



**Son 1500 Yıl Boyunca Ege Denizi'ndeki Tsunamilerin Sedimanter İzleri,**  
**(Karine Lagünü, B-Türkiye)**  
*Sedimentary Traces of Tsunamis in the Aegean Sea During the Last 1500 Years,*  
*(Karine Lagoon, W Turkey)*

**Ulaş Avşar\*** 

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Ankara*

Geliş/Received : 28.03.2019 • Düzeltilmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received : 26.06.2019 • Kabul/Accepted : 27.06.2019 • Baskı/Printed : 31.08.2019

*Araştırma Makalesi/Research Article*

*Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey*

**Öz:** Yüksek enerjili tsunami dalgaları kıyıya yakın sığ bölgelere yaklaştıkça dalga yüksekliği artarak, deniz suyu karasal alanlara doğru tırmanır/ilerler, ve bu ilerleme sırasında yakın kıyı, kıyı önü ve kumsaldan ciddi miktarda sediman karaya doğru taşınır. Normal koşullar altında, alçak ve ince bir kum bariyeri ile denizden ayrılan bir lagün görece sakin bir çökelim ortamına sahipken, tsunami sırasında deniz suyu kum bariyerini aşarak lagünün iç kısımlarına yakın kıyı, kıyı önü ve kum bariyere ait sedimanları taşır. Bu nedenle, lagünlerdeki sedimanter istiflerin araştırılması, geçmişte meydana gelmiş tsunamilerin sedimanter izlerinin bulunmasında önemli rol oynar. Bu çalışmada, Karine Lagünü'nden alınan yaklaşık 3,2 m uzunluktaki iki adet karot boyunca sedimanların fiziksel ve jeokimyasal özellikleri incelenmiş, ve Ege Denizi'nde geçmişte meydana gelmiş tsunamilerin izleri araştırılmıştır. ITRAX mikro-XRF karot tarayıcısı kullanılarak, karotlar boyunca 0,2 mm çözünürlükte radyografik görüntüleme ve 1 mm çözünürlükte XRF taraması yapılmıştır. Yapılan bu yüksek çözünürlüklü analizler ışığında, görece homojen ve bazen ince tabakalanmalı istifin içinde, iki karotta da belirgin bir şekilde gözlenen, yüksek yoğunluğa sahip ve heterojen yapıda üç adet ara katman tespit edilmiştir. XRF verileri incelendiğinde, bu ara katmanlardaki Ca/Ti değerlerinin belirgin bir şekilde istifin geri kalanından daha yüksek olduğu, yani ara katmanların karbonatça zengin olduğu görülmüştür. Stereo mikroskop ile yapılan incelemelerde, istifin genelini temsil eden seviyelerde çökellerin genellikle 1 cm'den küçük bozuşmamış bivalv kavkuları içerdiği, buna karşın ara katmanların ise çapları yaklaşık 4 cm'yi bulan ve yüzeylerinde belirgin bozuşma izleri olan bivalv kavkuları içerdiği görülmüştür. Fiziksel ve jeokimyasal gözlemler birlikte değerlendirildiğinde, görece iri taneli ve bozuşmaya uğramış bivalv kavkuları içeren bu ara katmanların, tsunamiler sırasında lagünün kum bariyerinden taşınan tsunami çökelleri olduğu sonucuna varılmıştır. Radyokarbon tarihlendirmeleri, Karine Lagünü'ndeki üç adet ara katmanın M.S. 1956, 1650 ve 1303 yıllarındaki tsunamilerden kaynaklandığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Karine Lagünü, karot radyografisi, ITRAX mikro-XRF tarayıcı, radyokarbon, paleotsunami.

**Abstract:** As high energy tsunami waves reach shallow near-shore environments, the height of the waves increases and sea water propagates towards the land. During this movement, significant amounts of sediment are transported inland from the nearshore, foreshore and beach. While a lagoon that is separated from the sea by a low, thin sand barrier has a relatively calm depositional environment under normal conditions, during a tsunami the sea water climbs over the sand barrier and deposits material from the nearshore, foreshore and sand barrier onto inner parts of the lagoon. This phenomenon is the reason why investigation of sedimentary sequences in lagoons reveals the sedimentary traces of past tsunamis. In this study, the physical and geochemical properties of sediments in two ca. 3.2 m-long cores collected from Karine Lagoon on the coast of Aydın-Söke (western Turkey) were investigated in order to determine the traces of past tsunamis in the Aegean Sea. An ITRAX micro-XRF scanner was used to obtain 0.2 mm-resolution radiographic images and 1mm-resolution XRF data from the cores. High-resolution analysis

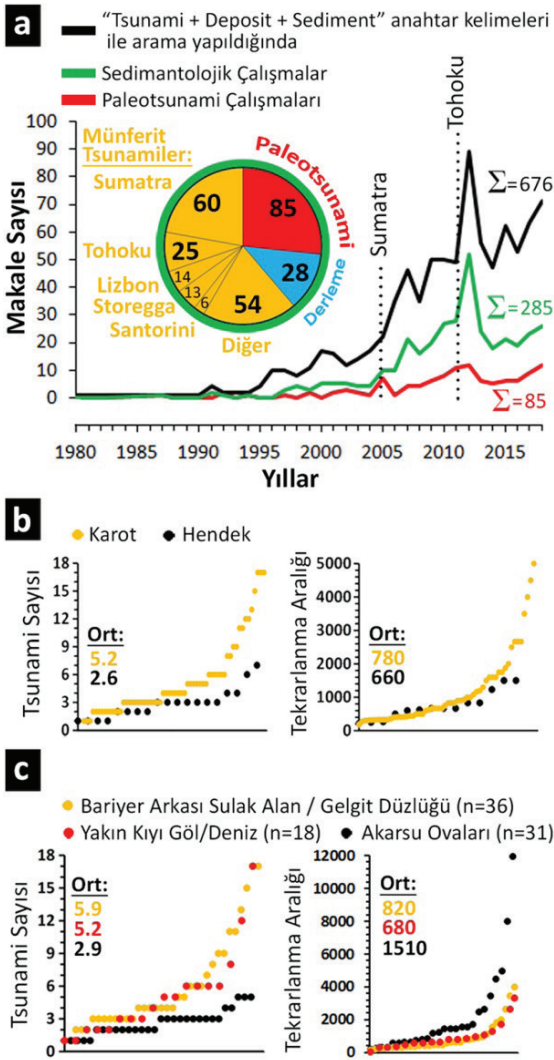
*detected three heterogeneous and high-density intercalations within the relatively homogenous and occasionally laminated background sediments. XRF data revealed that these intercalations had significantly higher Ca/Ti values compared to the background sediments, i.e. they were rich in carbonates. Observation under a stereo-microscope determined that while the background sediments contained fresh bivalve shells smaller than 1 cm in diameter, the intercalations contained weathered/broken bivalve shells approximately 4 cm in diameter. Considering the physical and geochemical observations together, it was concluded that the intercalations containing relatively coarser and intensely-weathered bivalve shells are deposits that were transported from the sand barrier of the lagoon during tsunamis. Radiocarbon dating shows that three intercalations in the sequence of Karine Lagoon were deposited during the tsunamis, from AD 1956, 1650 and 1303.*

**Keywords:** Karine Lagoon, core radiography, ITRAX micro-XRF scanner, radiocarbon, paleotsunami.

## GİRİŞ

Pasifik Okyanusu'nu çevreleyen dalma-batma zonları ile karakterize edilen Pasifik Ateş Çemberi'nde tsunami tehlikesi farkındalığının yüksek olmasına karşın, benzer sismik kaynakları barındıran Ege Denizi ve Akdeniz'e kıyısı olan ülkemizde, tsunami tehlikesine yönelik paleotsunami araştırmaları oldukça sınırlıdır. Yakın geçmişte, sırasıyla 230.000 ve 15.270 kişinin hayatını kaybettiği (ITIC, 2018) 2004 Sumatra (Endonezya) ve 2011 Tohoku (Japonya) tsunamileri bizlere, tsunamilerin insan hayatını nasıl tehdit edebileceğini tekrar hatırlatmıştır. Günümüzde, sismolojik ve jeodezik çalışmalara ek olarak depremlerin jeolojik kayıtlarını inceleyen paleosismik verilerden de destek alan sismik tehlike analizleri başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Ancak bunu tsunami tehlike analizleri için söylemek pek mümkün değildir. Bir bölgede geçmişte meydana gelmiş tsunamilerin jeolojik kayıtlarının bulunması, tarihlendirilmesi ve karakteristik bir tekrarlanma aralığının olup olmadığının anlaşılması, tsunami tehlike analizleri için oldukça önemlidir. Ancak, geçmiş tsunamilerin jeolojik izlerini inceleyen ve tsunami tehlike analizlerinde kullanılacak nitelikte paleotsunami kronolojisi sunan çalışmalarının sayısı oldukça azdır.

“Tsunami + Deposit + Sediment” anahtar kelimeleri ile “Web of Science” sitesinde bir arama yapıldığında, yıllara göre dağılımı Şekil 1a'da gösterilen, toplam 676 adet makale bulunmaktadır. 2004 Sumatra ve 2011 Tohoku tsunamilerinin hemen ardından gözlenen makale sayısı artışı dikkat çekicidir. Bu çalışmalardan; jeofizik ölçümler, tsunami dalgası tırmanma ve ilerleme modellemeleri, sediman taşınma modellemeleri gibi çalışmalar çıkarıldığında ise, tsunami çökellerinin sedimantolojik özelliklerini inceleyen makale sayısı 285'e düşmektedir. Bunların içinde yalnızca 85 adedi birden fazla tsunami çökelinin tespit edildiği ve tarihlendirildiği paleotsunami çalışmalarıdır. 85 adet paleotsunami ve 28 adet sedimantolojik derleme makalesinin dışındaki 172 makale ise; Sumatra, Tohoku, Lizbon, Storegga ve Santorini gibi güncel ya da iyi bilinen tarihsel tsunamilerin çökelleri üzerine yapılan araştırmaları sunmaktadır. Dünya çapında son 4000 yılda tarihsel kayıtlara girmiş 2640 adet tsunami olmasına karşın (NCEI/WDS, 2019), literatürde yalnızca 85 adet paleotsunami makalesi olması, bilim dünyası olarak tsunamileri anlamak için önümüzde daha ne kadar uzun bir yol olduğunun göstergesidir.



**Şekil 1. a)** "Web of Science" sitesinde yapılan arama sonucunda; tsunami çalışmaları ile ilgili makale sayılarının yıllara göre dağılımı (siyah eğri), bunların içinde tsunami çökellerinin sedimentolojik özelliklerine odaklanan makalelerin yıllara göre dağılımı (yeşil eğri), ve paleotsunami çalışmalarını sunan makalelerin yıllara göre dağılımı (kırmızı eğri). Paleotsunami çalışmaları tüm çalışmaların yalnızca %12'sini oluşturmaktadır (www.webofknowledge.com). **b)** Hendek açarak ya da örselenmemiş karot örnekleri olarak yapılan paleotsunami çalışmalarında tespit edilen tsunami sayısı ve tekrarlanma aralığı dağılımı. **c)** Farklı kıyusal çökelim ortamlarında yapılan paleotsunami çalışmalarında tespit edilen tsunami sayısı ve tekrarlanma aralığı dağılımı. (b) ve (c)'de sunulan grafiklerde, çalışmaların sonuçları x-ekseni

boyunca düşük değerlerden büyük değerlere doğru sıralanarak sunulmuştur.

**Figure 1. a)** Distribution of tsunami-related articles with respect to year in the "Web of Science" database (black line), distribution of the number of articles in which the main focus is sedimentological investigation (green line), and the distribution of articles presenting paleotsunami chronologies (red line). Note that paleotsunami studies constitute only 12% of the overall tsunami-related studies (www.webofknowledge.com). **b)** Comparison of coring vs. trenching methods based on the number of detected tsunamis and their mean recurrences per study. **c)** Comparison of different coastal depositional environments based on the number of detected tsunamis and their mean recurrences per study. In (b) and (c), the results of previous studies are presented along the x-axis sequentially from lower to higher values.

Yüksek enerjili tsunami dalgaları kıyıya yakın sığ bölgelere yaklaştıkça dalga tabanı deniz tabanına dokunmaya başlar. Bu durum, dalga hızının ve genişliğinin azalmasına neden olurken, dalga yüksekliğinin artması ve böylece tsunami dalgasının karasal alanlara doğru tırmanması/ ilerlemesi (overwash) ile sonuçlanır. Bu ilerleme sırasında yakın kıyı, kıyı önü ve kumsaldan ciddi miktarda sediman kıyı ardı karasal alanlara taşınır. Geri çekilme (backwash) sırasında ise kıyı ardı karasal ortamlardan yakın kıyı ve kıta sahanlığına sediman taşınımı gerçekleşir. İlerleme ve geri çekilme sırasındaki buna benzer sediman yer değiştirmelerinin kıyusal çökelim ortamlarındaki sedimanter istiflerde bıraktığı izler paleotsunami araştırmalarının ana konusunu oluşturmaktadır. Dolayısı ile, lagünlerde (Kelsey vd. 2005; Donato vd. 2009; Peterson vd. 2011; May vd. 2012a; Jackson vd. 2014; Avşar, 2019), gelgit düzlüğü sulak alanları ve göllerinde (Sawai vd. 2009; Dura vd. 2015; Kempf vd. 2015, 2017; Baranes vd. 2016), bariyer arkası sulak alanlarda (Clark vd. 2011; Peterson vd. 2011; May vd. 2012b), akarsu ovalarında (Vött vd. 2011; Alpar vd. 2012; Papadopoulos vd. 2012; Kitamura vd. 2013), ve yakın kıyı çökelim ortamlarında (van den Bergh

vd. 2003; Goodman-Tchernov vd. 2009; Gutiérrez-Mas vd. 2009; Smedile vd. 2011; Tyuleneva vd. 2018) yapılmış birçok paleotsunami çalışması mevcuttur.

Kıyasal çökelim ortamlarındaki paleotsunami amaçlı sedimantolojik araştırmalar, istiflerde hendek açarak ya da örselenmemiş karot örnekleri olarak yapılmaktadır. Şekil 1b, karot ve hendek yöntemleri ile yapılmış çalışmalarda tespit edilen tsunami sayısı ve elde edilen tekrarlanma aralığı değerlerini karşılaştırmaktadır. Herbir çalışma için, çalışılan istifin zamansal uzunluğunun tespit edilen tsunami sayısına bölümü ile ortalama tsunami tekrarlanma aralığı elde edilmiştir. Karot yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda daha yüksek sayıda tsunami tespit edilmiş olmasına rağmen, tekrarlanma aralığı açısından iki yöntem arasında belirgin bir fark yoktur. Hendek çalışmalarında genel olarak, yeraltı su seviyesinden daha derin hendekler açılmamaktadır. Bu nedenle, kıyasal alanlardaki yüksek yeraltı su seviyesi hendek derinliğini ve dolayısıyla incelenen istif kalınlığını (maksimum 3-4 m) ve zamansal uzunluğunu kısıtlayabilmektedir. Ancak, karot yönteminde yeraltı suyu bir problem yaratmadığı için daha kalın (10-15 m) ve dolayısıyla zamansal olarak daha uzun istifler incelenebilmektedir. Bu farklılık, karot yönteminde hendek yöntemine kıyasla daha fazla sayıda tsunaminin tespit edilmiş olmasına rağmen tekrarlanma aralığı açısından ciddi bir fark görülmemesinin muhtemel sebebi olarak düşünülebilir. Benzer şekilde, farklı kıyasal çökelim ortamları da Şekil 1c’de karşılaştırılmıştır. Akarsu ovalarında yapılan çalışmalarda tespit edilen tsunami sayısının belirgin bir şekilde daha düşük olduğu ve tekrarlanma aralıklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Akarsu ovaları ile karşılaştırıldığında, sulak alanlarda erozyon etkisinin daha az olması nedeni ile daha düzenli ve kesintisiz sedimanter istiflerin bulunması beklenir. Bu iki karşılaştırmanın sonucunda, yakın kıyı göl/deniz ortamlarında ve bariyer arkası/gelgit düzlüğü sulak alanlarında karot alma

yöntemi kullanılarak yapılacak çalışmalar ile daha başarılı paleotsunami kayıtları elde edilebileceği çıkarımı yapılabilir. Bu açıdan bakıldığında, özellikle lagünlerin paleotsunami araştırmaları için oldukça değerli sedimanter ortamlar olduğu düşünülmektedir.

Paleotsunami çökelleri, kıyasal istiflerdeki sedimanların fiziksel, mikropaleontolojik ve jeokimyasal özelliklerinde zamana bağlı değişimlerin incelenmesiyle tespit edilir (Röbke ve Vött, 2017). Bir tsunami sırasında, yüksek enerjili su baskını nedeni ile görece sakin bir çökelim ortamına (örn. bariyer arkası sulak alana) aniden daha kaba-taneli sediman ulaşması ve çökmesi beklenir. Bu beklenti, tane-boyu dağılım ölçümlerini paleotsunami araştırmalarında en yaygın kullanılan yöntem haline getirmiştir (Nanayama vd. 2007; Smedile vd. 2011; Razjigaeva vd. 2014; Dura vd. 2015; Graehl vd. 2015). Ayrıca, bir tsunami sırasında denizden karaya sediman taşındığı düşünülürse, tatlı/acı su türlerinin baskın olduğu karasal sucul bir istif içinde arakatmanlar olarak tuzlu su türleri ile karşılaşılması beklenir. Sedimanların içindeki diatom (Goff vd. 2011; Dura vd. 2015; Graehl vd. 2015), foraminifer (Mamo vd. 2009; Bertrand vd. 2011; Pilarczyk ve Reinhardt 2012; Mathes-Schmidt vd. 2013; Fischer vd. 2016) ve ostrakod (Ruiz vd. 2010; Mischke vd. 2012) topluluklarını inceleyerek eski tsunamilerin izlerini tespit eden birçok çalışma mevcuttur. Jeokimyasal çalışmalara ise fiziksel ve mikropaleontolojik çalışmalardan daha az rastlanmaktadır. XRF ölçümlerine dayanan birçok çalışma, tsunami çökellerinin Sodyum (Na), Klor (Cl), Kalsiyum (Ca), Stronsiyum (Sr) ve Magnezyum (Mg) gibi genellikle karbonatlar ile ilişkili elementlerce zengin olduğu gözlemini yapmıştır (Vött vd. 2009; Chagué-Goff, 2010; Chagué-Goff vd. 2011, 2017; Ramirez-Herrera vd. 2012; Mathes-Schmidt vd. 2013; Baranes vd. 2016). Bu çalışmalar kıyıdaki karasal çökel istiflerine aniden denizel kökenli karbonatların (minerojenik ya da biyojenik) arakatman olarak



girdiğini göstermektedir. Bunların aksine, Avşar (2019) Ölüdeniz Lagünü'ndeki tsunami çökellerinin Titanyum (Ti), Demir (Fe), Potasyum (K) gibi karasal kökenli elementlerce zengin olduğunu bulmuştur. Jeokimyasal veri sunmasalar da, Kempf vd. (2015, 2017) Şili'deki ve Wagner vd. (2007) Doğu Grönland'daki kıyısız göllerin istiflerinde tsunami kaynaklı ani karasal sediman girişleri tespit etmişlerdir.

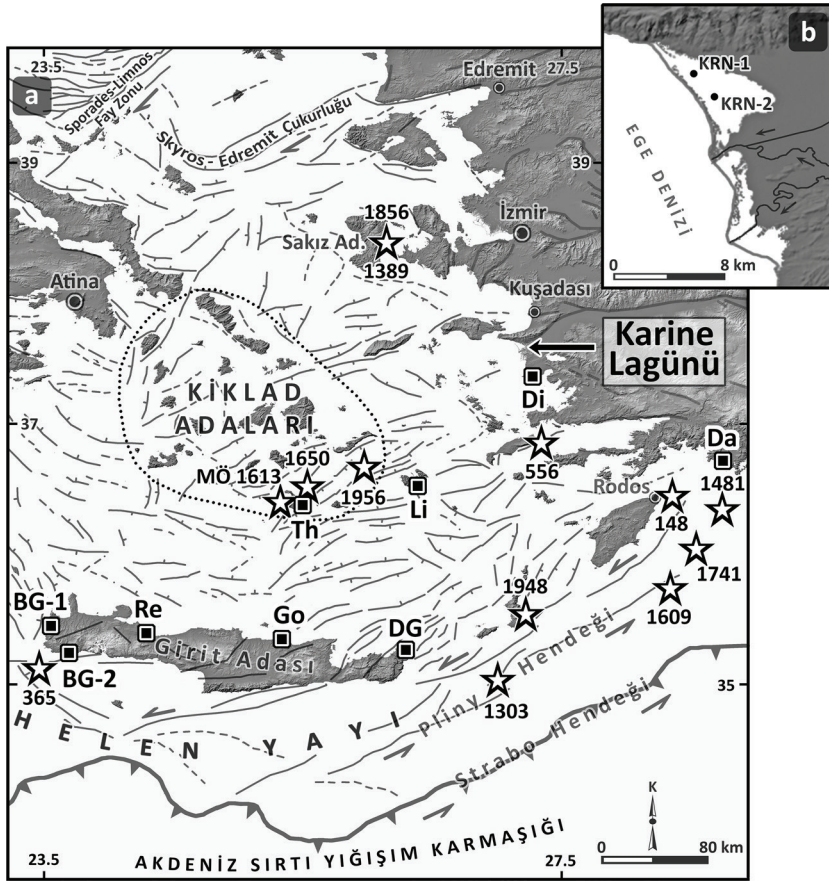
Bu çalışma, Ege Denizi'nin doğu kıyısında yer alan Karine Lagünü'nün sedimanter istifinden alınmış iki adet örselenmemiş karot örneği boyunca yapılan mikro-XRF taramaları ve sediman radyografisi analizlerinin sonuçlarını sunmakta, ve karotlar boyunca tespit edilen sedimanter olayların Ege Denizi'ndeki tarihsel tsunamiler ile olan muhtemel ilişkisini tartışmaktadır.

## ÇALIŞMA ALANI

Ege Denizi ve Batı Anadolu, Helen Yayı ardındaki Kuzey-Güney yönlü gerilme sisteminden kaynaklı birçok normal faya ev sahipliği yapmaktadır (Şekil 2a) (Emre vd. 2011; Sakellariou ve Tsampouraki-Kraounaki 2019). Tarihsel kayıtlar, bölgede son 3600 yılda şiddeti altının üzerinde olan (Papadopoulos ve Imamura, 2001'in 12 kademeli Tsunami Şiddet Ölçeği'ne göre) tsunamiler tetiklemiş 13 adet deprem olduğunu göstermektedir (Papadopoulos vd. 2014, Şekil 2a'daki yıldızlar). Bu tarihsel bilgilerin yanında, bölgede dokuz adet lokasyonda eski tsunamilerin sedimanter izlerine rastlanmıştır (Şekil 2a'daki kareler). Didim ile Gouves'de (Şekil 2a'daki "Di" ve "Go"; Minoura vd. 2000), ve Palaikastro'da (DG; Bruins vd. 2008) yapılan çalışmalar, Santorini Adası'nda M.Ö. 1613 ± 13'de meydana gelen Minos patlaması tarafından tetiklenen tsunaminin (Santorini Tsunamisi) izlerini sunmaktadır. Girit'de (BG-

2; Werner vd. 2018), Thera'da (Th; Dominey-Howes vd. 2000a) ve Livadia'da (Li; Dominey-Howes vd. 2000b) yapılan çalışmalar da sırası ile M.S. 365, 1650 ve 1956 yıllarında meydana gelmiş tsunamilerin sedimanter kayıtları ile ilgili bilgiler sunmaktadır. Münferit tsunamilerin izleri hakkında olan bu çalışmalar haricinde, bölgede birden fazla tsunaminin izlerini tespit etmeyi başaramamış çalışmalar yalnızca üç adet lokasyonda mevcuttur. Pirazzoli vd. (1992)'nin ve Scheffers ve Scheffers (2007)'nin Batı Girit'de (Şekil 2a'daki "BG-1") yaptıkları çalışmalarda G.Ö. 5660, M.S. 66, M.S. 365, ve M.S. 1500'e tarihlenen dört adet tsunami bulunmuştur. Yine Girit'de, Werner vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada (Şekil 2a'daki "Re") Santorini Tsunamisi'nin ve M.S. 365 tsunamisinin izleri bulunmuştur. Alpar vd. (2012) ve Papadopoulos vd. (2012) tarafından Dalaman Ovası'nda (Şekil 2a'daki "Da") yapılan çalışmalarda ise Doğu Helen Yayı'nda 1303, 1481 ve 1741 yıllarında meydana gelen depremler tarafından tetiklenen tsunamilerin izleri bulunmuştur.

Ege Denizi'nin Doğu kıyılarında yer alan Karine Lagünü (37.59 K, 27.18 D), tsunami dalgalarının kolaylıkla aşabileceği bir kum bariyeri (yaklaşık 250 metre genişlikte ve maksimum 1,5 metre yükseklikte) ile Ege Denizi'nden ayrıldığı için, bölgedeki tsunamilerin sedimanter kayıtlarının incelenmesi için ideal bir hedef saha olarak kabul edilebilir. Büyük Menderes Nehri'nin denize ulaşan kollarının bulunduğu orta ve güney kısımlarda oldukça dinamik sedimantasyon koşulları olması nedeni ile, lagünün görece daha sakin olan kuzey kısmından karot alınması uygun görülmüştür (Şekil 2b). Karotlar alınmadan önce yapılan batimetrik ön araştırmalar sırasında, lagün tabanının oldukça düz ve su derinliğinin 2,0-2,5 metre civarı olduğu görülmüş ve detaylı bir batimetrik harita hazırlanmasından vazgeçilmiştir.



**Şekil 2.** a) Karine Lagünü'nün konumu ve deniz sismliği araştırmaları sonucunda Ege Denizi'nde haritalanmış aktif faylar (Sakellariou ve Tsampouraki-Kraounaki (2019)'dan değiştirilerek alınmıştır). Batı Anadolu'daki aktif faylar ise Emre vd. (2011)'den alınmıştır. Devamlı çizgiler varlığı kesin olan fayları, kesik çizgiler muhtemel fayları, fay çizgilerine dik kısa çizgiler ve üçgenler tavan bloğu, ok işaretleri ise doğrultu atım yönünü göstermektedir. Yıldızlar tsunami tetiklediği bilinen tarihsel depremlerin yaklaşık merkez üssü konumlarını (Papadopoulos vd. 2014), kareler ise bölgede tespit edilmiş paleotsunami çökellerinin konumlarını göstermektedir (Detaylı bilgi ve kaynakça için metne bakınız). b) Karine Lagünü'nün yakından görünümü ve karot lokasyonları (KRN-1 ve KRN-2).

**Figure 2.** a) Location of Karine Lagoon and active faults in the Aegean Sea based on marine seismic surveys (modified from Sakellariou and Tsampouraki-Kraounaki, 2019). The active faults in western Anatolia are taken from Emre et al. (2011). Continuous lines indicate active faults, dashed lines are probable faults, ticks and triangles on the faults mark hangingwall blocks, and half-arrows show the direction of strike-slip activity. Stars show the approximate epicenter of historical tsunamigenic earthquakes (Papadopoulos et al., 2014); while squares show the location of paleotsunami studies (See text for details and references). b) Close-up view of Karine Lagoon and coring locations (KRN-1 and KRN-2).

## MALZEME ve YÖNTEM

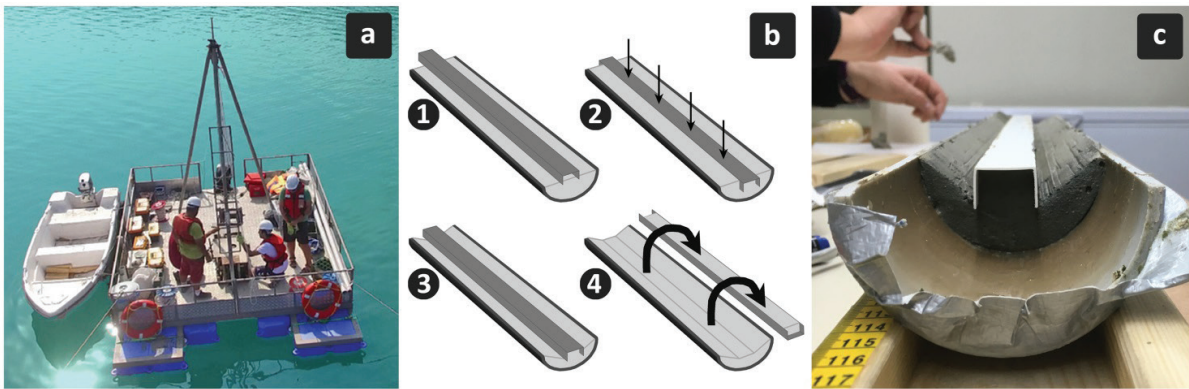
Bu çalışma kapsamında yapılan piston karot alma işlemleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne ait 5,5x4,5 m boyutlarında ve 2500 kg çekme kapasitesine sahip yüzer araştırma platformu kullanılarak yapılmıştır

(Şekil 3a). Konumları Şekil 2b'de gösterilen ve uzunlukları 327 (KRN-1) ve 313 (KRN-2) cm olan iki adet karot, 2017 yılı Eylül ayında kum bariyerden yaklaşık 1 km uzakta olacak şekilde ve su derinliğinin 2,2-2,3 m olduğu lokasyonlardan alınmıştır (KRN-1: 37.6063K, 27.1551D; KRN-2: 37.5881K, 27.1731D). İstif boyunca sedimanter

yapıların ve makro sediman içeriklerinin (deniz kabukları gibi) daha detaylı görüntülenebilmesi için, radyografik görüntüleme işleminin mümkün olduğu kadar ince bir sediman dilimi boyunca yapılması önemlidir. Bu nedenle radyografik görüntülemenin yarım karotlar boyunca değil, genişliği 2,5 cm ve kalınlığı 1,5 cm olan u-kanallar boyunca yapılması tercih edilmiştir (Şekil 3a ve b). U-kanal çıkarma işlemi sırasında, önce PVC kanal yarım karotun yüzeyini ortalayacak şekilde (Şekil 3b-1) yerleştirilir ve nazikçe sedimanın içine bastırılır (Şekil 3b-2). Ardından, u-kanalın iki tarafındaki sedimanlar sıyrıldıktan sonra (Şekil 3b-3 ve c) bir misina yardımı ile u-kanalın alt yüzeyi boyunca sediman kesilir ve içi sediman dolu u-kanal ters çevrilerek karottan ayrılır (Şekil 3b-4). Böylece radyografik görüntüleme ve mikro-XRF taramasında kullanılacak u-kanal elde edilmiş olur.

KRN-1 ve KRN-2 karotlarından çıkarılan u-kanallar, Bremen Üniversitesi GEOPOLAR Laboratuvarına ITRAX mikro-XRF taramaları için gönderilmiştir.

Radyografik taramalar u-kanallar boyunca 0,2 mm çözünürlükte, XRF taramaları ise 1 mm çözünürlükte yapılmıştır. XRF taramalarında, X-ışını kaynağı olarak 30 kV ve 40 mA ile uyarılan Molibden tüpü kullanılmış ve her 1 mm için 5 saniye ölçüm yapılmıştır. ITRAX mikro-XRF tarayıcılar ölçümleri doğrudan karot ya da u-kanal yüzeyindeki ıslak sediman üzerinde yapmaktadır. Geleneksel XRF ölçümlerinde olduğu gibi herhangi bir kurutma ve öğütme işlemi yapılmadığı için, ITRAX tarafından yapılan ölçümler sedimanların su muhtevası, organik madde muhtevası ve tane-boyu dağılımı gibi özelliklerinin izlerini taşıyabilir. Bu nedenle, bazı durumlarda bir elementin istif boyunca olan değişimini yorumlamak için o elementin ITRAX tarafından sağlanan verisini doğrudan kullanmak yanıltıcı olabilir. Bu problemin üstesinden gelmek için elementlerin birbirine olan oranları kullanılır. Elementler birbirlerine oranlanırken, bazı elementler arasında kıyaslanabilir ölçekler elde edilmesi gerekir. ITRAX, elementler için her ölçüm noktasında "saniyedeki sayım" cinsinden yarı-nicel veriler sağlamaktadır. Örneğin, Karine



**Şekil 3.** a) Karot alma işlemleri için kullanılan, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesindeki yüzer araştırma platformu. b) Karotlar ikiye bölündükten sonra u-kanal çıkarma işleminin adımlarını (1-4) gösteren şemalar. c) U-kanal karota bastırıldıktan sonra, u-kanalın iki tarafındaki sedimanlar sıyrıldıktan sonraki görünüm.

**Figure 3.** a) Coring platform used for this study belonging to Middle East Technical University, Department of Geological Engineering. b) Schematic illustration of extraction of u-channels from split-cores (1-4). c) View of split-core after sediments on both sides of the u-channel were removed.



Lagünü karotları için, Kalsiyum (Ca) elementinin “saniyedeki sayım” değerlerinin ortalaması 18000 iken, Titanyum (Ti) için ortalama 1100’dür. Bu iki element arasında kıyaslanabilir bir ölçek elde etmek için verilerin standardize edilmesi gerekir. Standardizasyon için öncelikle her elementin istif boyunca ortalama ( $\mu$ ) ve standart sapma ( $\sigma$ ) değerleri bulunur. Her ölçüm noktası için standart değer (z) ise, o noktadaki ölçüm değeri ile ortalama arasındaki farkın standart sapmaya bölümü ile elde edilir (Eşitlik 1). Böylece, istif boyunca her elementin (z) değerlerinin ortalaması “0”a ve standart sapması “1”e eşitlenerek, farklı elementler kıyaslanabilir şekilde ölçeklendirilmiş olur.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

İstif boyunca sedimanların fiziksel heterojenliğinin değerlendirilebilmesi için, radyografik görüntünün genişliği boyunca her 1 mm’lik satır için gri değerlerinin standart sapması (heterojenlik indisi) hesaplanmıştır. Homojen yapıya sahip seviyeler düşük standart sapma değerleri verirken, deforme olmuş ya da içinde makro kavkı bulunan seviyeler yüksek standart sapma değerleri verir. Böylece, istif boyunca sedimanların fiziksel heterojenliğindeki değişimler grafiksel olarak değerlendirilmiş olur.

Radyokarbon tarihlendirmesi için kullanılacak makro organik maddeyi ayıklamak ve tsunami tarafından kum bariyerden ve deniz tabanından lagünün içine taşınmış iri bivalv kavkılarını incelemek için sedimanlar; önce manyetik karıştırıcı ile damıtılmış su içinde 15 dakika boyunca çözülmüş, daha sonra ultrasonik banyoda 10 dakika boyunca yıkanmış ve ardından No. 14 (1,4 mm) elek ile elenmiştir. Sonraki aşamada, No. 14 eleğinin üzerinde kalan kısım stereo mikroskop altında fotoğraflanmıştır. Bu esnada, yaşlı karbon kirlenmesinden kaçınmak adına, Karine Lagünü karotları boyunca yıkanan ve elenen sedimanlardan karasal bitki kalıntıları

olduğu düşünülen organik parçalar ayıklanarak (Şekil 4), radyokarbon tarihlendirmesi için Poznan Radyokarbon Laboratuvarı’na gönderilmiştir. Laboratuvarından gelen ham sonuçlar OxCal Programı’nda (Bronk Ramsey, 2017) IntCal13 kalibrasyon eğrisi (Reimer vd. 2013) kullanılarak takvim yılına dönüştürülmüştür.



**Şekil 4.** Radyokarbon tarihlendirmesi için sedimanlardan ayıklanan bitki kalıntılarının bir görünümü.

*Figure 4.* Plant remains extracted from sediments for radiocarbon dating.

## ARAŞTIRMA BULGULARI

KRN-1 ve KRN-2 karotları boyunca istifi oluşturan hakim tane-boyu killi silttir. Bununla birlikte istif genelinde sedimanların bivalv kavkuları içerdiği de gözlenmektedir. Karotların yüzeyinden yapılan görsel incelemeler ışığında, Şekil 5’de gri çubuklar ile gösterilen seviyelerde, sedimanların kum içeriğinin arttığı ve bu seviyelerde istifin geneline göre daha iri ve mukavemetli kavkılar bulunduğu anlaşılmıştır. Karotlardan çıkarılan u-kanallar boyunca elde edilen radyografik görüntüler incelendiğinde, görece homojen ve bazen ince tabakalanmalı istifin içinde, yer yer yüksek yoğunluğa sahip (radyograflarda koyu renkli görünen) ve heterojen yapıda arakatmanlar göze çarpmaktadır (Şekil 5’deki gri çubuklar). Düşük gri değerlere ve yüksek heterojenlik indisi değerlerine sahip bu tip ara katmanlardan, KRN-1 karotunda yedi adet (Şekil 5a’da [1-1]-[1-7]) ve



KRN-2 karotunda beş adet (Şekil 5c'de [2-1]-[2-5]) tespit edilmiştir. Radyografik görüntüler yakından incelendiğinde istifin genelini temsil eden çökellerden daha yüksek yoğunluğa sahip olan bu ara katmanların, yuvarlak çakıl tanelerinden ziyade çizgisel ve köşeli parçalar içerdiği anlaşılmaktadır (Şekil 5b ve d).

Bu ara katmanların içeriklerinin daha iyi anlaşılması için, KRN-2 karotu boyunca bazı seviyelerde çökellerin 1,4 mm'den daha kaba taneleri mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 6). İstifin genelini temsil eden seviyelerde (0-4, 13-23, 45-55 ve 98-109 cm'ler arası) çökellerin genellikle 1 cm'den küçük bivalv kavkuları içerdiği, buna karşın ara katmaların ise (4-13, 24-34 ve 74-84 cm'ler arası) çapları neredeyse 4 cm'yi bulan görece daha büyük kavkılar içerdiği görülmüştür. Fotoğraflara ilk bakıldığında, istifin genelini temsil eden seviyelerdeki kavkuların oldukça kırıklı olduğu ve bu nedenle çökelden önce fiziksel bozuşmaya maruz kaldığı, yani su kolonundan doğrudan çökeler sedimanlara katılmaktan ziyade taşınmış olabilecekleri düşünülebilir.

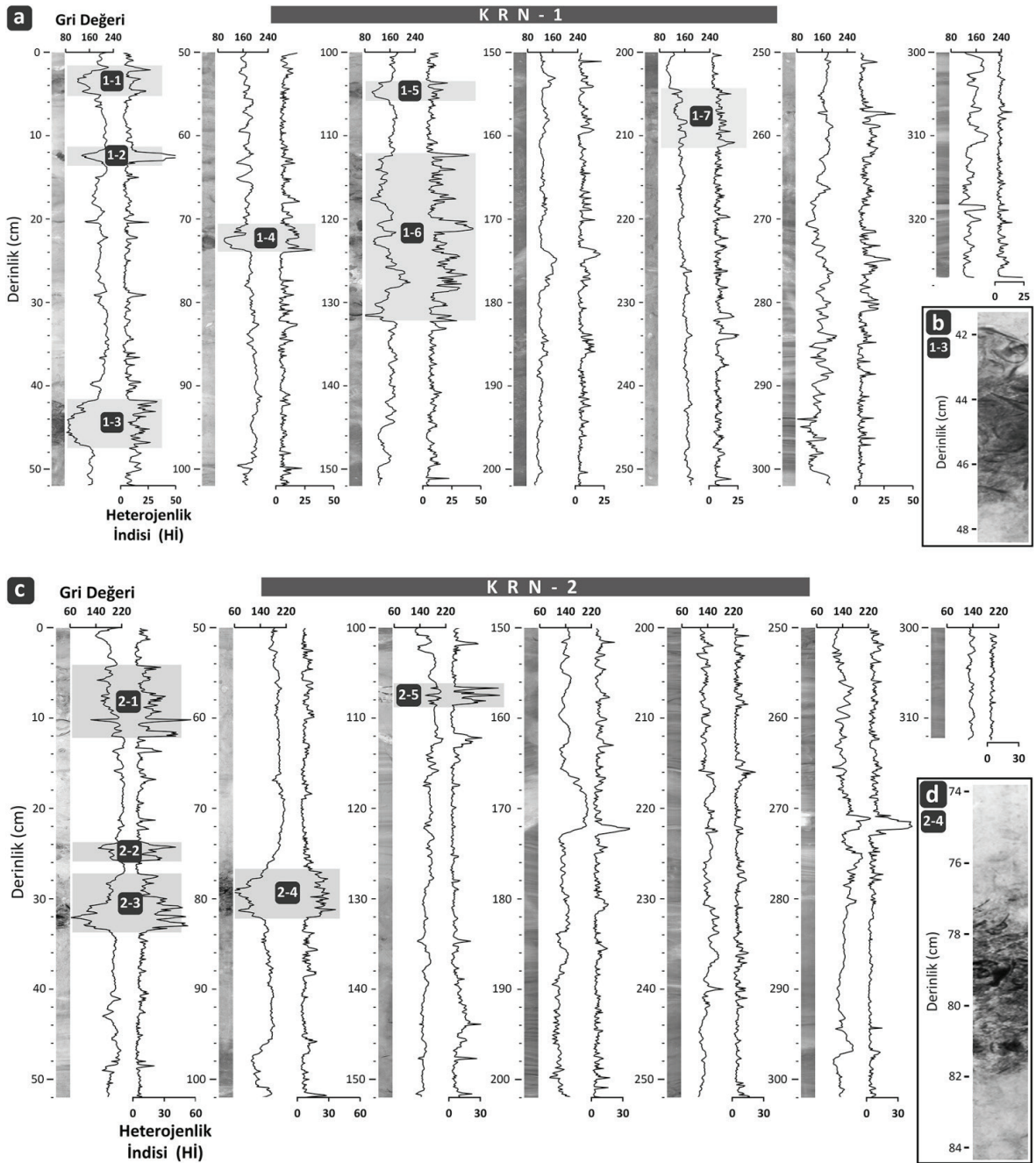
Ancak, oldukça ince ve narin bir yapıya sahip olan bu kavkuların sedimanların çözülmesi sırasında karıştırıcının yüksek hızla dönen manyetik çubuğu tarafından kırılmış olma ihtimali yüksektir. Diğer taraftan, ara katmanlarda bulunan görece daha büyük ve mukavemetli kavkuların manyetik çubuğun darbeleri ile kırılmış olma ihtimali oldukça düşüktür. Ayrıca, Şekil 6'nın en sağ kolonu boyunca sunulan görüntülerde kavkuların yüzeylerine yakından bakıldığında, istifin genelinde bozuşmamış ve temiz yüzeylere sahip kavkuların baskın olduğu, ancak ara katmanlarda bozuşmuş, yıpranmış ve kırılmış kavkuların baskın olduğu görülmektedir. Bu gözlem, bazı dönemlerde (muhtemelen bir tsunami ya da fırtına sırasında) deniz suyunun kum bariyeri aşarak lagünün iç kısımlarına, görece daha iri ve bozuşmuş bivalv kavkuları taşıdığı bir göstergesidir.

ITRAX mikro-XRF taramaları sonucu elde edilmiş kimyasal veriler, radyografik görüntüler boyunca yapılan fiziksel gözlemler ile bir araya

getirildiğinde (Şekil 7), görece daha iri taneli ve bozuşmuş bivalv kavkuları içeren arakatmanlarda Ca ve Cl zenginleşmeleri olduğu görünmektedir. Şekil 7'de, istifler boyunca yüksek heterojenlik ve yoğunluğa sahip seviyelerin daha belirgin gözlemlenebilmesi için, heterojenlik indisi değerleri gri değerlerine bölünerek (HI/GD) sunulmuştur. Ca ve Cl'nin istifler boyunca görece artış ve azalışlarının değerlendirilebilmesi için de, Ca ve Cl değerleri Ti değerlerine bölünerek sunulmuştur.

Deniz ya da göl sedimanlarındaki Ti'nin kökeni genellikle karadan gelen minerojenik kırıntılı malzemedir. Ancak, Ca'nın kökeni hem karadan gelen minerojenik kırıntılı malzeme hem de su kolonu içinde üretilen biyojenik ve kimyasal karbonatlar olabilir. Bu nedenle, Ca değerleri Ti değerlerine bölündüğünde, sedimanlar içindeki biyojenik ve kimyasal karbonatların karasal kırıntılı malzemeye göre değişimi değerlendirilebilir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, Şekil 5'de radyografik görüntüler boyunca tespit edilen arakatmanların çoğu, Ca/Ti değerlerinde belirgin anomaliler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu da, arakatmanların karbonatlar, yani bivalv kavkuları açısından zengin olduğunu kimyasal olarak doğrulamaktadır.

ITRAX mikro-XRF tarayıcısı, ölçümleri doğrudan ıslak sediman üzerinde yaptığı için, elde edilen sonuçlar sedimanlardaki boşluk suyu kimyasının da izlerini taşımaktadır. ITRAX ölçümlerinden elde edilen Cl'nin kökeni temel olarak sedimanlardaki gözeneklerde hapsedilmiş deniz suyudur (örn. Tjallingii vd. 2007; Avşar, 2019). Görece daha tatlı suya sahip olan bir lagüne ani deniz suyu girişi olması ve bu suyun kırıntılar arası gözeneklerde hapsedilmesi, istif boyunca ölçülen Cl profillerinde belirgin anomaliler olarak karşımıza çıkabilir. ITRAX ölçümleri yarı-nicel veriler sağladığı için, Cl profillerinin doğrudan kullanılması yerine başka bir element ile normalize edilerek kullanılması, Cl konsantrasyonunun istif boyunca görece değişimlerinin daha sağlıklı yorumlanmasını sağlayacaktır.



**Şekil 5.** KRN-1 ve KRN-2 karotları boyunca elde edilen radyografik görüntüler, ve bu görüntüler boyunca gri değeri ve heterojenlik indisi (HI) değişimleri (a ve c). '1-3' ve '2-4' arakatmanlarının yakından görünümü (b ve d).

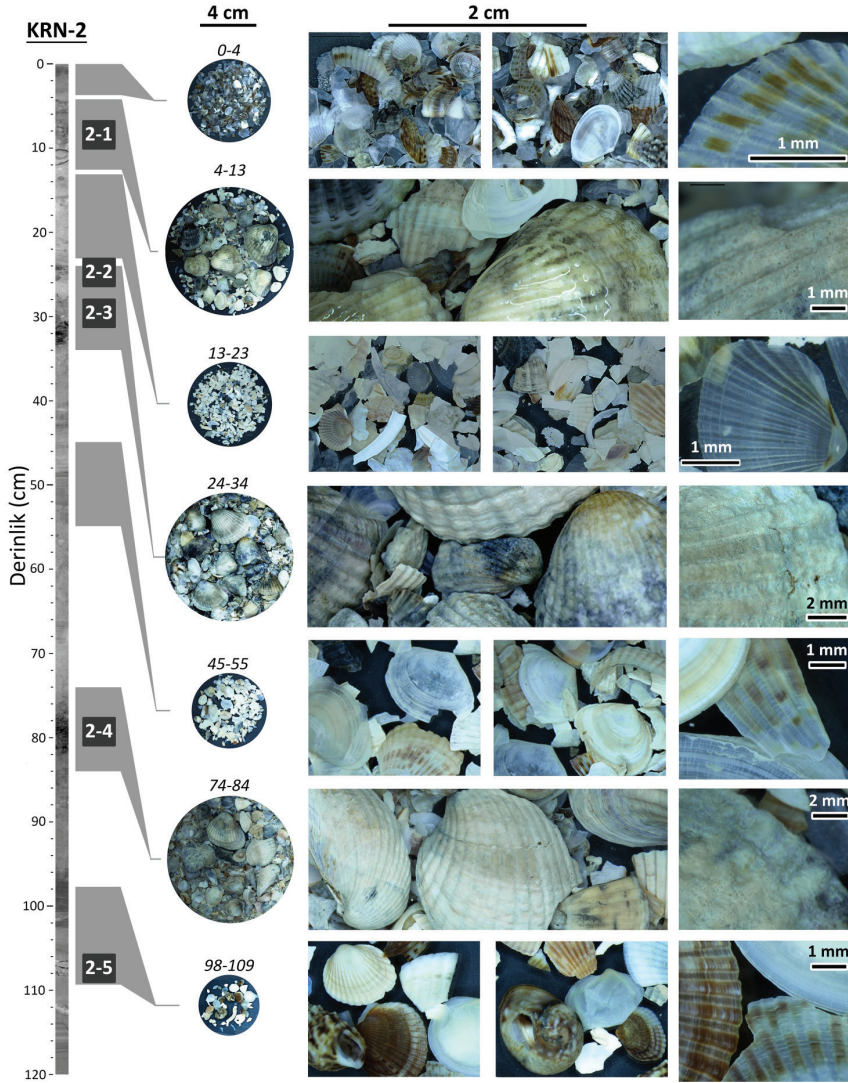
**Figure 5.** (a and c) Radiographic images, grayscale values and Heterogeneity Index (HI) values in KRN-1 and KRN-2 cores. (b and d) Close-up views of '1-3' and '2-4' intercalations.

Ti'nin kabaca kırıntılı malzemeyi temsil ettiği düşünülürse, Cl değerlerinin Ti ile normalize edilmesi ile kırıntılar arası boşluklardaki suyun

Cl içeriği hakkında daha sağlıklı bilgi elde edilebilir. Ca/Ti değerlerinde olduğu gibi, Şekil 5'de gösterilen Karine Lagünü istifinde tespit

edilen arakatmanların çoğu Cl/Ti anomalileri de göstermektedir. Fiziksel ve jeokimyasal verilerin bütünleşik olarak değerlendirilebilmesi açısından, arakatmanlarda anomali veren parametrelerin (Hi/GD, Ca/Ti ve Cl/Ti) ortalaması alınarak elde edilen grafikler Şekil 7'de en sağda sunulmuştur. KRN-1'de '1-2', '1-3' ve '1-6' arakatmanlarının,

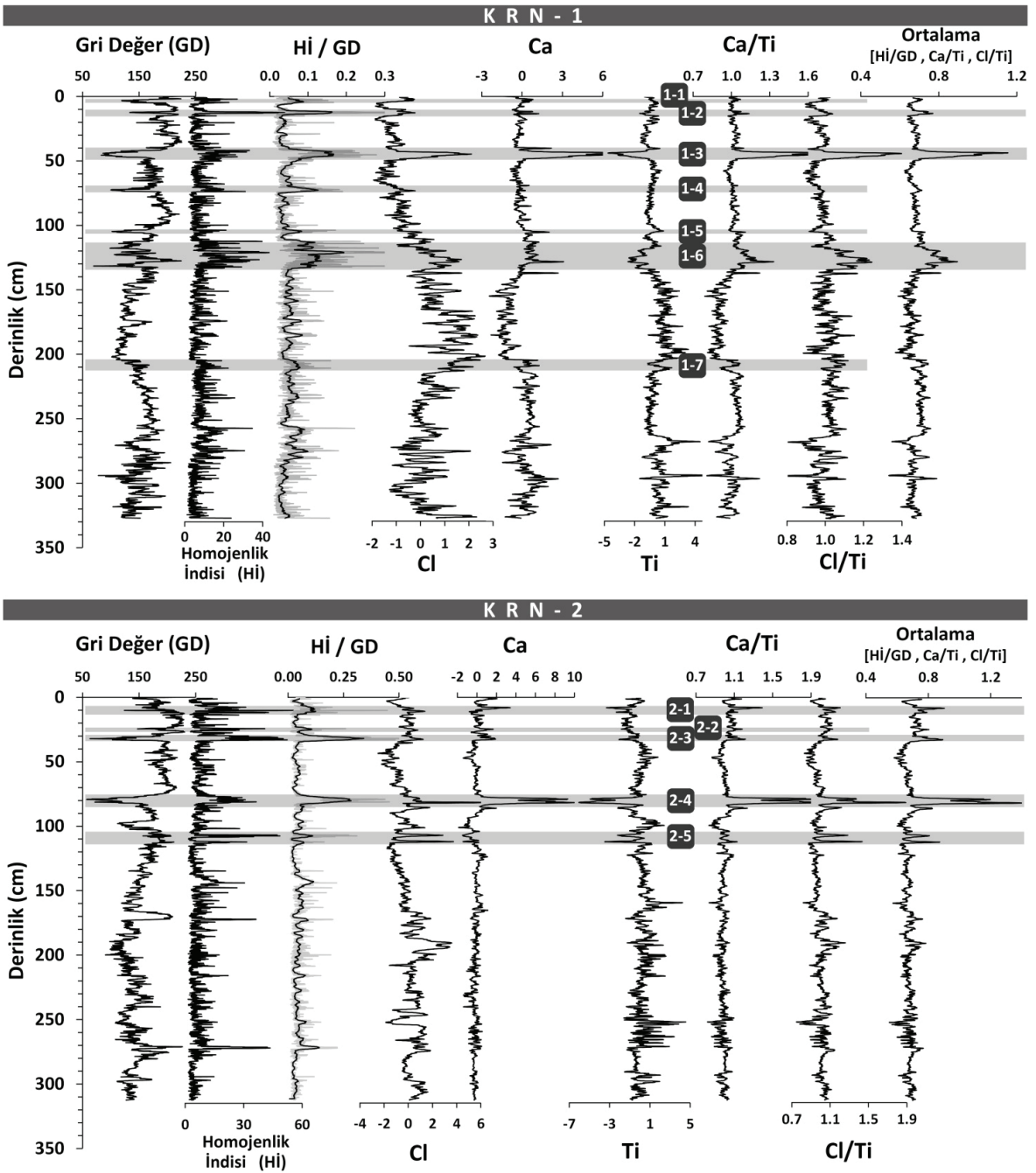
ve KRN-2'de '2-1', '2-3', '2-4' ve '2-5' arakatmanlarının hem fiziksel, hem de kimyasal olarak istif boyunca belirgin farklılıklar sunduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu arakatmanlar denizden Karine Lagünü'ne ani malzeme ve su girişleri olarak yorumlanabilir.



**Şekil 6.** KRN-2 karotu boyunca bazı seviyelerde yapılan yıkama ve eleme işlemleri sonucunda elde edilmiş, 1.4 mm'den daha iri taneli sediman içeriğinin mikroskop altındaki görüntüleri. İstifin genelini temsil eden seviyeler ile karşılaştırıldığında (0-4, 13-23, 45-55 ve 98-109 cm'ler arası), ara katmanların (4-13, 24-34 ve 74-84 cm'ler arası) görece daha iri taneli ve bozuşmuş bivalv kavkaları içerdiği görülmektedir.

**Figure 6.** Microscopic views of sediment content coarser than 1.4 mm at some levels along KRN-2. Compared to levels representing the background sedimentation (between 0-4, 13-23, 45-55 and 98-109 cm), intercalations (between 4-13, 24-34 and 74-84 cm) contain relatively larger and more weathered bivalve shells.





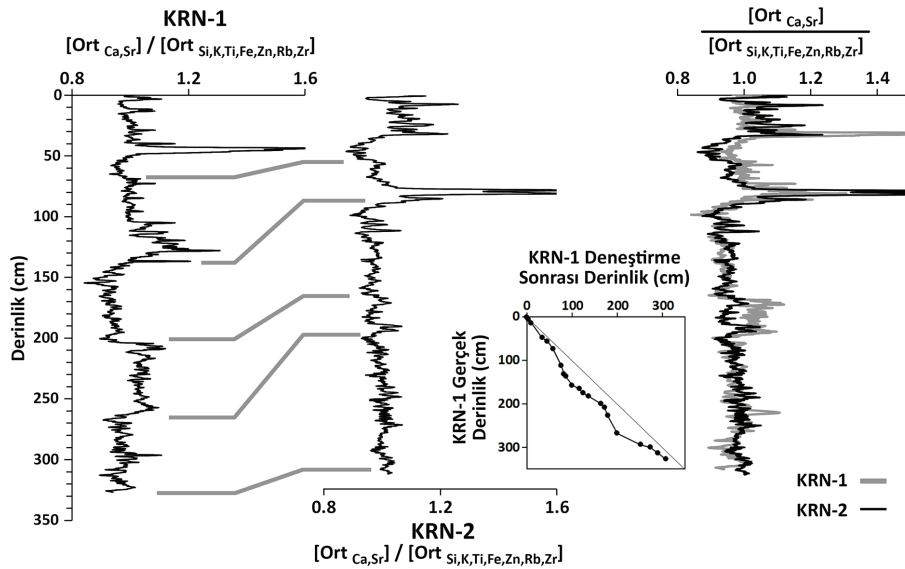
Şekil 7. KRN-1 ve KRN-2 karotları boyunca, radyograflardan elde edilen heterojenlik indisi değerlerinin gri değerlerine oranı (HI/GD), ve ITRAX mikro-XRF taramalarından elde edilen Ca, Cl ve Ti verileri. En sağda sunulan bütünlük grafikler incelendiğinde, Şekil 5’de gösterilen 12 arakatmandan yalnızca 7’si (1-2, 1-3, 1-6, 2-1, 2-3, 2-4 ve 2-5) hem fiziksel (HI/GD) hem jeokimyasal (Ca/Ti ve Cl/Ti) anomaliler vermektedir.

**Figure 7.** Ratio of heterogeneity index and grayscale values (HI/GD), and Ca, Cl and Ti profiles obtained by ITRAX micro-XRF scanning of KRN-1 and KRN-2 cores. Inspection of plots on the far right reveals that only 7 out of 12 intercalations shown in Figure 5 (1-2, 1-3, 1-6, 2-1, 2-3, 2-4 and 2-5) have both physical (HI/GD) and geochemical (Ca/Ti and Cl/Ti) anomalies.



Özellikle Karine Lagünü gibi sığ ve dinamik çökelim ortamlarında lokal diyajenez ve sediman odaklanması gibi durumlar oldukça yaygındır. Bu yüzden, bu tip ortamların sedimanter istifleri incelenirken birden fazla lokasyondan karot alınarak, farklı lokasyonlardaki sedimanter kaydın birbiri ile uyumlu olup olmadığının kontrol edilmesi oldukça önemlidir. Bölgedeki iklimsel değişikliklerin, sedimanter kaydı lokal olarak değil havza genelinde etkileyeceği düşünülürse, karotlar arası stratigrafik deneştirme için paleo-iklim koşullarını yansıtan parametrelerin kullanılması daha sağlıklı sonuçlar verecektir. İklimsel koşullardaki değişikliklerin, özellikle sığ su ortamlarında biyojenik üretimi etkilediği bilinmektedir. Kavkılarını karbonattan yapan canlılar, Ca ile birlikte Sr elementini de

kullanmaktadır (Croudace ve Rothwell, 2015). Buradan yola çıkarak, KRN-1 ve KRN-2 karotları arasındaki stratigrafik deneştirme, biyojenik karbonat üretim miktarını temsil eden Ca ve Sr elementleri ortalamasının karasal kırıntılı malzemeyi temsil eden Si, K, Ti, Fe, Zn, Rb ve Zr elementleri ortalamasına bölümü ile elde edilen profiller kullanılarak yapılmıştır (Şekil 8). Bu çalışmada, KRN-2 karotunun 45 ve 306 cm derinliklerinde iki adet radyokarbon tarihlendirmesi yapılmış ve KRN-1'in derinlik değerleri KRN-2'ye göre tekrar hesaplanmıştır. Böylece, KRN-1'in  $[Ort_{Ca,Sr}] / [Ort_{Si,K,Ti,Fe,Zn,Rb,Zr}]$  profili yeni derinlik değerlerine göre tekrar çizildiğinde ve KRN-2 ile üstüste koyulduğunda, iki karotun sedimanter kayıtları arasındaki uyum net bir şekilde görülmektedir (Şekil 8).

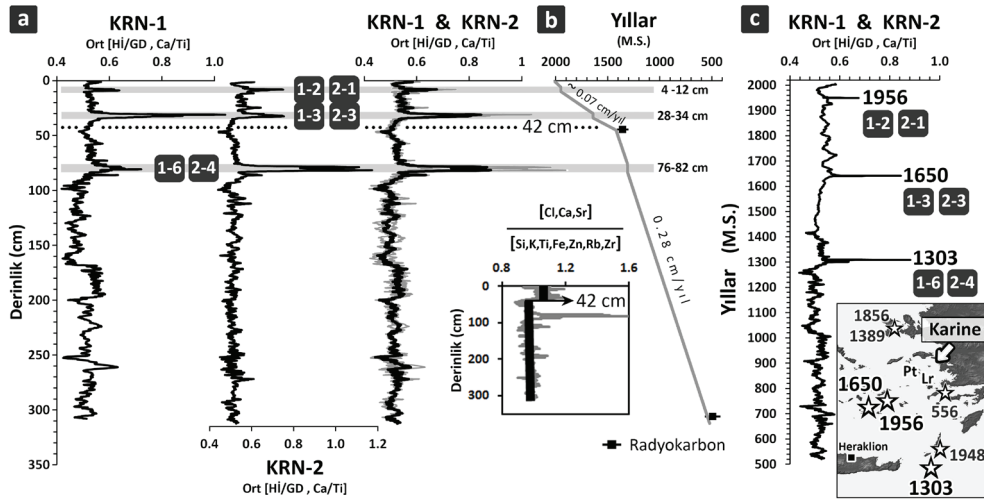


**Şekil 8.** KRN-1 ve KRN-2 karotları arasındaki stratigrafik deneştirme, biyojenik karbonat üretim miktarını temsil eden elementlerin ortalamasının karasal kırıntılı malzemeyi temsil eden elementlerin ortalamasına bölümü ile elde edilen profiller ( $Ort_{Ca,Sr} / Ort_{Si,K,Ti,Fe,Zn,Rb,Zr}$ ) aracılığı ile yapılmıştır. Stratigrafik uyumun daha iyi değerlendirilebilmesi için, KRN-1'e ait profil değiştirilmiş derinlik değerleri ile tekrar çizilip, KRN-2'nin profili ile üstüste gelecek şekilde sunulmuştur.

**Figure 8.** Stratigraphical correlation between KRN-1 and KRN-2 cores was achieved using the profiles obtained by dividing the average of elements representing biogenic carbonate production by the average of elements representing terrestrial clastic material (i.e.  $Avg_{Ca,Sr} / Avg_{Si,K,Ti,Fe,Zn,Rb,Zr}$ ). In order to better evaluate the stratigraphical consistency, the profile of KRN-1 was re-plotted with respect to the modified depth values, and overlapped with the profile of KRN-2

İki karot arasındaki stratigrafik deneştirme sağlandıktan sonra, denizden ani malzeme gelişimi ile ilgili olduğu düşünülen arakatmanları temsil eden  $H\bar{I}/GD$  ve  $Ca/Ti$  değerlerinin ortalaması iki karot için de Şekil 9a'da yan yana, ve ayrıca üstüste koyulup ortalaması da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, tüm istif boyunca üç adet arakatman iki karotta da belirgin anomaliler vermektedir. Şekil 7'de KRN-2 karotunda görünen '2-5' arakatmanı KRN-1 karotunda görünmemektedir. Şekil 6'da da görüleceği üzere '2-5' arakatmanı herhangi bir iri bivalv kavkı da içermemektedir. Bu nedenle, '2-5'in sediman odaklanması gibi lokal bir olay sonucu oluştuğu düşünülebilir. Buna karşın, Şekil 6'daki mikroskop görüntülerinde de görüldüğü üzere, oldukça iri bivalv kavkuları içeren '2-1', '2-3' ve '2-4' arakatmanlarının KRN-1 karotunda da karşılıkları vardır ('1-2', '1-3' ve '1-6', Şekil

9a). Bu bağlamda, bu üç arakatmanın Karine Lagünü'nün genelini etkileyen ciddi sedimenter olaylar sonucu oluştuğu söylenebilir. Fiziksel ve jeokimyasal veriler ışığında düşünülecek olursa, bu arakatmanların aşırı dalga olayları (ADO) sırasında denizden ani malzeme taşınması sonucu oluştuğu söylenebilir. Denizden karaya doğru malzeme taşıyabilecek şiddetteki ADO'ların sebebi tsunamiler yada fırtınalardır. Vött vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Ege Denizi ve Akdeniz'de 1902-2017 yılları arasında meydana gelen ADO'ların yaklaşık %85'inin tsunami kökenli olduğu belirtilmiştir. Bu istatistiksel bilgi gözönünde bulundurulduğunda, Karine istifinde görülen arakatmanların muhtemel sebebinin, fırtınalardan ziyade tsunamiler olduğu söylenebilir.



**Şekil 9.** a) Denizden ani malzeme girişini temsil eden  $H\bar{I}/GD$  ve  $Ca/Ti$  değerlerinin ortalaması, KRN-1 ve KRN-2 karotları için ayrı ayrı, ve stratigrafik uyumun görülmesi açısından üstüste gösterilmiştir. b) İki adet radyokarbon tarihlendirmesi kullanılarak ve arakatmanların aniden çökeldiği varsayılarak oluşturulan yaş-derinlik eğrisi. Küçük grafikte ise, sedimanların kimyasal içeriğinde yaklaşık 42 cm'de meydana gelen kayma gösterilmiştir. c) Yaş-derinlik eğrisi kullanılarak,  $H\bar{I}/GD$  ve  $Ca/Ti$  değerlerinin ortalamasının Karine Lagünü istifinde zamana bağlı değişimi. Arakatmanların tarihleri, bölgede meydana gelen 1956, 1650 ve 1303 tsunamileri ile uyum göstermektedir.

**Figure 9.** a) Average of  $H\bar{I}/GD$  and  $Ca/Ti$  profiles, which represent sudden marine intrusions into the lagoon, plotted separately for KRN-1 and KRN-2 cores. In order to aid evaluating the stratigraphical correlation, the profiles are also overlapped. b) Age-depth model constructed based on two radiocarbon dates. The intercalations are assumed to have been suddenly deposited. c) Based on the age-depth model, plot of average of  $H\bar{I}/GD$  and  $Ca/Ti$  profiles with respect to calendar years. The intercalations temporally correlate with the tsunamis that occurred in the region in 1956, 1650 and 1303.

KRN-2 karotunun 45 ve 306 cm derinliklerindeki bitki kalıntıları üzerinde yapılan radyokarbon ölçümleri, bu derinliklerdeki sedimanların sırasıyla M.S. 1355±55 ve 490±75 tarihlerinde çökeldiğini göstermektedir. Sucul bitkilerin -15±5 aralığında  $\delta^{13}\text{C}$  değerlerine sahip oldukları, buna karşın karasal kökenli bitkilerde  $\delta^{13}\text{C}$  değerlerinin -26±4 aralığında olduğu (örn. Stuiver ve Polach, 1977) gözönünde bulundurulduğunda, bu çalışmada tarihlendirilen organik kalıntıların ( $\delta^{13}\text{C} = -28\pm 1$ ) karasal kökenli olduğu söylenebilir (Çizelge 1). Arakatmanların (KRN-2 karotundaki derinlikleri: 4-12, 28-34 ve 76-82 cm) aniden çökeldiği gözönünde bulundurularak oluşturulan yaş-derinlik modeli (Şekil 9b), sedimantasyon oranının 0-42 cm arasında yaklaşık 0,07 cm/yıl, 42 cm'nin altında ise 0,28 cm/yıl olduğunu ortaya koymaktadır. Sedimantasyon oranındaki bu değişimin sebebi KRN-2 karotunun  $[\text{Ort}_{\text{Cl Ca Sr}}]/[\text{Ort}_{\text{Si K Ti Fe Zn Rb Zr}}]$  profilinde görülmektedir. Bu profil boyunca, tabandan 42 cm'ye kadar olan değerler, 42 cm'nin üstündeki değerlerden daha düşüktür. Bu değişim, 42 cm'den sonra (yaklaşık M.S. 1400 sonrası dönemde) karot lokasyonuna daha az miktarda karasal kırıntılı malzeme geldiğini göstermektedir. Daha az kırıntılı malzemenin gelmesi de sedimantasyon oranının 0,28 cm/yıl'dan 0,07 cm/yıl'a düşmesine sebep olmuştur. KRN-1 karotunda böyle bir değişimin görülmemesi nedeni ile (Şekil 8), karasal malzeme gelişindeki bu düşüşün iklimsel bir değişiklikten ziyade Menderes Nehri'nin ana kolundaki bir yerdeğiştirmeden kaynaklandığı yorumu yapılabilir.

## TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Elde edilen yaş-derinlik modeli ile, Karine Lagünü istifinde, özellikle Hİ/GD ve Ca/Ti değerlerinin ortalaması alınarak elde edilen profilde belirgin anomaliler olarak görülen üç adet arakatmanın 20. yüzyılın ortalarında, 17. yüzyılın ortalarında ve 14. yüzyılın başlarında çökeldiği anlaşılmaktadır. Belirlenen bu tarihler, bölgede meydana gelen 1956, 1650 ve 1303 tsunamileri ile uyumluluk göstermektedir (Şekil 9c). Literatürde yer alan ve XRF ölçümlerine dayanan birçok çalışma, tsunami çökellerinin Sodyum (Na), Klor (Cl), Kalsiyum (Ca), Stronsiyum (Sr) ve Magnezyum (Mg) gibi genellikle karbonatlar ile ilişkili elementlerce zengin olduğu gözlemini yapmıştır (Vött vd. 2009; Chagué-Goff, 2010; Chagué-Goff vd. 2011, 2017; Ramirez-Herrera vd. 2012; Mathes-Schmidt vd. 2013; Baranes vd. 2016). Bu açıdan bakıldığında, Karine Lagünü'nde tespit edilen tsunami ilişkili arakatmanların jeokimyasal özellikleri literatürdeki çalışmalar ile uyumludur.

Son 1500 yılı kapsayan tarihsel kayıtlar incelendiğinde (Papadopoulos vd. 2014), bölgedeki en eski tsunaminin 556'da merkez üssü Kos Adası civarında olduğu tahmin edilen bir deprem tarafından tetiklendiği görülmektedir (Şekil 9c). Papadopoulos ve Imamura (2001)'in 12 kademeli Tsunami Şiddet Ölçeği'ne göre bu tsunaminin Kos Adası civarında 8 şiddetinde hissedildiği tahmin edilmektedir (Papadopoulos vd. 2014). Ancak bu tsunaminin Karine Lagünü istifinde belirgin bir izine rastlanamamıştır. 1389 ve 1856 yıllarında Sakız Adası civarında meydana

**Çizelge 1.** KRN-2 karotunda yapılan iki adet radyokarbon ölçümü ile ilgili bilgiler ve kalibrasyon sonuçları.

**Table 1.** Summary of two radiocarbon measurements for KRN-2 core, with calibration results.

Laboratuvar Numarası	Örnek Adı	Karottaki Derinlik (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Radyokarbon Yaşı (G.Ö.)	Takvim Yılı (M.S.)
Poz-102388	KRN-R1	45	-29,1	590 ± 30	1355 ± 55
Poz#2-102975	KRN-R2	306	-26,6	1560 ± 30	490 ± 75

gelen depremlerin tetiklediği tsunamilerin ise bölgede sırasıyla 6 ve 8 şiddetinde hissedildiği belirtilmektedir (Papadopoulos vd. 2014). Karine Lagünü'ndeki karotlarda bu iki tsunaminin de izi bulunmamaktadır.

1956 ve 1948 yıllarındaki tsunamileri stratigrafik olarak ayırt etmek pek mümkün olmasa da, Karine Lagünü karotlarında sedimanter izi bulunmayan 556, 1389 ve 1856 tsunamilerinin tetiklendiği lokasyonlar ve şiddetleri gözönünde bulundurulduğunda, 1948 yılında Kerpe (Karpathos) Adası güneyinde meydana gelen deprem tarafından tetiklenen ve bölgede 7 şiddetinde hissedilen tsunaminin Karine Lagünü'nde sedimanter bir iz bırakma ihtimalinin olmadığı söylenebilir. Bu nedenle, '1-2' ve '2-1' arakatmanları, 9 Temmuz 1956 tarihinde meydana gelen (Mw=7) deprem tarafından tetiklenen ve bölgede 9 şiddetinde hissedilen tsunamiden kaynaklanmış olmalıdır. Bu tsunaminin dalga yüksekliği, Karine Lagünü'nün yaklaşık 50 km güneybatısında bulunan Leros Adası'ndaki gelgit istasyonunda (Şekil 9c'de "Lr") yaklaşık 4 m olarak ölçülmüştür (Galanopoulos, 1957). Bu durum, tsunaminin Karine Lagünü'nün kum bariyerini aşmış olma ihtimalinin oldukça yüksek olduğu anlamını taşımaktadır.

Karine Lagünü'nde kaydedilen bir diğer tsunami ise, 1650 yılında Thera (Santorini) Adası'nın 10 km doğusunda bulunan Columbo sualtı volkanının patlaması ile tetiklenen tsunamidir (Dominey-Howes vd. 2000a). Bu tsunaminin, Karine Lagünü'nün 60 km güneybatısında bulunan Patmos Adası'nda 10 şiddetinde hissedildiği tahmin edilmektedir (Papadopoulos vd. 2014). Lagündeki sedimanter izin belirginliği gözönünde bulundurulduğunda (Şekil 9a), 1650'da gerçekleşen tsunaminin 1956'dakinden daha büyük olduğu yorumu yapılabilir.

Bu çalışmada elde edilen bir diğer kayda değer bilgi de, 1303 yılında Doğu Helen

Yayı'nda meydana gelen bir deprem tarafından tetiklenmiş ve Girit Adası'nın kuzeyindeki Heraklion'da 10 şiddetinde hissedilmiş olan tsunaminin Karine Lagünü istifinde tespit edilmiş olmasıdır (Şekil 9c). 1303 tsunamisine karşılık gelen arakatman, 1956 ve 1650 tsunamilerinin izlerinden daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 9a). İlginç bir şekilde, bu tsunami Alpar vd. (2012) ve Papadopoulos vd. (2012) tarafından Dalaman Ovası'nda (Şekil 2a'daki "Da") yapılan çalışmalarda ve Avşar (2019) tarafından Dalaman'nın 30 km güneydoğusundaki Öludeniz Lagünü'nde yapılan çalışmalarda belirgin bir şekilde tespit edilmiş olmasına rağmen, Ege Denizi içlerinde yer alan lokasyonlarda yapılmış (Şekil 2a'daki Di, Li, Th, DG, Go ve Re) hiçbir çalışmada tespit edilememiştir. 1303 tsunamisinin, karasal ortam istiflerinde hendek açarak ya da karot olarak araştırılan bu yedi adet lokasyondan (Dalaman Ovası dahil) yalnızca Dalaman'da tespit edilmiş olmasına karşın, bu tsunaminin iki adet lagünde yapılan araştırmaların (Karine ve Öludeniz) ikisinde de tespit edilmiş olması, giriş kısmında da vurgulandığı üzere, karasal istiflerle karşılaştırıldığında lagün ya da kıyısız göl istiflerinin paleotsunami araştırmaları için daha uygun ortamlar olduğunun bir göstergesidir (Şekil 1c).

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Avrupa Komisyonu "Marie Skłodowska-Curie Actions – Individual Fellowships" programı tarafından desteklenen ve OrtaDoğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde yürütülmüş olan "Towards a paleotsunami chronology in the southern Aegean and Levantine seas, Eastern Mediterranean (EASTMED-PALEOTSUNAMI)" başlıklı proje kapsamında yapılmıştır. Yazar; Özgür Avşar (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi), Bülent Tokay (Orta Doğu Teknik Üniversitesi), Emre Çetinkaya (Orta Doğu Teknik Üniversitesi), Emrah Ürün ve



Sinan Altıok'a karot alma çalışmalarına yaptıkları katkılardan dolayı ve Zeynep Bektaş'a (Orta Doğu Teknik Üniversitesi) u-kanal çıkarma işlemleri sırasındaki yardımlarından dolayı teşekkür eder.

## **EXTENDED SUMMARY**

*A detailed search of the literature on the “Web of Science” website reveals there are 676 articles related to the keywords “Tsunami + Deposit + Sediment” (Fig. 1a). After eliminating articles focusing on geophysical surveys, tsunami waveform modeling, sediment transport and flow speed inverse modeling, for example, the number of articles about the sedimentological properties of tsunami deposits is 285. Among these, only 85 articles provide sedimentary paleotsunami chronologies. Despite the fact that 2640 tsunamis were recorded worldwide during the last 4000 years (NCEI/WDS, 2019), only 85 paleotsunami studies demonstrates how far we are from understanding the history of tsunamis on Earth.*

*A comparison of coring vs. trenching methods in different coastal depositional environments reveals that studies based on coring in coastal lagoons, back-barrier wetlands and tidal flats provide longer and more complete paleotsunami chronologies than those carried out on alluvial plains (Fig. 1b and c). This tells us that the sedimentary sequences of lagoons are ideal for investigating evidence of past tsunamis.*

*The Aegean Sea hosts numerous normal faults induced by the Hellenic Arc back-arc extensional regime. Historical records report 13 submarine earthquakes during the last 3600 years (Papadopoulos et al., 2014, stars in Fig. 2a) that triggered tsunamis with an intensity greater than 6 on a 12-grade tsunami intensity scale (Papadopoulos and Imamura, 2001). In addition to historical information, sedimentary traces of tsunamis have been documented at nine localities (squares in Fig. 2a). Among these, only*

*three studies were able to detect more than one tsunami deposit in their sequences (“BG-1”, “Re” and “Da”). Karine Lagoon, located on the eastern coast of the Aegean (37.59 N, 27.18 E), is separated from the sea by a narrow (ca. 250 m) and low (ca. 1.5 m. a.s.l.) sand barrier that can easily be washed over during a tsunami (Fig. 2). The bathymetry in the lagoon is almost flat, with a maximum water depth of 2.5 m.*

*Samples from two piston cores, KRN-1 (37.6063 N, 27.1551 E) and KRN-2 (37.5881 N, 27.1731 E), were collected from the lagoon to search for sedimentary traces of past tsunamis. U-channels of 2.5 cm-width and 1.5 cm-thickness were extracted from the cores, and scanned by an ITRAX micro-XRF scanner using a Mo-tube with an exposure time of 5 s per mm. Radiographic imaging in the u-channels was carried out at 0.2 mm resolution. In order to evaluate the heterogeneity of the sediments in the radiographic images, the standard deviation of gray-scale values in the 1 mm-thick slices along the width of the radiographic images was calculated and plotted, forming the Heterogeneity Index (HI). Following this method, homogeneous parts of the sequences result in low HI values, while deformed or macrofossil-rich levels have relatively high HI values. The sediments in KRN-2 were also wet-sieved and examined under a stereo microscope to extract terrestrial organic material for radiocarbon dating (Fig. 4), and to check for the presence of macro bivalve remains that could have been transported from the sand barrier to the core sampling locations during tsunamis (Fig. 6).*

*Based on the HI plots, heterogeneous sediment intercalations were observed at seven levels in KRN-1 and five levels in KRN-2 (Fig. 5). Examination under the microscope revealed that the heterogeneous levels in KRN-2 contained relatively larger and more weathered bivalve shells compared to the homogeneous background sediments (Fig. 6). The ITRAX micro-XRF data show Ca and Cl peaks related to these*

intercalations, confirming that they are rich in carbonates, i.e. bivalve shells (Fig. 7). Since two radiocarbon datings were carried out on KRN-2, the depth scale of KRN-1 was adjusted to KRN-2 by correlating the profiles of the cores ( $Average_{CaSr} / Average_{SiK Ti Fe Zn Rb Zr}$ ) (Fig. 8), which represent relative changes in carbonate content with respect to the terrestrial detrital content of the sediments. After achieving correlation between the sequences in the cores, the coevality of carbonate-rich intercalations in both cores could be evaluated. Peaks in the HI/GD (Heterogeneity Index / Grayscale Values) profiles indicate levels that are both dark and heterogeneous; while peaks in the Ca/Ti profiles show carbonate-rich levels. Thus, the average of these profiles (Avg [HI/GD Ca/Ti]) reveals carbonate-rich intercalations containing macro bivalve shells, i.e. candidate tsunami deposits. The Avg [HI/GD Ca/Ti] profiles of both cores were overlapped and are presented together with their average (Fig. 9a). An age-depth model was constructed based on the two radiocarbon dates and by assuming that the intercalations were sudden depositional events (Fig. 9b). When the average Avg [HI/GD Ca/Ti] profile is plotted with respect to time (Fig. 9c), we see three distinct anomalies along the Avg [HI/GD Ca/Ti] profiles, i.e. candidate tsunami deposits, which temporally correlate with the 1956, 1650 and 1303 tsunamis in the region.

Historical tsunami records from the past 1500 years show that the oldest tsunami in the region was in AD 556 (Papadopoulos et al., 2014) (Fig. 9c). This tsunami had an intensity of 8 around Kos Island, and it did not leave any distinct sedimentary trace in the sequence of Karine Lagoon. Similarly, the 1389 and 1856 tsunamis around Chios Island with intensities of 6 and 8, respectively, were not detected in the sequence of the lagoon. Considering the absence of sedimentary traces of these three tsunamis in the Karine sequence, it is unlikely that the youngest intercalation was the 1948 tsunami around Karpathos Island, which had an intensity

of 7. Hence, the youngest intercalation in the sequence must be due to the tsunami triggered by the 9 July 1956 earthquake ( $M_w=7$ ), which had an intensity of 9 in the region.

The second intercalation in the Karine sequence, dated to mid-17th century, was most probably caused by the tsunami in 1650 triggered by the eruption of Columbo submarine volcano, located 10 km east of Thera (Santorini) Island. This tsunami had an intensity of 10 around Patmos Island (Pt in Fig. 9c), situated 60 km southwest of Karine Lagoon (Papadopoulos et al., 2014). Given its relatively more apparent sedimentary trace in the Karine sequence, it can be said that the 1650 tsunami was more intensely felt in the region than the 1956 tsunami.

Lastly, the oldest intercalation in the Karine sequence temporally correlates with the 1303 tsunami, which was triggered by an earthquake in the eastern Hellenic Arc. This tsunami is estimated to have had an intensity of 10 around Heraklion in the north of Crete Island (Papadopoulos et al., 2014) (Fig. 9c). Although sedimentary traces of this tsunami were detected by Alpar et al. (2012) and Papadopoulos et al. (2012) in the sequence of Dalamani Plain ("Da" in Fig. 2a), and by Avşar (2019) in Ölüdeniz Lagoon, it was not detected by other studies carried out in the Aegean Sea (Di, Li, Th, DG, Go and Re in Fig. 2a). Sedimentary traces of this tsunami could be detected in only one terrestrial sequence (among seven sequences) at Karine, while it could be detected in two studies carried out in other lagoons. This supports the idea that lagoons and coastal lakes may be more suitable depositional environments for paleotsunami investigation than terrestrial sedimentary sequences, as illustrated in Fig. 1c.

## ORCID

Ulaş Avşar  <https://orcid.org/0000-0002-3224-8399>

## **DEĞİNİLEN BELGELER / REFERENCES**

- Alpar, B., Ünlü, S., Altınok, Y., Özer, N. ve Aksu, A., 2012. New approaches in assessment of tsunami deposits in Dalaman (SW Turkey). *Natural Hazards*, 63, 181-195.
- Avşar, U., 2019. Sedimentary geochemical evidence of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean from Ölüdeniz Lagoon, SW Turkey. *Journal of Paleolimnology*, 61 (3), 373-385.
- Baranes, H.E., Woodruff, J.D., Wallace, D.J., Kanamaru, K. ve Cook, T.L., 2016. Sedimentological records of the C.E. 1707 Hoei Nankai Trough tsunami in the Bungo Channel, southwestern Japan. *Natural Hazards*, 84, 1185-1205.
- Bertrand, S., Doner, L., Akçer Ön, S., Sancar, U., Schudack, U., Mischke, S., Çağatay, M.N. ve Leroy, S.A.G., 2011. Sedimentary record of coseismic subsidence in Hersek coastal lagoon (Izmit Bay, Turkey) and the late Holocene activity of the North Anatolian Fault. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, 1-17.
- Bronk Ramsey, C., 2017. OxCal Program v. 4.3.2". University of Oxford, Radiocarbon Accelerator Unit.
- Bruins, H.J., MacGillivray, J.A., Synolakis, C.E., Benjamini, C., Keller, J., Kisch, H.J., Klügel, A. ve van der Plicht, J., 2008. Geoarchaeological tsunami deposits at Palaikastro (Crete) and the Late Minoan IA eruption of Santorini. *Journal of Archaeological Science*, 35, 191-212.
- Chagué-Goff, C., 2010. Chemical signatures of palaeotsunamis: A forgotten proxy?. *Marine Geology*, 271, 67-71.
- Chagué-Goff, C., Schneider, J.L., Goff, J.R., Dominey-Howes, D. ve Strotz, L., 2011. Expanding the proxy toolkit to help identify past events - Lessons from the 2004 Indian Ocean Tsunami and the 2009 South Pacific Tsunami. *Earth Science Reviews*, 107, 107-122.
- Chagué-Goff, C., Szczuciński, W. ve Shinozaki, T., 2017. Applications of geochemistry in tsunami research: A review. *Earth Science Reviews*, 165, 203-244.
- Clark, K., Cochran, U. ve Mazengarb, C., 2011. Holocene coastal evolution and evidence for paleotsunami from a tectonically stable region, Tasmania, Australia. *Holocene*, 21, 883-895.
- Croudace, I.W. ve Rothwell, R.G., 2015. Twenty Years of XRF Core Scanning Marine Sediments: What Do Geochemical Proxies Tell Us?, I.W. Croudace ve R.G. Rothwell (Eds.). *Micro-XRF Studies of Sediment Cores, Developments in Paleoenvironmental Research* 17 (25-102), Springer, Dordrecht.
- Dominey-Howes, D.T.M., Papadopoulos, G.A. ve Dawson, A.G., 2000a. Geological and Historical Investigation of the 1650 Mt. Columbo Eruption and Tsunami, Aegean Sea, Greece. *Natural Hazards*, 21, 83-96.
- Dominey-Howes, D.T.M., Cundy, A. ve Croudace, I., 2000b. High energy marine flood deposits on Astypalaea Island, Greece: possible evidence for the AD 1956 southern Aegean tsunami. *Marine Geology*, 163, 303-315.
- Donato, S.V., Reinhardt, E.G., Boyce, J.I., Pilarczyk, J.E. ve Jupp, B.P., 2009. Particle-size distribution of inferred tsunami deposits in Sur Lagoon, Sultanate of Oman. *Marine Geology*, 257, 54-64.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B.P., Ely, L.L., Nelson, A.R., Wesson, R.L. ve Pilarczyk, J.E., 2015. Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 113, 93-111.
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Özalp, S., 2011. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritaları Serisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Fischer, P., Finkler, C., Röbbke, B.R., Baika, K., Hadler, H., Willershäuser, T., Rigakou, D., Metallinou, G. ve Vött, A., 2016. Impact of Holocene tsunamis detected in lagoonal environments on Corfu (Ionian Islands, Greece) - geomorphological, sedimentary and microfaunal evidence. *Quaternary International*, 401, 4-16.
- Galanopoulos, A.G., 1957. The seismic sea-wave of 9 Iouliou 1956. *Praktika Academy Athens*, 32 pp. 90-101 (in Greek with Engl. abstr.).
- Goodman-Tchernov, B.N., Dey, H.W., Reinhardt, E.G., McCoy, F. ve Mart, Y., 2009. Tsunami waves generated by the Santorini eruption reached Eastern Mediterranean shores. *Geology*, 37, 943-946.

- Goff, J., Lamarche, G., Pelletier, B., Chague-Goff, C. ve Strotz, L., 2011. Predecessors to the 2009 South Pacific tsunami in the Wallis and Futuna archipelago. *Earth Science Reviews*, 107, 91–106.
- Graehl, N.A., Kelsey, H.M., Witter, R.C., Hemphill-Haley, E. ve Engelhart, S.E., 2015. Stratigraphic and microfossil evidence for a 4500-year history of Cascadia subduction zone earthquakes and tsunamis at Yaquina River estuary, Oregon, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 127, 211–226.
- Gutierrez-Mas, J.M., Lopez-Arroyo, J. ve Morales, J.A., 2009. Recent marine lithofacies in Cadiz Bay (SW Spain) Sequences, processes and control factors. *Sedimentary Geology*, 218, 31–47.
- ITIC, 2018. International Tsunami Information Center. <http://itic.ioc-unesco.org>
- Jackson, K.L., Eberli, G.P., Amelung, F., McFadden, M.A., Moore, A.L., Rankey, E.C. ve Jayasena, H.A.H., 2014. Holocene Indian Ocean tsunami history in Sri Lanka. *Geology*, 42, 859–862.
- Kelsey, H.M., Nelson, A.R., Hemphill-Haley, E. ve Witter, R.C., 2005. Tsunami history of an Oregon coastal lake reveals a 4600 yr record of great earthquakes on the Cascadia subduction zone. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 1009–1032.
- Kempf, P., Moernaut, J., Van Daele, M., Vermassen, F., Vandoorne, W., Pino, M., Urrutia, R., Schmidt, S., Garrett, E. ve De Batist, M., 2015. The sedimentary record of the 1960 tsunami in two coastal lakes on Isla de Chiloé, south central Chile. *Sedimentary Geology*, 328, 73–86.
- Kempf, P., Moernaut, J., Van Daele, M., Vandoorne, W., Pino, M., Urrutia, R. ve De Batist, M., 2017. Coastal lake sediments reveal 5500 years of tsunami history in south central Chile. *Quaternary Science Reviews*, 161, 99–116.
- Kitamura, A., Fujiwara, O., Shinohara, K., Akaike, S., Masuda, T., Ogura, K., Urano, Y., Kobayashi, K., Tamaki, C. ve Mori, H., 2013. Identifying possible tsunami deposits on the Shizuoka Plain, Japan and their correlation with earthquake activity over the past 4000 years. *Holocene*, 23, 1684–1698.
- Mamo, B., Strotz, L. ve Dominey-Howes, D., 2009. Tsunami sediments and their foraminiferal assemblages. *Earth Science Reviews*, 96, 263–278.
- Mathes-Schmidt, M., Schwarzbauer, J., Papanikolaou, I., Syberberg, F., Thiele, A., Wittkopp, F. ve Reicherter, K., 2013. Geochemical and micropaleontological investigations of tsunamigenic layers along the Thracian Coast (Northern Aegean Sea, Greece). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57, 005–027.
- May, S.M., Vött, A., Brückner, H. ve Smedile, A. 2012a. The Gyra washover fan in the Lefkada Lagoon, NW Greece—possible evidence of the 365 AD Crete earthquake and tsunamis. *Earth, Planets and Space*, 64, 859–874.
- May, S.M., Vött, A., Brückner, H., Grapmayer, R., Handl, M. ve Wennrich, V., 2012b. The Lefkada barrier and beachrock system (NW Greece) — Controls on coastal evolution and the significance of extreme wave events. *Geomorphology*, 139–140, 330–347.
- Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T. ve Yalçiner, A.C., 2000. Discovery of Minoan tsunami deposits. *Geology*, 28, 59–62.
- Mischke, S., Schudack, U., Bertrand, S. ve Leroy, S.A.G., 2012. Ostracods from a Marmara Sea lagoon (Turkey) as tsunami indicators. *Quaternary International*, 261, 156–161.
- Nanayama, F., Furukawa, R., Kiyoyuki, S., Makino, A., Soeda, Y. ve Igarashi, Y., 2007. Nine unusually large tsunami deposits from the past 4000 years at Kiritappu marsh along the southern Kuril Trench. *Sedimentary Geology*, 200, 275–294.
- NCEI/WDS, 2019. Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information. Doi: 10.7289/V5PN93H7 [Erişim tarihi: 19.01.2019]
- Papadopoulos, G.A. ve Imamura, F., 2001. A proposal for a new tsunami intensity scale. *Proceedings of the International Tsunami Symposium 2001, Seattle*, 569–577.
- Papadopoulos, G.A., Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Yalçiner, A., Fokaefs, A. ve Takahashi, T., 2012. Geological evidence of tsunamis and earthquakes at the Eastern Hellenic Arc: correlation with historical seismicity in the eastern Mediterranean Sea. *Research in Geophysics*, 2, 90–99.



- Papadopoulos, G.A., Gràcia, E., Urgeles, R., Sallares, V., De Martini, P.M., Pantosti, D., González, M., Yalciner, A.C., Mascle, J., Sakellariou, D., Salamon, A., Tinti, S., Karastathis, V., Fokaefs, A., Camerlenghi, A., Novikova, T. ve Papageorgiou, A., 2014. Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts. *Marine Geology*, 354, 81–109.
- Peterson, C.D., Carver, G.A., Cruikshank, K.M., Abramson, H.F., Garrison-Laney, C.E. ve Dengler, L.A., 2011. Evaluation of the use of paleotsunami deposits to reconstruct inundation distance and runup heights associated with prehistoric inundation events, Crescent City, southern Cascadia margin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 967–980.
- Pilarczyk, J.E. ve Reinhardt, E.G., 2012. Testing foraminiferal taphonomy as a tsunami indicator in a shallow arid system lagoon: Sur, Sultanate of Oman. *Marine Geology*, 295-298, 128-136.
- Pirazzoli, P.A., Ausseil-Badie, J., Giresse, P., Hadjidakit, E. ve Arnold, M., 1992. Historical environmental changes at Phalasarna harbour, West Crete. *Geoarchaeology*, 7, 371-392.
- Ramirez-Herrera, M.T., Lagos, M., Hutchinson, I., Kostoglodov, V., Machain, M.L., Caballero, M., Goguitchaichvili, A., Aguilar, B., Chagué-Goff, C., Goff, J., Ruiz-Fernández, A.C., Ortiz, M., Nava, H., Bautista, F., Lopez, G.I. ve Quintana, P., 2012. Extreme wave deposits on the Pacific coast of Mexico: Tsunamis or storms? — A multi-proxy approach. *Geomorphology*, 139–140, 360-371.
- Razjigaeva, N.G., Ganzey, L.A., Grebennikova, T.A., Ivanova, E.D., Kharlamov, A.A., Kaistrenko, V.M., Arslanov, Kh.A. ve Chernov, S.B., 2014. The Tohoku Tsunami of 11 March 2011: The Key Event to Understanding Tsunami Sedimentation on the Coasts of Closed Bays of the Lesser Kuril Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 171, 3307–3328.
- Reimer, P.J., vd., 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55 (4), 1869-1887.
- Röbke, B.R. ve Vött, A., 2017. The tsunami phenomenon. *Progress in Oceanography*, 159, 296-322.
- Ruiz, F., Abad, M., Cáceres, L.M., Vidal, J.R., Carretero, M.I., Pozo, M. ve González-Regalado, M.L., 2010. Ostracods as tsunami tracers in Holocene sequences. *Quaternary Research*, 73, 130-135.
- Sakellariou, D. ve Tsampouraki-Kraounaki, K., 2019. Plio-Quaternary Extension and Strike-Slip Tectonics in the Aegean. Duarte, J.C. (ed.), *Transform Plate Boundaries and Fracture Zones*. Elsevier. 478 s.
- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M., Nasu, H., Okamura, Y., Satake, K., Thomson, K.H., Matsumoto, D., Fujii, Y., Komatsubara, J. ve Aung, T.T., 2009. Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01319.
- Scheffers, A. ve Scheffers, S., 2007. Tsunami deposits on the coastline of west Crete (Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 259, 613-624.
- Smedile, A., De Martini, P.M., Pantosti, D., Bellucci, L., Del Carlo, P., Gasperini, L., Pirrotta, C., Polonia, A. ve Boschi, E., 2011. Possible tsunami signatures from an integrated study in the Augusta Bay offshore (Eastern Sicily-Italy). *Marine Geology*, 281, 1–13.
- Stuiver, M. ve Polach, H. A., 1977. Discussion: Reporting of <sup>14</sup>C data. *Radiocarbon*, 19, 355-363.
- Tjallingii, R., Röhl, U., Kölling, M. ve Bickert, T., 2007. Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8, 1-12.
- Tyuleneva, N., Braun, Y., Katz, T., Suchkov, I. ve Goodman-Tchernov, B., 2018. A new chalcolithic-era tsunami event identified in the offshore sedimentary record of Jisr al-Zarka (Israel). *Marine Geology*, 396, 67-78.
- van den Bergh, G.D., Boer, W., de Haas, H., van Weering, Tj.C.E. ve van Wijhe, R., 2003. Shallow marine tsunami deposits in Teluk Banten (NW Java, Indonesia), generated by the 1883 Krakatau eruption. *Marine Geology*, 197, 13-34.
- Vött, A., Brüeckner, H., Brockmüller, S., Handl, M., May, S.M., Gaki-Papanastassiou, K., Herd, R., Lang, F., Maroukian, H., Nelle, O. ve Papanastassiou, D., 2009. Traces of Holocene

- tsunamis across the Sound of Lefkada, NW Greece. *Global and Planetary Change*, 66, 112–128.
- Vött, A., Lang, F., Brüeckner, H., Gaki-Papanastassiou, K., Maroukian, H., Papanastassiou, D., Giannikos, A., Hadler, H., Handl, M., Ntageretzi, K., Willershaeuser, T. ve Zander, A., 2011. Sedimentological and geoarchaeological evidence of multiple tsunamigenic imprint on the Bay of Palairos-Pogonia (Akarnania, NW Greece). *Quaternary International*, 242, 213-239.
- Vött, A., Bruins, H.J., Gawehn, M., Goodman-Tchernov, B.N., De Martini, P.M., Kelletat, D., Mastronuzzi, G., Reicherter, K., Röbbke, B.R., Scheffers, A., Willershauser, T., Avramidis, P., Bellanova, P., Costa, P.J.M., Finkler, C., Hadler, H., Koster, B., Lario, J., Reinhardt, E., Mathes-Schmidt, M., Ntageretzi, K., Pantosti, D., Papanikolaou, I., Sanso, P., Scicchitano, G., Smedile, A., Szczucinski, W., 2018. Publicity waves based on manipulated geoscientific data suggesting climatic trigger for majority of tsunami findings in the Mediterranean—response to ‘Tsunamis in the geological record: making waves with a cautionary tale from the Mediterranean’ by Marriner et al. (2017). *Zeitschrift für Geomorphologie, (Supplementary Issues) 1:2*, 39 s.
- Wagner, B., Bennike, O., Klug, M. ve Cremer, H., 2007. First indication of Storegga tsunami deposits from East Greenland. *Journal of Quaternary Science*, 22, 321-325.
- Werner, V., Baika, K., Fischer, P., Hadler, H., Obrocki, L., Willershäuser, T., Tzigounaki, A., Tsigkou, A., Reicherter, K., Papanikolaou, I., Emde, K. ve Vött, A., 2018. The sedimentary and geomorphological imprint of the AD 365 tsunami on the coasts of southwestern Crete (Greece) - Examples from Sougia and Palaiochora. *Quaternary International*, 473, 66-90.
- Werner, V., Baika, K., Tzigounaki, A., Reicherter, K., Papanikolaou, I., Emde, K., Fischer, P. ve Vött, A., 2019. Mid-Holocene tectonic geomorphology of northern Crete deduced from a coastal sedimentary archive near Rethymnon and a Late Bronze Age Santorini tsunamite candidate. *Geomorphology*, 326, 167-189.