KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOPOĞRAFİK DÜZENSİZLİKLERİN ORTOMETRİK YÜKSEKLİKLERE ETKİSİNİN FARKLİ ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SYM VE SİLİNDİRİK ŞABLONLAR YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

SEVDA OLGUN

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOPOĞRAFİK DÜZENSİZLİKLERİN ORTOMETRİK YÜKSEKLİKLERE ETKİSİNİN FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SYM VE SİLİNDİRİK ŞABLONLAR YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

SEVDA OLGUN

Doç. Dr. Aydın ÜSTÜN
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Haluk KONAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Uğur DOĞAN
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmama yön veren, her koşulda birikim ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Aydın ÜSTÜN'e,

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen Harita Mühendisliği Bölümündeki hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma, cennetteki güzel arkadaşım Aydan'a ve tüm arkadaşlarıma,

Emekleri ve sabırları için sevgili anneme, babama ve kardeşime,

Teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Haziran - 2017 Sevda OLGUN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GRAVİTE İNDİRGEMESİ VE TOPOĞRAFİK DÜZELTME 5
1.1. Boşlukta Gravite İndirgemesi 6
1.2. Basit Bouguer Düzeltmesi 8
1.2.1. Topoğrafik düzeltmeler 10
1.3. Topoğrafik Düzeltme Hesabı 12
1.3.1. Silindir bölme yöntemi 12
1.3.2. Prizma yöntemi 16
1.4. Tam Bouguer İndirgemesi 17
1.5. Poincare ve Prey'e Göre İndirgeme 18
2. ORTOMETRİK YÜKSEKLİKLER VE TOPOĞRAFYANIN ETKİSİ 21
2.1. Helmert Ortometrik Yüksekliği 23
2.2. Mader Ortometrik Yüksekliği 24
2.3. Niethammer Ortometrik Yüksekliği 25
2.4. Niethammer ve Helmert Ortometrik Yüksekliklerinin Karşılaştırılması 26
2.5. Gerçeğe Yakın Ortometrik Yükseklikler 26
3. SAYISAL ARAZİ VE GLOBAL BATİMETRİ MODELLERİ 29
3.1. Sayısal Arazi Modelleri 29
3.1.1. SRTM1 ve SRTM3 29
3.1.2. ASTER GDEM 30
3.2. Batimetri Modelleri 32
3.2.1. SRTM15-PLUS 32
4. SAYISAL UYGULAMA 34
4.1. Gravite Gözlem İstasyonlarında Topoğrafik Düzeltmeler ve Ortometrik Yüksekliğe Etkisi 34
4.2. Nivelman Yollarında Topoğrafik Düzeltmeler ve Ortometrik Yüksekliğe Etkisi 37
4.3. Tartışma 45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 54
EKLER 57
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 77
ÖZGEÇMİŞ 78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Silindirik kitle elemanı ve P noktasına çekim etkisi 9
Şekil 1.2. Silindir bölümleme için şablon örneği 13
Şekil 1.3. Silindir bölme yönteminde iç ve dış grid 14
Şekil 1.4. Yeryüzündeki P noktasına göre topoğrafik düzeltmeler için bölgeler 18
Şekil 1.5. Yer içindeki Q noktasına göre topoğrafik düzeltmeler için bölgeler 20
Şekil 2.1. Ortometrik Yükseklikler 22
Şekil 2.2. Helmert ve Niethammer ortometrik yüksekliklerinin elde edilişi 27
Şekil 3.1. SRTM verilerinin kapsadığı alan (URL-4, 2017) 31
Şekil 3.2 ASTER GDEM ve SRTM3 SYM'lerinin kapsadığı alan ve karşılaştırma (URL-5, 2017) 32
Şekil 3.3. SRTM15-PLUS global batimetri modeli 33
Şekil 3.4. SRTM15-PLUS Türkiye batimetri modeli 33
Şekil 4.1. Konya Kapalı Havzası SRTM3 SYM ile çalışma alanı ve gravite istasyonlarının gösterimi 35
Şekil 4.2. Çalışma bölgesi ve nivelman yolları 41
Şekil 4.3. Antalya-Samsun nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler 43
Şekil 4.4. Antalya-İstanbul nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler 43
Şekil 4.5. Antalya-İskenderun nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler 44
Şekil 4.6. Antalya-İzmir nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler 44
Şekil 4.7. Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi nivelman güzergahı (Simav ve diğ., 2015) 50
Şekil A.1. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan topoğrafik düzeltmeler haritası 58
Şekil A.2. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan topoğrafik düzeltmeler histogramı 58
Şekil A.3. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan yükseklik değişimleri haritası 59
Şekil A.4. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan yükseklik değişimleri histogramı 59
Şekil A.5. Niethammer şablonunda ASTER1-3 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 60
Şekil A.6. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 60
Şekil A.7. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 60

Şekil A.8. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 61
Şekil A.9. Niethammer şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 61
Şekil A.10. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 61
Şekil A.11. Niethammer şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 62
Şekil A.12. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 62
Şekil A.13. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 62
Şekil A.14. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 63
Şekil A.15. Hammer şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 63
Şekil A.16. Hammer şablonunda ASTER1-3 ve SRT1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 63
Şekil A.17. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 64
Şekil A.18. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 64
Şekil A.19. Hammer şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 64
Şekil A.20. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 65
Şekil A.21. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 65
Şekil A.22. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 65
Şekil A.23. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 66
Şekil A.24. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1-3 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 66
Şekil A.25. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 66
Şekil A.26. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 67
Şekil A.27. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15ile hesaplanan yükseklik değişimleri 67
Şekil A.28. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 67
Şekil A.29. Hammer şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 68
Şekil A.30. Hammer şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 68
Şekil A.31. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 68

Şekil A.32. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 69
Şekil A.33. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 69
Şekil A.34. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 69
Şekil A.35. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 70
Şekil A.36. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 70
Şekil A.37. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 70
Şekil A.38. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 71
Şekil A.39. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 71
Şekil A.40. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 71
Şekil A.41. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 72
Şekil A.42. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 72
Şekil A.43. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri 72
Şekil A.44. Antalya-Samsun nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi 73
Şekil A.45. Antalya-İstanbul nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi 74
Şekil A.46. Antalya-İzmir nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi 75
Şekil A.47. Antalya-İskenderun nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi 76

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Niethammer şablonu silindir yarıçap ve dilimleri 15
Tablo 1.2. Hayford-Bowie şablonu silindir yarıçap ve dilimleri 15
Tablo 1.3. Hammer şablonu silindir yarıçap ve dilimleri 16
Tablo 2.1. Topoğrafik düzeltmelerin ortometrik yüksekliklere etkisi 28
Tablo 4.1. Hayford-Bowie şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 38
Tablo 4.2. Niethammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 38
Tablo 4.3. Hammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 38
Tablo 4.4. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 38
Tablo 4.5. Niethammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 39
Tablo 4.6. Hammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal) 39
Tablo 4.7. Hayford-Bowie şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 39
Tablo 4.8. Niethammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 39
Tablo 4.9. Hammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 40
Tablo 4.10. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 40
Tablo 4.11. Niethammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 40
Tablo 4.12. Hammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm) 40
Tablo 4.13. Nivelman hatlarının uzunluğu ve istasyon sayısı 41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	:	Silindir parçasının düşey eksene göre yaptığı açı
C_P	:	Jeopotansiyel sayı
dH	:	Topoğrafik düzeltmelerin ortometrik yüsekliklere etkisi, (m)
δg_{BI}	:	Boşlukta gravite indirgemesi, (mGal)
δg_{BB}	:	Basit Bouguer indirgemesi, (mGal)
δg_P	:	Yeryüzündeki topoğrafik düzeltme, (mGal)
δg_{P0}	:	Jeoit üzerindeki nokta için getirilen topoğrafik düzeltme, (mGal)
δg_Q	:	Q noktası için getirilen topoğrafik düzeltme, (mGal)
H	:	Yükseklik, (m)
H_{ort}^{H}	:	Helmert ortometrik yüksekliği, (m)
H_{ort}^{N}	:	Niethammer ortometrik yüksekliği, (m)
H_{ort}^{M}	:	Mader ortometrik yüksekliği, (m)
H_P	:	P noktasının yüksekliği, (m)
g(r)	:	Referans yüzeyindeki gravite, (mGal)
G	:	Evrensel gravite sabiti
g_{P_0}	:	P_0 noktasında jeoit üzerinde ölçülen gravite, (mGal)
g_P	:	P noktasında ölçülen gravite, (mGal)
$\bar{g}_Q$	:	Q noktası için ortalama gravite, (mGal)
$\bar{g}_P$	:	P noktası için ortalama gravite, (mGal)
$\bar{g}^H$	:	Helmert'e göre ortalama gravite, (mGal)
$\bar{g}^N$	:	Niethammer'a göre ortalama gravite, (mGal)
$\bar{g}^M$	:	Mader'e göre ortalama gravite, (mGal)
M	:	Yerin Kütlesi
Q	:	Jeoit ve yeryüzü arasında çekül doğrultusunun orta noktası
R	:	Kürenin yarıçapı, (m)
P	:	Topoğrafya yoğunluğu, (g/cm^3)
Θ	:	Kompartman bölümlendirme açısı
W	:	Gravite potansiyeli

Kısaltmalar

ASTER	:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Gelişmiş Uzaysal Isıl Emisyon ve Yansıma Radyometresi)
DTED	:	Digital Terrain Elevation Data (Sayısal Arazi Yükseklik Verileri)
EGM96	:	Earth Gravitational Model 1996 (Yerküre Gravite Modeli 1996)
GDEM	:	Global Digital Elevation Model (Global Sayısal Yükseklik Modeli)
GPS	:	Global Positioning Systems (Global Konumlama Sistemleri)
METI	:	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı)
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)

InSAR	:	Interferometric Synthetic Aperture Radar (İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Sistemi)
SAR	:	Synthetic Aperture Radar (Yapay Açıklıklı Radar)
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission (Topoğrafik Amaçlı Radar Uzay Aracı
SYM	:	Sayısal Yükseklik Modeli
TG-91	:	Türkiye Gravimetrik Jeoidi
TG99A	:	Güncelleştirilmiş Türkiye Jeoidi
TUDKA	:	Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı

TOPOĞRAFİK DÜZENSİZLİKLERİN ORTOMETRİK YÜKSEKLİKLERE ETKİSİNİN FARKLI ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SYM VE SİLİNDİRİK ŞABLONLAR YARDIMIYLA ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Ortometrik yükseklikler nivelman ve gravite ölçmeleri yardımıyla belirlenirken çekül eğrisi boyunca ortalama graviteye getirilen yaklaşımlara göre değişkenlik gösterirler. Helmert yaklaşımı düşey datum sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Topoğrafyanın plaka şeklinde kabul edildiği bu yöntemle fiziksel yeryüzünün gerçek görünümü çoğu kez göz ardı edilir. Bu durum ortalama graviteden ve dolayısıyla ortometrik yüksekliklerden sapmalara neden olmaktadır. Niethammer ve ona yaklaşan Mader ortometrik yüksekliklerinde ise topoğrafik düzeltmeler dikkate alınır. Niethammer ve Helmert ortometrik yükseklikleri arasındaki farklar bu çalışmada incelenmiştir.

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında topoğrafyayı bölmelere ayırarak onun çekim etkisini modelleyen yöntemlerden biri silindir bölme yöntemidir. Yöntem kullanılan şablonların bölümleme biçimlerine ve bölmeler içerisine düşen yükseklik sıklığına ya da grid çözünürlüğüne göre topoğrafik düzeltmeleri farklı sonuçlarla ortaya koyabilir. Çalışmada bu değişkenliği görmek için GPS/Nivelman istasyonları ve gravimetrik jeoit istasyonlarında iki farklı uygulama yapılmıştır. SRTM ve ASTER yükseklik verileri 1", 3" ve 15" çözünürlüklü olarak elde edilmiş ve iç ve dış grid çözünürlükleri farklı Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) oluşturulmuştur. Topoğrafik yapı Hammer, Hayford-Bowie ve Niethammer şablonları ile kompartmanlara ayrılmış ve ortalama yükseklikleri her bir SYM ile ayrı ayrı elde edilerek topoğrafik düzeltmeler hesaplanmıştır. Bu düzeltmelerin ortometrik yüksekliklere etkileri belirlenmiştir. Konya Kapalı Havasındaki gravite ölçme istasyonlarında 20 cm'ye varan ortalama 1 mm ve 12 mm standart sapmalı yükseklik değişimleri %95'i 25 mm'nin altında olarak Helmert ortometrik yükseklikleri için gözlemlenmiştir. Nivelman yolları için ortometrik yüksekliklerde ise 7,5 mm'ye varan yükseklik düzeltmeleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gravite İndirgemeleri, Ortometrik Yükseklikler, Sayısal Arazi Modeli, Silindir Şablon, Topoğrafik Düzeltmeler.

DETERMINATION OF THE EFFECTS OF TOPOGRAPHIC IRREGULARITIES ON ORTHOMETRIC HEIGHTS WITH RESPECT TO USING DIFFERENT RESOLUTION DEMs AND CYLINDRICAL TEMPLATES

ABSTRACT

When the orthometric heights are determined by gravimetric methods, they vary according to the approaches taken to the average gravity along the plumb line. In the case of vertical datum systems determined by the Helmert approach, in which the topography is considered as a plate, actual topographyis not taken account in gravity reduction. This causes more or less deviations in mean gravity, as well average heights. On the other hand, topographic corrections are calculated in the determination of Niethammer orthometric heights. The differences between Helmert and Niethammer orthometric heights were investigated in the study.

One of the methods of modeling the topography is to divide it into compartments namely the cylinder method. The method can reveal topographic corrections with different results depending on the partitioning formats of the templates used and the grid resolution falling within the compartments. In order to see this variability in the study, two different applications were performed in two case study area, GPS/leveling stations and gravimetric geoid stations. SRTM and ASTER altitude data were obtained with 1", 3" and 15" resolution, and they are employed to create internal and external grids. The topographic structure was divided into compartments with Hammer, Hayford-Bowie and Niethammer templates, and topographic corrections were calculated by obtaining the mean heights for each DEMs. The effects of these corrections on the orthometric heights are determined. Corrections of elevations are up to 20 cm , approximately 1 mm and 12 mm standard deviation were observed for Helmert orthometric heights at gravity measuring stations. The height effects is according to statistical significance are %95 less than 25 mm. Elevation corrections up to 7,5 mm were obtained at orthometric heights for levelling lines.

Keywords: Gravity Reductions, Orthometric Heights, Digital Elevation Model, Cylindrical Template, Topographical Corrections.

GİRİŞ

Bir noktanın yüksekliği, nokta ve referans yüzeyi arasında referans doğrultusu boyunca uzanan mesafedir. Yükseklik sistemleri referans yüzeyi ve doğrultusuna göre çeşitlilik göstermektedir. En çok kullanılan referans yüzeyi dünyanın gerçek şekli sayılan jeoit yüzeyidir. Ortalama deniz yüzeyiyle çakıştığı ve karaların altında devam ettiği varsayılan jeoit dünyanın fiziksel şekli olması nedeniyle, fiziksel karşılıkları bulunan yükseklik sistemlerinde, çekül sapması bileşenlerinin ve gravite değerlerinin belirlenmesinde referans yüzey olarak kullanılır. Yeryuvarının şekli ve kitle yoğunluk dağılımlarının düzensiz olması nedeniyle gravite kuvvetinin büyüklük ve yön olarak her noktada farklı değer alması, jeoidin yönünü ve dolayısıyla biçimini belirleyen çekül eğrisinin de her noktada farklı doğrultu kazanmasına neden olur. Jeodin şeklinin her noktada düzlemden ve bilinen basit yüzeylerden uzaklaşması onu matematiksel bir tanımdan çıkartarak fiziksel yüzey boyutuna getirir.

Jeoit, yerin çekim alanındaki eşpotansiyel yüzeylerden biri olduğu için, kitle ve yoğunluk dağılım özelliklerini gösterir. Bu nedenle yükseklik sistemleri tanımlanırken yerin çekim alanı referans alınır. Kütlelerin çekim kuvveti ve merkezkaç kuvvetin etkisi altındaki çekül doğrultusu bu düzensiz kitle ve yoğunluk dağılımının etkisiyle yerin ağırlık merkezine doğru eğri çizerek ilerler. Bu eğri üzerindeki her nokta, sabit potansiyelli farklı nivo yüzeyleri üzerindedir. Bu nedenle yükseklik farkları eşpotansiyel yüzeylerin arasındaki potansiyel (fiziksel) ya da geometrik farklarla uzunluk olarak ifade edilebilir. Jeoit başlangıç olarak jeopotansiyel sayılar, çekül eğrisi boyunca ölçülen ortometrik yüksekliklerin tek anlamlı olarak hesaplanmasına olanak sağlar.

Jeopotansiyel sayılar jeoit ve nokta arasındaki çekül eğrisi üzerindeki ortalama graviteye bölünerek geometrik uzunluklara (yükseklik) dönüştürülebilirler. Ortalama gravitenin elde ediliş yöntemine göre ortometrik yüksekliklerin türü de değişir. Ortalama gravite jeoit ve yeryüzü noktası arasında çekül eğrisi boyunca sonsuz sayıdaki gravitenin ortalaması kabul edilir ve bu değere çeşitli yaklaşımlar

geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri Helmert ortometrik yükekliğidir. 1890 yılında Helmert tarafından uygulanan bu metot topoğrafyanın şeklini Bouguer levhası olarak kabul eder ve Poincare and Prey's yöntemiyle, ortalama graviteyi hesaplar. Helmert bu yaklaşımında, jeoit ve H yüksekliği arasındaki ortalama yükseklik olan H/2 noktasındaki graviteyi ortalama gravite olarak kabul eder (Heiskanen ve Moritz, 1984).

Mader ve Niethammer ortometrik yükseklikleri ise, topoğrafik düzeltmeleri içermeleri yönünden Helmert ortometrik yüksekliklerinden daha yüksek doğruluktadır (Odera ve Fukuda, 2015).

Hayford ve Bowie (1912), jeodezik problemlerin çözümü için topoğrafyayı farklı yarıçaplarda silindirlere bölmüştür. Topoğrafyanın izostatik etkilerini görmek için Hayford ve Bowie'nin oluşturduğu şablon gravite ölçme noktasından 167 km silindir yarıçapı ile geniş alanlardaki yükseklik bilgilerini hesaba dahil eder. Hayford şablonu topoğrafyayı bölmelere ayıran ilk şablon örneğidir.

Ayrıca Niethammer (1932), Niethammer ortometrik yüksekliklerini oluştururken topoğrafik düzeltmeler için şablon hazırlamıştır. 42 km uzaklığa kadar uzanan şablon silindir yarıçapları diğerlerinin aksine yüz ve katlarından oluşur (Demirel, 1984).

Topoğrafik düzeltmeler için yapılan bir diğer çalışma Bullard'a aittir. Bullard (1936) topoğrafik düzeltmelerin etkisini Bullard A, Bullard B ve Bullard C olarak gruplandırmıştır. Bullard A, topoğrafyayı Bouguer levhası olarak kabul eder. Bullard B aşamasında levhayı dünyanın eğriliğinden dolayı yüzeyi nokta çevresinde 166,7 km lik bir yarıçapla sınırlar. Bullard C ise topoğrafyanın levha altında ve üstünde kalma durumlarını inceleyerek topoğrafik düzeltmelerin getirilmesi gereken aşamadır.

Bullard C, nokta çevresinde farklı yarıçaplı halkalar oluşturup bu halkaları da farklı sayıda kompartmanlara bölerek topoğrafik etkileri silindir bölme yöntemiyle elde etmeyi açıklar (Hammer, 1939). Gravite metotlarında veya jeolojik yapıların araştırılmasında daha küçük alanların topoğrafik yapısı incelendiğinden Hammer şablonu geliştirilmiştir. Bu şablonla yakın çevredeki etkiler Bowie şablonuna göre daha belirgindir (Sandberg, 1959).

Geleneksel silindir bölme yönteminde silindirler bloklar şeklinde kabul edilir. Sandberg (1958) ise, arazinin gerçek şekline daha yakın olan eğik düzlemler şekindeki silindirler şablonlarını geliştirmiştir (Sandberg, 1958).

Bullard B'ye karşılık gelen yerin eğriliğinden kaynaklı çekim, LaFehr (1991) tarafından incelenmiştir ve 167 km'lik silindirde Bullard B etkisi küçük değerlerde (<3 mGal) görülmektedir.

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanması bilgisayarlı hesaplama tekniklerinin geliştirilmesinden önce elle uygulanmaktaydı. Şeffaf şablonların topoğrafik haritaların üstüne konulmasıyla, görsel olarak haritalardan ortalama yüksekliklerin okunması hem zaman alıcı hem de hataya açık bir uygulamadır. Günümüzde ise Sayısal Yükseklik Modellerinin (SYM) yüksek çözünürlükte olması ve ulaşılabilirliğindeki kolaylıklar yüksek doğrulukta düzeltme değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bilgisayarlı hesaplama tekniklerinin gelişmesiyle topoğrafik düzeltmeler dijital ortamda hızlı ve enerji verimli hesaplanabilmektedir.

Topoğrafik düzeltme değerleri kimi zaman büyük değerlerde olmasına rağmen SYM'lerin oluşturulmasındaki güçlükler hesap zorluğu yüzünden birçok düşey datum sistemi Helmert ortometrik yükseklikleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Günümüzde ise düşey datum sistemlerini düzenlemek amacıyla gerçeğe yakın ortometrik yükseklikler geliştirilmektedir. Gerçeğe yakın ortometrik yüksekliklerde, ortalama gravite değerini oluşturan değişkenler; ikinci dereceden normal gravite düzeltmesi, ikinci dereceden Bouguer levhası düzeltmesi, jeoit kitlelerinin bozucu gravitesi ve topoğrafya yoğunluğunun değişiminin oluşturduğu gravite olarak sınıflandırılmaktadır. Tüm bu değişkenlerin ortometik düzeltmeye olan katkıları incelenmektedir (Vaníček ve diğ., 2004); (Tenzer ve diğ., 2005); (Santos ve diğ., 2006).

Bu çalışmayla, nivelman noktalarında Helmert yaklaşımıyla belirlenmiş ortometrik yüksekliklere topoğrafik düzeltmelerle gelecek düzeltme miktarlarının hesaplanıp yorumlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Antalya-Samsun, Antalya-İstanbul, Antalya-İzmir ve Antalya-İskenderun hatlarında karayolları üzerinde olduğu varsayılan nivelman yolları sayısal analize konu edilmiştir. Hatlar üzerinde 2 km aralıklı nivelman istasyonları oluşturulmuştur.

Ortometrik yüksekliklerin içerdikleri hatalar jeoit modellerini de etkilemektedir. Düşey kontrol ağı noktalarında, ortometrik ve elipsoidal yüksekliklerle oluşturulan GPS/Nivelman jeoitlerinde, ortometrik yüksekliklerdeki hatalar tekrar görülmektedir. Ayrıca gravimetrik jeoitlerin kontrolleri ve değerlendirilmesi, bu hataları içeren GPS/ Nivelman jeoitlerinin yardımıyla yapılmaktadır (Üstün ve diğ., 2002). Bunun yanı sıra jeoit modelleri gravite alanıyla ilişkili olduğundan gravimetrik jeoitler oluşturulurken topoğrafik düzeltmeler önemlidir. Bu nedenle jeoit modelleri için kullanılabilecek olan Konya Kapalı Havzası'ndaki gravite ölçme istasyonları için topoğrafik düzeltme büyüklükleri ve ortometrik yüksekliklere etkileri değerlendirilecektir.

Çalışmada ayrıca, topoğrafik düzeltmeleri hesaplanırken silindir bölme yöntemindeki şablon farklılıklarının sonuçlarda yaratacağı değişimin görülmesi hedeflenmektedir.

Bunların yanı sıra, topoğrafik düzeltmelerin belirlenmesinde kullanılan SYM'lerde çözünürlük ve model farklılıkların düzeltmelerdeki etkisinin ne kadar olduğu araştırılmıştır. Buna göre SYM'nin tercihinde çözünürlükteki yeterliliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. SYM'nin oluşturulma biçimindeki farklılığın yansımaları ise SRTM ve ASTER modelleri açısından değerlendirilecektir.

1. GRAVİTE İNDİRGEMESİ VE TOPOĞRAFİK DÜZELTME

Gravite düzeltmeleri veya gravite indirgemeleri, jeoidin belirlenmesi, ölçülen graviteden farklı konumlardaki gravite değerlerine enterpolasyon ve ektrapolasyon yapılması ve yerkabuğunun incelenmesi gibi çalışmalarda kullanılır (Heiskanen ve Moritz, 1984).

Jeodezi ve jeofizik disiplinlerinde, gravite ölçmelerini uygulamalarda kullanılabilir hale getirmek için indirgemeler yapılır. Yeryüzünde yapılan gravite ölçmeleri, yeryüzünün şeklinden, jeolojik yapısından, atmosferik durumlardan, gezegenlerin konumundan, kıta hareketlerinden vb. etkilenir. Bu nedenle gravite bilgisi konuma göre değişkenlik gösterir. Yeryüzünde farklı konumlarda yapılan gravite ölçmelerinin birlikte değerlendirilebilmesi için jeoit üzerine indirgenebilirler. Gravite ölçmelerini referans yüzeyine indirgemek için topoğrafyadan ve yer merkezine olan mesafeden kaynaklı etkilerin uzaklaştırılması amaçlanır (Featherstone ve Dentith, 1997). Böylece gravite ölçme noktaları aralarındaki yükseklik farkıyla ilgili problemler ortadan kaldırılmış olur ve ölçü yapılamayan noktaların da gravite değerlerine ulaşılabilinir (Heiskanen ve Moritz, 1984).

Gravite ölçmelerinde genellikle kullanılan iki yöntem vardır: Bouguer indirgemesi, Poincare ve Prey indirgemesi. İki indirgeme yönteminde de gravite ölçmeleri, boşlukta gravite düzeltmesinden, Bouguer levha düzeltmesinden ve topoğrafya düzeltmelerden etkilenir. Ancak Bouguer indirgemesinde, referans yüzeyi üzerindeki tüm kitleler kaldırılır ve yerine konmaz. Örneğin, jeoit belirleme çalışmalarında, jeoit dışındaki tüm kitlelerin etkisi kaldırılır ve jeoidin üstündeki kitleleri de kapsadığı kabul edilir (Heiskanen ve Moritz, 1984). Poincare ve Prey yönteminde ise referans üzerinden kaldırılan tüm kitleler tekrar yerine konularak gravitenin referans üzerinde ölçülmesi durumunda beklenen değeri elde edilir (Demirel, 1984); (Vanicek ve Krakiwsky, 1987).

Ortometrik yükseklikler jeopotansiyel sayılarla ifade edilirken, Poincare ve Prey yöntemi uygulanarak referans yüzeyi üzerindeki topoğrafyanın var olduğu kabul edilir.

1.1. Boşlukta Gravite İndirgemesi

Yeryüzündeki bir P gravite ölçme noktasındaki g_P gravite değerinin, çekül eğrisi boyunca referans yüzeyi üzerindeki (P_0) noktasına kitlelerin çekim etkisi yok sayılarak indirgenmesidir. Bu düzeltmenin boşlukta gravite düzeltmesi olarak adlandırılmasının nedeni indirgeme düzlemi ve ölçme noktası arasındaki kitlelerin bulunmadığı varsayılarak indirgeme yapılmasıdır. Bu indirgemeyle gravite ölçme noktasının yüksekliğinden kaynaklı çekim etkisi yok edilir ve ölçü noktası referans yüzeyine taşınmış olur. Amaç birbirlerinden farklı eşpotasiyel yüzeylerde bulunan noktalardeki gravite ölçmelerini kitlesiz bir ortamda yüksekliğe göre indirgeyerek tüm gravite ölçme noktalarını aynı referans yüzeye getirmektir. Böylece ölçme noktaları birbirleriyle karşılaştırlabilir. Bu indirgemeyi gerçekleyebilmek için gravite ölçme noktasının yüksekliğinin, referans yüzeyine göre gravitede neden olduğu artış veya azalmalar yok edilir.

Gravitenin referans yüzeyindeki değeri olan g(R), yeryuvarının küresel, sabit ve homojen yoğunluklu kabul edilmesi ve tüm kütlesinin yermerkezinde toplandığının varsayılması ile, Newton'un kitle çekim kanundan hareketle,

$$g(R) = -\frac{GM}{R^2} \tag{1.1}$$

denklemiyle ifade edilir. Referans yüzeyinden çekül doğrultusunda H kadar uzaklaşılmasıyla, yeni noktadaki gravite değeri,

$$g(R+H) = g(R) + \left(\frac{\partial g_R}{\partial H}\right)_R H + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 g_R}{\partial H^2}\right)_R H^2 + \ldots \tag{1.2}$$

şeklinde Taylor seri açılımıyla bulunabilir. Boşlukta gravite düzeltmesinin büyüklüğü, yerin merkezinden referans yüzeyine göre H yüksekliği kadar uzakta olma durumunda gravitedeki değişim olduğu için,

$$\delta g_{BI} = g(R+H) - g(R) \tag{1.3}$$

serinin birinci derece terimi,

$$\frac{\partial g_R}{\partial H} = -2\frac{GM}{R^3} = -2\frac{g_R}{R} \tag{1.4}$$

göz önüne alınarak,

$$\delta g_{BI} = H\frac{2g_R}{R} \tag{1.5}$$

boşlukta gravite düzeltmesine ulaşılır. Düşey yöndeki gravite gradyeni yer içinde her konumda bilinemediği için yer sabit homojen bir küre olarak kabul edilir. Bu nedenle R ve g(R) küre yüzeyinde her yerde aynı olur R ve g(R)'nin sırasıyla 6371 km ve 978032,677 mGal alınmasıyla,

$$\delta g_{BI} = 0,3086H \tag{1.6}$$

olur (Heiskanen ve Moritz, 1984). H yüksekliğinin metre biriminde alınmasıyla, δg_{BI} mGal biriminde olacaktır.

Doğruluğu arttırmak için yerin şeklinin elipsoit kabul edilmesi ve Taylor serisinin ikinci teriminin de hesaplamalara dahil edilmesiyle;

$$\delta g_{BI} = -(0,3087691 - 0,0004398\sin^2\vartheta)H + 7,2125 \times 10^{-8}H^2 \tag{1.7}$$

ϑ enlemindeki H yüksekli bir noktaya uygulanacak boşlukta gravite düzeltmesine ulaşılır (Demirel, 1984); (Heiskanen ve Moritz, 1984); (Vanicek ve Krakiwsky, 1987); (Hinze ve diğ., 2012). Yeri küre olarak kabul etme durumundan farklı olarak Denklem (2.7)'nin uygulanmasıyla, indirgeme değeri ekvatordan kutuplara kadar yaklaşık $\%0,2$ ve deniz seviyesi ve 10 km yükseklikli topoğrafya arasında ise yaklaşık $\%0,02$ değişir. Bu sonuçlar bir çok çalışma için ihmal edilebilir düzeyde olacağından, yerin küre kabul edilerek gravitenin düşey gradyentinin hesaplanması daha çok tercih edilir (Hinze ve diğ., 2012).

Boşlukta gravite düzeltmesi, H yüksekliğinin referans yüzeyinin altında olması durumunda ($H < 0$), yermerkezine daha yakın olduğu için negatif değer alarak gravite ölçmesini boşluktaki yüksekliğe göre jeoit üzerine indirgenmiş olur. Noktanın jeoidin

üstünde olması ($H > 0$) durumunda ise boşlukta gravite düzeltmesi noktadaki ölçülen graviteye pozitif yönde etki ederek jeoide boşlukta indirgenir.

Bu nedenle pozitif yükseklikli noktalar için örnek verilecek olursa, ortometrik yükseklikler jeopotansiyel sayılarla hesaplanırken, boşlukta gravite indirgemesi gravite ölçmesine pozitif olarak etki eder. Yeryüzündeki H yükseklikli P noktasındaki gravite ölçmesinin, çekül doğrultusu boyunca jeoit üzerindeki uzantısı olan P_0 noktasına yapılan boşlukta gravite indirgemesi,

$$\begin{aligned} g_{P_0} &= g_P + \delta g_{BI} \\ &= g_P + 0,3086H \end{aligned} \tag{1.8}$$

şeklindedir (Demirel, 1984).

1.2. Basit Bouguer Düzeltmesi

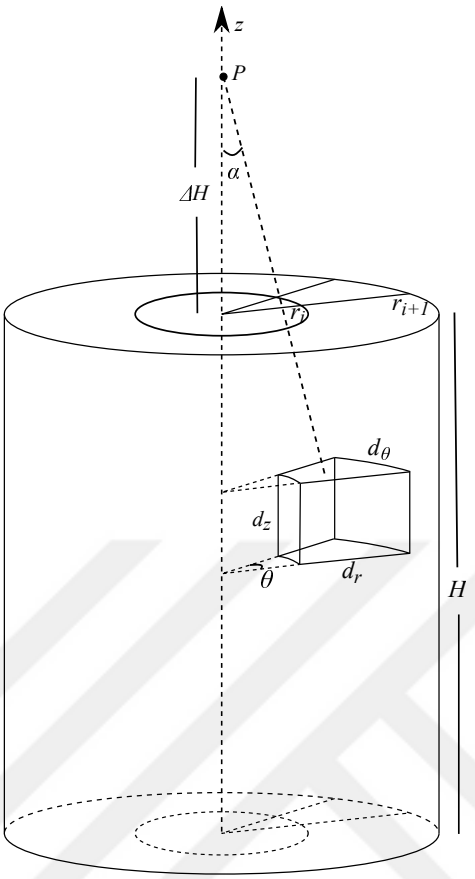
Boşlukta gravite indirgemesinde ölçü noktasındaki graviteye getirilen indirgeme değerinde jeoit ve yeryüzü arasındaki kitleler yok sayılırken, Bouguer indirgemesiyle bu etki göz önüne alınır.

Gözlem noktası ve deniz seviyesi arasındaki topoğrafya gözlem noktasının yüksekliğinde sonsuz yarıçaplı bir silindir olarak kabul edilir. Sonsuz yarıçaplı bu silindir homojen ve ρ yoğunlukludur. Noktasal bir cisim üzerinde indirgeme düzlemi ve yeryüzü arasındaki bu levhanın oluşturacağı düşey yöndeki çekim ivmesi (g_{BB}), sonsuz silindirin diferansiyel olarak her parçasının oluşturacağı çekimin integral toplamı yardımıyla hesaplanır. Üç boyutlu diferansiyel hacimin (dV) silindirik koordinat sisteminde kabul edilmesiyle, diferansiyel kitle olan dm,

$$dm = \rho dV = \rho r dr dz d\theta \tag{1.9}$$

ile gösterilebilir (Şekil 1.1). Burada r, z ve θ sırasıyla yarıçap, yükseklik ve azimutu temsil eden silindirik koordinatlardır. ρ silindirin sabit yoğunluğudur. Silindir parçasının P noktasıyla düşey eksenle (z) yaptığı açı α ise düşeydeki çekim etkisi,

$$\Delta g = \frac{G dm}{r^2 + z^2} \cos\alpha = \frac{G\rho z r dz dr d\theta}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{1.10}$$



Şekil 1.1. Silindirik kitle elemanı ve P noktasına çekim etkisi

diferansiyel olarak ifade edilir. Noktanın düşeyde ΔH kadar uzağında olan r yarıçaplı H yükseklikli bir silindirin oluşturacağı çekim etkisi,

$$\Delta g = G\rho \int_{z=\Delta H}^{H+\Delta H} zdz \int_{r=0}^{r} \frac{rdr}{(r^2+z^2)^{3/2}} \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta \tag{1.11}$$

formülüyle integral toplamı olarak gösterilir. Sonsuz yarıçaplı ve H yükseklikli levhanın etkisi olan basit Bouguer düzeltmesi (g_{BB}) silindirin çekim ivmesi toplam formülünden yola çıkarak,

$$\delta g_{BB} = G\rho \int_{z=0}^{H} zdz \int_{r=0}^{\infty} \frac{rdr}{(r^2+z^2)^{3/2}} \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta \tag{1.12}$$

$$\delta g_{BB} = 2\pi G\rho H \tag{1.13}$$

elde edilir. Bu durumda P noktası levhanın üzerinde kabul edilmiş olur. Levha etkisi, referans yüzeyinin üstündeki bir noktada, H yükseklik farkının metre biriminde, ρ

yoğunluğunun ise 2,67 g/cm^3 alınmasıyla,

$$\delta g_{BB} = 2\pi G\rho H = 0,1119H \tag{1.14}$$

denklemiyle mGal biriminde hesaplanabilir.

Denklem (2.8)'den ve Denklem (2.14)'ten görüleceği gibi, Bouguer levha düzeltmesi, boşlukta gravite düzeltmesinin yaklaşık üçte biri kadardır.

Büyüklüğü belirlenen levha etkisinin doğrultusu, istasyon noktasının referans düzlemine göre konumuna bağlı olarak değişir. Jeoidin üstündeki gravite ölçme noktaları için referans yüzeyi ve nokta arasındaki kitleler ölçülen graviteyi referans yüzeyine göre arttırmıştır. Bouguer levhası düzeltmesi yapılırken bu etki çıkarılmalıdır. Böylece jeoit üzerindeki P_0 noktasında gravite değerinden, levha etkisinin kaldırılması ve boşlukta gravite indirgemesinin yapılmasıyla,

$$g_{P_0} = g_P + \delta g_{BI} - \delta g_{BB} \tag{1.15}$$

$$g_{P_0} = g_P + 0,1967H \tag{1.16}$$

basit Bouguer indirgemesi yapılır. Bu etki kitlelerin sonsuz levha şeklinde kabulüne dayandığı için topoğrafyanın levhadan ayrılan yönlerini içermez.

1.2.1. Topoğrafik düzeltmeler

Levha düzeltmesiyle H yükseklikli yatay bir düzlem kabul edilen topoğrafik yapının, arazideki engebelerin çekim etkilerini yansıtarak gerçek topoğrafyanın şekline daha çok yaklaşılmasını sağlayan düzeltmeler gereklidir. Topoğrafik düzeltmeler gravite ölçme noktasının etrafindaki topoğrafyanın düzensizliğini ortadan kaldırmayı amaçlar. Noktadan yüksek olan kitleler yukarı yönlü çekime neden olurlar. Noktadan aşağıda kalan vadilerle nokta arasında ise kitle yerine boşluklar vardır. Bu boşluklar gravitenin engebesiz araziye göre daha düşük değerlerde olmasına neden olur. Bu nedenle her iki engebe durumu da gravite ölçmesine pozitif işaretli olarak eklenerek topoğrafya engebesiz hale getirilir (Heiskanen ve Moritz, 1984).

Nokta çevresindeki bölgenin küçük bölmelere (kompartmanlara) ayrılmasının ardından tüm bölmelerdeki toplam etki topoğrafik etki olarak düşünülebilir. Kompartmandaki ortalama yükseklik, o kompartmandaki topoğrafyanın şekli olarak

kabul edilir. Bu nedenle bölümlendirme sayısı arttıkça arazinin şekli ve topoğrafik düzeltme gerçeğe daha yakın olur.

Nokta çevresindeki 167 km yarıçap içindeki topoğrafik etki çok engebeli alanlarda 100 mGal zirve noktalarında veya dar vadilerdeki noktalarda için görülebilir. Ancak dağlık arazide ortalama 50 mGal'e varır (Garland, 1965). 3000 m yükseklikteki zirve noktalarında arazi düzeltmesi yaklaşık 50 mGal beklenir (Heiskanen ve Moritz, 1984).

Topoğrafik etki en çok noktanın yakınındaki bölgelerde etkilidir. Çünkü, çekim etkisi Newton'un çekim kanundan (Denklem (2.1)) yola çıkarak uzaklığın karesiyle ters orantılır. Ayrıca çekim etkisinin büyüklüğü topoğrafyanın noktayla aynı yükseklikteki sonsuz levhadan ne kadar farklılaştığıyla da ilgilidir. Bu nedenle ani yükseklik değişimlerinin neden olduğu çekim etkisi levhadan daha az farklılaşan arazilere göre daha fazladır. Az engebeli ve yükseklik farkının 10 metrenin katlarıyla ifade edilebildiği arazilerde 0,1'den 1 mGal'e kadar değişen topoğrafik düzeltmeler, yükseklik farkının bir kaç yüz metre değiştiği alanlarda 1 ve 10 mGal arasında değişime neden olur. Dağlık alanlardaki topoğrafik düzeltme ise yükseklik farkına göre 10 mGal büyüklüğünün katlarına ulaşabilir (Hinze ve diğ., 2012).

Ayrıca topoğrafik düzeltmeler deniz, okyanus veya büyük göllere yakın alanlarda batimetri veriyle hesaplanarak su kitlelerini de içermelidir. Su kitlelerinin ihmal edilmesi, derinliğin fazla olduğu yerlerde onlarca mGal hataya neden olabilir (Hinze ve diğ., 2005); (Hinze ve diğ., 2012).

Maden arama gibi yerin altındaki kitlelerle ilgili çalışmalarda, 21,94 km uzaklık sınırına kadar topoğrafya değişimlerini değerlendirmek yeterliyken, kıtalararası çalışmalarda, izostatik anomaliler belirlenirken ve ölçü noktasına uzaklarda olan topoğrafyanın etkisinin önemli olduğu durumlarda 166,7 km yarıçaplı alanı kapsayan düzeltmeler yapılmaktadır (Hinze ve diğ., 2012).

166,7 km'lik uzaklığın içindeki topoğrafik yapının etkisi az miktarda yeryüzünün eğriliğiyle ilgili düzeltme gerektirirken, daha uzaktaki kitlelerin etkilerini içeren topoğrafik düzeltme hesaplamalarında yerin eğriliği bazı çalışmalar için önemli olabilir

(Cogbill, 1990); (LaFehr, 1991). Yerin eğriliğiyle ilgili düzeltme denklemi;

$$g_{cc} = H(c_0 + H(c_1 + H(c_2 + c_3 H))) \tag{1.17}$$

Topoğrafya yoğunluğunun $2,67$ gr/cm^3 olduğu durumda c_0, c_1, c_2, c_3 katsayıları sırasıyla, $1,464139 \times 10^{-3}$, $-3,533047 \times 10^{-7}$, $1,002709 \times 10^{-13}$, $1,002709 \times 10^{-18}$ değerlerindedir.

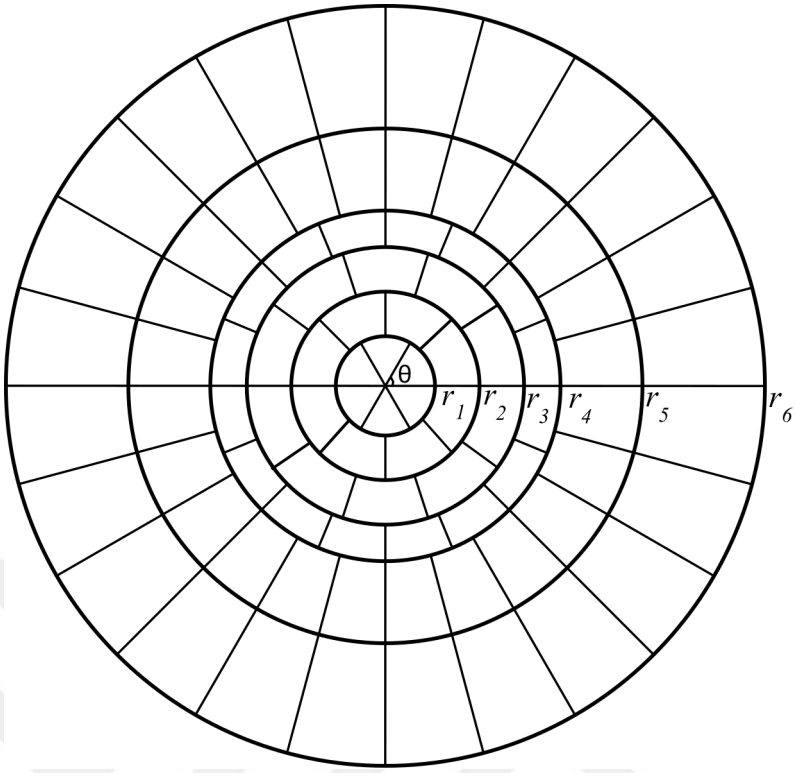
1.3. Topoğrafik Düzeltme Hesabı

1.3.1. Silindir bölme yöntemi

Bouguer levha etkisiyle dümdüz kabul edilen topoğrafya arazinin gerçek şeklini yansıtmaz. Bouguer levhasının altındaki boşlukların ve üstündeki kitlelerin çekim etkilerinin belirlenmesi amacıyla silindir bölme yönteminden yararlanılabilir. Topoğrafik etkilerin hesaplanacağı noktanın ekseninde olduğu silindir belirli yarıçaplara göre halkalara ayrılır. Halka yarıçapları r_1 küçük yarıçap ve r_2 büyük yarıçaptır. Ayrıca halkalar da θ radyal açılı kompartmanlara ayrılarak arazi yapısının doğruluğu arttırılır (Şekil 1.2). Her bir kompartmandaki topoğrafik yapı kendi içinde tek bir yapı halini alır. Bu yapıyı kompartmanın ortalama yüksekliği ve nokta yüksekliği arasındaki fark belirler. Her bir kompartman silindirin parçasıdır ve bir bütün olarak düşünülüp noktadaki topoğrafik kitlelerin etkisini ortaya koyarlar. Bu silindir parçalarının çekim etkisi, silindirik kitlelerin çekim etkisi Formül (2.11)'den yola çıkarak bulunabilir. Silindirik koordinat sisteminde z düşey ekseninde H kalınlıklı ölçülen, düşeyle yaptığı açı α olan, r yarıçaplı, $\Delta\theta$ radyal açılı, silindir parçasının noktada oluşturacağı düşey çekim ivmesi Δ g difreransiyel boyuttaki silindirik kitlelerin integral toplamıyla ifade edilebilir,

$$\Delta g = G\rho \int_{z=\Delta H}^{H+\Delta H} z\,dz \int_{r=0}^{r} \frac{r\,dr}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \int_{\theta=0}^{\Delta\theta} d\theta \tag{1.18}$$

bulunur. Bu denklemden yola çıkarak herhangi bir silindirik kitlenin silindirin üzerinde veya dışında olma durumlarına göre oluşturacağı gravite etkisi hesaplanabilir.



Şekil 1.2. Silindir bölümleme için şablon örneği

Böylece, noktanın silindirin üzerinde ve merkezinde olması durumunda kompartmanın noktaya gravite etkisi,

$$g_c = G\rho 2\frac{\pi}{\theta}[r_2 - r_1 - \sqrt{r_2^2 + H^2} + \sqrt{r_1^2 + H^2}] \tag{1.19}$$

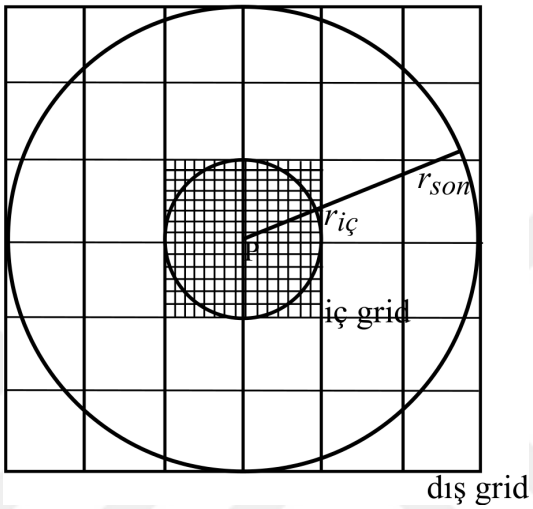
ve noktanın silindir z ekseni üzerinde ΔH kadar uzakta olması durumunda,

$$g_c = G\rho 2\frac{\pi}{\theta}(\sqrt{r_1^2 + (H + \Delta H)^2} - \sqrt{r_2^2 + (H + \Delta H)^2} - \sqrt{r_1^2 + \Delta H^2} + \sqrt{r_2^2 + \Delta H^2}) \tag{1.20}$$

denklemiyle tek bir kompartmandaki gravite etkisi bulunur. Tüm kompartmanlar için sonuçlar toplandığında topoğrafik etkiye ulaşılır.

Topoğrafik etkiler hesaplanırken arazinin yükseklikleri için önceleri topoğrafik haritalar kullanılıp ve etkileri şablonlar yardımıyla bilgisayarsız bir ortamda el yordamıyla bulunabilir. Bunun için daha çok en büyük yarıçapı 21,94 km olan Hammer şablonu tercih edilir. Manuel hesaplamalarda, topoğrafik harita üzerine yerleştirilen yarıçapları ve kompartmanları çizilmiş Hammer şablonu yerleştirilerek,

ortalama yükseklikler gözle okunur. Bu durum hem çok iş yükü gerektirir hem de hata miktarını arttır. Bundan sonraki süreçte, kompartmanların ortalama yüksekliklerine göre topoğrafik düzeltme değerleri hesaplanır ve toplam değeri bulunur (Hinze ve diğ., 2012). Topoğrafik düzeltmelerin bu yolla hesaplanması sayısal ortamda yükseklik verilerinin bulunmadığı ve bilgisayarlı hesaplama tekniklerinin gelişmemiş olduğu zamanlara aittir.



Şekil 1.3. Silindir bölme yönteminde iç grid ve dış grid

Günümüzde ise silindir bölme yöntemiyle topoğrafik etkiler bulunurken, Sayısal Yükseklik Modellerinden (SYM) yararlanılır. SYM, kompartmanın ortalama yüksekliğinin bilinebilmesi için uygun çözünürlükte olmalıdır. Yükseklik modelleri; yeterli doğruluk, işlem hızı ve verilerin depolanması gibi etkenler göz önüne alınarak iç ve dış gridlerde farklı çözünürlüklerde olabilir (Şekil 1.3). SYM kullanılarak silindir bölme yöntemi uygulanırken, bölümlendirme yarıçaplarının ve kompartman sayılarının topoğrafyayı yeterli doğrulukta yansıtması gerekir. Bunun için günümüze kadar çeşitli şablonlar geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak Hayford-Bowie, Hammer ve Niethammer şablonları verilebilir.

Niethammer Şablonu, Niethammer (1932) tarafından topoğrafik düzeltmeleri hesaplarken noktaya 42 km uzaklıktaki alanı kapsayan topoğrafyanın etkilerini yeterli görmüştür. 17 halkadan oluşan şablonda halkaların her biri 8 kompartmandan oluşmaktadır (Tablo 1.1). Hayford ve Bowie (1912), topoğrafyanın izostatik etkilerini görmek amacıyla topoğrafyayı silindirik bölmelere ayırarak, bölmelerin

Tablo 1.1. Niethammer şablonu silindir yarıçap ve dilimleri

Halka	İç Yarıçap (m)	Dış Yarıçap (m)	Dilim Sayısı
B	1	100	8
C	100	200	8
D	200	300	8
E	300	400	8
F	400	500	8
G	500	1000	8
H	1000	1500	8
I	1500	2000	8
J	2000	3000	8
K	3000	4000	8
L	4000	6000	8
M	6000	8000	8
N	8000	11000	8
O	11000	15000	8
P	15000	20000	8
Q	20000	26000	8
R	26000	33000	8
S	33000	42000	8

Tablo 1.2. Hayford-Bowie şablonu silindir yarıçap ve dilimleri

Halka	İç Yarıçap (m)	Dış Yarıçap (m)	Dilim Sayısı
B	2	68	4
C	68	230	4
D	230	590	6
E	590	1280	8
F	1280	2290	10
G	2290	3520	12
H	3520	5240	16
I	5240	8440	20
J	8440	12400	16
K	12400	18800	20
L	18800	28800	24
M	28800	58800	14
N	58800	99000	16
O	99000	166700	28

yüksekliğe göre izostatik denge etkilerini görmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla oluşturulan şablon topoğrafyayı bölmelere ayıran ilk şablon örneğini oluşturmaktadır. Hoyford ve Bowie'nin topoğrafyayı halkalara ve kompartmanlara ayıran şablonu Tablo 1.2'de görülmektedir. Hammer (1939) tarafından geliştirilen Hammer şablonu, engebeli arazilerde 0,1 mGal topoğrafik düzeltme doğruluğu sağlamayı amaçlar.

İlk oluşturulduğu zamanlarda istasyon noktasından en uzak yarıçap 21,94 km'dir. Halkaların yarıçaplarıyla kompartmanların sayıları orantılı olarak belirlenmiştir. Bu şablon, Hammer (1982) ve Douglas ve Prahl (1972) tarafından geliştirilerek halkaların yarıçap aralıkları azaltılmış ve halkaların kapsadığı alan arttırılmıştır. Böylece yükseklik bilgisine erişilen alan genişletilmiştir (Tablo 1.3).

Tablo 1.3. Hammer şablonu silindir yarıçap ve dilimleri

Halka	İç Yarıçap (m)	Dış Yarıçap (m)	Dilim Sayısı
B	2	16,6	4
C	16,6	53,3	6
D	53,3	170,1	6
E	170,1	390,1	8
F	390,1	894,9	8
G	894,9	1530	12
H	1530	2615	12
I	2615	4469	12
J	4469	6653	16
K	6653	9903	16
L	9903	14742	16
M	14742	21944	16
N	21944	33000	20
0	33000	50000	20
P	50000	75000	20
Q	75000	110000	20
R	110000	166735	20

1.3.2. Prizma yöntemi

Topoğrafik düzeltmeler prizma yöntemiyle hesaplanırken, topoğrafyaya dikdörtgen prizmaları içeren bir model ile yaklaşılır. Her bir prizmanın yarattığı çekim etkisinin düşey bileşeni hesaplanır ve bu bileşenlerin toplamı topoğrafik düzeltmeleri verir.

Koordinat sisteminin orijininde olan bir noktaya, prizma şeklinde kitlenin neden olduğu gravite etkisinin düşey bileşeni, hacim integralinden yola çıkarak,

$$\begin{aligned}\Delta g &= G\rho \int_{z_i=z_1}^{z_2} \int_{y_i=y_1}^{y_2} \int_{x_i=x_1}^{x_2} \frac{z dx_i dy_i dz_i}{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= G\rho \int\int\int f(x,y,z)dV = G\rho F(x,y,z) \end{aligned} \tag{1.21}$$

elde edilmektedir. Orijindeki noktaya olan uzaklık,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1.22}$$

olmak üzere, Denklem (2.21) integrali çözüldüğünde,

$$-F(x, y, z) = x \ln y + r + y \ln x + r - z \arcsin \frac{y^2 + z^2 + yr}{(y + r)(y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{1.23}$$

eşitliği çıkar (Nagy, 1966a).

Prizma yöntemi bilgisayarlı hesaplama tekniklerine uygundur ve büyük alanlarda uygun grid aralıklarıyla uygulanabilir (Nagy, 1966b). Ancak her prizma için logaritmik ve trigonometrik ifadelerin tekrar tekrar değerlendirilmesinin gerekliliği yöntemin dezavantajıdır (Tsoulis ve diğ., 2009).

1.4. Tam Bouguer İndirgemesi

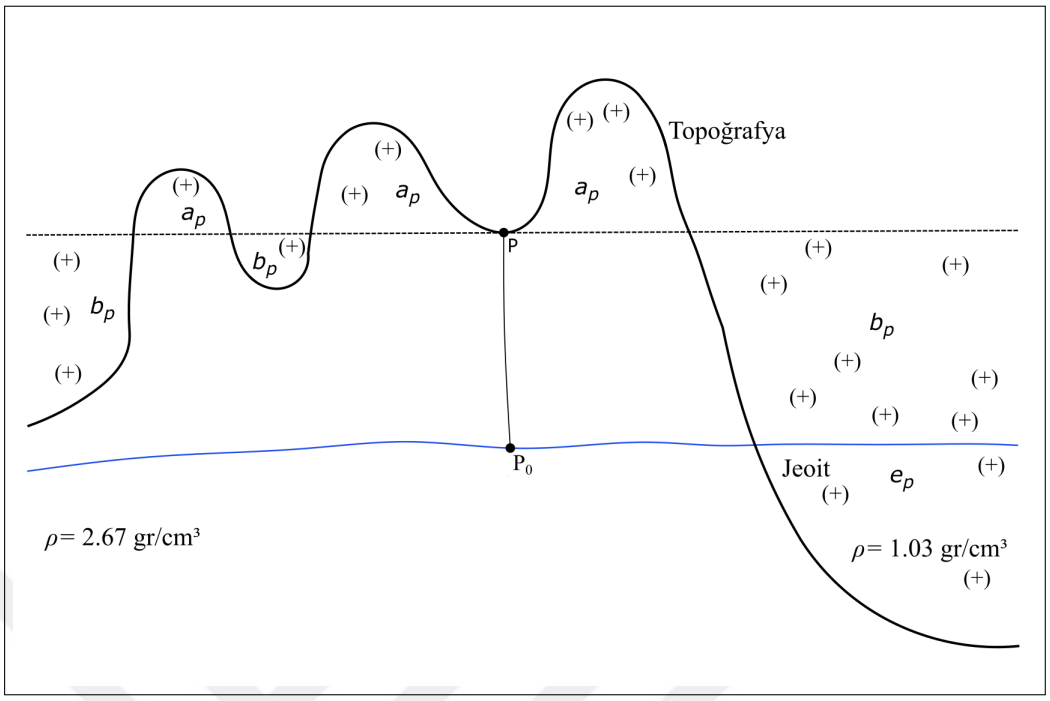
Basit Bouguer indirgemesinde topoğrafya levha olarak kabul edilirken, tam Bouguer indirgemesinde arazi engebeleri de basit Bouguer indirgemesine dahil edilir.

Basit Bouguer düzeltmesinde, H kalınlıklı silindirin üstünde kalan topoğrafya (a_P bölgesi) veya altında kalan boşluklar (b_P bölgesi) ihmal edilir. Tam Bouguer düzeltmesinde bu kitleler ve boşluklar da hesaba dahil edilir. a_P bölgesindeki artık kitlelerin çekim etkisi sonsuz levhanın çekim etkisiyle ters yönde olduğundan bu bölgelerden kaynaklı topoğrafik düzeltme (δg_a^P) pozitif işaretli düzeltmedir. b_P bölgelerindeki boşluklar ise sonsuz levhayla birlikte ρ yoğunluklu kitleler olarak kabul edildiğinden, boşlukladan kaynaklı etki (δg_b^P) yine levha etkisiyle ters işaretli büyüklük olup pozitif değerli olarak indirgeme işlemine dahil edilirmektedir. Tam Bouguer yöntemiyle indirgenmiş gravite,

$$g_{P_0} = g_P + \delta g_{BI} - (\delta g_{BB} - \delta g_b - \delta g_a) = g_P + \delta g_{BI} - \delta g_{BB} + \delta g_b^P + \delta g_a^P \tag{1.24}$$

$$g_{P_0} = g_P + 0,0848H + \delta g_b^P + \delta g_a^P \tag{1.25}$$

eşitlikleriyle tanımlıdır. Burada yüksekliğin metre biriminde alınmasıyla mGal biriminde elde edilir (Hinze ve diğ., 2012). Deniz bölgesine yakın yerlerde deniz yüzeyi topoğrafyasının da önemli sayılabileceği çalışmalar için deniz etkisi (δg_e^P) pozitif büyüklüktedir ve Şekil 1.4'te e_P bölgesinde gösterilmiştir. Bölge deniz



Şekil 1.4. Yeryüzündeki P noktasına göre topoğrafik düzeltmeler için bölgeler

yoğunluğunun $1,03$ gr/cm^3 alınmasıyla topoğrafya yoğunluğunun $2,67$ gr/cm^3 kabul edildiği durumdan $1,64$ gr/cm^3 farklı olduğu için bu bölgedeki çekim etkisi bu yoğunluk farkına göre belirlenmektedir. Deniz etkisinin de topoğrafik düzeltmelere dahil edilmesiyle, jeoit seviyesine indirgenmiş gravite değerine,

$$g_{P_0} = g_P + 0,0848H + \delta g_b^P + \delta g_a^P + \delta g_e^P \tag{1.26}$$

ile ulaşılmaktadır.

1.5. Poincare ve Prey'e Göre İndirgeme

Boşlukta gravite indirgemesi ve topoğrafya indirgemeleri yapıldıktan sonra kaldırılan topoğrafyanın indirgeme düzlemine etkisi hesaplanarak yerine konulur. Bouguer indirgemesinden farklı olarak, indirgeme düzlemi üzerindeki ihmal edilen topoğrafya, Poincare ve Prey düzeltmeleriyle tekrar yerine konulur. Bu yöntemle yer içinde gravite ölçmesine imkan olmayan noktaların beklenen gravite değerleri yeryüzündeki noktanın gravite değeriyle hesaplanır. Bu sayede, yer içindeki gravite değişiminin bilinmesiyle jeopotansiyel sayılara ulaşılıp nivelman düzeltmeleri gerçekleştirilebilir (Heiskanen ve Moritz, 1984); (Demirel, 1984).

Prey indirgemesinin en basit hali topoğrafyanın, Bouguer levhası olarak kabul edildiği durumdur. Yeryüzü üzerindeki bir P noktasından çekül doğrultusu üzerindeki olan Q noktasına Prey indirgemesi en basit biçimiyle yapılmak istenirse, boşlukta gravite ve Bouguer levha indirgemelerinin ardından topoğrafik yapının yeniden gerçeklenmesi için kaldırılmış olan levha yerine konulur. Sonsuz Bouguer levhasının indirgeme düzlemindeki noktada çekim etkisi yer merkezine ters yönde olacağından negatif etki gösterir. Buna göre;

$$g_Q = g_P + \delta g_{BI} - \delta g_{BB} - \delta g_{BB}$$

$$g_Q = g_P + (0,3086 - 0,1119 - 0,1119)(H_P - H_Q)$$

$$g_Q = g_P + 0,0848(H_P - H_Q) \tag{1.27}$$

denklem Prey indirgemesinin en basit halidir (Heiskanen ve Moritz, 1984). Topografyanın Bouguer levhası olarak kabul edildiği durumda P_0 noktasında ölçülmesi beklenen graviteyi verir.

Prey indirgemesi topoğrafik düzeltmelerin de dahil edilmesiyle geliştirilebilir. Bu süreçte, yeryüzündeki P noktası için topoğrafik düzeltmelerle arazi etkisi kaldırılan topoğrafik etkiler tekrar yerine konulur. Topoğrafik etkiler, levha içinde kalan boşluklar ve levha üzerindeki kitleler olarak bölgelere ayrılarak değerlendirilir (Şekil 1.5). Boşluklar levhayla birlikte negatif etki gösteren kitleler olarak kabul edildiği için bu bölgelerdeki (b_Q bölgesi) çekim etkisi ($\delta\overline{g}_b$) pozitif işaretli gravite düzeltmesi olarak hesaba dahil edilir. Levha üzerindeki kitlelerin (a_Q bölgesi) çekim etkisi ($\delta\overline{g}_a$) ise yermerkezli çekim etkisiyle ters yönlü olduğundan Q noktasındaki indirgenmiş gravite değerine negatif etki eder (Demirel, 1984); (Heiskanen ve Moritz, 1984). Ayrıca, indirgeme düzleminin altındaki boşluklar (d_Q bölgesi) da çekim etkisini azaltacağı için negatif yönde gravite değişimine neden olur. Denize yakın bölgelerde ise kaldırılan su tabakasının (e_Q bölgesi) yerine yerleştirilmesinde topoğrafik düzeltmeler negatif yönde etkilenir. Bu büyüklük ($\delta\overline{g}_e$) 1,67 gr/cm^3 yoğunluk farkına göre hesaplanır. Tüm bu etkiler göz önüne alındığında, Q noktasında ölçülmesi beklenen graviteye ulaşılır. Böylece Poincare ve Prey'e göre indirgeme düzlemindeki (jeoit) ağırlık ivmesi;

$$g_{P_0} = g_P + \delta g_{BI} - \delta g_{BB} + \delta g_b + \delta g_a - \delta g_{BB} - (-\delta\overline{g}_b + \delta\overline{g}_a + \delta\overline{g}_d + \delta\overline{g}_e) \tag{1.28}$$

eşitliğiyle gösterilir. Yeryüzündeki noktaya getirilen topoğrafik düzeltme δg_P ve indirgeme düzlemindeki Q noktasında topoğrafyanın yerine konulmasıyla getirilmesi gereken topoğrafik düzeltme $\delta \bar{g}_Q$ şeklinde gösterilirse,

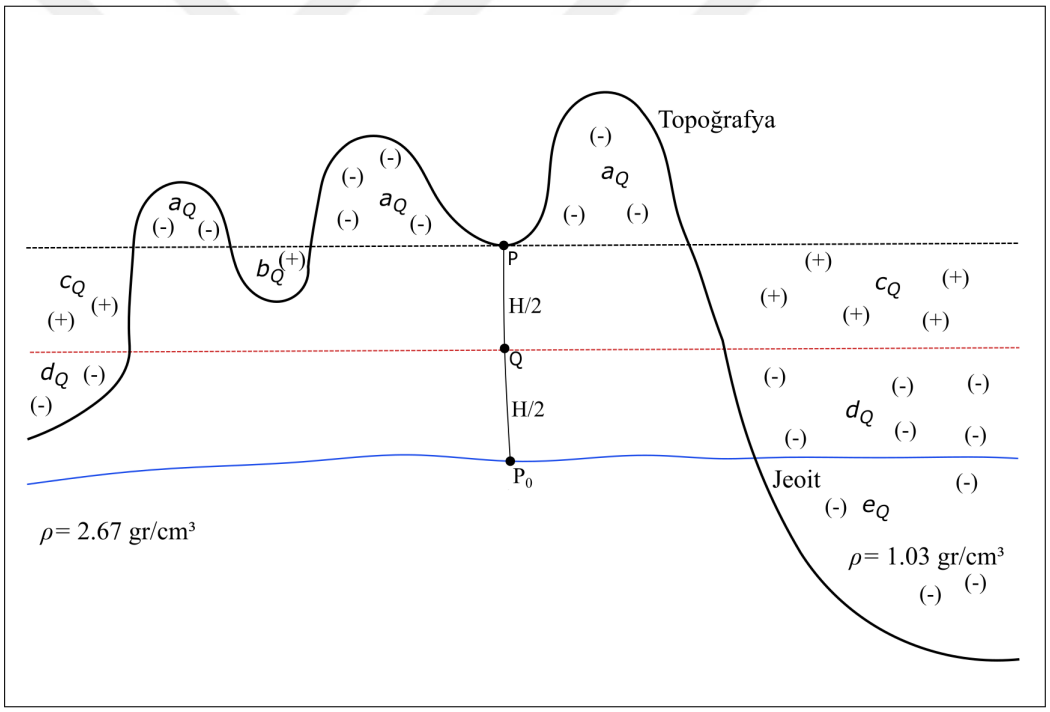
$$\delta g_P = \delta g_b + \delta g_a \tag{1.29}$$

$$\delta \bar{g}_Q = -\delta \bar{g}_b + \delta \bar{g}_a + \delta \bar{g}_d + \delta \bar{g}_e \tag{1.30}$$

denklemlerine karşılık gelir. Bu değişkenlere göre formül sadeleştirilirse,

$$g_{P_0} = g_P + 0,0848(H_P - H_{P_0}) + \delta g_P - \delta \bar{g}_Q \tag{1.31}$$

denklemi topoğrafik düzeltmeleri de içeren Poincare ve Prey indirgemesine karşılık gelir.



Şekil 1.5. Yer içindeki Q noktasına göre topoğrafik düzeltmeler için bölgeler

2. ORTOMETRİK YÜKSEKLİKLER ve TOPOĞRAFYANIN ETKİSİ

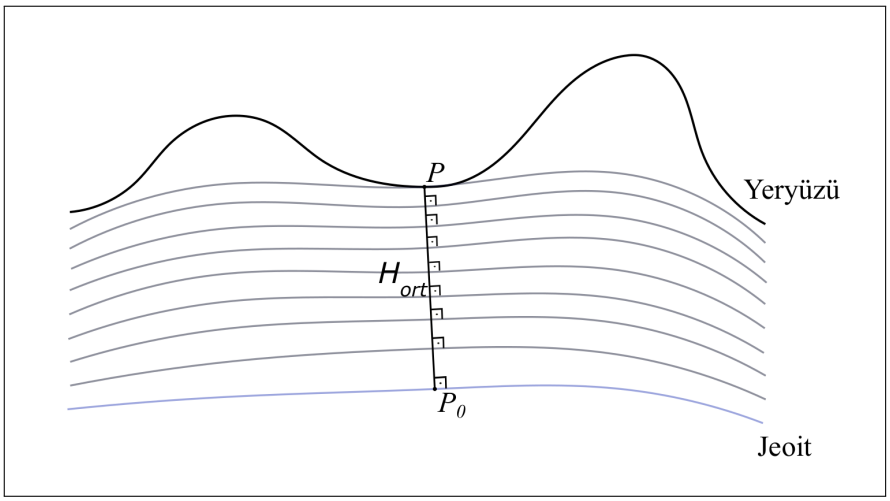
Ortometrik yükseklik mühendislik çalışmalarında, navigasyon, haritalama ve jeofizik çalışmalarında kullanılmaktadır. Ortometrik yükseklik deniz seviyesindeki eşpotansiyel yüzey (jeoit) ve noktanın bulunduğu eşpotansiyel yüzey arasındaki çekül eğrisi uzunluğudur. Bu uzunluk boyunca eşpotansiyel yüzeyler çekül doğrutusuna diktir (Şekil 2.1). Ancak bu yüzeyler birbirlerine paralel olmadığı için, çekül doğrultusu eğri görünümlüdür (Rapp, 1961). Yeriçinde gravitenin değişimine göre farklılaşan eğrinin uzunluğunun tam anlamıyla belirlenmesi için yer içinde her konumda gravite ölçmesi yapmak olanaksızdır. Çekül doğrultusu boyunca tüm gravite değerleri ve dolayısıyla tüm eşpotansiyel yüzeyler belirlenemeyeceğinden ortometrik yükseklikler için yaklaşımlar geliştirilir.

Nivelman ölçmeleriyle ortometrik yüseklikler belirlenirken, ölçme aletinin bulunduğu eşpotansiyel yüzey ve miraların bulundukları eşpotansiyel yüzeyler birbirlerine paralel olmadıkları için yola bağımlı yükseklik farkları bulunur. Bu fark nivelman geçkileri uzadıkça ve deniz seviyesindeki başlangıç noktasından uzaklaştıkça artacaktır. Ayrıca nivelman ölçmeleriyle yükseklik bilgisini yeryüzünde büyük alanlar boyunca taşımak fazla zaman ve yoğun iş yükü gerektirir.

Ortometrik yükseklikllerin belirlenmesindeki bir diğer yol, nivo yüzeyleri arasındaki gravite potansiyelindeki değişimleri gözlemektir. Eşpotansiyel yüzeyler arasındaki ağırlık potansiyeli farkı, noktasal bir kitleyi bu yüzeyler arasında en kısa yoldan (çekül eğrisi boyunca) taşıyarak yapılan iştir. Bu iş,

$$\Delta W = W_0 - W_P = \int_{P_0}^{P} \bar{g} dh \tag{2.1}$$

denklemiyle açıklanır. Bir noktanın ortometrik yüksekliği jeoit ve nokta arasındaki çekül doğrultusu uzunluğu olduğu için jeoit, referans nivo yüzeyi olarak seçilir. Dolayısıyla bir eşpotansiyel yüzey olan jeoidin jeopotansiyel kotu sıfır olarak kabul edilir. Nivo yüzeylerinin hiçbiri bibiriyle çakışmadığı için her noktanın farklı bir jeopotansiyel kotu vardır. Bu nedenle her nokta için tek anlamlı bir değer



Şekil 2.1. Ortometrik yükseklikler

bulunduğundan sonuçlar yoldan bağımsızdır. Ortometrik yükseklikler için kullanılan jeopotansiyel sayılar yeryüzündeki noktanın üzerinde bulunduğu eşpotansiyelli yüzeyin potansiyeli ile jeoit potansiyeli arasındaki farktır. Jeopotansiyel yükseklik farkı da denilebilir. P noktasındaki jeopotansiyel sayı bu noktadaki ve bu noktanın jeoit üzerinideki izdüşümü olan P_0 noktasındaki gravite potansiyelleri arasındaki farktır;

$$C_P = W_0 - W_P = \int_{P_0}^{P} gdH \tag{2.2}$$

W_0 jeoit potansiyeli, W_P P noktasının gravite potansiyeli, dH düşey yöndeki yer değişimi, g ise gözlenen gravite büyüklüğüdür.

Nivo yüzeylerinin hiçbiri bibiriyle çakışmadığı için her yüzeyin farklı bir jeopotansiyel kotu vardır. Bu nedenle jeopotansiyel sayılar ile ortometrik yüksekliklerin elde edilmesi geometrik nivelmandan farklı olarak yoldan bağımsızdır.

Jeoit ve yeryüzü arasında gravite her noktada değiştiğinden dolayı ortometrik yüksekliğin hesaplanabilmesi için çekül doğrultusu boyunca ortalama bir gravite değeri $\overline{g}$ değeri seçilir. Ancak bu değer yer içinde gravite ölçmesi yapılarak belirlenemez, yerküre için kitle dağılımı ve yoğunluklarının modelenmesiyle yaklaşık bir $\overline{g}$ değeri hesaplanabilir.

P noktasındaki ortometrik yüksekliğe (H_P) jeopotansiyel sayının ortalama graviteye bölünmesi yoluyla yaklaşılabilir;

$$H_P = \frac{C_P}{\overline{g}} \tag{2.3}$$

1900'lerden günümüze kadar araştırılan ortalama gravite değerine, farklı tekniklerle yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlara Helmert, Niethammer, Mader ortometik yükseklikleri örnek verilebilir. Mader ve Niethammer yöntemleri topoğrafik düzeltmelerin de hesaba katılmasıyla, Helmert methoduna göre daha yüksek doğrulukları yakalasa da hesaplama güçlüğü ve topoğrafyayı temsil eden yeterli yükseklik verisine sahip olunamadığı için daha az kullanılmışlardır. Örneğin, ülkemizin düşey kontrol ağı TUDKA, hesap ve uygulama kolaylığı nedeniyle Helmert Ortometrik yüksekliğe göre oluşturulmuştur. Ancak günümüzde uydu tekniklerinin gelişmesiyle Sayısal Yükseklik Verileri ve bilgisayarlı hesaplama tekniklerinde yaşanan gelişmeler, topoğrafya düzetmelerinin hasap yükünü azalmıştır.

2.1. Helmert Ortometrik Yüksekliği

Helmert yöntemi ortalama gravite değeri için Poincare-Prey gravite indirgeme yönteminin en basit halini Denklem (2.26) ile kullanır. Jeoit ve nokta arasındaki topoğrafyayı Bouguer levhası olarak kabul eder ve topoğrafik etkileri yok sayar. Ortalama graviteyi ise, jeoit üzerindeki gravite (P_0) ve yeryüzü noktasında ölçülen gravitenin ortalaması olarak alır,

$$\overline{g}^H = \frac{g_P + g_{P_0}}{2} \tag{2.4}$$

Topoğrafya levha olarak kabul edildiğinden levha yüksekliğinin yarısı olan H/2 yüksekliğindeki Q noktası, ortalama gravitenin hesaplandığı varsayılan noktadır. Denklem (2.29)'daki nokta ve indirgeme düzlemi arasındaki yükseklik farkının H/2 olarak alınmasıyla,

$$\overline{g}^H = g_P + 0,0424H \tag{2.5}$$

denklemi Helmert ortometrik yüksekliği için ortalama gravite $2,67$ gr/cm^3 yoğunluklu topoğrafya için elde edilir.

Farklı yoğunluklu topoğrafyalar için ise Poincare ve Prey indirgemesi H/2 ortalama yüksekliği için uygulanırsa,

$$\bar{g}^{H} = g_P + 0,3086H_Q - 4\pi G\rho H_Q \tag{2.6}$$

denkleminde H yerine H/2 yazılarak Q noktası için gravite değeri yani ortalama gravite bulunur.

Hesaplanan ortalama gravite değerleriyle Helmert ortalama yüksekliğine,

$$H^{H}_{ort} = \frac{C}{g_P + 0,0424H} \tag{2.7}$$

denklemiyle ulaşılmaktadır.

2.2. Mader Ortometrik Yüksekliği

Mader ortometrik yüksekliği, ortalama gravite değeri olarak Helmert yöntemindeki gibi noktanın gravite değeri ile noktanın çekül doğrultusu boyunca izdüşümü olan jeoit üzerindeki gravite değerinin ortalamasını kabul eder. Helmert yönteminden ayrılarak topoğrafyanın levha etkisine ek olarak topoğrafya düzeltmelerini de içerir. Poincare ve Prey indirgeme yöntemini baz aldığı için, indirgenen topoğrafik etkiler tekrar yerine konularak jeoit üzerinde ölçülmesi beklenen gravite değeri elde edilir. Bu nedenle yeryüzündeki gravite ölçmelerine topoğrafya düzeltmesi getirildikten sonra yeniden yerleştirilen topoğrafik kitlelerin jeoit üzerindeki noktaya olan topoğrafik etkileri de incelenir ve aritmetik ortalamaları alınır. Topoğrafik etkiler sadece gravite ölçme noktası ve jeoit üzerindeki P_0 noktasında incelendiği için gravitenin değişimi lineer olarak kabul edilmiş olur. Lineer olarak en orta değer olan H/2 yüksekliğindeki Q noktası için ortalama gravite değeri Mader yöntemine göre,

$$\bar{g}^{M} = g_P + 0,3086H_Q - 2(2\pi G\rho)H_Q + \delta g^{P} + \frac{1}{2}(\delta g^{P} - \delta g^{P_0}) \tag{2.8}$$

$$\bar{g}^{M} = g_P + 0,0424H + \delta g^{P} + \frac{1}{2}(\delta g^{P} - \delta g^{P_0}) \tag{2.9}$$

denklemiyle gösterilir. δg^{P} yeryüzündeki topoğrafik düzeltmeye, δg^{P_0} ise jeoit üzerindeki P_0 noktası için getirilen topoğrafik düzeltmeyi ifade eder.

Ortalama graviteden hareketle,

$$H_{ort}^{M} = \frac{C}{\overline{g}^{M}} \tag{2.10}$$

eşitliği kullanılarak Mader ortometrik yükseklikleri belirlenebilir.

2.3. Niethammer Ortometrik Yüksekliği

Niethammer ortometrik yüksekliği, Helmert ortometrik yüksekliğinden farklı olarak topoğrafik düzeltmeleri de içerir. Ortalama graviteyi belirlerken, kitlelerin yarattığı topoğrafik etkiyi çekül doğrultusu boyunca araştırarak topoğrafya etkisini yüksek doğruluklu olarak belirlemeyi amaçlar. Pratikte tüm çekül doğrultusu boyunca gravite değerleri bilinmediğinden H/2 yüksekliğindeki graviteyi ortalama gravite olarak kabul eder. Yer içinde ortalama topoğrafik düzeltme,

$$\overline{\delta}g = \frac{1}{H}\int_{H=0}^{H} \delta g dH \tag{2.11}$$

çekül doğrultusu boyunca tüm yer içi topoğrafik düzeltmeleri toplam yüksekliğe (H) oranlayarak elde eder. Bu ortalama değerin çekül eğrisinde yaklaşık orta yükseklik olan H/2 yüksekliğindeki yer içinde bulunan Q noktasına ait olması beklenir. Çekül doğrultusu boyunca her noktadaki gravite değişimi bilinemeyeceğinden dolayı, P noktasındaki gravite ölçmesini Q noktasına indirgeyerek, Niethammer metodunda ortalama gravite,

$$\overline{g}^{N} = g_P + 0,0424H + \delta g^{P} - \delta g^{Q} \tag{2.12}$$

şeklinde $2,67$ gr/cm^3 yoğunluklu topoğrafya için hesaplanır.

Ortalama gravite değerinden yola çıkarak hesaplanacak olan Niethammer ortometrik yükseklikleri,

$$H_{ort}^{N} = \frac{C}{\overline{g}^{N}} \tag{2.13}$$

olarak ifade edilir.

2.4. Niethammer ve Helmert Ortometrik Yüksekliklerinin Karşılaştılırması

Helmert ve Niethammer ortometrik yüksekliklerinin elde edilişi Şekil 2.2'de özetlenmiştir.

Helmert ortometrik yükseklikler topoğrafik düzeltmeleri içermedikleri için Niethammer yüksekliğinden farklı olarak topoğrafyadan kaynaklı hataları daha çok içerirler. Niethammer ortometrik yükseklikleriyle getirilen topoğrafik düzeltmeler ortometrik yüksekliklerdeki doğruluğu arttır. Ortalama graviteye getirilen bu düzeltmenin ortometrik yüksekliklere etkisi (dH),

$$dH = -\frac{C}{\bar{g}^2}d\bar{g} = -\frac{H}{\bar{g}^2}d\bar{g} \tag{2.14}$$

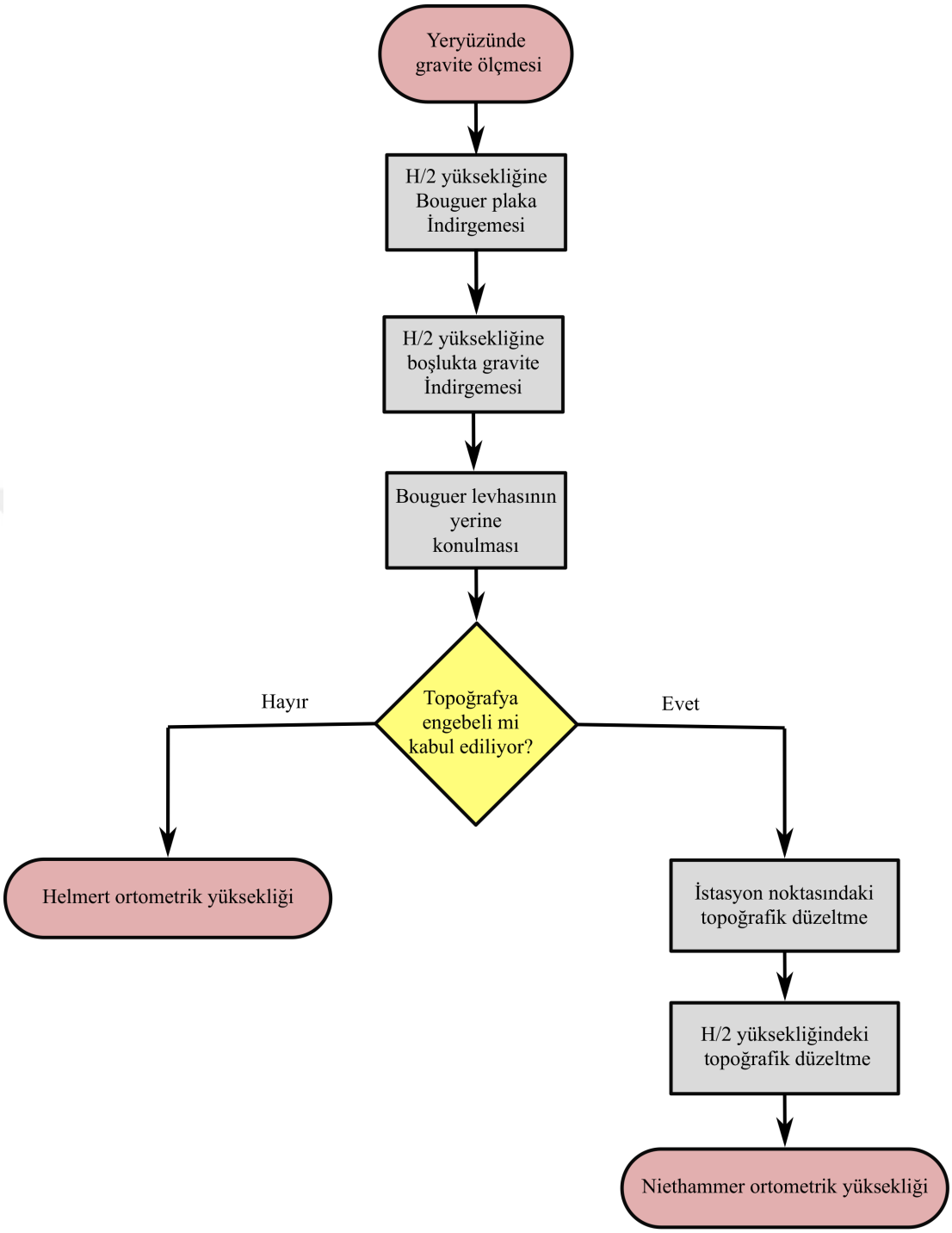
ile bulunur. Eşitliğin sağında $\bar{g}$ yaklaşık 1 kGal ve H yüksekliği km alındığında,

$$dH_{[mm]} = d\bar{g}_{[mGal]}H_{[km]} \tag{2.15}$$

ortalama gravitedeki mGal biriminde değişimin neden olduğu ortometrik yükseklik düzeltmesinin mm biriminde karşılığı bulunur (Heiskanen ve Moritz, 1984). Niethammer ve Helmert ortometrik yükseklikleri arasındaki farklar için topoğrafik düzeltme değerleri ve nokta yüksekliklerine göre beklenen değerler Tablo 2.1'deki gibidir. Tablodaki değerlerden de görüleceği gibi ortalama gravitedeki değişimler ortometrik yükseklikleri ciddi oranda etkilemektedir. Helmert ve Niethammer yöntemlerinden bulunacak ortometrik yüksekliklerin farkı düşük yükseklikli arazilerde milimetre düzeyinde küçük farklılıklar olurken, dağlık ve engebeli bölgelerde onlarca santimetreyi bulabilir. Bu nedenle topoğrafik düzeltmelerin yüksekliği fazla noktalarda yok sayılması ortometrik yüksekliklerde gerçek değerlerinden büyük miktarda sapmalara neden olabilir.

2.5. Gerçeğe Yakın Ortometrik Yükseklikler

Gerçeğe yakın ortometrik yükseklikler, ortalama graviteyi, jeoidi oluşturan kitlelerden kaynaklı gravite değişimi ile topoğrafyadan kaynaklı gravite toplamı olarak kabul eder. Jeoit toplam kütlenin neden olduğu, normal gravite ile bozucu gravite bileşkesi olarak düşünülebilir. Gerçeğe yakın ortometrik yüksekliklerde topoğrafya etkisi; Bouguer



Şekil 2.2. Helmert ve Niethammer ortometik yüksekliklerinin elde edilişi

Tablo 2.1. Topoğrafik düzeltmelerin ortometrik yüksekliklere etkisi

H (m)	$d\bar{g}$ (mGal)	dH (mm)
50	10	0,5
50	50	2,5
50	100	5
500	10	5
500	50	25
500	100	50
1000	10	10
1000	50	50
1000	100	100
2000	10	20
2000	50	100
2000	100	200
3000	10	30
3000	50	150
3000	100	300

tabakası etkisi, yeryüzündeki topoğrafya engebelerinin etkisi ve yoğunluk değişiminin etkisi olarak 3 terimden oluşur (Tenzer ve Vanicek, 2003); (Tenzer ve diğ., 2005); (Santos ve diğ., 2006); (Odera ve Fukuda, 2015).

Gerçeğe yakın ortometrik yüksekliklerde en büyük gravite etkisini jeoit kitlelerinin gravite etkisi ve yoğunluk değişimi yapmaktadır. Niethammer ve Mader ortometrik yüksekliğinde ortalama gravite büyüklüğünde bu değerler kullanılmadığı için, düzeltme değerleri gerçeğe yakın ortometrik yüksekliğinden daha küçük olmaktadır (Santos ve diğ., 2006)

Gerçeğe yakın Helmert ortometrik yüksekliği topoğrafyanın yoğunluk değişimlerine bağlı olarak Helmert ortometrik yüksekliklikliklerine düzeltme getirir. Yüksek noktalarda bu etki önemli hale gelirken, yoğunluk değişimine bağlı olarak düşük kotlu noktalarda da büyük etkileri olabilir. Örneğin, 6000 m yüksekliğinde 0,5 m civarında, 2000 m yüksekliğinin altında ise 6 cm'den küçük düzeltmelere neden olabilir. Ancak yöntemin uygulanabilmesi için yoğunluk modellerine ihtiyaç vardır (Tenzer ve Vanicek, 2003).

3. SAYISAL ARAZİ VE GLOBAL BATİMETRİ MODELLERİ

Sayısal yükseklik modelleri (SYM), mühendislik uygulamaları, kentsel planlama ve CBS, yerbilimi araştırmaları, askeri amaçlar ve üç boyutlu yeryüzü bilgisi gerektiren birçok farklı çalışma için altlık oluşturmaktadır. Topoğrafyanın üç boyutlu konum bilgisi, yersel ölçmelerle, fotogrametrik ve uzaktan algılama teknikleriyle elde edilen verilerle üretilebilir. Yersel ölçmeler yükseklik modellerinde yüksek doğruluk sağlamasının yanı sıra büyük alanlarda kullanımı çok fazla iş yükü, zaman ve maliyet gerektirir. Gelişen uydu teknolojilerinin kullanılmasıyla sayısal yükseklik modellerinin oluşturulması zaman ve maliyet yönünden verimli bir hal almaktadır.

SYM'ler ile topoğrafya modellenirken, topoğrafik yapının ne kadar temsil edildiği nokta sıklığına bağlıdır. Uygulama alanının büyüklüğüyle grid nokta sayısı milyarlara varabilir. Bu denli büyük sayıda verinin toplanabilmesi günümüzde uydu teknikleriyle zaman ve emek tasarruflu olarak gerçekleştirilmektedir. Uydu tekniklerinden InSAR (İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Sistemi) tekniği ile radar uydu görüntülerindeki sinyal faz farkıyla yükseklik verisi üretilmesiyle oluşturulan SRTM, Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) için veri kaynağıdır. Ayrıca ASTER GDEM yükseklik verileri de SYM oluşturulurken kullanılan bir diğer veri kaynağıdır. Terra uydusu üzerine yerleştirilmiş ASTER ile kızılötesinden morötesi bandına kadar 14 farklı bantta görüntüler almaya dayalı olarak çalışan bir sistemdir.

3.1. Sayısal Arazi Modelleri

3.1.1. SRTM1 ve SRTM3

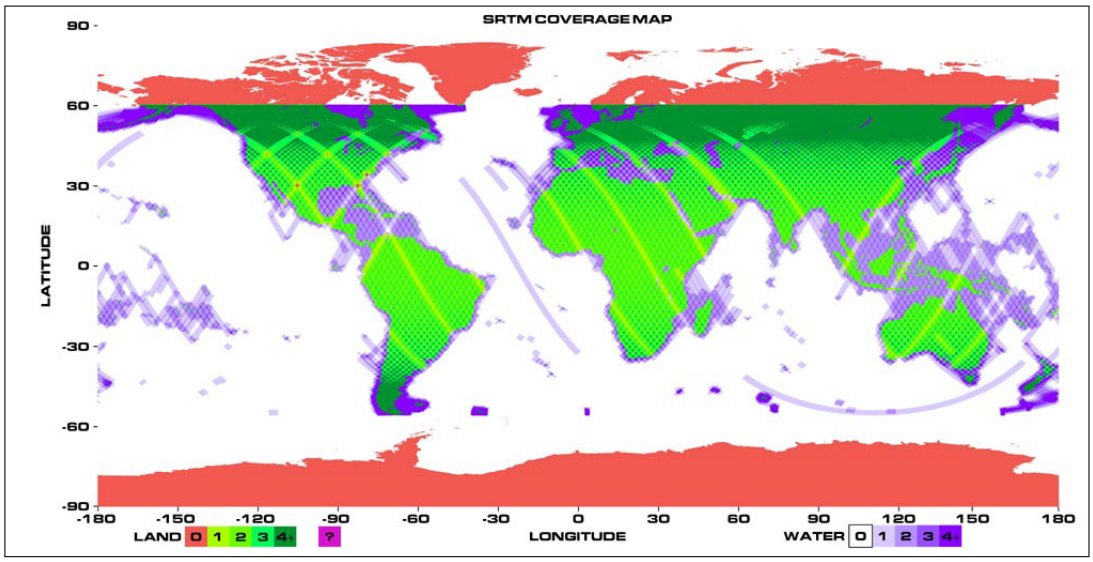
SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) tarafından yürütülen, kara parçalarının SAR (Yapay Açıklıklı Radar) görüntülerini toplayan bir projedir. Bu projeyle, yeryüzünün 60° kuzey ve 56° güney enlemleri arasındaki kara parçalarının yükseklik modelleri üretilmektedir. Bu enlem aralığı yeryuvarındaki karaların yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır (Şekil 3.1).

SRTM verileri InSAR tekniğiyle radar görüntülerindeki sinyal faz farklarıyla yeryuvarı görüntülerini oluşturur. 2000 yılında fırlatılan Endeavour uydusunda farklı konumlardaki iki radar anteniyle alınan eş zamanlı görüntüler birleştirilerek 3 boyutlu yeryuvarı görüntüleri toplanmıştır. Bu iki antenin üzerinde bulunan C ve X bandlarıyla farklı frekanslarda veriler toplanmıştır. Bu farklı frekanslardan farklı çözünürlüklerde olan DTED-1 ve DTED-2 formatlarında veriler üretilmiştir. DTED-1 formatındaki $3''$ çözünürlüklüdür ve $1''$ çözünürlüklü DTED-2'nin ortalama yükseklikleriyle üretilmiştir. Ayrıca gölgeli yerlerin olmaması için her arazi alanın farklı açılarda alınan en az iki görüntüye sahip olması hedeflenmiştir.

DTED (Digital Terrain Elevation Data) formatındaki dosyalar güney-batı köşe enlem ve boylamlarına göre isimlendirilmişlerdir. Hücrelerinde coğrafi enlem ve boylam aralıklarına göre yükseklik bilgisini bulundururlar. Arazinin yükseklik bilgisi satır sütunların kesişiminde bulunur ve metre birimindedirler. Bir dosya $1^\circ \times 1^\circ$ büyüklüğünde alanı kapsar ve bu alanın güneybatı köşesi referans noktası olup, yükseklik verileri belirli enlem ve boylam aralıklarında konumludur. Bu bölümlendirme aralığı, DTED-2 dosyalarında üikemizin de içinde bulunduğu 0°-50° boylam aralıklarında $1''$ iken kutuplara doğru meridyen aralığı daraldığı için, boylam aralıkları da artar. Ancak enlemler $1''$ aralığında değişmezdirler. Bu nedenle 0°-50° boylam aralığındaki DTED-2 paftaları $1'' \times 1''$ çözünürülüklüdür ve $1^\circ \times 1^\circ$'lik pafta alanlarında 3601×3601 adet yükseklik verisi bulunur. Yükseklik verilerinin dosya kayıtları, güney-batı köşe noktasından başlayarak batıdan doğuya doğru sıralıdır. Yükseklik değerleri, 16 bitlik binary integer olarak metre birimindedir. Ayrıca bu dosyalardaki denizlerin yükseklikleri sıfır değerindedir (URL-1, 2017); (URL-2, 2017); (URL-3, 2017). Günümüzde $1'' \times 1''$ çözünürlükteki SRTM1 ve $3'' \times 3''$ çözünürlükteki SRTM3 ile sayısal yükseklik verileri internet kanalından ücretsiz olarak paylaşılmaktadır.

3.1.2. ASTER GDEM

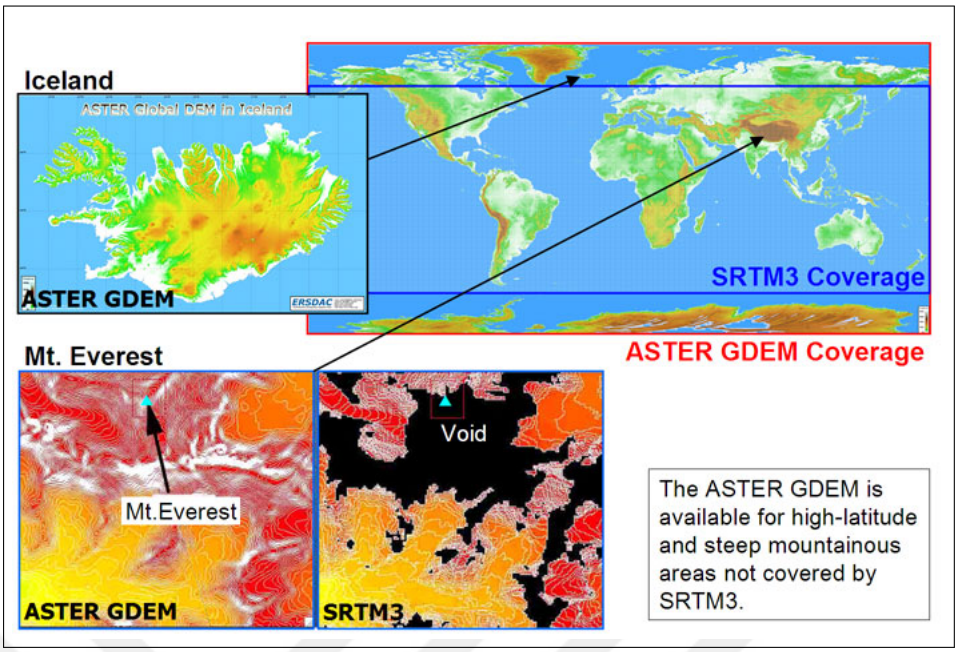
Global Sayısal Yükseklik Modeli olan ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), NASA ve METI işbirliğiyle oluşturulmuştur. GDEM 1 ve GDEM 2 olarak iki ayrı versiyonu vardır. GDEM 2 versiyonu GDEM



Şekil 3.1. SRTM verilerinin kapsadığı alan (URL-4, 2017)

1'in iyileştirilmiş halidir. NASA'nın 1999 yılında fırlatılan Terra uydusu üzerinde bulunarak ASTER alıcıları yakın kızılötesi kameralarla görüntü çiftlerini 60 km$\times$60 km boyutlarında elde eder. İki farklı açıdan alınan görüntüler derinlik bilgisi sağladığından 3 boyutlu görüntülerle sayısal yükseklik modellerinin üretilmesini olanaklı kılmaktadır. ASTER GDEM1'deki doğruluk %95 güvenilirlikle 20 metre iken, bu doğruluk ASTER GDEM 2 versiyonuyla 17 m'ye yükseltilmiştir. $1^\circ \times 1^\circ$ lik alanlar için GeoTIFF dosya formatında enlem ve boylam bilgilerine sahip olarak sunulmaktadır. ASTER GDEM dosyaları sol alt köşe pikselin geometrik ortasındaki enlem ve boylam koordinatlarına göre isimlendirilirler . Yatay koordinatlar WGS 84 elipsoidi, yükseklikler ise ve EGM96 jeoidi referanslıdır. $1''$ ($\approx$30 m) çözünürlüklü oldukları için her bir dosya 3601$\times$3601 adet veri içerir. 83° kuzey ve 83° derece güney enlemleri arasındaki alanda veri oluşturduğu için nerdeyse tüm yeryüzündeki tüm kara alanlarıyla ilgili yükseklik elde etmektedir. Bu yönüyle SRTMverilerine göre daha fazla alanı kapsamaktadır (Şekil 3.2).

ASTER GDEM verileri DTED-2 verileri gibi enlem, boylam olarak $1^\circ \times 1^\circ$ alanında 16 bit boyutunda 3601$\times$3601 adet yükseklik verisi içerirler. Su kitleleri için yükseklik bilgisi ise sıfır değerindedir (URL-6, 2017).



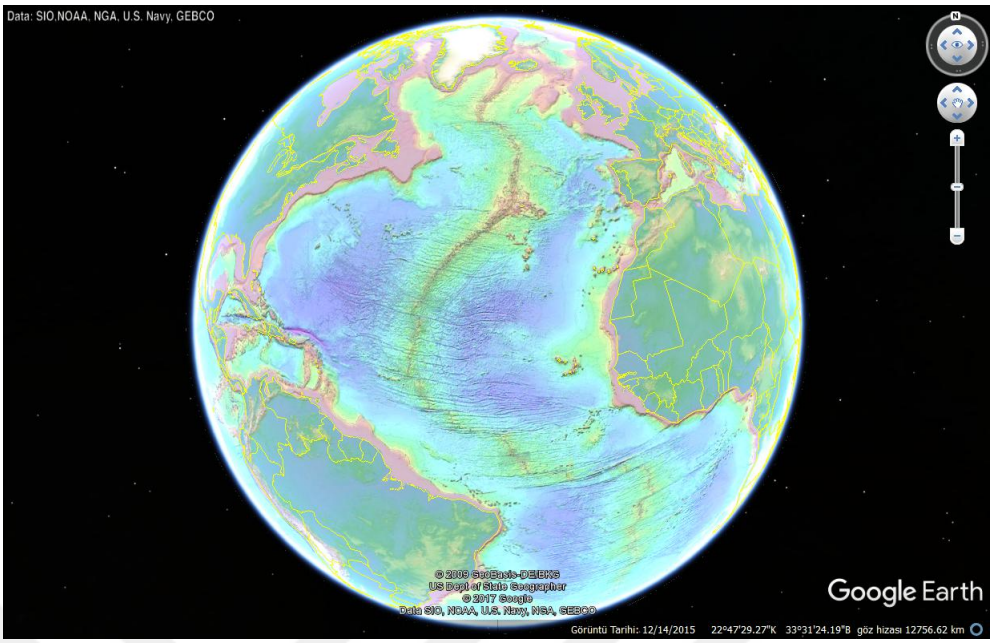
Şekil 3.2. ASTER GDEM ve SRTM3 SYM'lerinin kapsadığı alan ve karşılaştırma (URL-5, 2017)

3.2. Batimetri Modelleri

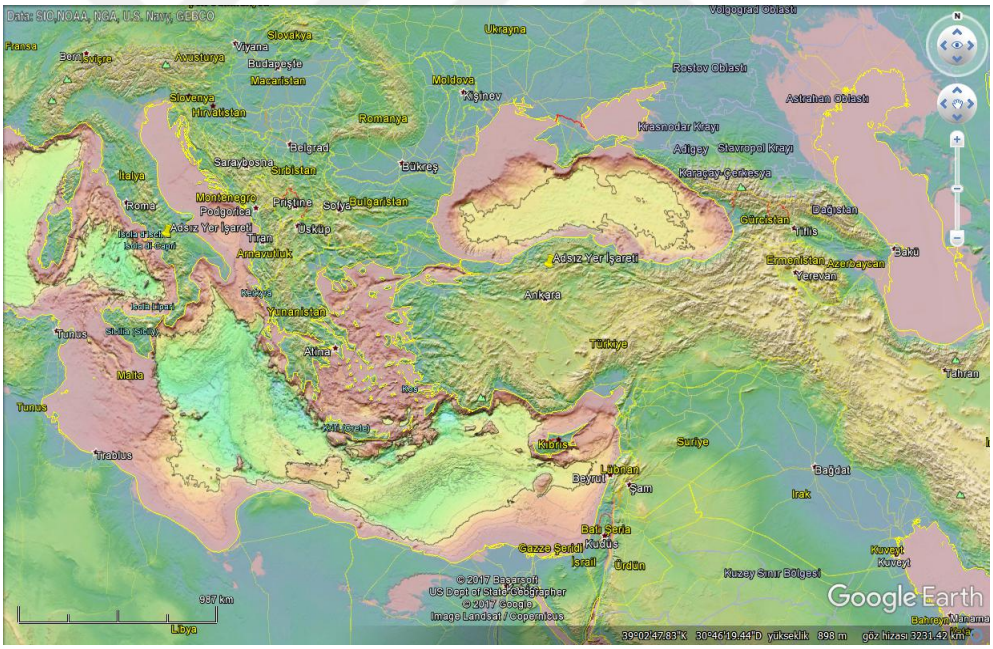
3.2.1. SRTM15-PLUS

SRTM15-PLUS 15″ çözünürlüklü deniz tabanını yüksekliklerini de içeren sayısal yükseklik modelini oluşturmak amacıyla, mevcut olan derinlik bilgileri ve kıyı bölgelerinde gravite modellerini kullanmaktadır. Karalardaki yükseklikler ise ASTER, SRTM ve buzul bölgelerindeki CryoSat-2 sayısal yükseklik verilerinin birleşimiyle oluşturulmuştur. Okyanuslardaki batimetri bilgisi CryoSat-2 ve Jason-1 küresel gravite modellerinden düzenlenen 15″ çözünürlükteki 494 milyon derinlik bilgisine dayanmaktadır. topo15.grd ve USGS HDR olarak iki farklı formatta veri seti vardır. topo15.grd netCDF formatındadır ve GMT yazılımında kullanıma uygundur.

SRTM15-PLUS verileriyle oluşturulan global batimetri ve Türkiye batimetri modeli sırayla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. SRTM15-PLUS global batimetri modeli



Şekil 3.4. SRTM15-PLUS Türkiye batimetri modeli

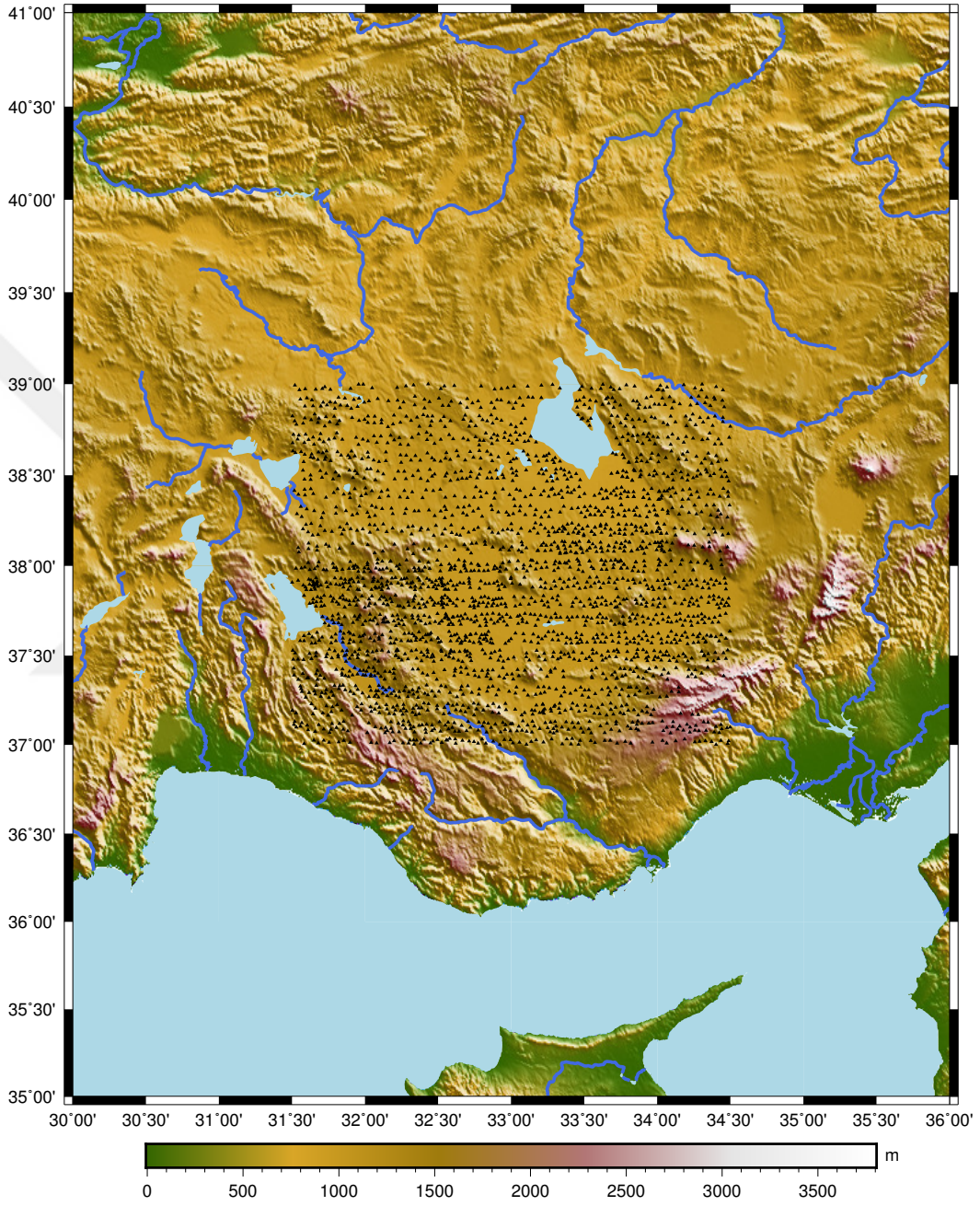
4. SAYISAL UYGULAMA

4.1. Gravite Gözlem İstasyonlarında Topoğrafik Düzeltmeler ve Ortometrik Yüksekliğe Etkisi

Niethammer ortometrik yüksekliklerinde ortalama graviteye dahil edilen topoğrafik düzeltmeler,

Konya kapalı havzasındaki gravite gözlem istasyonları için hesaplanmıştır. İstasyon bilgileri Harita Genel Komutanlığı tarafından üretilmiştir. Ölçü sayısı 2681'dir ve 22 km^2'ye 1 nokta düşecek şekilde dağılmaktadır. Kullanılan veri dosyasında, istasyonların coğrafi koordinatları, yükseklik bilgileri ve gravite değerleri yer almaktadır. Ancak uygulamada istasyonların topoğrafik düzeltme büyüklüklerinin belirlenmesiyle yürütüleceğinden gravite değerleri bu çalışmada kullanılmayacaktır. İstasyonların coğrafi koordinatları WGS84, yükseklikleri ise Türkiye Ulusal Düşey datumundadır. Konya Kapalı Havzası arazi şeklinin hem düzlükleri hem de engebeli alanları içermesi yönünden topoğrafik düzeltmelerin karşılaştırılmasında uygun sonuçlar doğuracağı öngörülmüştür. Nokta dağılımları 31,5-34 boylamları ve 37-39 enlemleri arasındadır. Noktalar tüm araziyi kapsamakta ve homojen dağılmaktadır. İstasyon noktalarının yükseklikleri 450 metre ve 2800 metre arasındadır. Çalışma bölgesi ve istasyon dağılımları Şekil 4.1 ile görselleştirilmiştir. Topoğrafik etkiler hesaplanırken, ASTER, SRTM ve SRTM15-PLUS sayısal yükseklik modelleri ve Hayford-Bowie, Hammer ve Niethammer şablonları kullanılmıştır. Silindir bölme yöntemiyle hesaplanan düzeltme değerileri ve Niethammer yöntemiyle ortalama gravite belirlenmiştir. Yeryüzündeki H yükseklikli P noktasındaki topoğrafik düzeltme değeri belirlenir. Ardından, jeoit ile P noktası arasındaki H/2 yüksekliğinde bulunduğu kabul edilen Q noktasındaki topoğrafik düzeltme kaldırılan topoğrafyanın yerine yerleştirilmiş biçimi için düzeltmeler hesaplanmıştır. Düzeltme değerlerinin, şablonların sayısal yükseklik verilerini yarıçap ve bölümlendirme sayılarına göre kompartmanlara ayırmasıyla, kompartmanların ortalama yükseklikleri elde edilmiştir. Bulunan ortalama yükseklikler ile topoğrafya etkisinin hesaplanacağı

istasyon noktalarının yükseklik farkları hesaplanmıştır. Kompartmanların ortalama yüksekliğindeki silndirik kitlelerin noktaya uyguladıkları çekim yönü ve büyüklüğü, noktaya olan düşey uzaklıklarına ve topoğrafya yoğunluğuna göre değişmektedir.



Şekil 4.1. Konya Kapalı Havzası SRTM3 SYM ile çalışma alanı ve gravite istasyonlarının gösterimi

Sayısal yükseklik verileri her nokta için 167 km radyal açıyı sağlayan bölge olan 30-36 boylamları ve 35-41 enlemleri arasındaki alan için SRTM1 verileri indirilmiştir. Dosyalar, uygulamada kullanılmak üzere grd formatına dönüştürülmüştür. Ardından

$3''$ çözünürlükli grd dosyaları $1''\times1''$ çözünürlüklü grd dosyalarından interpole edilmiştir. Her iki çözünürlükteki grid dosyaları binary formatına getirilmiştir. Grid dosyalarının bileştirilmesinde, interpolasyon ve format dönüşümü işlemlerinde GMT yazlımı kullanılmıştır.

P ve Q noktalarındaki topoğrafik düzeltme değerleri yükseklik modellerinin ve şalonların farklı kombinasyonlarıyla oluşturulmuştur. $1''$ ve $3''$ çözünürlüklerdeki SRTM ve ASTER, $15''$ çözünürlüklü TOPO15 sayısal yükseklik verileri ve tüm şablonlar için uygulanmıştır. Ayrıca grd formatındaki tüm dosyalarında şablonların 5. yarıçapları ve nokta arasındaki tüm kompartmanlarda iç grid ve 5. yarıçaptan daha uzak olanlar dış grid olarak kabul edilmiştir. Böylece noktaya yakın olan ve topoğrafik düzeltmeleri daha büyük değerlerde etkilemesi beklenen yükseklik bilgilerinin sıklığı nokta çevresinde iç gridlerde daha yüksek çözünürlüklü yükseklik modelleri kullnılarak arttırılmıştır. Ayrıca yükseklik veri sayısının az olduğu veya hiç olmadığı kompartmanlar için veri de sağlanmış olur. Dış grid bölgeleri ise noktadan uzaklaşıldığı için topoğrafik düzeltme etkisinin az olduğu bölgelere denk gelir. Bu nedenle düşük çözünürlüklü yükseklik modelleri dış grid olarak kulanılmıştır. İç ve dış gridler oluşturularak yapılan hesaplamaların daha hızlı sonuç verme ve daha az yer kaplama avantajlarına rağmen yeterli doğruluğu sağlayıp sağlamadıklarının araştırılması amaçlanmıştır. $1''$ çözünürlüklü grid dosyalarına göre topoğrafik düzeltmelerin doğruluklarının yeterlilikleri araştırılmıştır. $1''$ iç gridli $3''$ dış gridli, $1''$ iç gridli ve $15''$ dış gridli, $3''$ iç gridli ve $15''$ dış gridli ASTER, SRTM ve TOPO-15 yükseklik modelleriyle topoğrafik düzeltmeler tüm şablonlar için belirlenmiştir.

Konya Kapalı Havzası bölgesi için topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında her nokta için 167 km radyal açıyı sağlayan bölge olan 30°-36° boylamları ve 35°-41° enlemleri arasındaki alan için SRTM1 verileri indirilmiştir. Dosyalar, uygulamada kullanılmak üzere grid formatına dönüştürülmüştür. Ardından $3''$ çözünürlükli grid dosyaları $1''\times1''$ çözünürlüklü grid dosyalarından interpole edilmiştir. Her iki çözünürlükteki grid dosyaları binary formatına getirilmiştir. Grid dosyalarının bileştirilmesinde, interpolasyon ve format dönüşümü işlemlerinde GMT yazlımı kullanılmıştır.

Tüm çözünürlük ve şablon olasılıklarının kullanılmasıyla topoğrafik düzeltmeler yeryüzündeki P noktasında ve yeriçindeki Q noktasında araştırılmıştır. Toplam topoğrafik düzeltmeler ASTER modeli ile Hayford Bowie, Niethammer ve Hammer şablonları için sırasıyla Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te sunulmuştur. SRTM modeli için ise yer içinde ve yeryüzündeki topoğrafik düzeltmelerin toplamı Hayford Bowie, Niethammer ve Hammer şablonları için sırasıyla Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da gösterilmektedir. Ayrıca toplam topoğrafik düzeltmelerin Helmert ortometrik yüksekliklerinde neden olacağı yükseklik düzeltmeleri de belirlenmiştir. topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkileri ASTER sayısal yükseklik modeli için Hayford Bowie, Niethammer ve Hammer şablonları için sırasıyla Tablo 4.7, Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da ve SRTM modeli için ise Tablo 4.10, Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'te gösterilmektedir.

4.2. Nivelman Yollarında Topoğrafik Düzeltmeler ve Ortometrik Yüksekliğe Etkisi

TUDKA, gometrik nivelman ile yükseklikleri belirlenen nivelman röper noktalarında gravite gözlemleri yapılarak jeopotansiyel sayılarla Helmert ortometrik yüksekliklerin belirlenmesiyle oluşturulmuştur. Bu noktalar çoğunlukla karayolları boyunca uzanır. Nirengi noktalarının karayolları üzerinde ulaşılabilir yerlerde bulunması uygulama için oluşturulan test nivelman yollarını karayolların temsil edebileceğinin gösteririr. Bu nedenle nivelman güzergahları için yerine uygulamada karayolu geçkileri kabul edilmiştir.

Uygulama güzergahları Antalya'dan başlayarak karayolları üzerinde oluşan hatlardan seçilmiştir. Böylece nivelman noktalarındaki Helmert ortometrik yükseklikleri ile Niethammer ortometrik yüksekliğinin karşılaştırması amaçlanmıştır.

Karayollarının güzergahları seçilirken topoğrafya düzeltmelerinde denizin, yüksekliğin ve arazi engebelerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca hatlar doğu-batı, kuzey-güney yönlerinde topoğrafik düzeltmeleri de incelemeyi amaçlar. Bu nedenle test güzergahları olarak Antalya-İstanbul, Antalya-Samsun, Antalya-İzmir ve Antalya-İskenderun tercih edilmiştir. Karayollarının konum bilgileri Google Earth üzerinde yaklaşık 2500 metre aralıklarla sayısallaştırılmasıyla enlem ve boylam verileri olarak elde edilmiştir. Hatların yükseklik bilgilerine ise SRTM3 verilerinden ulaşılmıştır.

Tablo 4.1. Hayford-Bowie şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-24,74	79,98	-0,64	0,27	6,43	6,43	90,6 sn
$3''$	-24,35	79,89	-0,67	0,26	6,44	6,44	10,1 sn
$15''$	-18,19	89,21	-0,73	0,64	7,12	7,12	0,6 sn
$1''$-$3''$	-24,74	79,98	-0,64	0,27	6,43	6,43	11,23 sn
$1''$-$15''$	-24,89	79,76	-0,75	0,16	6,42	6,42	1,6 sn
$3''$-$15''$	-26,34	79,90	-0,81	0,06	6,39	6,39	0,5 sn

Tablo 4.2. Niethammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-26,54	75,03	-0,44	0,26	6,10	6,09	6,8 sn
$3''$	-26,32	74,42	-0,48	0,22	6,10	6,10	0,8 sn
$15''$	-19,03	83,93	-0,58	0,60	6,76	6,73	0,1 sn
$1''$-$3''$	-26,51	75,04	-0,44	0,26	6,09	6,09	1,9 sn
$1''$-$15''$	-26,37	74,81	-0,78	-0,02	6,09	6,09	1,2 sn
$3''$-$15''$	-27,36	73,91	-0,87	-0,17	6,05	6,09	0,2 sn

Tablo 4.3. Hammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-26,04	79,18	-0,78	0,05	6,35	6,35	92,4 sn
$3''$	-25,80	79,11	-0,79	0,04	6,36	6,37	10,3 sn
$15''$	-19,70	87,77	-1,15	0,09	6,97	6,97	0,5 sn
$1''$-$3''$	-26,03	79,14	-0,78	0,05	6,35	6,35	0,5 sn
$1''$-$15''$	-26,31	78,73	-1,03	-0,18	6,35	6,34	1,6 sn
$3''$-$15''$	-26,47	78,43	-1,05	-0,21	6,33	6,33	0,6 sn

Tablo 4.4. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-24,67	80,32	-0,71	0,13	6,39	6,39	89,3 s
$3''$	-24,61	80,19	-0,71	0,13	6,40	6,40	10,0 s
$15''$	-18,85	89,75	-0,62	0,75	7,19	7,15	0,6 s
$1''$-$3''$	-24,67	80,31	-0,71	0,13	6,39	6,39	11,2 s
$1''$-$15''$	-24,81	80,34	-0,71	0,12	6,39	6,39	1,5 s
$3''$-$15''$	-25,79	80,46	-0,74	0,06	6,35	6,40	0,5 s

Tablo 4.5. Niethammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-26,25	75,34	-0,52	0,10	6,06	6,06	6,7 s
$3''$	-26,42	74,69	-0,55	0,08	6,06	6,06	2,1 s
$15''$	-19,65	84,46	-0,45	0,70	6,80	6,76	0,1 s
$1''$-$3''$	-26,22	75,36	-0,52	0,10	6,06	6,06	1,9 s
$1''$-$15''$	-25,94	75,49	-0,51	0,13	6,06	6,06	1,2 s
$3''$-$15''$	-26,84	74,51	-0,55	0,02	6,01	6,01	0,2 s

Tablo 4.6. Hammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmeler (mGal)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma	İşlem Hızı
$1''$	-25,77	79,41	-0,76	-0,01	6,31	6,31	93,8 s
$3''$	-25,75	79,32	-0,76	-0,01	6,32	6,32	10,3 s
$15''$	-20,32	88,31	-0,74	0,37	6,96	6,95	0,5 s
$1''$-$3''$	-25,76	79,38	-0,76	-0,01	6,31	6,31	11,4 s
$1''$-$15''$	-25,93	79,37	-0,76	-0,01	6,30	6,30	1,5 s
$3''$-$15''$	-26,17	79,03	-0,76	-0,03	6,29	6,29	0,5 s

Tablo 4.7. Hayford-Bowie şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-41,71	216,93	-0,65	1,14	12,29	12,24
$3''$	-41,05	216,67	-0,68	1,13	12,30	12,25
$15''$	-30,68	241,94	-0,76	1,73	13,66	13,55
$1''$-$3''$	-41,71	216,90	-0,65	1,14	12,29	12,24
$1''$-$15''$	-41,97	216,31	-0,77	1,01	12,24	12,20
$3''$-$15''$	-44,41	216,68	-0,83	0,88	12,16	12,13

Tablo 4.8. Niethammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-44,75	203,49	-0,45	0,99	11,48	11,44
$3''$	-44,37	201,82	-0,49	0,94	11,48	11,44
$15''$	-32,09	227,63	-0,59	1,54	12,76	12,67
$1''$-$3''$	-44,70	203,52	-0,45	0,99	11,48	11,44
$1''$-$15''$	-44,45	202,89	-0,81	0,68	11,43	11,41
$3''$-$15''$	-46,13	200,43	-0,89	0,48	11,31	11,30

Tablo 4.9. Hammer şablonu ve ASTER SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-43,90	214,73	-0,79	0,85	12,11	12,08
$3''$	-43,50	214,56	-0,80	0,85	12,13	12,10
$15''$	-33,22	238,03	-1,19	1,03	13,25	13,21
$1''$-$3''$	-43,88	214,63	-0,79	0,85	12,11	12,08
$1''$-$15''$	-44,36	213,52	-1,05	0,59	12,04	12,03
$3''$-$15''$	-44,64	212,69	-1,07	0,55	12,00	11,99

Tablo 4.10. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

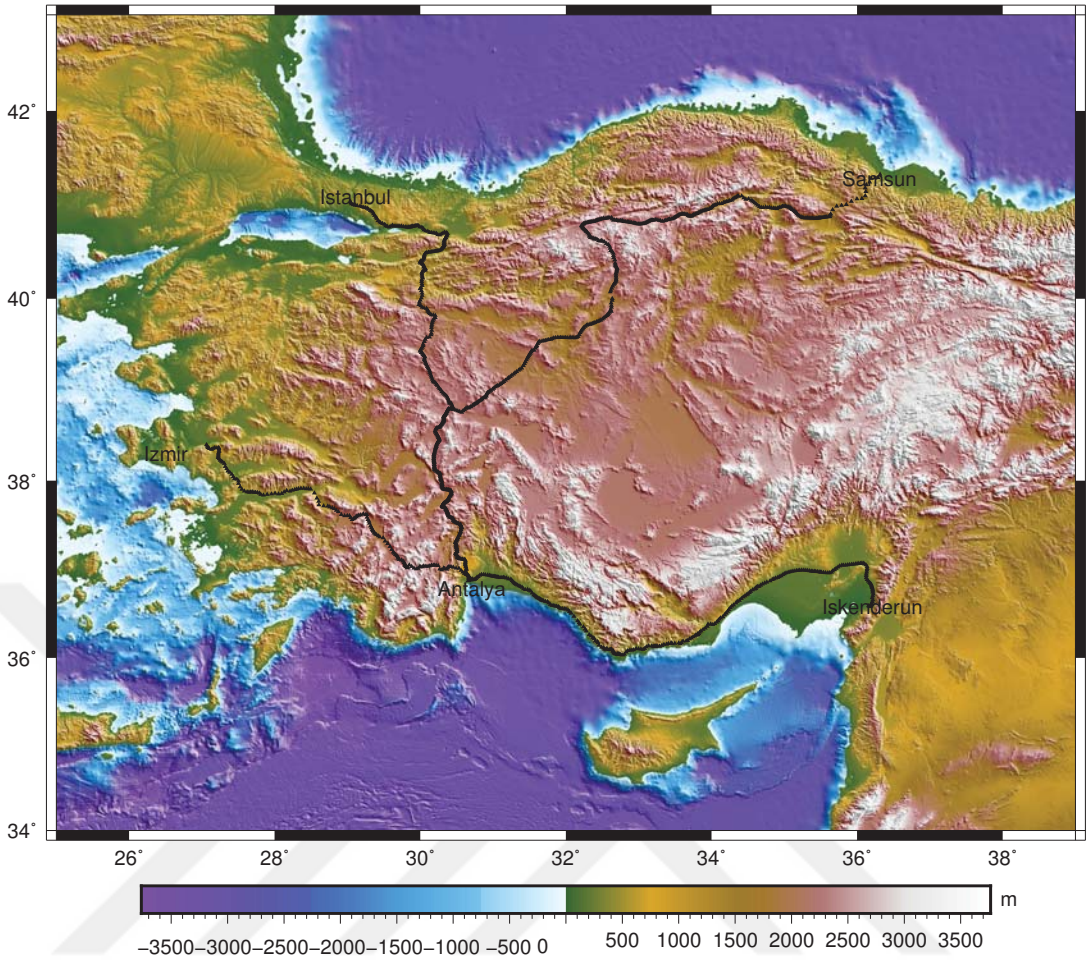
Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-42,04	218,00	-0,74	0,98	12,21	12,18
$3''$	-41,93	217,62	-0,75	0,97	12,22	12,19
$15''$	-32,12	243,58	-0,64	1,85	13,68	13,56
$1''$-$3''$	-42,03	217,97	-0,74	0,98	12,21	12,18
$1''$-$15''$	-42,28	218,05	-0,74	0,96	12,19	12,15
$3''$-$15''$	-43,95	218,37	-0,77	0,88	12,12	12,09

Tablo 4.11. Niethammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-44,73	204,48	-0,54	0,81	11,41	11,38
$3''$	-45,02	202,70	-0,56	0,78	11,40	11,37
$15''$	-33,48	229,23	-0,46	1,67	12,79	12,68
$1''$-$3''$	-44,68	204,53	-0,54	0,81	11,41	11,38
$1''$-$15''$	-44,20	204,88	-0,54	0,84	11,40	11,37
$3''$-$15''$	-45,73	202,21	-0,58	0,70	11,29	11,27

Tablo 4.12. Hammer şablonu ve SRTM SYM ile toplam topoğrafik düzeltmelerin yükseklik etkisi (mm)

Çözünürlük	Min.	Maks.	Medyan	Ortalama	RMS	Std. Sapma
$1''$	-43,90	215,53	-0,78	0,78	12,03	12,00
$3''$	-43,87	215,26	-0,79	0,78	12,04	12,02
$15''$	-34,62	239,66	-0,76	1,33	13,26	13,19
$1''$-$3''$	-43,89	215,44	-0,78	0,78	12,03	12,00
$1''$-$15''$	-44,18	215,40	-0,78	0,77	12,00	11,98
$3''$-$15''$	-44,59	214,49	-0,78	0,77	11,97	11,94



Şekil 4.2. Çalışma bölgesi ve nivelman yolları

Tablo 4.13. Nivelman hatlarlarının uzunluğu ve istasyon sayıları

Güzergah	Nivelman Yolu Uz. (km)	İstasyon Sayisi	İstasyon Yükseklikleri Aralığı (m)
Antalya-Samsun	1034	519	-8-1553
Antalya-İstanbul	673	340	7-1319
Antalya-İzmir	440	159	12-1560
Antalya-İskenderun	637	275	0-460

Nivelman yollarındaki topoğrafik düzeltmeler için ise kapsayıcı bölge olan 25°-39° boylamları ve 34°-43° enlemleri aralığının tümünü içine alan SRTM3 dosyaları kullanılmıştır. Bu çalışma için $3'' \times 3''$ çözünürlüğü yeterli görülmüştür. Tüm hgt uzantılı dosyalarda Nan değerleri yok edilmiş ve grid formatına getirildikten sonra tüm grid dosyaları birletirilerek tek bir grid dosyası oluşturulmuştur. Bu dosya binary formatına dönüştürülerek uygulamaya hazır hale getirilmiştir. Antalya-İstanbul, Antalya-Samsun, Antalya-İzmir ve Antalya-İskenderun nivelman hatlarındaki topoğrafik düzeltmeler $3''$ çözünürlüklü SRTM yükseklik verisiyle Hayford Bowie şablonuna göre hesaplanmıştır. Konya Kapalı Havzasındaki örnekte

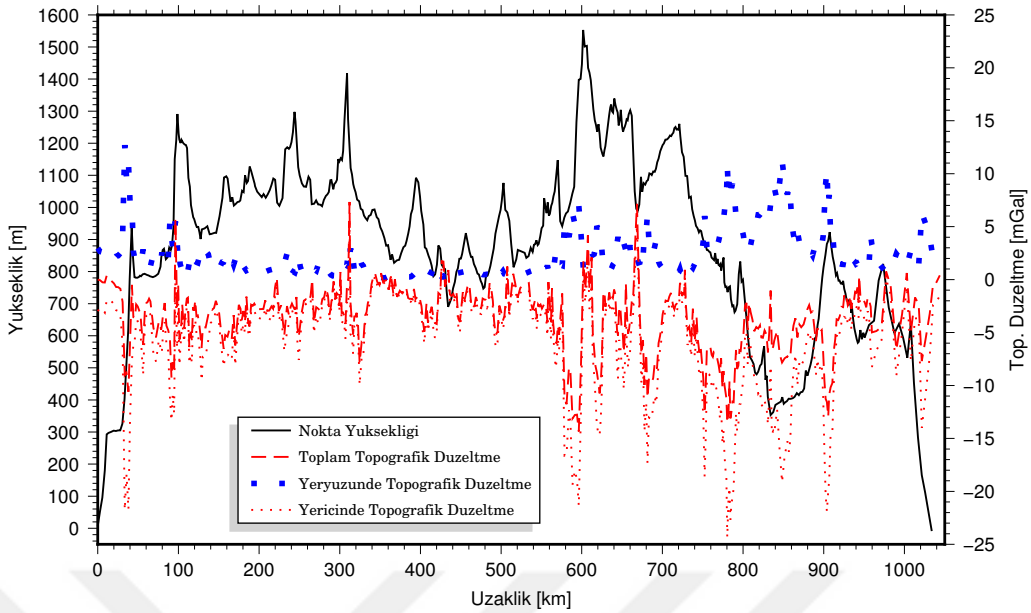
$3''$ çözünürlüklü yükseklik modelinin yeterli doğrulukta sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle Nivelman yolarındaki hesaplamalar içinde $3''$ çözünürlüklü yükseklik modeli yeterli görül/müştür. Ayrıca hem KKH örneğinde Hayford-Bowie şablonundaki topoğrafik düzeltmelerin daha fazla topoğrafik düzeltme içerebilmesinin kanıtlanması hem de kompartman sayısındaki fazlalığın bilinmesi nedeniyle Hayford-Bowie şablonu bu uygulama için kulanılmıştır.

Helmert yükseklikllerinin topoğrafik düzeltmeleri içermemesi nedeniyle nivelman röper noktalarındaki yükseklik sapmalarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

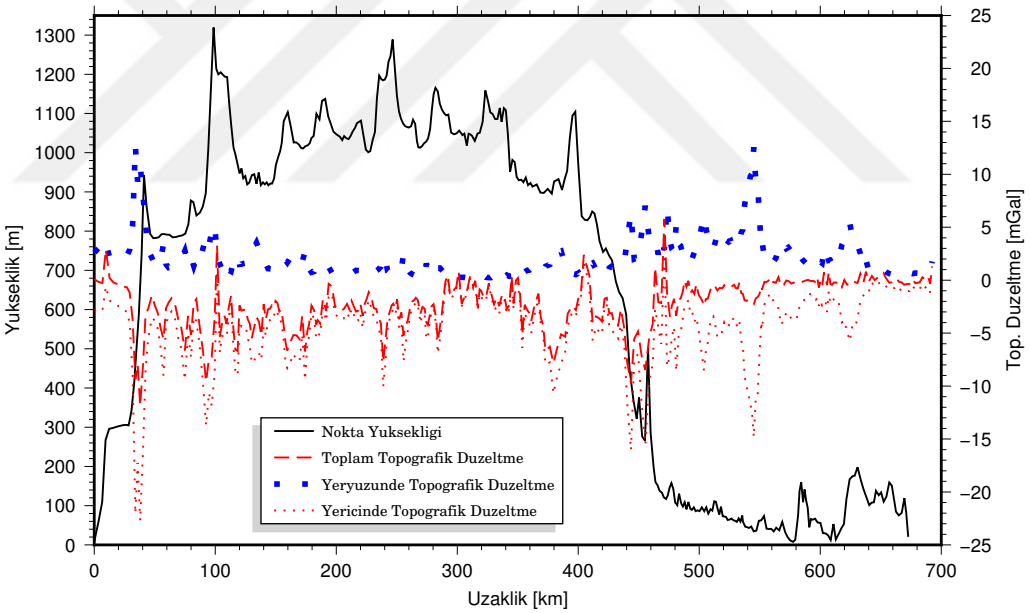
Nivelman hatlarının denize yakın olmaları nedeniyle topoğrafik düzeltmelerdeki deniz etkisi de hesaplamalara dahil edilmiştir. Su kitlelerinin yarattığı çekim etkisi yeryüzündeki istasyon noktasında ve onun yeriçinde jeoitle arasındaki ortalama yükseklik olan Q noktasında belirlenmiştir. Bu etki düzeltme değeri olarak topoğrafik düzeltme hesaplamalarına dahil edilmiştir. Dahil edilmediği durumda su kitleleri yerine 2,67 gr/cm^3 yoğunluklu topoğrafya kabul edileceği için, su kitlelerinin 1,03 gr/cm^3 yoğunluğunun 2,67 gr/cm^3 yoğunluğundan çıkarılması gerekir. Böylece su kitlelerinin topoğrafik etkileri $1,64$ gr/cm^3 yoğunluk değeriyle bulunur.

Nivelman yollarındaki topoğrafik düzeltmeler için ise kapsayıcı bölge olan 25-39 boylamları ve 34-43 enlemleri aralığının tümünü içine alan SRTM3 dosyaları internet kaynaklı olarak elde edilmiştir. Bu çalışma için $3'' \times 3''$ çözünürlüğü yeterli görülmüştür. Tüm hgt uzantılı dosyalarda grid formatına getirildikten sonra tüm grid dosyaları birleştirilerek tek bir grid dosyası oluşturulmuştur. Bu dosya binary formatında kullanıma hazır hale getirilmiştir.

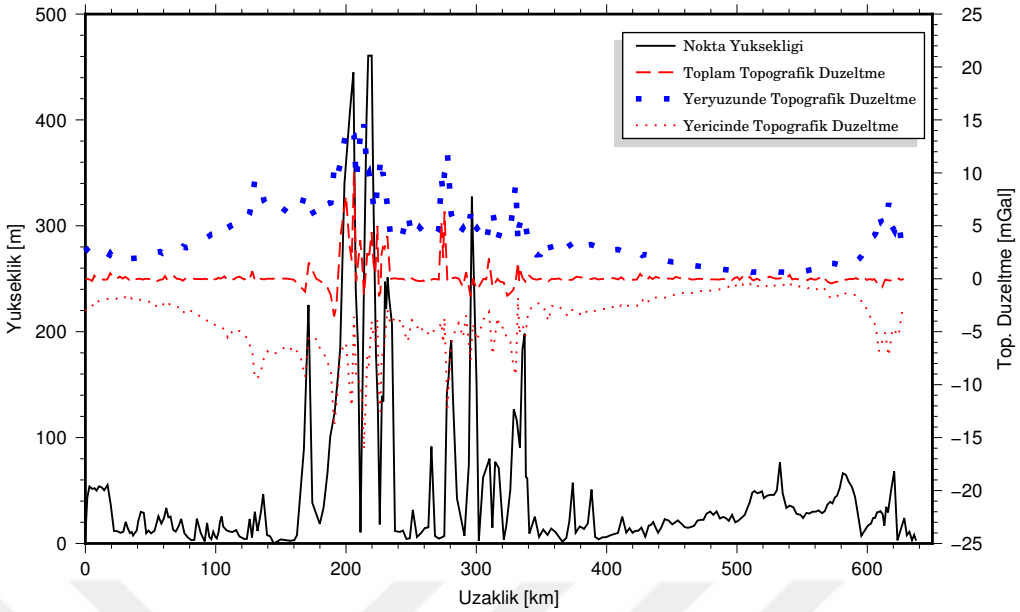
Nivelman yoları için hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin değerleri ve noktanın çevresinin yüksekliğine göre değişimlerini görebilmek için grafikler oluşturulmuştur. Antalya-Samsun, Antalya-İstanbul, Antalya-İskenderun ve Antalya-İzmir geçkilerinin boykesitleri boyunca yer içindeki, yeryüzündeki ve toplam topoğrafik düzeltmeler sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur. Grafiklerden görüleceği gibi topoğrafik düzeltmeler yüksek değişimiyle çoğunlukla paralel ilerlemiştir.



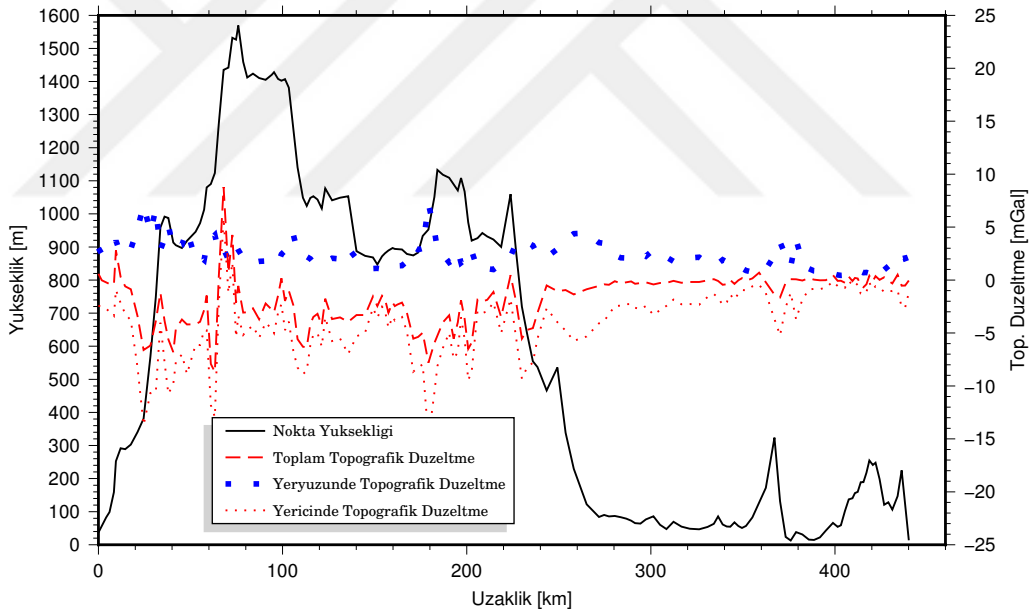
Şekil 4.3. Antalya-Samsun nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler



Şekil 4.4. Antalya-İstanbul nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler



Şekil 4.5. Antalya-İskenderun nivelman hattında yükseklik ve topoğrafik düzeltmeler



Şekil 4.6. Antalya-İzmir nivelman hattında yükseklikler ve topoğrafik düzeltmeler

4.3. Tartışma

Helmert ortometrik yükseklikleri, topoğrafyanın plaka şeklinde kabul edilmesinden kaynaklı hatalarla yüklüdürler. Niethammer ortometrik yükseklikleri hesaplanırken topoğrafyanın düzensizliklerini de içermesi yönüyle Helmert ortometrik yüksekliklerinden ayrılmaktadır. Topoğrafik düzeltmelerin ortometrik yükseklikleri ne kadar değiştirdiği gravite gözlem istasyonları ve GPS/Nivelman istasyonlarında incelenmiştir.

Helmert ortometrik yüksekliklerindeki topoğrafya düzeltmelerinin ihmal edilmesinden kaynaklı hatalar belirlenirken çalışmada silindir bölme yöntemi kullanılmıştır. Silindir bölme yöntemi için birçok şablon geliştirilmiştir. Şablonların halka, kompartman sayıları ve yarıçaplarındaki farklılıklar silindir dilimlerinin arazi temsil etme biçimlerini değiştirmektedir. Bu da noktayı etkiyen topoğrafik çekim etkilerinin kullanılan şablon yardımıyla ne kadar doğrulukta hesaplandığını düşündürür. Ayrıca bilgisayarlı hesaplama tekniklerinde işlem hızı şablonun kapladığı alana ve bölümlendirme sayısına göre değişecektir.

Çalışmada Niethammer, Hammer ve Hayford-Bowie şablonları araziyi temsil etme ve işlem hızı yönünden karşılaştırılmıştır. Farklı şablonların kullanılmasıyla oluşan topoğrafik düzeltmelerde, Hammer ve Bowie şablonlarının daha geniş alanları kapsamaları nedeniyle beklenildiği gibi Niethammer şablonundan büyük değerlerde topoğrafik etki hesaplamaktadırlar. Hayford-Bowie şablonu daha fazla kompartmandan oluşması ve daha geniş alanları kapsaması yönünden topoğrafik düzeltmeleri en fazla içermektedir ve daha büyük değerlerde hesaplamaktadır. Halka ve kompartman sayısının az olması ise Niethammer şablonuyla yapılacak hesaplamaların hızlılık nedenidir.

Ayrıca topoğrafyanın yükseklik bilgisi elde edilirken kullanılan sayısal yükseklik modelinin veri sıklığı ve modelin doğruluğu da topoğrafik düzeltme miktarlarını etkilemektedir. Yüksek çözünürlüklü modeller arazinin şeklini gerçeğe yakın ifade ederek topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında daha fazla gerçeğe yakın sonuçlar vereceklerdir.

Ancak veri miktarında fazlalık hem depolama hem de verilerin işlenmesi nedeniyle zaman bakımından dezavantajlar doğuracaktır. Bu nedenle topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında yeterli arazi çözünürlükleri, $1''$ çözünürlüklü modellerle karşılaştırılarak gravite gözlem istasyonlarında araştırılmıştır. $1''$ iç grid $3''$ dış grid çözünürlüklü model $1''$ çözünürlüklü modelle alınan sonuçlarla neredeyse birebir aynıdır. $3''$ ve $1''$ iç gridli ve $15''$ dış gridli modeller de sonuç değerlere yakındır. Ancak $15''$ çözünürlüklü yükseklik modelleriyle yapılan hesaplamalar $1''$ çözünürlüklü topoğrafik düzeltme hesaplamalarından uzak değerler vermektedir.

Ortometrik yükseklikler için referans olan, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA-99) 29316 km uzunluğunda, 243 geçki ve 25680 noktadan oluşan ağın dengelenmesiyle oluşturulmuştur. Düşey kontrol ağı noktalarındaki ortometrik yükseklikler geometrik nivelman ve gravite gözlemleri ile Helmert ortometrik yükseklikleri olarak belirlenmiştir. Düşey datum için anlık deniz seviyesi ölçmeleriyle ortalama deniz seviyesi belirlenmiş olan Antalya mareograf istasyonu kullanılmıştır. Ağın noktaları karayolları boyunca yaklaşık 2 km aralıklı olarak oluşturulmuştur. Antalya mareograf istasyonu düşey datum olarak kullanılmıştır. Düşey datum noktalarında Helmert ortometrik yükseklikleri kullanılarak topoğrafik düzetmeler ihmal edilmiştir. Ancak, günümüzde gelişen hesaplamalı bilimler, bilgisayarla hesaplama teknikleri ve uydu teknolojileri topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle ülke düşey kontrol ağları tekrar düzenlenmektedir (Tenzer ve Vaníček, 2003); (Odera ve Fukuda, 2015).

Düşey kontrol ağları yeniden yapılandırılırken, topoğrafya yoğunluğu, jeoitten kaynaklı gravite değişimleri ve arazi engebeleri dikkate alınmaktadır. Arazi yüksekliklerinin uydu teknikleriyle geliştirilen SYM'ler sayesinde elde edilişi kolay olmaktadır. Ancak topoğrafyanın yoğunluk modellerinin üretilmesi için yoğun iş yükü gerekmektedir. Örneğin, Kanada'da GPS/Nivelman noktalarında topoğrafya yoğunluk değişiminin ortometrik yükseklikte neden olacağı düzelme büyüklükleri, -1,9 cm ve +3,4 cm arasında görülmektedir. Ancak, 2000 m yüksekliğinde ise 6 cm'e kadar değişim gözlenebilmektedir. GPS/Nivelman noktalarına getirilen bu düzeltmelerin yalnızca bir kaç cm olmasının nedeni, noktaların yüksekliklerinin 2000 m'den düşük olmasıdır (Tenzer ve Vaníček, 2003). Türkiye'de düşey

kontrol ağlarının karayolları boyunca devam etmesi nedeniyle çoğunlukla 2000 m'yi geçen yüksekliklerde olmaması yoğunluk etkileri yönünden avantaj sayılabilmekle birlikte yüksek doğruluklu kontrol noktaları için topoğrafik yoğunluk modelleri kullanılmalıdır.

Bunun yanı sıra, topoğrafya düzensizliklerinin topoğrafik düzeltmelerdeki etkileri önemli büyüklüklerdedir. Ortalama gravite değerinde topoğrafik düzeltmelerinin etkileri nivelman noktalarında ve gravite gözlem istasyonlarındaki çalışmada incelenmiştir. Antalya-Samsun nivelman hattındaki istasyonlarda 1,5 cm'ye varan ortometrik yükseklik düzeltmeleri bulunmuştur. Uygulamada kullanılan nivelman hatlarının en fazla 1500 m yükseklikteki noktaları içermesi düzeltme değerlerinin de küçük çıkmasında etkili olmaktadır. En düşük yükseklik düzeltmeleri ise bölgenin bir tarafının deniz olması nedeniyle engebelerin az olması ve düşük yüksekli noktalardan oluşması nedeniyle Antalya-İskenderun hattındadır. Ayrıca karayolları Türkiye coğrafyasına göre nispeten daha az engebeli alanlardan geçmektedir ve topoğrafik düzeltmelerin küçük değerlerde olmasına neden olabilmektedir. Ancak daha yüksek ve engebeli hatlarda 1,5 cm'lik düzeltmenin artması beklenmektedir. Bu durumda birçok mühendislik projelerinde ve haritalama çalışmalarında kullanılan TUDKA'nın topoğrafik düzeltmeleri içermemesi önemli yanlışlıklara neden olabilir.

Düşey kontrol ağı noktalarında, geometrik nivelman ile belirlenen yükseklik farkları ve gravite gözlemlerinin kullanılmasıyla jeopotansiyel sayılarla ortometrik yükseklikler elde edilebilmektedir. Ancak, zahmetli ve çok zaman alan geometrik nivelman yerine GPS ölçmeleriyle gerçekleştirilen GPS/Nivelmanı düşey kontrol ağı noktalarının yüksekliklerinin belirlenmesinde hızlı ve pratik bir yoldur. GPS ölçmelerinde referans yüzeyinin elipsoit olması, ortometrik yüksekliklere geçişte, jeoit yüksekliğinin belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. GPS ölçüleriyle elde edilen elipsoit yüksekliklerinin ortometrik yüksekliklere dönüştürülebilmesi için yeterli doğruluğa sahip jeoit modeller gerekmektedir. Helmert ortometrik yüksekliklerine dönüşüm için Türkiye Jeoidi-1999A (TG99A) veya yerel GPS/Nivelman jeoidinin kullanılması Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğinde (BÖHÜY) önerilmektedir. TG99A jeoidi, Türkiye Gravimetrik Jeoidi (TG-91), Türkiye GPS/Nivelman jeoidinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Ortometrik

yükseklikler jeoitler ve elipsoidal yükseklikler yardımıyla belirlenirken, TG99A jeoidinin doğrudan kullanılması, TG99A jeoidinin yerel GPS/Nivelman ölçüleriyle güncelleştirerek veya yerel GPS/Nivelman jeoid modelinin oluşturulması yöntemleri kullanılabilir.

Ortometrik yüksekliklerin belirlenmesinde kullanılan GPS/Nivelman jeoitleri, ortometrik yükseklikleri bilinen noktaların yardımıyla oluşturulmaktadır. GPS ölçmeleriyle belirlenen elipsoidal yükseklikler ve jeopotansiyel sayılarla üretilen ortometrik yüksekliklerin farkıyla jeoit yükseklikleri belirlenebilir. Hesaplanan jeoit yükseklikleri, bir geometrik jeoit olan GPS/Nivelman jeoidini sağlarken, elipsoidal ve ortometrik yüksekliklerindeki hataları da barındırır. Ortometrik yüksekliklerde ortalama gravitede yapılan varsayımlardan kaynaklı hataların etkisi GPS/Nivelman jeoidinde de görülmüş olur. Bu nedenle ortometrik yüksekliklerin yüksek doğruluklu belirlenmesi hem jeoit modeller hem de bu modellerle belirlenen ortometrik yükseklikler açısından önemlidir.

Bir diğer jeoit türü olan gravimetrik jeoitler oluşturulurken ise topoğrafik yoğunluk bilgisi, topoğrafyanın düzensizliğinin belirlenmesi ve gravite gözlemleri gereklidir. Yükseltinin fazla olduğu bölgelerde gravimetrik jeoitler oluşturulurken ortalama gravite belirlenmesi ve tam Bouguer anomalilerinin kullanılması önemlidir (Abbak ve diğ., 2012). Topoğrafik düzeltmelerin gerekliliği yönüyle ortometrik yüksekliklerin jeopotansiyel sayılarla belirlenmesindeki gerekliliklere benzerdir. Bu nedenle topoğrafyayla ilgili benzer hatalardan etkilenirler. Topoğrafyanın kabul edilen şekli, ortometrik yüksekliklerin belirlenmesinde önemli olduğu gibi, gravimetrik jeoitlerin belirlenmesinde de önemlidir.

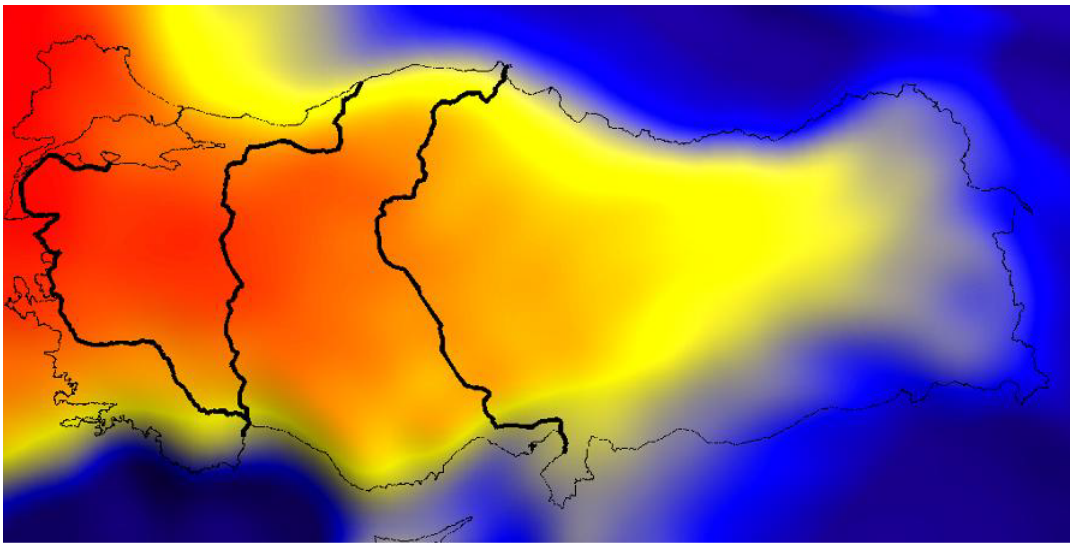
Çalışma kapsamında yapılan uygulamalarda gravite gözlem istasyonlarında hesaplanmış ve ortometrik yüksekliklere etkileri araştırılmıştır. Hesaplanan topoğrafik düzeltmeler, başka çalışmalarda ortometrik yüksekliklerin yanı sıra gravimetrik jeoidin belirlenmesinde de kullanılabilir. Ayrıca gravimetrik jeoitlerin kontrolü ve düşey datum sistemine uyumu araştırılırken de GPS/Nivelman jeoitleri kullanılmaktadır (Üstün ve diğ., 2002). GPS/Nivelman jeoitleri ortometrik yükseklikler yardımıyla

oluşturulduğu için jeoit modelleri birbirlerine göre karşılaştırılıp değerlendirilirken ortometrik yüksekliklerdeki hatalarla tekrar karşılaşılmasına neden olur.

Dolayısıyla, ortometrik yükseklikler jeoit modeller üzerinde etkili olmakta ve aynı zamanda ortometrik yükseklikler de jeoit modeller ile belirlenebilmektedir. Bu da hem ortometrik yüksekliklerdeki hem de jeoit modellerindeki doğruluğun sağlanmasında topoğrafik düzeltmeleri önemli kılmaktadır.

TUDKA'nın ihtiyaçlara cevap verememesi ve gravite verilerinin yetersizliği nedeniyle yerbilimleri alanlarının problemlerine çözüm geliştirilmesi amacıyla gravite altyapısının ve yükseklik sisteminin geliştirilmesini amaçlayan proje 2015 yılında oluşturulmuştur. Proje Harita Genel Komutanlığı'nın yürütücülüğünde, MTA, TUBİTAK MAM, TUBİTAK UME ve TPAO işbirliğiyle gerçekleştirilmektedir. Üretilecek hassas jeoit modeliyle, geometrik nivelmanın yerine, GNSS, LİDAR ve radar altimetresi yöntemlerinin yükseklik bilgisi üretiminde yüksek doğrulukla kullanılabilirliğini sağlamak hedeflenmektedir. Bunun için Şekil 4.7'de gösterilen 2800 m uzunluğundaki nivelman hatlarında 1 km ara ve 5 km ana GNSS/Nivelman istasyonlarında ölçmeler gerçekleştirilmektedir (Simav ve diğ., 2015).

Yükseklik sisteminin modernizasyonu çalışmasında elde edilen verilerin ışığında nivelman istasyonlarında belirlenecek olan ortometrik yüksekliklerin ve jeoit yüksekliklerinin topoğrafik düzeltmeleri içermesi durumunda yüksekliklere etkisinin hangi büyüklüklerde olacağı bir başka çalışmada incelenebilir.



Şekil 4.7. Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi nivelman güzergahı (Simav ve diğ., 2015)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Konya Kapalı Havzasındaki gravite ölçme istasyonları için topoğrafik düzeltmelerin ortometik yüksekliklere etkileri belirlenmiştir. Minimum -24 mGal, maksimum 79,98 mGal topoğrafik düzeltmeler, ortalama 0,27 mGal değerinde ve 6,43 mGal standart sapmalıdır. Topoğrafik düzeltmelerinin %95'i 12 mGal değerinin altındadır. Uygulama istasyonlarında Helmert ortometrik yükseklikleri yerine topoğrafik düzensizlikleri içeren Niethammer ortometrik yüksekliklerinin kullanılmış olması durumunda ortalama yükseklik etkisi 1 mm civarında 12 mm standart sapmalıdır. Yükseklik etkisinin büyüklüklerinin %95'i 25 mm'nin altındadır. Engebenin ani olarak değiştiği yüksek istasyonlarda yükseklik düzeltmeleri ortalama değerden uzaklaşmakta ve 20 cm'lere kadar varmaktadır. Bu sonuçlar ortometik yüksekliklerin kullanım alanlarında ve jeoit modellerinde önemli hatalara neden olabilecek büyüklüklerdir.

Kullanılan şablonların etkileri de daha fazla kompartman sayısı ve halkalar içermesi nedeniyle topoğrafik düzeltmelerin daha büyük çıkacağı Hayford-Bowie şablonuna göre yorumlanmaktadır. Niethammer şablonu bazı istasyonlarda Hayford-Bowie şablonundan en fazla 5 mGal daha küçük topoğrafik düzeltme sonuçları vermiştir ve ortometrik yükseklikler 10 mm'ye kadar varan değerlerde daha küçük bulunmuştur. İstasyon çevresinde 167 km^2'ye kadar olan alanı kapsamaması ve 42 km ile sınırlandırması topoğrafik düzeltmelerin küçük değerlerde çıkmasının yanı sıra hesaplama süresini de kısaltan bir etken olduğu görülmektedir. Ayrıca halka ve kompartman sayısının az olması da Niethammer şablonuyla yapılacak hesaplamaların hızlılık nedenidir. Uygulamada $1''$ çözünürlüklü SYM verileriyle topoğrafik etkiler belirlenirken bir istasyonda geçen hesaplama süresi Bowie ve Hammer şablonlarıyla 1,5 dakika iken bu süre Niethammer şablonuyla 6 saniyedir.

Topoğrafik düzeltmeler hesaplanırken nokta çevresindeki topoğrafyanın yükseklikleri SYM yardımıyla belirlenirken arazi yükseklik verilerinin ne sıklıkta olduğu önemlidir. Farklı çözünürlüklerde arazi yükseklik verisi uygulanmıştır. Günümüzde ücretsiz

ulaşılabilen $1''$ çözünürlüklü yükseklik modellerinden olan SRTM ve ASTER modelleri çalışmada kullanılan $3''$ ve $15''$ çözünürlüklü modellere göre daha yüksek çözünürlüklüdür ve araziyi daha doğru yansıtmaktadır. Bu nedenle topoğrafik düzeltmelerde farklı çözünürlüklü yükseklik modellerinin kullanılmasının etkileri $1''$ çözünürlükten elde edilen sonuçlardan sapmalara göre karşılaştırılmıştır. Yükseklik modelinin iç ve dış gridler olarak $1''$, $3''$ ve $15''$ çözünürlüklü modeller $1''$ çözünürlüklü modelle alınan sonuçlarla karşılaştırıldığında, iç ve dış çözünürlüğü aynı ve $15''$ çözünürlüklü SYM modelinin yaklaşık 10 mGal topoğrafik düzeltme ve 20 cm civarında yükseklik değişiminde sapmalara neden olduğu tespit edilmiştir. $1''$ iç gridli ve $3''$ dış gridli yükseklik modellerinin $1''$ lik modelle neredeyse aynı sonuçları verdiği ve işlem hızının da önemli derecede arttığı görülmüştür. $1''$ çözünürlüklü modele göre, $3''$ çözünürlüklü model ve $1''$ iç gridli ve $15''$ dış gridli model en fazla yaklaşık 1 mGal, $3''$ iç gridli $15''$ dış gridli model ise yaklaşık 2 mGal farklı topoğrafik düzeltme sonuçları vermektedirler. Bu sonuçlar küçük büyüklüklerdir ve $3''$ çözünürlük ve $1''$ iç gridli ve $15''$ dış gridli çözünürlükteki modellerde yaklaşık 1 mm ve $3''$ iç gridli $15''$ dış gridli modelle ise yaklaşık 2 mm sapmalar gözlenmektedir.

Çalışmada SYM çözünürlüğünün $15''$ olması durumunda topoğrafik düzeltme miktarları ve yükseklik etkisi $1''$ çözünürlüklü modellerdeki değerlerden yüksek miktarda sapmaktadır. Bu nedenle topoğrafik düzeltmeler hesaplanırken tüm grid çözünürlüğünün $15''$ ve üzerinde olduğu modellerin tercihi büyük hatalara neden olabilir. İşlem hızı ve yüksek doğruluk yönünden $1''$ iç gridli ve $3''$ dış gridli, $3''$ iç gridli $15''$ dış gridli veya tüm grid çözünürlüğünün $3''$ olduğu modellerin yeterli olduğu görülmektedir.

Sayısal yükseklik modellerinin elde ediliş ve oluşturulma biçimine göre SRTM ve ASTER modellerinin topoğrafik düzeltmelere ve dolayısıyla ortometrik yüksekliklere etkileri belirlenmiştir. $1''$ lik SRTM ve ASTER modelleri üzerinden karşılaştırma yapılacak olursa 4 mGal' e varan topoğrafik düzeltmeler ve en fazla 2 mm, ortalama 0,2 mm ortometrik yükselikleri değişmektedir. Bu sonuçlar her iki SYM'nin topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında yaklaşık aynı sonuçları verdiğini göstermektedir.

GPS/Nivelman istasyonlarındaki Helmert ortometrik yükseklikleri ve Niethammer ortometrik yükseklikleri arasındaki farklar KKH bölgesindeki uygulamadan yola çıkarak $3''$ çözünürlüklü SYM yardımıyla gerçekleştirilmesi yeterli görülmüştür. Bu amaçla $3''$ çözünürlüklü SRTM verisi kullanılmıştır. Ayrıca nivelman yollarının denize yakın bölgelerde bulunmaları nedeniyle deniz etkisinin de topoğrafik düzeltmelere dahil edilmesi amacıyla TOPO-15 yükseklik verisi batimetre verileri olarak kullanılmıştır. En yüksek topoğrafik düzeltme değerleri Antalya-Samsun hattında görülmüştür. Bu nivelman hattında topoğrafik düzeltmelerden kaynaklı 1,5 cm büyüklüğüne kadar varan ortometrik yükseklik düzeltmeleri mevcuttur. TUDKA, Helmert ortometrik yüksekliğine göre oluşturulurken bu düzeltmelerin yok sayılması, düşey datum noktalarının topoğrafyadan kaynaklı hatalar içerdiğini ortaya koymaktadır.

Gravite ölçme istasyonlarındaki topoğrafik düzeltme miktarları ve ortometrik yüksekliklre olan etkileri değerlendirilirken 20 cm'ye varan yükseklik düzeltmeleri ve 80 mGal'e varan topoğrafik düzeltmeler elde edilmiştir. Yalnızca ortometrik yüksekliklerde değil GPS nivelman jeoitlerinde ve gravimetrik jeoitlerde önemli olan bu düzeltmelerin, ortometrik yüksekliklerin hesaplanmasında ihmal edilmemesi gerekmektedir. Ayrıca, düşey kontrol ağlarının da yeterli doğruluğa ulaştırılabilmesi için topoğrafik düzeltmeler ortometrik yükseklik hesaplamalarına dahil edilmelidir.

KAYNAKLAR

Abbak R. A. A., Sjöberg L. E., Ellmann A., Üstün A., A Precise Gravimetric Geoid Model in A Mountainous Area with Scarce Gravity Data: A Case Study in Central Turkey, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2012, **56**(909), 1-19

Bullard E., Gravity Measurements in East Africa, *Royal Society*, 1936, **235**(757), 445-531.

Cogbill A., Gravity Terrain Corrections Calculated Using Digital Elevation Models, *Geophsics*, 1990, **55**(1), 102-106.

Demirel H., *Yükseklik Sistemleri ve Nivelman Sonuçlarının İrdelenmesi*, İDMMA, 1984.

Douglas J., Prahl S., Entended Terrain Correction Tables for Gravity Reductions, *Geophysics*, 1972, **37**(2), 377-379.

Featherstone W., Dentith M., A Geodetic Approach to Gravity Data Reductions for Geophysics, *Computers & Geosciences*, 1997, **23**(10), 1063-1070.

Garland G., *The Earth's Shape and Gravity*, 2nd ed., Pergamon Press, U.S.A., 1965.

Hammer S., Terrain Corrections for Gravimeter Stations, *Geophysics*, 1939, **4**(3), 184-194.

Hammer S., Critique of Terrain Corrections for Gravity Stations, *Geophysics*, 1982, **47**(5), 839-840.

Hayford J., Bowie W., *The effect of Topography and Isostatic Compensation upon The Intensity of Gravity Coast and Geodetic Survey*, 1st ed., Government Printing Office, Washington, 1912.

Heiskanen W., Moritz H., *Fiziksel Joeodezi (Çeviri: Gürkan O.)*, 1st ed., Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon, 1984.

Hinze W., Aiken C., Bronzena J., New Standarts for Reducing Gravity Data: The North American Gravity Database, *Geophysics*, 2005, **70**(4), J25-J32.

Hinze W.J., Frese R. R. B., Saad A. H., *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices and Application*s, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.

LaFehr T., An Exact Solution fort he Gravity Curvature (Bullard B) Correction, *Geophysics*, 1991, **56**(8), 1178-1184.

Nagy D., The Gravitational Attraction of a Right Rectangular Prism, *Geophysic*s, 1966, **32**(2), 362-371.

Nagy D., The Prism Method for Terrain Corrections using Digital Computers, *PAGEOPH*, 1966, **63**(31), 31-39.

Niethammer T., *Nivellement und Schwere als Mittel zur Berechnung wahrer Meereshöhen; mit 25 Taf*, Kartenverl. D. Schweiz, Landestopographie in Komm, 1932.

Odera P., Fukuda Y., Comparison of Helmet and Rigorious Orthometric Heights over Japan, *Earth, Planet and Space*, 2015, **67**(1), 261-271.

Rapp R., The Orthometric Heights, Master Thesis, Ohio State University, Geodesy Department, Ohio, 1961.

Sandberg C., Terrain Corrections for an Inclined Plane in Gravity Computations, *Geophysics*, 1958, **23**(4), 701-711.

Sandberg C., Terrain Correction Charts for Transition from Hammer Charts to Hayford-Bowie Charts, *Geophysics*, 1959, **24**(2), 323-329.

Santos M., Vanicek P., Featherstone W., The Relation Between Rigorious and Helmert's Definitions of Orthometric Heights, *Journal of Geodesy*, 2006, **80**(12), 691-704.

Simav M., Yıldız H., Cingöz A., Sezen E., Demirsoy N. S., Akpınar İ., Okay H., Gürer A., Akçakaya M., Yılmaz S., Akça M., Çakmak R., Karaböce B., Sadıkoğlu E. Doğan U., Türkiye Yükseklik sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi, *TMMOB HKMO 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 25-28 Mart 2015.

Tenzer R., Vanicek P., Santos M., Featherstone W. E., Kuhn M., The Rigorious Determination of Orthometric Heights, *Journal of Geodesy*, 2005, **79**(1), 82-92.

Tsoulis D., Novak P., Kadlec M., Evaluation of Precise Terrain Effects using High-Resolution Digital Elevation Models, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, **114**(B2), B02404.

URL-1: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/Documentation/MIL_PDF_89020B.pdf, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

URL-2: http://www.dlr.de/eoc/Portaldata/60/Resources/dokumente/7_sat_miss/SRTM-XSAR-DEM-DTED-1.1.pdf, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

URL-3: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/Documentation/SRTMTopo.pdf (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

URL-4: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm7coverage.htm, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

URL-5: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/2.html, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

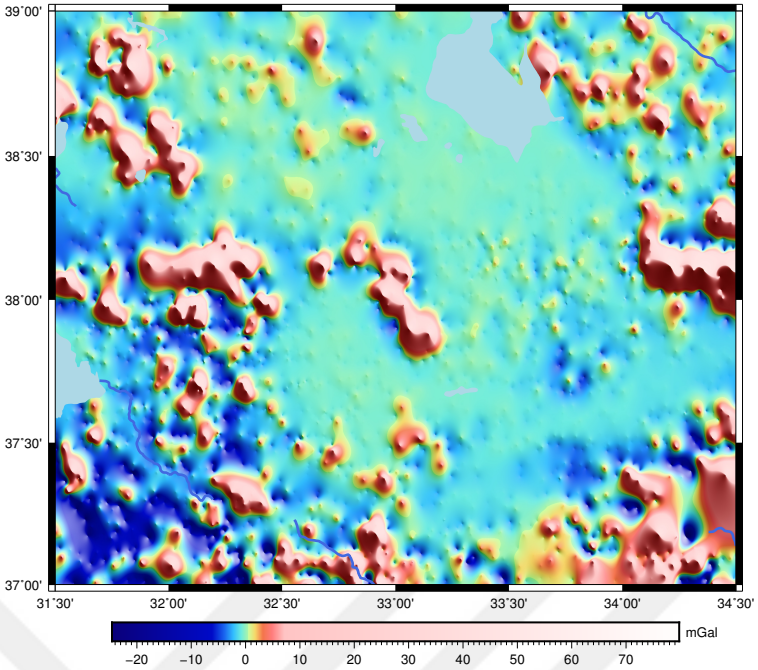
URL-6: ftp://lilakes.unige.ch/SEGMENTED/UNIT___N35E050/README.pdf, (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2017).

Üstün A., Demir C., Kılıçoğlu A., Demirel H., Determination of a Geometrical Geoid Profile Between the Mediterranean and the Black Sea by GPS-Levelling, *3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission: Gravity and Geoid 2002*, Greece, 26-31 August 2002.

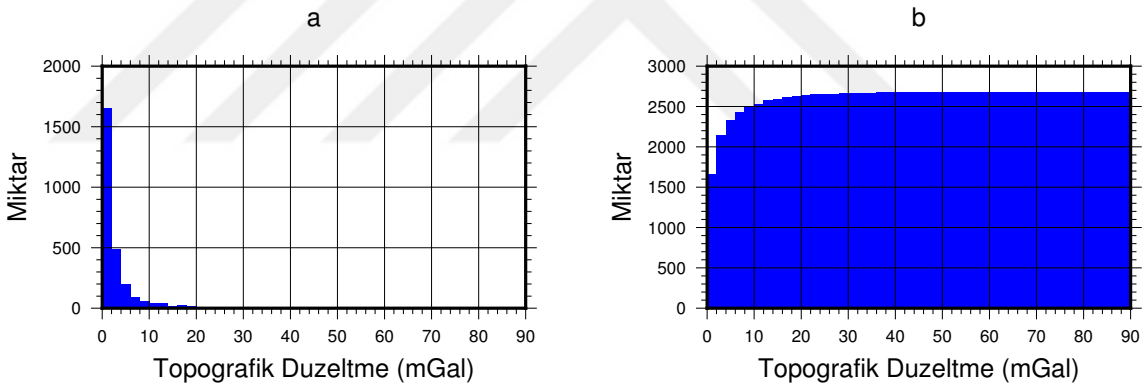
Vanicek P., Krakiwsky E. J., *Geodesy: The Concepts*, 2nd ed., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1987.

Vanicek P., Tenzer R., Sjöberg L. E., Martinec Z., Featherstone W., New Views of Spherical Bouguer Gravity Anomaly, *Geophysical Journal International*, 2004, **159**(2), 460-472.

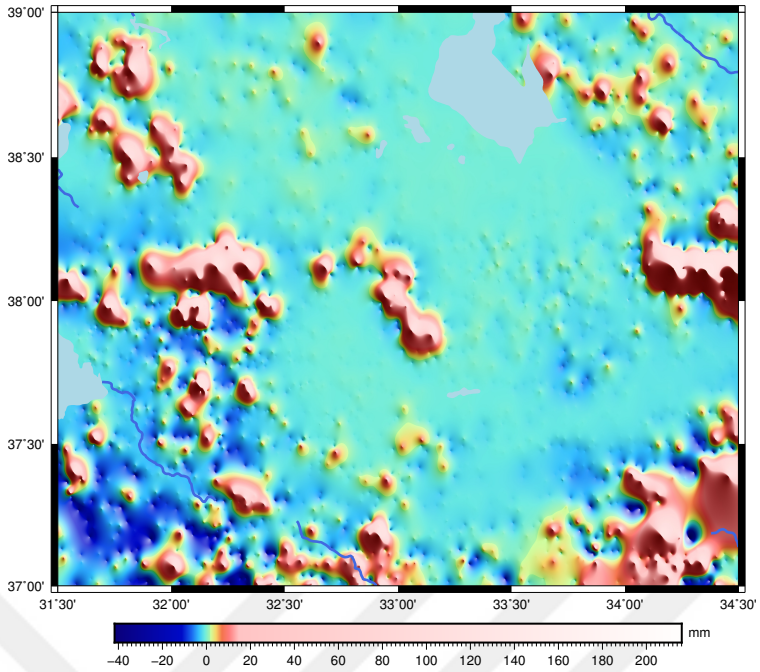
EKLER



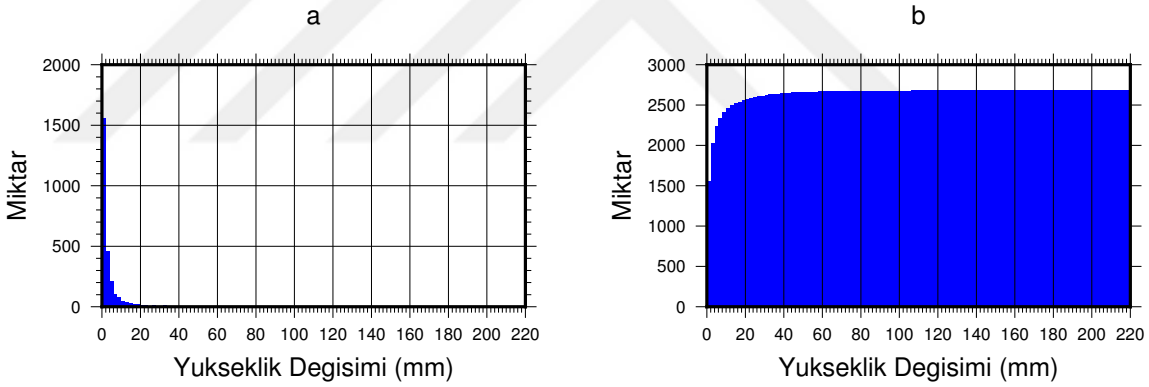
Şekil A.1. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan topoğrafik düzeltmeler haritası



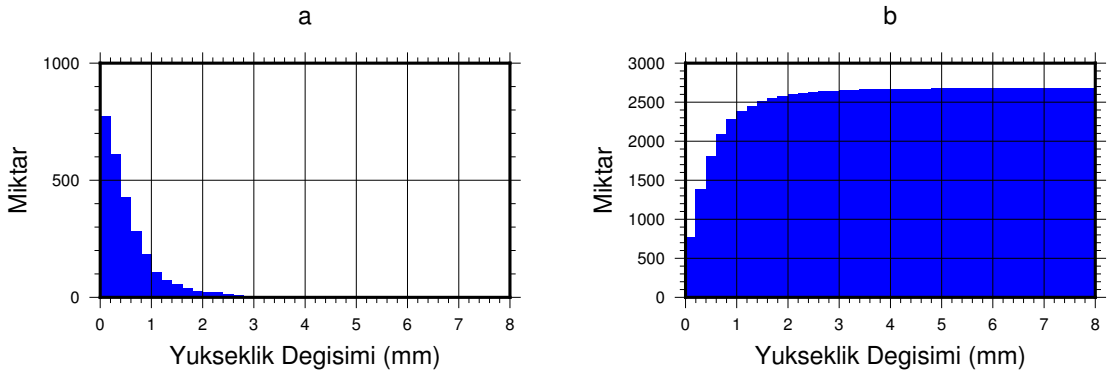
Şekil A.2. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan topoğrafik düzeltmeler histogramı



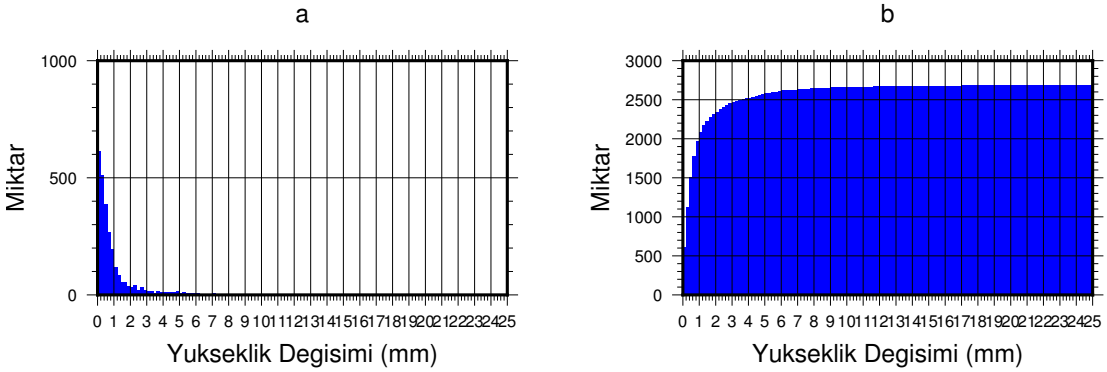
Şekil A.3. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan yukseklik degisimleri haritası



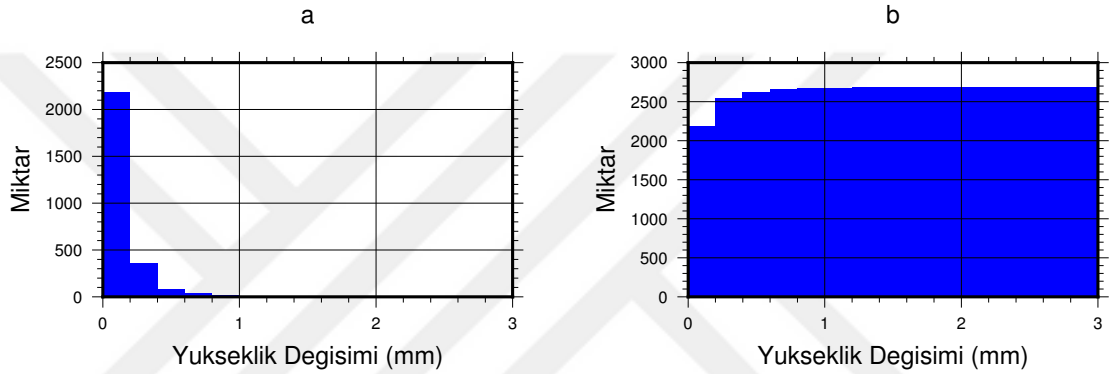
Şekil A.4. Hayford-Bowie şablonu ve SRTM1 SYM ile hesaplanan yukseklik degisimleri histogramı



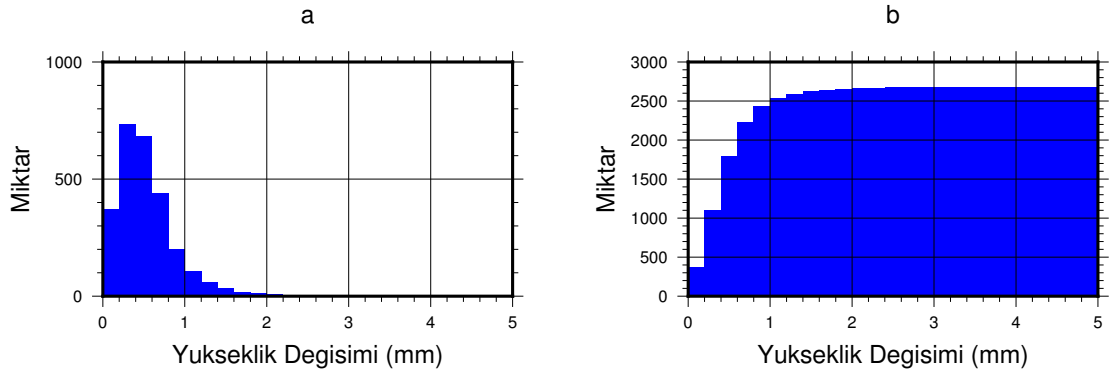
Şekil A.5. Niethammer şablonunda ASTER1-3 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



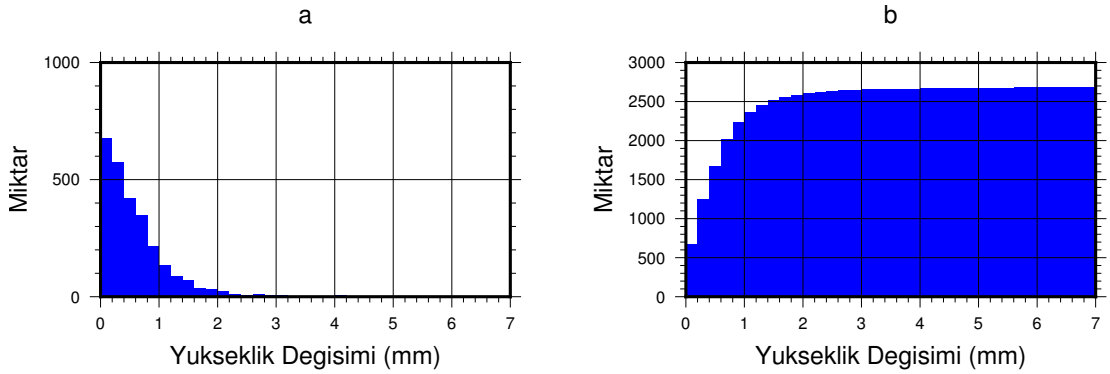
Şekil A.6. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



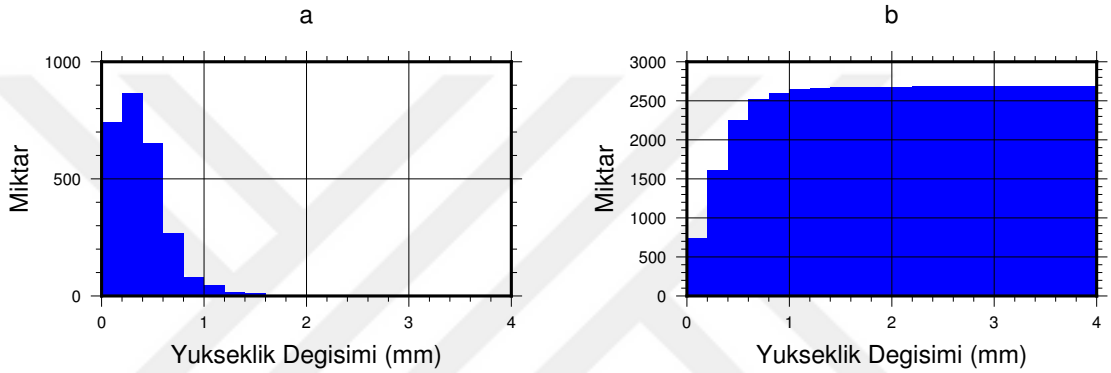
Şekil A.7. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



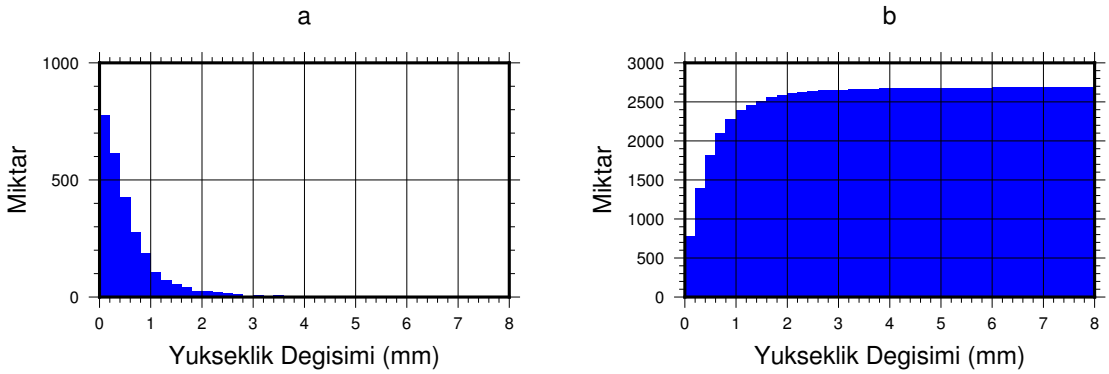
Şekil A.8. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



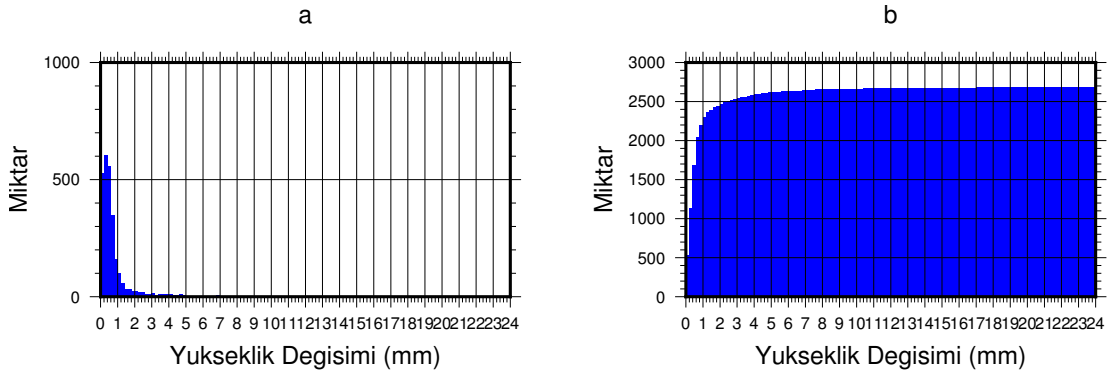
Şekil A.9. Niethammer şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



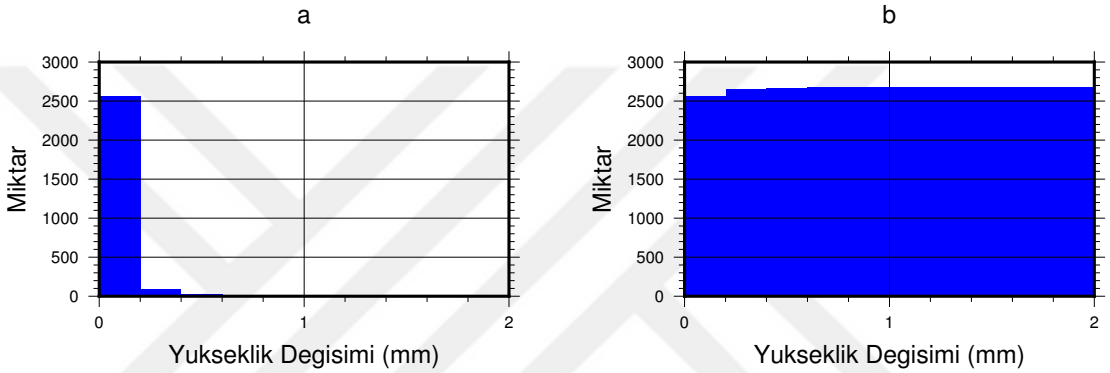
Şekil A.10. Niethammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



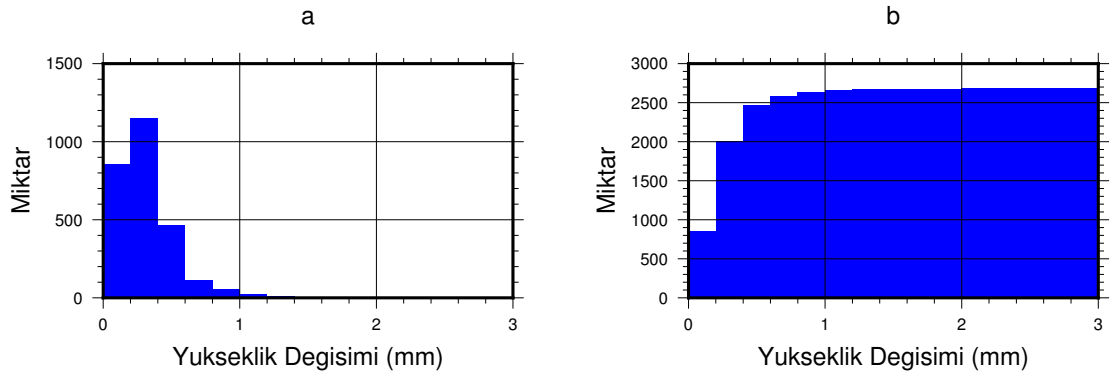
Şekil A.11. Niethammer şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



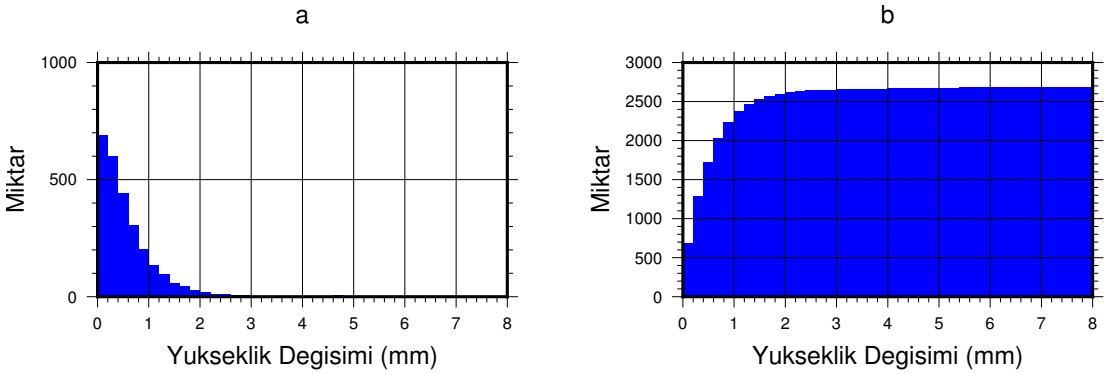
Şekil A.12. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



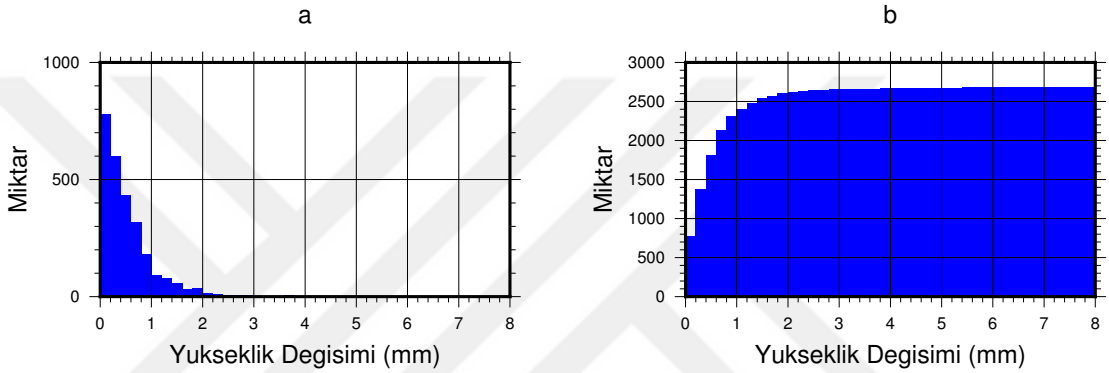
Şekil A.13. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



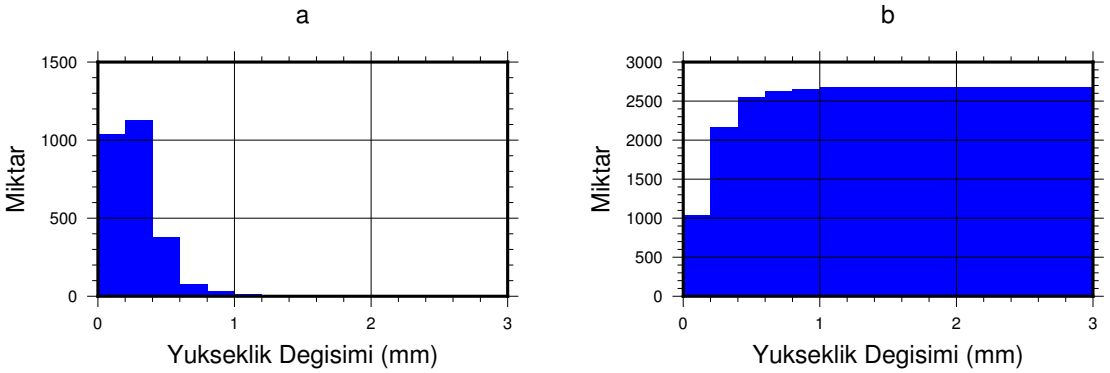
Şekil A.14. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



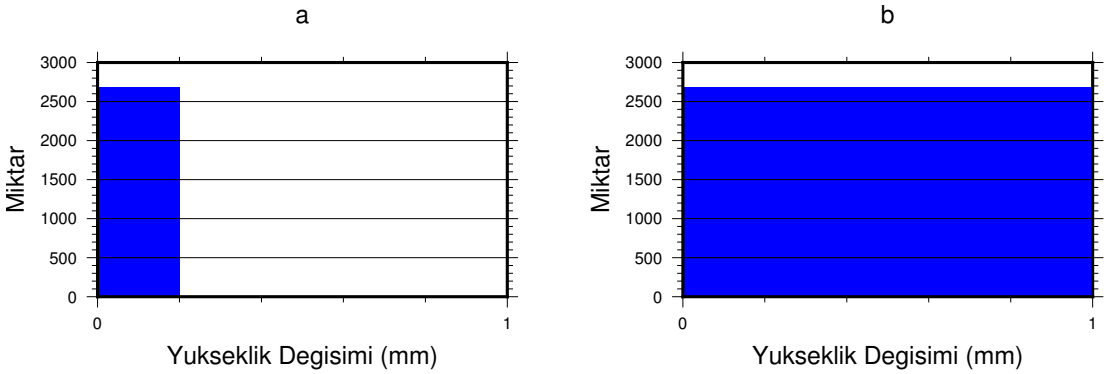
Şekil A.15. Hammer şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



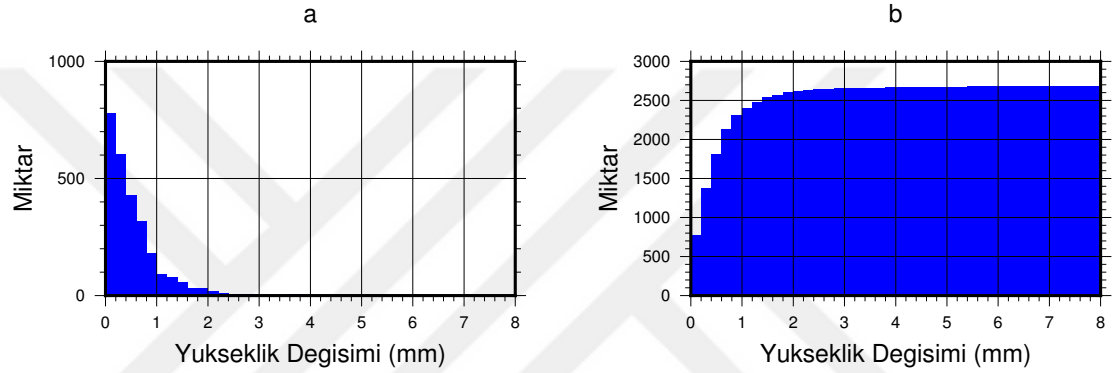
Şekil A.16. Hammer şablonunda ASTER1-3 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



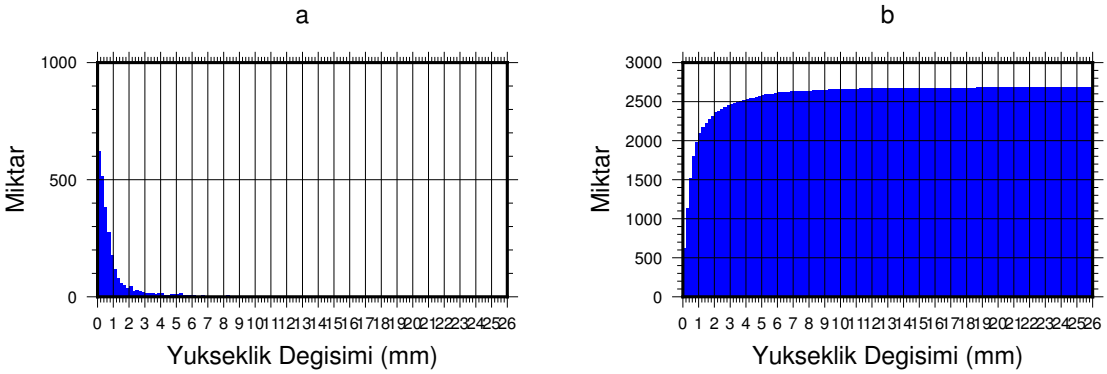
Şekil A.17. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



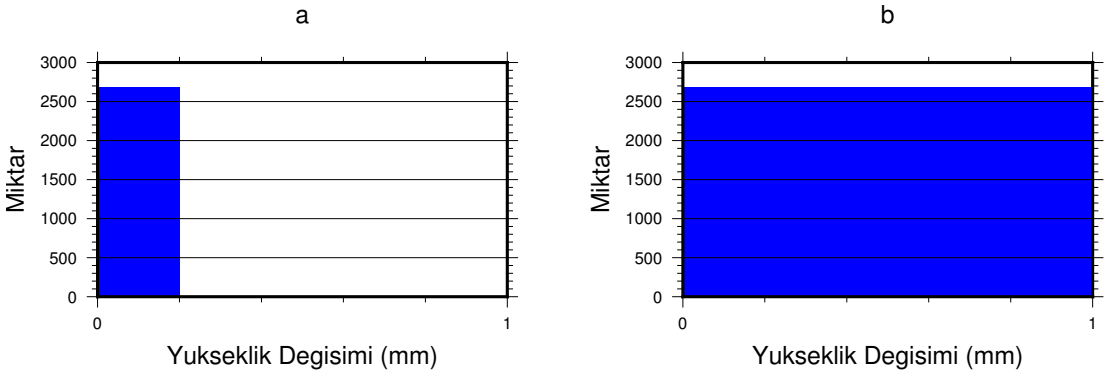
Şekil A.18. Hammer şablonunda ASTER1 ve ASTER1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



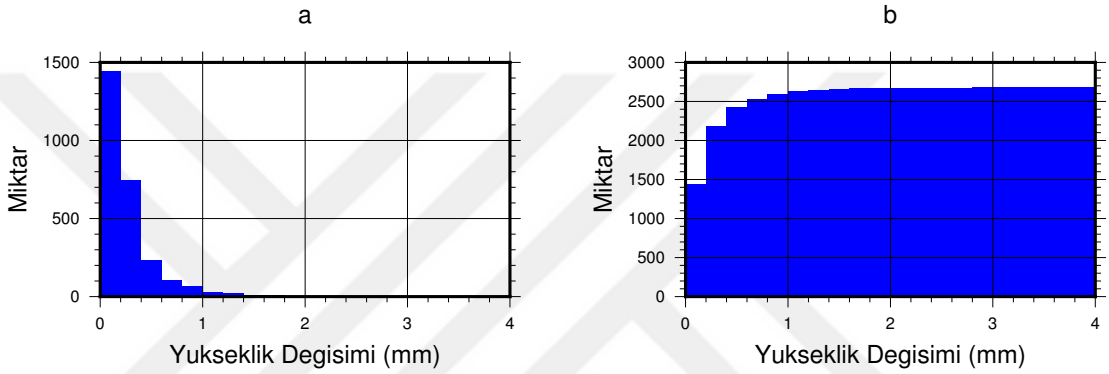
Şekil A.19. Hammer şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



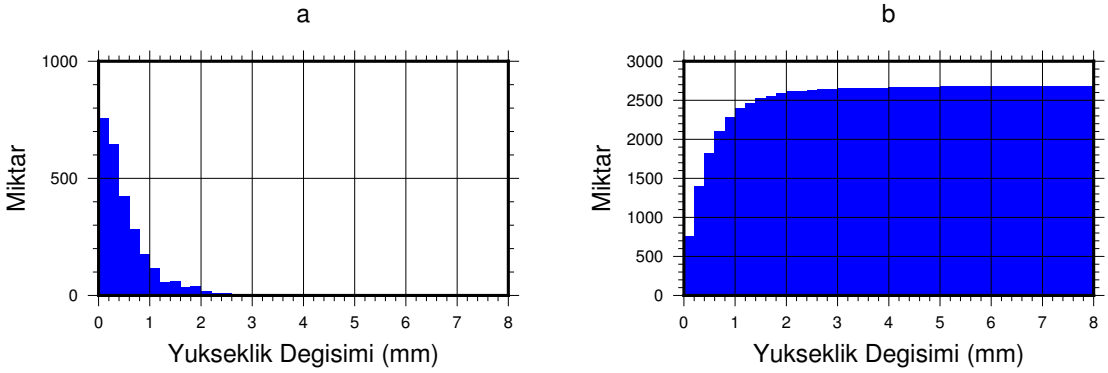
Şekil A.20. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



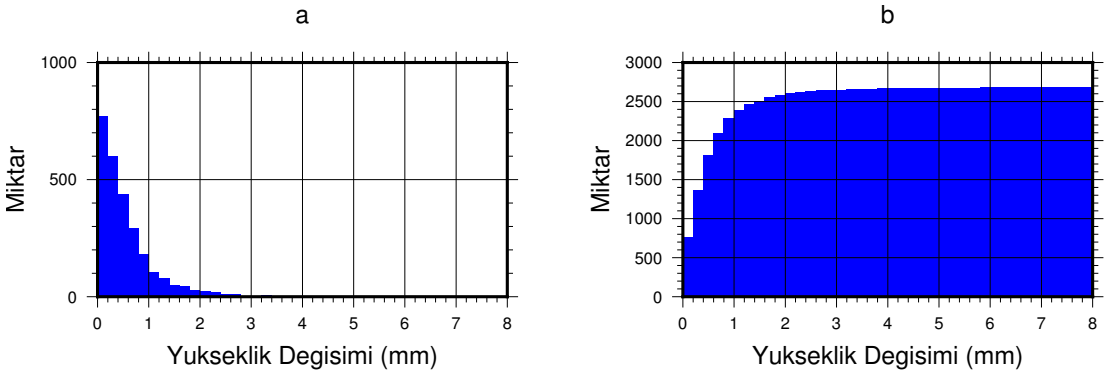
Şekil A.21. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



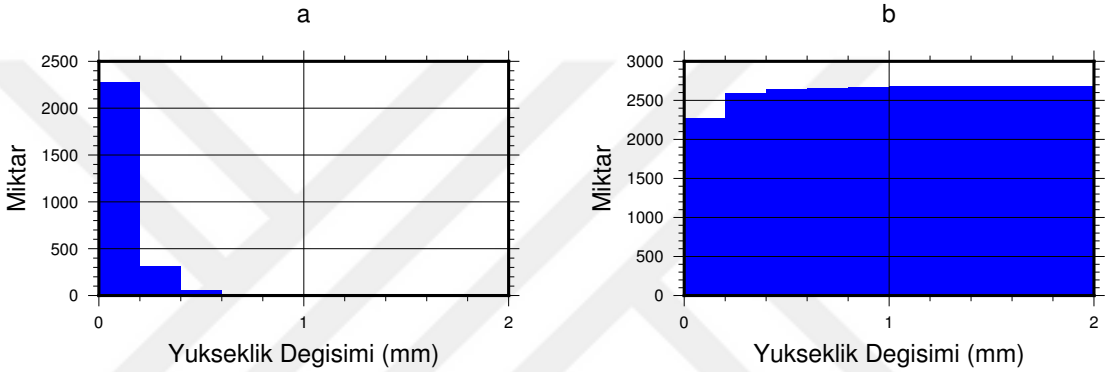
Şekil A.22. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



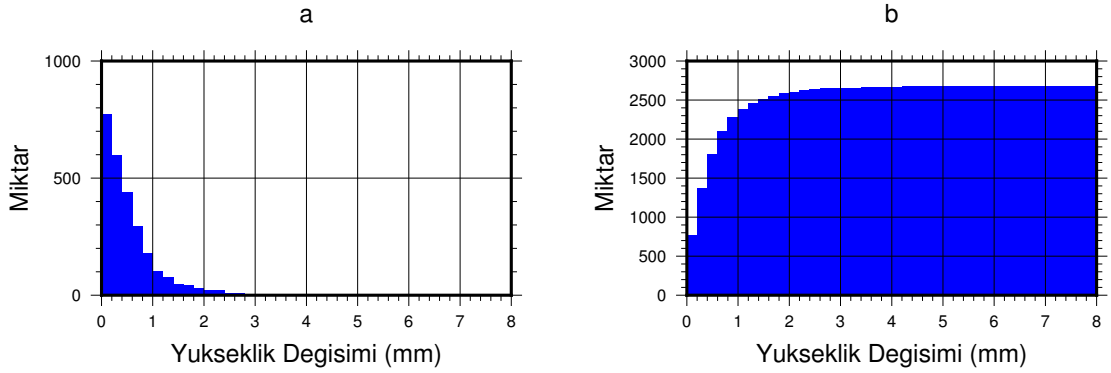
Şekil A.23. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1-15 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



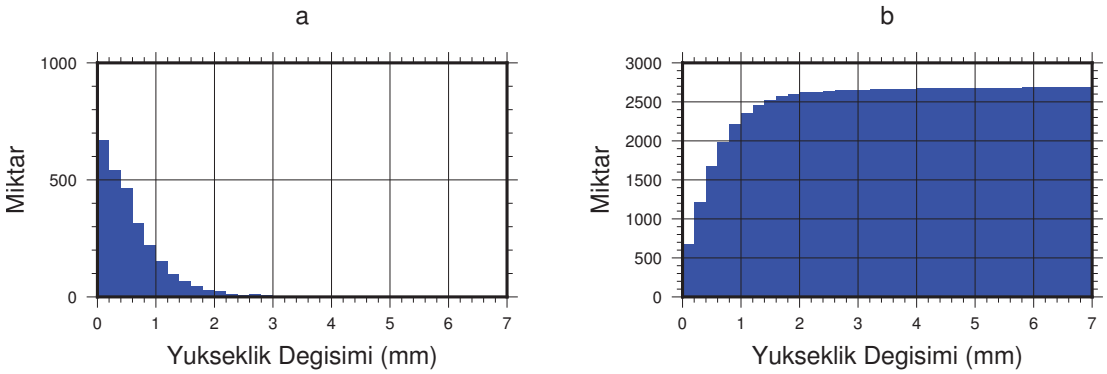
Şekil A.24. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1-3 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



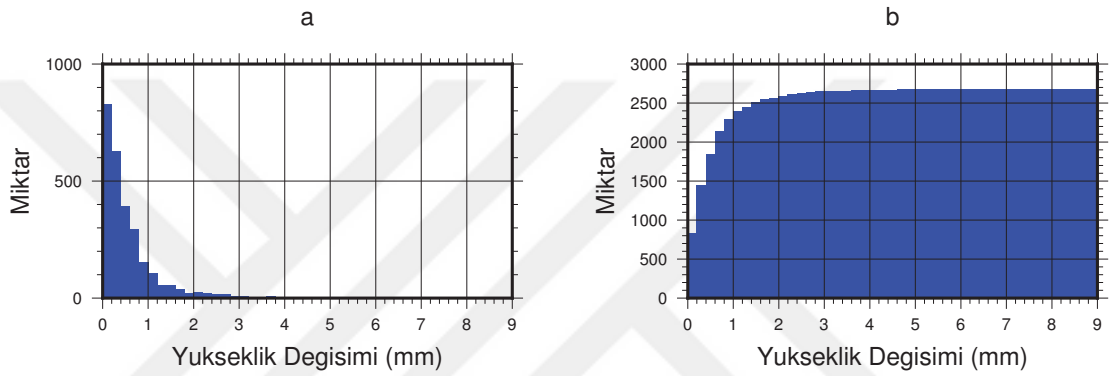
Şekil A.25. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve ASTER1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



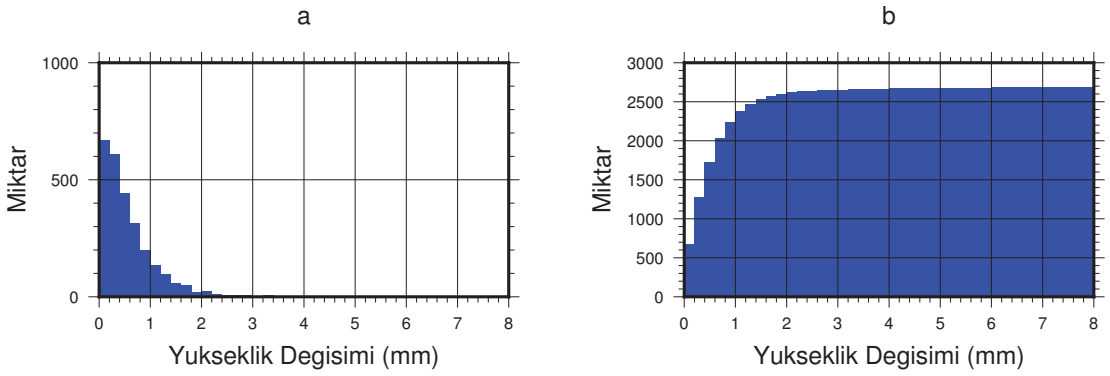
Şekil A.26. Hayford-Bowie şablonunda ASTER1 ve SRTM1 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



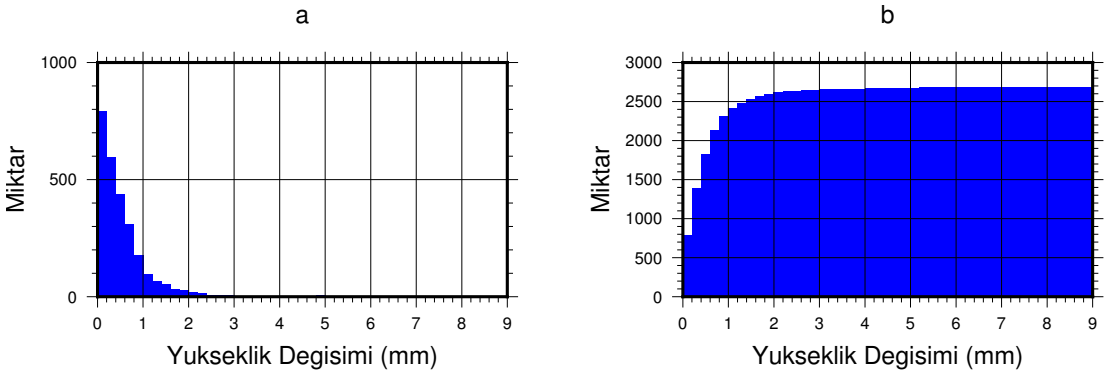
Şekil A.27. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



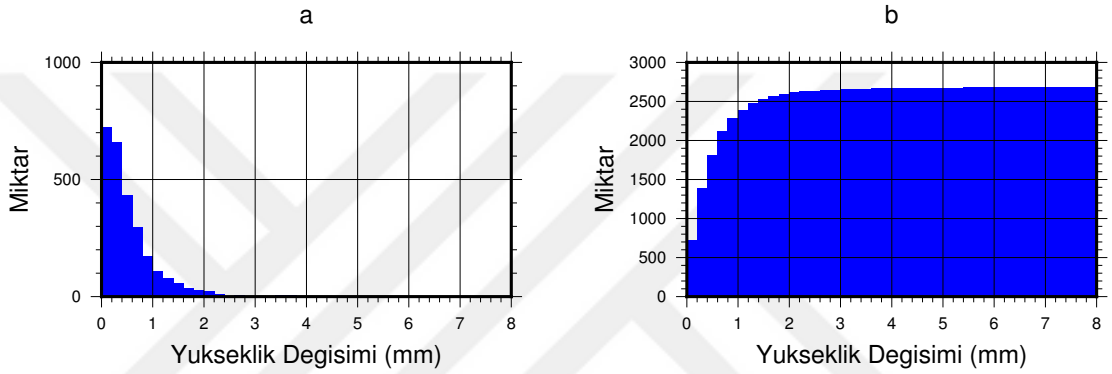
Şekil A.28. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



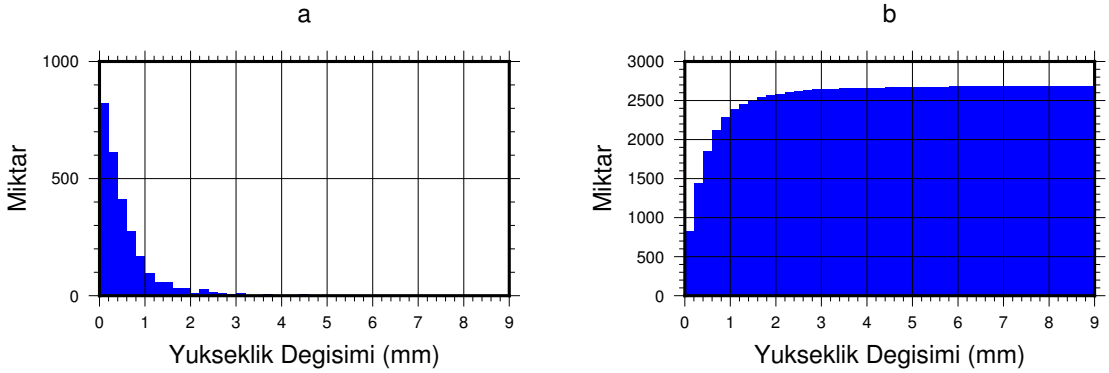
Şekil A.29. Hammer şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



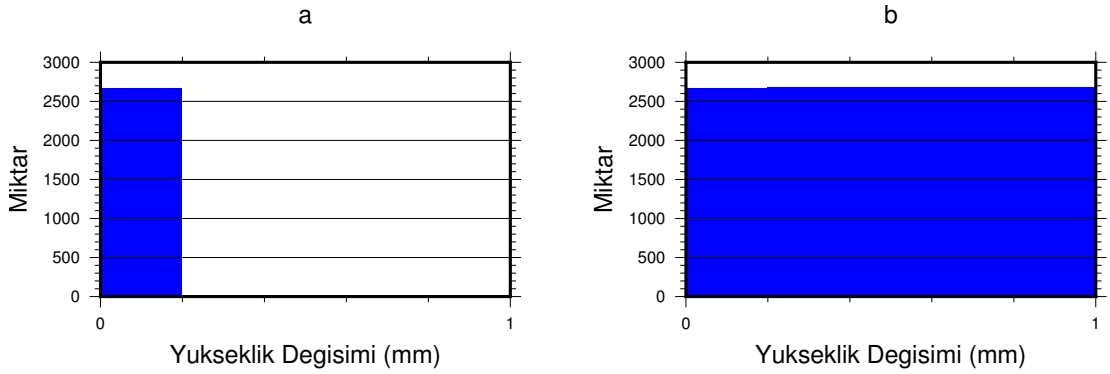
Şekil A.30. Hammer şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



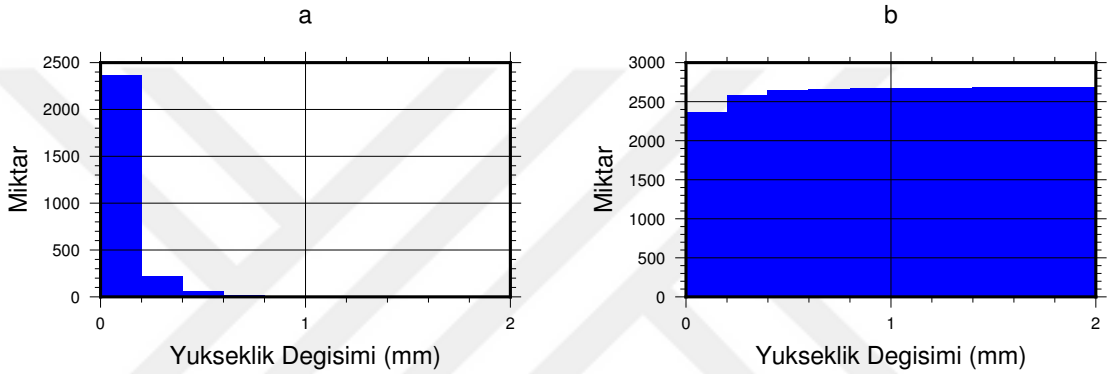
Şekil A.31. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3-15 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



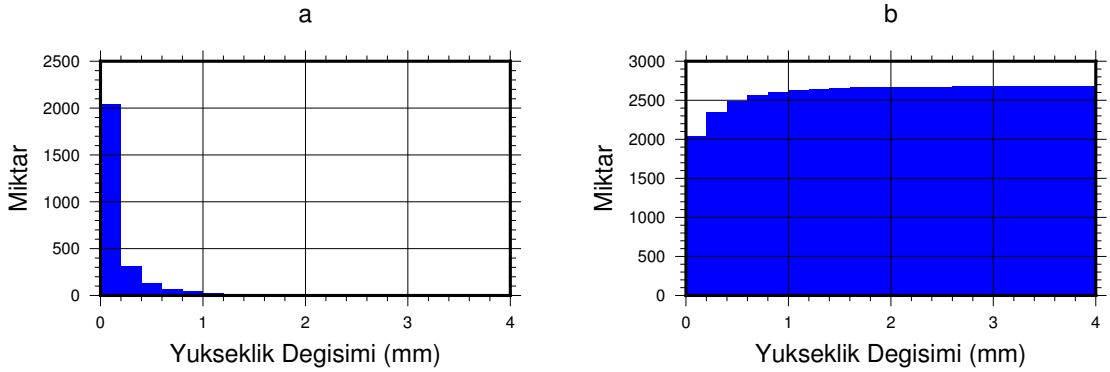
Şekil A.32. Hayford-Bowie şablonunda ASTER3 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



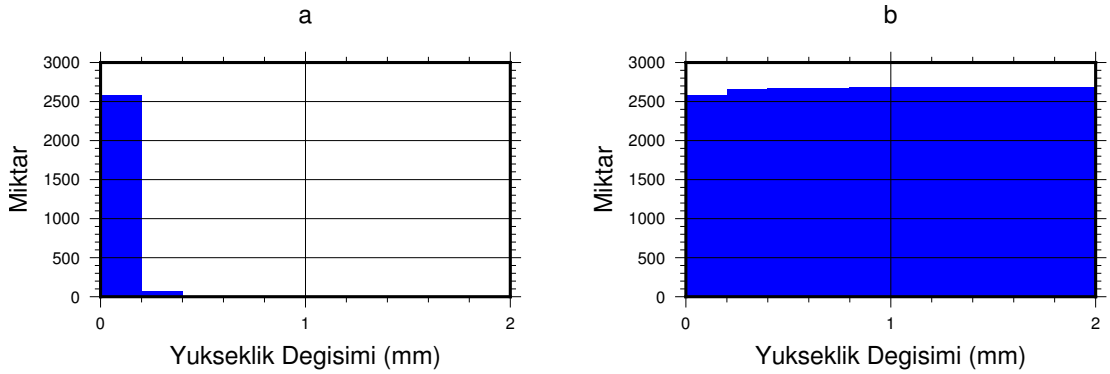
Şekil A.33. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



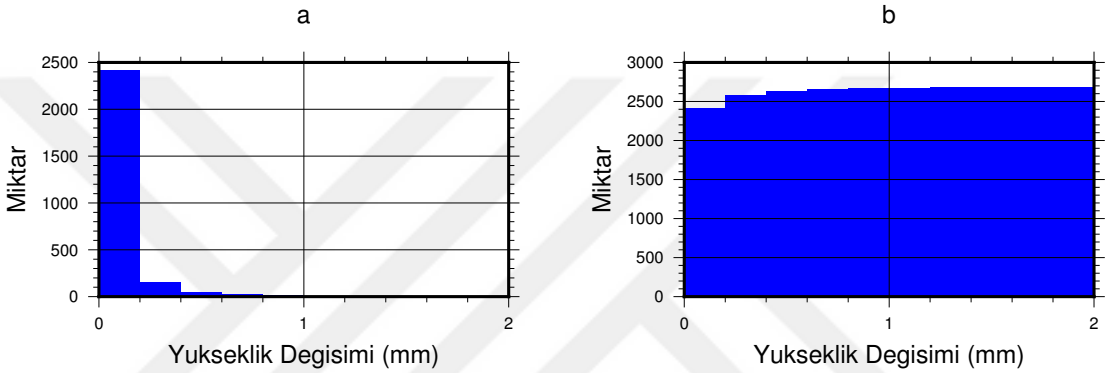
Şekil A.34. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



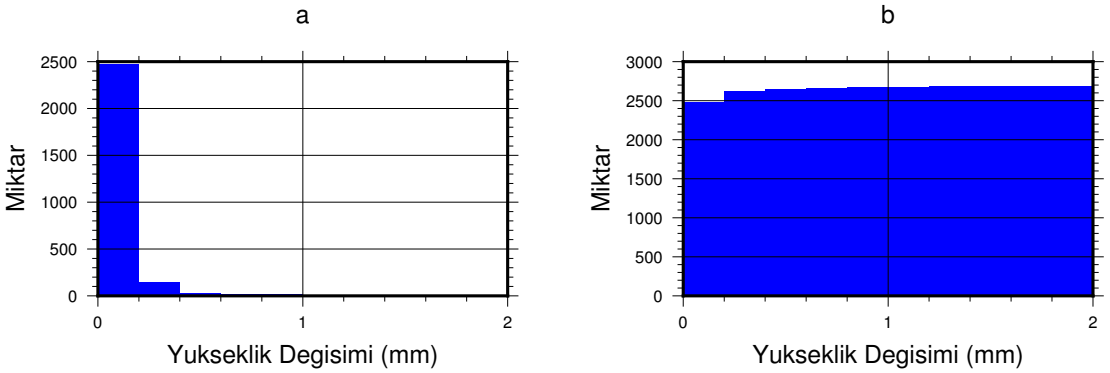
Şekil A.35. Niethammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



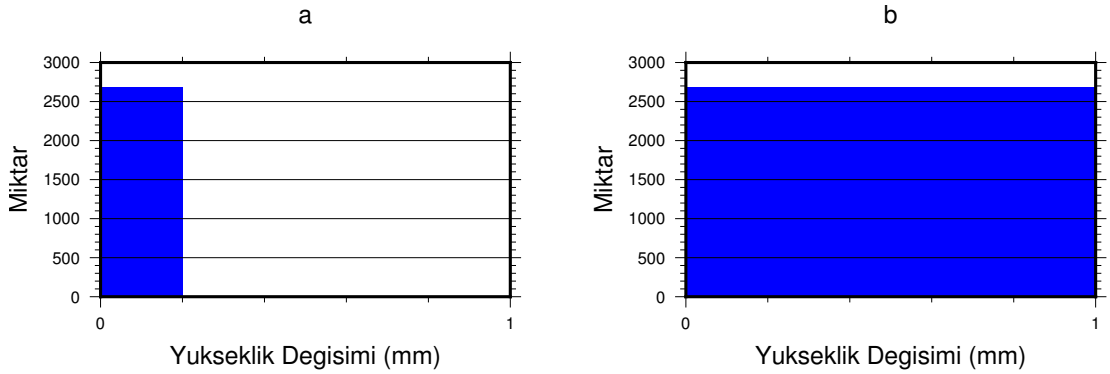
Şekil A.36. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



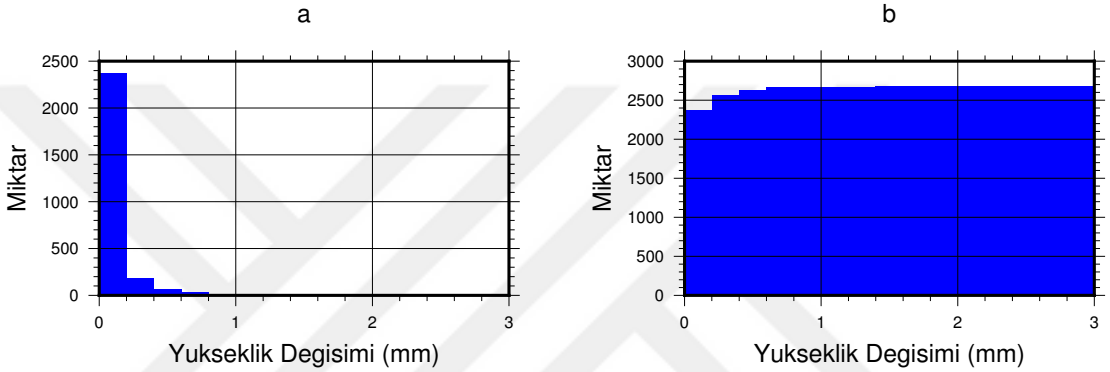
Şekil A.37. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



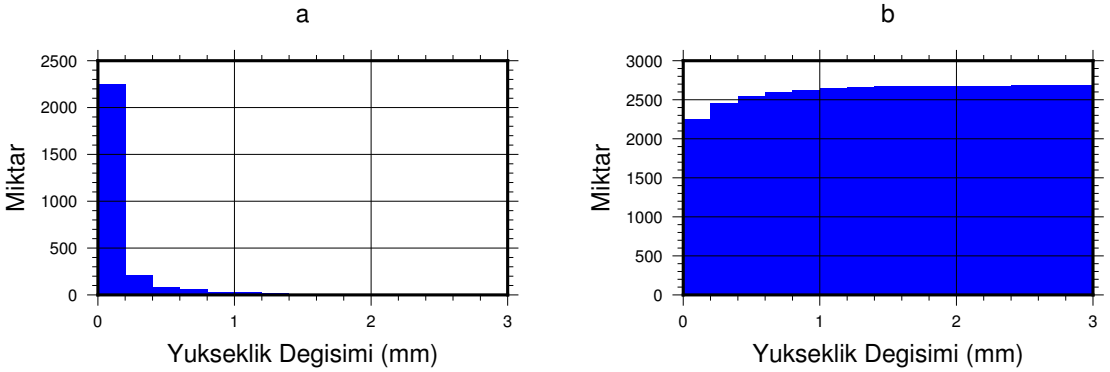
Şekil A.38. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



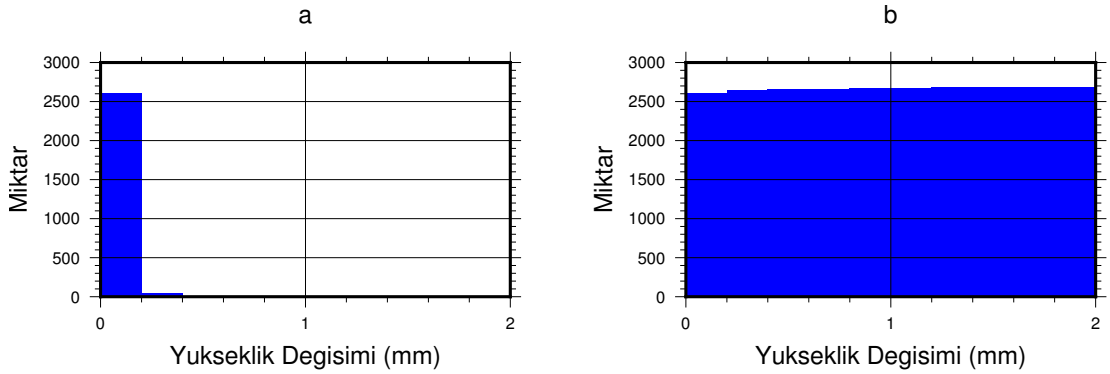
Şekil A.39. Hammer şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



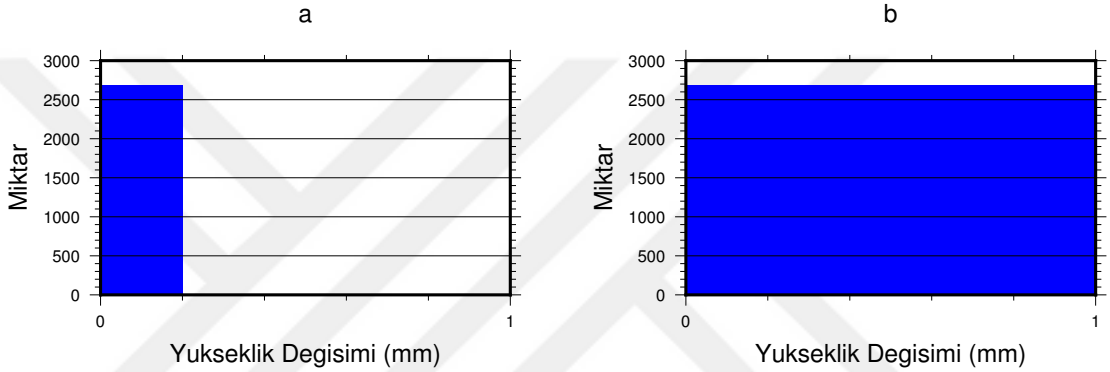
Şekil A.40. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



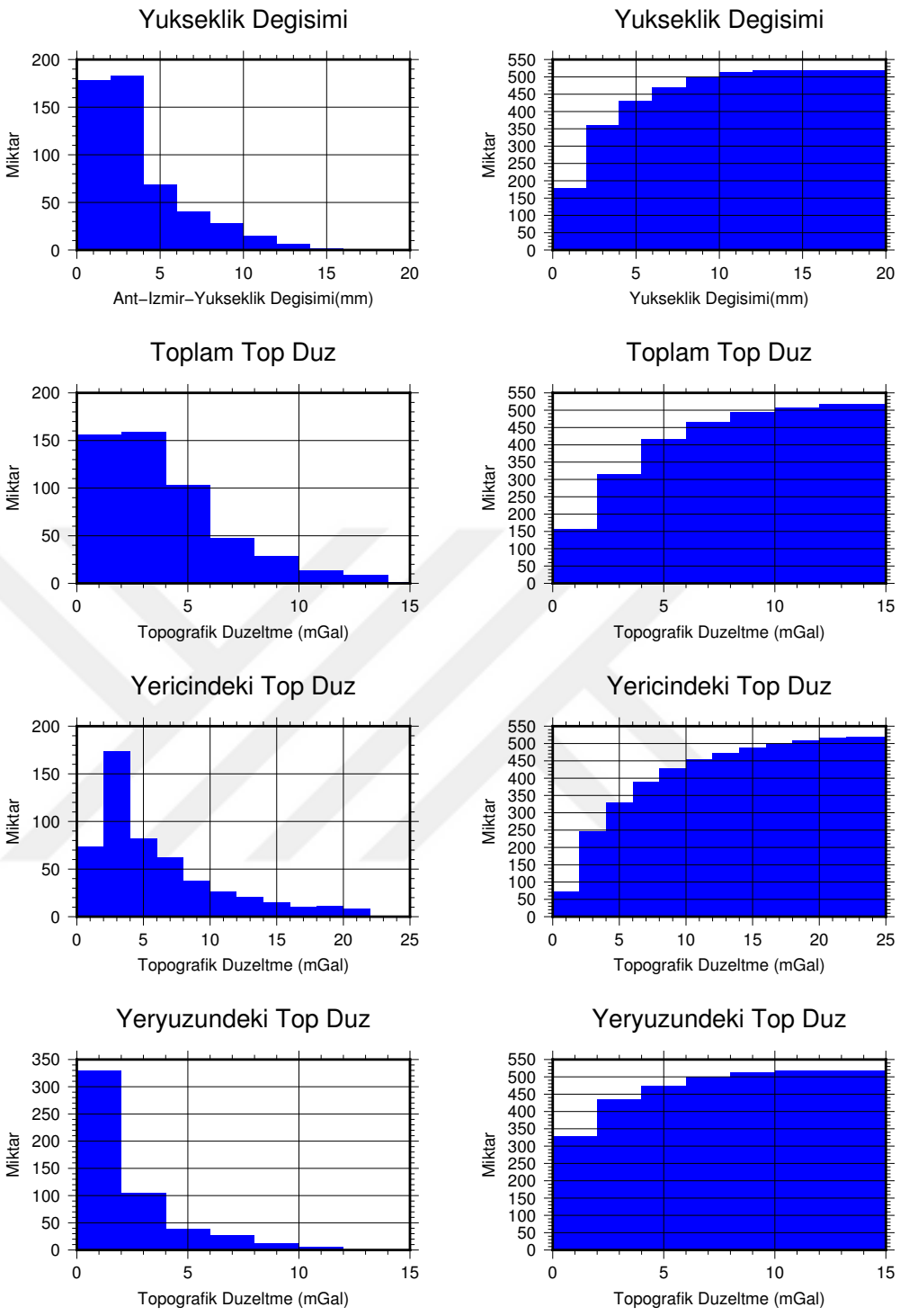
Şekil A.41. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM3-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



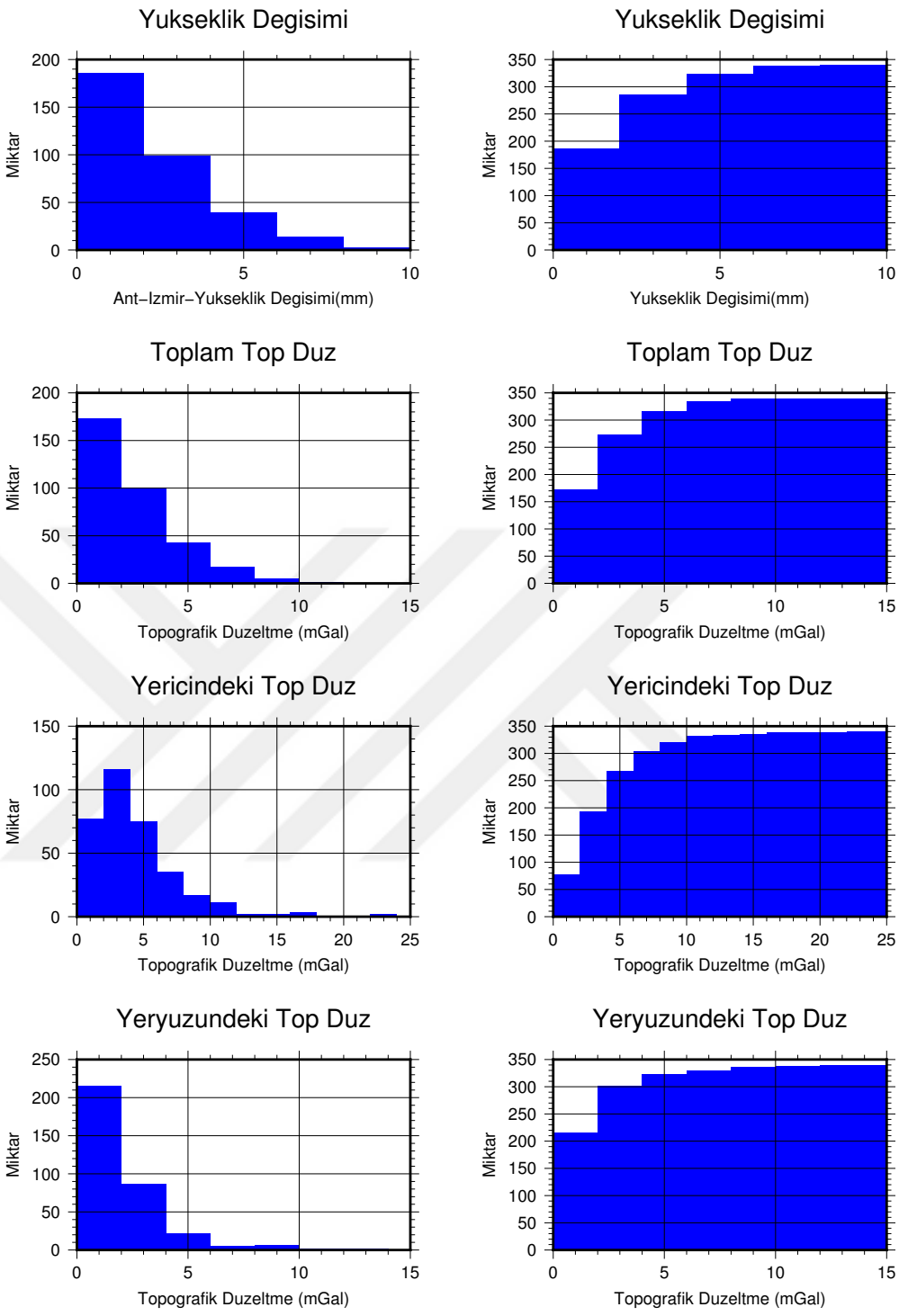
Şekil A.42. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM1-15 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



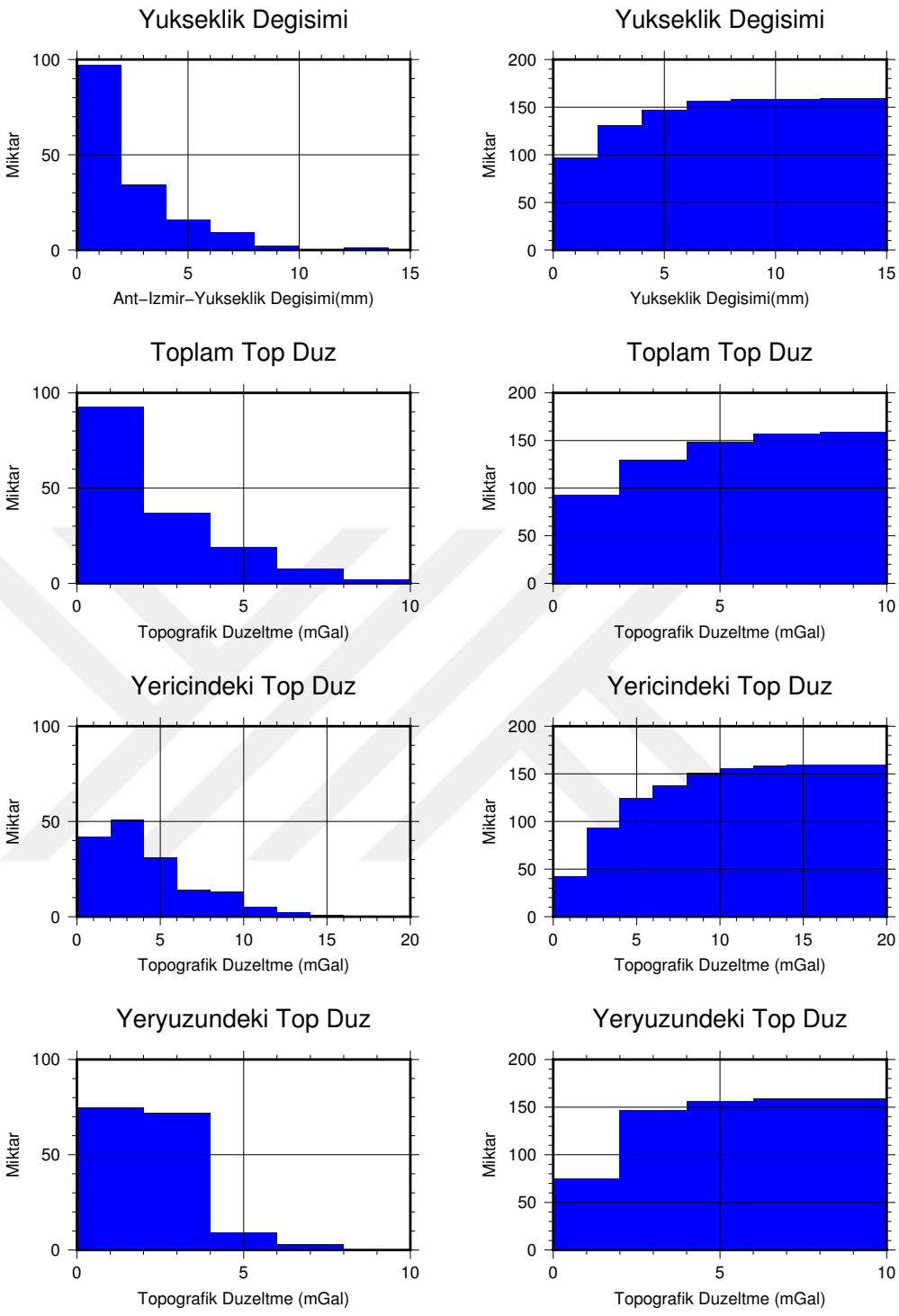
Şekil A.43. Hayford-Bowie şablonunda SRTM1 ve SRTM1-3 ile hesaplanan yükseklik değişimleri



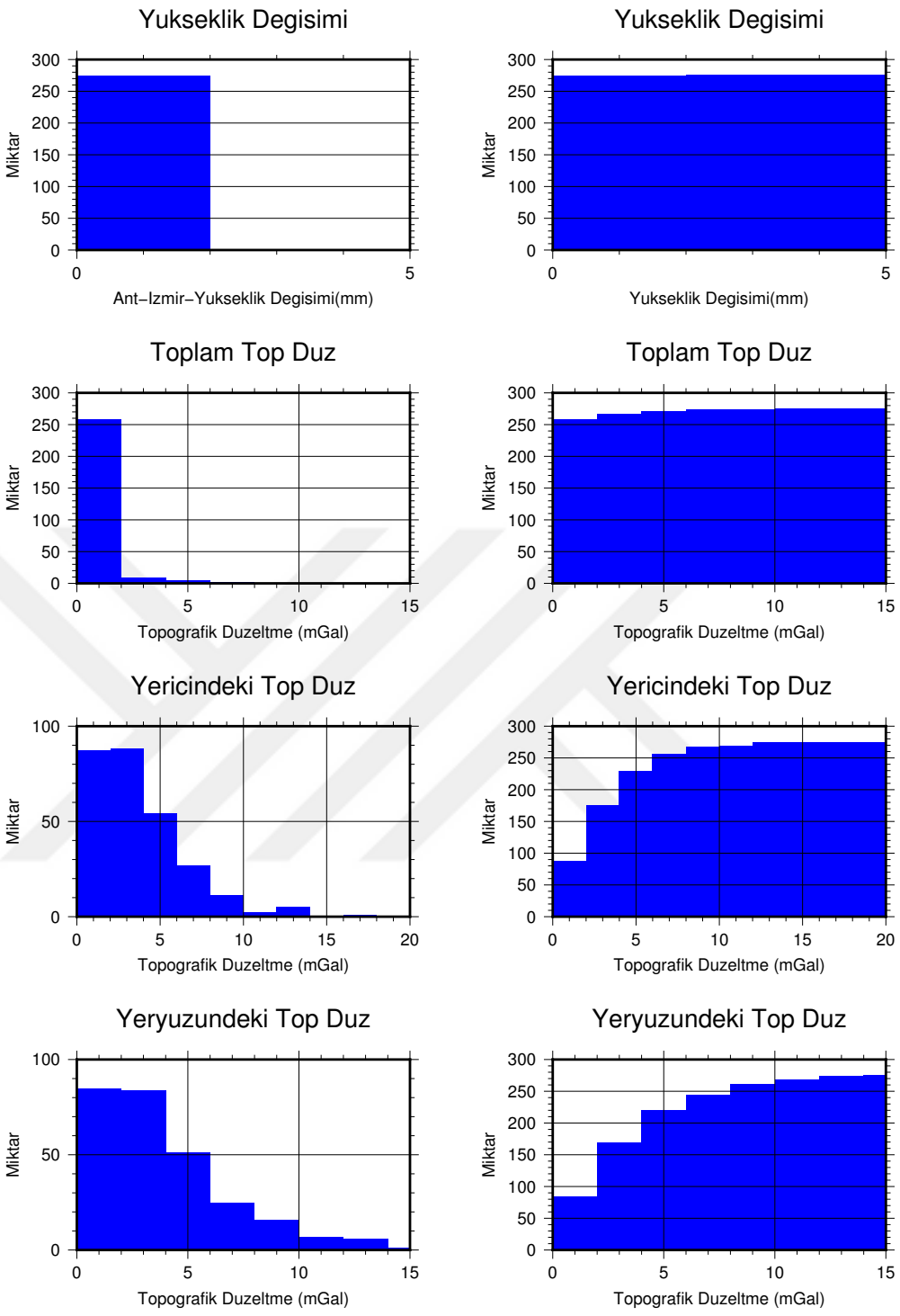
Şekil A.44. Antalya-Samsun nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi



Şekil A.45. Antalya-İstanbul nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi



Şekil A.46. Antalya-İzmir nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi



Şekil A.47. Antalya-İskenderun nivelman hattında topoğrafik düzeltmeler ve düzeltmelerin yüksekliklere etkisi

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Üstün A., **Olgun S.,** Gravite Verileri için Topoğrafik Düzeltme Büyüklükleri ve Ortometrik Yükseklik Belirlemeye Etkisi, *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu(TUJK)-2016,* Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 3-4 Kasım 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1991'de İstanbul'da doğdu. Lise öğrenimini Hayrullah Kefoğlu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Jeodezi ve Jeoinformasyon Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Ayrıca, 2015 yılında Harita Mühendisliği Bölümünde başladığı araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.