnelerin formundaki değişime göre iki ana başlıkta incelenir (Büyüksalih 1997) (Şekil 2):

- Negatif (Fıçı) Distorsiyon: Görüntü noktalarının asal noktaya doğru radyal olarak yaklaşması durumudur. Bu etkide, kare veya dikdörtgen formundaki objelerin kenarları dışa doğru bükülerek bir fıçı görünümü alır.
- Pozitif (Yastık) Distorsiyon: Görüntü noktalarının asal noktadan radyal olarak uzaklaşması durumudur. Bu türde ise şekillerin kenarları içe doğru çekilir ve görüntü bir yastık formuna bürünür.

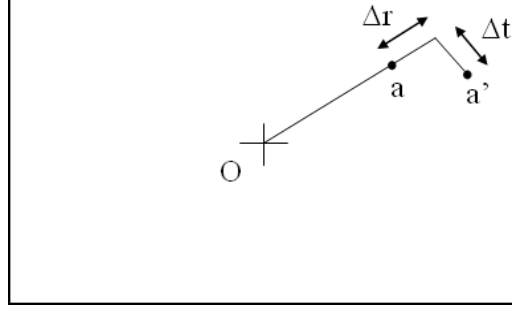
Şekil 2. Yastık ve Fıçı Biçimli Distorsiyonlar



Radyal distorsiyon için simetri noktası kesinlikle asal nokta olmayabilir, fakat genellikle asal nokta orijin olarak kabul edilir. Gelen ışık ışını doğru yer olan a yerine a' konumunda

görüntülenir, burada radyal distorsiyon miktarı Δr , teğetsel distorsiyon ise Δt kadardır (Şekil 3).

Şekil 3. Yastık ve Fıçı Biçimli Distorsiyonlar



r , radyal uzaklık olarak kabul edilirse, radyal mercek distorsiyonu matematiksel olarak, bir polinom eşitliği ile şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots$$

Bu açısal değişimin etkisinin fotoğraf koordinat sistemi içerisinde x ve y yönlerindeki bileşenleri ise;

$$\Delta r_x = \Delta r(x-x_0)/r$$

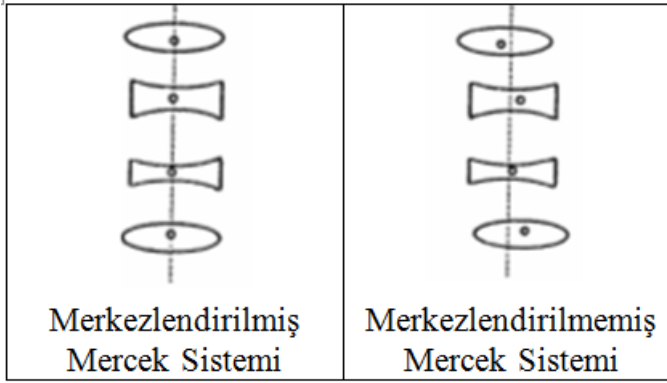
$$\Delta r_y = \Delta r(y-y_0)/r$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Diğer yandan, kameralarda kullanılan çoklu mercek sistemini oluşturan merceklerin merkez noktaları aynı doğru üzerinde oluşmaması nedeniyle mercek merkezleri doğrultudan saparlar ve buna fabrikasyon aşamasında özellikle dikkat

edilmelidir. Doğrultudan sapma, fotoğrafta teğetsel (tanjant) distorsiyon adı verilen geometrik yer değiştirmeye sebep olacaktır (Şekil 4). Bu tür distorsiyon her zaman radyal distorsiyonda bir asimetriye neden olmaktadır (Büyüksalih 1997).

Şekil 4. Teğetsel Distorsiyon (Büyüksalih 1997)



Teğetsel distorsiyonun noktanın fotoğraf koordinatlarına verdiği etki aşağıdaki şekilde ifade edilecek olursa,

$$\Delta x_s = (1-(c/S)) [P_1(r^2 + 2(x - x_p)^2) + 2P_2(x - x_p)(y - y_p)]$$

$$\Delta y_s = (1-(c/S)) [P_2(r^2 + 2(y - y_p)^2) + 2P_1(x - x_p)(y - y_p)]$$

bağıntıları elde edilir. Burada Δx_s ve Δy_s , x, y fotoğraf noktasındaki teğetsel distorsiyon bileşenleri, x_p ve y_p ana nokta koordinatları, P_1 ve P_2 teğetsel distorsiyon katsayıları, c mercek odak uzaklığı ve S mercekten olan obje uzaklığıdır.

2.2. Kendi Kendine Kalibrasyon Yöntemi

Bu yöntemde, fotogrametrik fotoğraf çekimi ve yöneltme için gerekli olan kontrol noktalarının, fotoğraf çekim merkezi

koordinatlarının (dış yöneltme elemanları) değerlendirme aşamasında hesaplanabilmesi için gereğinden fazla kontrol noktası kullanılarak, fotoğraf çekimi anında hedeflerin oluşturduğu çerçevenin konumunun jeodezik ölçümlerle hassas bir şekilde tespit edilir. Yöntemin matematik modeli, yöneltme için kullanılan demet dengelemesi işleminde, fotoğraf çekim merkezi 3B koordinatlarının yardımı ile iç yöneltme elemanlarının dengelemeye bilinmeyen olarak katılması sonucu artacak olan bilinmeyen sayısının, doğruluğu yüksek bir şekilde bilinen kontrol noktalarındaki fazla fotoğraf koordinatı ölçülmesi sonucu örtebilmek ve fotoğraf çekim merkezi koordinatlarının yüksek bir doğrulukla hesaplama algoritmasıdır.

Uygulama aşamasının başlangıcında, ölçüm doğruluğunu güvence altına almak amacıyla kamera kalibrasyonu gerçekleştirilir. Bu süreçte, 3B koordinatları yüksek hassasiyetle önceden belirlenmiş hedeflerin bulunduğu bir laboratuvar test alanında fotoğraf çekimleri yapılır. Elde edilen veriler doğrultusunda hesaplanan iç yöneltme elemanları, mercek sistemine ait tüm karakteristik distorsiyon değerlerini de kapsayan kapsamlı bir parametre seti sunar. Eğer mercek sistemine ait teorik veya optik esaslı distorsiyon değerleri halihazırda mevcutsa, bu veriler demet dengelemesi hesaplamalarında başlangıç (yaklaşık) değerleri olarak kullanılır. Bu metodolojideki en kritik unsurlar şunlardır:

- Geometrik Bütünlük: Fotoğraf çekim merkezleri ile test alanındaki hedeflerin birbirlerine göre konumsal doğruluğunun laboratuvar ortamında kusursuz bir şekilde kurulması.
- Işın Kesişimi: Hedeflerden gelen ışınların çekim noktalarında tam olarak kesiştiğinin ve bu doğruluğun

herhangi bir dış saha kontrolüne ihtiyaç duymadan belirlenebilmesi.

Sonuç olarak; sistemin uzaysal kabiliyeti, laboratuvar koşullarında sağlanan bu kontrollü geometrik yapı ve ışın geometrisinin ne denli hassas kurulduğuna doğrudan bağlıdır. Bilindiği gibi, fotoğraf çekim noktasının 3B koordinatları (X_0, Y_0 ve Z_0) ile iç yöneltme elemanları (x_0, y_0 ve c) arasında bir ilişki vardır. Bu sebeple uygulanan kalibrasyon yöntemi ile öncelikle distorsiyon değerleri belirlendikten sonra kestirme yoluyla fotoğrafın izdüşüm merkezi koordinatları bulunmalı ve demet dengelemesinin son aşamasında da bu parametrelere ve iç yöneltmenin yaklaşık değerlerine bağlı olarak ana nokta koordinatları ve kamera sabiti (odak uzaklığı) karesel ortalama hataları ile birlikte hesaplanmalıdır (Demiray 2001).

3. UYGULAMA

Bu çalışmada, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden; fotoğraf çekim merkezinin odak uzaklığı (c), fotoğraf koordinat sisteminin dönüklükleri ile distorsiyon parametrelerinin fotogrametrik kamera kalibrasyonu ile bulunması gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon yöntemi olarak da, çekim sırasında kalibrasyon yönteminin doğal bir uzantısı olan kendi kendine kalibrasyon yöntemi kullanılmıştır (Marangoz 2002)

3.1. Amaç ve Yöntem

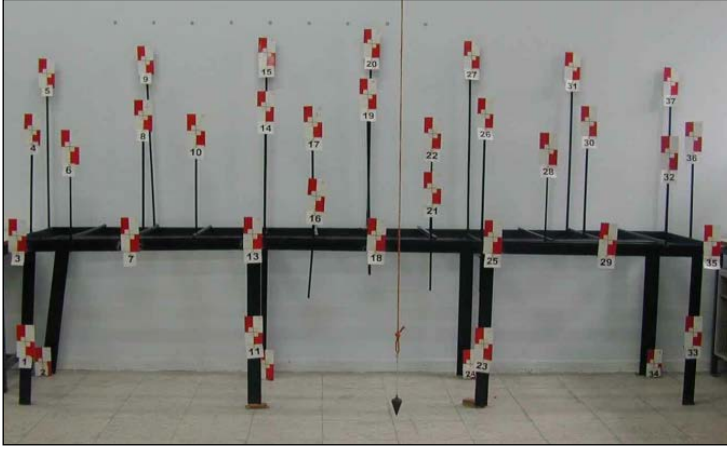
Yapılan çalışmada, Şekil 4’de görülen 7.9 mikron boyut ve 1600x1200 nokta fotoğraf çözünürlük kapasitesine sahip 7-21 mm zum özellikli merceklerini kullanabilen, metrik olmayan Nikon Coolpix 950 sayısal kamerasının geometrik kalibrasyonunun yapılması amaçlanmıştır.

**Şekil 5. Zum Özellikli ve Metrik Olmayan
Nikon Coolpix 950 Sayısal Kamera**



Kalibrasyon çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Fotogrametri Laboratuvarındaki 3B test alanında gerçekleştirilmiştir. Bu test alanı 36 noktadan oluşup $4.5 \times 2 \times 1.1 \text{ m}^3$ 'lük bir hacim kaplamaktadır (Şekil 6).

Şekil 6. 3B Test Alanı

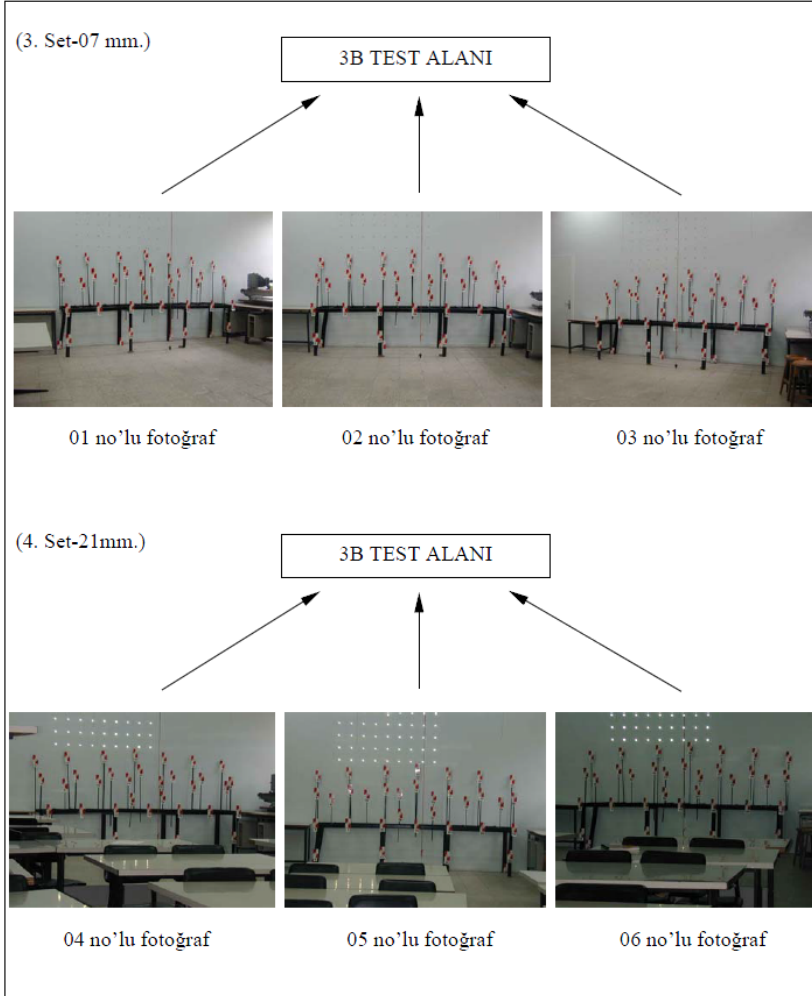


Test alanının 3B koordinatları, daha önceki çalışmalarda jeodezik yöntemlerle ölçülüp koordinatları hesaplanmış ve bu koordinatların hatasız olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada da, test alanının önceden hesaplanan bu 3B koordinatları kullanılmıştır.

Test alanında fotoğraf çekim planı yapılarak, iki set halinde, kamera ile homojen olarak üç istasyon noktasından (test alanın karşı-sol, karşı ve karşı-sağ tarafından) çoklu konvergent

kalibrasyon algoritması kullanılarak üç adet fotoğraf çekimi yapılmıştır (Şekil 7).

Şekil 7. Nikon Coolpix 950 Sayısal Kamerası İle Uygulanan Fotoğraf Çekim Planı ve Elde Edilen Fotoğraflar (Marangoz 2002)

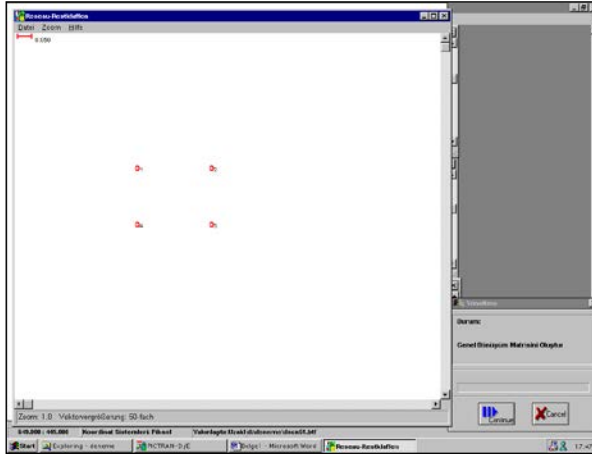


Değerlendirme işlemi, bir sayısal görüntü işleme yazılımı olan PICTRAN sayısal fotogrametri değerlendirme yazılımı kullanılarak PICTRAN-D (iç ve dış yöneltme - 3B

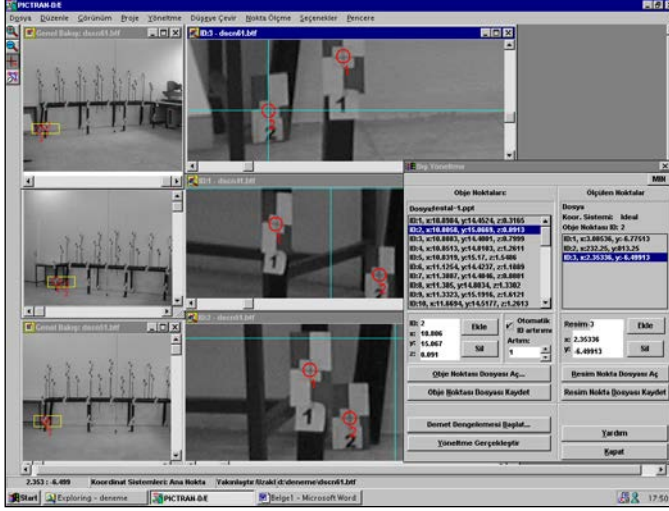
değerlendirme) ve PICTRAN-B (demet dengelemesi) modülleri ile yapılmıştır.

PICTRAN-D modülü, çekilen fotoğrafların bir takım işlemler sonucu bilgisayar ortamında yeniden modellendirilmesini sağlar. Modeli oluşturan bölge üzerinde yapılan 3B nokta ölçümü esnasında kullanılan fotoğraflarda uzaysal doğrular oluşturulur. Böylelikle nokta ölçümünün hassas olması sağlanır. Uzaysal ışınlar kesiştirilerek noktaların 3B koordinatları elde edilir. Ayrıca seçilecek düzlem üzerinde noktaların konumları ilişkilendirilebilir. Bu modül kullanılarak fotoğrafların iç yöneltmeleri, sayısal kameralarda Reseau plakaları ve orta nokta bulucuları olmadığından dört köşe noktasından yapılmıştır. Yöneltmeye başlandıktan sonra ekranda ölçülen noktalardaki hatalar görülür ve bu hataların değerine bağlı olarak iç yöneltme kabul veya reddedilir (Şekil 8). Şekil 9’da ise PICTRAN-D modülünde üç fotoğrafın birlikte kullanılarak yapılan dış yöneltme işlemi gösterilmiştir.

Şekil 8. İç Yöneltme İşlemi Sonrası Ekranda Ölçülen Noktalardaki Hatalar (Marangoz 2002)



**Şekil 9. PICTRAN-D Modülü Çalışma Ortamı,
Üç Fotoğrafın Birlikte Kullanılarak Yapıldığı
Dış Yönelme İşlemi (Marangoz 2002)**



PICTRAN-B modülünde ise, iç yönelmesi yapılan fotoğraflar kontrol noktalarıyla demet dengelemesi işlemine sokulur. Dengeleme esnasında fotoğraf çekim noktasının koordinatlarına ve dönüklük değerlerine ihtiyaç duyulmaz. Bu değerler demet dengelemesi esnasında bu modül tarafından hesaplanmaktadır. Bu özellik PICTRAN-B'nin en önemli özelliğidir. Ayrıca dengelemede cisim üzerinden herhangi bir ölçü veya koordinat parametre olarak girilebilir (Demiray 2001).

Uygulanan en küçük kareler tekniğinde, fotoğrafta ölçme hatalarını en aza indirmek ve ayrıca iç ve dış yönelme elemanlarını radyal ve teğetsel distorsiyon parametreleriyle birlikte eş zamanlı hesaplamak için uygulanır. Bu tekniğin matematiksel modeli klasik olarak uygulanmıştır. Ancak stokastik modelin ağırlık matrisi parametreleri demet dengelemesinden önce hesaplanmıştır. Bu parametreler iç yönelme elemanlarının sıfır olarak alınmasıyla elde edilen parametrelerdir. Bunun anlamı, hesaplama işleminde iç

yöneltme elemanlarının varyanslarının da sıfır alınması demektir.

3.2. Kalibrasyon Sonuçları

PICTRAN fotogrametrik değerlendirme yazılımının PICTRAN-D modülü yardımıyla yapılan fotoğraf ölçme işleminden sonra PICTRAN-B modülü ile demet dengelemesine geçilmiştir. Demet dengelemesinde ilk değerler sayısal kamera için sıfır (0), odak uzaklığı (c) ise, 7 mm ve 21 mm olarak alınmış, bu yaklaşık değerlerin program içindeki statüleri ölçme değeri olacak şekilde girilmiştir.

Verilen bu ilk yaklaşık değerlerle iterasyon başlatılarak x_0 , y_0 ve c ' nin sonuç değerleri 7 mm durumunda 17 iterasyon sonucunda, 21 mm durumunda 13 iterasyon sonucunda sıfır hata ile elde edilmiştir. Bu sayısal kamera sisteminin iç yöneltme eleman değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Fotoğrafların iç yöneltmesinde ölçülen köşe noktalarındaki distorsiyon değerleri de Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kamera sisteminin İç Yöneltme Elemanları (Marangoz 2002).

YAKLAŞIK DEĞERLER	Piksel Koordinat Sistemi (mm)		c (mm)
	x_0	y_0	
Maksimum Zum	0.000000	0.000000	7.000000
Minimum Zum	0.000000	0.000000	21.000000
KALİBRASYON SONRASI DEĞERLER	x_0	y_0	c (mm)
Maksimum Zum	-0.123357	-0.058867	7.116261
Minimum Zum	-0.058311	-0.081769	21.149562

Çizelge 2. Radyal Distorsiyon Değerleri (Marangoz 2002).

7 mm Mercek İçin (mm)		21 mm Mercek İçin (mm)	
A ₁	-0.00102006	A ₁	0.0133858
A ₂	-0.000126240	A ₂	-0.000473790
A ₃	0.0481907	A ₃	-0.0114144
A ₄	-0.0261101	A ₄	0.000000

Çizelge 2'deki A1, A2, A3 ve A4 değerleri fotoğrafların iç yöneltmesinde ölçülen köşe noktalarındaki distorsiyon değerleridir. Bu distorsiyon değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$x_{neu} = x_{alt} - x_{alt} \cdot (R_2 - R_0^2) \cdot A_1$$

$$x_{neu} = x_{alt} - x_{alt} \cdot (R_2 - R_0^2) \cdot A_2$$

$$y_{neu} = y_{alt} - y_{alt} \cdot (R_2 - R_0^2) \cdot A_1$$

$$y_{neu} = y_{alt} - y_{alt} \cdot (R_2 - R_0^2) \cdot A_2$$

Yapılan demet dengelemesi sonucunda radyal distorsiyon değerleri ve iç yöneltme elemanları arasındaki korelasyon değerleri bulunmuştur. Değerlendirme öncesinde demet dengelemesinin temel prensibi gereği iç yöneltme ve distorsiyon değerlerinin birbirleriyle korelasyonsuz oldukları, yani bağımsız oldukları düşünülmüştür. Demet dengelemesi sonucunda birbirleri ile korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 3. 7 mm Mercek İçin Korelasyonlu ve Korelasyonsuz Değerler (Marangoz 2002).

Nokta No	Radyal Distorsiyon (mm)	Teğetsel Distorsiyon (mm)
1	-0.00102006	0.001698
2	-0.000126240	0.00004293
3	0.0481907	0.009739
4	-0.0261101	0.008561

Çizelge 4. 21 mm Mercek İçin Korelasyonlu ve Korelasyonsuz Değerler (Marangoz 2002).

Nokta No	Radyal Distorsiyon (mm)	Teğetsel Distorsiyon (mm)
1	0.0133858	0.002370
2	-0.000473790	0.00008577
3	-0.0114144	0.008242
4	0.000000	-

Teğetsel distorsiyon değerleri ile iç yöneltme elemanlarının birbirleriyle dengeleme sonrasında korelasyon değerleri bulunmuştur. Dengeleme öncesi ise demet dengelemesinin temeli gereği iç yöneltme bilinmeyenleri ve distorsiyonlar birbirlerinden bağımsız olarak düşünülmüştür.

4. SONUÇLAR

Tarihi eserlerin envanter çalışmalarında, durumlarının belirlenmesi, korunması ve kayıt altına alınmasında yersel fotogrametri yöntemi kullanılabilir. Eserlerin görüntülerinin elde edilmesi bu yöntemin temel aşamasıdır ve bunun için öncelikle metrik olan profesyonel kameralara, değerlendirme alet ve donanımlarına ihtiyaç duyulur. Günümüzde, bu metrik kameraların yerine ucuz, basit ve piyasada bol bulunan metrik olmayan kameralar yaygınlaşmıştır. Metrik olmayan kameraların iç yöneltme elemanlarının bilinmemesi ve mercek sistemlerinin fazla hareketli olmalarından dolayı, bu kameraların uygulama öncesinde yada sırasında test ve kalibre edilmeleri gerekmektedir. Bir kameranin kalibrasyonu, kamera fotoğraf koordinat sistemini oluşturan kamera merceğinin sabiti olan odak uzaklığı değeri, fotoğraf koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ile mercek sisteminin distorsiyon parametrelerinin hesaplanması ile sağlanır (Demiray 2001). Günümüzde sayısal kameraların yaygınlaşması ile kameraların geometrik kalibrasyonu bilgisayar ve sayısal hesaplamalar yardımıyla yapılabilir.

Bu çalışmada, 7.9 mikron boyut ve 1600x1200 nokta fotoğraf çözünürlük kapasitesine sahip 7-21 mm merceklerini kullanabilen, zum özellikli, metrik olmayan Nikon Coolpix 950 sayısal kamerası, kendi kendine kalibrasyon yöntemi ile bir test alanında kalibre edilmiştir. Bu yöntem yardımıyla, test alanında bulunan noktaların yüksek doğrulukta elde edilen 3B cisim

koordinatlarının demet dengelemesine bilinmeyen olarak katılmasıyla, fotoğraf çekim merkezi koordinatları ve odak uzaklığı yüksek doğrulukta elde edilmiştir.

Kullanılan kendi kendine kalibrasyon yönteminde, hiçbir cisim uzayına ait etkili kontrol tekniğinin kullanılmaması ve fotoğraf çekim noktalarında tam olarak hedeflerden gelen ışınların kesişmesinin sağlanmasındaki doğruluğun belirlenebilmesi önemlidir. Bu da laboratuvar ortamında sağlanabilen, fotoğraf çekim merkezleri ile test alanı arasındaki geometrik yapının doğru olarak kurulabilmesi ile mümkündür. Yöntemin avantajı, doğruluğu yüksek bir kalibrasyon sonucu sağlamasıdır. Buna karşılık zaman ve laboratuvar ortamı gerektirmesi dezavantaj olarak sayılabilir.

Çekilen fotoğraflar kullanılarak yapılan değerlendirme işlemi ise, bütünüyle PICTRAN sayısal fotogrametri değerlendirme yazılımı kullanılarak, PICTRAN-D (iç ve dış yöneltme - 3B değerlendirme) ve PICTRAN-B (demet dengelemesi) modülleri ile yapılmıştır. Uygulamanın önemli kısmını oluşturan dış yöneltme aşaması tüm modelin doğruluğunun hesaplanması ve demet dengelemesi açısından önemlidir. Bu işlemler için PICTRAN B yazılımını oluşturan demet dengelemesi kullanılmıştır. Ancak yüzeyin doğru olarak belirlenip, bu yüzey üzerinden doğru koordinatların okunması yine PICTRAN-D modülünün yüzey belirleme arayüzü ile sağlanmıştır. Diğer otomatik yüzey ölçme yazılımlarına göre PICTRAN-D modülünün arayüzü, ölçme yapmak açısından daha uzun zaman gerektirmesi ve kullanım açısından daha zor olmasına rağmen uygulama sonucunda istenilen sonucu sağlamıştır.

Sonuçta, dengeleme öncesinde, demet dengelemesinin temel prensibi gereği, iç yöneltme elemanları ile distorsiyon değerlerinin birbirleriyle korelasyonsuz oldukları halde, demet

dengelemesi sonucunda radyal distorsiyon değerleri ve iç yöneltme elemanları arasında korelasyon olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda, mimarlık ve tarihi eser uygulamalarının en önemli ayağını oluşturan kültürel mirasın korunması ve kayıt altına alınması için uygulanabilecek bir eserin sayısal fotogrametrik yöntemle rölövesi çıkarılma çalışmasında, test edilen Nikon Coolpix 950 sayısal kamerası ve benzeri bir kameranın kullanılması durumunda, oluşturulan model üzerinde radyal mercek distorsiyonundan kaynaklanan hataların oluşması muhtemeldir. Bu tür distorsiyon, kamera ile çekilen fotoğraf üzerinden herhangi metrik ölçüm yapılacağı zaman dikkate alınmalı ve kameranın geometrik kalibrasyonu ile giderilmelidir.

5. TEŞEKKÜRLER

Yazar; çalışmadaki değerli katkılarından dolayı, Sayın Prof. Dr. Gürcan BÜYÜKSALİH'e (İstanbul Üniversitesi) ve Sayın Doç. Dr. Bahadır ERGÜN'e (Gebze Teknik Üniversitesi) teşekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Beyer H A (1992) Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System, 186, ETH Zürich.
- Büyüksalih G (1997) Geometric and Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers for Photogrammetric Applications, Ph.D Thesis, University of Glasgow.
- Büyüksalih G ve Akcin, H (1999) Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Uygulamalarında Kullanılan Video Sistemleri ve Teknik Özellikleri, Harita Dergisi.
- Demiray A O (2001) Fotogrametrik Veri Elde Etme Sistemlerinin Kalibrasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ergün B (1999) 3B Otomobil Yüzeyinin Dijital Fotogrametrik Yöntemle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fryer J G (2001) Camera Calibration, In: K. B. Atkinson (ed), Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing.
- Krauss K (2007) Fotogrametri: Cilt 1: Geometrik Temeller ve Standart Yöntemler (Çev. M. O. Altan). İTÜ Vakfı Yayınları.
- Marangoz A M (2002) Sayısal Kameralarla Tarihsel Yapıların Rölelevelerinin Çıkarılması Olanakları, Yüksek Lisans Tezi, Danışman: Prof. Dr. Ahmet YAŞAYAN, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Nikon (1999) Nikon Coolpix E 950 Dig. Camera Pocket Guide.
- Shenk, T (1999) Digital Photogrammetry, The Ohio State University, TerraScience, USA.

- Technet (1997) Pictran Digital Photog. Software Manual.
- Visnovcova J, Gruen A ve Zhang L (2001) Image-Based Object Reconstruction and Visualization for Inventory of Cultural Heritage, Proceedings of EVA 2001 Conference - Electronic Imaging and Visual Arts, Florence, Italy, 26.3. - 30.3.2001, p. 118 – 122.
- Wolf P R, Dewitt B. A, ve Wilkinson B E (2014) Elements of Photogrammetry with App. in GIS. McGraw-Hill Edu.
- Yılmaz H M, Karabörk H ve Yakar M (2000) Yersel Fotogrametrinin Kullanım Alanları, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı 1, 18-28.

YEREL JEOİD BELİRLEMEDE ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİ¹

Birol KURU²

Mustafa YILMAZ³

1. GİRİŞ

Fiziksel yeryüzünde gerçekleştirilmiş olan jeodezik ölçümlerin değerlendirilebilmeleri için matematiksel olarak ifade edilen modellere ihtiyaç vardır. Fiziksel yeryüzü homojen bir kütle dağılımı göstermediği için geometrik olarak tanımlanamamakta ve bu nedenle yapılan ölçülerin matematiksel olarak bilinen hesap yüzeylerine parametre ve denklem olarak aktarılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Jeodezik (coğrafi) üç boyutlu koordinatları temsil eden elipsoidal enlem, boylam ve yükseklikler, global uydu bazlı konumlama sistemleri (*Global Navigation Satellite Systems-GNSS*) ile Jeodezik Referans Sistemi 1980 (*Geodetic Reference System 1980-GRS80*) kullanılarak elde edilirler. Ancak büyük ölçekli mühendislik projelerinde ve haritacılık çalışmalarında fiziksel yeryüzünü esas alan ve nivelman uygulaması sonucu bulunan ortometrik yüksekliklere ihtiyaç duyulur. GNSS ile elde edilen elipsoidal yüksekliklerin fiziksel anlamı bulunmamaktadır. Bu bağlamda, mühendislik projelerinde kullanılabilmeleri

¹ Bu çalışma, Birol KURU tarafından Mustafa YILMAZ danışmanlığında hazırlanan Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

² Öğr. Gör., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Köprübaşı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, ORCID: 0000-0002-2203-301X.

³ Prof. Dr, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-4192-3226.

amacıyla geometrik temelli elipsoid al yüksekliklerin fiziksel temelli ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, elipsoid al yüksekliklerin ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi için gerekli olan yerel (lokal) jeoid modelleri; enterpolasyon doğruluğunu etkileyen veri yoğunluğu ve dağılımına ilişkin mevcut araştırmalar temel alınarak seçilen, ters mesafe ile ağırlıklı (TMA), kriging (KRG), en küçük eğrilik (EKE), radyal bazlı fonksiyon (RBF) ve geliştirilmiş Shepard (GSH) enterpolasyon yöntemleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Enterpolasyon noktalarının, oluşturulan modellerden hesap edilen jeoid yükseklikleri ile bilinen jeoid yükseklikleri arasındaki farklarına ait karesel ortalama hata (KOH) değerleri incelenerek en efektif enterpolasyon yönteminin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

2. YÜKSEKLİK VE ENTERPOLASYON

2.1. Jeodezik Yükseklik Kavramı

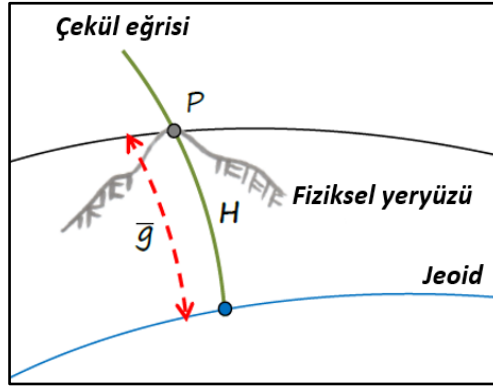
Üç boyutlu (3B) konum bilgisinin üçüncü boyutu yüksekliktir. Yeryüzündeki bir noktanın yüksekliğinden, durgun okyanus yüzeylerinin karaların altından devam ettiği varsayımıyla oluşturulan ve bir nivo yüzeyi olan jeoid yüzeyi ile fiziksel yeryüzü üzerindeki nokta arasındaki bağlantı anlaşılır. Bir noktaya ait yüksekliğin ifade edilebilmesi için başlangıç yüzeyi ve dik doğrultuları belirlenmelidir. Yeryüzündeki noktalar için en kolay belirlenebilen doğrultu, çekül doğrultusudur. Fiziksel yeryüzünde ölçüye konu edilen bir noktadan sarkıtılmış olan çekül eğrisinin jeoide değdiği noktaya kadar olan boyu, yüksekliklerin geometrik anlamdaki ifadesidir (Turgut, 1995).

Yerkürenin, kütesinden kaynaklanan çekim kuvveti ve kendi eksenini etrafındaki dönme hareketinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti etkisindeki jeoid yüzeyinin konumu, fiziksel

yeryüzüne göre tam olarak elde edilememektedir. Bu nedenle çeşitli kabullere farklı yükseklikler tanımlanmıştır (Tuşat, 2000).

2.1.1. Ortometrik Yükseklik

Fiziksel yeryüzü üzerindeki bir ölçü noktasının, ilgili noktadan geçen çekül eğrisi boyunca jeoide olan uzaklığı, ortometrik yükseklik olarak tanımlanır (Şekil-1). Ortometrik yükseklik, fiziksel karakterdedir ve ölçü noktasının gravite büyüklüğüne bağlıdır. Farklı iki noktanın aynı seviye (nivo) yüzeyi üstündeki ortometrik yükseklikleri birbirinden farklı olabilir.



Şekil 1. Ortometrik yükseklik (Aydın, 2014)

Ortometrik yüksekliği hesaplamak için ilgili noktadaki jeopotansiyel sayı (yükseklik-kot) değeri kullanılır.

$$C_p = W_o - W_p = \int_0^P g dh \quad (1)$$

$$C_p = \bar{g}H \quad (2)$$

eşitliklerindeki, C_p ; P noktasındaki jeopotansiyel sayı, $\bar{g}$; çekül eğrisi boyunca ortalama gravite değeridir. Ortometrik yükseklik (H),

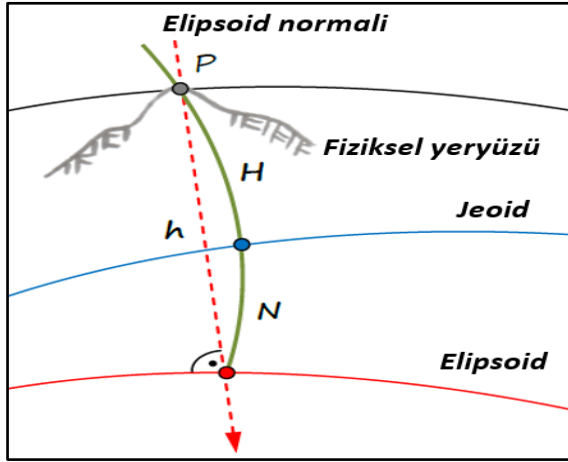
$$H = \frac{C}{\bar{g}} \quad (3)$$

formülü ile hesaplanabilir (Vanicek ve Krakiwsky, 1982; Torge, 1991).

2.1.2. Elipsoidal Yükseklik

Büyük yarı eksen (a) ve küçük yarı eksen (b) temel parametreleri ile tanımlanan elipsin küçük yarı eksen etrafında döndürülmesi sonucu oluşan kapalı geometrik yüzeye elipsoid adı verilir. Eğrilik yarıçapı (R), elipsoidin basıklığı (f), birinci eksantrisitesi (e^2), ikinci eksantrisitesi (e'^2) gibi diğer parametreler iki temel parametreden (a ve b) hesaplanabilir. Elipsoid, yerküreye benzemesinden dolayı fiziksel yeryüzündeki ölçülerin indirgenebileceği jeodezik referans yüzeyi olarak kullanılabilir (Yurt, 2006).

Fiziksel yeryüzü üzerindeki bir ölçü noktasının, ilgili noktadan geçen elipsoid normal boyunca seçilen referans elipsoidine olan uzaklığı, elipsoidal yükseklik (h) olarak tanımlanır (Şekil-2).



Şekil 2. Elipsoidal yükseklik (Aydın, 2014)

2.2. Jeoid ve Jeoid Belirleme Kavramları

Gauss (1828) tarafından, “Geometrik anlamda, Dünya’nın şekli olarak adlandırdığımız yüzey, her noktasında

çekül doğrultularını dik açılarla kesen ve okyanus yüzeyi ile kısmen çakışan yüzeyden başka bir şey değildir.” şeklinde tanımlanan ve Listing (1872) tarafından “jeoid” adı verilen yüzey yeryüzünün gerçek şeklini ifade etmekte kullanılmaktadır (Yılmaz ve Yılmaz, 2014).

Güncel uydu teknolojisinin gelişimine paralel olarak GNSS kullanımının yaygınlaşması ile jeoid yüzeyinin tespiti daha çok önem kazanmaya başlamıştır. Fiziksel yeryüzünde gerçekleştirilen GNSS ölçümleri elipsoidal temelli olmakla birlikte yükseklik boyutunda fiziksel olarak anlam kazanabilmeleri bakımından jeoide ihtiyaç duyarlar. Elipsoid yüzeyi ile jeoid yüzeyinin sürekli olarak örtüşmesi söz konusu değildir. Örtüşmeyen sadece bazı noktalarda kesişen bu iki yüzey arasındaki düşey boyuttaki fark jeoid yüksekliği (N) olarak adlandırılır (Grafarend, 1994). Yatay konumu bilinen noktalar ile jeoid yüksekliğinin ifade edilmesini sağlayan modelleme prosedürü jeoid tespiti olarak tanımlanır (Yılmaz, 2005).

Gerçek gravite alanını ifade eden, gerçek gravite potansiyeli (W), ortometrik yükseklik (H), gerçek gravite (g), astronomik enlem ve boylam (Φ , Λ) büyüklükleriyle referans elipsoidine ait, normal potansiyel (U), normal gravite (γ), elipsoidal yükseklik (h), jeodezik enlem ve boylam (ϕ , λ) büyüklükleri arasındaki farklardan oluşan bozucu potansiyeli (T), jeoid yüksekliği (N), gravite anomalisi (Δg) ve çekül sapması bileşenleri (η , ξ) büyüklüklerinin belirlenmesi, jeoidin belirlenmesi şeklinde ifade edilir. Jeoidin belirlenmesi işlemi büyük çoğunlukla jeoid yüksekliği (N) kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Karaali, 1985).

Kullanılan verilere ve uygulanan modellere göre, jeoid tespiti yöntemlerinin sınıflandırılması aşağıdaki gibidir (Turgut, 1995):

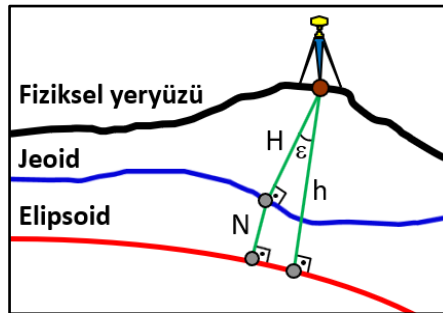
- Astro-jeodezik jeoid tespiti
- Gravimetrik jeoid tespiti
- Jeopotansiyel modeller kullanılarak jeoid tespiti
- Kombine yöntemle (*remove-restore*) jeoid tespiti
- GNSS/Nivelman yöntemiyle jeoid tespiti

2.2.1. GNSS/Nivelman Yöntemiyle Jeoid Tespiti

GNSS kullanılarak ölçüm yapılan noktalarda elipsoidal yükseklikler (h) elde edilir. Klasik (geometrik) nivelman ile yapılan ölçümler ile ortometrik yükseklikler (H) elde edilir. Elde edilen bu yükseklikler arasındaki bağlantı Eşitlik (4) ile gösterilir (Featherstone vd., 1998).

$$N = h - H \quad (4)$$

(N) jeoid yüksekliği olup bir noktada elipsoidal yükseklik ve ortometrik yükseklik biliniyorsa jeoid yüksekliği Eşitlik (4) kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir (Şekil 3). Eşitlik (4), yerçekimi doğrultusunu gösteren çekül doğrultusu ile referans elipsoidinin normal doğrultusu arasındaki küçük açısal fark olan çekül sapmasının (ε) ihmal edilmesi nedeniyle tam olarak kesin değildir. Bununla birlikte, çekül sapmasının ortometrik yükseklik üzerindeki etkisi çok küçük ($< \text{mm}$) olduğundan söz konusu eşitlik çoğu haritacılık uygulaması için yeterli doğrulukta sonuçlar verir (Tenzler vd., 2005; Yılmaz vd., 2017)



Şekil 3. Ortometrik ve elipsoidal yükseklikler ile jeoid yüksekliği arasındaki ilişki (Yılmaz vd., 2016)

2.3. Yerel Jeoid Tespitinde Enterpolasyon

Enterpolasyon, değer bilinen noktalardan başlayarak, değeri bilinmeyen bir noktanın olası değerini hesaplamaya çalışan yöntem olarak tanımlanır. Genellikle enterpolasyon, mühendislik, matematik vb. bilim dallarında elde edilen verilerin bir fonksiyon eğrisine çevrilmesinde kullanılır. Elde edilen verilerin homojen dağılımlı olmadığı durumlarda boş bölgelerdeki değerler enterpolasyon yöntemleriyle belirlenebilir (Smith vd., 2007).

Jeoid yüksekliklerini belirlemede, bölgedeki bilinen elipsoidal yükseklik ile ortometrik yükseklik değerlerine bağlı olarak jeoid yüksekliklerinin analitik bir yüzey modeli olarak ifade edildiği yöntem, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ara noktaların bilinmeyen jeoid yükseklik değerlerinin enterpolasyonla hesaplanmasında yükseklik değerleri bilinen noktalara göre elde edilen matematiksel yüzey modeli kullanılır (Güllü vd., 2011).

2.3.1. Ters Mesafe ile Ağırlıklı Enterpolasyon

Enterpolasyon bölgesinde, yakın noktaların uzak noktalara göre ağırlığının daha fazla olması ilkesine dayanan TMA'nın kullanımı, programlama açısından uygun bir algoritmaya sahip olmasından dolayı yaygındır. Enterpolasyon noktasının değeri, referans noktası değerlerinin ağırlıklandırılmış ortalamasına göre hesaplanır. Referans noktasıyla enterpolasyon noktası arasındaki mesafeye göre gerçekleştirilen ağırlıklandırma sonucu, enterpolasyon noktalarına, uzak referans noktalarının etkisi az, yakın referans noktalarının etkisi fazladır (Güllü vd., 2011).

2.3.2. Kriging Enterpolasyonu

Harita, çevre, meteoroloji, maden, inşaat vb. birçok mühendislik dalında kullanılabilirliğini kanıtlamış olan KRG,

jeoistatistiksel bir interpolasyon yöntemidir. KRG, referans noktaları arasındaki mesafe ve yön ilişkisini, yüzeyin karakterini belirlemeye yardımcı olan bir fonksiyon olarak kullanır. Böylece her konum için çıktı değerlerini belirlemek amacıyla, belirli bir etki alanı içindeki bazı noktalara veya tüm noktalara matematiksel bir fonksiyon atanır. KRG yönteminde yakın noktaların daha fazla etkiye sahip olmasını sağlayan bir ağırlıklandırma sistemi kullanılır (Güllü vd., 2011).

2.3.3. En Küçük Eğrilik Enterpolasyonu

Yer bilimlerinde yaygın olarak kullanılan EKE ile elde edilen model, referans noktalarından geçen minimum bir bükülmeye sahip ince bir plaka şeklinde olmasından dolayı mümkün olduğunca interpolasyon noktalarının yakınından geçen bir yüzey olarak tanımlanır. EKE algoritmasıyla elde edilen yüzeydeki bükülme veya eğilmeler için, 0 ile 1 arasında değişen sınır gerilme ve iç gerilme katsayıları kullanılır. Bu değer büyüdükçe yüzeyde oluşan bükülme veya eğilmelerde küçülme görülmektedir (Güllü vd., 2011).

2.3.4. Radyal Bazlı Fonksiyon ile Enterpolasyon

Çok sayıda kesin enterpolasyon yöntemini kapsayan RBF, birçok açıdan jeoistatistiksel enterpolasyon yöntemlerine benzer. Ancak variogramların önceden analiz edilmesi avantajına sahip değildir. Bununla birlikte, referans noktaları hakkında herhangi bir varsayımda bulunmazlar ve çok geniş veri türleri için oldukça başarılı sonuç sağlarlar. Arazi modelleme ve yer bilimleri çalışmalarında özellikle çoklu kuadratik (*multiquadratic*) fonksiyon ve ince tabaka parçalı polinomu (*thin plate spline*) yöntemleri oldukça etkili olmaktadır (Güllü vd., 2011).

2.3.5. Geliştirilmiş Shepard Enterpolasyonu

Ters mesafe ağırlıklı en küçük kareler yöntemini kullanan MSHP ile oluşturulan yüzey, her bir dağınık veri noktasından

geçecek şekilde enterpolasyon yapar ve enterpolasyon noktasına en yakın referans noktalarından güçlü şekilde etkilenir. En küçük kareler yönteminin bölgesel olarak kullanılmasıyla, oluşturulan kontur haritalarında boğa gözü (*bull's eye*) görünümünü ortadan kaldırmaktadır (Güllü vd., 2011).

3. MATERYAL VE METOT

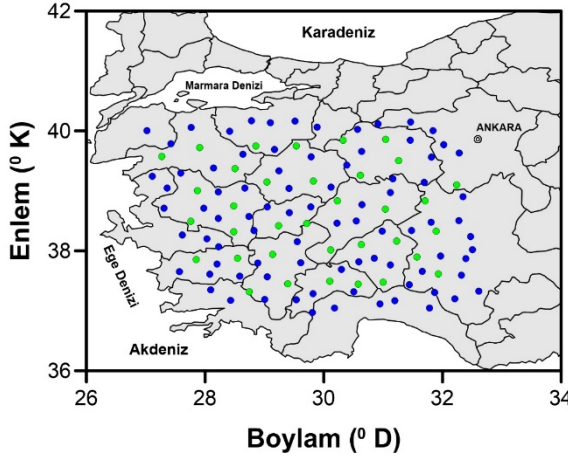
3.1. Uygulama Alanı

Çalışma kapsamında yerel jeoid hesaplaması için, $36.5^{\circ} < \varphi < 40.5^{\circ}$ enlem ve $26.5^{\circ} < \lambda < 33.0^{\circ}$ boylam değerleri aralığını kapsayan bölge uygulama alanı olarak seçilmiştir. Referans noktaları arasındaki mesafenin enterpolasyon noktalarının jeoid yüksekliklerine olan etkisini inceleyebilmek amacıyla makro ve mikro ölçekte iki test ağı kurgulanmıştır (Tablo-1).

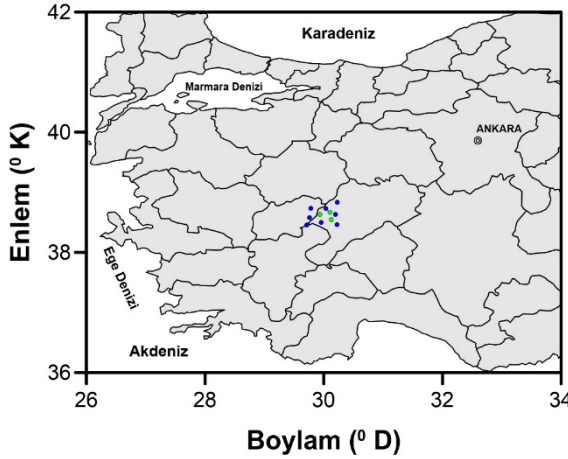
Tablo 1. Test ağı modelleri

Model	Nokta Sayısı	
	Referans	Enterpolasyon
Makro	85	35
Mikro	8	3

Makro test ağındaki enlem, boylam, ortometrik ve elipsoidal yüksekliği bilinen 120 noktanın dağılımı Şekil-4'de, mikro test ağındaki enlem, boylam, ortometrik ve elipsoidal yüksekliği bilinen 11 noktanın dağılımı Şekil-5'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Makro test ağındaki referans ve enterpolasyon noktalarının dağılımı (referans: mavi; enterpolasyon: yeşil)



Şekil 5. Mikro test ağındaki referans ve enterpolasyon noktalarının dağılımı (referans: mavi; enterpolasyon: yeşil)

3.2. Uygulamanın Amacı

Planlanan çalışmada, enlem, boylam ve yükseklikleri (elipsoidal-ortometrik) bilinen referans noktalarına göre yerel jeoid modellerinin oluşturulması ve enlem, boylam ve yükseklikleri (elipsoidal) bilinen enterpolasyon noktalarındaki

ortometrik yüksekliklerin hesaplanmasını sağlayan en uygun enterpolasyon yönteminin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliklere dönüştürülebilmesi için jeoid yüksekliklerine gerek duyulmaktadır. GNSS/Nivelman yöntemiyle her iki yükseklik sisteminde belirlenmiş olan büyüklükler kullanılarak jeoid yükseklikleri hesaplanabilir. Bu çalışmada, elipsoidal yüksekliklerden (h), ortometrik yüksekliklere (H) dönüşüm için gerekli olan yerel jeoid modellerinin belirlenmesi, TMA, KRG, EKE, RBF ve GSH enterpolasyon yöntemlerini, Surfer® programında varsayılan (*default*) katsayı ve ayarlar ile kullanılması, Eşitlik (5) ile elde edilen KOH değerlerinin karşılaştırılması ve en doğru sonucu veren enterpolasyon yönteminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{GNSS/Niv} - N_{Ent})_i^2} \quad (5)$$

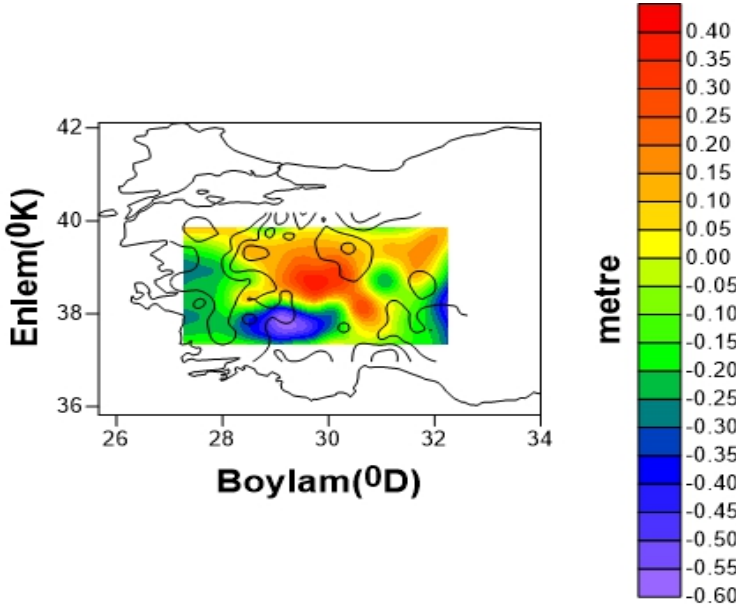
4. UYGULAMA, BULGULAR VE SONUÇ

Makro test ağındaki enlem, boylam ve yükseklikleri (elipsoidal-ortometrik) bilinen 85 referans noktasının jeoid yükseklik değerleri ve mikro test ağındaki enlem, boylam ve yükseklikleri (elipsoidal-ortometrik) bilinen 8 referans noktasının jeoid yükseklik değerleri kullanılarak, Surfer® programında varsayılan katsayı ve ayarlar esas alınarak, TMA, KRG, EKE, RBF ve GSH yöntemleri ile uygulama alanının yerel jeoid yüzey modelleri oluşturulmuştur. Makro ve mikro test ağlarında ilgili yöntemlere göre oluşturulan jeoid yüzey modellerinden enterpolasyon noktalarının jeoid yükseklikleri hesaplanmıştır. Enterpolasyon noktalarının hesaplanan jeoid yükseklikleri ile ilgili noktaların GNSS/Nivelman yöntemine göre bilinen jeoid yükseklikleri karşılaştırılarak aralarındaki jeoid yüksekliği fark

değerlerinin ($N_{GNSS/Niv} - N_{Ent}$) istatistikleri Tablo-2 ve Tablo-3’de verilmiştir. Görsel değerlendirme de yapabilmek amacıyla ilgili jeoid yüksekliği farklarının en küçük KOH değerine göre fark haritaları da (Şekil-6 ve Şekil-7) oluşturulmuştur.

Tablo 2. Makro test ağındaki jeoid yüksekliği fark değerlerinin istatistikleri (m)

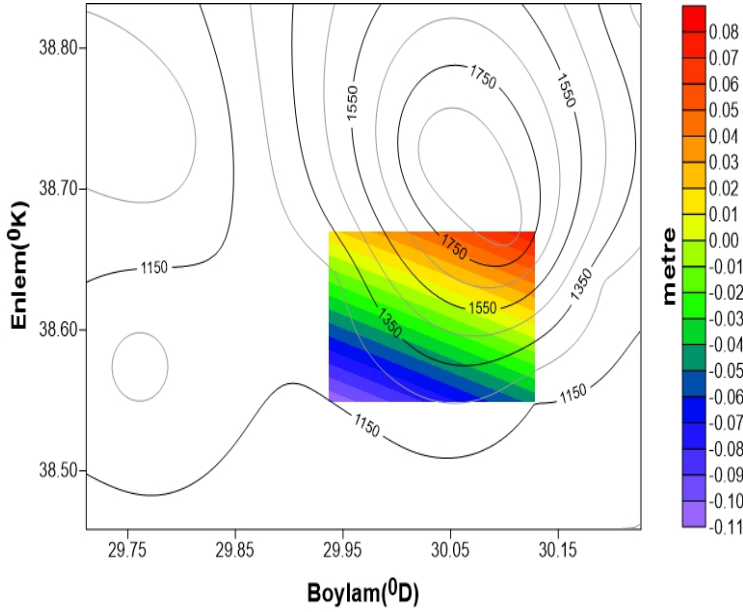
Yöntem	Min.	Maks.	Ort.	KOH
TMA	-1.4808	0.9147	0.2298	0.5510
KRG	-0.5862	0.5668	0.0073	0.2223
EKE	-0.5170	0.4647	-0.0215	0.2218
GSH	-0.5579	0.3335	-0.0500	0.2026
RBF	-0.5848	0.4972	-0.0100	0.2237



Şekil 6. Makro test ağında GSH yöntemine göre elde edilen jeoid yüksekliği fark haritası

Tablo 2. Mikro test ağındaki jeoid yüksekliği fark değerlerinin istatistikleri (m)

Yöntem	Min.	Maks.	Ort.	KOH
TMA	-0.2245	0.1126	-0.0240	0.1774
KRG	-0.1367	0.0799	-0.0095	0.1131
EKE	-0.0468	0.0708	0.0005	0.0621
GSH	-0.1586	0.0420	-0.0457	0.1026
RBF	-0.1197	0.0586	-0.0129	0.0942



Şekil 6. Mikro test ağında EKE yöntemine göre elde edilen jeoid yüksekliği fark haritası

Makro test ağında 85 referans noktasına göre 35 interpolasyon noktası için yapılan çalışma sonucu Tablo-2’de verilen KOH değerleri karşılaştırıldığında, en küçük değere sahip GSH yönteminin en doğru sonuçları verdiği görülmektedir. GSH yöntemini sırası ile EKE, KRG ve RBF yöntemleri izlemektedir. Söz konusu yöntemlerin KOH değerleri birbirine oldukça yakındır. TMA yöntemi ise en büyük KOH değeri ile en düşük doğruluk sonucunu vermektedir. Ayrıca

Tablo-2’de verilen minimum ve maksimum değerleri incelendiğinde, GSH yönteminin modelleme doğruluğu ortaya çıkmaktadır.

Mikro test ağında 8 referans noktasına göre 3 enterpolasyon noktası için yapılan çalışma sonucu Tablo-3’de verilen KOH değerleri karşılaştırıldığında, en küçük değere sahip EKE yönteminin en doğru sonuçları verdiği görülmektedir. EKE yöntemini sırası ile RBF, GSH ve KRG yöntemleri izlemektedir. Söz konusu yöntemlerin KOH değerleri birbirine oldukça yakındır. TMA yöntemi ise en büyük KOH değeri ile en düşük doğruluk sonucunu vermektedir. Ayrıca Tablo-2’de verilen minimum ve maksimum değerleri incelendiğinde, EKE yönteminin modelleme doğruluğu ortaya çıkmaktadır.

Her iki test ağında da TMA yönteminin en düşük doğruluk sonucuna sahip olmasının, ağırlıklandırma prosedürünün, referans ve enterpolasyon noktaları arasındaki mesafeye bağlı olmasından dolayı uzaktaki noktaların enterpolasyona etkilerinin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmada konu edilen enterpolasyon yöntemlerine ait sonuçlar ele alınacak olursa; yerel jeoid belirleme çalışmaları için referans noktaları arasındaki mesafenin ≥ 15 km olduğu bölgelerde GSH yönteminin, referans noktaları arasındaki mesafenin ≤ 5 km olduğu bölgelerde EKE yönteminin, enterpolasyonda kullanılabileceği öngörülmektedir. 5 km’den küçük bölgeler için mikro test ağındaki referans noktalarının birbirine yakın olması ve noktaların bulunduğu fiziksel yeryüzünün düz bir yüzey varsayılması EKE yönteminin en doğru sonucu vermesini sağladığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Arslan, E. ve Yılmaz, M. (2005). Nokta Yoğunluğunun Geoit Hesabına Etkisi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart-1 Nisan 2005, Ankara.
- Aydın, C. (2014). Fiziksel Jeodezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- de Smith, M.J., Goodchild, M.F., Longley, P. (2018). Geospatial analysis : a comprehensive guide to principles, techniques and software tools (6th edition), The Winchelsea Press, London, UK.
- Featherstone, W.E., Dentith, M.C., Kirbiy, J.F. (1998). Strategies for accurate determination of orthometric heights from GPS. Survey Review, 34(267), 278-296.
- Gauss, C. F. (1828). Bestimmung des Breitenunterschiedes zwischen den Sternwarten von Göttingen und Altona, Göttingen.
- Grafarend, E.W. (1994). What is Geoid?, Geoid and its Geophysical Interpretations. Eds. Petr Vanicek and Nikolas T. Christou, Chapter 1, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, USA.
- Güllü, M., Yılmaz, İ., Yılmaz, M., Turgut, B. (2011). An alternative method for estimating densification point velocity based on back propagation artificial neural networks. Studia Geophysica et Geodaetica, 55(1), 73-86.
- Karaali C. (1985). Türkiye'nin Bir Bölgesi İçin Astrojeodezik Jeoid Belirleme Denemesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Listing, J. B. (1872). Über unsere jetzige Kenntnis der Gestalt und Grösse der Erde, Nachr. d. Kgl., Gesellsch. d. Wiss. und der Georg-August-Univ., 33-98, Göttingen.
- Tenzer, R., Vanicek, P., Santos, M., Featherstone, W.E., Kuhn, M. (2005). The rigorous determination of orthometric heights. Journal of Geodesy, 79, 82-92.
- Torge, W. (1991). Geodesy. Walter de Gruyter Company, Berlin, New York.
- Turgut, B. (1995). Fiziksel Jeodezi (Basılmamış Ders Notları). Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Tuşat E. (2000). GPS Gözlemleri ve Yersel Gözlemler Yardımıyla Jeoid Profilinin Çıkarılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Vanicek, P. and Krakiwsky, E. (1982). Geodesy: The Concepts. North Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo.
- Yılmaz M. (2005). İstanbul Metropolitan Alanında Geoit Araştırması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, M. ve Yılmaz, İ. (2014). Temel Harita Bilgisi, S. Erdoğan (Ed.), Bilgisayar Destekli Harita Yapımı ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Temelleri içinde (s. 3-20), 2014
- Yılmaz, M., Turgut, B., Güllü, M., Yılmaz, İ. (2016). Evaluation of Recent Global Geopotential Models by GNSS/Levelling Data: Internal Aegean Region, International Journal of Engineering and Geosciences, 1(1), 18-23, 2016.

- Yılmaz, M., Turgut, B., Güllü M., Yılmaz, İ. (2017). Application of artificial neural networks to height transformation, Technical Gazette, 24(2), 443-448.
- Yurt K. (2006). Geometrik ve Gravimetrik Metodlarla Lokal Jeoid Belirleme ve Modelleme: Trabzon ili Örneği. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com