

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SAPANCA GÖLÜ'NDE KUZEY ANADOLU FAYI NEDENİYLE GELİŞEN  
POCKMARKLARIN YARI-OTOMATİK SİSTEMLE TESPİT EDİLMESİ VE  
MORFOLOJİK ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Enes SÖNMEZ**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hülya KURT**

**TEMMUZ 2023**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SAPANCA GÖLÜ'NDE KUZEY ANADOLU FAYI NEDENİYLE GELİŞEN  
POCKMARKLARIN YARI-OTOMATİK SİSTEMLE TESPİT EDİLMESİ VE  
MORFOLOJİK ANALİZLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Enes SÖNMEZ  
(505201402)**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hülya KURT**

**TEMMUZ 2023**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505201402 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Enes SÖNMEZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SAPANCA GÖLÜ'NDE KUZHEY ANADOLU FAYI NEDENİYLE GELİŞEN POCKMARKLARIN YARI-OTOMATİK SİSTEMLE TESPİT EDİLMESİ VE MORFOLOJİK ANALİZLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Hülya KURT**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Mustafa Emin DEMİRBAĞ**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Asım Oğuz ÖZEL**  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

**Teslim Tarihi**      : **09.06.2023**  
**Savunma Tarihi**    : **13.07.2023**





*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam boyunca engin bilgilerini sunan; önerileri, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Hülya KURT'a teşekkür eder, şükranlarımı sunarım. Bu çalışmada kullanılan batimetrik veriler "Sapanca Gölü ve Çevresinin Jeofizik Yöntemlerle Aktif Tektonik Araştırması" başlıklı TÜBİTAK-1001 Projesi'nden (Proje No: 117Y130) sağlanmıştır.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen ve her türlü konuda hep yanımda olan çok değerli aileme minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca beni yalnız bırakmayan, her zaman desteğini benden esirgemeyen İnşaat-Jeofizik Mühendisi Aslı ÇARK ve Araş. Gör. Nedim Gökhan AYDIN'a gönülden teşekkür ederim.

Temmuz 2023

Enes Sönmez  
(Jeofizik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. SAPANCA GÖLÜ VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ</b> .....	<b>9</b>
<b>3. METODOLOJİ</b> .....	<b>13</b>
3.1 Batimetri.....	13
3.2 Çok Işınlı Batimetri (Çok ışınlı) Verileri Hakkında Genel Bilgiler.....	15
3.3 Sapanca Gölü'nde Çok ışınlı Verilerinin Toplanması .....	18
<b>4. POCKMARK MORFOLOJİSİ</b> .....	<b>21</b>
4.1 Pockmarklarda Geometrik Sınıflama .....	25
<b>5. ÇOK IŞINLI BATİMETRİK VERİLERİN İŞLENMESİ</b> .....	<b>29</b>
5.1 Batimetri Haritasının Oluşturulması.....	30
5.2 Yarı-Otomatik Filtreleme İle Pockmark Belirleme.....	32
<b>6. GÖL TABANI MORFOLOJİK YORUMLARI</b> .....	<b>49</b>
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>57</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>73</b>



## KISALTMALAR

<b>ARCGIS</b>	: Arc Coğrafi Bilgi Sistemi (Arc Geographic Information System)
<b>BKB</b>	: Batı Kuzey Batı
<b>CTD</b>	: İletkenlik, Sıcaklık, Derinlik (Conductivity, Temperature, Depth)
<b>CTD</b>	: İletkenlik, Sıcaklık, Derinlik (Conductivity, Temperature, Depth)
<b>DAF</b>	: Doğu Anadolu Fay
<b>DAFZ</b>	: Doğu Anadolu Fay Zonu
<b>D-B</b>	: Doğu-Batı
<b>GAMS</b>	: GNSS Azimut Ölçüm Sistemi (GNSS Azimuth Measurement System)
<b>GIS</b>	: Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System)
<b>GMT</b>	: Genel Haritalama Aracı (Generic Mapping Tool)
<b>GNSS</b>	: Küresel Konumlandırma Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)
<b>GPS</b>	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
<b>K</b>	: Karlıova
<b>KAF</b>	: Kuzey Anadolu Fayı
<b>KAFZ</b>	: Kuzey Anadolu Fay Zonu
<b>KB-GD</b>	: Kuzeybatı-Güneydoğu
<b>KDAFZ</b>	: Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu
<b>K-G</b>	: Kuzey-Güney
<b>LADS</b>	: Hava Kaynaklı Lazer Derinlik Ölçer (Laser Airborne Depth Sounder)
<b>MBES</b>	: Çok ışınlı Echosounder
<b>MRU</b>	: Hareket Referans Birimi (Motion Reference Unit)
<b>MTA</b>	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
<b>ODTÜ</b>	: Orta Doğu Teknik Üniversitesi
<b>ÖDFZ</b>	: Ölü Deniz Fay Zonu
<b>POS MV</b>	: Deniz Araçları İçin Konum ve Yön Belirleme Sistemi (Position and Orientation System for Marine Vessels)
<b>QGIS</b>	: Kuantum Coğrafi Bilgi Sistemi (Quantum Geographic Information System)
<b>SVP</b>	: Ses Hızı Profili (Sound Velocity Profile)

**TÜBİTAK** : Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu

**TWT** : Çift Yönlü Seyahat Zamanı (Two Way Travel Time)



## SEMBOLLER

<b>A</b>	: Alan
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>D</b>	: Derinlik
<b>d</b>	: Pockmark Kalınlığı
<b>kHz</b>	: Kilohertz
<b>km</b>	: Kilometre
<b>m</b>	: Metre
<b>MaksSD</b>	: En Büyük Su Derinliği
<b>MinSD</b>	: En Küçük Su Derinliği
<b>Mw</b>	: Moment Magnitüd Ölçeği
<b>Rx</b>	: Alıcı
<b>Tx</b>	: Ses Kaynağı (Verici)
<b>v</b>	: Hız
<b>x</b>	: En Uzun Eksen Uzunluğu
<b>y</b>	: En Uzun Eksene Dik Eksenin Uzunluğu
<b>e</b>	: Eksantirisite (Dışmerkezlilik)



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> Neotektonik yapıları ve bölgeleri gösteren Türkiye'nin basitleştirilmiş tektonik haritası (Bozkurt, 2001'den Düzenlenmiştir). .....	2
<b>Şekil 1.2:</b> a) KAFZ fay segmentleri (kırmızı çizgiler) (Türkiye Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) ve sabit Avrasya levhasına göre Anadolu levhasının GPS'den türetilen yatay hız alanı (siyah oklar) haritası. b) KAFZ ve 1939-2012 yılları arasında gerçekleşen depremlerin odak mekanizmaları (Bohnhoff ve diğ., 2016'dan düzenlenmiştir). .....	3
<b>Şekil 1.3:</b> KAFZ'nin kuzey ve güney kollarını gösteren harita (Bohnhoff ve diğ., 2016'dan düzenlenmiştir). .....	4
<b>Şekil 1.4:</b> Doğu Marmara bölgesindeki deprem üsleri ve odak çözüm mekanizmaları (Dikbaş ve diğ., 2018'dan değiştirilmiştir). .....	4
<b>Şekil 1.5:</b> a) Çalışma alanını gösteren harita b) Sapanca Gölü'nde toplanan çok ışınli batimetri, boomer, chirp kaynaklı sismik, yandan taramalı sonar verilerinin dağılımı (Kurt ve diğ., 2020). .....	7
<b>Şekil 2.1:</b> (a) Çalışma alanının konumu, (b) Sapanca Göl'ü ve çevresine ait fay haritası, kırmızı faylar MTA diri fay haritasından oluşturulmuştur (Emre ve diğ., 2011), siyah faylar Gülen ve diğ. 2014 çalışmasından oluşturulmuştur (Gülen ve diğ., 2014'ten değiştirilerek). .....	10
<b>Şekil 2.2:</b> Gölcük 1999 depremi sonrasında Sapanca ve çevresinde kırılan segmentler (Lettis ve diğ., 2002) .....	11
<b>Şekil 2.3:</b> Çalışma alanı ve çevresi için basitleştirilmiş jeolojik harita (Tarı ve Tüysüz, 2015).....	11
<b>Şekil 3.1:</b> Çok ışınli Echosounder ölçüm cihazının konfigürasyonu ve tekne hareketleri (Jakobsson ve diğ., 2016).....	16
<b>Şekil 3.2:</b> a) Sapanca Gölü'nde jeofizik verilerin toplanmasında kullanılan İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesine ait araştırma teknesi b) Çok ışınli batimetri verisinin toplanmasında kullanılan ekipmanlar. (Kurt ve diğ., 2020) 19	19
<b>Şekil 3.3:</b> Gölde CTD ve derinlik okuma çalışmalarına ait fotoğraflar (Kurt ve diğ., 2020) .....	19
<b>Şekil 4.1:</b> Pockmark formasyonunun gelişim şeması: a-) gaz borusu deniz tabanına doğru yükselir, b-) akışkan gaz/sıvı deniz tabanının altında birikmeye başlar, c-) aşırı basınç deniz tabanında zamansal tümsek oluşmasına neden olur, d-) akışkan patlaması su sütunun içinden gerçekleştirilir (Sarıtaş ve diğ., 2018'den değiştirilerek) .....	22
<b>Şekil 4.2:</b> MBES kullanılarak kaydedilen gaz emisyonlu pockmark (Idczak ve diğ., 2020) .....	25
<b>Şekil 4.3:</b> Pockmark şematik görseli. ....	26
<b>Şekil 4.4:</b> Birim (unit) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002'den düzenlenmiştir). .....	26
<b>Şekil 4.5:</b> Normal Pockmark (Hovland ve diğ., 2002'den düzenlenmiştir). .....	26
<b>Şekil 4.6:</b> Uzunlamasına (Elongated) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002'den düzenlenmiştir).....	27

<b>Şekil 4.7:</b> Gözlü (Eyed) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002'den düzenlenmiştir). ....	27
<b>Şekil 4.8:</b> Pockmark dizileri (Kurt ve diğ., 2020'den değiştirilerek). .....	28
<b>Şekil 4.9:</b> Pockmark derinliklerinin deniz tabanı çökelleri kalınlığına göre dağılımları (Brothers ve diğ., 2012). .....	28
<b>Şekil 5.1:</b> Batimetrik verilerin işlenmesinde izlenen akış şeması.....	30
<b>Şekil 5.2:</b> Çok ışınlı batimetri haritası. ....	31
<b>Şekil 5.3:</b> Kabartı haritası. ....	31
<b>Şekil 5.4:</b> Bir pockmarka ait taşma noktasının yeri. ....	32
<b>Şekil 5.5:</b> Z-limit değerleri için şematik görsel a) z-limit=4m b) z-limit= 7 m.....	33
<b>Şekil 5.6:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=1 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	34
<b>Şekil 5.7:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=2 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	34
<b>Şekil 5.8:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=4 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	35
<b>Şekil 5.9:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=5 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	35
<b>Şekil 5.10:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=6 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	36
<b>Şekil 5.11:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=10 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	36
<b>Şekil 5.12:</b> Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=7 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir). ....	37
<b>Şekil 5.13:</b> Minimum derinlik eşiği = 0.01 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). .....	38
<b>Şekil 5.14:</b> Minimum derinlik eşiği = 0.1 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	38
<b>Şekil 5.15:</b> Minimum derinlik eşiği = 0.2 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	39
<b>Şekil 5.16:</b> Minimum derinlik eşiği = 0.3 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	39
<b>Şekil 5.17:</b> Minimum derinlik eşiği = 0.4 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	40
<b>Şekil 5.18:</b> minimum derinlik eşiği = 0.5 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	40
<b>Şekil 5.19:</b> Minimum derinlik eşiği = 1 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	41
<b>Şekil 5.20:</b> Minimum derinlik eşiği = 1.3 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir). ....	41
<b>Şekil 5.21:</b> a) Farklı minimum derinlik eşiği değerlerine göre pockmark değişimleri.b) Değişimlerin izlendiği alanın gölde bulunduğu yer kırmızı çerçeve ile verilmiştir. ....	42
<b>Şekil 5.22:</b> Manuel düzenleme ile veri setinden çıkarılan alanlar a) poligon veri seti b) kabartı haritası.....	43
<b>Şekil 5.23:</b> Minimum derinlik eşik değeri belirleme ve buffer işlemi için şematik görsel. Eşik-1 değeri 10 cm seçilmiştir, Eşik – 2 değeri 30 cm seçilmiştir. ....	44
<b>Şekil 5.24:</b> Tüm pockmarkların çalışma alanındaki konumlarını gösteren harita. ....	45
<b>Şekil 5.25:</b> Birbirinden manuel olarak ayrılan iki pockmarkın a) harita üzerinde b) kesit olarak görünümü. ....	46
<b>Şekil 5.26:</b> Normal pockmarkların çalışma alanındaki konumlarını gösteren harita. ....	46

<b>Şekil 5.27:</b> Deniz tabanındaki bir pockmark'ın basitleştirilmiş diyagramı.....	47
<b>Şekil 6.1:</b> Sapanca Gölü'nde Ertürk (1994)'ün göl tabanında belirlediği litolojik birimleri gösteren harita üzerinde pockmarkların yoğunlaştığı alanlar (Ertürk, 1994'den değiştirilmiştir.).....	49
<b>Şekil 6.2:</b> Haritalanan 49 normal pockmark için pockmark alanı ve kalınlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik. Mavi kesikli çizgi eşlenen pockmark işaretleri için eğilim çizgisini gösterir.....	50
<b>Şekil 6.3:</b> Çizilen 49 normal pockmark için pockmark derinliği (d) ile minimum su derinliği (MinSD) ilişkisini gösteren grafik.....	51
<b>Şekil 6.4:</b> 0 ile 1 arasında değişebilen farklı eksantriklik değerlerine sahip elips örnekleri (Gafeira ve diğ., 2012).....	52
<b>Şekil 6.5:</b> Eksantrikliklerine göre normal pockmark frekans dağılımını gösteren histogram.....	52
<b>Şekil 6.6:</b> Normal pockmarkların en derin noktalarını, merkez noktalarını ve sınır çizgilerini gösteren harita.....	53
<b>Şekil 6.7:</b> Sapanca Gölü tabanındaki fay izleri (Kurt ve diğ., 2020'den değiştirilerek). .....	54
<b>Şekil 6.8:</b> KAF'ın Sapanca Gölü'nün güneydoğusundaki fay izi a) push up bölgesini gösteren harita b) 3 boyutlu push up modeli c) push up bölgesinden alınan kesit. ....	55
<b>Şekil 6.9:</b> Sapanca Gölü'nün çok ışınlı batimetri verisine göre çizilmiş faylar. ....	56



# SAPANCA GÖLÜ'NDE KUZEY ANADOLU FAYI NEDENİYLE GELİŞEN POCKMARKLARIN YARI-OTOMATİK SİSTEMLE TESPİT EDİLMESİ VE MORFOLOJİK ANALİZLERİ

## ÖZET

Sapanca Gölü Marmara Bölgesi'nin doğusunda D-B doğrultulu uzanan ve Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) etkisiyle oluşmuş tektonik bir göldür. Yaklaşık 1200 km uzunluğundaki aktif KAF, Doğu Anadolu'da Karlıova'dan başlar ve yaklaşık olarak doğu-batı doğrultusunda Marmara Bölgesi üzerinden Ege Denizi'nin kuzeyine kadar uzanmaktadır. Sağ yanal doğrultu atımlı bir fay olan KAF, Doğu Marmara bölgesinde Güney kol, Orta kol ve Kuzey kol olmak üzere 3 segmente ayrılmıştır. Kuzey kolu, Bolu'nun batısından Sapanca Gölü, İzmit Körfezi, Marmara Denizi ve Saros Körfezi üzerinden Kuzey Ege Denizi'ne kadar uzanmaktadır. Tarihsel ve aletsel dönemde KAF Zonu (KAFZ) boyunca büyüklüğü  $M_w > 7$  olan çok sayıda deprem kaydedilmiştir. Doğu Marmara bölgesinde meydana gelen; 1957 Abant ( $M_w = 7.1$ ), 1967 Mudurnu ( $M_w = 7.1$ ), 1999 Gölcük ( $M_w = 7.4$ ) ve 1999 Düzce ( $M_w = 7.2$ ) depremleri bunlardan bazılarıdır.

Doğu Marmara bölgesinde yer alan Sapanca Gölü, KAF'a bağlı olarak gelişmiş, D-B doğrultusunda ~16 km, kuzey-güney doğrultusunda ~5 km uzunluğunda tektonik bir göldür. Göl, deniz seviyesinden 33 metre yükseklikindedir. Göl, güneyinde yer alan Samanlı Dağları (Kartepe kütlesi) ve bu dağların yamaçlarıyla sınırlanmıştır. Kuzeyde Kocaeli Platosu bulunurken, doğuda Adapazarı Ovası ve Arifiye Ovası, batıda ise İzmit-Sapanca oluşu bulunmaktadır. Sapanca Gölü, İzmit-Sapanca segmenti ile Sapanca-Akyazı segmenti arasında yer almaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda gölün KAF hareketlerine bağlı olarak çek-ayır (pull-apart) mekanizmasıyla oluştuğu belirtilmiştir.

*“Sapanca Gölü ve Civarının Aktif Tektoniğinin Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması”* başlıklı TÜBİTAK-1001 projesi (Proje No: 117Y130) kapsamında (Kurt ve diğ., 2020) Sapanca Gölü tabanının aktif tektonik özelliklerini belirlemek için çok ışınlı batimetri ve yüksek çözünürlüklü sığ sismik yansıma verileri toplanmıştır. Gölün ~17.85 km<sup>2</sup>'lik alanında, çok ışınlı batimetri verileri ile santimetre ölçeğinde yatay ve dikey çözünürlük sunan haritalarda aktif tektonik yapıların izleri ve buna bağlı gelişen göl tabanı çukurlukları araştırılmıştır. Göl tabanına ait batimetrik verilerin işlenmesi ve yorumlanmasına yönelik haritalama çalışmalarının çeşitli aşamalarında; SURFER-16, GMT (Genel Haritalama Aracı), QGIS (Kuantum Coğrafi Bilgi Sistemi) ArcGIS (Arc Coğrafi Bilgi Sistemi) ve MATLAB yazılımları kullanılmıştır.

Oluşturulan iki ve üç boyutlu batimetrik kontur ve kabartı haritalarında gölde hakim olan aktif faylarla ilgili çizgisellikler ve pockmark yapıları gözlenmiştir. Göle ait batimetrik değişimin bütününe bakıldığında göle güney batı ucundan girip BKB doğrultusunda uzanan çizgiselliğin KAF'ın kuzey koluna ait olduğu muhakkaktır. Nitekim Kurt ve diğ. (2020)'de bu batimetrik verilere ilaveten yüksek çözünürlüklü sığ sismik veriler değerlendirilerek bu yapının genişlemeli-büklüm yapısı bulunduğu

belirtmiştir. Fayla ilişkili bu çizgiselliklerin gölün özellikle doğu kısmında yaptığı sola sıçramalar (en-echelon) üzerinden alınan batimetrik kesitlerde basınç sırtı (pressure-ridge) yapıları gözlenmiştir. Göle ait batimetrik harita ve kesitlerde gözlenen pockmark yapıları, genellikle deniz veya göl tabanında bulunan ve çapları birkaç santimetreden birkaç metreye kadar değişebilen tortulardaki dairesel çöküntülerdir. Bu çukurluklar, akışkanların deniz veya göl tabanında salınması sonucu oluşmaktadır. Gölde gözlenen pockmark yapılarının boyutları, geometrik özellikleri, dağılımı ve yoğunluğu gibi özellikleri, oluşturulan kontur ve kabartı haritalarından, manuel olarak yapılan tespitlerin oluşturabileceği hataları en aza indirmek amacıyla, yarı-otomatik bir sistem kullanılarak belirlenmiştir. Yarı-otomatik filtreleme yöntemi, manuel olarak yapılan haritalama ve karakterizasyon sürelerinden çok daha kısa sürede tamamlanabilen, güvenilir bir sistemdir. Fakat batimetrik verilerin çözünürlüğünden büyük ölçüde etkileneceğinden yüksek çözünürlüklü verilerle kullanılması önerilmektedir.

Belirlenen pockmarklar fay hattına belirli mesafelerde yer almakta olup, çok ışınlı batimetri (multibeam bathymetry) verilerinin toplandığı alanda toplam sayısı 439'dur. Gölde belirlenen pockmarklara bazı morfolojik özellik analizleri uygulanmıştır. Pockmark yapılarının çapları 1-50 metre, kalınlıkları ise 0.1-3.9 metre arasında değişmektedir. Bu analizlere ve ölçümlere göre, gölde bulunan pockmark yapıları "birim" ve "normal" olmak üzere karakterize edilmiştir. Birim pockmarklar genellikle 1-10 metre genişliğinde çapa sahip ve 0.5 metre kalınlığa kadar ulaşabilmektedirler. Gölde yapılan ölçümlere göre, normal pockmarklar ise 10-50 metre çapa ve yaklaşık 4.0 metre kalınlığa kadar ulaşabilmektedir.

Pockmarklar, gölün güneydoğu bölgesinde de bulunmasına rağmen, kuzeydoğu bölgesinde yoğunlaşmıştır. Jeolojik haritalar ve batimetri haritaları birlikte incelenerek gölde bulunan pockmarkların yoğun olarak çamurlu kum çökellerinde oluştuğu görülmüştür. Normal pockmarklar için pockmark kalınlığı (d) ile pockmark kesit alanı (A) arasında doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Genel eğilime göre pockmark kalınlığının artmasıyla, kesit alanı da artış göstermektedir. Pockmark kalınlığı ve minimum su derinliği (MinSD) arasında ise anlamlı bir ilişki yakalanamamış olup farklı kalınlık değerlerinde yaklaşık olarak sabit bir minimum su derinliği tespit edilmiştir.

Gölde bulunan normal pockmarkların şekli ve yönelimi göl tabanı jeolojisi ve hidrolik aktivite hakkında bilgi sunmaktadır. Normal pockmarklara ait eksantrisite (dışmerkezlilik) değerleri hesaplanarak ağırlıklı olarak 0.3 bulunmuştur. Böylelikle pockmarkların genellikle dairesel bir şekle sahip olduğu anlaşılmıştır. Buradaki dairesel pockmarkların, göl tabanındaki fayın deprem aktivitesi ile güçlü ve ani bir akışkan çıkışı tarafından oluştuğu düşünülmektedir. Eksantriklik değerlerindeki farklılık ince sedimanların göl suyunda hakim olan dip akıntılarında etkilendiğini göstermektedir. Normal pockmarkların yaklaşık %50'sinin KD-GB yönlü olduğu, geri kalanının ise farklı yönelimlere sahip olduğu görülmüştür. Tutarlı yönelimler pockmarkların kısa bir süre içerisinde oluştuğunu ve/veya dip akıntısı rejiminin uzun süredir sabit olduğunu gösterirken, farklı yönelimler akışkan akışı ve/veya akım rejiminde oluşan değişimleri işaret etmektedir.

# **DETECTION AND MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF POCKMARKS DEVELOPED DUE TO NORTH ANATOLIA FAULT IN SAPANCA LAKE WITH SEMI-AUTOMATIC SYSTEM**

## **SUMMARY**

Sapanca Lake is a tectonic lake located in the eastern part of the Marmara Region, extending in a northeast-southwest direction and formed under the influence of the North Anatolian Fault (NAF). The active NAF, which is approximately 1200 km long, starts from Karlıova in Eastern Anatolia and extends roughly in an east-west direction through the Marmara Region to the north of the Aegean Sea. The NAF, which is a right-lateral strike-slip fault, is divided into three segments in the Eastern Marmara region: the Southern branch, the Central branch, and the Northern branch. The Northern branch extends from the west of Bolu to Sapanca Lake, the Izmit Bay, the Marmara Sea, and the Saros Bay all the way to the northern Aegean Sea. Numerous earthquakes with magnitudes greater than  $M_w > 7$  have been recorded along the NAF Zone (NAFZ) in both historical and instrumental periods. Some of the earthquakes that occurred in the Eastern Marmara region include 1957 Abant earthquake ( $M_w = 7.1$ ), 1967 Mudurnu earthquake ( $M_w = 7.1$ ), 1999 Gölcük earthquake ( $M_w = 7.4$ ), and 1999 Düzce earthquake ( $M_w = 7.2$ ).

Sapanca Lake, located in the Eastern Marmara region, is a tectonic lake developed in connection with the NAF. It has an approximate length of about 16 km in the northeast-southwest direction and about 5 km in the north-south direction. The lake is situated at an elevation of 33 meters above sea level. It is bounded by the Samanlı Mountains (Kartepe Massif) to the south and their slopes. The Kocaeli Plateau is located to the north, while the Adapazarı Plain and Arifiye Plain are to the east, and the Izmit-Sapanca trough is to the west. Sapanca Lake is located between the Izmit-Sapanca segment and the Sapanca-Akyazı segment. Studies conducted so far have indicated that the lake was formed through a pull-apart mechanism due to the movements of the NAF.

Within the scope of the TÜBİTAK-1001 project titled " Investigation of Active Tectonics of Lake Sapanca and Surrounding with Geophysical Methods " (Project No: 117Y130), multi-beam bathymetry and high-resolution shallow seismic reflection data were collected to determine the active tectonic characteristics of the Sapanca Lake basin (Kurt et al., 2020). In an area of approximately 17.85 km<sup>2</sup> of the lake, the traces of active tectonic structures and the resulting lake basin depressions were investigated through multi-beam bathymetry data, which provided centimeter-scale horizontal and vertical resolution maps. Various software tools were used in the processing and interpretation of the bathymetric data for mapping purposes, including SURFER-16, GMT (Generic Mapping Tools), QGIS (Quantum Geographic Information System), ArcGIS (Arc Geographic Information System), and MATLAB.

In the generated two-dimensional and three-dimensional bathymetric contour and relief maps, lineaments related to dominant active faults and pockmark structures were

observed in Sapanca Lake. When looking at the overall bathymetric changes in the lake, it is evident that the lineament entering the lake from the southwest and extending in the northeast-southwest direction belongs to the northern branch of the NAF. Indeed, Kurt et al. (2020) noted that this lineament exhibits an extensional-folding structure based on the evaluation of high-resolution shallow seismic data in addition to the bathymetric data. The pressure-ridge structures were observed in the bathymetric profiles taken over the left-stepping (en-echelon) movements of these lineaments, particularly in the eastern part of the lake. The pockmark structures observed in the bathymetric maps and profiles of the lake are circular depressions in sediments on the seabed or lake floor, ranging in diameter from a few centimeters to several meters. These depressions are formed as a result of fluid venting from the seafloor or lake floor. The dimensions, geometric characteristics, distribution, and density of the pockmark structures observed in the lake were determined using a semi-automatic system to minimize errors that may arise from manual detections, based on the generated contour and relief maps. The semi-automatic filtering method is a reliable system that can be completed in a much shorter time compared to manual mapping and characterization processes. However, it is recommended to use high-resolution data with the method as it can be significantly affected by the resolution of bathymetric data.

The identified pockmarks are located at certain distances from the fault line and a total of 439 pockmarks were detected in the area where the multi-beam bathymetry data were collected. Morphological analyses were conducted on the identified pockmarks in the lake. The diameters of the pockmark structures range from 1 to 50 meters, and their depths vary between 0.1 and 3.9 meters. Based on these analyses and measurements, the pockmark structures in the lake were characterized as "unit" and "normal." Unit pockmarks generally have a diameter of 1-10 meters and can reach a depth of up to 0.5 meters. According to the measurements conducted in the lake, normal pockmarks have diameters ranging from 10 to 50 meters and depths of approximately 4.0 meters.

Although pockmarks are also found in the southeastern region of the lake, they are concentrated in the northeastern region. By examining geological maps and bathymetric maps together, it is observed that the pockmarks in the lake predominantly occur in muddy sand deposits. For normal pockmarks, a linear relationship was found between the pockmark thickness ( $d$ ) and the pockmark cross-sectional area ( $A$ ). According to the general trend, as the pockmark thickness increases, the cross-sectional area also increases. However, no significant relationship was found between the pockmark thickness and the minimum water depth (MinSD), and approximately a constant minimum water depth was determined for different thickness values.

The shape and orientation of the normal pockmarks in the lake provide information about the lakebed geology and hydraulic activity. The eccentricity (eccentricity) values of the normal pockmarks were calculated, and a weighted average of 0.3 was found. This indicates that the pockmarks generally have a shape close to circular. It is believed that these circular pockmarks are formed by strong and sudden fluid outbursts associated with seismic activity along the fault line in the lakebed. The variation in eccentricity values suggests that it is influenced by the dominant bottom currents in the lake water, affecting the fine sediments. Approximately 50% of the normal pockmarks were found to have a northeast-southwest orientation, while the rest had different orientations. Consistent orientations indicate that the pockmarks formed

within a short period of time and/or that the bottom current regime has been stable for a long time. Different orientations suggest changes in fluid flow and/or current regime.

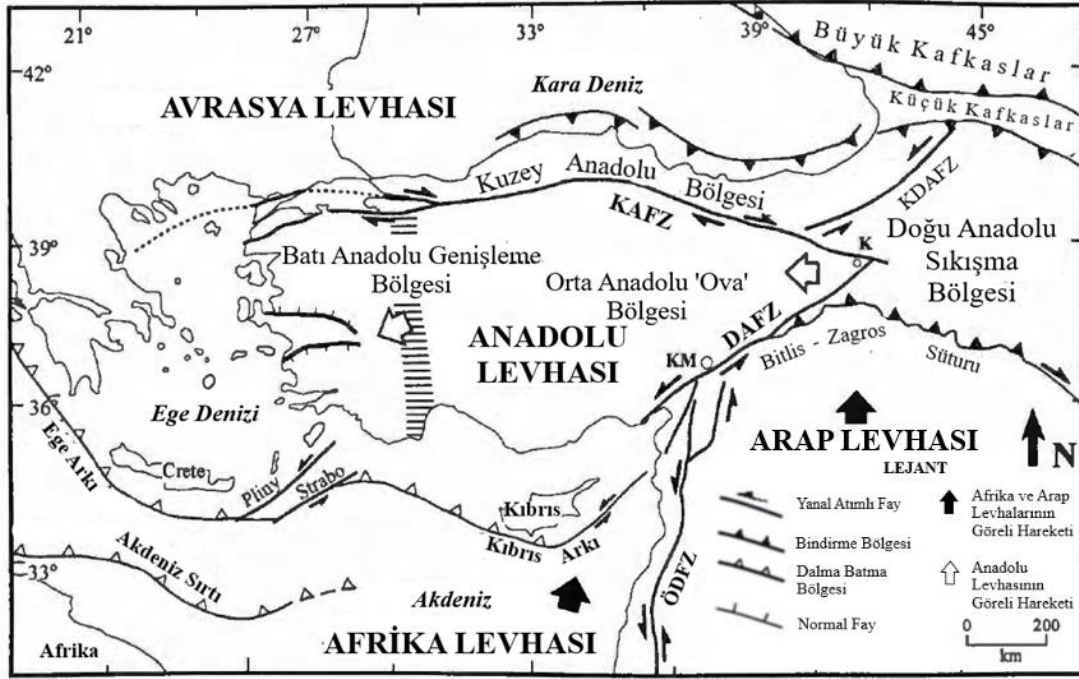




## 1. GİRİŞ

Alp-Himalaya orojenik kuşağında yer alan Türkiye; Arap, Anadolu, Afrika ve Avrasya Levha hareketlerinin etkisinde sismik açıdan aktif bir tektonizmaya sahiptir. Türkiye'nin tektonik evrimi, çeşitli levhaların etkileşimleri ve bu etkileşimlerin sonucunda ortaya çıkan tektonik deformasyonlar üzerine kuruludur. Arap plakasının Anadolu plakası altına dalmasıyla Anadolu plakası batıya doğru kaçış hareketi yapmaktadır (Şengör ve diğ., 1981; İmren ve diğ., 2001; Taymaz ve Yılmaz, 2009; Göğüş ve Zabcı, 2009). Afrika levhası, kuzeydoğu yönde hareket ederken, Anadolu levhası batıya doğru hareket etmektedir. Şekil 1.1'de plakaların hareket yönleri gösterilerek, bu hareketler sonucu meydana gelen neotektonik yapılar belirtilmiştir. Levha hareketlerinden dolayı bölge dört neotektonik alana ayrılmıştır: Doğu Anadolu Daralma Alanı, Kuzey Anadolu Alanı, Merkez Anadolu "Ova" Alanı ve Batı Anadolu Genişleme Alanı. Bu bölgeler Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), Ölü Deniz Fay Zonu (ÖDFZ) ve Ege-Kıbrıs Yay'ı (Ark) ile sınırlanmıştır (Bozkurt, 2001). Plaka hareketleri sonucunda Bitlis-Zagros hattında çarpışma, Helenik ve Kıbrıs yayında dalma-batma meydana gelirken, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) boyunca doğrultu atımlı faylanma meydana gelmektedir.

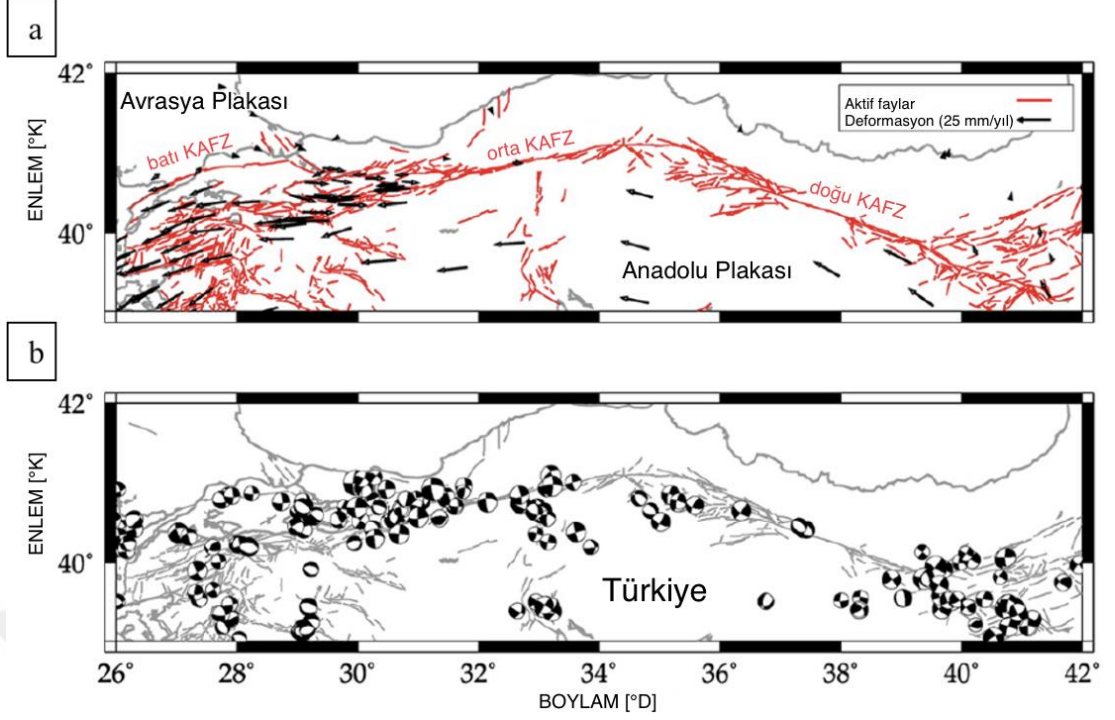
Dünyanın, kıtasal ölçekte büyük deformasyon yaratan, önemli doğrultu atımlı faylarından biri olan KAF; Arap ve Anadolu levhalarının etkileşim bölgesinde yer alması nedeniyle yoğun tektonik aktiviteye sahiptir. KAF yaklaşık 1200 km uzunlukta D-B uzanımlı olarak doğuda Bingöl'ün Karlıova ilçesinden batıda Saroz Körfezi'ne kadar uzanmaktadır (Ketin, 1948; Şengör, 1979). KAF, farklı deprem aktiviteleri ve karakteristiklere sahip segmentlere ayrılmıştır. Plaka hareketleri ve gerilim birikmesi sonucu segmentlerde doğrultu atımlı hareket meydana gelmektedir.



**Şekil 1.1:** Neotektonik yapıları ve bölgeleri gösteren Türkiye'nin basitleştirilmiş tektonik haritası (Bozkurt, 2001'den Düzenlenmiştir).

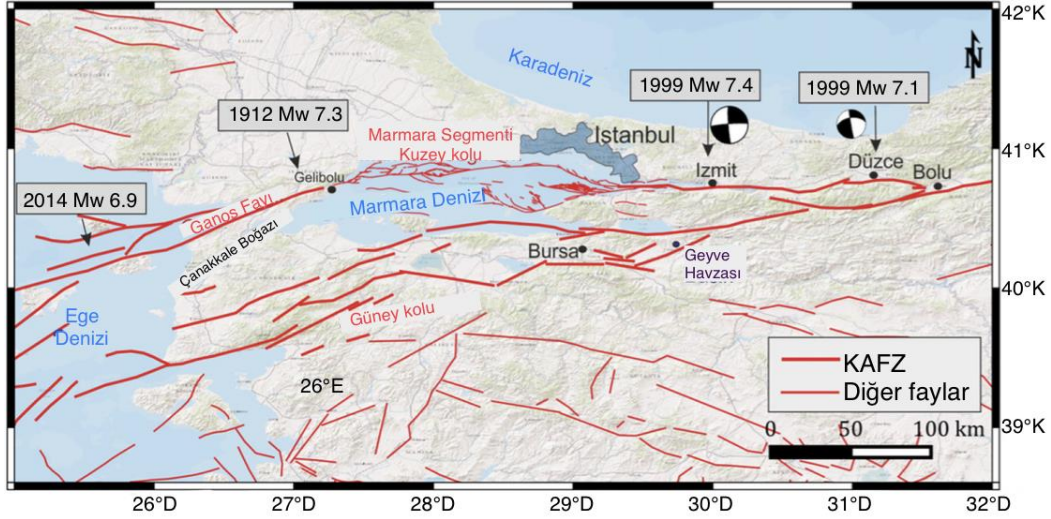
Şekil 1.2 (a)'da Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nden (MTA) alınan bilgilerle KAF'ın haritalanmış fay segmentleri gösterilmiş olup, McClusky ve diğ. (2000)'den alınan verilerle Anadolu levhasının durağan Avrasya plakasına göre Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System – GPS) ile türetilen yatay hız alanları ve yönleri siyah oklar ile belirtilmiştir (Bohnhoff ve diğ., 2016). GPS yöntemleriyle yapılan hesaplamalar sonucu KAF'nın doğusunda kayma hızı yaklaşık 20 mm/yıl olarak, batısında ise 25 mm/yıl olarak ölçülmüştür (Barka, 1992; McClusky ve diğ., 2000; Reilinger ve diğ., 2006).

Şekil 1.2 (b)'de gösterilen deprem odak mekanizma çözümleri incelendiğinde KAF'ın sağ yanal doğrultu atımlı bir fay türü olduğunu göstermektedir, ancak fayın batı kısımlarında normal faylanma depremleri de gözlenmektedir (Flerit ve diğ., 2004; Bohnhoff ve diğ., 2005; Şengör ve diğ., 2005; Ekström ve diğ., 2012).



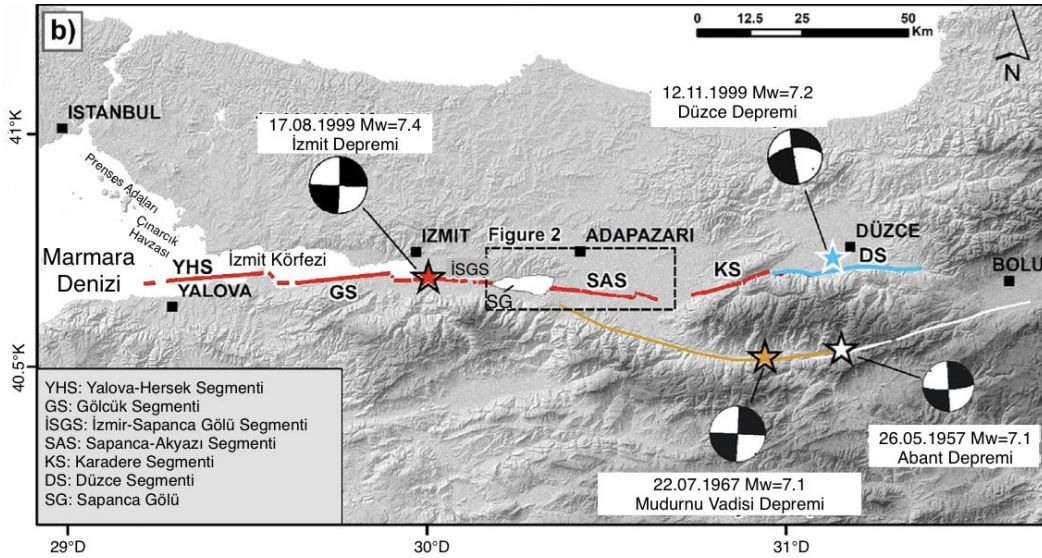
**Şekil 1.2:** a) KAFZ fay segmentleri (kırmızı çizgiler) (Türkiye Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) ve sabit Avrasya levhasına göre Anadolu levhasının GPS'den türetilen yatay hız alanı (siyah oklar) haritası. b) KAFZ ve 1939-2012 yılları arasında gerçekleşen depremlerin odak mekanizmaları (Bohnhoff ve diğ., 2016'dan düzenlenmiştir).

KAF'ın batısında yer alan ve Türkiye'nin en yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş bölgelerinden biri olan Marmara Bölgesi, büyük bir deprem potansiyeline sahiptir. KAF Marmara Bölgesi'nde Bolu'nun batısında 3 ana kola ayrılmaktadır (Şekil 1.3). Haritada fay segmentleri (kırmızı) ve son zamanlarda meydana gelen büyük depremler yıl ve büyüklükleri ile birlikte depremin merkez üssünü işaret edecek şekilde verilmiştir (Bohnhoff ve diğ., 2016). Kuzey kol, Almacık bloğunun batısında sırasıyla Sapanca Gölü, İzmit Körfezi, Marmara Denizi ve Saroz Körfezi'ni takip etmektedir. Orta Kol ise Almacık bloğundan ayrılarak Güney Batı'ya doğru dönmektedir. Güney Kol Mekece üzerinde Orta Kol'dan ayrılır Bursa ve İnegöl arasında normal faylar ile Eskişehir Fay Zonu'na bağlanmaktadır (Seyitoğlu ve diğ., 2016).



**Şekil 1.3:** KAFZ'nin kuzey ve güney kollarını gösteren harita (Bohnhoff ve diğ., 2016'dan düzenlenmiştir).

Tarih boyunca KAF üzerinde birçok büyük deprem ( $M_w > 6.0$ ) meydana gelmiştir. Doğu Marmara bölgesinde Sapanca Gölü civarındaki bu depremlerden bazıları: 1957 Abant ( $M_w=7.1$ ), 1967 Mudurnu ( $M_w=7.1$ ), 1999 Gölcük ( $M_w=7.4$ ), 1999 Düzce ( $M_w=7.2$ ) ve yakın tarihli olan 2022 Düzce ( $M_w=6.0$ ) depremleridir. Şekil 1.4'te Doğu Marmara bölgesindeki yıkıcı depremler ve depremlerin sismik yüzey kırılmaları gösterilmiştir.



**Şekil 1.4:** Doğu Marmara bölgesindeki deprem üsleri ve odak çözüm mekanizmaları (Dikbaş ve diğ., 2018'dan değiştirilmiştir).

KAFZ'nin, Marmara Denizi'ne girerken Sapanca Gölü içerisinde de geçerek İzmit Körfezi'ne ulaşan Kuzey Kolunda Sapanca-Gölcük segmenti olarak adlandırılan ana kuzey segmenti, D-B doğrultuludur. Gölcük ilçesinin güneyinde bu fay kolu

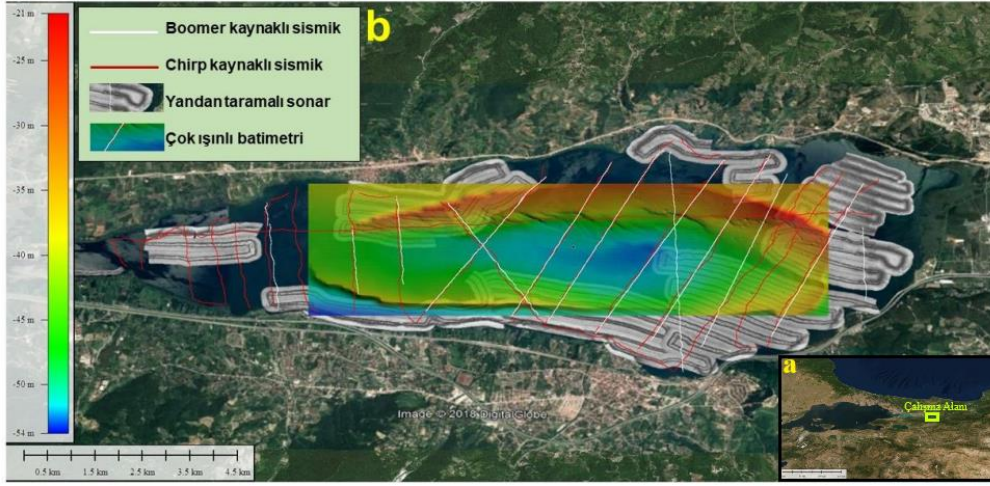
güneybatıya doğru yön değiştirmektedir (Barka, 1997). Sapanca-Gölcük segmenti, KAF üzerinde gerçekleşen depremlerin neden olduğu doğrultu atımlı hareketlerle karakterizedir. 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 depremleri gibi birçok yıkıcı deprem bu segment üzerinde meydana gelmiştir. 1999'da gerçekleşen depremler Marmara Bölgesi'nde ~130 km kırılarak çok yıkıcı etkiler meydana getirmiştir (Emre ve diğ., 1999).

Meydana gelen yıkıcı depremler sonrasında Marmara Denizi'nde birçok jeolojik ve jeofizik yöntemler kullanılarak veriler toplanıp KAF'ın batı kesimindeki eksik olan bilgiler giderilmeye çalışılmıştır. İzmit Körfezi ve Adapazarı segmentleri arasında kalan, KAF'ın deprem aktivitesinin en yoğun olduğu Kuzey Kolu'nun içinden geçtiği Sapanca Gölü'nde de tarih boyunca çalışmalar yapılmıştır. İzmit Körfezi'nde KAF'ın Kuzey kolu "Sismik Yansıma ve Çok Işınlı Batimetri (multibeam bathymetry)" yöntemleri kullanılarak incelenmiştir (Alpar ve Yaltırak, 2002; Çağatay ve diğ., 2003; 2012; Polonia ve diğ., 2004; Cormier ve diğ., 2006; Okyar ve diğ., 2008; Kurt ve Yücesoy, 2009; Demirel ve diğ., 2020).

Sapanca Gölü'nde Erinç (1949), göl tabanından 156 örnek alarak göl tabanı derinlik haritası oluşturmuştur. Ertürk (1994), 60 adet örnek alarak göl tabanı sedimanlarını analiz etmiştir. Lettis (2002)'in yaptığı batimetri çalışması sonucunda Sapanca Gölü'nün kuzeyde Sapanca Fay segmenti ile Güneyde ise normal fay ile sınırlandığı belirlenmiştir. Sapanca Gölü kuzeydoğusunda Çarksuyu deresi ile Sakarya Nehri'ne bağlanmaktadır. Gürbüz ve Gürer (2008), göl-nehir etkileşimini, tortu taşınması ve birikmesini 47 dip örneği ile incelemiş olup çalışmalarını batimetrik echosounder ile desteklemişlerdir. Schwab ve diğ. (2009), Sapanca Gölü'nden 7 noktadan karot örnekleri alarak paleolimnolojik araştırmalara ve geçmiş deprem kayıtlarına katkı sağlamıştır. Leroy ve diğ. (2010) ise 5 sediment karotunun çok yönlü analizlerini yapmıştır. Birçok jeoloji ve jeofizik yönteminin bir arada kullanıldığı en önemli çalışmalardan olan Gülen ve diğ. (2014) Sapanca Gölü içerisinde KAF'ın çek-ayır (pull-apart) fay geometrisine sahip olduğunu saptamışlardır. Bunu tespit ederken sığ sismik yansıma (30 adet profil; 84 km uzunluk), yandan taramalı sonar (side-scan sonar) yöntemleri uygulanmış ve bir profil doğrultusunda 3 adet karot örneği alınarak analizler yapılmıştır. Gündüz (2015) çalışmasında göl tabanındaki akifer miktarlarını ve kalitesini ortaya koymuştur.

Sapanca Gölü'ndeki günümüze kadar yapılmış bu çalışmalar gölün oluşumu ve aktif tektonik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için yeterli olamamıştır. Eski çalışmalardaki teknolojik ve profil sıklığı eksikliğinden dolayı hala göl tabanından geçen sağ yanal doğrultu atımlı KAF'ın kuzey kolu hakkında daha fazla bilgiye ihtiyaç olduğu görülmektedir. Doğrultu atımlı faylar deniz ve göl tabanlarından her zaman bir iz oluşturmadığından yapılan çalışmalarda yalnızca göl tabanı görüntüsü elde etmek yeterli olmayabilir. Bu nedenle birçok yöntem çalışma alanında uygulanmalı ve eş zamanlı olarak veriler arası korelasyon sağlanmalıdır. Bu amaçla gerçekleştirilen "Sapanca Gölü ve Civarının Aktif Tektoniğinin Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması" başlıklı TÜBİTAK-1001 Projesi (Proje No: 117Y130) kapsamında gölün çevresindeki kara alanlarında ve gölde sığ jeofizik veriler toplanmıştır (Kurt ve diğ., 2020). Projenin göl kısmında Şekil 1.5'te gösterildiği gibi çok ışınlı batimetri (çok ışınlı), boomer, chirp kaynaklı sismik ve yandan taramalı sonar verileri toplanmıştır. Kurt ve diğ. (2020)'de gölde toplanan sığ jeofizik verilere ilaveten ilk kez toplanan ve göl tabanında cm ölçeğindeki değişimleri gösteren çok ışınlı batimetrik verilerden oluşturulan harita ve kesitlerde takip edilen aktif fay izlenen çizgiselliklerine dayanarak KAF'ın göle güneydoğu ucundan girdikten sonra B-KB yönelimi ile batıya doğru uzandığı ve göl tabanında genişlemeli büklüm geometrisi oluşturduğu gözlenmiştir. Gölün oluşumunun, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda öne sürülen çek-ayır modelinden ziyade genişlemeli büklüm yapısına bağlı olduğu ilk kez bu çalışma ile belirlenmiştir. Kurt ve diğ. (2020)'de ayrıca çok ışınlı batimetrik verilerden oluşturulan harita ve kesitlere ilaveten sığ sismik ve sonar verilerine dayanarak göl tabanında yoğun bir pockmark dağılımı belirlenmiştir. Çalışmada bu pockmark yapılarının KAF'ın gölde oluşturduğu aktif fay davranışına bağlı olarak göl tabanından püsküren gaz ve/veya sıvı çıkışları ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasında Kurt ve diğ. (2020)'ne ait çok ışınlı batimetrik verileri kullanarak gölde gözlenen pockmarkların geometrik nitelikleri, sahadaki dağılımları ve birbiri ile ilişkileri araştırılmıştır. Belirlenen bu pockmark özellikleri ve göl tabanında gözlenen ve aktif faylarla ilişkilendirilen çizgisellikler araştırılmış ve gölün aktif tektoniğine bağlı bulguların sunulması amaçlanmıştır.



**Şekil 1.5:** a) Çalışma alanını gösteren harita b) Sapanca Gölü'nde toplanan çok ışınlı batimetri, boomer, chirp kaynaklı sismik, yandan taramalı sonar verilerinin dağılımı (Kurt ve diğ., 2020).

Sapanca Gölü'nde bu kapsamda gölün yaklaşık 17.85 km<sup>2</sup>'lik bir alanında toplanan verilerle yüksek çözünürlüklü batimetrik haritalar oluşturularak yorumlanmıştır. Sedimentasyonun fazla olduğu su tabanında aktif fayları çevreleyen ve akışkan (gaz/sıvı) çıkışlarıyla oluştuğu düşünülen pockmark yapılarının detaylı geometrik ve dağılım özellikleri belirlenerek sınıflandırmalar yapılmıştır.



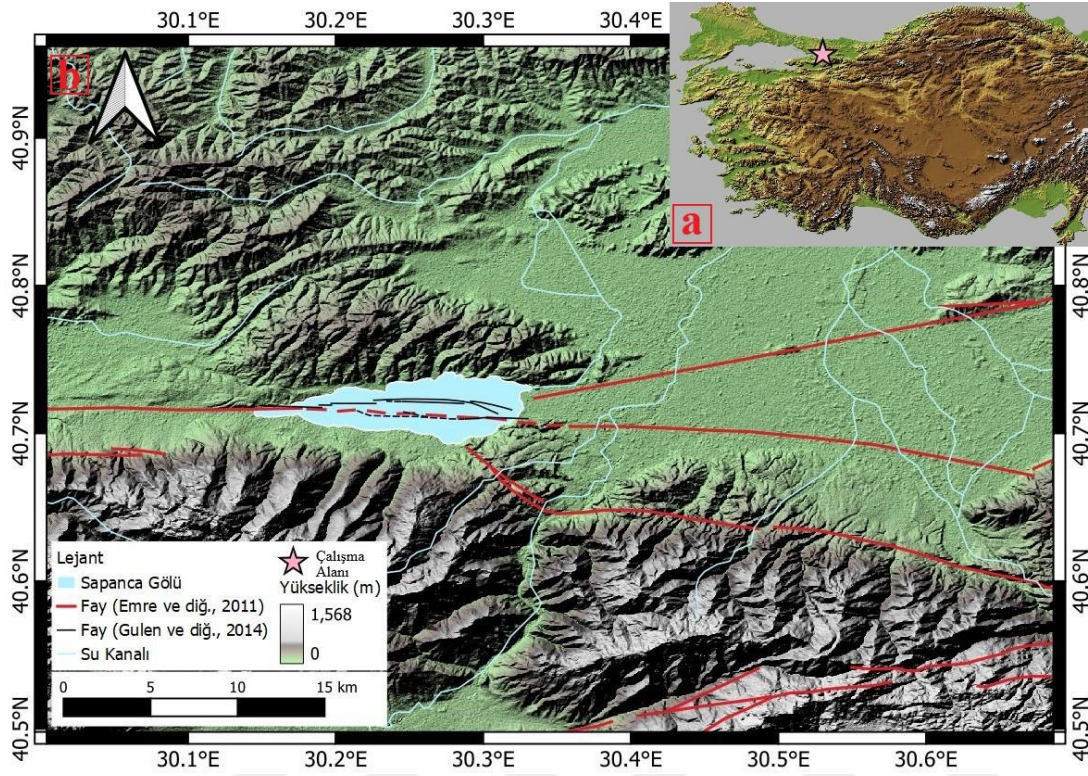
## 2. SAPANCA GÖLÜ VE ÇEVRESİNİN JEOLojİSİ

Tezin çalışma alanı olan Sapanca Gölü, Türkiye'nin kuzeybatısındaki İzmit'in güneydoğusu ile Sakarya'nın güneybatısı arasında konumlanmıştır. Araştırma alanı, Sapanca Gölü'nün güneyinde yer alan Samanlı Dağları (Kartepe kütle) ve bu dağların yamaçlarıyla sınırlanmıştır. Kuzeyde, Kocaeli Platosu bulunmaktadır. Araştırma alanının doğu ve batı sınırlarını alüvyal sahalar ve ova alanları oluşturmaktadır. Doğuda Adapazarı Ovası ve Arifiye Ovası yer almaktadır, batıda ise İzmit-Sapanca oluğu bulunmaktadır. KAF'ın batı ucunda bulunan ve Doğu Marmara Bölge'sindeki kuzey kolu üzerinde bulunan Sapanca Gölü deniz seviyesinden 30 m yüksekte olan bir tatlı su havzasıdır. Çalışma alanının Türkiye haritası üzerinde konumu Şekil 2.1 (a)'da gösterilmiştir. Gölün genişliği (K-G uzanımı) ~ 5.5 km, uzunluğu (D-B uzanımı) ~15.8 km ve yüzey alanı ise ~ 47 km<sup>2</sup>'dir. Gölün ortalama derinliği ~ 36 m olup en derin yeri ~ 61 m'dir (Erinç, 1949; Ceylan, 1990).

Sapanca Gölü, jeomorfolojisi ve tektonik durumu göz önüne alındığında, tektonik göller grubuna ait bir göldür. Şekil 2.1 (b)'de Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve Gülen ve diğ. (2014)'den alınan verilerle oluşturulmuş Sapanca Göl'ü ve çevresine ait fay haritası sunulmuştur. Bu çalışmalara göre göl, Sapanca (İzmit-Sapanca Gölü) ve Sakarya (Sapanca-Akyazı) fay segmentleri arasında meydana gelen bir "step-over" bölgesi sonucunda oluşmuştur. 1999 İzmit depremi sonrasında Sapanca Gölü'nün batimetri verileri kullanılarak göl tabanının özellikleri, boyutları ve fay geometrisinin ortaya koyulduğu bir çalışma Sapanca havzasının kuzeyde Sapanca fay segmenti ve güneyde normal faylar tarafından sınırlanan bir yapı olduğunu göstermektedir (Lettis ve diğ., 2002).

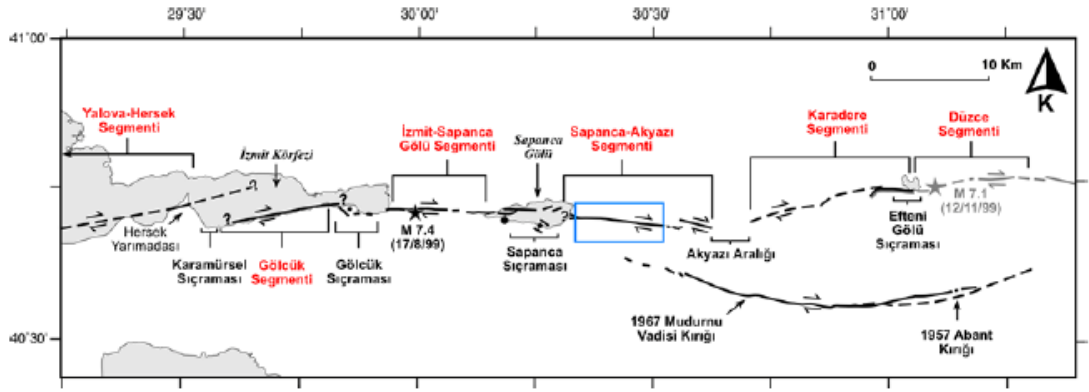
İzmit Körfezi ve Düzce arasında 17 Ağustos 1999 depremi sonrasında ~150 km yüzey kırığı oluşmuştur ve bu kırık 5 farklı segment şeklinde tanımlanmıştır (Barka ve diğ., 2002). Bu segmentler batıdan doğuya doğru sırasıyla Hersek, Karamürsel-Gölcük, İzmit-Sapanca, Sapanca-Akyazı ve Karadere segmentleridir. Gölün batısında İzmit-Sapanca segmenti, doğusunda Sapanca-Akyazı segmenti bulunmaktadır (Şekil 2.2).

İzmit-Sapanca segmenti D-B uzanımlıdır ve toplam uzunluğu ~25 km'dir. Sapanca-Akyazı segmenti KB-GD uzanımlı ve toplam uzunluğu ~25 km'dir (Dikbaş, 2009).



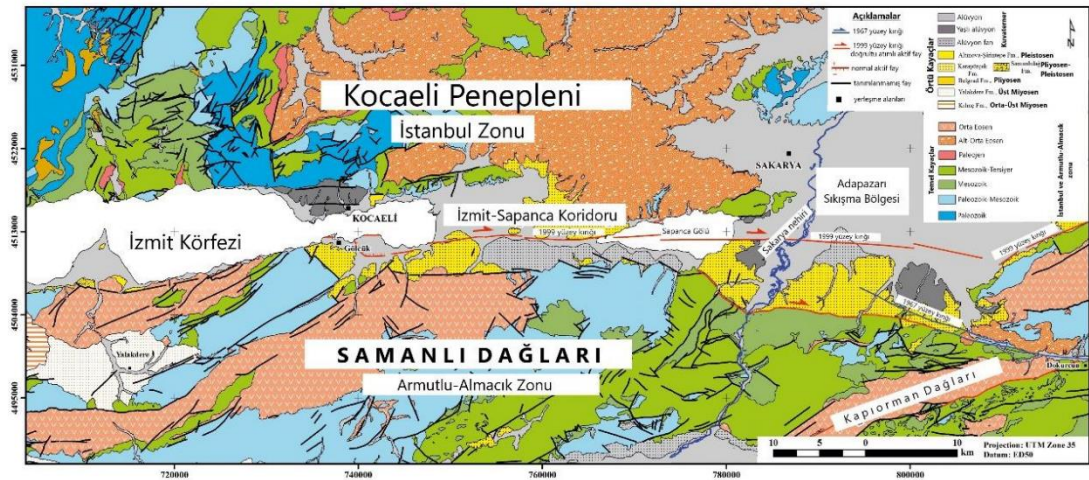
**Şekil 2.1:** (a) Çalışma alanının konumu, (b) Sapanca Göl'ü ve çevresine ait fay haritası, kırmızı faylar MTA diri fay haritasından oluşturulmuştur (Emre ve diğ., 2011), siyah faylar Gulen ve diğ. 2014 çalışmasından oluşturulmuştur (Gulen ve diğ., 2014'ten değiştirilerek).

İzmit-Sapanca koridoru, Trakya-Kocaeli pennelemi (İstanbul Zonu) ile Armutlu-Almacık yaylası arasında yer alan bir ovadır. Bu koridor, kuzeyde Armutlu-Almacık yaylasını sınırlayan KAFZ'nin kuzey kolunun etkisi altındadır (Elmas ve Gürer, 2004). İzmit-Sapanca Koridoru boyunca 17 Ağustos 1999 depremi sırasında meydana gelen yüzey yırtılmasının, havzanın bir tarafındaki ana fayla ilişkili olan asimetrik çek-ayır havzada, havza ortası fayı şeklinde ortaya çıktığı belirlenmiştir (Gürbüz ve Gürer, 2008b). Bu asimetrik çek-ayır havzada, Sapanca Gölü tabanından geçen doğrultu atımlı tektonik (KAF) ile ayrı bir çek-ayır (pull-apart) havzası olarak gelişmiştir (Neugebauer, 1995; Barka ve diğ., 2000; Lettis ve diğ., 2000; Rathje ve diğ., 2004; Gürbüz ve Gürer, 2008a; Leroy ve diğ., 2009).



**Şekil 2.2:** Gölçük 1999 depremi sonrasında Sapanca ve çevresinde kırılan segmentler (Lettis ve diğ., 2002).

Çalışma alanı olan Sapanca Gölü ve çevresinin bulunduğu Kuzeybatı Anadolu'nun jeolojik evrimi Paleotektonik ve Neotektonik olmak üzere iki temel döneme ayrılmaktadır. Paleotektonik dönemde, Pontid bölgesi, Armutlu-Ovacık bölgesi ve Sakarya bölgesi olmak üzere üç tektonostratigrafik birim oluşmuştur (Elmas ve Gürer, 2004). Bölgedeki Neotektonik dönem ise Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun gelişimiyle başlamıştır (Şengör ve Yılmaz, 1981). Sapanca Gölü Neotektonik birimlerin bulunduğu bölge olan İzmit-Sapanca koridorunda konumlanmıştır.



**Şekil 2.3:** Çalışma alanı ve çevresi için basitleştirilmiş jeolojik harita (Tarı ve Tüysüz, 2015).

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi İzmit-Sapanca koridorunun litolojik birimleri, kuzeyden güneye doğru, akarsu/taşkın ovası birimlerinden oluşan Karapürçek Formasyonu'ndan ve üst Pliyosen-Pleistosen dönemlerine ait alüvyal-fan çökellerinden oluşmaktadır.

Armutlu-Almacık yaylası, İzmit-Sapanca koridorunun güney sınırında yer alır ve KAFZ'nun kuzey ve güney kolları arasında doğu-batı yönlü bir basınç sırtı yapısı olarak gelişmiştir. Koçyiğit (1988); Gürbüz ve Gürer (2008b) Armutlu-Almacık Yaylası için güney kısımda üst Miyosen alüvyal-fan/deltaik çökellerden, kuzey kısmında ise alt Pliyosen yaşlı transgresif çökellerden oluştuklarını belirtmiştir. Yine Armutlu-Almacık Zonu için yaşları tartışmalı olan üç metamorfik ve bir Paleozoik-Mesozoik yaşlı metaofiyolitten oluşmaktadır. Üst Miyosen-Holosen örtü (cove) birimleri Armutlu-Almacık zonunda daha yaygındır (Emre ve diğ., 1998; Görmüş ve diğ., 1997; Sichenberg ve diğ., 1975; Tarı ve Tüysüz, 2016). Trakya-Kocaeli penepleni ise, İzmit-Sapanca koridorunun kuzey sınırını oluşturur ve geç Miyosen döneminde oluşmuş bir erozyon yüzeyidir. Emre ve diğ. (1998) Trakya-Kocaeli Penepleni'nin geç Miyosen'de kumtaşı, killi kireçtaşı, şeyl ve silttaşı gibi çökellerle oluştuğunu belirtmiştir.

Tarı ve Tüysüz (2016) İstanbul Zonu'nun genel olarak Paleozoik ve Trias yaşlı sedimanlardan oluştuğunu tespit etmiştir. Paleozoik yaşlı kayalar, Sapanca Gölü havzasının en yaşlı birimlerini oluşturmaktadır. Gölün kenarları çoğunlukla birleşmiş alüvyal yelpazeler (fans), teraslar (terraces), Holosen plajları ve nehirlerin ağzında ilerleyen delta yelpazelerinden (fans) oluşmaktadır (Rathje ve diğ., 2004). Sapanca Gölü'nün tabanını Plio-Kuaterner yaşlı alüvyal fan ve yeni alüvyon çökelleri oluşturmaktadır (ODTÜ-MTA, 1999; Kanıbir ve diğ., 2006; Gürbüz ve Gürer, 2008a). Kıyıya yakın birimlerde kum çökelleri, daha derin bölgelerde ise genellikle siltli çökeller bulunmaktadır. Gölün güney bölgesinde kuzeye göre çok daha fazla çökel (tortu) birikimi gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak gölün daha büyük havza boyutları ve güneydeki Samanlı Dağları'nın dik yamaçları olduğu belirtilmiştir. Çalışma alanının güneyindeki Samanlı dağları, bir basınç sırtı yapısı olarak yükselmiştir (Koçyiğit, 1988). Bu dağların Sapanca Gölü'ne bakan cephesi Paleozoik-Mesozoik yaşlı metamorfik ve meta-ofiyolitik kayaları içermektedir.

### 3. METODOLOJİ

Bu çalışmada, Sapanca Gölü'nün yapısal ve stratigrafik analizi için TÜBİTAK-1001 projesi kapsamında (Proje No: 117Y130) elde edilen yüksek çözünürlüklü çok ışınlı batimetri verileri kullanılmıştır (Kurt ve diğ., 2020). İzleyen paragraflarda başta çok ışınlı batimetri olmak üzere batimetrik verilerin toplanmasına ve işlenmesine dair detaylı bilgiler sunulmuştur.

#### 3.1 Batimetri

Batimetri, sualtı topoğrafyasının çıkarılmasına yönelik yapılan ölçmelerin gerçekleştirildiği ve okyanuslardaki, nehirlerdeki veya göllerdeki su derinliği değerlerini içeren bir yöntemdir. Bu alandaki çalışmalar, sualtı topografyasını ve yüzey altı yapılarını incelemeyi amaçlar. Batimetrik veriler, deniz tabanının şeklini, derinlik değişikliklerini ve sualtı volkanları, sığılıklar, resifler, kıta sahanlıkları, okyanus hendekleri ve sırtları gibi su altı coğrafi yapıları içermektedirler. Bu veriler, deniz jeolojisi, levha tektoniği, okyanus akıntıları, sedimantasyon süreçleri ve deniz ekosistemleri gibi çeşitli alanlarda çalışmalarını desteklemek için kullanılmaktadır.

On dokuzuncu yüzyılın başlarından itibaren, batimetriye ilişkin çalışmalar başlamıştır. Deniz seviyesini ölçmek için kullanılan denizaltı halatlarının geliştirilmesi, deniz tabanının derinliğini tahmin etme çabalarını tetiklemiştir. Deniz tabanındaki dağlar, sahanlıklar, kanyonlar ve hendekler, on dokuzuncu yüzyılın ortalarından beri farklı derecelerde doğrulukla haritalanmıştır (Dierssen ve Theberge, 2020). Bu süreçte batimetriye yönelik öncül çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bugün, batimetri teknolojileri ve yöntemleri hızla gelişmekte ve daha hassas, ayrıntılı ve geniş kapsamlı batimetri verilerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

Batimetri verileri, su kütesinin derinliklerini ölçmek ve tabanının şeklini belirlemek için çeşitli teknolojik araçlar ve yöntemler kullanılarak toplanmaktadır. Veriler, fiziksel temas kurmadan deniz tabanını dolaylı olarak araştıran “uzaktan algılama” yöntemleri kullanılarak elde edilmektedir. Spesifik olarak, sensörler bir ses, ışık veya radyo dalgaları ışını yayar ve ışının bir yüzeyden yansıtılması ve sensöre geri dönmesi

için geçen gidiş-dönüş seyahat süresini ölçmektedir. Geçen süre, ışının kat ettiği mesafeyle ilişkilendirilir ve inferbatimetri için kullanılmaktadır. Işının geri dönmesi için geçen süre ne kadar uzunsa, kat edilen mesafe o kadar büyük olmaktadır.

Batimetrik veriler çeşitli şekillerde toplanmaktadır: Uydu altimetrisi, tek ışınlı iskandiller (single beam echosounders) ve çok ışınlı iskandiller (çok ışınlı echosounders). Uydu verileri, geniş bir alan üzerinde düşük çözünürlükte genel özellikleri gösteren haritalar üretmek için kullanılabilir. Uydu altimetrisi, okyanus yüzeyinin yüksekliğini ölçer. Deniz tabanında tepeler/dağlar varsa, o bölgenin etrafındaki yerçekimi kuvveti daha fazla olacak ve dolayısıyla deniz yüzeyi şişecektir. Bu ölçüm, deniz tabanının daha yüksek olduğu yerleri göstermek için kullanılabilir ve bu, düşük çözünürlükte geniş bir alan üzerinde genel özellikleri gösteren haritalar üretmek için kullanılabilir.

Tek ışınlı iskandiller (single beam echosounders), doğrudan ekipmanın altında tek bir derinlik noktası çizgisi oluşturur. Bu ölçümler genellikle, genel deniz tabanı modellerini ve/veya balık sürülerini belirlemek için bir tekne hareket halindeyken yapılır. Çok ışınlı iskandil cihazları (çok ışınlı echosounders) ve hava kaynaklı lazer ölçümleri (LADS) gibi her alanda birden fazla derinlik noktası olarak yığınlarca veri yakalayan ekipmanlardır. Bu veri kümeleri çok yüksek çözünürlüklüdür ve veriler bir metreden daha iyi doğruluktur.

Elde edilen batimetri verileri, daha sonra işlenir, analiz edilir ve haritalandırılır. İşleme süreci, verilerin düzeltilmesini, düzenlenmesini ve filtrelenmesini içermektedir. Bu aşamada, verilerdeki gürültüyü azaltmak, yanlış ölçümleri düzeltmek ve homojen bir veri seti elde etmek amaçlanmaktadır. Analiz aşamasında, batimetrik veriler istenen özellikler ve parametreler açısından incelenmektedir. Son aşamada, batimetri verileri haritalandırılmaktadır. Batimetrik haritalar, arazi özelliklerinin şeklini ve yüksekliğini göstermek için çizgiler kullanan topoğrafik haritalara çok benzemektedir. Topoğrafik haritalarda, çizgiler eşit yükseklikteki noktaları birleştirirken batimetrik haritalar ise eşit derinlikteki noktaları birleştirir. Bu haritalar ile özellikle deniz tabanının jeomorfolojisini anlamak, okyanus tektoniğini incelemek veya sediment taşıma modellerini belirlemek gibi araştırma sorularına yanıtlar bulunabilmektedir.

### 3.2 Çok Işınlı Batimetri (Çok ışınlı) Verileri Hakkında Genel Bilgiler

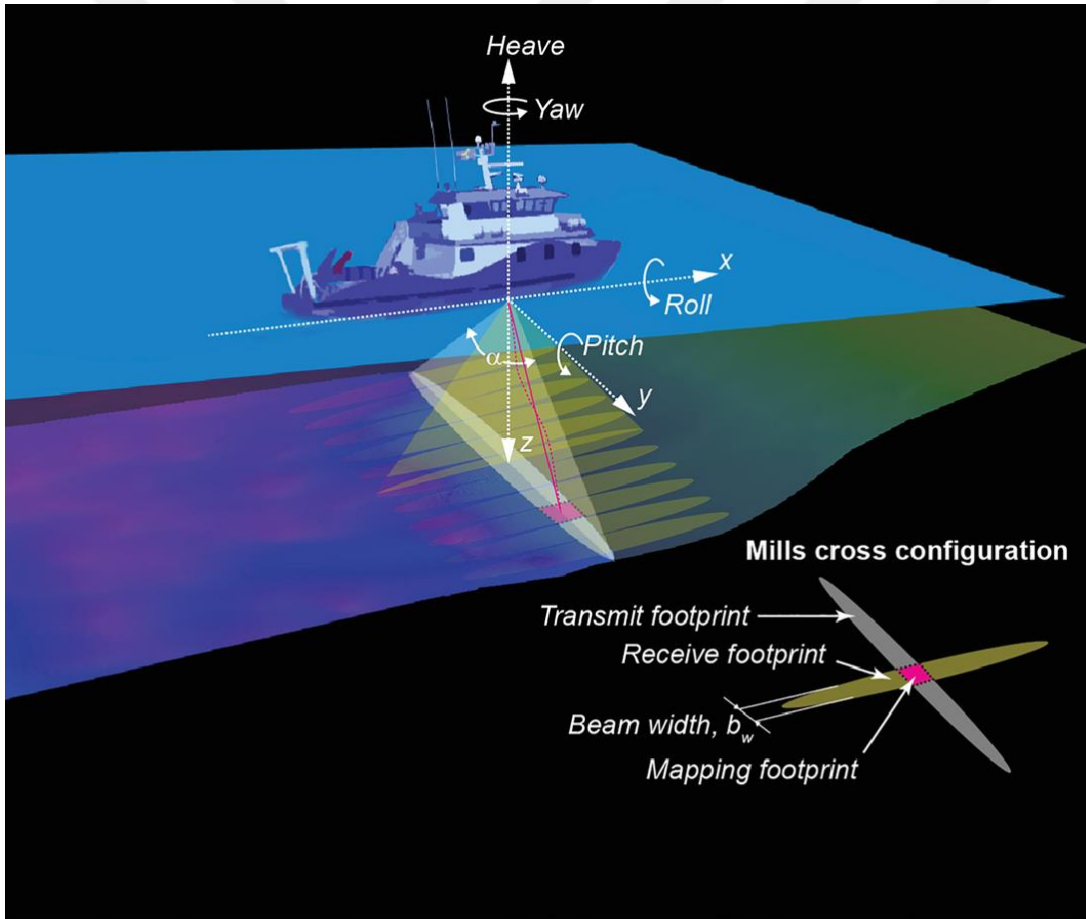
Çok ışınlı batimetri (Çok ışınlı), batimetrik verilerin toplanması için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde temel prensip ses ışınlarının iki yönlü seyahat zamanının ölçülerek daha sonrasında derinlik bilgisinin elde edilmesine dayanmaktadır.

White (1971) sığ sular için ilk çok ışınlı sonarlar yirmi yılı aşkın bir süre önce kullanıma sunulduğundan bahsetmiştir. 1984 yılında açık deniz petrol ve gaz altyapısı çalışmaları için ilk kez sığ su çok ışınlı echosounder (500-1000 kHz) kullanılmıştır (Hammerstad ve diğ., 1985; Micallef ve diğ., 2017). Denizel alanlarda kullanılan batimetrik sistemlerin sayısı yıllar geçtikçe artış göstermiştir ve neredeyse her yerde bulunur hale gelmiştir (Cloet ve diğ., 1982; Hammerstad ve diğ., 1988; Pohner, 1986; Oldenburg, 1987; Harre ve Meyer, 1989; Simrad, 1992; Hughes Clarke ve diğ., 1996; Micallef ve diğ., 2017). 2000lerin başından itibaren yüksek kaliteli deniz tabanı haritaları oluşturmak için, gelişmiş algoritma ve yazılımların kullanılması ile gelişmiş düzeltmeler ve filtreleme teknikleri, daha net ve gürültüsüz sonuçlar elde etmeye yardımcı olmuştur.

Çok ışınlı batimetri, yüksek veri yoğunluğu sağlar ve geniş bir alanı hızlı bir şekilde kapsayabilmektedir. Bu sayede batimetrik veriler daha ayrıntılı ve kapsamlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Yüksek çözünürlük, su altı rölyefinin detaylarını yakalamayı ve su altı yapılarını (örneğin kayalar, resifler, batık gemiler) belirlemeyi mümkün kılmaktadır. Çok ışınlı ölçümler genellikle, tek ışınlı araştırmaların kullandığı küçük ölçekli haritalama, liman girişleri, kanallar veya sığ sular gibi küçük su kütleleri yerine; derin denizler, okyanuslar gibi daha büyük su kütlelerinde uygulanmaktadır.

Su tabanı taramasının gerektiği durumlarda çok ışınlı echosounder (MBES) derinlik-ölçerler kullanılmaktadır. Bunlar dar açılı tek ışınlı derinlik-ölçerlere özdeşirler ancak yayılımları tek ışınlılardan farklı olarak sadece düşeyde değildir. Çok ışınlı batimetride teknenin altındaki su derinliğini direkt olarak ölçmek yerine, geniş bir ışın seti gönderilmektedir. MBES, ölçüm alınan noktada hem sağa hem sola doğru onlarca ses ışınlarının oluşturduğu yelpaze demetinden oluşarak ses dalgalarını geniş bir yelpazede iletmektedir (Jakobsson ve diğ., 2016). Böylece MBES batimetrisinde; tek ışın sondajında olduğu gibi gözlemcinin seyrek iki boyutlu profiller arasında enterpolasyon yapması yerine üç boyutlu bir yüzey incelenebilmektedir (Micallef ve diğ., 2017).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi çok ışınlı dalgaları, ses hızı profili (sound velocity profile – SVP) bilgisine ve ölçüm sırasında teknenin hareketinin (heave, pitch, roll and yaw) ayrıntılı ölçümlerine dayalı olarak su sütunu boyunca geometrik olarak izlenmektedir (Jakobsson ve diğ., 2016). Bu esnada alıcı dönüştürücü dizisinin (Mills cross veya Mills T) verici diziye göre  $90^\circ$  döndürüldüğü yine aynı şekilde gösterilmiştir. Temelde bir multibeam sistemde bulunması gereken sensörler şunlardır: Sağa-sola ve öne arkaya hareketleri ölçen hareket sensörü (roll ve pitch), yukarı ve aşağı ani hareketleri ölçen ivme sensörü (heave) ve ölçme aracını sağa sola dönüşlerini ölçen doğrultu sensörü (jiroskop veya vektör GPS). Standart saha kalibrasyon prosedürleri [Patch Testi (Godin, 1998)] sensörler arası açısal yanlış hizalamaları ve zaman gecikmesini hesaplamak için kullanılmaktadır (Micallef ve diğ., 2017).



**Şekil 3.1:** Çok ışınlı Echosounder ölçüm cihazının konfigürasyonu ve tekne hareketleri (Jakobsson ve diğ., 2016)

Bir tekneye bağlı çok ışınlı echosounder tarafından, su kütlesi tabanına bir "şerit" boyunca yelpaze şeklinde gönderilen bir ışın demeti, tabandan geri yansıtıkça, veriler

toplanır ve işlenir. İşlenen veriler, çalışma sırasında teknede gerçek zamanlı (eş zamanlı – real time) olarak görüntülenebilmektedir. Akustik sonarlar temel fizik kuralı ile çalışırlar ve basitçe “Derinlik = Hız x Zaman” formülü kullanılarak derinlikler hesaplanmaktadır. Zaman gidiş ve geliş süresidir (iki yöne seyahat zamanı), yol ise toplam ses ışını yolunun yarısıdır. Ölçülen derinlik verileri daha sonra deniz tabanını gösteren bir harita oluşturmak için kullanılmaktadır. Ses kaynağı (verici, projektör veya Tx olarak da adlandırılır) bilinen bir zamanda suya bir ses darbesi (pulse veya ping) iletir. İletilen bu ses darbesi deniz tabanından veya diğer hedeflerden yansıtılır (yankılanır). Alıcı (Rx) tarafından geri dönüş zamanı kaydedilir. Daha sonra iki yönlü seyahat süresi (gidiş-geliş veya TWT) hesaplanır. Sesin su sütunundaki hızı (v) ölçülebilmektedir. TWT şu şekilde yerel derinliğe (D) dönüştürülebilir (Jakobsson ve diğ., 2016).

$$D=v \times \frac{TWT}{2} \quad (3.1)$$

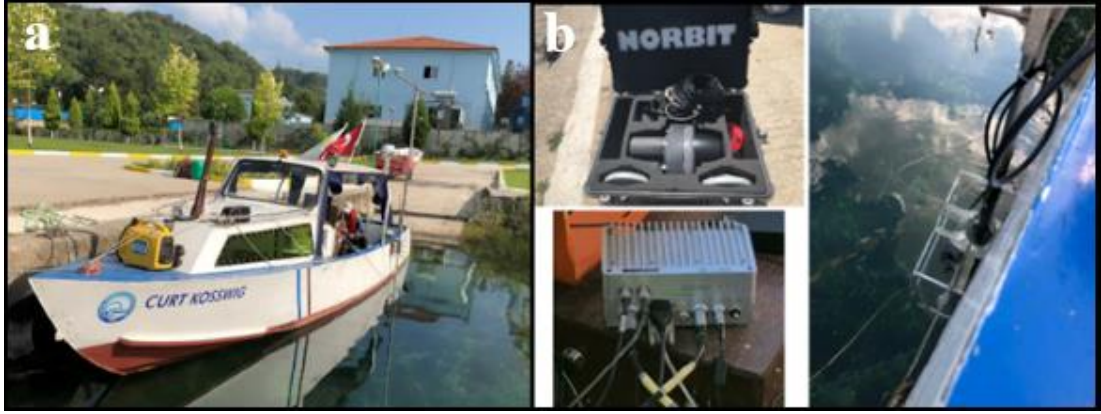
Farklı su derinliklerini haritalamak için farklı frekanslar kullanılmaktadır. MBES'nin çözünürlüğünü dönüştürücü dizisinin (transducer array) frekansı ve uzunluğundan etkilenmektedir. Yüksek frekans ve uzun dönüştürücü dizileri, deniz tabanında dar ışın genişlikleri ve küçük ayak izleri oluşturacaktır (Jakobsson ve diğ., 2016). Genel olarak, kullanılan frekans ne kadar yüksek seçilirse, toplanan verilerin çözünürlüğü o kadar iyi olur (Locat ve Sanfacon, 2000). Yüksek ve hassas çözünürlük verebilen batimetrik çok ışınlı cihazı derinde düşük açı ile sığda ise geniş açı ile yüksek kalitede veri toplayabilmektedir. Sığ suda çok yüksek çözünürlük elde edilebilir, ancak yelpaze genişliği azalmaktadır. Tersine, yelpaze genişliği geometrik olarak genişledikçe derin sularda gemi operasyonunun verimliliği artar ancak çözünürlük azalır (Francois ve Garrison 1982; Micallef ve diğ., 2017; Dierssen ve Theberge, 2020). Çok ışınlı echosounderlar, ses darbeleri gönderen yüzlerce çok sıkı ışına sahiptir. Bu darbe dizisi çok yüksek açısız çözünürlük sağlamaktadır. Açısız çözünürlük, tek bir nesnenin farklı açılarını veya bakış açılarını ölçme yeteneğidir. Geniş açılı ölçümler daha fazla alanı kapladığı için cazip gibi görünse de verilerin çözünürlüğü ve doğruluğundan ödün vermektedir. Dar açılı ölçümlerde yüksek iz verisi yoğunluğu (çözünürlüğü) ve doğruluğu sağlanmaktadır (Micallef ve diğ., 2017).

Çok ışınlı echosounder ile derinliği belirlemek için iskandil cihazları tarafından yapılan anlık ölçümlere ek olarak, deniz tabanının doğası hakkında fikir vermek için geri dönen sesin genliği (“Backscatter”) kaydedilebilir (Fonseca ve Mayer 2007; Hughes ve Clarke 2015; Jakobsson ve diğ., 2016). Daha güçlü bir dönüş sinyali, kaya gibi sert bir zemini göstermektedir. Daha zayıf bir dönüş sinyali, çamur gibi yumuşak bir zemini gösterir.

Akustik ölçümlerde derin sularda bir gemiden veya sığ sularda küçük bir tekneden ölçüm yapmak için harcanan zaman ve maliyet bu yöntem için dezavantaj olsa da çok ışınlı yöntemi kullanılarak yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilebilmektedir. Yüksek çözünürlükte tutarlı görüntüler oluşturmak için, örtüşen izlere sahip birçok araştırma hattının çalıştırılması gerekir (Dierssen ve Theberge, 2020). Çok ışınlı batimetri verileri işlenirken, sonar sinyallerinin suda ilerleme hızını etkileyebilecek; su tuzluluğu, deniz sıcaklığı ve okyanus derinliği gibi faktörlere için düzeltmelerin yapılması gerekmektedir.

### **3.3 Sapanca Gölü’nde Çok ışınlı Verilerinin Toplanması**

Sapanca Gölü’nde çok ışınlı batimetrik veriler 117Y130No’lu TÜBİTAK projesi çerçevesinde, SonarSea firması tarafından alınan hizmet alımı ile 06.08.2018 - 13.08.2018 tarihleri arasında toplanmıştır (Kurt ve diğ., 2020). Gölde verilerin toplandığı alan yaklaşık 17.85 km<sup>2</sup>’dir. İzleyen paragraflarda Kurt ve diğ. (2020)’de yer alan ve batimetrik verilerin toplanmasıyla ilgili bilgiler özetlenmiştir. Batimetrik verilerin toplanması amacıyla ilk olarak 5.08.2018 tarihinde tekneye ekipmanlar kurulmuş ve test edilmiştir. Toplanacak olan derinlik değerlerinin düşey bir referans seviyesine bağlanabilmesi için karada topoğrafik çalışmalar yapılmıştır. Harita Genel Komutanlığı’ndan alınan 4A-YDN7 noktasından çıkış yapılarak su seviyeleri okunmuştur. Daha sonrasında okunan değerler veri toplama yazılımına aktarılmıştır. Gölde batimetrik verilerin toplanmasında “Norbit iWBMS Çok ışınlı Echosounder” sistemi ve İstanbul Üniversitesi Su Bilimleri Fakültesine ait yaklaşık 10 m uzunluğundaki “Curt Kosswig” araştırma teknesi kullanılmıştır (Şekil 3.2a). 2 metre mesafe ile yerleştirilmiş çift GPS sistemi konumsal bilginin eldesi için kullanılmıştır. Çok ışınlı echosounder transduseri ile GPS sistemi aynı eksen üzerinde konumlandırılmıştır (Şekil 3.2b).



**Şekil 3.2:** a) Sapanca Gölü'nde jeofizik verilerin toplanmasında kullanılan İstanbul Üniversitesi, Su Bilimleri Fakültesine ait araştırma teknesi b) Çok ışınlı batimetri verisinin toplanmasında kullanılan ekipmanlar. (Kurt ve diğ., 2020).

Kaynak sinyalin su kolonunda seyahat süresinin (gidiş-geliş) doğru saptanabilmesi ve veri toplanma süresince doğru derinlik değerinin okunabilmesi için tüm ölçümler öncesinde su kolonuna ait ses hızı değerleri alınmış (CTD, Conductivity, Temperature, Depth) ve veri toplama (data acquisition) yazılımına aktarılmıştır (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3:** Gölde CTD ve derinlik okuma çalışmalarına ait fotoğraflar (Kurt ve diğ., 2020).

Heading değerlerinin eş zamanlı (real-time) olarak veri toplama yazılımına aktarılabilmesi için POS MV yazılımı içerisinde sunulan GAMS (GNSS Azimuth Measurement System) kalibrasyonu çalışması yürütülmüştür. Heading hassasiyeti sağlanabilmesi için ölçüm teknesi ile ani ve belli yönlerde manevralar yapılmıştır ve kalibre edilmiş heading hassasiyeti yaklaşık  $\pm 0.02^\circ$  değerindedir. Teknenin dinamik hareketlerinden dolayı MBES sisteminin yaptığı açısal hareketler hareket sensörü (Motion Reference Unit-MRU) ile sistemdeki yazılıma anında aktarılmıştır. Sistemin

kalibrasyonu için patch test uygulaması yapılmıştır. Test amaçlı proje sahası içerisinde bulunan uygun lokasyonlarda pitch, roll ve yaw'daki açısal değerlerinin doğru elde edilebilmesi için kayıtlar alınmıştır. Belirlenen açısal değerler veri toplama yazılımına aktararak çok ışınlı transduserin açısı doğru bir şekilde yazılıma tanıtılmıştır.

Yüksek ve hassas çözünürlük sağlayabilen “Norbit” çok ışınlı batimetri cihazı su yüzeyinden yaklaşık 80-90 cm draft ile aşağıdan çekilerek ölçüler alınmıştır. Bu cihaz, derinde düşük açı ile sığda ise geniş açı ile yüksek kalitede veri toplayabilmektedir. Ölçüm hattının koordinat bilgileri, tekne hızı, su derinliği, kalibrasyon ve patch test (pitch, roll ve yaw test) değerleri bir panelden canlı olarak gözlenebilmektedir. Ölçüm öncesi su derinliği “M Tide” kısmında programa tanıtılmıştır. Çalışma kapsamında yürütülen batimetrik verilerle eş zamanlı toplanan sonar görüntüsü de panelden izlenmiştir.

Gölde çok ışınlı batimetri verilerini toplama çalışmaları yaklaşık 10 gün sürmüştür. Verilerin toplanmasının ardından haritalar oluşturulmuştur ve yorumlamalar yapılmıştır. Toplanan verilerdeki gürültülü ışınlar WBMS serisi-Norbit cihazının gelişmiş dijital sinyal işleme tekniği swath-editing işlemiyle temizlenmiştir. Ascii formattaki (x,y,z) değerleri 0.5m ve 1m aralıklarla gridlenmiş veri seti oluşturulmuştur.

Çok ışınlı batimetri verilerinin haritalanması için açık kaynak yazılım kodu olan GMT (Generic Mapping Tool) ve QGIS {Quantum GIS (Geographic Information System)} programları kullanılmıştır. “xyz” formatındaki batimetrik verilerden GMT programının farklı gridleme teknikleri ve grid aralık değerleri test edilmiştir. GMT ve QGIS programlarının her ikisi kullanılarak en uygun görüntüyü veren kontur ve imaj haritaları oluşturulmuştur. Jeolojik yorumlar genel olarak gridlenmiş verilerin gradyant değerlerini kullanarak hazırlanmış olan 3-boyutlu kabartı (rölyef) haritaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hazırlanmış bu haritalara farklı yönlerden ışıklandırma verilerek yapıların belirginliği artırılmıştır. Ardından batimetrik görüntülerin göldeki yapısal unsurlar açısından yorumları gerçekleştirilmiştir.

#### 4. POCKMARK MORFOLOJİSİ

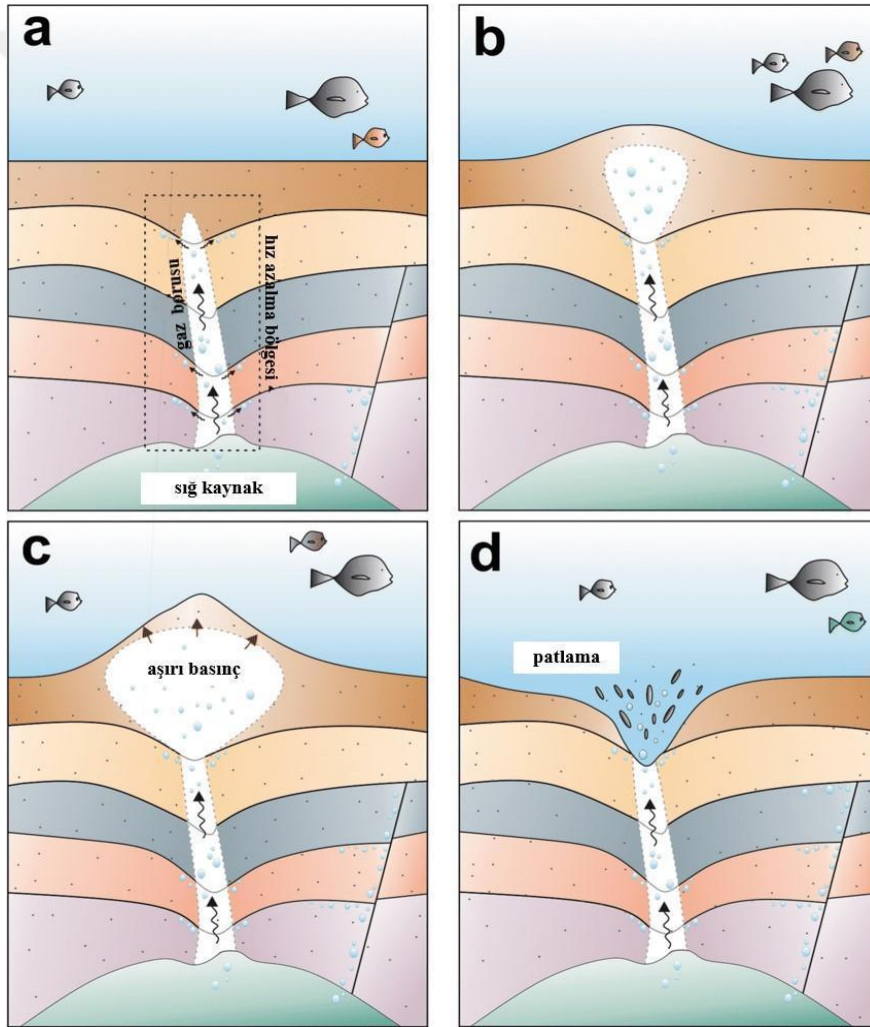
Pockmarklar, sualtındaki hidratların bozunması veya gazların sızması nedeniyle oluşan, dünya genelinde çamurlu deniz tabanlarında sık görülen doğal çukurlar olarak tanımlanmaktadır (Liu ve diğ., 2020). Bu çukurlar düşey ve yatayda santimetrelerden metreler ölçeğine kadar değişkenlik gösterebilmektedirler. Pockmarklar okyanus, deniz, göl veya nehir tabanının karmaşık bir özelliğidir ve bir dizi bilimsel disiplin için önemli sonuçları verebilmektedir. Oluşumlarını, dağılımlarını ve hidrokarbon rezervleri olarak potansiyellerini anlamak, yerbilimciler, oşinograflar ve çevre bilimcileri için önemli bir araştırma alanıdır. Pockmarklar, denizaltı hidrokarbon kaynaklarının keşfi ve denizaltı araştırmalarında; denizaltı jeolojisi, denizaltı volkanizması ve okyanus süreçleri gibi konuların araştırılmasında da önemli rol oynamaktadırlar.

Pockmarklar akustik alan haritalama yöntemlerinin geliştirilmesinden sonra, ilk kez 1960'ların sonlarında tanımlanmışlardır (King & MacLean 1970). Field ve Jennings (1987), bir deprem sırasında ve sonrasında açık denizde artmış akışkan kaçıışı hareketini fark eden ilk araştırmacılarıdır. 8 Kasım 1980'de Kuzey Kaliforniya'da  $M_w = 7$  büyüklüğündeki deprem öncesi ve sonrasında bölgede yüksek çözünürlüklü jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalı incelemeler sonucunda zeminin birçok sırt, tepelik ve pockmark geliştirdiğiyle birlikte sıg gazın meydana gelme sıklığında önemli bir artış olduğunu ortaya çıkarmıştır. Başlangıçta sadece jeofizik merak konuları olarak kabul edilmiştir, ancak oluşumlarından akışkan hareketinin sorumlu olduğu belirlendikçe (Hovland & Judd 1988; Hovland ve diğ., 1987), geçmiş ve günümüz hidrolik deniz tabanı aktivitelerinin kaydedicileri ve göstergeleri olarak görülmeye başlanmıştır (Hovland ve diğ., 2002).

Pockmarkların, genellikle gaz ve/veya gözenek akışkanının deniz tabanında patlaması sonucu oluştuğu, daha sonra da birkaç yıl veya binlerce yıl arasında değişen uzun bir akışkan kaçış dönemi yaşandığı düşünülmektedir. Hovland ve Judd (1988) pockmarkların ise tek noktadan gaz açığa çıkarmasıyla oluştuğunu belirtmektedirler.

Bazı çalışmalara göre son Buzul Çağı'nın sonlarına doğru buzların veya gaz hidratlarının erimesi, belirli yerlerde pockmark formasyonlarının gelişimine neden olmuştur (Solheim ve Elverhi 1993; Judd ve diğ., 1994; Long ve diğ., 1998). Bu nedenle, pockmarkların yoğun erozyon ve çökelmelerin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.1'de pockmark formasyonunun oluşum evreleri gösterilmiştir. Sıg kaynaktan gelen akışkanlar çökellerde akustik hız azalma bölgesi oluşturarak deniz tabanına doğru göç etmektedirler. Akışkanların deniz veya göl tabanları çökellerinde birikerek oluşturdukları aşırı basınç sonucu patlama gerçekleşerek bölgede çukurcuklar (pockmarklar) meydana gelmektedir.



**Şekil 4.1:** Pockmark formasyonunun gelişim şeması: a-) gaz borusu deniz tabanına doğru yükselir, b-) akışkan gaz/sıvı deniz tabanının altında birikmeye başlar, c-) aşırı basınç deniz tabanında zamansal tümsek oluşmasına neden olur, d-) akışkan patlaması su sütununun içinden gerçekleştirilir (Saritaş ve diğ., 2018'den değiştirilerek).

Çoğu okyanus, deniz ve bazı göl tabanlarında pockmarklara rastlanmaktadır. Hovland ve Judd (1988)'e göre pockmarklar, akışkan (sıvı/gaz) akışının odaklandığı ve kaçışın düşük geçirgenlikli, ince taneli yüzey tortularından kaynaklandığı her yerde meydana gelebilmektedir. Pockmarklar, kristalin temel kayalarla örtülü bölgelerde (Floden ve Soderberg 1988; Papatheodorou ve diğ., 2001; vb.), kıyı kesimlerinde ve nehir ağzlarında (Garcia-Garcia ve diğ., 1999; Hill ve diğ., 1992; Kelley ve diğ., 1994; Scanlon ve Knebel 1989; Taylor 1992 vb.), yer altı suyu akışlarının olduğu alanlarda (Busmann ve Suess 1994), hidrotermal aktiviteye sahip veya sahip olmayan göllerde (Pickrill, 1993) ve petrol oluşturan bölgeler de dahil olmak üzere birçok jeolojik ortamda yaygın olarak gözlenmektedir (Ellis ve McGuinness 1986; Hovland ve diğ., 1984; Josenhans ve diğ., 1978; Maisey ve diğ., 1980; Newton ve diğ., 1980; Rise ve diğ., 1999; vb.).

Pockmarklar en sık olarak çamur volkanlarının yakınında ve aktif sıvı boşalımı alanlarındaki fay hatları boyunca meydana gelmektedir. Akışkanlar genellikle derin faylar için kaydırıcı bir etki yarattığından akışkanların ve pockmarkların depremlerle ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Papatheodorou ve diğ., 1993; Kanamori ve Brodsky, 2001). Deniz dibindeki pockmarkların depremlerden önce ve depremler sırasında aktif hale girdiğini gösteren birçok gözlem bulunmaktadır (Field ve Jennings 1987; Hasiotis ve diğ., 1997; Soter, 1999). 14 Temmuz 1993 Patras depremi ( $M_w = 5.4$ ), Patras Körfezi'nde bir hidrografik kayıt istasyonu kurulurken meydana gelmiştir ve depremden önce körfezde üç defa olağanüstü sıcak su püskürtmesi kaydedilmiştir. Sonrasında yapılan side-scan sonar ve sub-bottom profiler ölçümleri sonucunda gaz çıkış kaynakları olarak pockmarklar tespit edilmiştir (Hasiotis ve diğ., 1997; Soter 1998). Depremler sırasında ve hemen sonrasında görülen pockmark aktivitesi ve gaz çıkışı gözlemlerinden açıkça görülebilir ki yer altı gazı ve sıvı hareketleri ile deprem aktivitesi yakından ilişkilidir.

Holosen öncesi dönemde akışkan sızıntısının hem deniz seviyesi değişiklikleri hem de aktif faylanma tarafından kontrol edilmiş olması muhtemeldir (Okay ve Aydemir, 2016). Gasperini ve diğ., (2020), aktif faylarda sismik olarak tetiklenen gaz salınımının, göl tabanından geri saçılan görüntülerde gözlenen topografik çöküntülere ve pockmarklara neden olduğunu belirtmiştir. Pockmarklar daha çok normal faylarla ilişkilidir, ancak doğrultu atımlı, ters veya bindirme fayları boyunca da gözlenebilmektedirler (Dimitrov ve Woodside, 2003). Deprem riski taşıyan

bölgelerde, pockmarklar yeraltı akışkan basınç bölgesinin doğal gözlemcileri olarak kullanılabilirler. Deprem riski taşıyan bir bölgedeki bilinen bir pockmark alanının taban suyu sıcaklığı ve gaz çıkışı durumunun izlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Birçok veriye göre, pockmark oluşumu hem sürekli hem de aralıklı aktiviteye işaret etmektedir. Pockmarkların uzun bir süre boyunca aletli olarak izlenememesi nedeniyle, aktivite düzenlerinin belirlenmesi zor olmaktadır. Hovland ve diğ., (2002)'de birçok pockmarkın periyodik olarak aktif olduğundan şüphelenilmiştir. Pockmarklı bir platonun daha derin sedimanlarında çok sayıda gömülü pockmarkın varlığını tespit eden Çiftçi ve diğ., (2003) deniz tabanına gaz göçünün sürekli olmadığını, uzun zaman dilimleri boyunca periyodik olarak tekrarlandığını göstermişlerdir. Bir kilometrekare başına 5 ila 10'dan fazla pockmark yoğunluğu "normalden daha fazla" olarak kabul edilmektedir ve bu durum deniz tabanının "hidrolik olarak aktif" olduğuna işaret etmektedir (Hovland ve Judd, 1988; Hovland ve diğ., 2010).

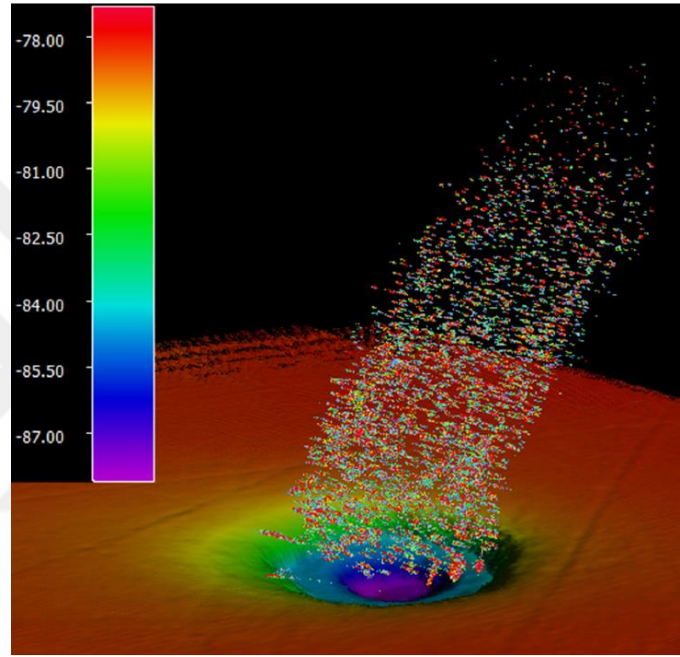
Pockmarklardan kaçan akışkanların, yüzeyin birkaç kilometre altında oluşan basınç dalgaları tarafından hareket ettirildiği düşünülse de (Brown, 1990), bunların çamur volkanlarıyla ilişkilendirilen akışkanlardan farklı olarak, yüzeye çok yavaş bir şekilde göç ettikleri tahmin edilmektedir. Pockmarklar, çamur tepecikleri ve bakteri örtüleri gibi deniztabanı özellikleri genellikle gaz yüklü tortularla ilişkilendirildiğinden ve deniz tabanından gaz geçişinin kanıt olduğundan (Fader, 1997); bazı hidrokarbon alanlarının üzerinde bol miktarda bulunan pockmarklar hidrokarbon birikimlerinin işaretçisi olarak da kullanılabilirler (Hovland, 1981).

Pockmarklar, deniz tabanı kararsızlığı (seabed instability) ve şev kaymasının (slope failure) potansiyel belirtileri olduğu gibi, yeraltı hidrolik aktivitesinin işaretleri olarak da önemlidirler. Kıta sahanlıklarındaki ve eğimlerindeki pockmarkların yanı sıra, limanlardaki ve göllerdeki pockmarklar derin akışkanları izlemek için kullanışlı yerler olarak düşünülebilirler. Pockmarklar göl kenarlarından göl ve okyanusa doğru yeraltı suyunun sızdığı yerleri gösterirler (Hovland ve diğ., 2002).

Pockmarkların bir göstergesi olarak deniz yüzeyinde görülen "köpürme (bubbling)" kabul edilebilmektedir. Brothers ve diğ. (2012), saha çalışmaları sırasında karot toplanırken deniz yüzeyinde "köpürme" görüldüğünden bahsetmektedir. Çalışmanın devamında altında gaz bulunan bir pockmark örneklemiştir. Böylece köpürmelerin

veya gaz kabarcıkların pockmarkların etrafında veya yakınında gözlemlenebileceği gösterilmiştir. Şekil 4.2’de MBES verisi ile pockmarkın içindeki su kolonunda yoğun ve sürekli gaz akışının varlığını gösterilmiştir (Idczak ve diğ., 2020).

Pockmarklar hakkında hala bilinmeyen bilgiler olsa da, dünyanın birçok yerinde gün geçtikçe popülerliğini arttıran araştırma konuları haline gelmektedirler. Pockmarklar hakkında yapılan tüm bu çalışmaların, zaman içinde toplanan sinyallerin yorumlanabilmesi ve tehlikeli patlamalar veya depremlerin göstergeleri olarak insanlara faydalı olabilmesi için analizler yapılmalı ve çalışmalar güçlendirilmelidir.

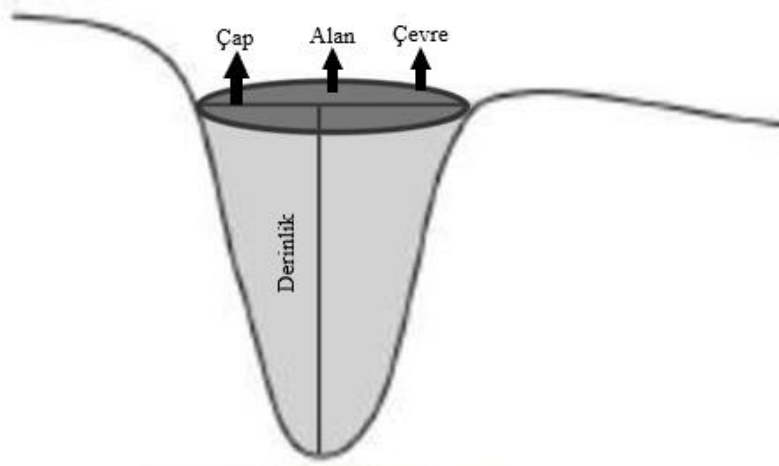


**Şekil 4.2:** MBES kullanılarak kaydedilen gaz emisyonlu pockmark (Idczak ve diğ., 2020).

#### **4.1 Pockmarklarda Geometrik Sınıflama**

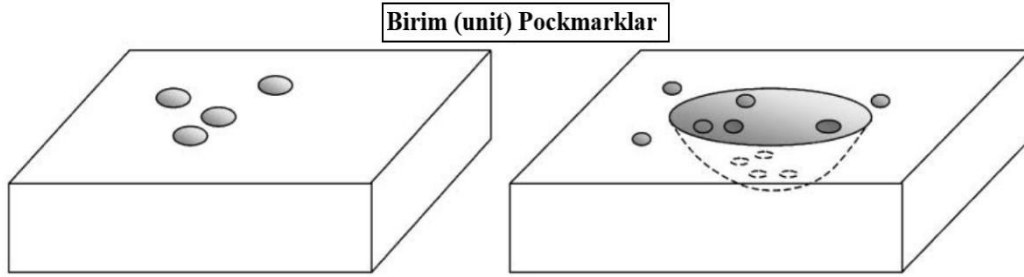
Akışkanların doğası gereği sıvı veya gaz fazda bulunabilmesi ve kökenlerinin mikrobiyal, termojenik, hidrotermal veya volkanik olabilmesi nedeniyle; akışkan akışı göstergesi olan pockmarkların çeşitli koşullarda oluşabilmektedirler. Ayrıca morfolojik olarak da çeşitliliğe sahiptirler.

Pockmarklar birçok çalışma kapsamında çap ve derinlik değerlerine göre sınıflandırılmışlardır. Şekil 4.3’te pockmarka ait şematik bir görünüm sunulmuştur. Çap, derinlik, alan ve çevre bilgilerinin bir pockmarktan nasıl elde edildiği bu şekil üzerinde gösterilmiştir.



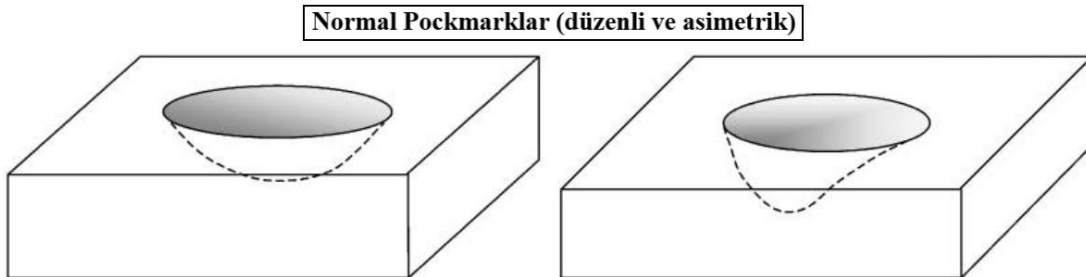
**Şekil 4.3:** Pockmark şematik görseli.

Pockmarklar her boyutta ve şekilde olabilmektedir. Ancak, bazı formlar ve boyutlar diğerlerinden daha tipiktir. Pockmarkları daha kapsamlı kategorize edilebilmek için birçok çalışmaya göre altı morfolojik sınıflandırma oluşturulmuştur. Genellikle 1-10 metre genişliğinde çapa sahip ve 0.5 metre derinliğe kadar ulaşabilen pockmarklar “birim pockmark - unit pockmark” olarak adlandırılırlar (Şekil 4.4).



**Şekil 4.4:** Birim (unit) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002’den düzenlenmiştir).

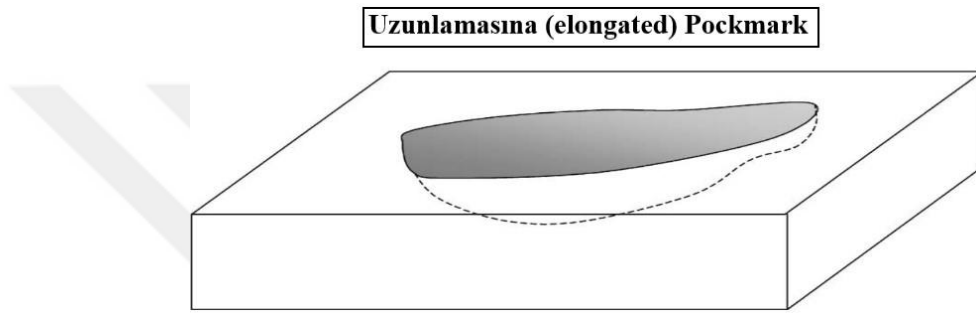
10-700 metre çapa ve 1-45 metre derinliğe kadar ulaşabilen dairesel çukurlara “Normal pockmark” tanımı yapılmaktadır (Şekil 4.5). Kesitleri, alçak açılı bir havza şeklinden yüksek duvarlı asimetric bir özelliğe kadar değişebilmektedir, hatta bazılarınının merkezi bir huni şekline sahiptir.



**Şekil 4.5:** Normal Pockmark (Hovland ve diğ., 2002’den düzenlenmiştir).

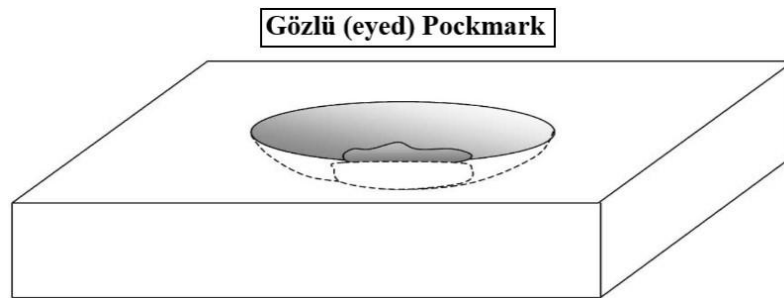
“Normal” pockmarkların içinde ve çevresinde “birim” pockmarklara sıkça rastlanmaktadır. “Birim” pockmarkların muhtemelen döngüsel gözenekli su sızıntısını temsil ettiği, “normal” pockmarkların ise aralarda yavaş ve döngüsel gözenekli su sızıntısı ile periyodik veya aralıklı gaz patlamalarını temsil ettiği düşünülmektedir (Hovland ve diğ., 2010).

Bir tarafı diğerine göre çok daha uzun olan çukurlar “Uzunlamasına – elongated” pockmarklar olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 4.6). Dik yamaçlarda ve deniz tabanında güçlü akıntıların olduğu bölgelerde “uzunlamasına – elongated” pockmarklar görülmektedir (Hovland ve diğ., 2002).



**Şekil 4.6:** Uzunlamasına (Elongated) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002’den düzenlenmiştir).

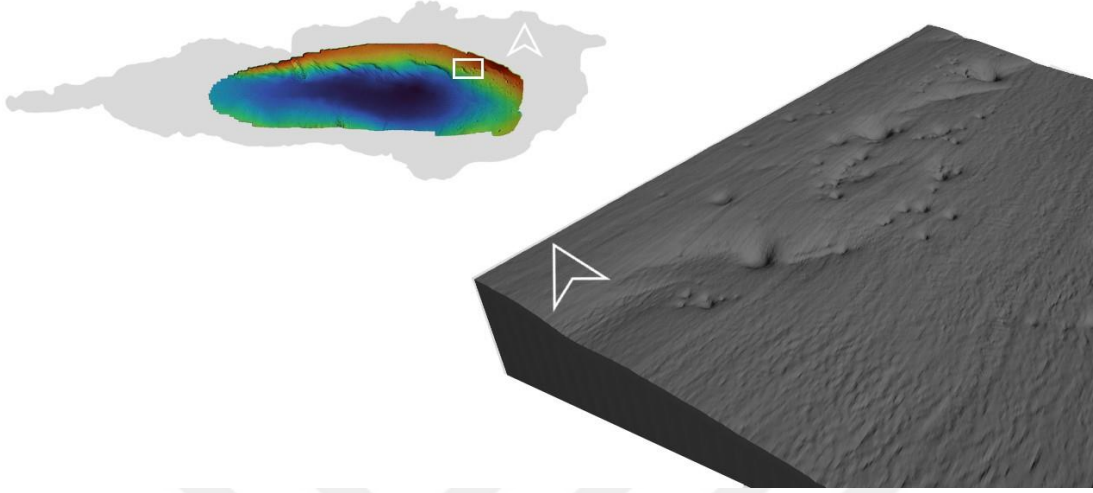
Merkezinde akustik olarak yüksek yansımalara sebep olan bir nesne veya alan bulunan pockmarklar “gözlü – eyed” olarak ayrıştırılabilmektedir (Şekil 4.7). Karbonat çökelmeleri veya iskelet kalıntıları, ölü/canlı kabuklar gibi biyolojik aktiviteler, erozyon sürecinde kalan iri partiküller bu durumu oluşturmaktadır.



**Şekil 4.7:** Gözlü (Eyed) Pockmark (Hovland ve diğ., 2002’den düzenlenmiştir).

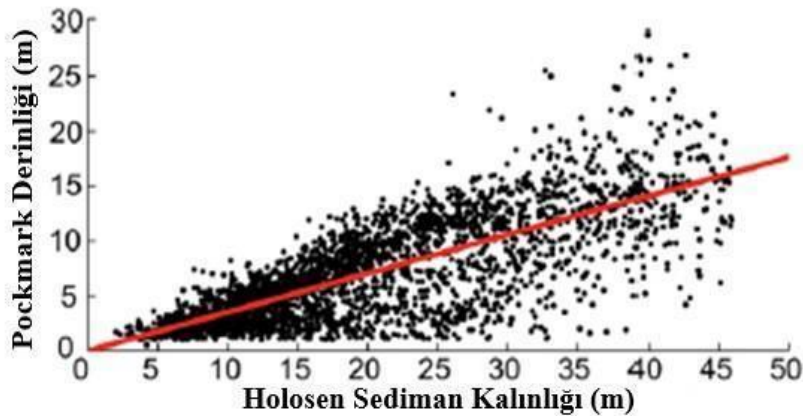
“Birim (unit)” pockmarklar veya küçük “normal” pockmarklar kavisli zincirler veya sıralar halinde düzenlenerek kilometrelerce uzunlukta “pockmark dizileri – strings of pockmark” oluşturabilmektedir (Şekil 4.8). Bu durum, yakın dikey faylar, eğimler veya üst tortul tabakadaki zayıf bölgeler boyunca sıvı konsantrasyonu nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. “Karmaşık - complex” pockmarklar, “normal” pockmark kümeleri

veya büyük pockmark birleşmeleri ile oluşmaktadır. Çiftçi ve diğ. (2003), geniş uzun pockmarkların daha küçük boyutlu dairesel pockmarkların birleştirilmesiyle oluştuğunu belirtmiştir.



**Şekil 4.8:** Pockmark dizileri (Kurt ve diğ., 2020'den değiştirilerek).

Brothers ve diğ., (2012), pockmarkların yalnızca Holosen sediman kalınlığı 2 metreden büyük olan alanlarda olduğunu tespit etmiştir. Buna bağlı olarak Holosen sediman kalınlığının pockmark boyutuyla güçlü bir ilişkisi olduğu sonucu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 4.9). Sığ gaz birikimlerinin çoğu, deniz tabanına yakın Holosen yaşlı sedimanlarda meydana gelmektedir, ancak buzul deniz sedimanları da gaz birikimleri içerebilmektedir (Fader, 1997).

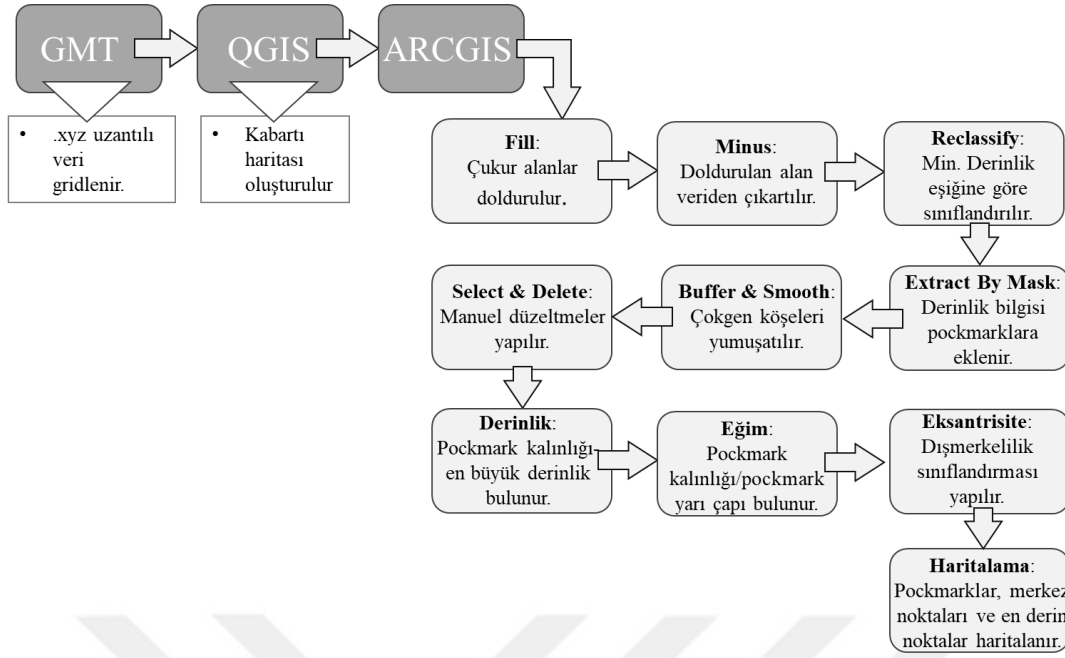


**Şekil 4.9:** Pockmark derinliklerinin deniz tabanı çökelleri kalınlığına göre dağılımları (Brothers ve diğ., 2012).

## 5. ÇOK IŞINLI BATİMETRİK VERİLERİN İŞLENMESİ

Bu çalışmada Sapanca Gölü'ne ait yüksek çözünürlüklü çok ışınlı batimetrik verilerde gözlenen pockmark yapılarının boyutları, yatay ve düşey ölçekteki geometrik özellikleri, saha içindeki dağılımı, yoğunluğu, ve birbiri ile karşılaştırılması gibi özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan kontur ve kabartı haritalarında net olarak gözlenebilen pockmark unsurlarının bu özelliklerinin manuel olarak hazırlanması hem zahmetli ve zaman alıcı hem de kullanıcıya göre değişebileceğinden bu yolla yapılan değerlendirmeler hatalar içerebilecektir. Bu sorunların giderilmesi için pockmarklara ait yukarıda sıralanan özelliklerin sistematik bir yaklaşımla değerlendirilmesi ve buna bağlı otomatik ölçümler gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla haritalama programları kullanılmış ve özel bir veri işlem akış şeması geliştirilmiştir.

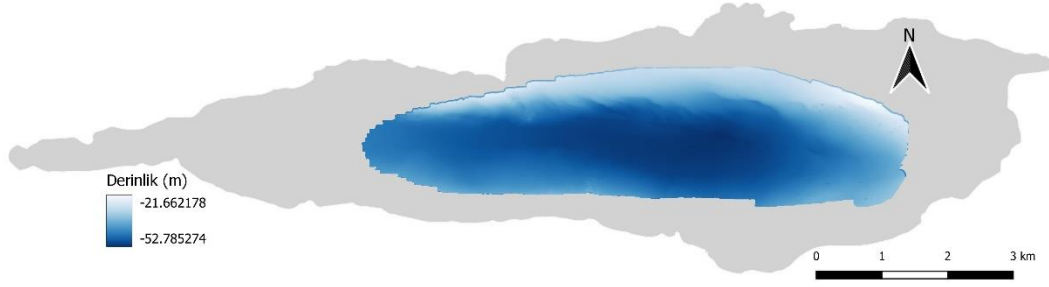
Bu tez kapsamında batimetrik verilerin işlenmesi ağırlıklı olarak üç farklı program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki linux işletim sisteminde çalışan açık kaynaklı bir haritalama programı olan GMT (Generic Mapping Tools), diğeri windows işletim sisteminde çalışan ve yine açık kaynaklı haritalama programı olan QGIS'dir (Quantum Geographic Information System). Bu iki programa ilaveten zengin bir morfolojik analiz modülü çeşitliliğini içeren ve İTÜ kullanım lisansına sahip ARCGIS programı kullanılmıştır. Şekil 5.1'de verilen akış şemasında kullanılan veri işlem basamakları verilmektedir. Akış şemasında da gösterildiği gibi, her bir işlem aşamasında uygun değer veri işlem parametrelerinin belirlenebilmesi için analizler ve testler gerçekleştirilmiştir.



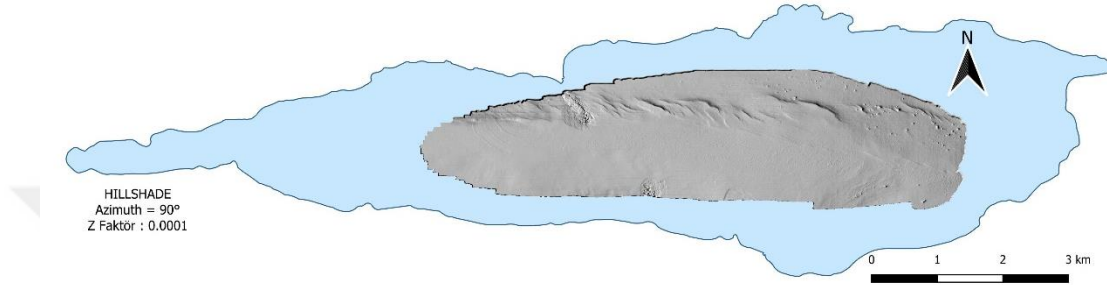
**Şekil 5.1:** Batimetrik verilerin işlenmesinde izlenen akış şeması.

## 5.1 Batimetri Haritasının Oluşturulması

Sapanca Gölü'nde yaklaşık 17.85 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsayan MBES verileri toplam 70.744.745 adet noktadan oluşmaktadır. MBES verisinin “.xyz” uzantılı final dosyası GMT programına aktarılmış ve gridlenmiştir. Gridlenmiş verinin yataydaki çözünürlüğü 50 cm düşeyde ise cm'ler mertebesindedir. GMT programında gridlenmiş verinin “.grd” uzantılı dosyasından kontur ve kabartı görüntülerini içeren haritalar hazırlanmıştır (Kurt ve diğ., 2020). Ancak GMT programında grid dosyası oluşturulduktan sonra batimetrik verilerin haritalanması, çeşitli doğrultularda kesitler oluşturulması vb. işlemlerin gerçekleştirilmesinde ağırlıklı olarak QGIS ve ArcGIS programları tercih edilmiştir. Çalışmada batimetrik haritalama ve kesit almada pratik kullanım kolaylığı sağladığından bundan sonraki aşamada ağırlıklı olarak QGIS ve ARCGIS programlarının kullanımı tercih edilmiştir. Gridlenmiş yüksek çözünürlüklü batimetrik veriler kullanılarak QGIS programında oluşturulmuş göl tabanı haritası Şekil 5.2'de verilmiştir. Haritada Sapanca Gölü'ne ait kıyı çizgisi ve gölün orta kısımlarına denk gelen çok ışınlı batimetrik verilerin toplanmış olduğu alanlar (17.85 km<sup>2</sup>) açıkça gözlenmektedir. Toplanan verilerin en sığ olduğu kesimleri -21 metrelerden başlayıp gölün merkezine yakın bir noktada -52.78 m değerine ulaşmaktadır. Batimetrik verilerden ayrıca bir kabartı haritası da oluşturulmuştur (Şekil 5.3).



**Şekil 5.2:** Çok ışınlı batimetri haritası.



**Şekil 5.3:** Kabartı haritası.

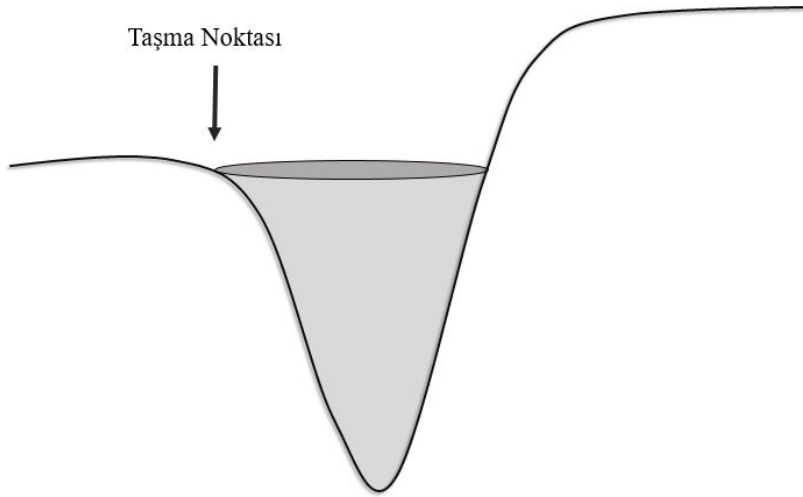
Kuzeyle 90°'lik bir açıda ışıklandırma yapılarak oluşturulan kabartı haritasında göl tabanındaki pockmarklar ve fay izleri gözle rahatlıkla tespit edilebilir hale getirilmiştir. Pockmark olduğu düşünülen çukurluk alanları QGIS programında kabartı haritası göz önüne alınarak manuel olarak belirlenmiştir. Bunun için pockmarkların yoğun olduğu bölgelere odaklanılarak kontur haritaları oluşturulmuş, konturların geometrisinden pockmarkların göl tabanında kapladığı alan analiz edilmiş ve işaretlenmiştir. Ayrıca batimetrik verilerin bu alanlarına dair farklı doğrultularda kesitler alarak pockmarkların derinlik ve kanat eğimlerine dair manuel bilgiler türetilmiştir. Fakat pockmarkların morfolojisine dair bu türden manuel değerlendirmeler yorumcunun o an görebildiği pockmark sayısı ve değerlendirme kriteri ile sınırlı kalmaktadır ve geometrik değerlendirmeler göreceli değişiklikler gösterebilmektedir. Bu şekilde değerlendirmelerde ayrıca pockmark olmayan çukurluklar da yanıltıcı sonuçlar oluşturabilmektedir. Bu sebeplerle göl tabanında gözlenen pockmark yapılarına ait niteliklerin belirlenmesinde sistematik ve otomatik yaklaşımlara ihtiyaç doğmuştur. Bu anlamda son yıllarda pockmarkların otomatik ve yarı otomatik yollarla morfolojik değerlendirmelerini içeren birçok çalışmaya literatürde rastlanmaktadır (Gafeira ve diğ., 2012; Gafeira ve diğ., 2018; Audsley ve diğ., 2019; Lundine ve diğ., 2023).

## 5.2 Yarı-Otomatik Filtreleme İle Pockmark Belirleme

Bu bölümde anlatılacak olan yöntem mevcut GIS tabanlı programlara ait birtakım araçların kullanılmasıyla gerçekleştirilen çok aşamalı bir süreçtir. Bu süreçler pockmarkların tanımlanması ve belirlenmesini içermektedir. Böylece pockmarklar tarafından şekillendirilen deniz tabanı alanlarını temsil eden çokgenler oluşturulmaktadır.

Raster veri formundaki çok ışınlı batimetri haritası ESRI ArcGIS programına aktarılmıştır. Bu harita enlem, boylam ve derinlik parametrelerine sahiptir. Bu sayede coğrafi koordinat sistemine sahip bu programın içerisinde harita gerçek konumuna yerleştirilmiştir. Pockmark'ı bir DDM (Digital Depth Model)'deki sınırlı bir çöküntü olarak kabul edebiliriz, bu nedenle bu yaklaşım dijital yükseklik modellerinde çukurları belirlemek için kullanılan hidrolojik algoritmaları kullanmayı mümkün kılar.

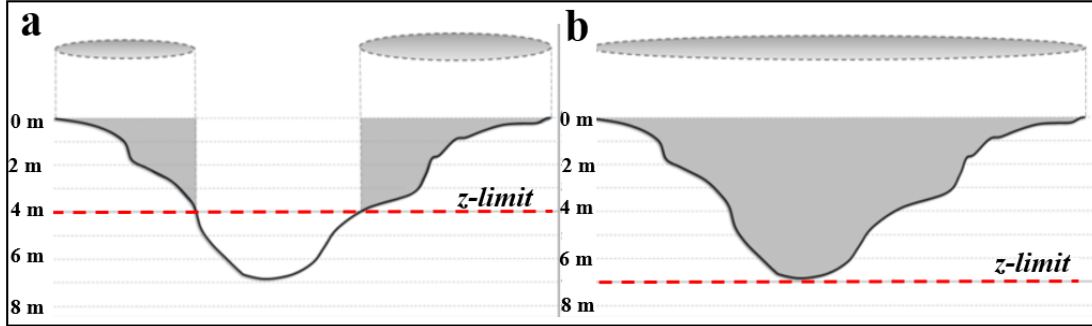
Yarı otomatize bir yolla göl tabanında yer alan pockmarkların belirlenmesi amacıyla DDM verilerine ArcGIS programının bazı modülleri uygulanmıştır. Bunlardan biri olan "Fill" aracı, çöküntünün kenarında en düşük yüksekliğin ne olacağını tanımlar yani çöküntü doluyormuş gibi taşma noktasını belirler. Taşma noktasından daha düşük derinliğe sahip tüm hücrelerin değerini taşma noktası değeriyle değiştirir (Şekil 5.4).



**Şekil 5.4:** Bir pockmarka ait taşma noktasının yeri.

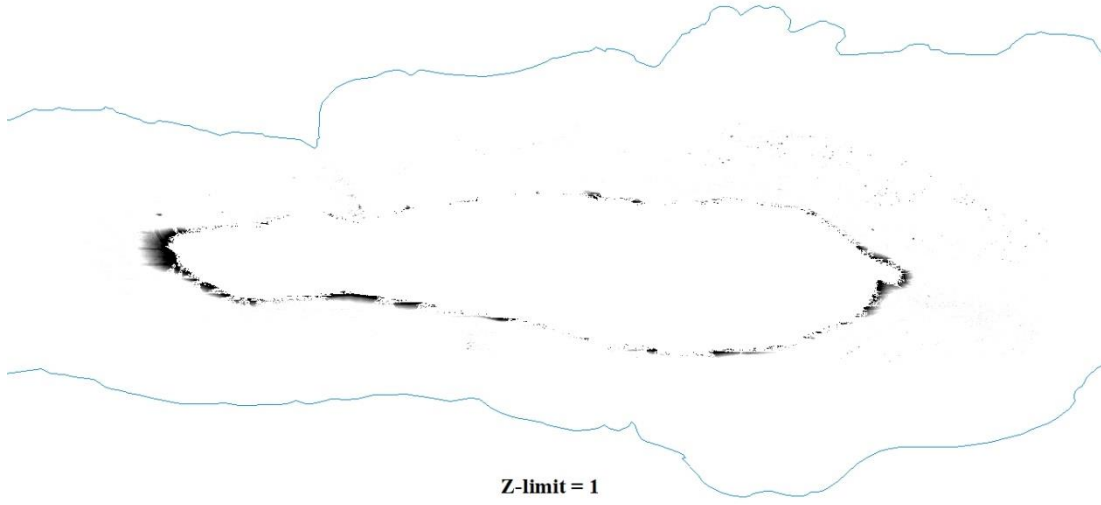
Verilere "Fill" aracı uygulanırken değişken bir parametre olan "z-limit" değeri için 6 farklı değer atanarak işlem yapılmıştır. Kullanılan bu değerler sırasıyla 1, 2, 4, 5, 6 ve 10 m'dir. Bu değerler göl tabanından, çukur yüzeyine kadar doldurulacak boşlukların

derinliğini ifade eden bir eşik değeridir. Şekil 5.5'te “z-limit” değerlerinin haritada oluşacak yansımalarının şematik görseli verilmiştir.

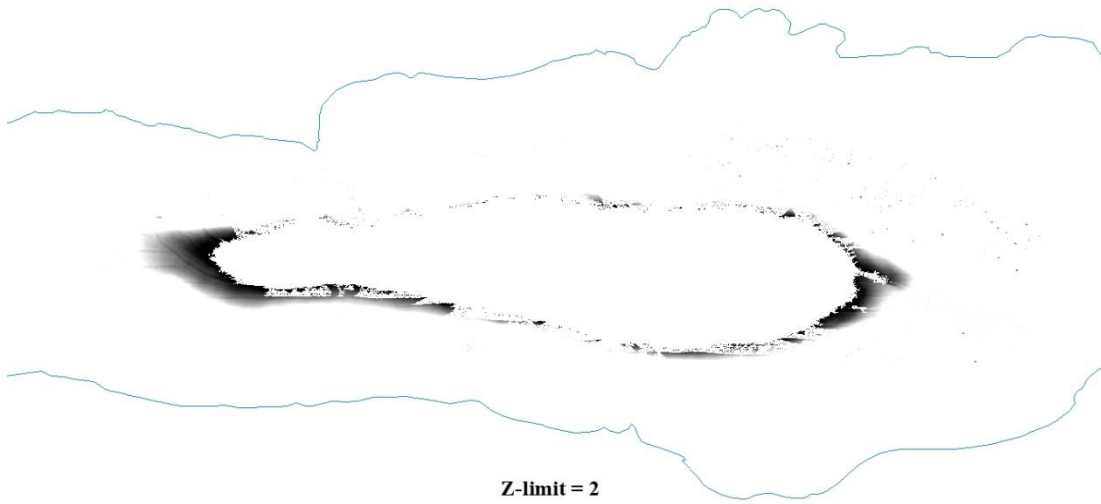


**Şekil 5.5:** Z-limit değerleri için şematik görsel a) z-limit=4m b) z-limit= 7 m.

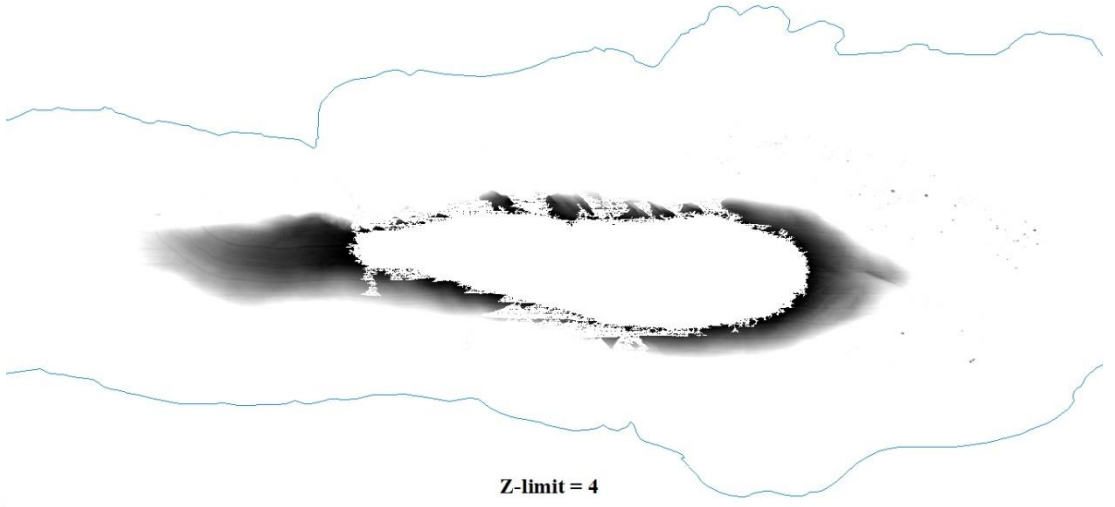
Sonraki aşamada “Fill” aracı ile oluşturulan verinin yüzey yükselti değerlerinin "Minus" aracı kullanılarak orijinal batimetrik DDM (Dijital Derinlik Modeli) verilerinden çıkarılması sağlanmıştır. Belirlenen bu yeni yüzey, sadece pockmark olduğu düşünülen sınırlı çöküntüler için sıfırdan farklı değerler içermektedir. Verilerin “Minus” aracı ile farklı z-limit değerleri için oluşturduğu dağılımlar Şekil 5.6 ve Şekil 5.12 aralığındaki haritalarda verilmiştir. Haritaların sunumunda göle ait bütün kıyı çizgisini vermek yerine yukarıda yapılan işlemlerde belirlenen görüntülerin olduğu kesimlere odaklanılmıştır. Haritalar incelendiğinde göl tabanında seçilen z-limit değerine bağlı olarak farklı çukurluklar belirlenebilmektedir. Bu parametrenin doğru seçilmesi önemlidir, çünkü z-limit değeri küçük seçilirse bölgedeki varolan pockmark sayısından daha fazla sayıda pockmark varmış gibi yanlış sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Uygun seçilen z-limit değerinde Şekil 5.5'te görüldüğü gibi pockmarkların sayısı ve kalınlığı doğru şekilde belirlenebilmektedir. Gölün kuzeydoğu tarafında ağırlıklı dağılım gösteren pockmark yapıları, gölün en derin noktası da göz önüne alındığında z-limit değerinin 6'dan sonraki değerlerinde daha belirgin gözlenmektedir. Haritalarda gölün orta kısmında gözlenen büyük çukurluk bir pockmarkı temsil etmemektedir ancak program modülünün tüm çukurluklara otomatik olarak uyguladığı etki nedeniyle haritada görünmektedir. Dikkat edilecek olursa ortadaki bu boşluk z-limit parametresinin seçilen en büyük değerinde tamamen kapanmıştır. Bu durum gölün en derin yerini de içeren orta kısımlarının 10 m kalınlıkta bir su kütlesi ile dolabileceğini göstermektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.11 aralığında haritaların sunumunda detayları vurgulayabilmek için belli bir büyüklük ölçeği seçilmiş ve her sayfada en fazla iki harita sunulabilmiştir. Ancak Ek-A'da tüm haritalar bir arada tek bir sayfada olacak şekilde verilmiştir.



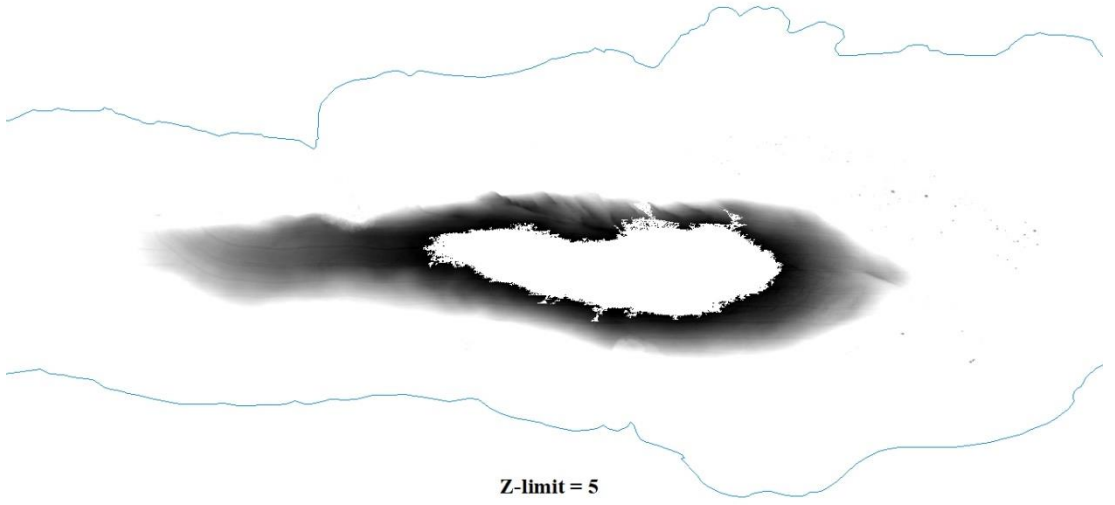
**Şekil 5.6:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=1 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).



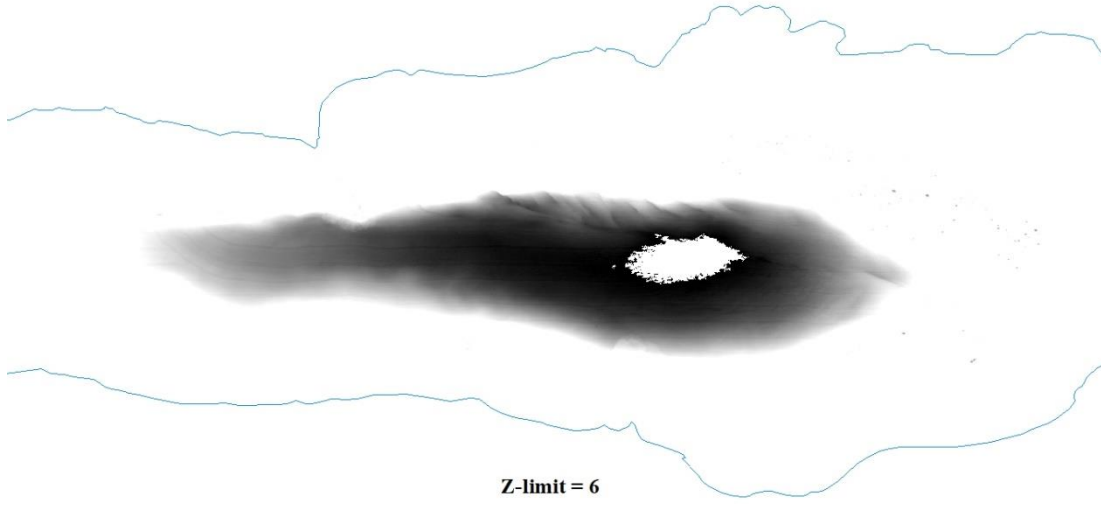
**Şekil 5.7:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=2 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).



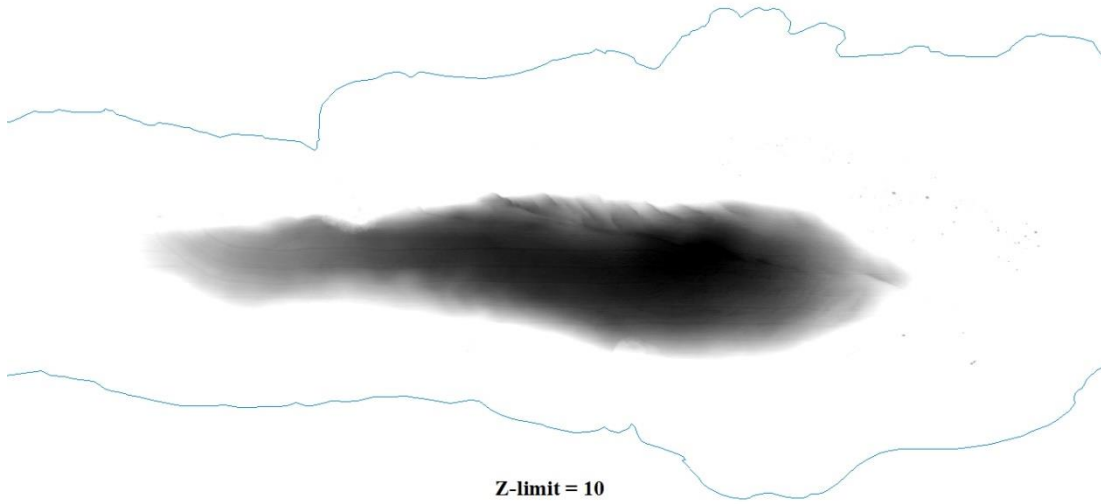
**Şekil 5.8:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=4 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).



**Şekil 5.9:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=5 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).

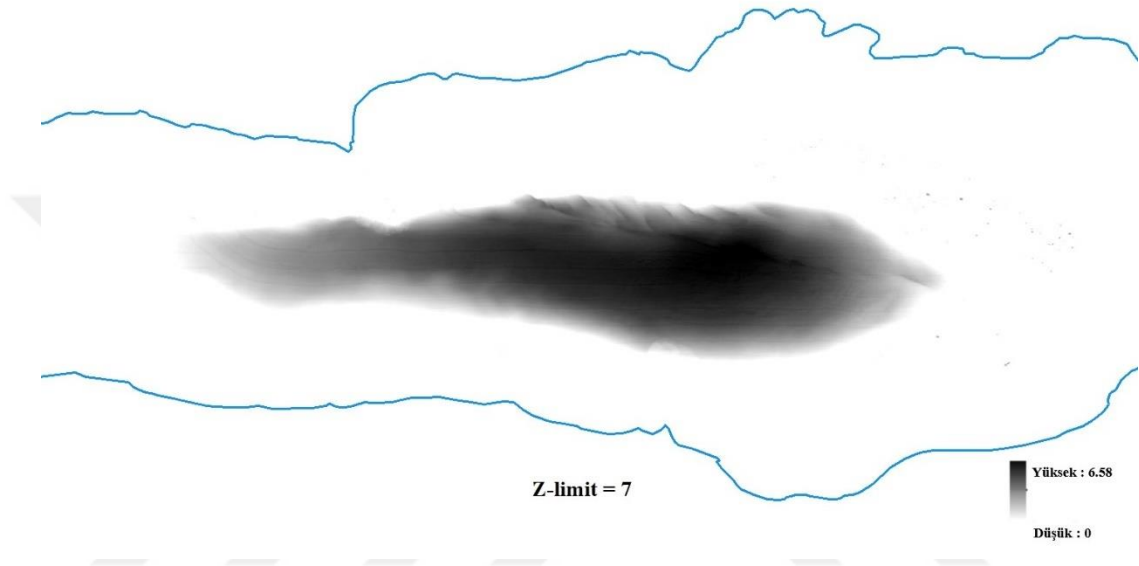


**Şekil 5.10:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=6 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).



**Şekil 5.11:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=10 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).

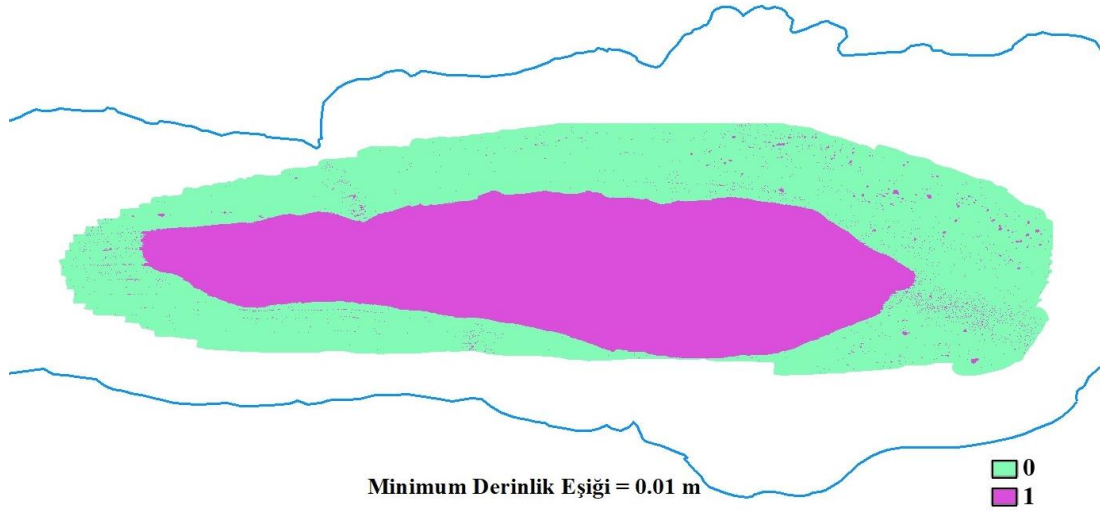
Şekil 5.6 ve Şekil 5.12 arasında verilen haritalardaki dağılım kıyaslandığında ve haritaların lejantlarında verilen minimum ve maksimum değerleri incelendiğinde z-limit = 10 parametresinin taşma noktası olarak doldurduğu en büyük değerin yaklaşık 6.5 m olduğu anlaşılmıştır. Buradan hareketle z-limit = 7m değeri kullanılarak “Fill” ve “Minus” araçları yukarıdakine benzer şekilde yeniden uygulanmış ve çıkan dağılım Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



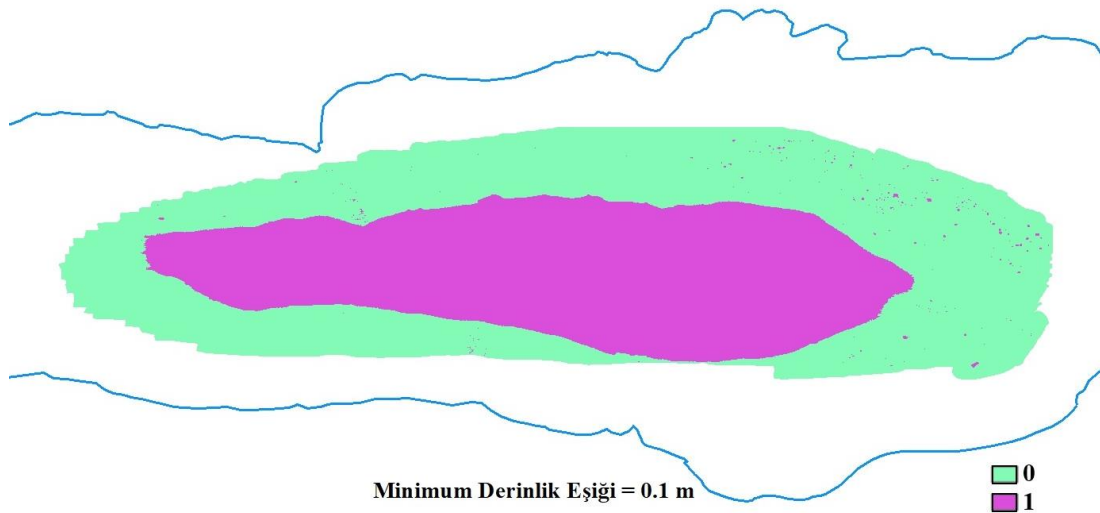
**Şekil 5.12:** Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının Z-limit=7 m değeri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).

Yukarıdaki paragraflarda göl tabanında 6.5 m olarak belirlenen limit derinlik değerinin gölün hangi bölgelerinde dağıldığı önem kazanmıştır. Bu nedenle bir sonraki adımda veri işlem akışında en son elde edilen bu raster veriler “Reclassify” aracı ile “0” ve “1” olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Yani oluşturulan sınıflandırmada göl tabanından itibaren kalınlığı, minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar 0, büyük olanlar ise 1 olarak tanımlanmıştır. Minimum derinlik eşiği deneme yanılma yöntemleriyle tahmin edilebilmektedir ve her DDM veri seti için değiştirilebilmektedir. İlk seçilen minimum derinlik eşik değeriyle elde edilen görsel, eşik değerinin doğru bir şekilde seçilip seçilmediğini yorumcunun kontrol etmesine olanak tanır. En uygun eşik değerinin seçilmesi nihai çıktının doğruluğunu belirlemekle birlikte çıktının doğruluğu orijinal DDM’lerin çözünürlüğüne yani giriş verilerinin yüksek çözünürlüğe sahip olup olmamasına bağlı olacaktır. Şekil 5.13 ve Şekil 5.20 arasındaki haritalarda minimum derinlik eşik değerleri sırasıyla 0.01 m, 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m, 1 m ve 1.3 m olarak seçilerek gerçekleştirilen testlerden çıkan sonuçlar verilmiştir. Bu

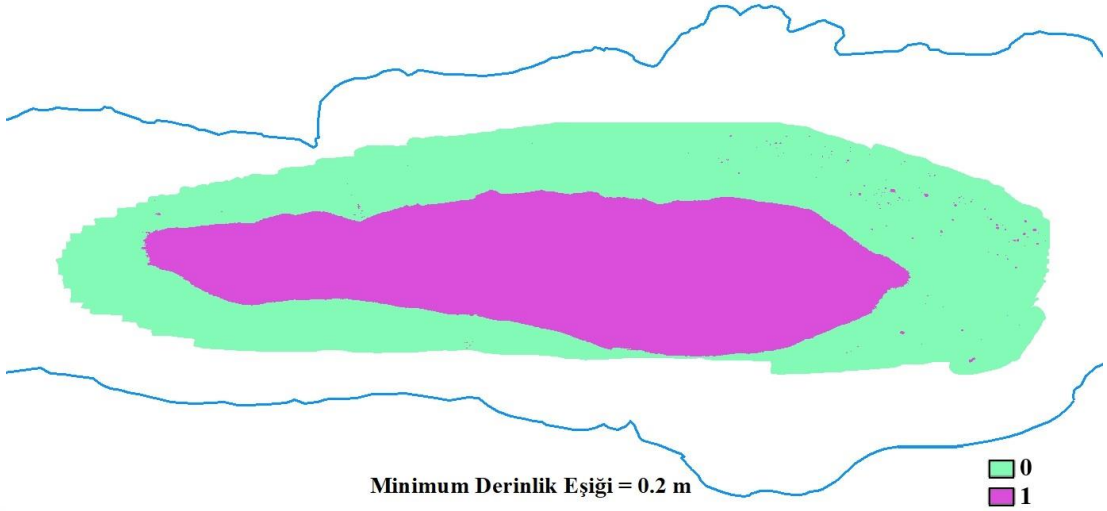
yaklaşımında minimum eşik değeri küçüldükçe çok daha sığ olan pockmarklar da fark edilebildiği için daha fazla sayıda pockmark belirlenebilmektedir. Ancak bu durum bazen pockmark olmayan küçük ölçekli çöküntülerin de sonuçlara dâhil olmasına neden olabilmektedir. Çalışmanın en başında manuel olarak gözle işaretlenmiş pockmarkların özellikleri de hesaba katılarak gölde minimum derinlik eşiği için en uygun değer 0.1 metre olduğu kararına varılmıştır.



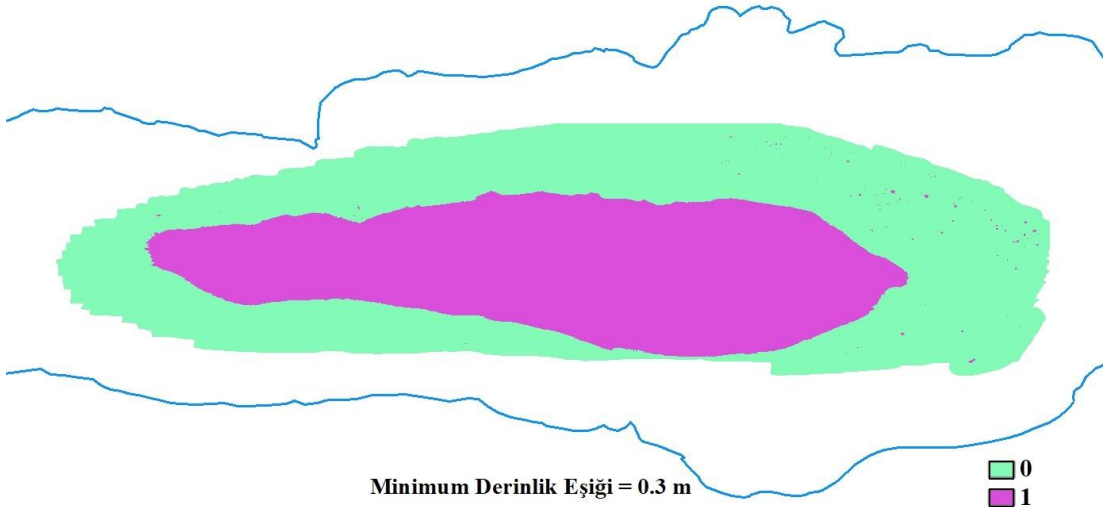
**Şekil 5.13:** Minimum derinlik eşiği = 0.01 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



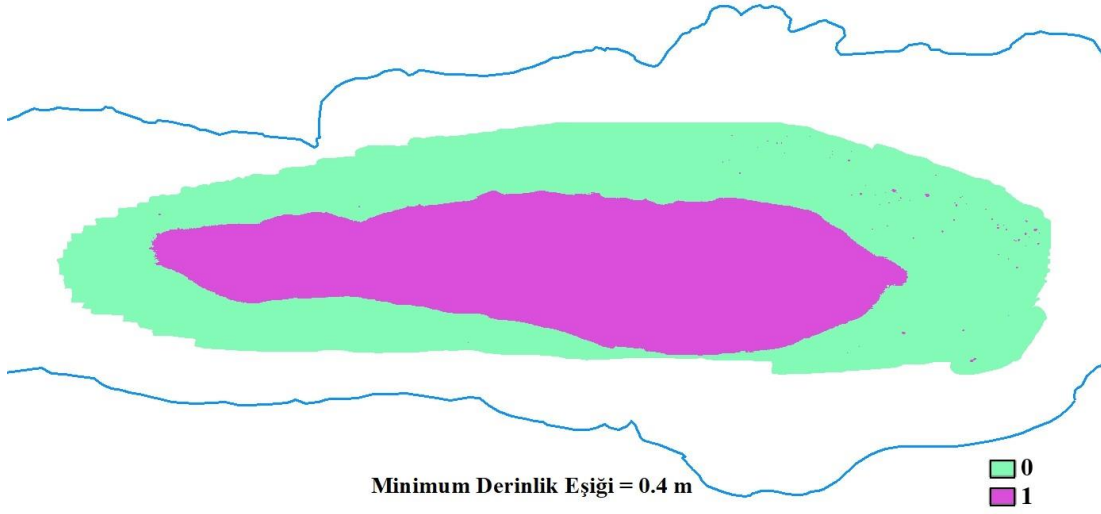
**Şekil 5.14:** Minimum derinlik eşiği = 0.1 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşiğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



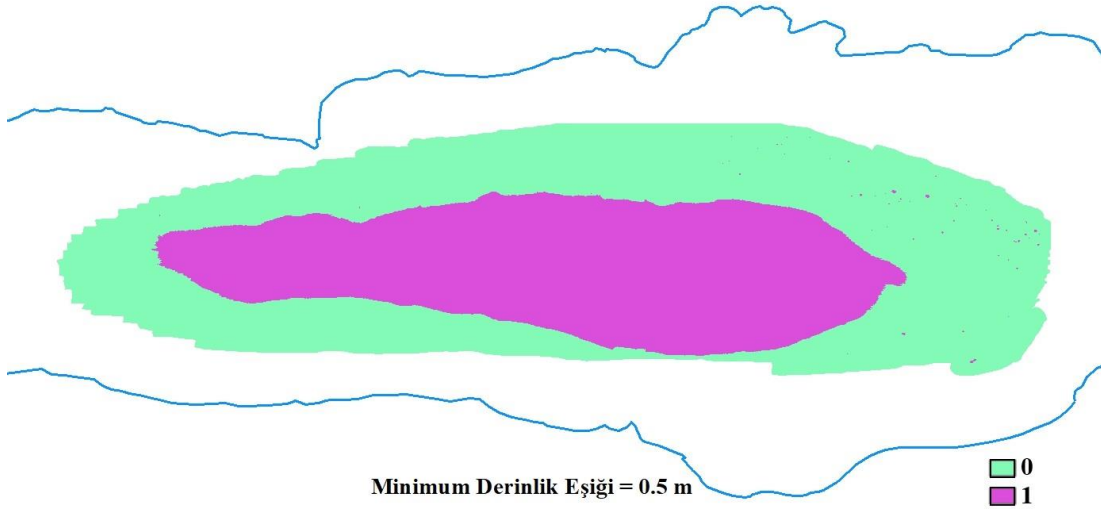
**Şekil 5.15:** Minimum derinlik eşığı = 0.2 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşığından küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



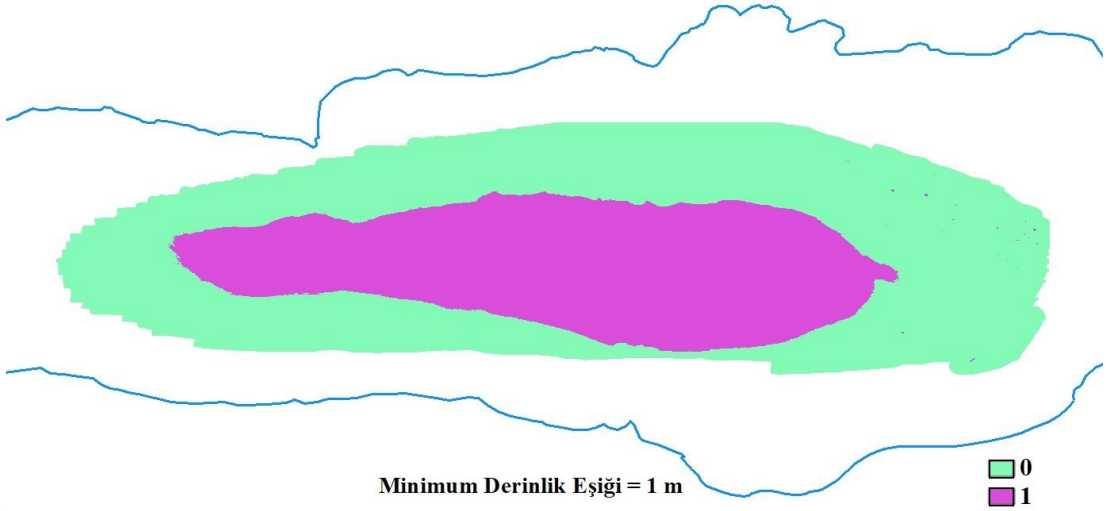
**Şekil 5.16:** Minimum derinlik eşığı = 0.3 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşığından küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



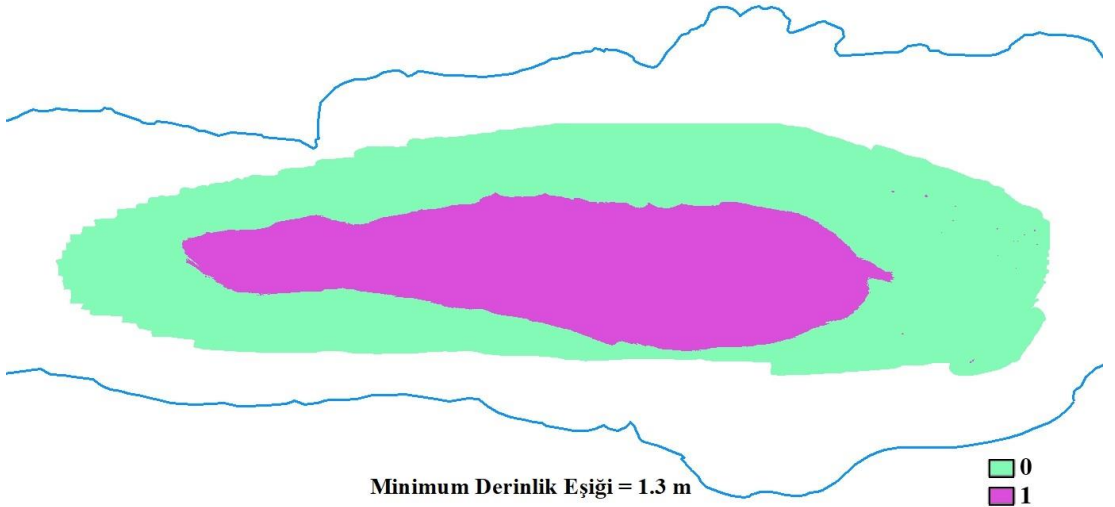
**Şekil 5.17:** Minimum derinlik eşığı = 0.4 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşığından küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



**Şekil 5.18:** minimum derinlik eşığı = 0.5 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşığından küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).

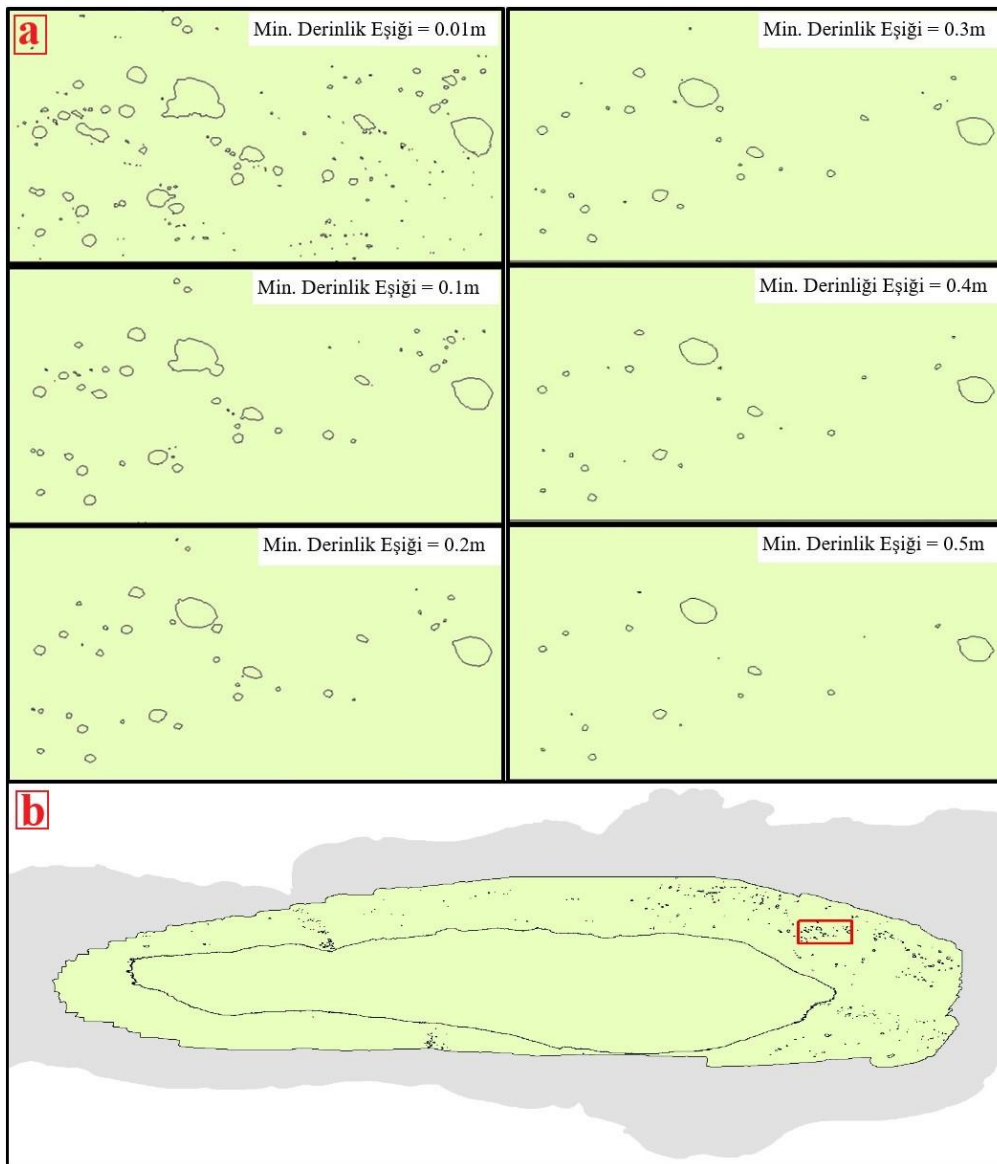


**Şekil 5.19:** Minimum derinlik eşği = 1 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).



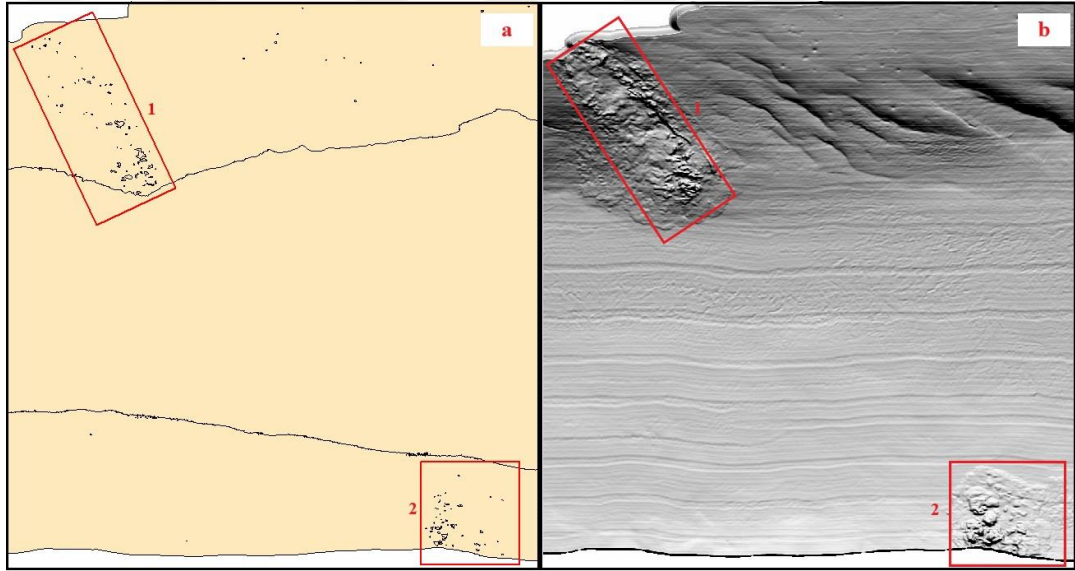
**Şekil 5.20:** Minimum derinlik eşği = 1.3 metre (Kalınlığı minimum derinlik eşğinden küçük olanlar yeşil, büyük olanlar mor renk ile gösterilmiştir).

Bir sonraki aşamada “Raster to Polygon” aracı ile raster veriler poligona çevrilmiş, böylece minimum eşik değerlerine göre sınıflandırılmış değerlere göre poligon verisinde çokgenler çizilmiştir. Bu çokgenler pockmark olduğu düşünülen çukur alanları temsil etmektedir. Şekil 5.21’de seçilen tüm eşik değerlerine ait çizdirilmiş çokgenler gösterilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere minimum derinlik eşliğinin çok küçük seçilmesi durumunda göl tabanındaki küçük düzensizlikler veya verilerdeki bozulmalar, pockmark olarak tanımlanabilecek alanlar oluşturarak yanlış yorumlara sebep olabilmektedir. Aksi bir durum olarak minimum derinlik eşliğinin çok büyük seçilmesinde ise kalınlığı görece küçük olan pockmarklar tespit edilememektedir.



**Şekil 5.21:** a) Farklı minimum derinlik eşığı değerlerine göre pockmark değişimleri. b) Değişimlerin izlendiği alanın gölde bulunduğu yer kırmızı çerçeve ile verilmiştir.

Veri setinin öznitelik tablosu incelendiğinde toplamda 1173 adet pockmark olduğu düşünülen çokgen oluşturulmuştur. Fakat bunların hepsinin pockmark olmadığı bilinmektedir. Öncelikli olarak kabartı haritası incelendiğinde batimetri verileri içerisinde düzensiz alanlar farkedilmiştir. Gölün kuzey ve güney sınırında bulunan bu taban düzensizliklerinin bölgede geçmiş dönemlere ait şiddetli sel ve kasırga olaylarının kıydan göle taşıdığı malzemenin yarattığı değişimler olduğu bilinmektedir (Kurt ve diğ., 2020). Bu alanlar Şekil 5.22’de gösterilmektedir. Bölgedeki diğer veri setleri de incelenmiş olup bu alanlarda pockmark sınıflandırmasına uyan yapıda çukurluklara rastlanmamıştır. Manuel olarak tespit edilemeyen pockmarkların varolabileceği yorumu yapılabilir. Ancak veri güvenilirliğini arttırmak için pockmark olmadığına karar verilen bu kaotik bölgeler manuel düzenleme ile veri setinden atılmıştır.



**Şekil 5.22:** Manuel düzenleme ile veri setinden çıkarılan alanlar a) poligon veri seti b) kabartı haritası.

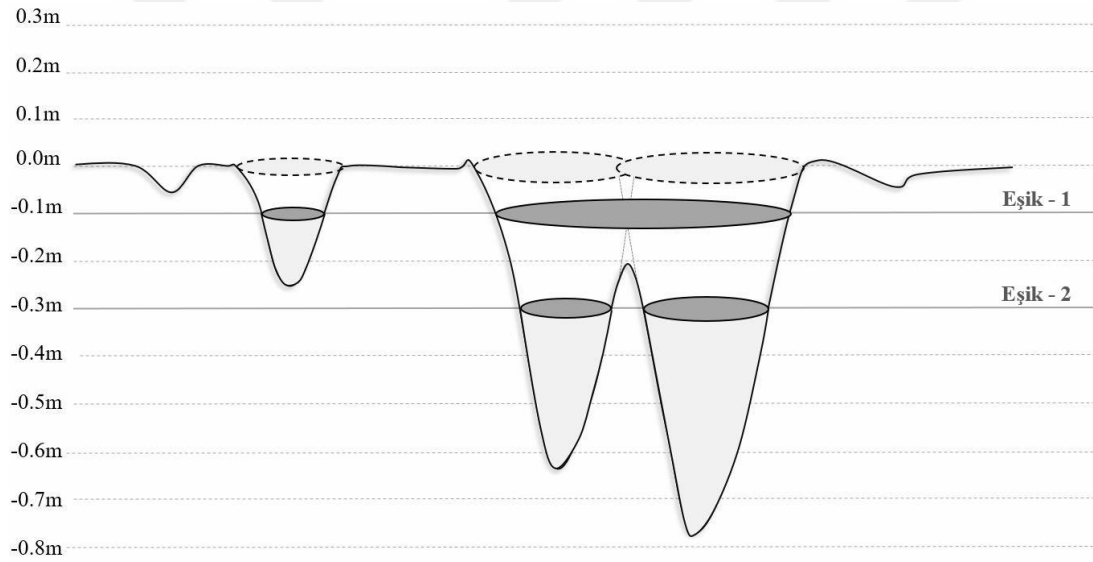
Yukarıdaki paragraflarda gölün en derin bölgesindeki ani derinlik artışı nedeniyle orta kısımda yer alan bu alanın büyük bir pockmark gibi görüldüğü belirtilmişti. Bundan dolayı bu bölge de manuel düzenlemeye dâhil edilerek veriden çıkartılmıştır. Manuel düzenlemeler sonrasında minimum derinlik eşiği = 0.1m değeri kullanılarak elde edilen pockmark sayısı 561 olarak belirlenmiştir.

Bir önceki aşamada oluşturulan poligon verileri “WGS 1984 UTM Zone 36N” koordinat sistemine göre projeksiyon edilmiştir. Bu sayede gerçek konumu bilinen bu çokgenlerin öznitelik tablosu içerisinde alanları ve çevreleri otomatik olarak hesaplanabilmektedir.

Seçilen eşik değerindeki pockmarka ait alanın gerçeğe yakın değere ulaşmasını sağlamak için “buffer - tamponlama” kullanılarak pockmarkların ortalama eğimine göre kesit alanları büyütülmüştür (Buffer mesafesi = 1.5 m). Uygulanan işlemin şematik görseli Şekil 5.23’de verilmiştir.

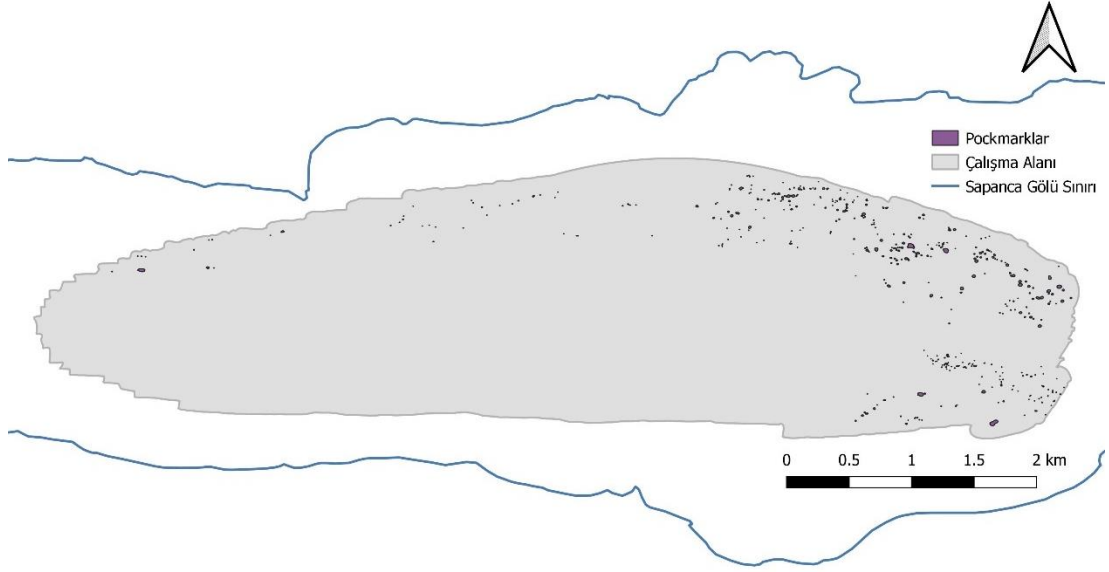
Veri setinde kötü hava koşullarından kaynaklanan akıntılara bağlı etkenler sebebiyle düzensiz hatlara sahip ancak pockmark olduğu bilinen çukurluk görünümünü yumuşatmak amacıyla “smooth” işlemi uygulanmıştır.

Yapılan düzenlemeler sonucunda gerçeğe en yakın değerler belirlenerek pockmarkların alan/çevre oranı kullanılarak çap değerleri elde edilmiştir. Buna göre Hovland ve diğ. (2002) tarafından yapılan sınıflandırma göz önüne alınarak elde edilen çap değerleri (çap  $\geq$  1 m) sınırlandırılmıştır.



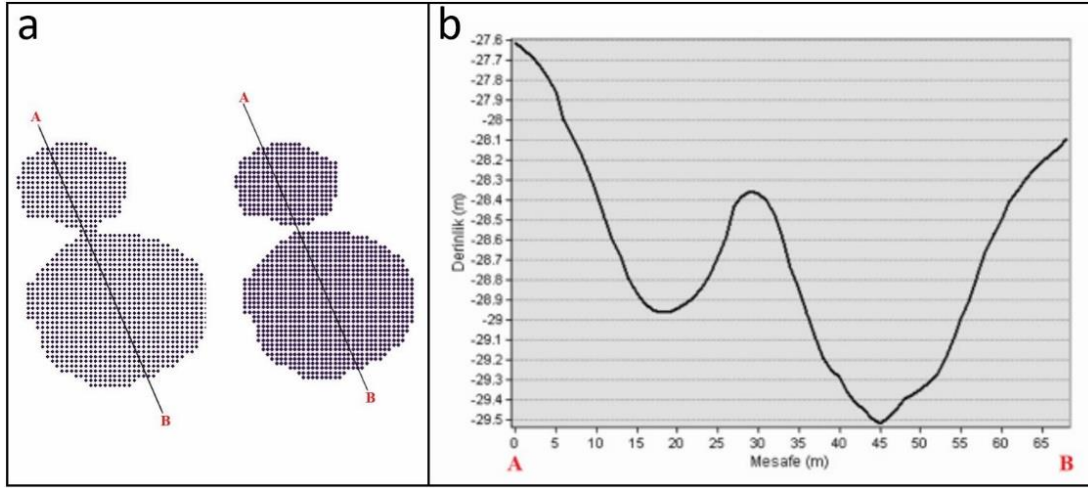
**Şekil 5.23:** Minimum derinlik eşik değeri belirleme ve buffer işlemi için şematik görsel. Eşik-1 değeri 10 cm seçilmiştir, Eşik - 2 değeri 30 cm seçilmiştir.

Yapılan bu filtreleme sonucunda da Sapanca Gölü’nde, çapları 1-50 metre, derinlikleri ise 0.1-3.91 metre arasında değişen toplam 439 adet pockmark elde edilmiştir. Şekil 5.24’te tüm pockmarkların çalışma alanındaki konumları verilmiştir.



**Şekil 5.24:** Tüm pockmarkların çalışma alanındaki konumlarını gösteren harita.

Normal pockmarklar için yapılacak olan analizlerde, bu pockmark sınıflandırmasına göre en gerçeğe yakın sonuçlara ulaşabilmek adına minimum derinlik eşiği 0.3 metre seçilmiştir. Göl tabanında bir arada birbirine çok yakın pockmarkların olduğu durumlarda minimum derinlik eşiği düşük seçilirse bu pockmarklar tek bir pockmark gibi görünürler. Minimum derinlik eşiği değeri arttırılarak pockmarklar birbirinden ayrılırlar ve bu problem ortadan kaldırılır. Şekil 5.23'te bu durumun temsili görseli sunulmuştur. Bu kapsamda minimum eşik değeri 0.3 metre seçildiğinde birleşik pockmarkların çoğunlukla birbirinden ayrıldığı gözlenmiştir. Normal pockmarkların analizi için bu değer seçilerek çalışmaya devam edilmiştir. Eşik değeri seçiminden sonra 0.1 metre değeri için uygulanan tüm işlemler minimum derinlik eşiği 0.3 metre seçilen veriler için de tekrarlanmıştır. Birbirinden hala ayrılmamış pockmarklar için manuel düzeltme yapılmıştır. Yapılan düzeltme örneği Şekil 5.25a'da gösterilmiştir. Bitişik görünen iki pockmarkın kesiti Şekil Şekil 5.25b'de verilmiştir.



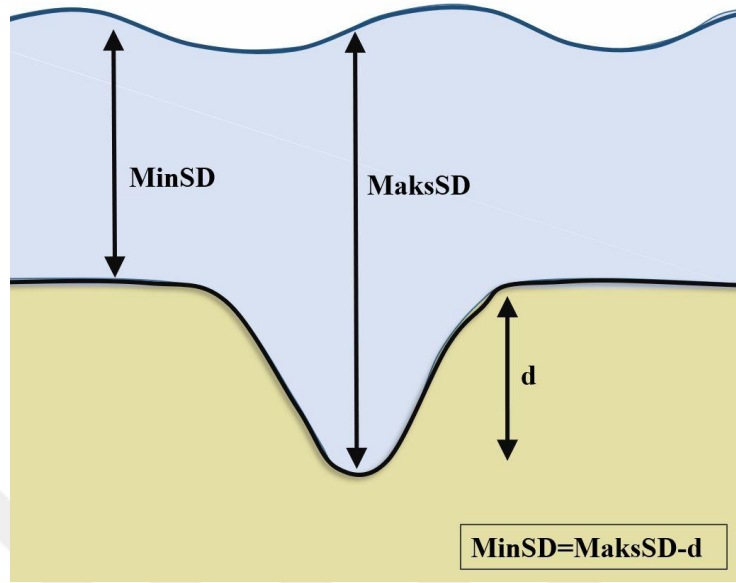
**Şekil 5.25:** Birbirinden manuel olarak ayrılan iki pockmarkın a) harita üzerinde b) kesit olarak görünümü.

Bu düzeltme toplam pockmark sayısının %10'undan az olacak şekilde uygulanmıştır. Toplam 49 adet normal pockmark belirlenmiştir. Gölde yapılan ölçümlere göre, normal pockmarklar 10-50 metre çapa ve yaklaşık 4.0 metre derinliğe kadar ulaşabilmektedir. Şekil 5.26'da normal pockmarkların çalışma alanındaki konumları gösterilmiştir.



**Şekil 5.26:** Normal pockmarkların çalışma alanındaki konumlarını gösteren harita. Şekil 5.12'deki kalınlık verisi kullanılarak her pockmarka kalınlık değeri atanmıştır ve en büyük değerler (d) belirlenmiştir. Bu değerler haritada en derin nokta parametresi olarak işaretlenmiştir. Bu noktaların su yüzeyine olan uzaklığı batimetri verisinden alınarak gerçek derinlik değerleri (MaxSD) bulunmuştur. Gerçek derinlik değerinden

pockmarka ait kalınlık değeri çıkartılarak pockmarkın taşma noktası derinliği (MinSD) hesaplanmıştır. Bu hesaplamaaya ait görsel Şekil 5.27’de açıklanmaktadır.



**Şekil 5.27:** Deniz tabanındaki bir pockmark'ın basitleştirilmiş diyagramı.

Poligon veri setinde işaretlenmiş olan 49 adet normal pockmarkın merkez noktaları belirlenerek ayrı bir veri seti olarak kaydedilmiştir. Merkez noktaları temel alınarak pockmarkların en uzun eksenini (x) ve ona dik olan eksene (y) göre, pockmarkların küreselliğinin bir değeri olan, eksantrisite (e - dış merkezlik) denklem 5.1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$e = \sqrt{\frac{x^2 - y^2}{x^2}} \quad (5.1)$$

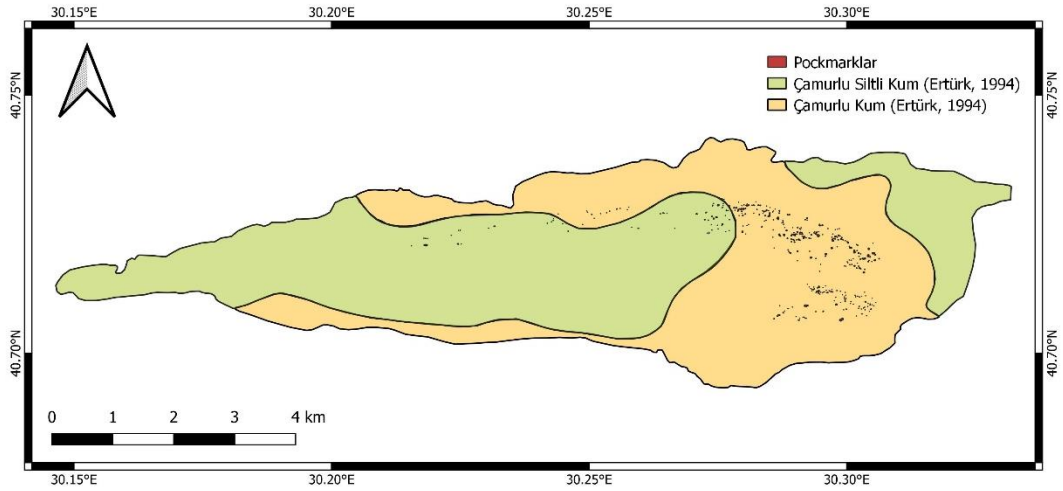
Sonuç olarak GMT, QGIS ve Arcgis programları kullanılarak batimetri verileri işlenmiş olup, Sapanca Gölü’nde bulunan pockmarklar özneliklerine göre filtrelerden geçirilerek yarı-otomatik bir sistem ile tespit edilmiştir. Pockmarkları analiz edebilmek için çeşitli haritalar oluşturulmuş ve bu haritalar üzerinden yapılan morfolojik yorumlamalar izleyen bölümde verilmiştir.



## 6. GÖL TABANI MORFOLOJİK YORUMLARI

Sapanca Gölü'ndeki yatay ve düşey çözünürlüğü cm'ler seviyesinde olan çok ışınlı batimetri verileri gölün yaklaşık 17.78 km<sup>2</sup>'lik bir alanına karşılık gelmektedir. Batimetri verisine göre gölün en derin noktası -52.78 m olarak belirlenmiştir.

Genellikle aktif fayları çevreleyen ve su tabanından yukarı doğru sıvı veya gaz akışının kanıtı olan pockmarklar çok ışınlı batimetrik verilerden oluşturulan haritalarda gözlenmiştir. Bu çukurluklar gölün daha çok kuzeydoğusunda yoğun bir şekilde görülmekle birlikte gölün güneydoğusunda da bu yapılara rastlanmaktadır. Şekil 6.1'de Ertürk (1994)'ten alınan verilerle Sapanca Gölü tabanına ait jeolojik birim haritasına pockmarklar dağılımları verilmiştir. Haritaya göre pockmarkların genellikle çamurlu kum çökellerinde yoğunlaştığı çıkarımı yapılmıştır.

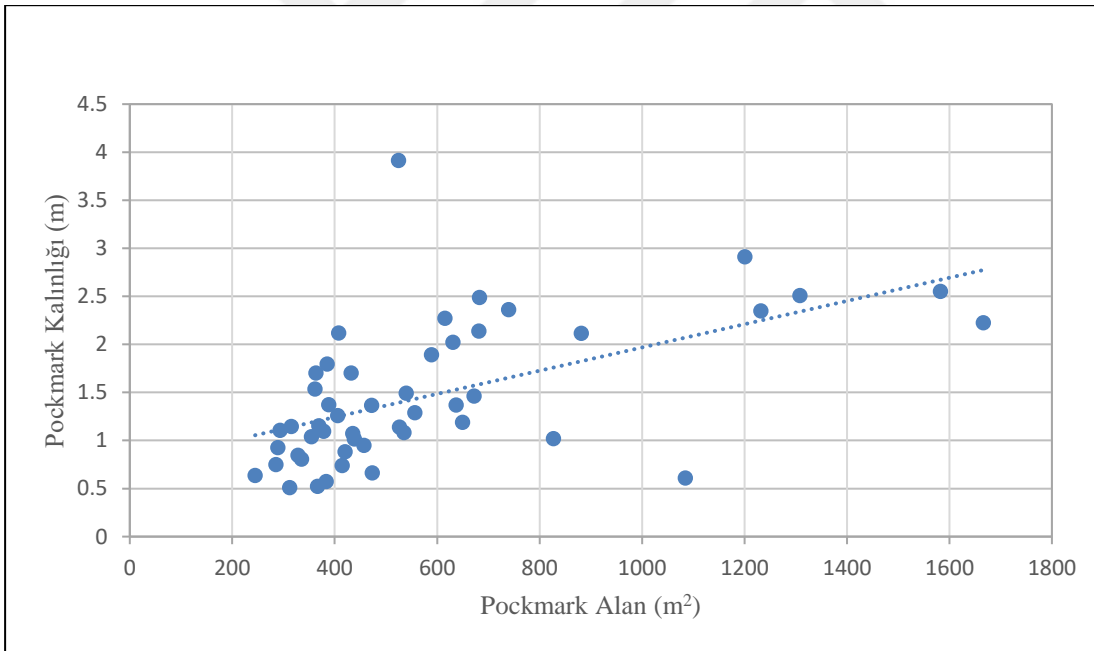


**Şekil 6.1:** Sapanca Gölü'nde Ertürk (1994)'ün göl tabanında belirlediği litolojik birimleri gösteren harita üzerinde pockmarkların yoğunlaştığı alanlar.

Göl tabanındaki pockmarkların varlığı ve dağılımı dikkate alınmalıdır. Ancak, bu özelliklerin batimetrik verilerden manuel olarak belirlenmesi son derece zaman alıcıdır ve öznelidir. Bu çalışmada pockmarkların yarı-otomatik bir sistemle nasıl tespit edilebildiği “Çok Işınlı Batimetrik Verilerin İşlemesi” bölümünde anlatılmıştır. Bu adımlar uygulanarak Sapanca Gölü'nün çok ışınlı batimetrik verilerinin olduğu alanda

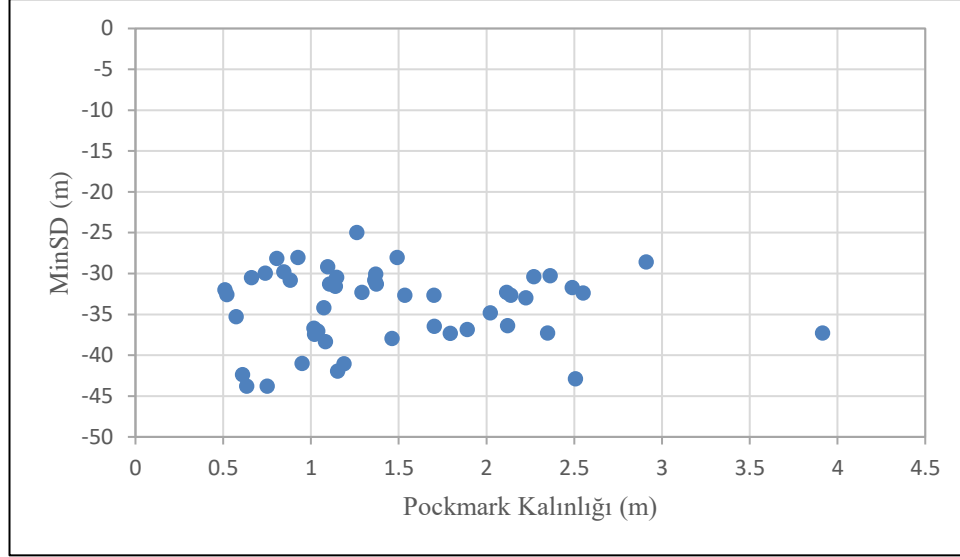
439 adet pockmark haritalanmış (Şekil 5.24) ve morfometrik olarak karakterize edilmiştir. Bu sistemle haritalama ve karakterizasyon işlemleri manuel olarak yapmak için gereken zamandan çok daha kısa sürmektedir. Bu haritalama yöntemi güvenilir sonuçlar vermesine rağmen, batimetrik verilerin çözünürlüğünden büyük ölçüde etkilenmektedir. Düşük çözünürlük, pockmarkların morfometrik karakterizasyonunu etkilemektedir (Gafeira ve diğ., 2012). Bu yaklaşımla yapılacak pockmark araştırmalarının çözünürlüğü yüksek (cm'ler ölçeğinde) verilerde kullanılması önerilmektedir.

Hovland ve diğ., (2002), pockmarkları çap ve derinlik özniteliklerine göre birim ve normal olarak sınıflandırmalara ayırmışlardır. Benzer kriterleri kullanmak üzere Sapanca Gölü'nde 49 adet normal pockmark tespit edilmiş ve haritalanmıştır (Şekil 5.26). Haritalanan 49 adet pockmark için Alan-Kalınlık arasındaki ilişki Şekil 6.2'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde eğim çizgisine göre, genel olarak normal pockmark kesit alanının artmasıyla, pockmarkların kalınlığında da artış olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.2:** Haritalanan 49 normal pockmark için pockmark alanı ve kalınlığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik. Mavi kesikli çizgi eşlenen pockmark işaretleri için eğilim çizgisini gösterir.

Andrews ve diğ., (2010), Belfast Körfezi'nde bulunan pockmarkları tarif ederken, daha derin sularda daha büyük pockmarkların meydana geldiğini belirtmektedir. Çalışma kapsamında 49 normal pockmark için pockmark kalınlığı (d) ile minimum su derinliği (MinSD) arasındaki ilişki Şekil 6.3'te verilmiştir.



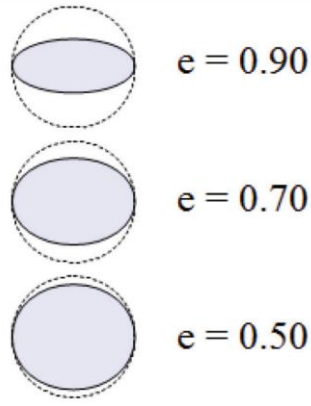
**Şekil 6.3:**Çizilen 49 normal pockmark için pockmark derinliği (d) ile minimum su derinliği (MinSD) ilişkisini gösteren grafik.

Bu çalışma sırasında elde edilen verilerden su derinliği (MinSD) ile pockmark derinliği (d) arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Ancak aynı derinliklere sahip normal pockmarkların kalınlıkları birbirinden farklı olabilmektedir.

Pockmarkların şekli ve boyutu, alt katman türü ve alttaki tabakaların gaz üretimi ile doğrudan ilişkilidir (Cao ve diğ., 2020). Bu kapsamda normal pockmarkların şekil ve boyutunun bir ifadesi olan eksantrisite değerleri hesaplanmıştır. Eksantrisite (dış merkezlilik), bir şeklin yuvarlaklık veya simetriye olan uzaklığını ifade eden bir ölçüdür. Eksantrisite, bir şeklin enine ve boyuna çaplarının oranı olarak hesaplanabilir. Eksantrisite, bir elipsin mükemmel dairesel olmaktan ne kadar sapma gösterdiğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir ve bu nedenle farklı boyutlardaki pockmarklar arasında karşılaştırma yapmayı sağlar.

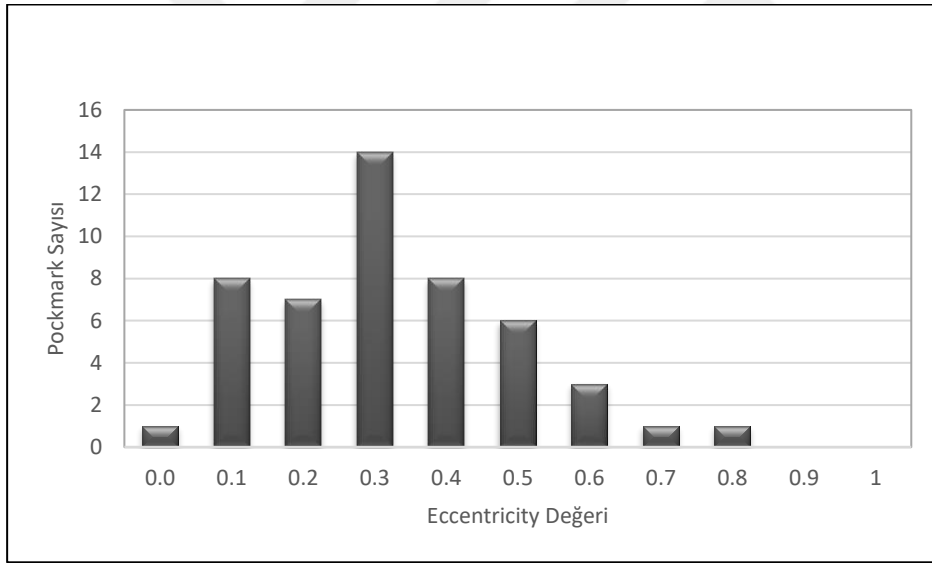
Her haritalanan normal pockmark'ın eksantrikliğini (e) tanımlamak için eksenin uzunluğu (x) ve toplam alanın (A) bilinmesi, yeterlidir. Eksantriklik, denklem 5.2'ye göre hesaplanmıştır.

Eksantrisite değeri 0 ile 1 arasında değişir. 0 değeri, tam bir simetri veya dairesel bir şekli gösterirken, 1 değeri en yüksek eksantrisiteyi temsil eder, yani şeklin en az simetrik veya en çok yuvarlaklık dışında olduğunu gösterir. Farklı eksantriklik değerlerine sahip örnekler verilen Şekil 6.4'te görülmektedir.



**Şekil 6.4:** 0 ile 1 arasında değişebilen farklı eksantriklik değerlerine sahip elips örnekleri (Gafeira ve diğ., 2012).

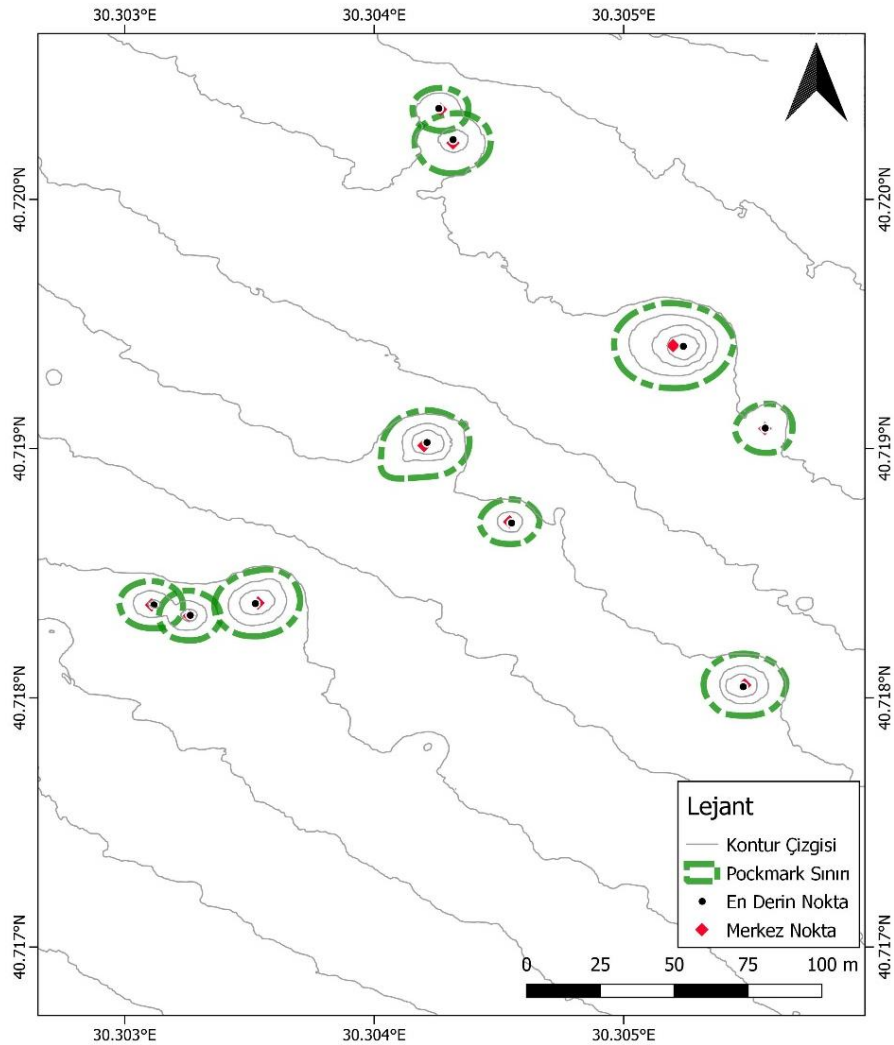
Bu tez kapsamında normal pockmarklar için hesaplanan eksantriklik değerleri histogram grafiği Şekil 6.5'te verilmiştir. Bu grafik, 49 normal pockmarkın eksantriklik değerlerine göre frekans dağılımını göstermektedir. Bu histograma bakıldığında, ortalama değeri yaklaşık 0.3 olan eksantrisite baskınlığı görülmektedir.



**Şekil 6.5:** Eksantrikliklerine göre normal pockmark frekans dağılımını gösteren histogram.

Eksantriklik histogramı değerlendirildiğinde Sapanca Gölü'ndeki normal pockmarkların genellikle dairesele yakın şekle sahip olduğu yorumu yapılabilmektedir. Eksantriklik yönelimi Şekil 6.6'da verilen haritada görülebilmektedir. Haritada normal pockmarkların en derin noktaları, pockmark sınırlarının merkezi ve pockmark sınırları gösterilmiştir. Tüm normal pockmarkların yönelimleri incelendiğinde farklı doğrultular görülebilse bile genellikle normal pockmarklar KD-GB yönlüdür.

Bir bölge içindeki eksantriklik değerlerindeki farklılık, gaz çıkış olayları sırasında değişken sürelerde gaz salınımı veya akımın gücündeki değişiklikleri yansıtabilir. Eğer akıntı yoksa dairesel bir pockmark oluşacaktır. Bunun nedeni, eğer bir pockmark ince sedimentin süspansiyona girmesiyle oluşuyorsa, bu süspansiyondaki sedimanın sonraki çökmesinin, hâkim olan akıntılar tarafından etkilenmesidir. Ancak sediman bir akıntı tarafından taşınıyorsa, süspansiyondaki malzemenin düzensiz bir dağılımı beklenir ve bu nedenle asimetrik pockmark'ların gelişimi gözlemlenebilmektedir (Gafeira ve diğ., 2012). Ayrıca akışkan akışının yoğunluğu zayıfladıkça, düzenli hidrodinamik kuvvetlerin neden olduğu uzun vadeli erozyon nedeniyle pockmarklar su akışı yönünde uzanabilmektedir (Cao ve diğ., 2020).

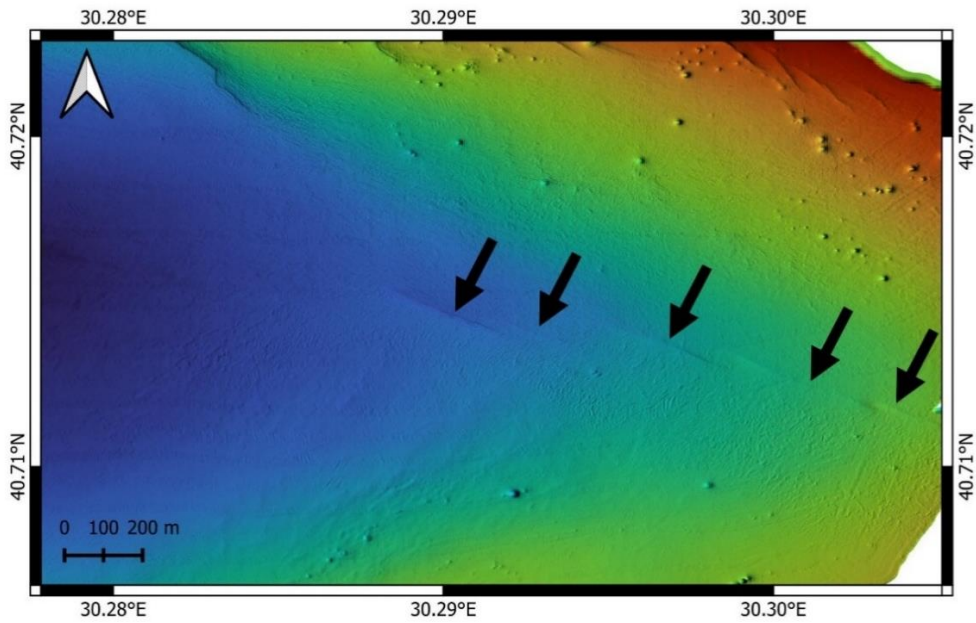


**Şekil 6.6:** Normal pockmarkların en derin noktalarını, merkez noktalarını ve sınır çizgilerini gösteren harita.

Sapanca Gölü tabanındaki günümüz akıntılarının hareketsiz pockmarkların geometrisini şekillendiremeyeceği anlaşılmaktadır. Buradan yola çıkılarak normal pockmarklara ait yönelim ve eksantiriklik oranları değerlendirildiğinde buradaki dairesel pockmarkların, güçlü bir akışkan akışı tarafından oluştuğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, Sapanca Gölü'ndeki pockmarkların, göl tabanındaki fayın deprem aktivitesi ile anlık akışkan patlamaları sonucu oluştuğu şeklinde yorumlanabilmektedir.

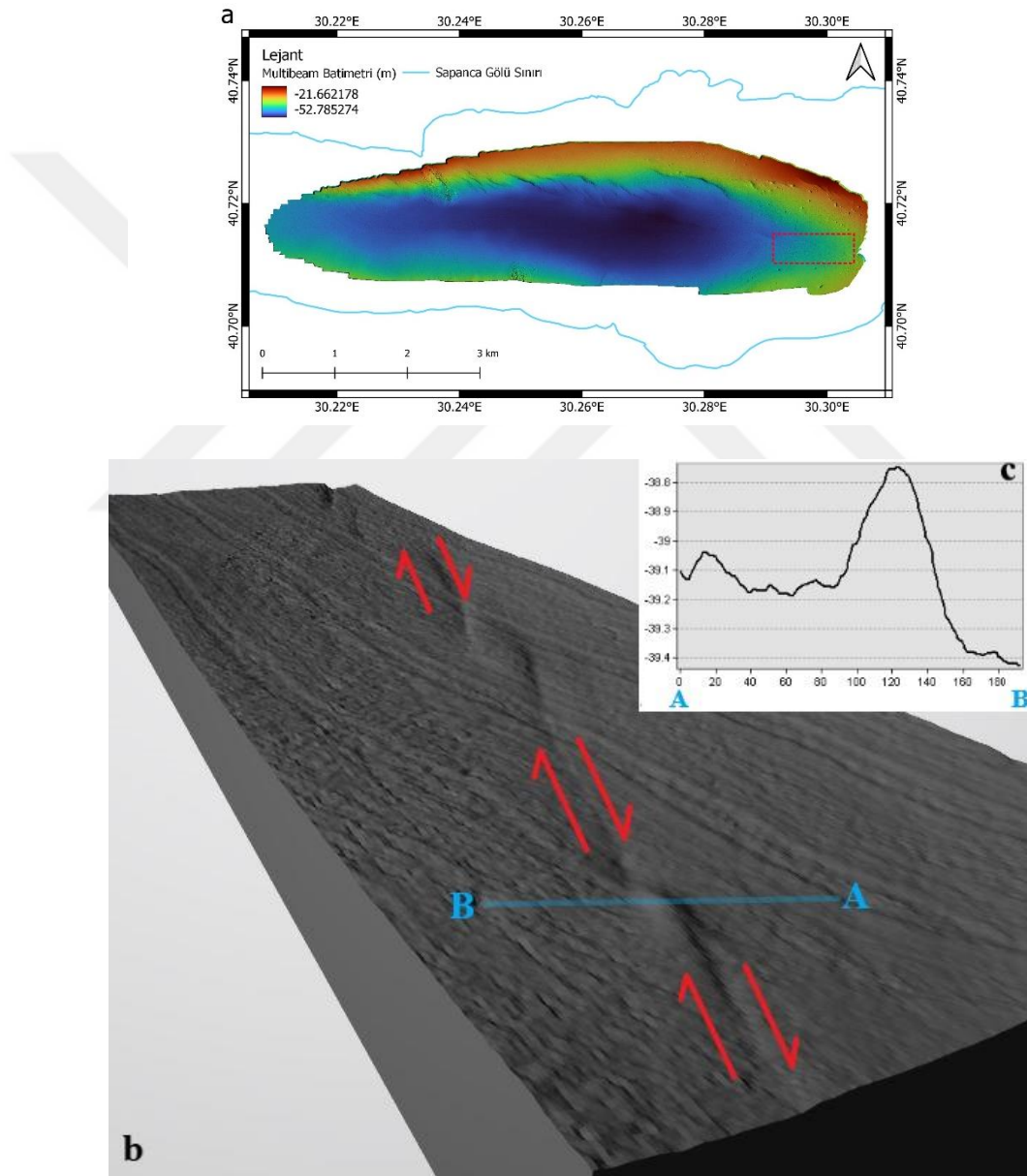
Veri setinde normal pockmarkların yaklaşık %50'sinin yönelimi güçlü bir tutarlık taşıdığından, ya tüm pockmarkların çok kısa bir süre içerisinde oluştuğu ya da göl içindeki dip akıntısı rejiminin uzun bir süredir aktif olduğu yorumu yapılabilir. Öte yandan yönelim dağılımının karmaşık olduğu normal pockmarklar değerlendirildiğinde bu farklılık değişik zamanlardaki akışkan akışı veya dip akıntısı rejimindeki değişiklikleri gösterebilmektedir. Bu yorumların güçlendirilebilmesi için göl tabanının tamamında bulunan pockmarklar incelenmelidir.

Çok ışınlı batimetri verilerinde çözünürlüğün çok yüksek olması sebebiyle göl tabanından geçen aktif fayların varlığına kanıt olan çizgiselliklerin takibi kolaylıkla yapılabilmektedir. Şekil 6.7'de Sapanca Gölü'ü tabanında KAF izlerinin görüldüğü bölgeye ait batimetri haritasında gözlenen fay izleri Kurt ve diğ. (2020)'de verildiği şekli ile siyah oklar ile gösterilmiştir.



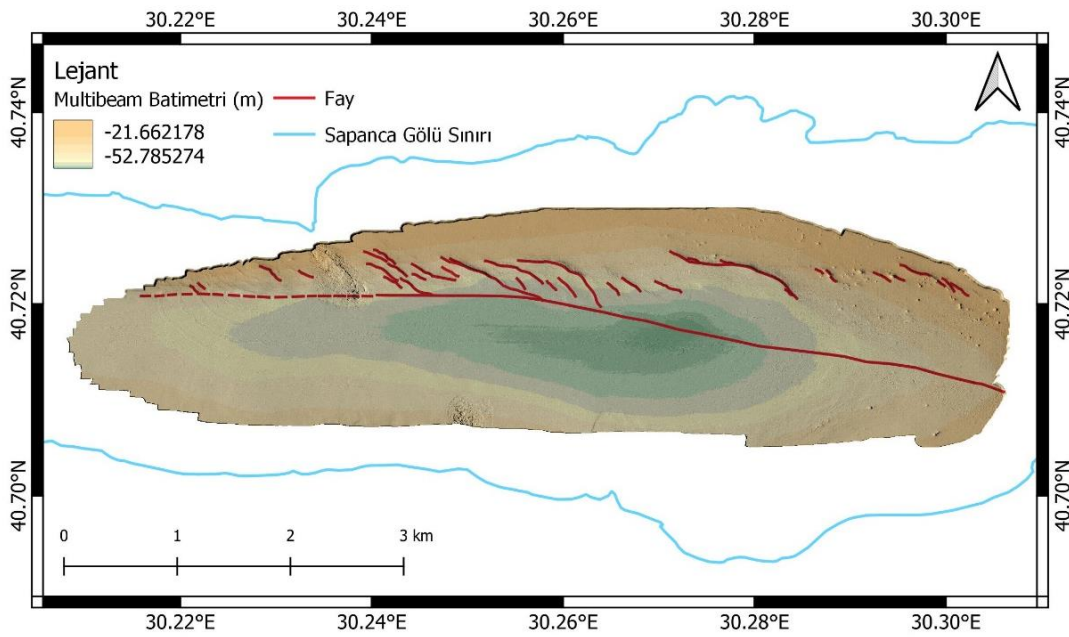
**Şekil 6.7:** Sapanca Gölü tabanındaki fay izleri (Kurt ve diğ., 2020'den değiştirilerek).

Haritada gölün güneydoğusunda kalan fay çizgilerinde sağ yanal doğrultu atımlı fayın sola doğru kademeli sıçramalar (en echelon) yaptığı görülmektedir (Kurt ve diğ., 2020). En echelon faylar, hemen hemen paralel olan yan yana fayların oluşturduğu bir yapıdır. Bu faylar, genellikle yanal veya yarı yanal bir kaymadan kaynaklanır (Ketin, 1969). Her bir fay, diğerlerine göre biraz ileri veya geri kaymıştır, böylece sıralanmış basamaklara benzer bir görünüm ortaya çıkmıştır. Bu alanlarda fayın atım yönüne bağlı olarak gelişen “push-up” bölgeleri gelişmiştir. Şekil 6.8’de bu push-up bölgesini kesen A-B doğrultulu bir kesit atılarak sıkışma kaynaklı oluşan tepe sergilenmiştir.



**Şekil 6.8:** KAF’ın Sapanca Gölü’nün güneydoğusundaki fay izi a) push up bölgesini gösteren harita b) 3 boyutlu push up modeli c) push up bölgesinden alınan kesit.

Çok ışınlı batimetri haritasında orta alanından doğusuna doğru BKB doğrultulu fay izleri görülmektedir. Sapanca Gölü'nde yapılan aktif tektonikliğin araştırıldığı önceki çalışmaların (Lettis ve diğ., 2002; Gürbüz ve Gürer, 2008a; Gülen ve diğ., 2014) batimetri verilerinde bu izler görülememiştir. Çok ışınlı batimetri verisindeki fay izleri takibi yapılarak çizilen fay haritası Şekil 6.9'da verilmiştir. Bu harita incelendiğinde sistematik çizgiselliğin KAF ile ilişkili olduğu yorumu yapılabilmektedir. Göldeki yüksek çözünürlüklü sismik verilerin ve yine batimetrik verilerle birlikte değerlendirilmesiyle KAF'ın bölgede genişlemeli-büklüm (relasing bend) yapısı sergilediği belirlenmiştir (Kurt ve diğ., 2020).



**Şekil 6.9:** Sapanca Gölü'nün çok ışınlı batimetri verisine göre çizilmiş faylar.

Gölün en derin bölgesinden -30 metrelere kadar olan alanında batimetrik değişim BKB yönlüdür. Batimetri veri setinin güneydoğusundan başlayıp batıya doğru uzanan fay izlerinin bir bütün olarak toplam uzunluğu yaklaşık 5.5 km'dir. Sapanca Gölü havzasının, çözünürlüğü yüksek çok ışınlı batimetri veri haritasına göre genişlemeli büklüm yapısı ile oluştuğu yorumu Kurt ve diğ. (2020)'ye benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ana fay kolunun kuzeyinde kalan antitetik ve/veya sentetik faylar da görülebilmektedir.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KAF'ın deprem aktivitesinin en yoğun olduğu Kuzey Kolu'nda bulunan Sapanca Gölü'nde toplanan çok ışınlı batimetrik veriler kullanılarak gölde aktif faylara bağlı olarak gelişen pockmark yapılarının geometrik özellikleri ve göldeki dağılımları araştırılmıştır. Bu kapsamda, “*Sapanca Gölü ve Civarının Aktif Tektoniğinin Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması*” başlıklı TÜBİTAK-1001 Projesi (Proje No: 117Y130) (Kurt ve diğ., 2020) çerçevesinde gölde yaklaşık 17.85 km<sup>2</sup>'lik bir alanda toplanan çok ışınlı batimetri verileri kullanılarak yüksek çözünürlüklü batimetrik haritalar oluşturulmuştur.

Elde edilen kontur ve kabartı haritalarından yapılan morfolojik değerlendirmelerde göl tabanında aktif fayları çevreleyen küçük çukurlukların (pockmarklar) özellikle gölün kuzeydoğu kesimlerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Pockmarklar, sedimentasyonun yoğun olduğu bölgelerde su tabanından sıvı veya gaz çıkışlarıyla ilişkili morfolojik yapılardır. Bu çalışmada gölün jeolojik yapısı, hidrolojik süreçleri ve sedimentasyon özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla, gözlenen bu pockmark yapılarının nitelikleri araştırılmıştır.

Pockmarkların varlığı ve dağılımı, önemli bir faktör olarak dikkate alınmalıdır. Ancak, bu özelliklerin manuel olarak gözle değerlendirilmesi zaman alıcı ve öznel olabilmektedir. Bu doğrultuda subjektif yorum hataları içerebilen göreceli analizlerden kaçınmak adına QGIS ve ARCGIS programlarından yararlanılarak yarı otomatik bir yaklaşımla pockmarkların konumu tespit edilmiş ve haritalanmıştır. Gölde yarı otomatik yaklaşımla toplam 439 adet pockmark tespit edilmiş ve morfometrik olarak karakterize edilmiştir. Pockmarkların çapları 1-50 metre, kalınlıkları (derinlikleri) ise 0.1-3.91 metre arasında değişmektedir. Pockmarklar, çap ve derinlik özelliklerine göre birim pockmark ve normal pockmark olarak sınıflandırılmaktadır (Hovland ve diğ., 2002). Bu çalışmada, 49 adet normal pockmark tespit edilmiş ve haritalanmıştır. Gölde bulunan normal pockmarklar 10-50 metre çapa ve yaklaşık 4.0 metre derinliğe kadar ulaşabilmektedir.

Özellikle gölün kuzeydoğu kesiminde dağılım gösteren pockmarklar, Ertürk (1994)'ün Sapanca Gölü tabanında dağılım gösteren jeolojik birim haritası ile ilişkilendirilmiş ve pockmarkların genellikle gölün çamurlu kum çökellerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir.

Normal pockmarkların çap, derinlik, kesit alanı ve çevresi belirlenerek alan-kalınlık ilişkisi incelenmiştir. Oluşturulan grafikte genel eğilim değerlendirildiğinde pockmarkların kesit alanlarının artmasıyla kalınlıklarının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca pockmark kalınlığı ve minimum su derinliği parametreleriyle grafik oluşturularak pockmarkların boyutu ile göl tabanı derinliği arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Ancak, bu çalışmada su derinliği ile pockmark kalınlığı arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. Yaklaşık olarak aynı su derinliklerinde, birbirinden farklı kalınlıklarda normal pockmarklara rastlanmaktadır.

Pockmarkların göl tabanındaki dairesel şekildeki uzanımları ortamda hâkim aktif faylanma özellikleri ve/veya su içindeki akıntı özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu amaçla gölde *eksantrisite* değeri kullanılarak pockmarkların şekil ve boyutları karakterize edilmiştir. Sapanca Gölü'ndeki normal pockmarkların eksantriklik değerlerinin ağırlıklı olarak 0.3 olduğu belirlenmiştir. Bölgedeki normal pockmarkların genellikle dairesele yakın şekle sahip oldukları görülmektedir. Bu nedenle, Sapanca Gölü'ndeki pockmarkların, göl tabanındaki fayın deprem aktivitesi sebebiyle anlık ve güçlü akışkan patlamaları ile oluştuğu düşünülmektedir.

Sapanca Gölü'ndeki normal pockmarkların yaklaşık %50'sinin KD-GB doğrultulu olarak göl tabanında uzanım gösterdiği tespit edilmiştir. Pockmarkların tutarlılıkla yönelime sahip olması, tüm pockmarkların kısa bir sürede oluştuğunu veya göl içindeki dip akıntısı rejiminin uzun bir süredir etkili olduğunu gösterebilmektedir. Ancak gölde bulunan normal pockmarkların karmaşık yönelimli dağılımı, farklı zamanlarda akışkan akışı veya dip akıntısı rejimindeki değişiklikleri gösterebileceğini işaret etmektedir. Bu yorumların doğrulanması için bütün göl tabanına ait çok ışınlı batimetrik verilerinin toplanması ve tüm pockmarkların incelenmesi gerekmektedir.

Sapanca gölüne ait yüksek çözünürlüklü batimetrik haritalarda ayrıca göl tabanında BKB doğrultulu fay izleri gözlenmiştir. Göle ait aktif tektonik yapıların araştırıldığı önceki çalışmaların (Lettis ve diğ., 2002; Gürbüz ve Gürer, 2008a; Gülen ve diğ., 2014) düşük çözünürlüklü batimetri verilerinde gözlenmeyen bu fay izleri Kurt ve diğ.

(2020)'de de belirtildiği gibi genellikle sola doğru kademeli sıçramalar yaparak en echelon yapılar oluşturmaktadır. Bu alanlarda sağ yanal atımlı fayın atım uzanımına bağlı olarak gelişen “push-up” bölgelerinin oluştuğu ve KAF'ın göl içinden geçen batimetrik çizgiselliğinin yine Kurt ve diğ. (2020)'dekine benzer şekilde genişlemeli büküm yapısı sunduğu anlaşılmıştır. Tüm bu özellikler, gölün jeolojik süreçlerle şekillendiğini ve aktif tektonik hareketlilikle ilişkili olduğunu göstermektedir.

Yüksek çözünürlüklü batimetrik verilerin araştırılması, Sapanca Gölü'ndeki aktif fay izlerine ilaveten pockmarkların dağılımı, boyutu, yönelimi ve oluşum mekanizmaları hakkında bilgiler sunmaktadır. Bu bilgiler, ileriki çalışmalarda, göl ekosisteminin jeolojik ve hidrolojik özelliklerini anlamak ve pockmarkların oluşum mekanizmalarını araştırmak için yardımcı olabilir.

Bu çalışma ayrıca, batimetrik verilerin yapısal yorumlarının araştırılmasında otomatik veri işleme ve analiz yöntemlerinin kullanımının avantajlarını göstermektedir. Otomatik yöntemlerle pockmark niteliklerinin hızlı ve tutarlı bir şekilde belirlenebilmesi, araştırmacılara zaman kazandırmakta ve daha geniş veri kümelerinin analiz edilebilmesini sağlamaktadır. Ancak, batimetrik verilerin düşük çözünürlüğü, pockmarkların morfometrik karakterizasyonunu etkileyebilir. Bu nedenle, daha yüksek çözünürlüklü verilere dayalı bir yöntemin tercih edilmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Alpar, B. & Yaltrak, C.** (2002). Characteristic features of the North Anatolian Fault in the eastern Marmara region and its tectonic evolution. *Marine Geology*, 190, 329-350.
- Andrews, B. D., Brothers, L. L., & Barnhardt, W. A.** (2010). Automated feature extraction and spatial organization of seafloor pockmarks, Belfast Bay, Maine, USA. *Geomorphology*, 124(1-2), 55-64.
- Audsley, A., Bradwell, T., Howe, J. A., & Baxter, J. M.** (2019). Distribution and classification of pockmarks on the seabed around western Scotland. *Journal of Maps*, 15(2), 807-817.
- Barka, A. A.** (1992). The North Anatolian fault zone. *Annales Tectonicae, Spec. Iss. VI*, 164–195.
- Barka, A. A., Akyüz, H. S., Altunel, E., Sural, G., Çakır, Z., Dikbaş, A., Yerli, B., Armijo, R., Meyer, B., de Chabalier, J.-B., Rockwell, T., Dolan, J. R., Hertleb, R., Dawson, T., Christofferson, S., Tucker, A., Furl, J., Langridge, R., Stenner, H., Lettis, W., Bachhuber, J. & Page, W.** (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit Earthquake (M7.4), North Anatolian Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (1), 43–60.
- Barka, A., Akyüz, H. S., Cohen, H. A., & Watchorn, F.** (2000). Tectonic evolution of the Niksar and Tasova–Erbaa pull-apart basins, North Anatolian Fault Zone: their significance for the motion of the Anatolian block. *Tectonophysics*, 322(3-4), 243-264.
- Bohnhoff, M., Harjes, H.-P. & Meier, T.** (2005). Deformation and stress regimes at the Hellenic subduction zone from Focal Mechanisms. *Journal of Seismology* 9 (3), 341–366.
- Bohnhoff, M., Martínez-Garzón, P., Bulut, F., Stierle, E. & Ben-Zion, Y.** (2016). Maximum earthquake magnitudes along different sections of the North Anatolian fault zone. *Tectonophysics*, 674, 147-165.
- Bozkurt, E.** (2001). Neotectonics of Turkey – a synthesis. *Geodinamica Acta*, 14:1-3, 3-30.
- Brothers, L. L., Kelley, J. T., Belknap, D. F., Barnhardt, W. A., Andrews, B. D., Legere, C., & Clarke, J. E. H.** (2012). Shallow stratigraphic control on pockmark distribution in north temperate estuaries. *Marine Geology*, 329, 34-45.
- Brown, K. M.** (1990). The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Journal of Geophysical Research*, 95, 8969–82.

- Bussmann, I. and Suess, E.** (1998). Groundwater seepage in Eckernforde Bay (western Baltic sea): effect on methane and salinity distribution of the water column. *Continental Shelf Research*, 18, 1795–806.
- Ceylan, M., A.** (1990). Sapanca Gölü'nün Hidrolojik Etüdü, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim dalı Yüksek lisans tezi.
- Clarke, J. E. H.** (2015, March). Multispectral acoustic backscatter from çok ışınli, improved classification potential. In *Proceedings of the United States Hydrographic Conference, San Diego, CA, USA* (pp. 15-19).
- Cloet, R. L., Hurst, S. L., Edwards, C. R., Phillips, P. S., & Duncan, A. J.** (1982). A sideways-looking towed depth-measuring system. *The Journal of Navigation*, 35(3), 411-420.
- Cormier, M. H, Seeber L, McHugh C, Polonia A, Cagatay N, Emre Ö, Gasperini L, Görür N, Bortoluzzi, G, Bonatti E, Ryan W, Newman K.** (2006). "North Anatolian Fault in the Gulf of Izmit (Turkey): Rapid vertical motion in response to minor bends of a nonvertical continental transform". *J. Geophys. Res.*, 111.
- Çağatay N.** (2003). Chronostratigraphy and sedimentology of the Marmara Sea over the last 40 kyrs.
- Çifçi, G., Dondurur, D., & Ergün, M.** (2003). Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea. *Geo-Marine Letters*, 23, 311-322.
- Demirel S, Alpar B, Yaltrak C, Vardar D, Kurt H.** (2020). "Northern segment of the North Anatolian Fault in the Gulf of Izmit inferred from marine magnetic anomalies", *Marine Geophysical Research*, 41.
- Dierssen, H. M., & Theberge, A. E.** (2020). Bathymetry: Seafloor mapping history. In *Coastal and Marine Environments*, 195-202.
- Dikbas A, Akyuz H. S, Meghraoui M, Ferry M, Altunel E, Zabcı C, Langridge R, Yalçın C. Ç.** (2018). "Paleoseismic history and slip rate along the Sapanca-Akyazi segment of the 1999 Izmit earthquake rupture (Mw=7.4) of the North Anatolian Fault (Turkey)", *Tectonophysics*, 738, 92- 111.
- Dikbaş, A.** (2009). *Kuzey Anadolu fay zonunun İzmit-Gölyaka (Düzce) arasındaki segmentlerinin paleosismolojisi ve morfolojik özellikleri* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, ISTANBUL.
- Dimitrov, L., & Woodside, J.** (2003). Deep sea pockmark environments in the eastern Mediterranean. *Marine Geology*, 195(1-4), 263-276.
- Ellis, J. P. and McGuinness, W. T.** (1986). Pockmarks of the northwestern Arabian Gulf. In *Proceedings of the Oceanology International Conference* (Brighton, March 1986). *Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering*, vol. 6. London, Graham and Trotman, pp. 353–67.
- Elmas A, Gürer A.** (2004). "A comparison of the geological and geoelectrical structures in the Eastern Marmara region (NW Turkey)", *Journal of Asian Earth Sciences*, 23, 153-162.

- Elmas, A., & Güner, A.** (2004). A comparison of the geological and geoelectrical structures in the Eastern Marmara region (NW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences* 23, 153-162.
- Emre, Ö., Awata, Y. & Duman, T. Y.** (2003). 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Yüzey Kırığı. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi, 1*, (ISBN:975-6595-53-1).
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S.,** 2011, 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Adapazarı (NK 36-13) Paftası, Seri No:14, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Erinç, S.** (1949). Sapanca Gölü'nün derinlik haritası ve morfometrisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (11-12), 139-140.
- Ertürk, O.** (1994). Geology, mineralogical and geochemical analysis of Sapanca Lake bottom sediments (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Istanbul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul, 113 pp.
- Fader, G. B.** (1997). The effects of shallow gas on seismic reflection profiles. *Glaciated Continental Margins: An Atlas of Acoustic Images*, 29-30.
- Field, M. E., & Jennings, A. E.** (1987). Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake. *Marine Geology*, 77(1-2), 39-51.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G. & Meyer, B.** (2004). The mechanical interaction between the propagating North Anatolian Fault and the back-arc extension in the Aegean. *Earth and Planetary Science Letters*, 224 (3(4)), 347–362.
- Floden, T., & Söderberg, P.** (1988). Pockmarks and related seabed structures in some areas of Precambrian bedrock in Sweden. *Geological Survey of Finland, Special Paper, 6*, 163-169.
- Fonseca, L., & Mayer, L.** (2007). Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to çok ışınli sonar data. *Marine Geophysical Researches*, 28, 119-126.
- Francois, R. E., & Garrison, G. R.** (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3), 896-907.
- Gafeira, J., Long, D., & Diaz-Doce, D.** (2012). Semi-automated characterisation of seabed pockmarks in the central North Sea. *Near Surface Geophysics*, 10(4), 301-312.
- Gafeira, J., Dolan, M. F., & Monteys, X.** (2018). Geomorphometric characterization of pockmarks by using a GIS-based semi-automated toolbox. *Geosciences*, 8(5), 154.
- García-García, A., Vilas, F., & García-Gil, S.** (1999). A seeping sea-floor in a Ria environment: Ria de Vigo (NW Spain). *Environmental Geology*, 38, 296-300.
- Gasperini, L., Marzocchi, A., Mazza, S., Miele, R., Meli, M., Najjar, H., ... & Polonia, A.** (2020). Morphotectonics and late Quaternary seismic

stratigraphy of Lake Garda (Northern Italy). *Geomorphology*, 371, 107427.

- Godin, A.** (1998). The Calibration of Shallow Water Çok ışınlı Echo-Sounding Systems. M.Eng. Report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 190, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. 182 pp.
- Göğüş, O. H., & Zabcı, C.** (2009). The tectonic evolution of the Turkish-Iranian Plateau and recent basin formation in the eastern Turkish mountains. *International Journal of Earth Sciences*, 98(4), 881-897.
- Gülen L., Demirbağ E., Çağatay N., Utkucu M., Yıldırım E., Yalçın H. & Yalamaz, B.** (2014). Sapanca Gölü'nün ayrıntılı batimetri, genç çökel istifi, aktif yapısal unsurları vasıtasıyla yakın bölgesinin sismojenik davranışının incelenmesi. *Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB) (Turkish National Union of Geodesy and Geophysics (TNUGG))*. Proje No: TUJJB-UDP-03-10.
- Gündüz, Ö. C.** (2015). Sapanca (Sakarya) göl havzasının hidrojeoloji incelemesi ve kavramsal yer altı suyu modellemesi.
- Gürbüz, A. & Gürer, Ö.** (2008a). Anthropogenic affects on lake sedimentation process: a case study from Lake Sapanca, NW Turkey. *Environmental Geology*, 56, 299–307.
- Gürbüz, A. & Gürer, Ö.** (2008b). Tectonic geomorphology of the North Anatolian Fault Zone in the Lake Sapanca basin (Eastern Marmara Region, Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*.
- H. Cao, Z. Sun, N. Wu et al.** (2020). Mineralogical and geochemical records of seafloor cold seepage history in the northern Okinawa Trough, East China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 155, article 103165.
- Hammerstad, E., Lovik, A., Minde, S., Krane, L., & Steinset, M.** (1985, November). Field performance of the Benigraph high-resolution çok ışınlı seafloor mapping system. In *OCEANS'85-Ocean Engineering and the Environment* (pp. 682-685). IEEE.
- Hasiotis, T., Papatheodorou, G., Kastanos, N., and Ferentinos, G.** (1996). A pockmark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/93 seismic event. *Marine Geology*, 130, 333–44.
- Hill, J. M., Halka, J. P., Conkwright, R., Koczot, K., and Coleman, S.** (1992). Distribution and effects of shallow gas on bulk estuarine sediment properties. *Continental Shelf Research*, 12, 1219–29.
- Hovland, M.** (1981). Characteristics of pockmarks in the Norwegian Trench. *Marine Geology*, 39, 103–17.
- Hovland, M., & Judd, A. G.** (1988). *Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology and the marine environment* (Vol. 293). London: Graham & Trotman.
- Hovland, M., Gardner, J. V., & Judd, A. G.** (2002). The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, 2(2), 127-136.

- Hovland, M., Heggland, R., De Vries, M. H., & Tjelta, T. I.** (2010). Unit-pockmarks and their potential significance for predicting fluid flow. *Marine and Petroleum Geology*, 27(6), 1190-1199.
- Hovland, M., Judd, A. G., and King, L. H.** (1984). Characteristic features of pockmarks on the North Sea floor and Scotian Shelf. *Sedimentology*, 31, 471–80.
- Hovland, M., Talbot, M. R., Qvale, H., Olausen, S., & Aasberg, L.** (1987). Methane-related carbonate cements in pockmarks of the North Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 57(5), 881-892.
- Hughes Clarke, J. E., Mayer, L. A., & Wells, D. E.** (1996). Shallow-water imaging çok ışınlı sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Marine Geophysical Researches*, 18, 607-629.
- Idczak, J., Brodecka-Goluch, A., Łukawska-Matuszewska, K., Graca, B., Gorska, N., Klusek, Z., ... & Bolalek, J.** (2020). A geophysical, geochemical and microbiological study of a newly discovered pockmark with active gas seepage and submarine groundwater discharge (MET1-BH, central Gulf of Gdańsk, southern Baltic Sea). *Science of The Total Environment*, 742, 140306.
- İmren, C., Le Pichon, X., Rangin, C., Şengör, A. M. C., & Siyako, M.** (2001). The North Anatolian fault within the Sea of Marmara: a new interpretation based on multi-channel seismic and gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(4), 595-616.
- Jakobsson, M., Gyllencreutz, R., Mayer, L. A., Dowdeswell, J. A., Canals, M., Todd, B. J., ... & Larter, R. D.** (2016). Mapping submarine glacial landforms using acoustic methods. *Geological Society, London, Memoirs*, 46(1), 17-40.
- Josenhans, H. W., King, L. H., and Fader, G. B. J.** (1978). A side scan sonar mosaic of pockmarks on the Scotian Shelf. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 831–40.
- Judd, A. G., Long, D. A. V. I. D., & Sankey, M.** (1994). Pockmark formation and activity, UK block 15/25, North Sea. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 41(1), 34-49.
- Kanbir, A., Ulusay, R., & Aydan, Ö.** (2006). Assessment of liquefaction and lateral spreading on the shore of Lake Sapanca during the Kocaeli (Turkey) earthquake. *Engineering geology*, 83(4), 307-331.
- Kelley, J. T., Dickson, S. M., Belknap, D. F., Barnhardt, W. A., and Henderson, M.** (1994). Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine. *Geology*, 22, 59–62.
- Ketin, İ.** (1948). Über die tektonisch-mechanischen Folgerungen aus den grossen anatolischen Erdbeben des letzten Dezenniums. *Geol. Rund.*, 36, 77–83.
- Ketin, İ.** (1969). Kuzey Anadolu Fayı Hakkında. *Bull. Miner.Res. Explor. Inst. Turk.*, 76, 1-25.

- King, L. H., & MacLEAN, B. R. I. A. N.** (1970). Pockmarks on the Scotian shelf. *Geological Society of America Bulletin*, 81(10), 3141-3148.
- Koçyiğit, A.** (1988). Tectonic setting of the Geyve Basin: Age and total displacement of the, Geyve Fault Zone. *METU J. Pure Appl. Sci.*, 21, 81–104.
- Kurt, H. & Yücesoy, E.** (2009). Submarine structures in the Gulf of İzmit, based on multichannel seismic reflection and çok ışınlı bathymetry. *Geophysical Research*, 30, 73–84.
- Kurt, H., İşseven, T., Tün, M., Demirbağ, E., Okut-Toksoy, N. G. & Gönül, E.** (2020). Sapanca Gölü ve Civarının Aktif Tektoniğinin Jeofizik Yöntemlerle Araştırılması. TÜBİTAK-1001 Araştırma Projesi, Final Raporu, Proje No: 117Y130.
- Leroy, S. A. G., Schwab M. J., & Costa, P. J. M.** (2010). Seismic influence on the last 1500-year infill history of Lake Sapanca (North Anatolian Fault, NW Turkey), *Tectonophysics*, 486, 15–27.
- Lettis, W., Bachhuber, J., Witter, R., Brankman, C., Randolph, C. E., Barka, A. A., Page, W. D. & Kaya, A.** (2002). Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: examples from the 17 August 1999 İzmit earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (1), 19–42.
- Liu, B., Chen, J. X., Haider, S. W., Deng, X. G., Yang, L., & Duan, M. L.** (2020). New high-resolution 2D seismic imaging of fluid escape structures in the Makran subduction zone, Arabian Sea. *China Geology*, 3(2), 269–282.
- Locat, J., & Sanfaçon, R.** (2000). Çok ışınlı surveys: a major tool for geosciences. In *Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference, Montréal* (pp. 1-11).
- Long, D., Lammers, S., and Linke, P.** (1998). Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea. In Henriët, J.-P. and Mienert, J. (eds.), *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Geological Society of London, Special Publication 137*, 223–37.
- Lundine, M. A., Brothers, L. L., & Trembanis, A. C.** (2023). Deep learning for pockmark detection: Implications for quantitative seafloor characterization. *Geomorphology*, 421, 108524.
- Maisey, G. H., Rokoengen, K., and Raaen, K.** (1980). Pock-marks formed by seep of petrogenic gas in the southern part of the Norwegian Trench, IKU, Trondheim Report No. P-258/1/80.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A. A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N. & Veis, G.** (2000). Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B3), 5695–5719.

- Micallef, A., Krastel, S., & Savini, A.** (Eds.). (2017). *Submarine geomorphology*. Springer.
- Neugebauer, J.** (1995). Structures and kinematics of the North Anatolian Fault zone, Adapazarı-Bolu region, northwest Turkey. *Tectonophysics*, 243(1-2), 119-134.
- Newton, R. S., Cunningham, R. C., and Schubert, C. E.** (1980). Mud volcanoes and pockmarks: seafloor engineering hazards or geological curiosities? *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, TX, OTC Paper 3729.
- Okay, S., & Aydemir, S.** (2016). Control of active faults and sea level changes on the distribution of shallow gas accumulations and gas-related seismic structures along the central branch of the North Anatolian Fault, southern Marmara shelf, Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(4), 328-346.
- Okyar M., Pınar A., Tezcan D., & Kamacı Z.** (2008). Late quaternary seismic stratigraphy and active faults of the Gulf of İzmit (NE Marmara Sea) *Marine Geophysical Researches* 29(2), 321:189–218.
- Oldenburg, G.** (1987, September). Honeywill-Elac Bottom Chart. In *OCEANS'87* (pp. 1190-1196). IEEE.
- Papatheodorou, G., Hasiotis, T., and Ferentinos, G.** (1993). Gas-charged sediments in the Aegean and Ionian seas, Greece. *Marine Geology*, 112, 171–84.
- Papatheodorou, G., Lavrentaki, M., Mourelatos, P., Voutsinas, K., and Xenos, K.** (2001). Pockmarks on the seabed of the Aetoliko Lagoon, Greece. *Alieftika Nea (Fishing News)*, No. 238, April, 73–87. (In Greek.)
- Pickrill, R. A.** (1993). Shallow seismic stratigraphy and pockmarks of a hydrothermally influenced lake, Lake Rotoiti, New Zealand. *Sedimentology*, 40(5), 813-828.
- Pohner, F.** (1986). Çok ışınlı echo sounder is low cost seafloor mapper. *Sea Technology*, 27(10), 29-32.
- Polonia A., Gasperini L., Amorosi A., Bonatti E., Bortoluzzi G., Çağatay N., Capotondi L., Cormier M. H., Görür N., McHugh C. & Seeber L.** (2004). Holocene slip rate of the North Anatolian Fault beneath the Sea of Marmara. *Earth Planet Sc Lett* 227, 411-426.
- Rathje, E. M., Karatas, I., Wright, S. G., & Bachhuber, J.** (2004). Coastal failures during the 1999 Kocaeli earthquake in Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(9-10), 699-712.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, R., Özener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. & Karam, G.** (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa– Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05411.

- Rise, L., Sættem, J., Fanavoll, S., et al.** (1999). Seabed pockmarks related to fluid migration from Mesozoic bedrock strata in the Skagerrak offshore Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 16, 619–31.
- Sarıtaş, H., Çifçi, G., Géli, L., Thomas, Y., Marsset, B., Henry, P., ... & Rochat, A.** (2018). Gas occurrence and shallow conduit systems in the Western Sea of Marmara: a review and new acoustic evidence. *Geo-Marine Letters*, 38, 385-402.
- Scanlon, K. and Knebel, H. J.** (1989). Pockmarks in the floor of Penobscot Bay, Maine. *Geo-Marine Letters*, 9, 53–8.
- Schwab, M. J., Werner, P., Dulski, P., McGee, E., Nowaczyk, N. R., Bertrand, S., & Leroy, S. A.** (2009). Palaeolimnology of Lake Sapanca and identification of historic earthquake signals, northern Anatolian fault zone (Turkey). *Quaternary Science Reviews*, 28(11-12), 991-1005.
- Seyitoğlu, G., Kaypak, B., Aktuğ, B., Gürbüz, E., Korhan, E. S. A. T., & Gürbüz, A.** (2016). A hypothesis for the alternative southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Northwest Turkey. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59(2), 115-130.
- Sichenberg, O., Becker-Platen, D. J., Benda, L., Berg, D. I., Engesser, B., Gaziry, W., ... & Tobein, H.** (1975). Die Gliederung des Höheren Jungtertiärs und Altquartars in der Türkei nach Vertebraten und ihre Bedeutung für die Übernationale Neogen-Stratigraphie. *Geologisches Jahrbuch Reihe B*, 15, 167.
- Simrad, S. E.** (1992). 1000 Hydrographic echo sounder. *Product Description: Simrad Subsea AB, Horten, Norway*.
- Solheim, A., & Elverhøi, A.** (1993). A pockmark" eld in the central Barents Sea. *Geo-Marine Letters*, 13, 235-243.
- Soter, S.** (1999). Macroscopic seismic precursors and submarine pockmarks in the Corinth–Patras Rift, Greece. *Tectonophysics*, 308, 275–90.
- Şengör A. M. C. & Yılmaz, Y.** (1981). Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181–241.
- Şengör A. M. C.** (1979). The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance. *Journal of Geological Society of London* 136, 269-282.
- Şengör A. M. C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., LePichon, X. & Rangin, C.** (2005). The North Anatolian Fault: a new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 37–112
- Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y., & Ketin, İ.** (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
- Tarı, U., Tüysüz, O.** (2015). The effects of the North Anatolian Fault on the geomorphology in Eastern Marmara Region, Northwest Turkey. *Geodinamica Acta*.
- Taylor, D. I.** (1992). Nearshore shallow gas around the UK coast. *Continental Shelf Research*, 12, 1135–44.

**Taymaz, T., & Yılmaz, Y.** (2009). The North Anatolian fault: a new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 145-176.

**White, D. J.** (1971, April). BO'SUN, A Multi-Beam Sonar for Search and Survey. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.



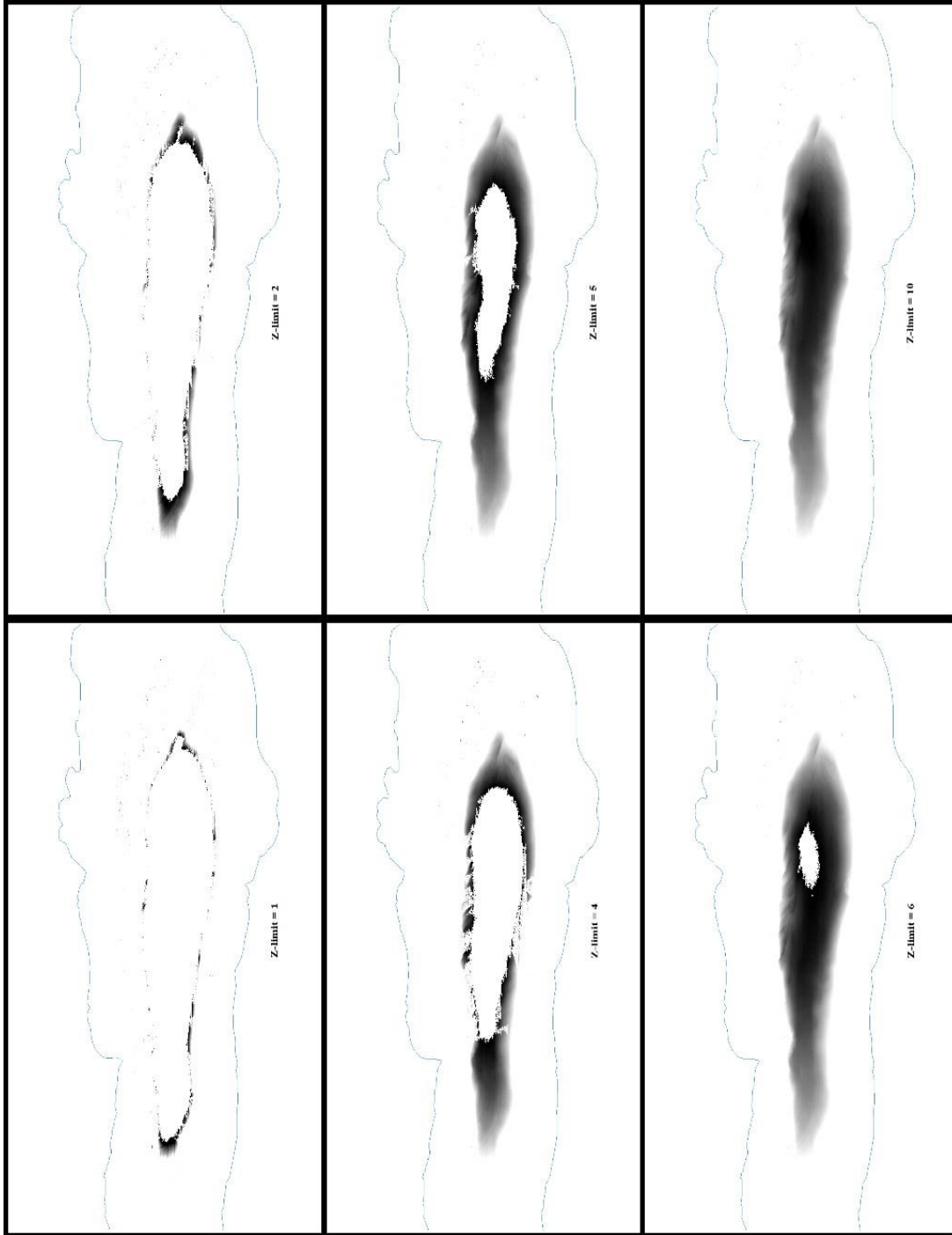


## **EKLER**

**EK A:** Farklı z-limit değerlerine göre “Minus” modülü görünümü



**EK A:**



**Şekil A.1** : Pockmark yapılarının tanımlanmasında kullanılan Minus aracının farklı “Z-limit” değerleri için görünümü (Göl sınırı mavi renkle çizilmiştir).

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Enes Sönmez

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü