Harita Dergisi, Ocak 2021; 165: 17-27

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Gravimetrik Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanmasında Yakın Bölge Katkısı
(Near Zone Contribution in the Gravimetric Terrain Correction Computations)

Sevda OLGUN, Aydın ÜSTÜN
Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
sevda.olgun@kocaeli.edu.tr, aydin.ustun@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 04.09.2020 Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Gravite alanının modellenmesi ile ilgili yapılan son çalışmalar, topoğrafik kitlelerin etkisi hakkında güvenilir bilginin önemini ortaya koymaktadır. Yerel yoğunluk ve topoğrafyanın geometrisi, Newton integrali tarafından tanımlanan bu etkinin temel bileşenleridir. Yüksek çözünürlüklü topoğrafya, on yıldan fazla bir süredir uydu radarından veya hava lidar tekniklerinden elde edilmektedir. Yeni veri kaynakları, yüksek doğrulukta topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasını sağlamakta, ancak maalesef katlanarak büyüyen topoğrafik verileri işleyebilmesi için bilgisayar algoritma gerekliliklerini de ortaya çıkarmaktadır. Hesaplama noktası çevresinde, topoğrafik düzeltmeye en büyük katkı yakın bölgedeki kitlelerden kaynaklanır. SYM'nin çözünürlüğü azaldıkça, çekim etkisinin hesaplanan sayısal değerleri de azalır. Bu nedenle, özellikle topoğrafyanın oldukça düzensiz ve engebeli olduğu bölgelerde düzeltme değerleri beklenenden daha düşük olmaktadır. Bu çalışmada, DEM çözünürlüğünün etkisini analiz etmek için topoğrafik düzeltmelerin 1" çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile hesaplanmasında küçük kitle elemanlarına sahip silindir bölme yöntemi kullanılmıştır. Konya Kapalı Havzasında 21901 grid noktasında sayısal bir test gerçekleştirilmiştir. Kompartmanlarda herhangi bir boşluk olmaması için yakın bölgedeki grid çözünürlüğü, enterpolasyon ile 0.5" çözünürlüğe yükseltilmiştir. Uyarlanmış yöntem topoğrafik düzeltmenin hesap yükünü artırsa da, hesaplanan değerler gerçek değerlere daha yakın olur. Hesap noktasını kuşatan topoğrafya farklı çözünürlükler altında bölümlendiğinde, bunun çalışma bölgesindeki sonuçları 1.4 ile 26.1 mGal arasında değiştirebildiği görülmüştür.

***Anahtar Kelimeler**: topoğrafik düzeltme, gravite indirgemesi, Sayısal Yükseklik Modeli, gravite alanı modelleme, silindirik şablon.*

ABSTRACT

The recent studies on the gravity field modeling suggest the importance of reliable knowledge about the effects of topographic masses. Local density and geometry of the topography are the fundamental components of this effect defined by the Newton integral. High resolution topography has been recovered from satellite radar or airborne lidar techniques for more than a decade. The new data resources have led to the computation of high accuracy terrain corrections, but they unfortunately unveil substantial necessities for the computer algorithms that process exponentially growing topographic data. The major contribution on terrain correction around a computation point comes from the masses in the near zone. As the DEM resolution decreases, the computed numerical values of the gravitational effect diminish. Therefore, the correction values become lower than expected especially in regions where the topography is considerably irregular and rough. In this study, cylindirical template method having smaller mass elements has been used for the terrain correction calculation with 1 arc-second resolution Digital Elevation Model (DEM) to analyze the effect of DEM resolution. A numerical test is performed at 21901 grid points in the Konya Closed Basin.The grid resolution in the near zone is upscaled to 0.5" by interpolation to avoid any gaps in the cylindirical compartments. Although the adapted method increases the computational burden of terrain correction, the computed values converge better to the actual ones. In case the topography surrounding computation point is segmented under different scenarios it is seen that this is able to change the results from 1.4 to 26.1 mGal over the study region.

***Keywords**: terrain correction, gravity reduction, Digital Elevation Models, gravity field modeling, cylindrical template.*

1. GİRİŞ

Newton mekaniğinde kitlesel cisimlerin birbirine uyguladığı karşılıklı çekim kuvveti enerji alanı ile açıklanır. Yerin çekim alanı örneğinde potansiyel, Yeryuvarını oluşturan kitlelerin birim ağırlıklı cismi hareket ettirmesi için gereken iş (enerji) miktarı olarak tanımlanır. Yeryüzünün veya yere yakın uzay kesiminin her noktasında bu potansiyelin değeri aranıyorsa Yerin kitle-yoğunluk dağılımı üç boyutlu modeller yardımıyla bilinmelidir. İşte jeodezi, jeofizik ve oşinografide deniz yüzeyinin üstündeki topoğrafik ve altındaki batimetrik bilginin önemi burada yatar. Bu disiplinlerde türlü hesap yöntemlerinin geliştirilmesinin amaçlarından biri topoğrafik (buradan itibaren batimetriyi de kapsadığı kabul edilecektir) kitlelerin çekim etkisinin hesabıdır.

Yerin gravite alanının eşpotansiyel yüzeylerinden biri olan jeoidin santimetre altı doğrulukla belirlenmesi jeodezinin günümüzde başlıca ödevidir. Yüksek çözünürlüklü ve

Atıf/To cite this article: Olgun, S. ve Üstün, A. (2021). Gravimetrik Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanmasında Yakın Bölge Katkısı. *Harita Dergisi,* 165, 17-27.

doğruluklu jeoit modellerinin bilinmesi durumunda, elde edilmesi pahalı ve iş yükü gerektiren ortometrik yüksekliklere GNSS gözlemleri sayesinde kolayca ulaşılabilir. Ayrıca, jeoidin uzaydaki yerinin belirsizliğinin azaltılması, Yerin iç ve dış dinamiklerinin daha doğru anlaşılmasını sağlar. Bu yönüyle, jeoit tahminleri topoğrafik kitlelerin düzensizliğinden bağımsız düşünülemez (örneğin bkz. Martinec, 1998; Sjöberg ve Bagherbandi, 2017). Sonuç olarak, gravite alanın eksiksiz modellenebilmesi topoğrafik kitlelerin yerel sinyallerinin göz önüne alınmasına bağlıdır. Örneğin, topoğrafya ile doğrudan korelasyonlu gravite büyüklüklerinin enterpolasyon yardımıyla sıklaştırılması zordur. Gereken özen gösterilmezse jeoide indirgenmiş gravite anomali değerleri çoğu kez topoğrafyaya bağımlı hale gelir. Bu durum jeodezi ve jeofizikte gravite (potansiyel) alanın hatalı yorumlanmasına neden olur.

Bouguer gibi Yerin iç yapısını gösteren daha yumuşak değişimli gravite anomalileri diğer anomali türlerine geçiş için kullanılır. Gridlenmiş yüksek çözünürlüklü gravite bilgisi veya enterpole edilmiş konumsal gravite alanı bilgisi Bouguer anomalilerinden elde edilir. Diğer anomali türleri için topoğrafya yeniden yorumlanmalıdır. Böyle bir indirgeme işlemi, jeoit üzerinde kalan topoğrafik kitlelerin tümünün indirgenmesiyle başka bir deyişle tamamlanmış Bouguer yöntemiyle sağlanabilir.

Topoğrafyanın çekim etkisinin içinde olduğu bir başka jeodezik büyüklük, jeoit ve quasi-jeoit dönüşüm değeridir. Modern yükseklik sistemleri, ortometrik ve normal yükseklik türlerinin kullanılmasına öncelik verir. Ortometrik yükseklikler jeoidi başlangıç alırken; normal yükseklikler ise quasi-jeoit ile ilişkilidir. Bazı ülkeler her iki yükseklik sistemini bir arada kullanır. Bu durum quasi-jeoit ve jeoit yüksekliği farkını belirlemeyi zorunlu hale getirir. Bir yükseklik sisteminden diğerine sağlıklı geçiş topoğrafik kitlelerin etkisinin güvenilir bir şekilde hesaplanması ile sağlanabilir. Aksi durumda bazı belirsizliklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Örneğin topoğrafyanın Bouguer levhası olarak kabulünden dolayı Zugspitze'de birkaç desimetre dönüşüm hatası gözlenmiştir (Flury ve Rummel, 2009).

Jeoit ve quasi-jeoit dönüşüm değeri, normal ve ortometrik yükseklikler arasındaki fark ile temsil edilir. Helmert ortometrik yüksekliği kullanılıyor ise topoğrafya, kalınlığı nokta yüksekliğine eşit Bouguer levhası olarak dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım düz alanlar için uygunken, yüksek ve engebeli topoğrafyada ve yoğunluk değişimlerinin sık görüldüğü -jeolojik olarak karmaşık- bölgelerde göz ardı edilemeyecek hatalara neden olabilir (Tenzer ve diğ., 2005; Santos ve diğ., 2006; Flury ve Rummel, 2009; Sjöberg ve Bagherbandi, 2012).

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında analitik, sayısal veya hibrit modeller kullanılmaktadır. Analitik algoritmalara dayalı silindirik ve prizmatik yöntem literatürde en iyi bilinenlerdir. Nagy ve diğ. (1966, 2000, 2002) prizmatik bölümlemeyi silindirik bölümlemeden daha etkili bir yöntem olarak önermiştir. Çekim etkisi ayrıca nokta kitle (point mass), polihedral, tesseroid gibi diğer basit kitle elemanları yardımıyla da hesaplanabilmektedir (Pohanka, 1998; Tsoulis, 2001; Heck ve Seitz, 2007; Grombein ve diğ., 2013; D'Urso, 2014; Wild-Pfeiffer, 2008; Yang ve diğ., 2020). Sayısal hesaplama tekniği olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ise daha hızlı sonuç verir (Parker, 1973; Sideris; 1985, Forsberg, 1985; Kirby ve Featherstone, 1999; Tsoulis, 2001; McCubbine ve diğ., 2017; Gayol ve diğ., 2020). Tsoulis (2001) ise FFT tekniği ile prizma ve polihedron yöntemlerini karşılaştırmış, engebeli alanlarda FFT tekniğinin doğruluk bakımından yetersiz kaldığını bildirmiştir. Bir başka çalışmada, uzun hesap süresi gerektiren Gaussian yönteminin FFT'den daha gerçekçi sonuç verdiği raporlanmıştır (Hwang ve diğ., 2003).

Bilgisayarla hesaplamada etkin bir yöntem arayışından önce, silindir bölme yöntemi yaygın olarak kullanılmıştır. Literatürde bilinen Hayford ve Bowie (1912) ve Hammer (1939) 166.7 km (Rapp, 1961; Nowell, 1999; Ayhan ve Kahveci, 1991), Niethammer (1932) şablonu ise 40 km (Demirel, 1984) uzaklığa kadar farklı bölümlendirme seçenekleri sunmaktadır. Bu şablonlar zamanın jeodezik ve jeofizik amaçları için yeterli görülmüştür. Bilgisayarların kullanılmaya başlamasıyla birlikte daha hızlı hesap avantajı sunan tekniklere karşı yöntem uygulamada etkinliğini kaybetmiştir. Öte yandan, günümüzde topoğrafik düzeltmeler için 0.1 mGal gibi yüksek doğruluk aranması (örneğin Long ve Kaufmann, 2013) başta spektral yöntemlerin başarısının sorgulanmasına neden olmuştur (Gayol ve diğ. 2020). Yazılım ve donanım teknolojisindeki gelişmeler kadar yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerinin ortaya çıkması bu arayışın bir diğer nedenidir. Silindir bölme yöntemi mevcut şablonlardan çok daha fazla kompartman ve kuşak sayısı ile kullanılabilir. Bu yaklaşımla topoğrafyanın daha küçük silindir parçalarına bölümlenmesi doğruluğu arttıracak başlıca

etmendir. Örneğin, Capponi ve diğ. (2018) noktanın yakın çevresinin gravite üzerindeki etkisini göz önüne alarak, hesap noktası yakınında silindir bölme yöntemini uygulamıştır.

Güncel çalışmalar Hirt ve diğ. (2019), McCubbine ve diğ. (2017) ve Gayol ve diğ. (2020) yüksek çözünürlüklü SYM'leri topoğrafik düzeltme hesabında dikkate almıştır. Bu çalışmada özellikle hesap noktası civarındaki SYM çözünürlüğünün etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, noktanın yakın çevresinde; 1", 3" ve 15" çözünürlüklü farklı SYM'ler kullanılmıştır. Bu hesaplamada ayrıntılı SYM kadar uygulanan algoritma da önemlidir. Topoğrafyanın bölümlendirilmesinde mevcut standartlar yerine daha küçük silindirik kitleler öngörülmektedir. Hesap noktasının yakın çevresindeki bölümlendirmede boşluk riskini önlemek için yaklaşık 15 m çözünürlüğe kadar enterpolasyon uygulanacaktır.

2. GRAVİTE İNDİRGEMELERİ VE TOPOĞRAFİK DÜZELTMELER

a. Bouguer İndirgemesi

Bouguer indirgemesi Yeryüzündeki gravite ölçmesinin deniz seviyesindeki karşılığını bulmayı amaçlar. Sırasıyla topoğrafik kitle ve yükseklik indirgemesi olarak iki aşamalı uygulanır. Kavranabilirlik açısından ters sırada açıklanması daha uygun olur. Yükseklik indirgemesi, nokta ile deniz yüzeyi arasında kitle olmadığı varsayılarak ölçülen gravitenin jeoide taşınmasıdır ve boşlukta gravite indirgenmesi (δg_{SH}) olarak adlandırılır. Taşıma işlemi, Yeryüzü noktasından Taylor seri açılımıyla gravite değerinin aşağıya analitik uzanımı biçiminde gerçekleştirilir. Jeoit ve havada asılı kabul edilen ölçme noktası arasında çekül doğrultusu boyunca gravite düşey gradyen bilgisinin gerçek değerini belirlemek mümkün olmadığından, kuramsal olanı yani boşlukta normal gravite düşey gradyeni $\left(\frac{\partial \gamma}{\partial h}\right)$ hesap için yeterli görülmektedir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Torge ve Müller, 2012; Sanso ve Sideris, 2013). Boşlukta gravite indirgeme değeri (δg_{SH}), GRS80 elipsoidine göre ϕ enleminde bulunan bir nokta için;

$$\begin{aligned}\delta g_{SH} &= -\frac{\partial \gamma}{\partial h}H - \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 \gamma}{\partial^2 h}H^2 - \cdots \\ &= -(0.3087691 - 0.0004398\sin^2\phi)H \\ &\quad +7.2125x10^{-8}H^2 - \cdots \end{aligned} \quad (1)$$

eşitliği ile gösterilir. Hesap işleminde deniz seviyesinden olan yükseklik (*H*) metre alınırsa sonuç mGal çıkar.

Topoğrafya düzeltmesi ise, Bouguer plakası indirgemesi ile başlar ve basit Bouguer yaklaşımı olarak adlandırılır. Devamında topoğrafyanın düzensizliklerinin de dahil edilmesiyle tamamlanmış Bouguer indirgemesi gerçekleştirilir. Bouguer plakası, gravite ölçme istasyonuyla aynı yüksekliğe sahip, sonsuz yarıçaplı bir tam silindirdir. Yeryüzündeki bir *P* noktasında bu plakanın gravite etkisi (δg_B), Newton integralinin bu sonsuz yarıçaplı silindir için yazılmasıyla elde edilir;

$$\delta g_B = 2\pi G\rho H \quad (2)$$

G evrensel çekim sabiti ve ρ ise ortalama kitle yoğunluğudur. ρ değerinin 2.67 gr/cm^3 alınmasıyla;

$$\delta g_B = 0.1119H \quad (3)$$

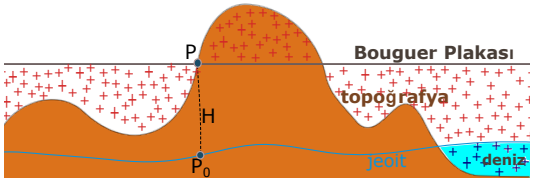
çıkar. Yüzeyde ölçülen gravite değerinin $(g_{P_{ölç}})$ jeoit üzerine indirgenmiş değeri;

$$g_{P_0} = g_{P_{ölç}} + \delta g_{SH} - \delta g_B \quad (4)$$

eşitliğiyle elde edilir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Torge ve Müller, 2012; Sanso ve Sideris, 2013). Ancak, topoğrafyanın gerçek şekli bir plaka değildir ve engebeli yapısından dolayı Bouguer plakasından farklılıklar gösterir. Plaka üzerinde kalan kitleler ve altında kalan boşluklar, *P* noktasında ölçülen gravite değerini Bouguer plakası ile olması gerekenden az gösterir. Gravite değerinin jeoit üzerindeki değeri, bu boşlukların doldurulması ve fazlalıkların traşlanmasıyla elde edilen ve daima pozitif olan gravite etkilerinin indirgenmesiyle sağlanır. Bu değerlerin toplamı (Şekil 1) topoğrafik düzeltme δg_{tc} olarak adlandırılır (Heiskanen ve Moritz, 1967). Bouguer indirgemesine topoğrafik düzeltmelerin ilave edilmesiyle tamamlanmış Bouguer indirgeme değerlerine ulaşılır. Böylece *P* noktası için jeoit üzerindeki gravite değeri atmosferik indirgemenin ihmal edilmesiyle;

$$g_{P_0} = g_{P_{ölç}} + \delta g_{SH} - \delta g_B + \delta g_{tc} \quad (5)$$

Bouguer'e göre elde edilir.



Şekil 1. Bouguer plakası ve topoğrafik düzeltmeler (Tüm topoğrafik düzeltmelerde + işareti kullanılırken batimetrik etki için mavi renkten yararlanılmıştır.).

b. Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanması

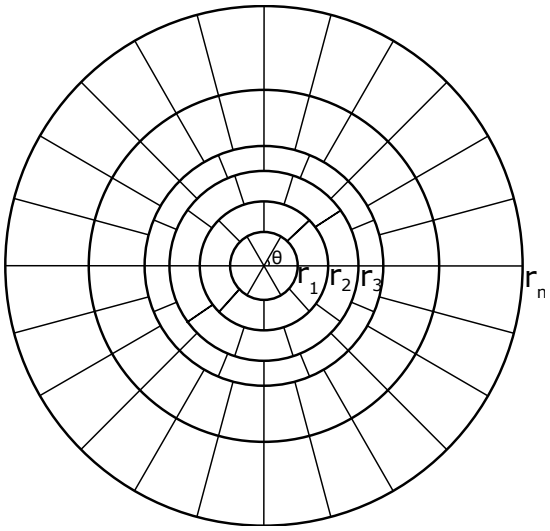
Topoğrafik düzeltme değerlerinin hesabında, işlem süresini, kullanılan SYM'nin çözünürlüğünü, doğruluğunu ve bilgisayar algoritmalarının güvenirliğini bir arada optimal olarak sağlamak günümüze kadar oldukça güç olmuştur. Ancak hesaplama tekniklerindeki yeni yaklaşımlar, uydu radar ve havadan lidar teknikleri ile sayısal yükseklik modellerine yüksek çözünürlükte ulaşılabilmesi ve bilgisayar bellek kapasitelerinin gelişmesi zor yükü oldukça hafifletmiştir.

Newton integraline göre çekim etkisinin düşey bileşeninin hesaplanması için topoğrafya çeşitli şekillerde küçük parçalara ayrılabilir. Bu bölümlendirme yönteminin ilk örneği silindir biçimli parçalama yöntemidir. Silindir bölme tekniği Hayford Bowie, Hammer vb. şablonlarla uygulanmıştır. Ancak bu şablonların bağımsız bileşenlerinin büyük hacimli olması topoğrafyanın ifadesinde yetersizliği beraberinde getirir. Günümüzde daha küçük silindir parçalarıyla (Capponi ve diğ., 2018) uygulanabilmektedir. Noktanın yakın çevresi için kullanılan bu yaklaşım ile silindir bölme yönteminin üstünlüğü kanıtlanmıştır. Ayrıca, prizmatik yaklaşımların aksine silindirik yöntemin matematiksel eşitlikleri logaritmik ifadeler içermez (Heiskanen ve Moritz, 1967). Bu sayede diğer analitik hesap yöntemlerine göre daha hızlı sonuç sağlar. FFT temelli sayısal yöntemler ise analitik yöntemlere göre daha hızlı olmalarına karşın engebeli yerlerde yüksek doğruluk beklentisini karşılamaz (Tsoulis, 2001). Ayrıca, noktanın yakın çevresinde yarıçapsal uzaklığın sıfıra yaklaşması durumunda silindir bölme yöntemi eşitliği hesaplamayı olanaklı kılarken, logaritmik ifadeler içeren diğer yöntemler söz konusu bölge için sonuç üretmez (Capponi ve diğ., 2018).

Topoğrafik düzeltme değerleri silindir bölme yöntemiyle hesaplanırken, topoğrafya halkalara ve her bir halka da θ açısal uzaklıklığına göre kompartmanlara bölünür. Silindirik halka aynı zamanda kuşak olarak isimlendirilebilir. Herhangi bir kuşak r_i iç yarıçap, r_{i+1} dış yarıçap ile tanımlıdır (Şekil 2). *H* kompartmanın ortalama yüksekliği, ρ topoğrafik yoğunluk değeri, G evrensel çekim sabiti olmak üzere topoğrafik düzeltme değeri;

$$g_{tc} = 2G\rho\frac{\pi}{\theta}[r_{i+1} - r_i - \sqrt{r_{i+1}^2 + H^2} + \sqrt{r_i^2 + H^2}] \quad (6)$$

eşitliğiyle her bir kompartman için hesaplanır (Heiskanen ve Mortiz, 1967; Olgun, 2017). Bir hesap noktası için oluşturulan tüm kompartmanların g_{tc} değerlerinin toplamı ise o noktadaki topoğrafik düzeltme değeridir.



Şekil 2. Hesap noktası merkezli *r* kuşak yarıçaplı ve θ açıklık açılı silindirik kitleler.

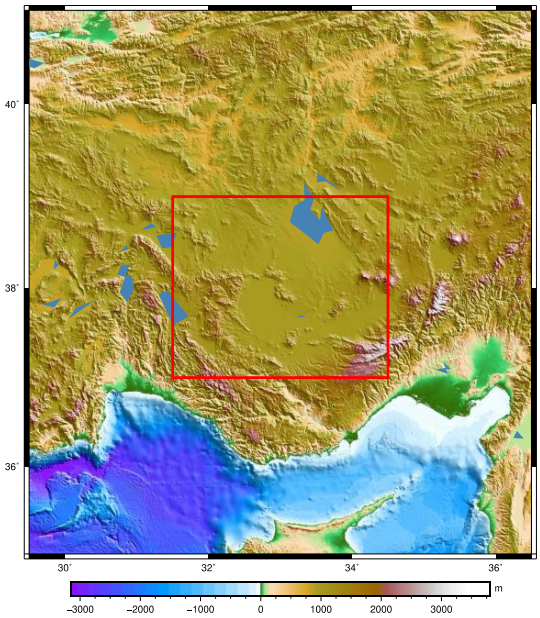
SYM'nin çözünürlüğü ve doğruluğu topoğrafik düzeltme değerinin doğruluğunu etkilemektedir. Düzeltme değerine en büyük katkı noktanın yakın çevresindeki yükseklik verisi ve bu verilerin detay özelliklerinden gelir (Long ve Kaufmann, 2013). Öte yandan, çözünürlük arttıkça hesap işlem hızında verimsizlik oluşur. Bu nedenle, noktanın yakın çevresi (iç bölge) için yüksek, geriye kalan dış bölge için daha düşük çözünürlük tercih edilir. Uzak bölge katkısının Hayford Bowie'nin O kuşağına karşılık gelen 166.7 km'ye kadar alınması yeterli görülmektedir (Bullard, 1936; LaFehr 1991; Hinze ve diğ., 2005).

3. UYGULAMA

a. Çalışma Bölgesi ve Veriler

Konya Kapalı Havzası, hem engebeli hem de düzlük alanlar içermesi yönünden topoğrafik düzeltme büyüklüklerinin incelenmesinde kolaylık sağlar. Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanacağı test bölgesi 31.5°-34.5° doğu boylamları, 37°-39° kuzey enlemleri arasındadır. Jeoit belirleme çalışmalarına örnek oluşturması ve yüksek çözünürlüklü topoğrafik düzeltme haritası elde edebilmek amacıyla 1' aralıklı grid noktalarında (toplam 21901) hesap işlemi yapılmıştır (Şekil 3). Bu noktalar en az 316 m, en çok 3206 m ve ortalama 1089 m topoğrafik yükseklikliğe sahiptir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, hesap noktası 166.7 km'lik (yaklaşık 1.5°'lik yarıçapsal uzaklık) silindir

şablon uzaklığı gerektirdiğinden kullanılacak SYM'nin batimetri bilgisini de içermesi gerekir.



Şekil 3. Topoğrafik ve batimetrik veriler için çalışma bölgesi ve hesap noktalarının sınırı (kırmızı renkte).

Topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında 1", 3" ve 15" çözünürlüklü, batimetrik verileri de içeren SYM'ler kullanılmıştır. Her üç model de aynı bölgeyi (Şekil 3) kapsamaktadır. Yükseklik verileri elde edilirken karasal alanlarda 1" (~ 30 m) çözünürlüklü SRTM1 (USGS EROS, 2018), batimetri bilgisi için ise 15" (~ 450 m) çözünürlüklü SRTM15+ (Olson ve diğ., 2016) kullanılmıştır. Batimetri verisinin kara verisiyle aynı çözünürlüğe getirilmesi bikübik enterpolasyon tekniğiyle sağlanmış ve ardından her iki model birleştirilmiştir. Enterpolasyon ve birleştirme işlemleri GMT yazılımı (Wessel ve diğ., 2019) yardımıyla yapılmıştır. Analiz için gerekli diğer iki model 1" çözünürlüklü referans modelin 3" ve 15" çözünürlüğe indirgenmesi yoluyla üretilmiştir. Bunun nedeni, hesaplamalarda model farklılığı etkisini en aza indirmek, sonuçları yalnızca çözünürlüğe göre yorumlamaktır.

b. Topoğrafik Düzeltmelerin Hesaplanması

Topoğrafik düzeltmeler, silindir bölme yöntemi ile iç ve dış bölge ayrı çözünürlüklerde olmak üzere iki farklı SYM yardımıyla hesaplanmıştır. Dış bölge için 15" çözünürlüklü model kullanırken, iç bölgenin çözünürlüğü üç farklı SYM (1", 3" ve 15") ile ayrı uygulanmıştır. Referans olarak kullanılan gravimetrik topoğrafik düzeltmeler iç bölge SYM çözünürlüğünün 1" olduğu modele aittir. 3" ve 15" iç model sonuçları referans değerlerle karşılaştırılmıştır.

Topoğrafya silindirik parçalara ayrılırken, geleneksel Hayford Bowie ve Hammer şablonlarından farklı olarak, doğruluğu arttırmak için daha küçük bölümlendirme boyutları tercih edilmiştir. Kuşak sınırlarının belirlenmesinde en yüksek 1" çözünürlüklü model göz önüne alınmıştır. Buna göre silindir şablon, ana halkalar ve onların içini sabit yarıçap artımlarıyla dolduran ara halkalardan oluşturulmuştur. Ana halkaların hesap noktasına uzaklığı arttıkça iç halkalar arasındaki yarıçapsal uzaklık değerleri de büyümektedir. Bölümlendirme biçimi, ana halkaların iç ve dış yarıçapları ve ara halka artış miktarları Tablo 1'de gösterilmektedir. Kompartman bölümlendirmeleri ise her bir iç halkanın çevresinin o halkalar arasındaki artım miktarına bölünmesiyle elde edilmiştir. Böylece büyük kiriş uzunluğunun, artım miktarındaki yarıçapsal uzaklık ile yakın değerde olduğu kompartmanlar elde edilmiş olur.

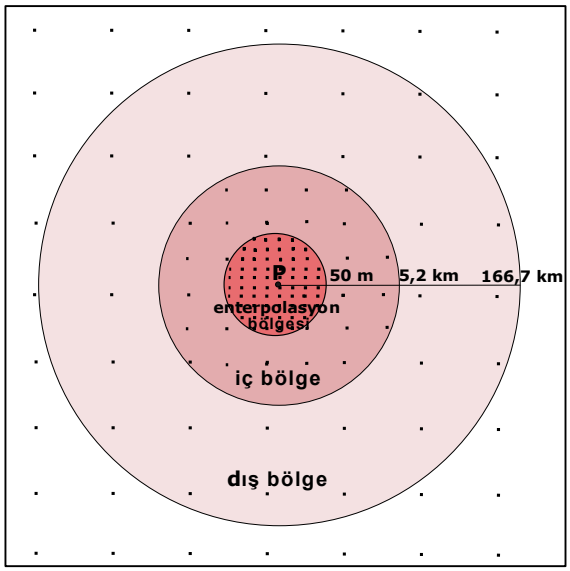
Tablo 1. Silindir bölümlendirmede ana ve ara kuşak yarıçap değerleri.

i	Ana kuşak		Ara kuşak yarıçap artımı (m)
	İç yarıçap (m)	Dış yarıçap (m)	
1	0.5	20	-
2	20	50	-
3	50	1500	50
4	1500	2600	100
5	2600	5200	200
6	5200	10700	550
7	10700	21700	1000
8	21700	51700	1500
9	51700	121700	2500
10	121700	166700	5000

Noktanın yakın çevresinin düzeltme değeri üzerindeki etkisinin en büyük olduğu bilgisinden hareketle 1" iç çözünürlüklü modelde ilk üç halka için (50 metre yarıçapsal uzaklığa kadar) ~30 metre grid aralığının yetersiz kalması ve boş kompartman gerçekleşmesi söz konusudur. Bundan sakınmak için en az 0.5" çözünürlüklü SYM gerekmektedir. Bu amaçla nokta çevresinde enterpolasyon bölgesi oluşturulmuş ve bikübik enterpolasyon ile grid sıklaştırılmıştır (Şekil 4).

Tüm iç SYM modellerinde enterpolasyonun etkisini anlamak için enterpolasyonlu ve enterpolasyonsuz topoğrafik düzeltme hesabı

yapılmıştır. İç bölgede daha düşük çözünürlüklü 3" ve 15" modellerde kayıp silindirik kitle olasılığı doğal olarak yüksektir. Üstelik boşluk riski enterpolasyon sınırı dışına taşar. Bu nedenle 3" (~ 90 m) için 2.5 km'ye kadar, 15" için 5 km'ye kadar 0.5" çözünürlüğünde enterpolasyon sağlanmıştır. Bu enterpolasyon sınırlarıyla, SYM çözünürlüğünün ara kuşak yarıçap artım değerinden küçük olması sağlanarak boş kompartman oluşumunun önüne geçilebilir. Tekrar hatırlatmak gerekirse, enterpolasyon SYM'ye topoğrafik detay kazandırmamakta, sadece boş silindirik kitle oluşmasını engellemektedir.



Şekil 4. Referans model için enterpolasyon bölgesi, iç ve dış silindirik bölge.

Topoğrafik düzeltmenin hesap yoğunluk değeri, deniz ve göl alanlarında 1.64 gr/cm^3, karasal bölgelerde ise 2.67 gr/cm^3 olarak sabit alınmıştır. Klasik düzlem yaklaşımlarından farklı olarak topoğrafik kitlelerin konumu elipsoidal coğrafi koordinatlarla (grid) temsil edilmiştir. Böylece koordinat dönüşümünden kaynaklı yüzey modeli hatalarının ve veri hazırlık aşamasının getireceği ek iş yükünün önüne geçilmiş olur. Bu hazırlık aşaması iç ve dış bölgeler için farklı yüzey modellerinin kullanımıyla daha da artmaktadır. Çoğu zaman dönüşüm işleminde gereken hazırlık süresi doğrudan coğrafi grid sisteminin kullanıldığı topoğrafik düzetme hesabı kadar sürmektedir.

c. Bulgular ve Tartışma

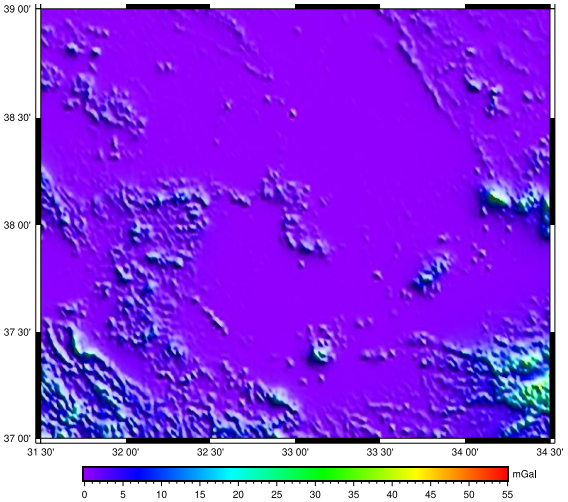
1'x1' aralıklı 21901 hesap noktasının her biri için 166.7 km'lik yarıçapsal uzaklığın içinde kalan yükseklik verisi hesaplamaya dahil edilmiştir. Her bir noktanın 5200 m yarıçapsal uzaklığına kadar (5. kuşağın sonu) yüksek çözünürlüklü, daha uzak kompartmanlarda ise daha düşük çözünürlüklü model kullanılmaktadır. Bu noktaların jeodezik koordinatları WGS84 sistemindedir. Hesap noktalarının deniz seviyesinden olan yükseklikleri SRTM 1 yay saniyesi sayısal yükseklik modelinden elde edilmiştir. Referans topoğrafik düzeltme modeli, 1" iç 15" dış çözünürlüklü ve ilk üç halka için 0.5" enterpolasyonu ile elde edilen sonuçlardır. 21901 nokta ile referans model için yapılan hesaplamada işlem süresi; Intel Xeon işlemcisi, 2.20 GHz CPU ve 32 GB RAM ile yaklaşık 1.5 saattir. Tablo 2'de sunulan düzeltmelerin dağılımı, Şekil 5'te haritalanmış ve Şekil 6'da histogram ile gösterilmiştir Beklendiği gibi, düzeltmeler düzlük alanlarda sıfıra yaklaşırken, engebeli arazide artmaktadır. En büyük topoğrafik düzeltme değerinin 50.68 mGal olduğu bu dağılımın ortalaması 1.74 mGal, standart sapması 3.02 mGal'dir. Dağılımın %90'ı için topoğrafik düzeltme 5 mGal'in altındadır. Daha düşük grid çözünürlüğünde hesap yükü azalacak, buna karşın gerçek yüzeyin detay kaybından kaynaklanan yaklaşım hataları artacaktır.

Tablo 2. 21901 noktanın farklı senaryolar altında hesaplanan topoğrafik düzeltme ve referans modelden olan fark (italik) istatistikleri (birim mGal).

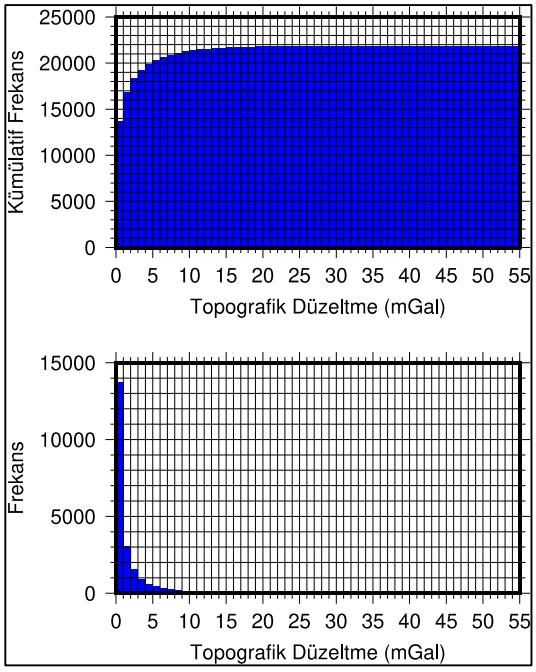
Model	Sonuç				
	Fark				
	Min.	Maks.	Ort.	RMS	Std. Sp.
Referans Model	0.06	50.68	1.74	3.49	3.02
iç grid 3" ve 0.5" enterpolasyon	0.05	50.42	1.72	3.47	3.01
	-1.43	*0.65*	*-0.01*	*0.05*	*0.05*
iç grid 3" ve enterpolasyonsuz	0.06	43.38	1.39	2.73	2.35
	-10.79	*0.00*	*-0.35*	*0.84*	*0.77*
iç grid 15" ve 0.5" enterpolasyon	0.06	48.83	1.64	3.31	2.88
	-6.21	*1.67*	*-0.10*	*0.30*	*0.28*
iç grid 15" ve enterpolasyonsuz	0.05	27.97	0.91	1.69	1.43
	-26.11	*0.04*	*-0.83*	*1.99*	*1.81*

İç çözünürlüğün 3" ve enterpolasyon bölgesinin 2500 metreye kadar oluşturulduğu çözümde referans çözüme yakın istatistik değerlerle karşılaşılmıştır. Ancak düzeltmelerin

referans değerlere göre küçük olduğu görülmektedir. Şekil 7 ile görselleştirilen farklar topoğrafya ile korelasyon ortaya koymaktadır. Farklar -1.45 ile 0.65 mGal arasında değişmektedir. Tek nokta içi nişlem süresi referans modelde 0.25 s iken bu modelde grid düğümlerinin azalmasıyla 0.01 saniyeye düşmektedir. 3" iç çözünürlüklü SYM'de enterpolasyon bölgesi oluşturulmaz ise fark en düşük -10.79 mGal'e gerilemektedir (ortalama sapma -0.35 mGal) (Şekil 8).

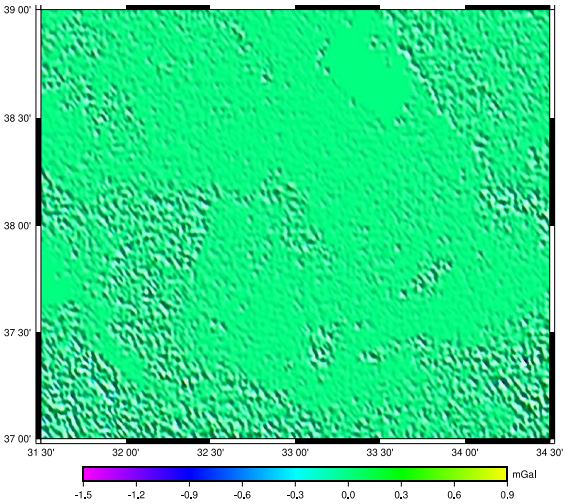


Şekil 5. Referans çözüm için topoğrafik düzeltme değerleri haritası.

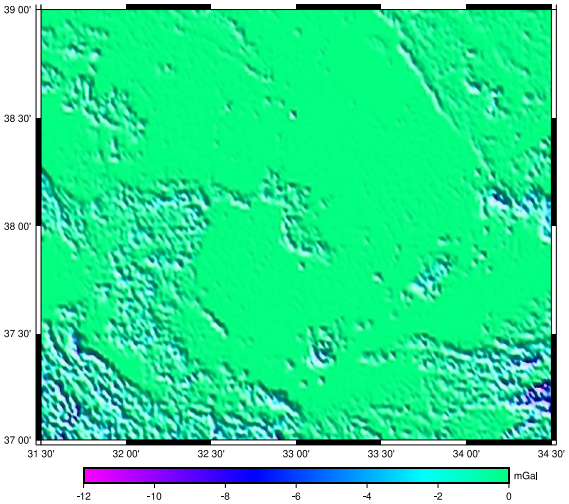


Şekil 6. Referans çözüm için topoğrafik düzeltme değerlerinin frekans dağılımları.

İç ve dış 15" çözünürlükle 5000 metreye kadar üretilen 0.5" aralıklı enterpolasyon bölgesiyle hesap işlemi boş kompartman olmadan sonuçlandırılmıştır. Topoğrafik düzensizliğe bağlı fark değerleri -6.21 ve 1.67 mGal aralığındadır (ortalama -0.10 mGal, Şekil 9).



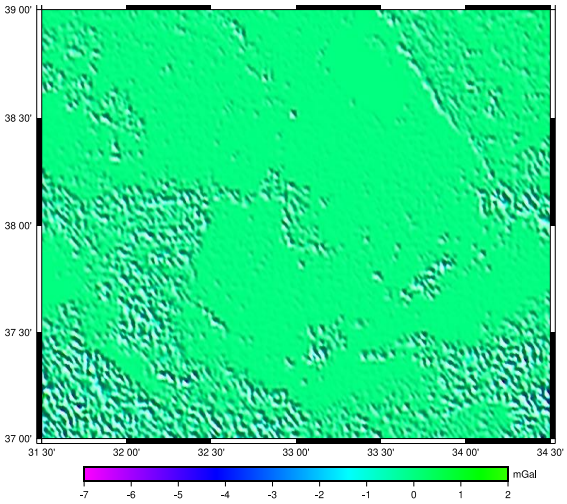
Şekil 7. Enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 3" iç ve 15" dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.



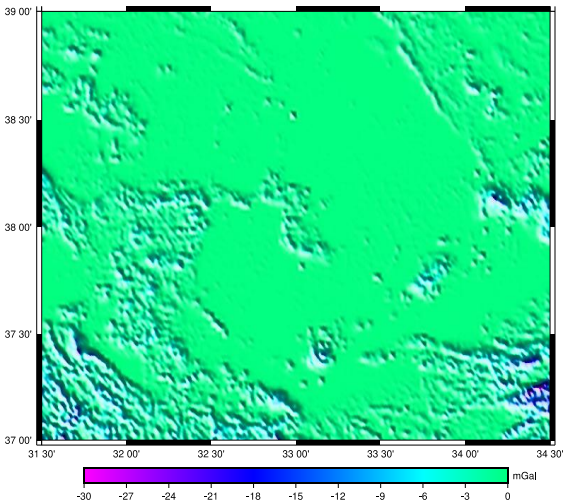
Şekil 8. Enterpolasyonsuz, 3" iç ve 15" dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.

SYM çözünürlüğünün azalması yakın çevredeki topoğrafik çekim etkisini daha belirginleştirmiştir. Her ne kadar enterpolasyon ile iç bölgede boşluk kalmayacak şekilde topoğrafya kesintisiz bir biçimde SYM'de temsil edilse bile topoğrafik detay 15" çözünürlüğünden daha iyi

değildir. Öte yandan enterpolasyonun yapılmadığı bir durumda bazı kompartmanlarda yükseklik verisinin bulunmaması nedeniyle farklar -26.11 mGal'e kadar çıkmıştır (ortalama -0.83 mGal). Şekil 10, farkların topoğrafya ile ilişkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 15" iç ve dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.



Şekil 10. Enterpolasyonsuz, 15" iç ve dış çözünürlüklü SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmelerin referans çözümden farkları.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, SYM'lerden hesaplanan topoğrafik düzeltmeler için iç grid çözünürlüğünün etkisi doğruluk yönünden araştırılmıştır. Sayısal uygulama ile iç bölgede 1", 3" ve 15" çözünürlüklü üç farklı SYM test edilmiştir. Topoğrafya silindirik kompartmanlara bölünerek kullanılmıştır. Topoğrafik düzeltme hesabı içinde hem geniş düzlüklerin hem de yüksek dağlık alanların bulunduğu Konya Kapalı Havzasında 1' grid aralığında 21901 noktada gerçekleştirilmiştir.

Nokta çevresinde enterpolasyon bölgesi (0.5" çözünürlüklü) oluşturulması durumunda 3" iç 15" dış çözünürlüklü SYM ile referans modelden en fazla -1.43 mGal kadar sapan düzeltme değerleri elde edilmiştir. Enterpolasyon oluşturulmaması durumunda, eksik silindirik kitlelerin etkisi -10.79 mGal'e yükselmektedir. 15" iç çözünürlüklü model için bu sapma değerleri sırasıyla -6.21 ve -26.11 mGal'e çıkmaktadır. 3" ve 15" iç çözünürlüklü model beklendiği gibi referans modele göre daha düşük topoğrafik detay içermektedir. Bu da hesaplanan potansiyel alanın konumsal çözünürlüğüne yansımaktadır. Sonuç olarak, hesap noktası yakın çevresinde enterpolasyon yapılmamasının ve iç bölge için 15" çözünürlüklü SYM yardımıyla topoğrafik düzeltme hesaplanmasının beklenenden oldukça küçük düzeltme değerleri vereceği ortaya çıkmaktadır. Farkların büyüklüğü doğrudan topoğrafyaya bağımlıdır. Jeodezik ve jeofizik uygulamalarda 3" SYM ve noktadan 2500 metrelik yarıçapsal uzaklığa kadar enterpolasyon bölgesi oluşturulması durumunda 1-1.5 mGal civarında bir kayıpla topoğrafik düzeltmelerin hesaplanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu istatistikler 1" iç ve 15" dış çözünürlüğe sahip SYM'lere göredir. Referans çözümde boş kitle elemanı oluşmasını önlemek için 50 metrelik yarıçapa kadar 0.5" enterpolasyon yapılması yeterli görülmüştür. Doğruluğun yanı sıra, tek bir nokta için işlem süresi 1" iç çözünürlüklü modelde 3" iç çözünürlüklüye göre 250 kat daha fazladır. Yapılacak çalışmanın niteliğine göre doğruluk ve hız ölçütleri değerlendirilerek kullanılacak iç çözünürlük belirlenebilir.

Uygulama sonuçlarından anlaşılacağı üzere topoğrafik düzeltmelerin hesaplanmasında noktanın yakın çevresi sonuçların doğruluğunda belirleyicidir. Düz yerlerde ortalama farklar 0.1 mGal değerinin altındadır. Bu yüzden iç model için çözünürlüğün engebeli topoğrafyada anlamlı olduğu açıktır. Günümüzde, SRTM1 ve ASTER1 gibi ulaşılabilir en yüksek çözünürlüklü küresel modellerin kullanımı gravite verilerinin indirgemesi çalışmalarında önemli bir veri seti oluşturmaktadır. Ayrıca, lidar verileriyle daha yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerin kullanımı gelecek çalışmaların konusu olacaktır.

Konya Kapalı Havzasında 50 mGal'e varan topoğrafik düzeltme değerleri elde edilmiştir. Ülkemizin engebeli ve yüksek coğrafyası nedeniyle, farklı bölgelerde yapılacak çalışmalarda daha büyük düzeltme değerlerine ulaşılacağı tahmin edilmektedir.

Yüksek lisans tezi araştırma konusu ile başlatılan ve bu çalışmada iyileştirilen algoritma; SYM çözünürlüğünün ve enterpolasyon yarıçapının seçiminde kullanıcıya esneklik sağlamaktadır. Ayrıca, 21901 noktada kısa sürede (en yüksek iç çözünürlükte yaklaşık 1.5 saat) uygulanabilmesi, silindir bölme yönteminin ve algoritmanın işlevselliğini ortaya koymaktadır. Hesaplamanın gerektiğinde tek bir nokta için doğrudan coğrafi grid yapılı sayısal yükseklik modeller üzerinden yapılması, düzlem için ayrıca SYM'nin yeniden gridleme gerektirmemesi önerilen yöntemin en önemli avantajıdır.

ORCID

Sevda OLGUN https://orcid.org/0000-0001-7082-2593
Aydın ÜSTÜN https://orcid.org/0000-0001-6449-2145

K A Y N A K L A R

Ayhan, M. E. ve Kahveci, M. (1991). Gravimetrik yerey düzeltmesinin Sayısal Arazi Modelinden yararlanarak hesabı. *Harita Dergisi,* 107, 1-24. Erişim adresi: https://www.harita.gov.tr/images/dergi/makaleler/a7bf3f5462cc820.pdf

Capponi, M., Mansi, A. H. ve Sampietro, D. (2018). Improving the computation of the gravitational terrain effect close to ground stations in the GTE software. *Studia Geophysica et Geodaetica, 62(2),* 206-222. doi: 10.1007/s11200-017-0814-3

Bullard, E. C. (1936). *Gravity measurements in East Africa: Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series A, 235, 445–534. doi: 10.1098/rsta.1936.0008

Demirel, H. (1984). *Yükseklik sistemleri ve nivelman sonuçlarının indirgenmesi*. Y.T.Ü. İnşaat Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Douglas, J. K. ve Prahl, S. R. (1972). Extended terrain correction tables for gravity reductions. *Geophysics, 37(2),* 377-379. doi: 10.1190/1.1440266

D'Urso, M. G. (2014). Analytical computation of gravity effects for polyhedral bodies. *Journal of Geodesy, 88(1),* 13-29. doi: 10.1007/s00190-013-0664-x

Flury, J. ve Rummel, R. (2009). On the geoid-quasigeoid separation in mountain areas. *Journal of Geodesy, 83(9*), 829-847. doi: 10.1007/s00190-009-0302-9

Forsberg, R. (1984). *A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modelling* (Rapor No. OSU/DGSS-355). Ohio: Ohio State Univ Columbus Dept Of Geodetic Science and Surveying.

Forsberg, R. (1985). Gravity field terrain effect computations by FFT. *Bulletin géodésique, 59(4),* 342-360. doi: 10.1007/BF02521068

Goyal, R., Featherstone, W. E., Tsoulis, D., ve Dikshit, O. (2020). Efficient spatial-spectral computation of local planar gravimetric terrain corrections from high-resolution digital elevation models. *Geophysical Journal International*, *221*(3), 1820-1831. doi: 10.1093/gji/ggaa107

Grombein, T., Seitz, K. ve Heck, B. (2013). Optimized formulas for the gravitational field of a tesseroid. *J. Geod*, *87*, 645-660. doi: 10.1007/s00190-013-0636-1

Hammer, S. (1939). Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics, 4(3),* 184–194. doi: 10.1190/1.1440495

Hammer, S. (1982). Critique of terrain corrections for gravity stations. *Geophysics, 47(5),* 839-840. doi: 10.1190/1.1441352

Hayford, J. F. ve Bowie, W. (1912). *Geodesy: the effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity*. Washington: US Government Printing Office.

Heck, B. ve Seitz, K. (2007). A comparison of the tesseroid, prism and point- mass approaches for mass reductions in gravity field modelling. *J Geod., 81(2)*, 121–136. doi: 10.1007/s00190-006-0094-0

Heiskanen, W. A. ve Moritz, H. (1967) *Physical geodesy* (1. baskı). San Francisco: Freeman.

Hinze, W. J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G. ve Kucks, R. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics, 70(4),* J25-J32. doi: 10.1190/1.1988183

Hirt, C., Yang, M., Kuhn, M., Bucha, B., Kurzmann, A. ve Pail, R. (2019). SRTM2gravity: an ultrahigh resolution global model of gravimetric terrain corrections. *Geophysical Research Letters, 46(9),* 4618-4627. doi: 10.1029/2019GL082521

Hwang, C., Wang, C. G. ve Hsiao, Y. S. (2003). Terrain correction computation using Gaussian quadrature. *Computers and geosciences, 29(10),* 1259-1268. doi: 10.1016/j.cageo.2003.08.003

Kirby, J. F. ve Featherstone, W. E. (1999). Terrain correcting Australian gravity observations using the national digital elevation model and the fast Fourier transform. *Australian Journal of Earth Sciences, 46(4),* 555-562. doi: 10.1046/j.1440-0952.1999.00731.x

Krynski, J. ve Lyszkowicz, A. (2006). *Centimetre quasigeoid modelling in Poland using heterogeneous data.* In IAG Proc. 1st International Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS): Gravity Field of the Earth, İstanbul.

Kuhn, M. (2003). Geoid determination with density hypotheses from isostatic models and geological information. *Journal of Geodesy, 77(1-2),* 50-65. doi: 10.1007/s00190-002-0297-y

LaFehr, T. R. (1991). Standardization in gravity reduction, *Geophysics*, 56, 1170–1178. doi: 10.1190/1.1443137

Long, L. T. ve Kaufmann, R. D. (2013). *Acquisition and analysis of terrestrial gravity data*. Cambridge: Cambridge University Press.

Martinec, Z. (1998). *Boundary-Value Problems for Gravimetric Determination of a Precise Geoid*, *Lecture Notes in Earth Sciences, 73*, Springer.

McCubbine, J. C., Featherstone, W. E. ve Kirby, J. F. (2017). Fast-Fourier-based error propagation for the gravimetric terrain correction. *Geophysics, 82(4),* G71-G76. doi:10.1190/geo2016-0627.1

Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, *31*(2), 362-371. doi: 10.1190/1.1439779

Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2000). The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy*, *74*(7-8), 552-560. doi: 10.1007/s001900000116

Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2002). Corrections to" The gravitational potential and its derivatives for the prism". *Journal of Geodesy, 76(8)*, 475-475. doi: 10.1007/s00190-002-0264-7

Nowell, D.A.G. (1999). Gravity terrain corrections – an overview, *Journal of Applied Geophysics*, 42, 117-137. doi: 10.1016/S0926-9851(99)00028-2

Niethammer, T. (1932). *Nivellement und Schwere als Mittel zur Berechnung wahrer Meereshöhen*. Bern: Schweizerische Geodätische Kommission.

Olgun, S. (2017). *Topoğrafik düzensizliklerin ortometrik yüksekliklere etkisinin farklı çözünürlüklü SYM ve silindirik şablonlar yardımıyla araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Olson, C. J., Becker, J. J. ve Sandwell, D. T. (2016). SRTM15_PLUS: Data fusion of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) land topography with measured and estimated seafloor topography (NCEI Accession 0150537). Erişim Adresi: https://catalog.data.gov/dataset/srtm15-plus-data-fusion-ofshuttle-radar-topography-mission-srtm-landtopography-with-measured-

Parker, R. L. (1973). The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International, 31(4),* 447-455. doi: 10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x

Pohánka, V. (1998). Optimum expression for computation of the gravity field of a polyhedral body with linearly increasing density. *Geophysical Prospecting, 46(4),* 391-404. doi: 10.1046/j.1365-2478.1998.960335.x

Rapp, R. H. (1961). The orthometric height: Master of Science Thesis, Dept. Of Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

Sanso, F. ve Sideris, M.G. (2013). *Geoid determination: theory and methods*. Springer Science and Business Media.

Santos, M. C., Vanícek, P., Featherstone, W. E., Kingdon, R., Ellmann, A., Martin, B. A. ve Tenzer, R. (2006). The relation between rigorous and Helmert's definitions of orthometric heights. *Journal of Geodesy, 80(12),* 691-704. doi: 10.1007/s00190-006-0086-0

Sideris, M. G. (1985). A fast Fourier transform method for computing terrain corrections. *Manuscripta geodaetica, 10(1),* 66-73. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/profile/Michael_Sideris/publication/234038995_A_Fast_Fourier_Transform_method_for_computing_terrain_correction/links/58cc4328a6fdcc5cccb98acb/A-Fast-Fourier-Transform-method-for-computing-terrain-correction.pdf

Sjöberg, L. E. ve Bagherbandi, M. (2012). Quasigeoid-to-geoid determination by EGM08. *Earth Science Informatics, 5(2),* 87-91. doi: 10.1007/s12145-012-0098-7

Sjöberg, L. E. ve Bagherbandi, M. (2017). *Gravity inversion and integration.* İsviçre: Springer International Publishing AG.

Tenzer, R. (2004). Discussion of mean gravity along the plumbline. *Studia Geophysica et Geodaetica, 48(2*), 309-330. doi: 10.1023/B:SGEG.0000020835.10209.7f

Tenzer, R., Vaníček, P., Santos, M., Featherstone, W. E. ve Kuhn, M. (2005). The rigorous determination of orthometric heights. *Journal of Geodesy, 79(1-3),* 82-92. doi: 10.1007/s00190-005-0445-2

Tenzer, R., Hirt, C., Novak, P., Pitonak, M. ve Sprlak, M. (2016). Contribution of mass density heterogeneities to the quasigeoid-to-geoid separation. *Journal of Geodesy, 90(1),* 65-80. doi: 10.1007/s00190-015-0858-5

Torge, W. ve Müller, J. (2012). *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.

Tsoulis, D. (2001). Terrain correction computations for a densely sampled DTM in the Bavarian Alps. *Journal of Geodesy, 75(5-6),* 291-307. doi: 10.1007/s001900100176

Tziavos, I. N., Vergos, G. S. ve Grigoriadis, V. N. (2010). Investigation of topographic reductions and aliasing effects on gravity and the geoid over Greece based on various digital terrain models. *Surveys in geophysics, 31(1),* 23. doi: 10.1007/s10712-009-9085-z

USGS EROS. (2018) Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Erişim Adresi: https://earthexplorer.usgs.gov

Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. ve Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools Version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. doi:10.1029/2019GC008515.

Wild-Pfeiffer, F. A. (2008). Comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *J. Geod.*, *82*, 637-653, doi:10.1007/s00190-008-0219-8

Yang, M., Hirt, C. ve Pail, R. (2020). TGF: A New MATLAB-based Software for Terrain-related Gravity Field Calculations. *Remote Sens., 12(7)*, 1063. doi: 10.3390/rs12071063