



Buzul İzostatik Dengeleme (GIA) ve Horseshoe Adası'nda (Batı Antarktika Yarımadası) Bulunan Yükselmiş Basamaklı Kıyı Yapılarının Önemi

Mehmet Korhan Erturaç

Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz
Bilimleri Enstitüsü
erturac@gtu.edu.tr

Giriş

Dünyamız tarihi boyunca önemli değişiklikler geçirmiştir, bunlardan, nispeten genç dönemlerdeki, en belirginini ise sıcak-soğuk dönem döngüleridir. Buzul Çağı olarak adlandırdığımız, günümüze göre soğuk dönemlerde, yüzlerce metre kalınlıktaki buz kütleleri ilerleyerek Kuzey Yarımküre'de önemli alanları örtmüş, günümüzdeki buzul arası dönemlerde de eriyerek Kuzey Kutup Dairesi'nde kalan kara alanlarına (Kanada Kuzeyi ve Grönland gibi)

çekilmişlerdir. Bu sürecin bir sonucu olarak okyanuslarda deniz seviyesi ~120 m düşmüş ve yer yüzeyi buzullaşan bölgelerde devasa bir yüke maruz kalmıştır. Buzul çağlarındaki bu kütle değişimleri, kabuk üzerindeki yükü artırmış, yerin çekim alanını ve dönüş hızının dahi değişmesiyle sonuçlanmıştır [1].

Günümüzde Antarktika Kıtası'nın büyük bir kısmı ortalama kalınlığı 1.9 km olan buzul örtüsü, kıyı alanları ise buz sahanlıkları ile kaplı durumdadır. Son buzul arası dönem olan Holosen'den itibaren başlayan buzullarda gerileme ve incelmeye günümüz küresel iklim krizi nedeniyle hızlandığı ortaya konulmaktadır [2, 3]. Kıta genelinde buz sahanlıklarının son 25 yıl içerisinde %1.9 alan kaybettiği bulgulanmıştır [4].

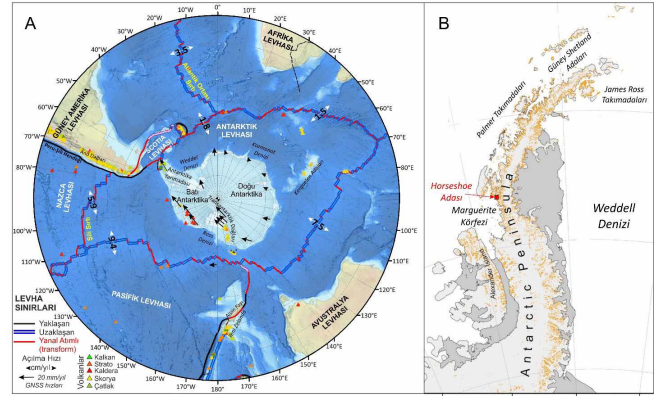
Buzul örtüsündeki bu değişimin doğrudan iki etkisi bulunmaktadır. (I) Antarktika kıtası izostatik olarak kalın buzul örtüsü altında baskılanmaktadır, bu düşük yüzlerce metrelik genlik ve binlerce kilometre dalga boyuna sahip baskılamaya gezegenimizin (katı yerküre, kütleçekim alanı ve okyanusların) cevabı günümüzde önde gelen araştırma sorularından birisidir [1]. Antarktika'daki buzul örtüsünün tamamen kalkması durumunda kıtanın 936 metre yükseleceği modellenmektedir [5]. (II) buzul ve buz sahanlıklarının erimesi deniz seviyesinin yükselmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Antarktik buzul örtüsünün tamamen erimesi sonucu deniz seviyesi yükselmesine +58 m katkı sağlayacağı modellenmiştir [6].

Buzul İzostatik Dengeleme (GIA)

Buzul İzostatik Dengeleme (Glacial Isostatic Adjustment, GIA) küresel buzul örtülerinin ilerlemesi ve gerilemesi ile kara alanlarında gerçekleşen santimetre mertebesinde hızla yükselme ve/veya çökmeyi açıklar [1]. Yer üzerindeki etkileri küresel olan GIA, buzul örtülerinin geri çekilmesinden binlerce yıl sonra bile gözlemlenen bir doğa olayıdır. Örneğin Kuzey Avrupa'da geçmişte buzul örtüsü altında kalan çoğu alan bugün 1 cm/yıl hızla yükselmektedir, bunun sonucu olarak İsveç'te bir liman kenti olan Östhammar sürekli yükselme nedeniyle kıyı gerisinde kalmış ve 1491 yılında taşınmıştır.

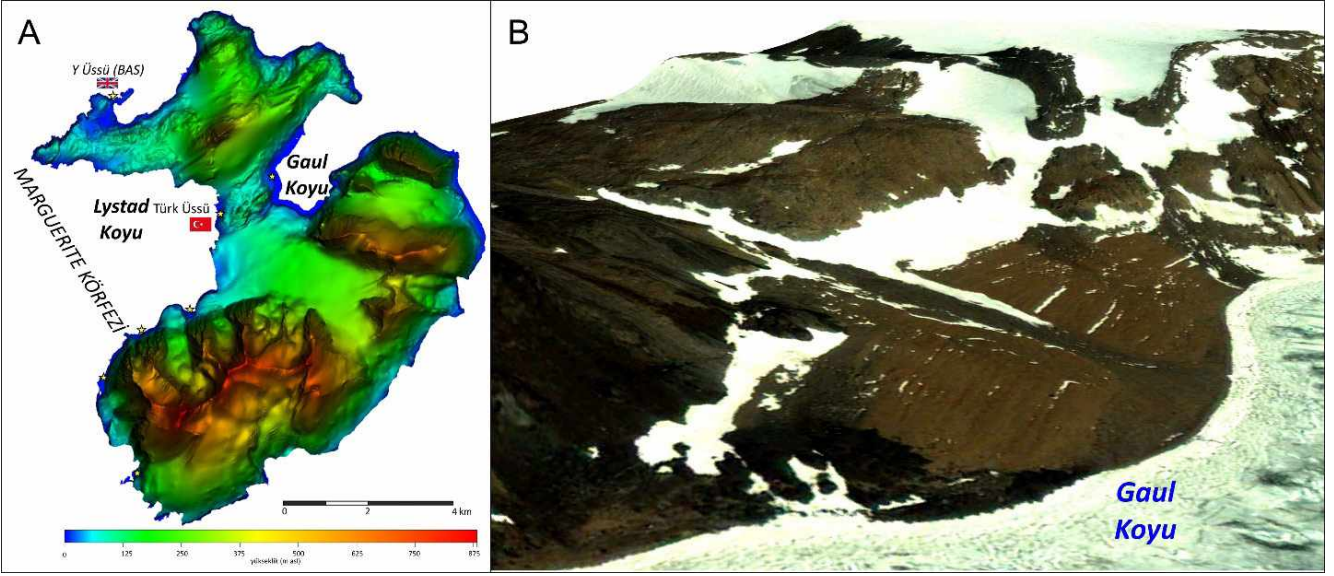
Antarktika'da (Şekil 1A) Son Buzul Maksimum

(~21 bin yıl) döneminin sonlanmasından itibaren gerçekleşen buzul örtüsünün gerilemesi, kara alanında belirgin yükselmeye neden olmaktadır [7, 8]. Holosen boyunca Antarktika Yarımadası'nda buzul gerilemesinin tarihçesi üzerine hipotezler, ilerleyen (zaman içerisinde artan) ya da salınımlı (artan-azalan) yükselme öngörmektedir [9]. Bu modeller manto vizkozitesi ve kabuk kalınlığı ile doğrudan ilgilidir. GIA modelleri, kıyı alanlarında bulgularan fosilleşmiş göreceli deniz seviyesi belirteçleri (RSL) kullanılarak oluşturulmuş ve günümüzde de sürekli GNSS ölçümleri ile geliştirilmektedir. Antarktika yarımadası ve çevresinde (Şekil 1B) (Güney Shetland Adaları ve Marguerite Körfezi kıyılarında) yükselmiş deniz seviyesi belirteçleri yaygın olarak bulunmaktadır [10, 11, 12, 13, 14]. Bu mutlak ölçümler ve tarihlendirme sonuçları kıtadaki sürekli GNSS ölçümleri ile birlikte değerlendirilerek bölgesel buzul örtüsü kaybı, yükselme ve GIA modellenmektedir [1, 5, 15, 16, 17].



Şekil 1 A. Antarktika Kıtası'nın tektonik konumu **B.** Antarktika Yarımadası içerisinde Horseshoe Adasının konumu (buzul ile örtülü olmayan alanlar sarı ile gösterilmiştir).

Antarktik Yarımadası'nda ilk kıyıların Holosen içerisinde (9.6 bin yıl önce) [12] açığa çıktığı bulgulanmıştır. Antarktika'da yükselme ve buzul gerilemesi etkileşiminin (karaya oturma çizgisi) Holosen içerisinde karmaşık bir ilişkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur [8, 15]. Geniş alanlarda zaman ve mekan içerisinde farklılaşmış yükselmenin anlaşılabilmesi için kıta boyunca mümkün olduğunca çok RSL belirtecinin tanımlanması, ölçümünün ve tarihlendirmesinin yapılması gerekmektedir [7, 12, 15].



Şekil 2 A. Horseshoe Adası'nın detay topografyası (REMA) ve B. Gaul Koyu kıyısında gözlenen ve basamaklı geometri sunan depolanmalı yerşekillerinin Google Earth görüntüsünden eğik görünümü

Horseshoe Adası'ndan GIA modellerine katkı

Türk Antarktik Bilimsel Araştırma Üssü'nün yer aldığı Batı Antarktika Yarımadası Marguerite Körfezi'nde yer alan Horseshoe Adası'nda (Şekil 2A) önceki gözlemlerde ve yayınlarda [10] bulgularan ve geçmiş deniz seviyesini işaret eden depolanmalı ve aşınmalı kıyı yer şekilleri yaygın olarak bulunmaktadır. Bu yapılar adanın doğusunda Gaul Koyunda, batı güneybatısında ve kuzeyinde gözlenmektedir (Şekil 2B).

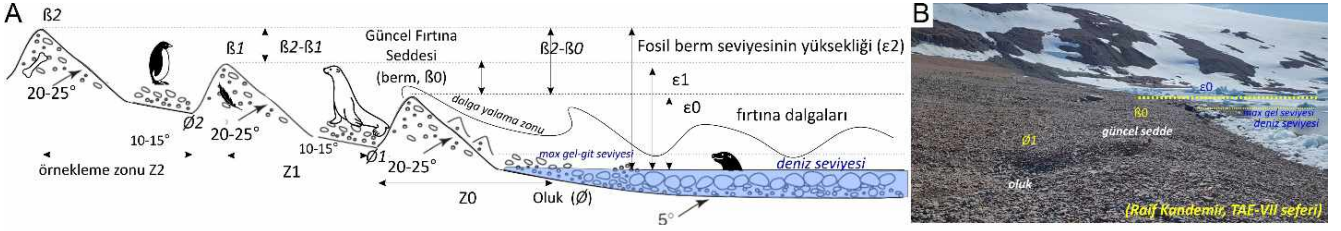
Ön saha gözlemlerinde (TAE-VII, Raif Kandemir) Gaul koyu özelinde kıyından 170 m karaya uzanan ve ~25 metre yüksekliğe ulaşan, ~16 sedde-oluk basamaklanması bulgulanmıştır (Şekil 3).

Kıyı alanlarında geçmiş deniz seviyesi belirteçleri kapsamlı olarak sınıflandırılmış ve yönergeleri tanımlanmıştır [18]. Buna göre kıyı depolarının ya da yapılarının kullanılabilir RSL kaydı olarak değerlendirilebilmesi için öncelikle detaylı olarak tanımlanması, depolanma ortamının belirlenmesi ve güncel karşılığı ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu aşamadan sonra fosil RSL belirtecin ve güncel karşılığının yüksekliklerinin hassas olarak ölçülmesi, karşılaştırılması ve mutlak yöntemlerle tarihlendirilmesi ile ilgi alanda RSL kaydı kurulabilir [10, 11, 15, 18].

Şekil 4A da yüksek enerjili bir kıyı ortamında hipotetik fırtına seddesi (berm) basamaklanması sunulmaktadır [18; 19]. Buna göre seddele-



Şekil 3 Gaul koyunun batıdan doğuya bakış ile görünümü ve basamaklı çökel sırtların dizilimi



Şekil 4 A Yükselen kıyılarda basamaklanmalı fırtına seddelerinin geometrisi ve hipotetik oluşum modeli. **B** Gaul Koyu aktif fırtına seddesinin görünümü

rin deniz yönündeki yamaçları 20-25° arasında eğim sunmakta ve plaj yüzünde bu eğim 10-15° olmaktadır. Bu sınıflamaya göre fosil β2 seddesinin deniz seviyesinden yüksekliği $\epsilon 2$, modern analogundan göreceli yüksekliği ise $\beta 2-\beta 0$ olarak tanımlanır. Bu morfodinamik model içerisinde Gaul Koyu kıyısındaki güncel fırtına seddesinin görünümü Şekil 4B'de sunulmaktadır. Çakıl köken kayacının pembe renkli metagranitler olduğu bilinmektedir [20] ve boyutlarının ortalama 5-10 cm ve düşük olgunluğa sahip oldukları görülmektedir.

TAE-VIII kapsamında yürütülecek saha çalışması ile bu yapıların sedimantolojik ve geometrik özellikleri detaylandırılacaktır. Bu yapıların oluşturan morfodinamikler güncel karşılıkları gözetilerek ortaya konulması hedeflenmektedir. Saha çalışmaları sırasında kıyı çizgisi boyunca ortalama deniz seviyesi ve en yüksek gel seviyesine yönelik jeomorfolojik kanıtlar da belirlenecektir.

Bu tanım içerisinde odak bölgelerdeki hedef kıyı yapılarının hassas olarak haritalanması gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak saha gözlemleri ve ölçümleri ile alçak irtifa İHA uçuşları elde edilecek sayısal hava fotoğraflarının fotogrametrik değerlendirilmesi ile nokta bulutları, ortofotoğraflar ve sayısal yüzey modelleri üretilmesi planlanmaktadır. Bu verilerin değerlendirilmesi ile hedef yer şekillerinin yükseklikleri, genişlikleri, çakıl yönelimleri, yüzey eğim değişimleri vb bilgiler elde edilecektir.

Taraça çökellerinin depolanma ve yüzeyleme tarihçesinin anlaşılması

Çalışmanın yaklaşımının en önemli bileşenlerinden birisi Horseshoe adasının yüksek enerjili kıyılarında depolanmış kaba taneli çökellerden oluşan basamaklı yapıların oluşum zamanları-

nın ortaya konulmasıdır. Kuzey ve güney kutup dairelerinde ve Antarktika özelinde yapılan çalışmalarda mutlak radyokarbon [10] ve model tarihlendirme yöntemlerinden kozmojenik yüzey tarihlendirmesi [12,21] ve lüminesans protokolleri [13,14,22,23,24] başarıyla uygulanmış ve zaman içerisinde deniz seviye değişimini gösteren RSL eğrileri elde edilmiştir. Bu tarihlendirme yöntemlerden herbirinin kendine ait avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında da Horseshoe Adası'ndaki yükselmiş kıyı çökellerinin oluşum zamanının anlaşılması için, lüminesans (OSL), kozmojenik radyonüklid yüzey tarihlendirme (CRN) ve radyokarbon tarihlendirme teknik, yaklaşım ve protokolleri kullanılacaktır. Uygulama alanının morfodinamik özgünlüğü, örnekleme (saha çalışması) öncesi ve sırasında her bir yöntemin yaklaşımına uygun bir strateji geliştirilmesini gerektirir.

Çalışma kapsamında elde edilecek her verinin karşılıklı değerlendirilmesi ile kıyı basamaklanmasının oluşum tarihçesi ve Horseshoe Adası özelinde RSL eğrilerinin oluşturulması hedeflenmektedir.

Katkı Belirtme

Mavi Gezegen Kutup Araştırmaları özel sayısı için tanıtılan bu çalışma, T.C. Cumhurbaşkanlığı himayesinde, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde ve TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Kutup Araştırmaları ve Uygulama Merkezi koordinasyonunca 2024 yılında gerçekleştirilecek 8. Antarktika Bilim Seferi (TAE-VIII) kapsamında 122G261 kodlu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Whitehouse P. L. Glacial isostatic adjustment modeling: historical perspectives, recent advances, and future directions. *Earth Surface Dynamics*, 6(2), 401-429, 2018.
- [2] Shepherd A., Ivins E., ... (IMBIE Teams). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017". *Nature*, 558 (7709): 219–222, 2018.
- [3] Stammerjohn S. E. ve Scambos T. A. Warming reaches the South Pole. *Nature Climate Change*. 10 (8): 710–711, 2020.
- [4] Greene C. A., Gardner A. S., Schlegel N. J. ve Fraser A. D. Antarctic calving loss rivals ice-shelf thinning. *Nature*, 609(7929), 948-953.24, 2022.
- [5] Paxman Guy J. G., ... "Inference of the Timescale Dependent Apparent Viscosity Structure in the Upper Mantle Beneath Greenland." *AGU Advances* 4.2,e2022AV000751, 2023.
- [6] Slater T., Hogg A. E. ve Mottram R. Ice-sheet losses track high-end sea-level rise projections. *Nature Climate Change*. 10 (10): 879–881, 2020.
- [7] Verleyen E., Hodgson D. A., Milne G. A., Sabbe K. ve Vyverman W. Relative sea-level history from the Lambert Glacier region, East Antarctica, and its relation to deglaciation and Holocene glacier readvance, *Quaternary Res.*, 63, 45–52, 2005.
- [8] Kingslake J., Scherer R. P., Albrecht T., Coenen J., Powell R. D., Reese R., ... ve Whitehouse P. L. Extensive retreat and re-advance of the West Antarctic Ice Sheet during the Holocene. *Nature*, 558(7710), 430-434, 2018.
- [9] Ivins E. R., Raymond C. A. ve James T. S. The influence of 5000 year-old and younger glacial mass variability on present-day crustal rebound in the Antarctic Peninsula. *Earth Planets and Space* 52, 1023–1029, 2000.
- [10] Bentley M. J., Hodgson D. A., Smith J. A. ve Cox N. J. Relative sea level curves for the south Shetland islands and marguerite bay, Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 24(10-11), 1203-1216, 2005.
- [11] Fretwell P. T., Hodgson D. A., Watcham E. P., Bentley M. J. ve Roberts S. J. Holocene isostatic uplift of the South Shetland Islands, Antarctic Peninsula, modelled from raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 29(15-16), 1880-1893, 2010.
- [12] Bentley M. J., Johnson J. S., Hodgson D. A., Dunai T., Freeman S. P. H. T. ve Cofaigh C. Ó. Rapid deglaciation of Marguerite Bay, western Antarctic Peninsula in the early Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 30(23-24), 3338-3349, 2011.
- [13] Simms A. R., DeWitt R., Kouremenos P. ve Drewry A. M. A new approach to reconstructing sea levels in Antarctica using optically stimulated luminescence of cobble surfaces. *Quaternary Geochronology*, 6, 50–60, 2011.
- [14] Simms A. R., Bentley M. J., Simkins L. M., Zurbuchen J., Reynolds L. C., DeWitt R. ve Thomas E. R. Evidence for a "Little Ice Age" glacial advance within the Antarctic Peninsula—Examples from glacially-overrun raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 271, 107195, 2021.
- [15] Johnson J. S., Venturelli R. A., Balco G., Allen C. S., Braddock S., Campbell S. ve Woodward J. Existing and potential evidence for Holocene grounding line retreat and readvance in Antarctica. *The Cryosphere*, 16(5), 1543-1562, 2022.
- [16] Pittard M. L., Whitehouse P. L., Bentley M. J. ve Small D. An ensemble of Antarctic deglacial simulations constrained by geological observations. *Quaternary Science Reviews*, 298, 107800, 2022.
- [17] van der Wal W., Barletta V., Nield G. ve van Calcar C. Glacial isostatic adjustment and post-seismic deformation in Antarctica. *Geological Society, London, Memoirs*, 56, 315-341, 2022.
- [18]. Rovere A., Raymo M. E., Vacchi M., Lorscheid T., Stocchi P., Gomez-Pujol L., ... ve Hearty P. J. The analysis of Last Interglacial (MIS 5e) relative sea-level indicators: Reconstructing sea-level in a warmer world. *Earth-Science Reviews*, 159, 404-427, 2016.
- [19] Oxford J. D., Forbes D. L. ve Jennings S. C. Organizational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48(1-3), 51-85, 2002.
- [20] Matthews D. W. The geology of Horseshoe and Lagotellerie Islands, Marguerite Bay, Graham Land. *British Antarctic Survey Bulletin* 52, 125–154, 1983.
- [21] Rhee H. H., Lee M. K., Seong Y. B., Hong S., Lee J. I., Yoo K. C. ve Yu B. Y. Timing of the local last glacial maximum in Terra Nova Bay, Antarctica defined by cosmogenic dating. *Quaternary Science Reviews*, 221, 105897, 2019.
- [22] Simkins L. M., DeWitt R., Simms A. R., Briggs S. ve Shapiro R. S. Investigation of optically stimulated luminescence behavior of quartz from crystalline rock surfaces: a look forward. *Quaternary Geochronology*, 36, 161–173, 2016.
- [23] Souza P. E., Sohbaty R., Murray A. S., Clemmensen L. B., Kroon A. ve Nielsen L. Optical dating of cobble surfaces determines the chronology of Holocene beach ridges in Greenland. *Boreas*, 50, 606–618, 2021.
- [24] Hong S., Lee M. K., Seong Y. B., Owen L. A., Rhee H. H., Lee J. I. ve Yoo K. C. Holocene sea-level history and tectonic implications derived from luminescence dating of raised beaches in Terra Nova Bay, Antarctica. *Geosciences Journal*, 25(3), 283-