



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Tuna Deltası (Romanya ve Bulgaristan Açık Denizi) Kıtasal Yamacı'ndaki gaz ve gaz hidratların sismik yansıma verileri ile incelenmesi

Investigation of gas and gas hydrate accumulations along the continental margin of the Danube Delta (Romania and Bulgaria offshore) using seismic reflection data

Orhan ATGIN^{a*} ve Günay ÇİFCİ^{a,b}

^a Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İzmir, Türkiye

^b Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Tuna Kanal-Set Sistemi,
Çoklu BSR, MTD,
Jeotermal Gradyan.

ÖZ

Tuna Kanalı'nın kıtasal yamaç boyunca uzanan kısmında alanın morfolojisini, gaz hidrat potansiyelini ve stratigrafik birimlerin gaz hidratlarla olan ilişkisini araştırmak amacı ile 2012 yılında çok ışınlı batimetri ve yaklaşık 2300 km yüksek çözünürlüklü 2 boyutlu sismik yansıma verileri toplanmıştır. Sismik verilerde 3 ayrı alanda, gaz hidrat birikimlerinin tabanını ifade eden "Tabana Benzeyen Yansıtıcılar (Bottom Simulating Reflector, BSR)" gözlenmiştir. Tüm BSR alanlarındaki yansıma türleri tabakaları kesen ve devamlı şekilde yansıma özelliği gösteren Tip-1 olarak sınıflandırılan yansımalarından oluşmaktadır. Alanda ayrıca üst üste yığılmış şekilde 5 ayrı BSR seviyesi gözlenmiştir. Çoklu BSR'lerin olası oluşum sebebi, çalışma alanındaki sedimentasyon hızının gaz hidratın çözünme hızından yüksek olmasıdır. Alanda gaz hidrat duraylılık zonu içerisinde 6 adet kütle kayması (mass transport deposits, MTD) yapısı bulunmaktadır ve bu kayma yapılarının aşırı konsolide olması nedeni ile içlerinde BSR gözlenmediği, dolayısıyla gaz hidrat içermediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bir MTD üzerinde yapılan ısı akısı ölçümlerinden elde edilen jeotermal gradyanın diğer alanlardan daha yüksek çıkması, MTD'lerin ısı iletim katsayısının yüksek olduğunu göstermektedir. Bu bölgedeki BSR'nin olması gereken seviyeden daha derinlerde gözlenmesinin sebebi ise kolay iletilen ısının olması gerekenden daha az sıcak olan ortamda, BSR'nin dengeye ulaşacağı seviyeyi olması gerekenden daha derinde oluşturmasıdır.

Geliş Tarihi: 01.11.2023

Kabul Tarihi: 28.12.2023

Keywords:

Danube Channel-Levee
System, Multiple BSR,
MTD, Geothermal
Gradient.

ABSTRACT

In 2012, a comprehensive study of the Danube River's submarine channels continental slope was conducted, employing multi-beam bathymetry and over 2300 km of high-resolution two-dimensional seismic reflection data. The investigation aimed to delve into the area's morphology, potential for gas hydrate presence, and the correlation between stratigraphic units and gas hydrates. Three distinct zones, revealed Bottom Simulating Reflectors (BSRs) indicating the base of gas hydrate accumulations in the seismic data. These BSR areas exhibited Type-1 reflections, characterized by continuous cuts across layers. Notably, five discrete levels of BSRs were detected, suggesting a consistent gas composition across them. The multiple BSR formations are attributed to higher sedimentation rates relative to gas hydrate dissolution rates. Mass transport deposits (MTDs) within the gas hydrate stability zone (6 in total) were identified; their highly consolidated nature could

*Başvurulacak yazar: Orhan ATGIN, orhan.atgin@deu.edu.tr

account for the absence of gas hydrates within them. Additionally, one MTD displayed elevated heat flow measurements, indicating a higher geothermal gradient, likely due to its relatively high thermal conductivity. This disparity in thermal properties explains the deeper-than-expected BSR in this specific region, as it forms at a lower temperature equilibrium level due to efficient heat conduction.

1. Giriş

Gaz hidratlar, yüksek basınç ve düşük sıcaklık koşulları altında, su molekülleri içerisinde hapsedilmiş gaz moleküllerinden oluşan kristal yapıli bileşiklerdir. Gaz hidratın oluşum sürecini ve duraylılık koşullarını kontrol eden parametreler hidratın yapısı, basınç, sıcaklık, gaz bileşenleri ve iyonik kuvvetlerdir (Sloan ve Koh, 2007; Thakur ve Rajput, 2010). Permafrost bölgelerde ya da kıta kenarları boyunca okyanusal sedimanlarda görülürler. Gaz hidratların oluşumu için ortamda yüksek miktarda metan gazı üretiminin olması ve uygun termobarik koşulların sağlanması gerekmektedir. Gaz hidratların duraylılığı basınç değişiklikleri tarafından yönetilir; basınçtaki bir azalma ya da sıcaklıktaki bir artış, hidrat yapısının su ve metan gazına ayrışmasına neden olur (Lerche ve Bagirov, 1998). Gaz hidrat tabakasının oluşabileceği en büyük derinlik jeotermal gradyanla ilişkilidir ve artan sıcaklık ile sınırlıdır (Kvenvolden, 1995).

Gaz hidratlara olan ilgi genel olarak üç nedenden kaynaklanmaktadır: 1) Deniz tabanında gaz hidratlarda tutulan metan gazının atmosfere salınımının sera etkisine olan katkısının çevresel sonuçları, 2) deniz tabanının stabilitesine olan etkisi nedeni ile gaz hidratların bir yer tehlikesi (geohazard) olma potansiyeli, 3) içerdikleri büyük orandaki metan nedeni ile gaz hidratların enerji kaynağı olma potansiyeli (Holbrook vd., 1996; Çifci, 2020). 1 m³ hidrat içerisinde standart sıcaklık ve basınç koşullarında 163 m³ serbest gaz bulunmaktadır (Lee vd., 2011).

Gaz hidratlar sismik kesitlerde tabana benzeyen yansıtıcı (bottom simulating reflection-BSR) adı verilen özel yansımalar oluştururlar ve bu sayede sismik kesitlerde belirlenerek haritalanabilirler. BSR'ler, üzerinde bulunan yüksek hıza sahip gaz hidrat içeren sedimanlar ve altında bulunan düşük hıza sahip gaz içeren sedimanlar arasındaki negatif empedanstan kaynaklanan belirgin yansımalar

(Hyndman ve Davis, 1992). BSR'ler eşit sıcaklıktaki seviyeleri takip eden yansımalar ve bu nedenle deniz tabanını taklit ederler. Deniz tabanını taklit ettikleri için stratigrafik birimlerin eğimlerine bağlı kalmaksızın oluşurlar ve stratigrafik yansımaları kesebilirler. BSR'ler sismik kesitlerde deniz tabanına göre ters polaritelidir ve genlikleri genellikle çevre yansımaların genliklerinden daha yüksektir. Gaz hidratlı bölgenin altındaki gözenek hacminde bulunan sadece yüzde birkaç oranındaki serbest gaz konsantrasyonları bile BSR oluşması için yeterlidir (Andreassen vd., 2007; Haacke vd., 2007).

Dünya genelinde gaz hidrat varlığının en önemli belirteçlerinden biri olan BSR'lerin gözlemlendiği birçok gaz hidrat araştırması mevcuttur. Bu alanların bazıları Japonya'daki Nankai Çukuru (Ashi vd., 2002; Baba ve Yamada, 2004), Amerika'nın doğusundaki Hidrat Sırtı (Tréhu vd., 2004; Bangs vd., 2011), Kore'nin doğusunda yer alan Ulleung Baseni (Horozal vd., 2009; Riedel vd., 2012; Yoo vd., 2013) ve Meksika Körfezi (Milkov ve Sassen, 2000; Cook vd., 2014) olarak gösterilebilir. Bu çalışmaların yanı sıra dünyada özellikle kıtasal sınırlarda birçok gaz hidrat araştırması gerçekleştirilmiştir ve hala çalışılmaya devam etmektedir. Çalışma alanının içerisinde bulunduğu Karadeniz'de de gaz hidratın varlığını ortaya koyan birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Derin basende ve Kırım'ın güneyindeki bazı çamur volkanlarından alınan örneklerde gaz hidratın varlığı ortaya konulmuştur (Ivanov vd., 1996; Woodside vd., 1997). Pape vd. (2011), Hopa açıklarında sismik veriler üzerinde gözlenen BSR'li bölgelerden gaz hidrat örneklerini analiz etmiştir. Karadeniz Türkiye batı marjiniinde Sakarya ve Cide arasında geniş çaplı gaz hidrat rezervlerinin varlığı sismik çalışmalar ile ortaya konmuştur (Dondurur, 2021). Karadeniz'in doğu marjiniinde ise Trabzon açıklarında sırt yapılarında çok kanallı sismik yansıma verilerinde BSR yansımaları yorumlanmıştır (Minshull vd., 2020).

Bazen sismik kesitlerde üst üste yığılmış şekilde birden fazla BSR gözlemlenir. Nadiren karşılaşılan bu tür çoklu BSR'ler, Norveç marjini (Posewang ve Mienert, 1999; Andreassen vd., 2000), Nankai çukurunda (Foucher vd., 2002; Baba ve Yamada, 2004), Cascadia kıtasal marjini (Trehu vd., 2004; Bangs, 2005), Türkiye batı marjini (Zonguldak ve Amasra açıklarında (Küçük, 2016) ve dünyadaki en çarpıcı örneklerden biri olup çalışma alanını da içerisinde bulunduran Tuna Fan Deltası'nda (Popescu vd., 2006) gözlenmiştir.

Çoklu BSR'lerde en üstteki BSR genellikle mevcut gaz hidrat duraylılık zonu temelini (GHDZT, base of gas hydrate stability zone) temsil edecek şekilde yorumlanırken daha derindeki BSR'lerin kökeni tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Sismik kesitlerde çoklu BSR'lerin varlığını ilk kez Popoescu vd. (2006) ortaya koymuştur. 2013 yılında Alman GEOMAR enstitüsünün yürüttüğü ve bu çalışmadaki verilerin de temelini oluşturan SUGAR projesi de bu alandaki önemli çalışmalardan biridir. CO₂ enjeksiyon yöntemi ile gaz hidrattan doğal gaz üretim yöntemini geliştirmek amacıyla planlanan projedeki veriler ile Zander vd. (2017), Hillman vd. (2018) ve Pape vd. (2020), gaz hidratların araştırılmasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmada Tuna derin deniz yelpazesini oluşturan kanal-set sistemindeki BSR'lerin karakterleri ve dağılımını araştırmak amacı ile yüksek çözünürlüklü 2 boyutlu çok kanallı sismik yansıma verileri kullanılmıştır. Çalışma alanındaki çoklu BSR'lerin karakteristik özellikleri, BSR'lerin sismik fasiyesler ve MTD yapıları ile ilişkileri ve çoklu BSR'lerin oluşum mekanizması bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

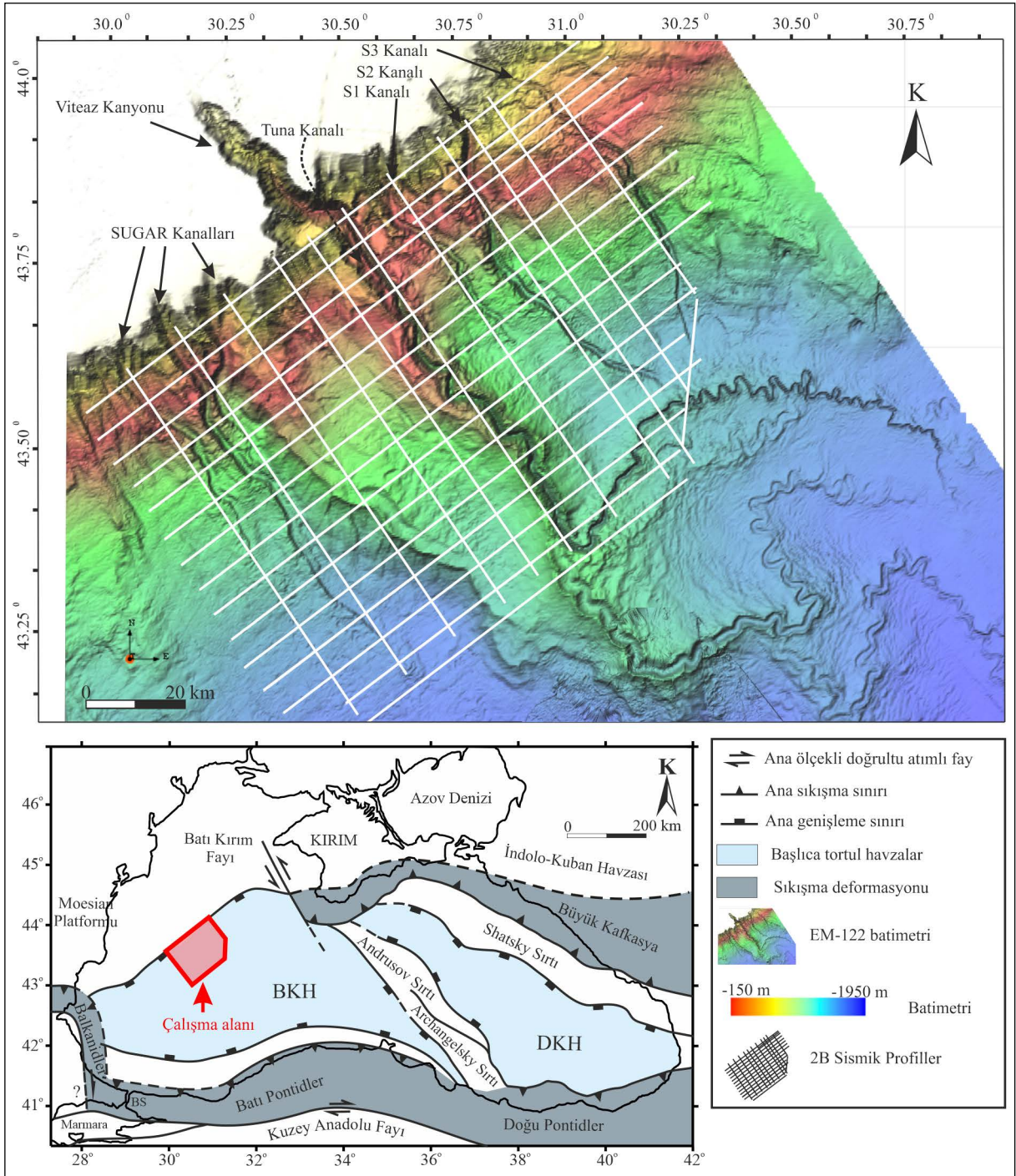
1.1. Bölgesel Jeoloji

Karadeniz, en derin noktasının 2200 m olduğu, Çanakkale ve İstanbul boğazları ile Akdeniz'e bağlanan dünyanın en büyük kıtalar arası havzalarından biri olan iç denizdir (Şekil 1). Karadeniz'in oluşumunun açılma tektoniği ile ifade edilmesine rağmen bu durum Eosen döneminde son bulmuştur ve Karadeniz'in hemen tüm sınırları günümüzde sıkışma deformasyonu ile nitelendirilmektedir (Robinson vd., 1996).

Günümüzde Karadeniz batimetrik olarak tek bir havza olarak görülse de sismik veriler bu havzanın iki ayrı alt havzadan oluştuğunu ortaya koymaktadır ve bu havzalar Doğu Karadeniz Havzası (DKH) ile Batı Karadeniz Havzası'dır (BKH; Tugolesov vd., 1985; Finetti vd., 1988; Belousov ve Volvovsky, 1989; Starostenko vd., 2004). Bu havzalar, Andrusov ve Arkhangelsky Sırtları ile birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 1). Karadeniz Havzası'nda bulunan en büyük şelf alanı ise batıda bulunan Odessa Şelfi'dir (Nikishin vd., 2015).

Çalışma alanı, Karadeniz'in KB marjini Tuna Nehri'nin denize döküldüğü bölgede yer almaktadır (Şekil 1). Bu bölgede yer alan Tuna ve Dinyeper nehirlerinin derin deniz yelpazeleri, Karadeniz'in kuzeybatısında yer alır ve bunların yaklaşık 900 ka önce gelişmeye başladığı öne sürülmektedir (Winguth vd., 2000). Bu yelpazeler son buzul dönem sırasında Tuna, Dinyeper, Dniestr ve Bug nehirlerinin tortullarını bölgeye boşaltması sonucu oluşmuştur (Winguth vd., 2000; Popescu vd., 2001). Tuna Fanı kıyı şeridinden geniş bir şelf ile ayrılan (yaklaşık 120 km) ince taneli bir türbidit sistemidir (Popescu vd., 2001). Tuna derin deniz yelpazesi, şelf kırığında 100 m su derinliğinden abisal düzlükte 2200 m su derinliğine kadar eğimli bölgede gelişmiştir (Wong vd., 1997). Tuna yelpazesinin en son aktif kanalı şelf kırığında Viteaz Kanyonu ile birlikte Tuna Nehri'ne bağlanan Tuna Kanalı'dır (Şekil 1) (Popescu vd., 2001). Aşındırıcı olan Viteaz Kanyonu yaklaşık 800 m su derinliğinde bir kanal-set sisteminde sona ermektedir (Lericolais vd., 2013). Tuna Kanalı, yaklaşık 25 ka önce son buzul dönemde deniz seviyesinin bugünkünden yaklaşık 120 m daha düşük olduğu dönemde gelişmiştir (Winguth vd., 2000).

Tuna yelpazesindeki gaz hidrat oluşumu, sığ denizaltı tortullarında ilk hidrat keşiflerinden beri bilinmektedir (Yefremova ve Zhizhenko, 1974; Ginsburg, 1998). Daha yakın zamanlarda, derin tortullarda gaz hidratın varlığı yelpazenin güneyindeki BSR gözlemlerinden çıkarılmıştır (du Fornel, 1999). Bölgedeki gaz çıkışları, esas olarak %99,1-99,9 konsantrasyonları ile biyojenik kaynaklı metandan oluşmaktadır (Poort vd., 2005; Römer vd., 2012; Bialas vd., 2014).



Şekil 1- Karadeniz ve çevresinin ana tektonik unsurları ve sismik hatların batimetri üzerindeki görünümü (Finetti vd., 1988; Robinson vd., 1996; Kazmin vd., 2000'den değiştirilmiştir). BKH, Batı Karadeniz Havzası; DKH, Doğu Karadeniz Havzası.

1.2. Veri ve Yöntem

Çalışma kapsamında, GEOMAR'ın yürüttüğü SUGAR (Submarine Gas Hydrate Reservoirs) projesinin ortak işbirliğinin bir parçası olarak Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi

Enstitüsü'ne ait olan sismik ekipmanlar ile R/V Maria S. Merian araştırma gemisiyle Aralık 2013 döneminde yaklaşık 2300 km çok kanallı yüksek ayrımlı sismik yansıma verisi toplanmıştır. Çok kanallı sismik verilere ait hatlar Şekil 1'de gösterilmiştir. 6.25 grup aralığı ile toplamda 196 kanala sahip 1050 metre uzunluğundaki

sismik altı kablo 4 metre derinlikten çekilmiştir. Sismik kaynak olarak 3 metre derinlikten çekilen ve 45+105 inç³ hacme sahip olan GI-gun ile 12,5 m ve 18,75 m atış aralıkları ile atışlar gerçekleştirilmiştir. Sismik kayıt ise 1 ms örnekleme aralığı ile 5000 ms kayıt uzunluğuna sahiptir.

Çok kanallı sismik veriler geleneksel veri işlem adımlarına tabi tutulmuştur ve bunları sırası ile veri yükleme, geometri tanımlama, bant geçişli süzgeç (8-220 Hz), iz ayıklama, f-k eğim süzgeci, tekrarlı yansımaların bastırılması (SRME), CDP gruplarını oluşturma, hız analizi, yığma öncesi zaman migrasyonu ve genlik düzeltmeleridir. Stratigrafik yorumlamalar için otomatik kazanç kontrolü (AGC) kullanılırken BSR yorumlamaları için verilere gerçek genlik kazanımı (TAR) uygulanmıştır. BSR seviyeleri üzerinde yapılan denge eğrilerinin hesaplandığı sismik kesitler yığma öncesi derinlik migrasyonuna tabi tutulmuştur. Karmaşık sismik nitelik analizi için final kesitlerden zarf kesitleri elde edilmiştir.

Çok ışınlı batimetri verisi için gemi gövdesine monte edilmiş olan EM122 çok ışınlı batimetri (Kongsberg) cihazı tüm sismik hatlarla eş zamanlı olarak veri toplamıştır ve bu verilerden 25m x 25m çözünürlükte batimetri haritası elde edilmiştir. EM122 sistemi 12 kHz frekansında, 432 ışınlı veri toplayan bir batimetri sistemidir.

BSR gözlenen alanlarda, yerinde sediman sıcaklığını ve termal iletkenliğe dair bilgiyi elde etmek için ısı akısı probu kullanılmıştır. Probon aktif uzunluğu 22 eşit aralıklı sıcaklık sensörleri ile birlikte 5.67 m'dir. Her sensör sıcaklığı 1 mK'dan daha düşük bir çözünürlükte ölçer ve bu sensörler 2 mK'dan daha iyi bir doğrulukla kalibre edilir.

2. Ana Metin

Çalışma alanı Tuna Deltası kanal-set sistemini içerisinde barındırmaktadır. Kanal-set sistemlerinin oluşturduğu seviyeler içerisinde 3 farklı alanda BSR'ler gözlenmiştir ve bu BSR alanlarından bazılarındaki yansımalar çoklu BSR'ler olarak gözlenmektedir. Akustik verilerin penetrasyonunun tamamını oluşturan Plio-Kuvaterner yaşlı birimler birçok jeolojik unsuru bünyesinde bulundurmaktadır. Alan içerisinde geçmişi dönemlere ait birden fazla

paleo-kanal-set sistemleri ve kütle kayması birikimleri (mass transport deposits, MTD) görülmektedir. Ayrıca, çalışma alanının bazı bölümlerinde sismik sinyallerin yapısını bozan ve o bölgedeki tabakalarının devamlılığının gözlenebilmesini engelleyen akustik maskeleye (akustik türbidite) alanları mevcuttur. Bu bölümde, bahsi geçen tüm bu unsurlar ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.1. Çalışma Alanının Morfolojik Özellikleri

Romanya ekonomik zonunda yaklaşık 160 kilometrelik genişliği ve 10 derece eğimi olan kıtasal şelf, şelf kırığına kadar uzanan ve genişliği 6 km, uzunluğu 30 km ve derinliği 900 m olan Viteaz Kanyonu ile birlikte kıtasal yamaca ulaşır. Bu bölgedeki şelf kırığı yaklaşık 120 metre derinlikte oluşmuştur. Karadeniz'in diğer yamaçları ile kıyaslandığında kıtasal yamaç bu bölgede oldukça uzundur ve eğimi yaklaşık 5 derecedir. Yaklaşık 200 ve 500 metre konturları arasında kalan derinlik ise yamacın geri kalanına oranla daha diktir ve 10 derecelik bir eğime sahiptir. Çalışma alanındaki en temel yapısal ve morfolojik unsur Viteaz Kanyonu ve bu kanyona bağlı gelişerek yamaç boyunca gözlemlenen Tuna Kanalı'dır. Kıtasal yamaçta geniş bir talvege sahip olan ve doğrusala yakın ilerleyen Tuna Kanalı, abisal düzlüğe yaklaştıkça sinüsitesi artan dar bir kanal formuna ulaşır. Tuna Kanalı'nın yanı sıra çalışma alanında birçok kanal sistemi bulunmaktadır. 3 tanesi Tuna Kanalı'nın batısında 3 tanesi de doğusunda yer alan bu kanallardan hiçbiri Tuna Kanalı ölçeğinde değildir. Tuna Kanalı'nın batısında şelf kırığından bir kanyon sistemi ile başlayıp kıtasal yamacın içerisinde son bulan yan yana 3 adet kanal bulunmaktadır ve bu kanallar Zander vd. (2017)'de "Sugar Kanalları" olarak isimlendirilmiştir. Tuna Kanalı'nın doğusunda ise yine şelf kırığından bir kanyon sistemi ile başlayıp kıtasal yamaç içerisinde son bulan Hillman vd. (2018)'de "S1, S2 ve S3" olarak adlandırılan 3 adet kanal sistemi bulunmaktadır (Şekil 1).

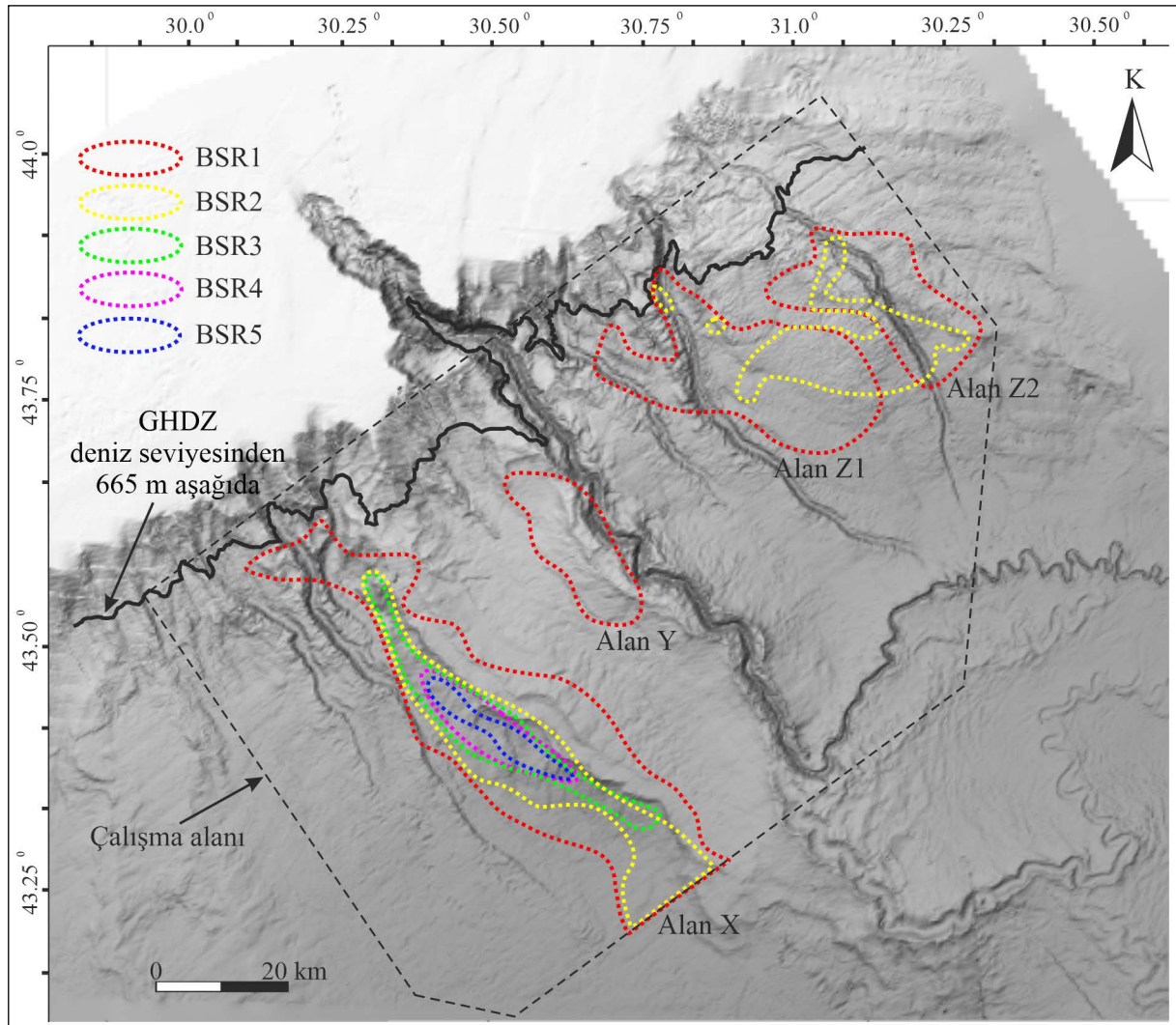
Tüm Karadeniz'i kapsayan çalışmalardan biri olan Nikishin vd. (2015)'deki sismik hatlarda, Tuna denizaltı fanlarının olduğu bölgedeki fan sistemlerinin maksimum derinliği geliş-gidiş zamanı cinsinden 4s olarak görülmektedir. Çalışmada kullanılan sismik yansıma kesitlerinin kayıt uzunluğunun geliş-gidiş

zamanı cinsinden 5s olması, alan içerisinde kalan kanal-set sistemlerinin oluşturduğu tüm seviyeleri gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Çalışma alanı içerisinde gömülü kalan kanal-set yapılarının oluşturduğu birimleri ve paleo-kanalları, güncel Tuna Kanalı'nın oluşturduğu kanal-set yapısına bağlı gelişen birimleri sismik kesitlerde görmek mümkündür. Hem güncel kanalın oluşturduğu geometri ve setler hem de paleo-kanallara ait geometriler ve setler güneybatı kuzeydoğu doğrultusu boyunca yamaç aşağı olacak şekilde gelişmişlerdir.

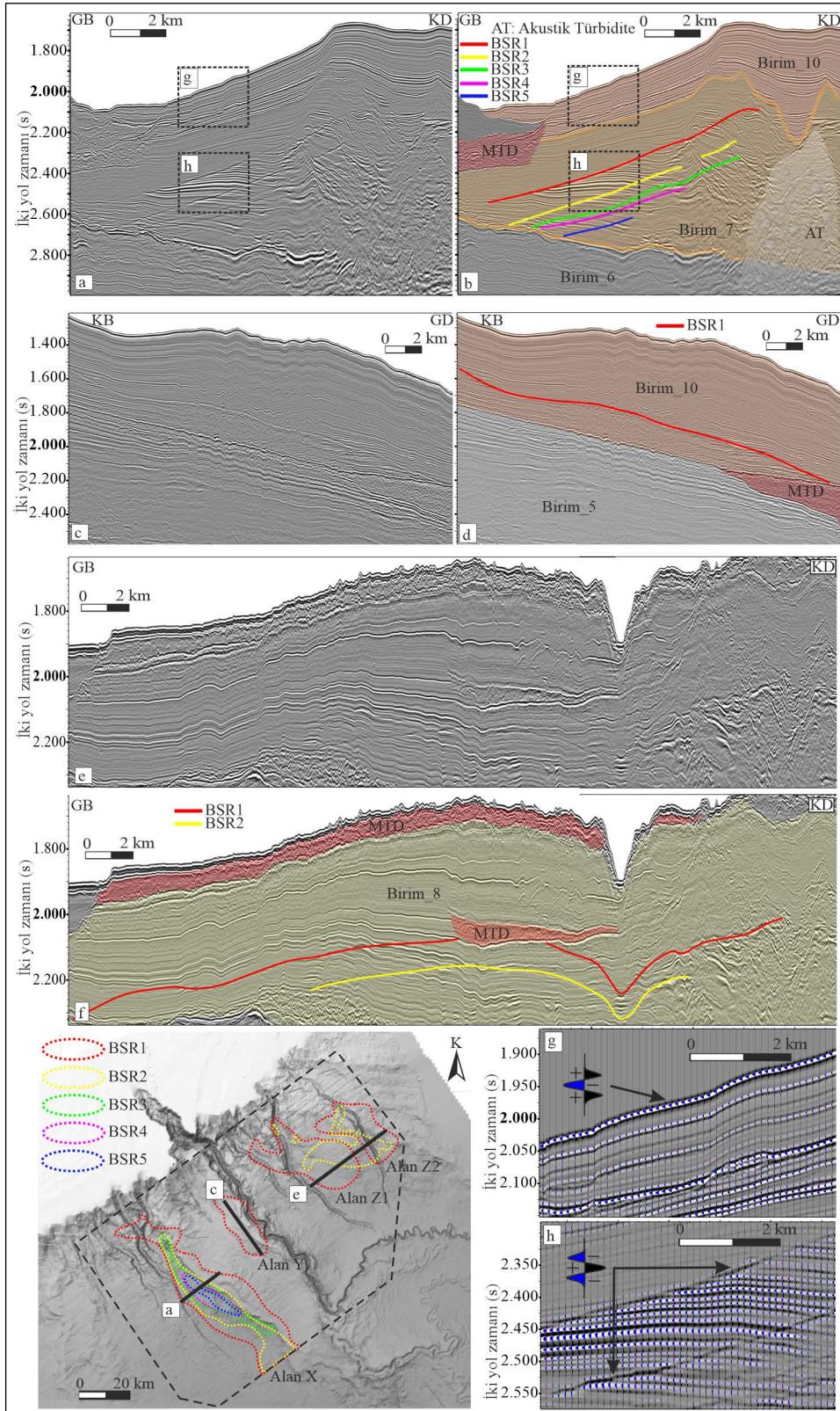
2.2. BSR'lerin Dağılımı ve Karakteristik Özellikleri

Alandaki BSR'lerin gözlenebildiği derinlikler 665 metreden başlamaktadır ve çalışma alanının en derin

yeri olan 1890 metrede son bulmaktadır (Şekil 2). Bu derinlikler içerisinde farklı derinliklerde başlayıp son bulan BSR alanları da gözlenmiştir ve bu bölgelere ait derinlik bilgileri Çizelge 1'de verilmiştir. Hyndman ve Davis (1992)'in tanımladığı gibi tabakaları kesen ve sürekli bir yansıma şeklinde görülen Tip-1 türü yansımalar olarak bilinen BSR türü çalışma alanının tamamındaki BSR'leri oluşturmaktadır. Alandaki çoklu ve tek yansıma şeklinde bulunan BSR'lerin tamamı Tip-1 türü BSR'lerdir ve altlarında serbest gazın neden olduğu akustik turbidite alanları oluşmamıştır. Ayrıca Tip-1 türü olarak ifade edilen BSR'lere ait bu yansıma türlerinin tamamı deniz tabanına göre ters polariteli yansıma karakteri göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 2- Çalışma alanındaki BSR'lerin dağılım haritası. Alandaki BSR'ler "X", "Y" ve "Z" alanı olarak adlandırılan 3 ayrı alanda gruplandırılmıştır.



Şekil 3- Çalışma alanındaki BSR'lere sismik kesitlerden örnekler, (a) "X" BSR alanından örnek sismik kesit ve (b) bu kesitin yorumlu hali, (c) "Y" BSR alanından örnek sismik kesit ve (d) bu kesitin yorumlu hali, (e) "Z" BSR alanından örnek sismik kesit ve (f) bu kesitin yorumlu hali. (g) "X" BSR alanındaki deniz tabanı yansımalarının ve (h) aynı alandaki BSR1 ve BSR2'nin polaritelerinin görünümü. BSR'lerin polariteleri deniz tabanı yansımalarına göre terstir. MTD, kütle kaymasını göstermektedir.

Çalışma alanı içerisinde farklı alanlarda BSR'ler gözlenmiştir ve bu alanlar "X, Y ve Z" alanları olmak üzere üçe ayrılmıştır (Şekil 2). Alanın en batısında bulunan "X" BSR alanında, en üstte bulunan ve yüz ölçümü olarak en geniş alana yayılan BSR, "BSR1" olarak adlandırılmıştır ve en üstteki BSR'yi ifade etmektedir. BSR1 olarak adlandırılan ve yüz ölçümü olarak en büyük BSR alanı olan bu alan 825 km²'dir. Ayrıca "X" BSR alanı, 665 metre olan en gaz hidrat duraylılık zonunun en sığ bölgesinden başlayıp alandaki en derin bölge olan 1890 metreye kadar ulaşmaktadır. Daha sonra alansal olarak bunu 714 km² olan "Z" alanı izler ve 172 km² olan "Y" alanı ise BSR alanları arasında yüz ölçümü olarak en küçük alandır (Çizelge 1). BSR alanlarından en dikkat çekici olan alan, 5 katmandan oluşan çoklu BSR'leri içeren "X" alanıdır (Şekil 3a ve b). Çoklu BSR'ler akustik verilerde sığdan derine doğru numaralandırıldığında en derindeki yansıma ise "BSR5" olarak adlandırılmıştır. Çoklu BSR'lerin dağılımları haritalandığında yalnızca "X" alanında bulunan 5 katlı BSR'lerin dıştan içe doğru alansal olarak küçüldüğü görülmektedir. "X" alanı içerisindeki BSR'ler akustik verilerde sığdan derine gittikçe yüz ölçümü olarak da küçülmektedirler ve BSR1 yansıması en geniş alana yayılırken, "BSR5" alansal olarak en küçük dağılıma sahip BSR'yi ifade etmektedir (Şekil 2).

"Y" alanı yüzölçümü olarak alandaki en küçük BSR alanıdır. Tüm alan boyunca akustik verilerde yalnızca "BSR1" yansıması görülmüştür ve bölgede çoklu BSR gözlenmemiştir (Şekil 3c ve d).

"Z" alanı içerisinde çoklu BSR'lerden yalnızca "BSR2" gözlenmiştir. Diğer iki alanın dağılımı yamaç boyunca kuzeybatı-güneydoğu yönelimli olmasına rağmen "Z" alanı diğerlerine oranla daha düzensiz bir şekilde dağılım gösterir. Ayrıca "Z" alanını güneybatı-kuzeydoğu şeklinde ortadan ikiye bölen MTD yapısı nedeni ile alan ikiye ayrılmıştır (Şekil 2e, f ve 5b). Bu yüzden batıda kalan alan "Z1" doğuda kalan ise "Z2" olarak adlandırılmıştır. "X" alanı içerisinde kalan diğer çoklu BSR'ler, "BSR1" ile uyumlu olacak şekilde dağılım gösterse de "Z" alanı içerisinde kalan ve tek çoklu BSR olan "BSR2", birinci BSR ile tamamen farklı dağılıma sahiptir (Şekil 2). Birincil ve çoklu olan BSR'lerin tamamına ait yüzölçümü ve

deniz tabanına göre derinliğine dair bilgiler Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1- Çalışma alanındaki tüm BSR'lerin yüzölçümleri (km²) ve değişikleri derinlik aralıkları (m).

Alan	Yüzölçümü (km ²)	Derinlik aralığı (m)
X_BSR1	825	665-1890
X_BSR2	359	1150-1890
X_BSR3	180	1150-1807
X_BSR4	111	1370-1700
X_BSR5	60	1310-1680
Y_BSR1	172	856-1275
Z1_BSR1	444	665-1518
Z1_BSR2	105	665-1285
Z2_BSR1	266	840-1580
Z2_BSR2	88	886-1340

Çoklu BSR'lerin varlığı Popescu vd. (2006)'nde tanımlandığı üzere 10 yıldan fazla süredir 3 farklı sismik kayıt sistemi ile görüntülenmiştir. Bu gözlemler, bölgedeki 5 adet BSR yansımasının yapay yansımalar, hatalı veya kayıt sisteminden kaynaklanan sorunlardan oluşan ve gerçek olmayan görüntüler olmadığını işaret etmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan veri setinde gözlenen BSR'ler, bölgede yapılan önceki çalışmalarda gözlenen çoklu BSR'ler ile uyumludur.

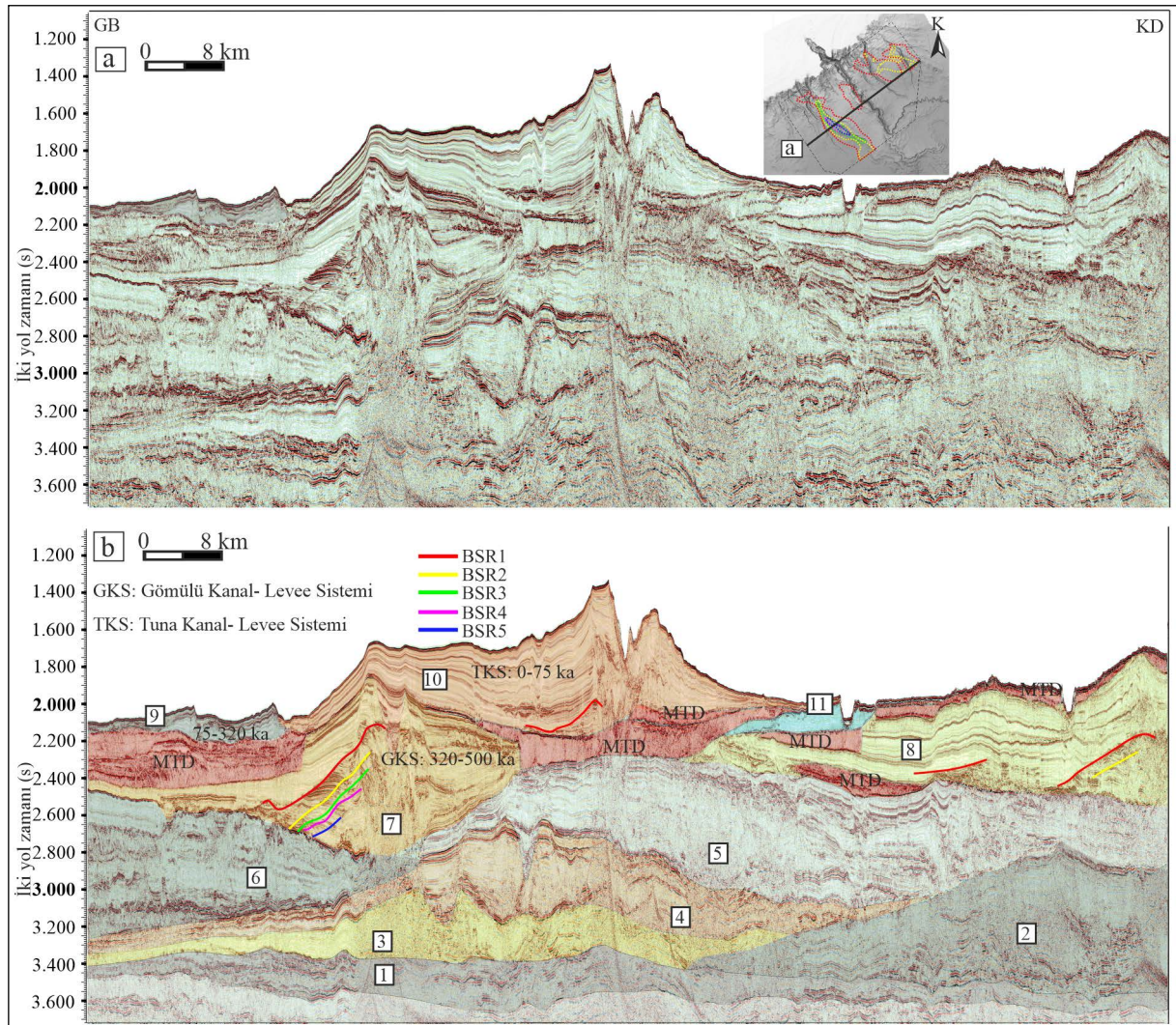
2.3. BSR ile İlişkili Sismik Fasiyesler

Çalışma alanı, Tuna Nehri'nin taşıdığı ve Viteaz Kanalı ile kıtasal yamaç üzerinden derin denize taşınan sedimentlerin, yine aynı kanal tarafından oluşturulan kanal-set fasiyeslerinden meydana gelmektedir. Şekil 4'te verilen ve Tuna Kanalı'nı dikine kesen sismik hatta, kanal-set sistemlerinin oluşturduğu jeolojik unsurların tamamını görmek mümkündür. Bu sistemlerin oluşturduğu birimler akustik verilerde 1'den 11'e kadar numaralandırılmıştır ve son dönemde oluşan Tuna Kanalı'nın oluşturduğu birim 10 numara ile ifade edilmiştir. Ayrıca akustik verilerde içerisinde düzenli yansımaların bulunmadığı kaotik yansımalar şeklinde görülen MTD'ler de bulunmaktadır (Şekil 3b, d, e ve 4). Winguth vd. (2000) bu alandaki kanal-set sistemlerinin yaşlarını tanımlamıştır. Bu birimlerden Tuna kanal-set sisteminin (TKS) yaşı, son büyük buzul döneme karşılık gelen 0-75 ka'dır. 7 numaralı gömülü kanal-set sisteminin (GKS) üzerinde ve paleo-kanalın batısında bulunan 9 numaralı seviye olarak tanımlanan birim 75-320 ka yaşında, Tuna Kanalı'nın

batısında ve altında gömülü şekilde yer alan GKS'ye karşılık gelen birim ise 320-500 ka yaşındadır (Şekil 4) (Winguth vd., 2000).

Şekil 4'te verilen sismik hat, BSR'lerin gözleendiği 3 alanı birden kestiğinden BSR'lerin hangi birimler içerisinde yer aldığı gözlenebilmesi açısından önemlidir. Alanın en batısında bulunan "X" alanındaki BSR'lerin tamamı gömülü kanal-set sistemi (GKS) olan 7 numaralı birimin içerisinde yer almaktadır. Bu bölge için GKS dışındaki herhangi bir birimde ne birincil ne de çoklu BSR gözlenmemiştir. En üstteki BSR1 yansıması dışında kalan BSR'ler, doğusunda akustik türbidite ile batısında ise 6 ve 7 numaralı birimlerin keştiği sınır ile son bulmuştur. "Y"

alanında bulunan ve sadece "BSR1" olarak gözlenen yansımanın tamamı Tuna kanal-set sistemi (TKS) olan 10 numaralı birim içerisinde yer almaktadır. Bu alandaki BSR1, batısında MTD ile doğusunda ise Tuna Kanalı'nın içerisinde bulunan dolgu sedimanları ile sınırlanmıştır. set birikimleri kadar düzenli bir istife sahip olmayan dolgu sedimanları içerisinde BSR gözlenmemiştir. "Z" alanında bulunan "BSR1" ve "BSR2" yansımaları 8 numaralı birimin içerisinde yer almaktadır. Bu birimin kanal yapısı çalışma alanı içerisinde yer almamaktadır. "Z" alanı içerisinde bulunan BSR1 ve BSR2 yansımalarının devamlılığını etkileyen MTD yapısı bazı bölgelerde iki yansımayı birden kesmiştir ve Şekil 2'de gösterilen dağılım haritasını oluşturmuştur. Tüm akustik veriler



Şekil 4- a) 3 Tüm BSR alanlarını birden kesen örnek sismik kesit, b) Sismik kesitin yorumlanmış hali. Kesitte görülen farklı sismik birimler 1'den 11'e kadar numaralandırılmıştır. MTD, kütle kayması göstermektedir. Ayrıntılar metin içerisinde verilmiştir.

incelendiğinde çalışma alanında birincil ve çoklu BSR'lerin tamamının 7, 8 ve 10 numaralı birimler içerisinde oluştuklarını söylemek mümkündür. Tüm alanlardaki BSR'ler sadece belli birimler içerisinde oluşmuştur ve BSR'lerin hiçbiri bir başka birimi kesmemiştir.

2.4. MTD-BSR İlişkisi

Çalışma alanı içerisinde farklı ölçeklerde birçok MTD yapısı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları küçük ölçekli MTD'ler, bazıları ise yüzlerce kilometre karelik alana yayılmış MTD'lerdir. BSR'lerin 2000 ve 2700 ms aralığındaki derinliklerde gözlemlendiği dikkate alındığında, özellikle bu derinliklerdeki MTD yapılarının yorumlanması önem taşımaktadır. Gaz hidrat duraylılık zonu içerisinde kalan bu MTD yapıları 1'den 6'ya kadar numaralandırılmıştır (Şekil 5). Bu MTD'lerin her birinin yüz ölçümleri ve maksimum kalınlıkları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2- Duraylılık zonu içerisindeki MTD'lerin yüzölçümleri (km²) ve ulaştıkları maksimum kalınlık değerleri (m).

	Yüzölçümü (km ²)	Maksimum kalınlık (m)
MTD_1	1220	200
MTD_2	2440	500
MTD_3	255	105
MTD_4	1200	180
MTD_5	60	45
MTD_6	420	70

Alanın en batısında bulunan MTD_1, "X" alanı olarak ifade edilen BSR bölgesini batıdan sınırlayacak şekilde dağılım göstermiştir. "X" alanında gaz hidrat duraylılık zonunun içerisinde yer alan MTD_1, çalışma alanı içerisinde gözlemlenen ikinci en büyük MTD yapısıdır. Sismik kesitlerde güncel kanal-set yapısının tabanında bulunan MTD_2 yapısı ise, MTD_1 gibi "X" alanındaki duraylılık zonu içerisinde yer almaktadır; fakat "Y" alanındaki BSR'lerin altında bulunmaktadır. "Y" alanını oluşturan BSR'lerin güney uçları MTD_2 yapısının üstünde sona ermektedir. Ayrıca Şekil 5'teki haritada da görüldüğü üzere "X" BSR alanını batıdan sınırlayan MTD_1 gibi, MTD_2 yapısı da bu alanı doğudan sınırlamaktadır ve böylece, "X" alanının MTD yapıları tarafından sınırlandırıldığını söylemek mümkün olmuştur.

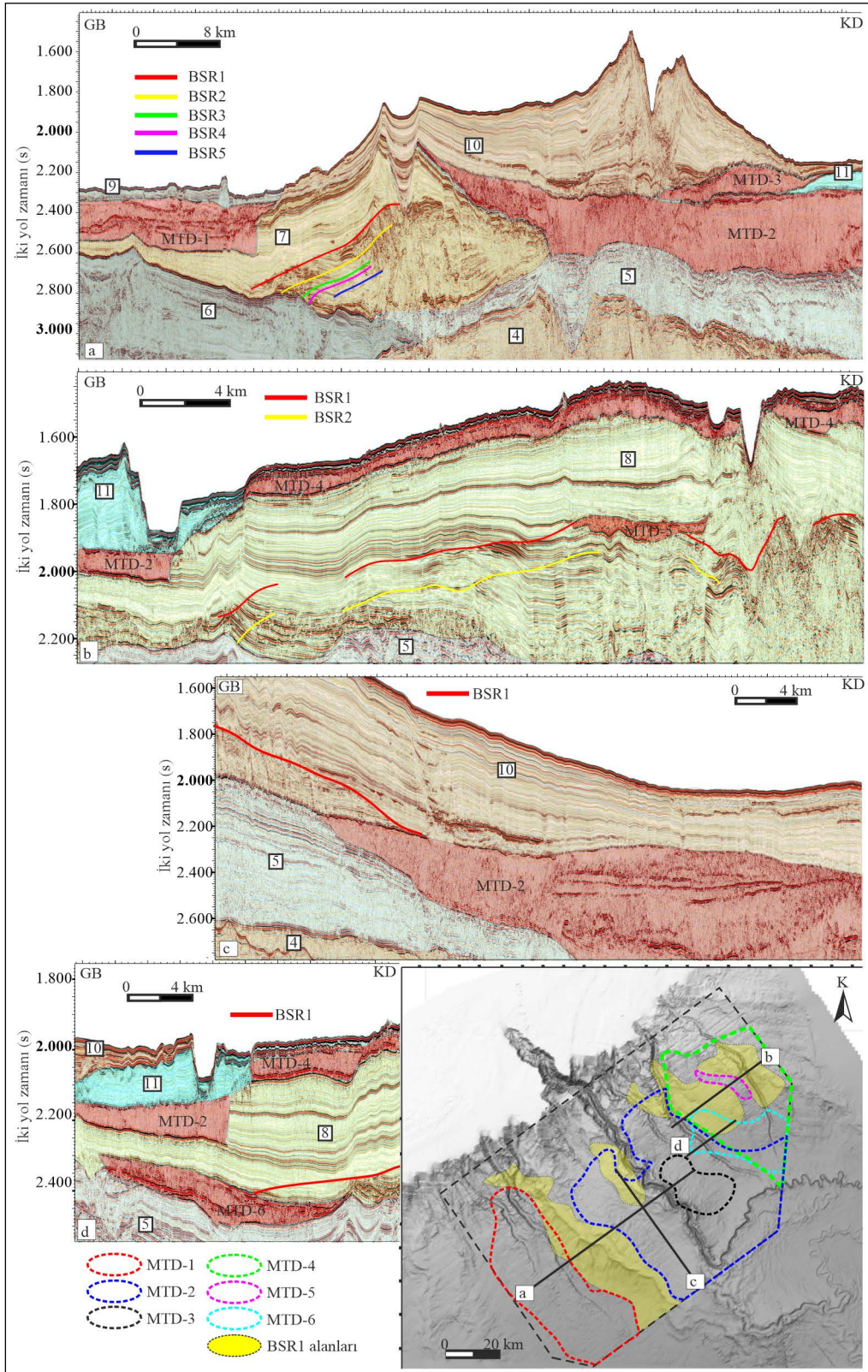
MTD_3, güncel kanal-set sisteminin doğu kanadının tabanında yer almaktadır ve herhangi bir

BSR ile teması bulunmamaktadır. Bu kütle kaymasının tüm sınırları çalışma alanı içerisinde yer almaktadır ve bir BSR alanı ile ilişkisi yoktur (Şekil 5a). MTD_4, yüz ölçümü olarak haritalanan MTD'ler arasında 3. sırada yer almaktadır ve deniz tabanına en yakın MTD'dir. Bu kütle kayması oldukça sığ olduğundan, çalışma alanındaki hiçbir BSR ile ilişkisi bulunmamaktadır (Şekil 5d). MTD_5, "Z" BSR alanında bulunan yansımalar ile kesiştiğinden ve moloz akması içerisinde herhangi bir BSR olmadığından, alanı "Z1" ve "Z2" olmak üzere iki parçaya bölmüştür. Gaz hidrat duraylılık zonu içerisinde haritalanan yüz ölçümü olarak en küçük moloz akması MTD_5'tir (Şekil 5b). Haritalanan son moloz akması olan MTD_6 "Z1" BSR alanı ile doğrudan ilişkilidir. Bu bölgedeki BSR'lerin batı uçları MTD_5 moloz akmasında son bulmuştur (Şekil 5d). Harita üzerinde "Z1" alanı MTD_6 ile sınırlandırılmış olarak görünmese de yansımaların moloz akması üzerinde son buldukları Şekil 5'deki sismik kesitlerde gözlenmektedir. Çalışma alanı içerisinde haritalanmayan, hem duraylılık zonu içerisinde hem de derin bölgelerde birçok küçük ölçekli moloz akması gözlemlense de çalışmada sadece BSR ile ilişkili olan ve diğer hatlarda devamlılığı gözlemlenebilen moloz akmaları yorumlanmıştır.

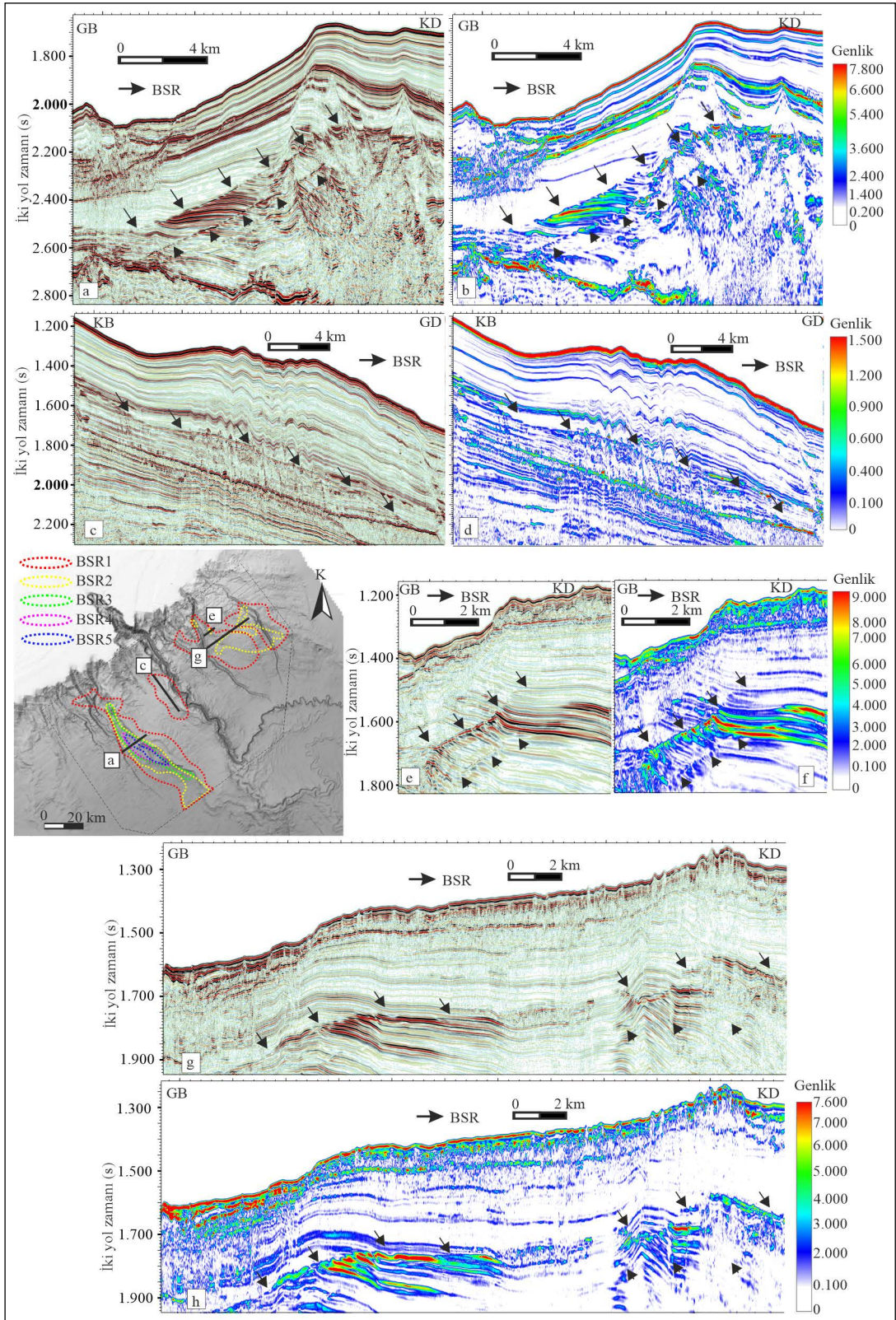
2.5. Sismik Nitelik Analizleri

Gaz hidratların en önemli belirteçlerinden biri olan, BSR'leri ve altında birikmiş olan serbest gaz anomalilerindeki genlik farklılıklarını daha belirgin şekilde ortaya koymak için tüm kesitlere nitelik analizlerinden biri olan zarf hesabı işlemi uygulanmıştır. Bu kesitler oluşturulurken herhangi bir genlik kazancı işlemi uygulanmamış hatlar seçilmiştir ve örnek olarak "X, Y ve Z" BSR alanlarından sismik kesitler Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca verilere gaz içeren birimlerde oluşan düşük frekanslı bölgeleri belirgin hale getiren anlık frekans nitelik analizi de uygulanmıştır. Alanın tamamında Tip_1 türü BSR yansımalar gözlemlendiğinden BSR seviyeleri altında serbest gazın varlığından bahsetmek mümkün olmamıştır ve bu yüzden anlık frekans nitelik analizi tüm BSR'li alanlara uygulansa da, kesitlerde frekansa bağlı anomaliler görülmemiştir.

Şekil 6a ve 6b'deki sismik kesitler, "X" alanında 5 katmandan oluşan çoklu BSR'lerin olduğu



Şekil 5- Çalışma alanındaki MTD'lere (kütle kaymaları) sismik kesitlerden örnekler ve bunların dağılımı, a) "X" BSR alanındaki örnek sismik kesitte görülen MTD yapıları, b) "Z" BSR alanındaki örnek sismik kesitte görülen MTD yapıları, c) "Y" BSR alanındaki örnek sismik kesitte görülen MTD yapıları, d) "Z" BSR alanındaki MTD yapılarını gösteren bir başka sismik kesit örneği. Alanda gaz hidrat duraylılık zonu içerisinde 6 adet MTD yapısı yorumlanmıştır.



Şekil 6- Çalışma alanındaki BSR içeren sismik kesitlere ait örnekler ve bu kesitlere uygulanmış anlık nitelik analizlerinden oluşturulmuş zarf kesitleri, a) "X" BSR alanından örnek sismik kesit ve b) bu kesitin zarf görüntüsü, c) "Y" BSR alanından örnek sismik kesit ve d) bu kesitin zarf görüntüsü, e) "Z1" BSR alanından örnek sismik kesit ve f) bu kesitin zarf görüntüsü, g) "Z" BSR alanından örnek sismik kesit ve h) bu kesitin zarf görüntüsü. "X" ve "Z" BSR alanlarındaki BSR1'lerin altında zarf kesitlerde yüksek genlikli anomaliler gözlenmektedir.

bölgeye örnek olarak verilmiştir. Bu alanda bulunan BSR'lerden özellikle BSR_1 ve BSR_2 sınırlarındaki yüksek genliklerin BSR seviyesi boyunca devam ettiği görülmektedir. BSR_1 seviyesinin altında kalan yansıma genlikleri üzerindeki genliklerden yaklaşık 4 kat daha yüksektir ve bu yüksek genlikler BSR_1 ve BSR_2 seviyeleri arasında bulunmaktadır.

Tüm "X" alanı boyunca çoklu BSR'lerin dağılım gösterdiği alanda, yüksek genlikli yansımaların tamamı BSR_1 ve BSR_2 seviyeleri arasında bulunmaktadır. "Y" BSR alanı içerisinde çoklu BSR gözlenmemektedir. Bu alandaki yansıma genliklerini incelemek için alanı kuzey-güney doğrultulu kesen hatlardan biri analiz edilmiş olup, bu hatta BSR seviyesinin zarf kesit üzerinde yüksek genlikli bir anomali vermediği görülmektedir (Şekil 6d). Dolayısıyla BSR'nin ne üzerinde ne de altında kıyaslama yapılabilecek bir genlik değeri farkı oluşmamıştır. "Z" BSR alanı Şekil 5b'de de görüldüğü üzere MTD yapısı ile ikiye bölünmüş şekildedir ve her iki tarafında da BSR_2 gözlemlendiğinden bu alan iki farklı zarf kesiti ile örneklendirilmiştir.

Şekil 6f'de "Z1" BSR alanının kuzeyinde çoklu BSR'nin olduğu bölgedeki zarf kesitinde BSR_1 çizgisi boyunca yüksek genlikli anomaliler gözlenmiştir. BSR_1 çizgisinin altında kalan genlikler üzerindeki genliklerden yaklaşık 10 kat daha yüksektir ve yüksek genliklerin tamamı "X" alanında olduğu gibi iki BSR arasında gözlenmektedir. Bu bölgedeki BSR_2'nin genlikleri bir çizgi şeklinde yüksek genlikli anomaliler oluşturmamıştır ve BSR seviyesinin altında da herhangi bir yüksek genlikli yansıma bulunmamaktadır. Ayrıca Şekil 6f'deki kesitte BSR'lerin batısında bulunan yüksek genlikli yansımalar, BSR gözlenmemesine rağmen devam etmektedirler. BSR'nin altında kalan yansımaların genlikleri, üzerindeki genliklerden yaklaşık 10 kat daha yüksektir. Son olarak Şekil 6h'de BSR alanını ikiye ayıran MTD ile birlikte gösterilen sismik hattın zarf kesitinde, hem çoklu hem de tekil BSR'lerin olduğu bölgedeki yansıma genlikleri incelendiğinde, BSR'nin altında kalan yüksek genlikli yansımaların BSR'nin üzerinde kalan yansımalara oranla yaklaşık 30 kat daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Kesitin batısında bulunan BSR'nin altında çoklu BSR bulunmamaktadır ve bu bölgedeki yüksek genlikli

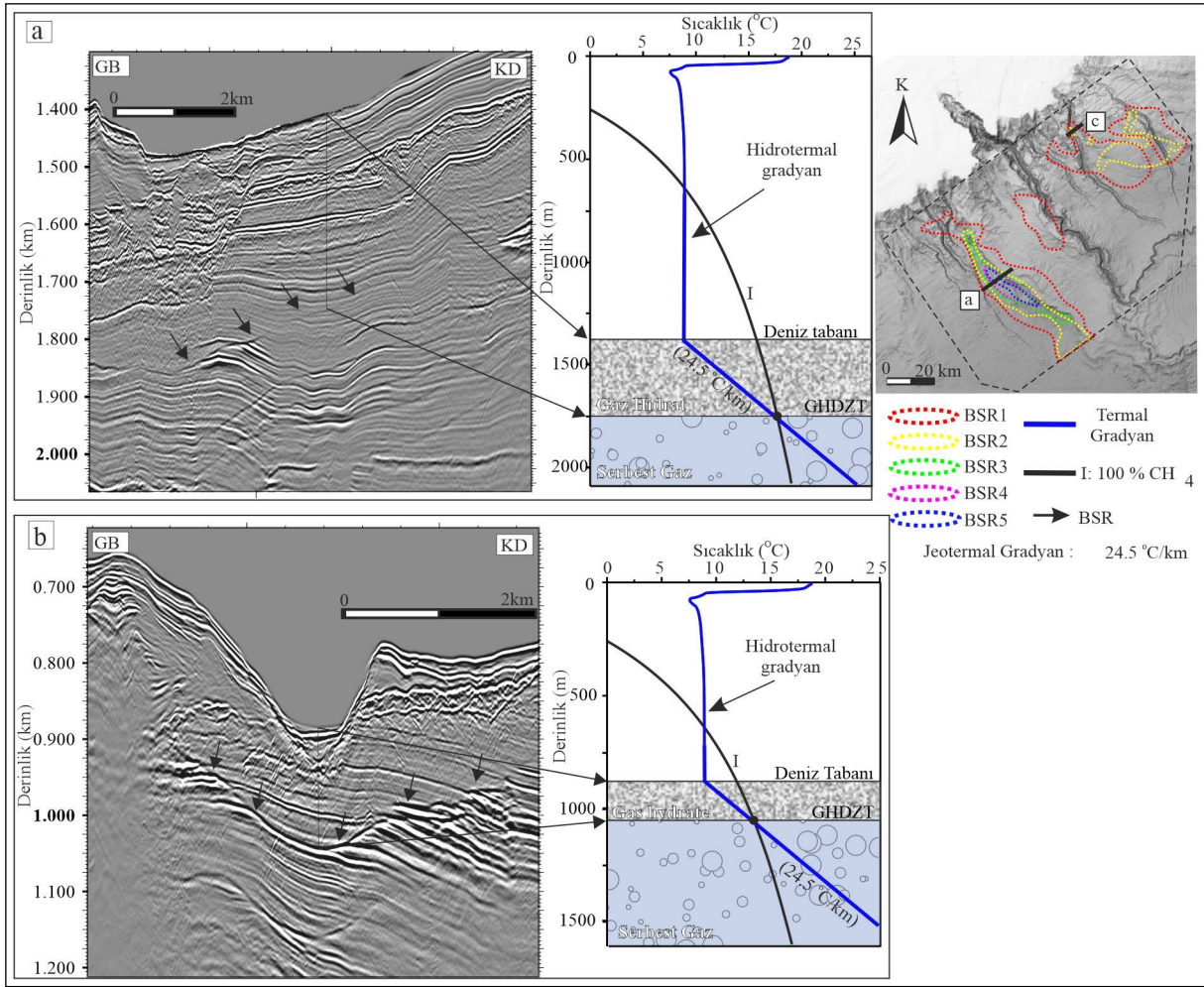
yansımalar "Z" alanının ortasında bulunan MTD yapısına kadar devam etmektedir. MTD'nin doğusunda kalan alanda ise "X" alanında olduğu gibi iki BSR arasında yüksek genlikli yansımaların bulunduğu görülmektedir (Şekil 6h). Dolayısıyla tüm çoklu BSR alanlarındaki yüksek genlikli yansımaların BSR_1 ve BSR_2 yansımaları arasında olduğunu söylemek mümkündür.

2.6. Gaz Hidrat için Hesaplanan Denge Eğrileri

2.6.1. Sadece Metandan Oluşan Gaz Hidrat için Denge Eğrisi

BSR seviyeleri için gaz hidrat denge eğrilerini hesaplamak için, derinlik migrasyonu işlemi kullanılarak, çalışma alanının "X" ve "Z" bölgesinden iki kesit derinlik ortamına dönüştürülmüştür. "X" BSR alanını doğu-batı yönlü kesen sismik hattaki (Şekil 7a) BSR'li bölgenin ortasından seçilen bir nokta için gaz hidrat denge eğrisi hesaplandığında, Şekil 7a'da mavi çizgi ile verilen eğri elde edilmiştir. Bu eğri ile sismik kesitten elde edilen BSR derinliği karşılaştırıldığında, sadece metandan oluşan gaz hidrat için hesaplanan bölgesel sıcaklık gradyanı yaklaşık olarak $24.5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 'dir. Bu sıcaklık diğer çalışmalardaki ($30 \text{ }^\circ\text{C/km}$; Vassilev ve Dimitrov, 2003; Popescu vd., 2006) gradyana kıyasla daha düşüktür. Bu nokta için deniz tabanının 1410 metre olduğu noktada BSR derinliği 1750 metredir. 340 metre BSR kalınlığı olan bölgede deniz tabanının sıcaklığı $9 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir ve denge eğrisinde BSR seviyesinin sıcaklığı yaklaşık $17.33 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye karşılık gelmektedir. Bu nokta için %100 metan içeriği kabulü ile çizdirilen eğriden hesaplanarak elde edilen $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ jeotermal gradyan değeri, bir başka BSR alanı olan "Z" alanında da kullanılmış ve denge eğrisi hesaplanmıştır (Şekil 7b).

Tuna Kanalı'nın doğusunda, S3 kanalının kuzeyi olan bu bölgedeki deniz tabanı 880 m'dir ve BSR derinliği ise 1040 metredir. Şekil 7a'daki BSR derinliği ile kıyaslandığında bu bölgedeki BSR kalınlığı derin bölgedeki BSR kalınlığından 180 m daha azdır. BSR kalınlığı olarak iki katından daha az olan bu bölge için sadece metan ve $24.5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 'lik jeotermal gradyana göre hesaplanmış gaz hidrat denge eğrisi tam olarak BSR seviyesinde eğri ile çakışmaktadır (Şekil 7b). 160 mBSR kalınlığına sahip bölgedeki denge eğrisinde



Şekil 7- "X" ve "Z1" BSR alanlarından iki örnek derinlik migrasyonu uygulanmış sismik kesitten üretilen teorik gaz hidrat duraylılık eğrisi. Her iki alandaki sismik kesitte de $24.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 'lik jeotermal gradyana göre hesaplatılmış denge eğrisi, %100 metan için oluşturulan eğri ile GHDZT (gaz hidrat duraylılık zonu tabanı) noktasında kesişmiştir.

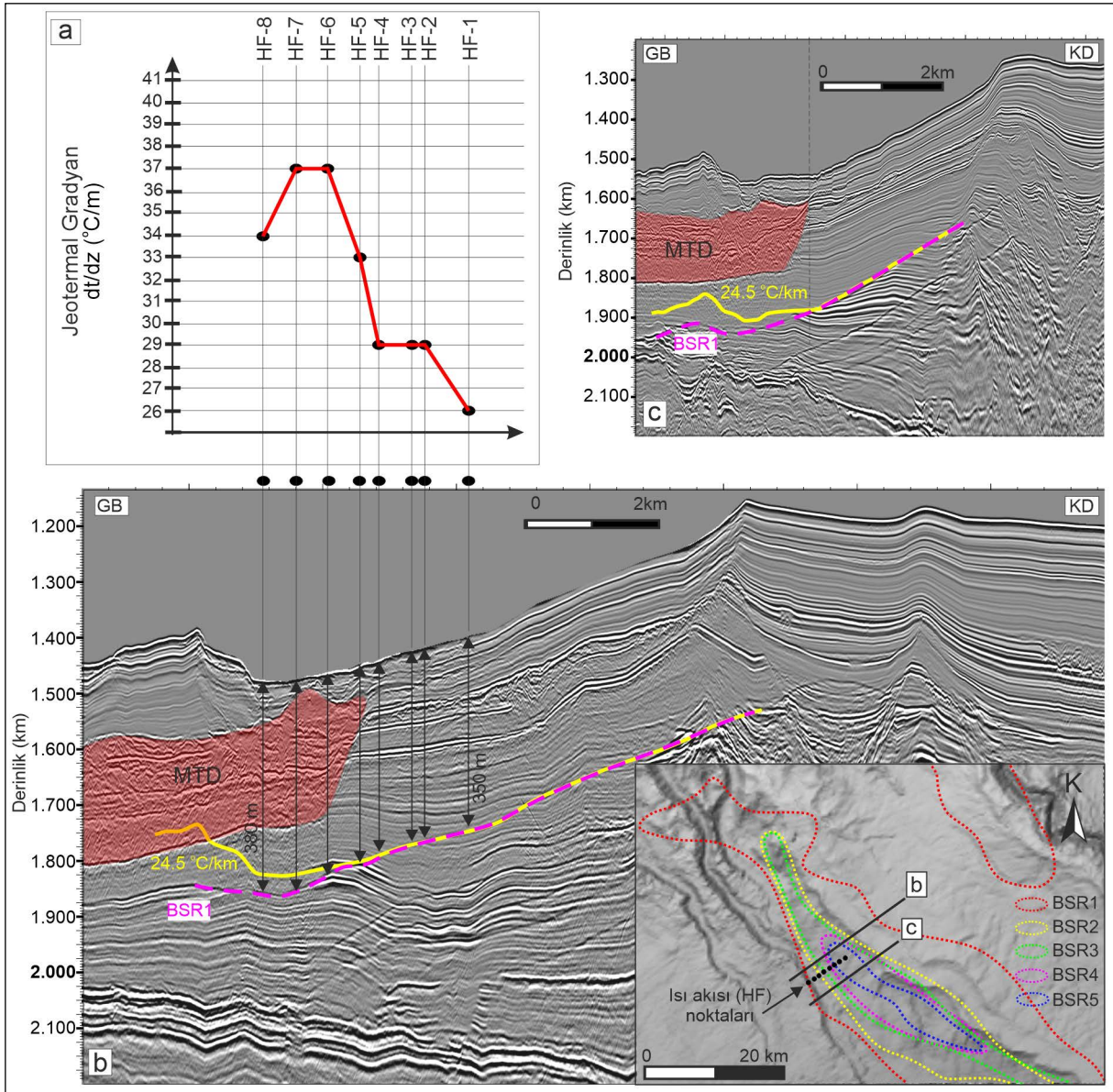
BSR seviyesinin sıcaklığı yaklaşık 12.9°C 'dir. Aynı jeotermal gradyan ile hesaplanan, farklı derinliklere ve farklı kalınlıklara sahip BSR'lerin yamaç aşağı kalınlıklarının arttığı "Y" BSR alanını kuzey-güney yönlü kesen sismik kesitte de açıkça görülmektedir (Şekil 3d).

2.6.2. BSR Düzensizlikleri ve Isı Akışı Değişimleri

Sismik kesitlerde gözlenen BSR'ler, eş sıcaklık eğrilerini takip ederler. Bu sıcaklık eğrileri, genellikle gaz hidratı oluşturan gaz bileşimi tarafından kontrol edilir. Sabit bir ısı akışı değeri için, eş sıcaklık seviyesinin deniz tabanından sabit bir derinlikte, deniz tabanına paralel uzandığı varsayılabilir. Bu nedenle BSR seviyeleri deniz tabanına paralel uzanır ve sismik kesitlerdeki normal stratigrafik tabakaları keserler.

Bununla birlikte, bazen BSR seviyesinin deniz tabanına paralel uzanmadığı ve BSR derinliğinde düzensizlikler meydana geldiği gözlenir. Bu durum genellikle yerel jeotermal gradyan değişimleri ile ilişkilendirilir. Çalışma alanındaki bazı noktalarda da BSR seviyelerinde bu tür düzensizlikler gözlenmiştir. Bu düzensizlikler, alandaki ısı akışı ölçüm değerleri dikkate alınarak analiz edilmiştir.

"X" BSR alanında çoklu BSR'lerin gözlemlendiği bölgede yapılan "ısı akışı (heat flow)" ölçümleri Şekil 8'de gösterilmiş ve grafik üzerinde aynı ölçekte sıralanmıştır. Batıdan doğuya doğru sıralanmış 8 adet ısı akışı ölçümünden elde edilen jeotermal gradyan değerleri her bir nokta için BSR üzerinde de gösterilmiştir ve bu noktadaki BSR derinlikleri de hesaplanmıştır (Şekil 8b).



Şekil 8- "X" BSR alanı üzerinde yapılmış ısı akısı ölçümlerine (HF noktaları) ait jeotermal gradyan değerleri ve bunların örnek sismik kesitler üzerindeki konumları, a) Yarı MTD yapısı üzerine denk gelen 8 adet ısı akısı ölçümünden elde edilen jeotermal gradyan değerleri, b) "HF" noktalarının kuzeyinde bulunan örnek sismik kesitin görüntüsü ve "HF" noktalarının kesit üzerindeki konumları, c) "HF" noktalarının güneyinde bulunan örnek sismik kesitin görüntüsü ve "HF" noktalarının kesit üzerindeki konumları. Çalışma alanının en batısında bulunan MTD_1 yapısı üzerindeki ısı akısı ölçümlerinden elde edilen jeotermal gradyan değerlerinin, aynı bölgede diğer noktadaki ölçümlere oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sarı çizgi 24.5°C/km'lik jeotermal gradyana göre çizilmiş BSR seviyesini ifade etmektedir. Mor kesikli çizgi gözlenen BSR1 seviyesine karşılık gelmektedir. Sarı çizgi 24.5 °C/km'lik jeotermal gradyana göre çizilmiş BSR seviyesini, mor kesikli çizgi ise gözlenen BSR1 seviyesini ifade etmektedir.

HF_1'den HF_8'e ısı akısı ölçüm noktalarına bakıldığında bu noktadaki BSR kalınlıkları MTD yapısının olduğu bölüme kadar 350 m olarak gözlenmiştir. MTD yapısının batı sınırı ile birlikte diğer ölçüm noktalarındaki BSR kalınlık değerleri doğuya gittikçe artmıştır. En batıdaki ölçüm noktası ile en doğudaki ölçüm noktası arasında 30 m'lik bir

kalınlık farkı olduğu görülmüştür. Daha önce denge eğrisinden hesaplanan 24.5 °C/km'lik jeotermal gradyana karşılık gelen GHDZT seviyesi sarı kesikli çizgi ile gösterilmiştir ve tam olarak MTD'nin batı sınırının olduğu yerde gerçek BSR yansıması (mor çizgi), hesaplanan sarı çizgili gradyandan daha derindedir ve bu fark giderek artmıştır. Deniz tabanına

göre tam olarak paralel olmayan Şekil 8b'deki BSR'nin yansıma özellikleri aynı şekilde, Şekil 8c'de de görülmektedir ve bu hat için de paralelliğin bozulduğu yer MTD'nin doğu sınırı ile başlamaktadır. Jeotermal gradyan değerlerine bakıldığında değerlerini, MTD yapısı dışında kalanlar ve içinde kalanlar şeklinde değerlendirmek gerekir. MTD yapısının olduğu bölümdeki jeotermal gradyan değerleri dışında kalanlara göre daha yüksek hesaplanmıştır (Şekil 8a).

3. Tartışma

3.1. BSR'lerin Dağılımı ve Karakteristik Özellikleri

Çalışma alanında BSR'lerin varlığı ilk kez Popescu vd. (2006) tarafından yapılan sismik çalışma ile ortaya konulmuştur. Çalışma alanı içerisinde haritalanan 3 BSR alanı (Şekil 2), Popescu vd. (2006) tarafından önerilen BSR dağılım haritası ile benzerlikler gösterse de, bu çalışmada önerilen BSR dağılımı ve karakteristik özellikleri hem alansal hem de stratigrafik olarak farklılıklar göstermektedir. BSR gözlenen en sığ su derinliği 665 m'dir ve bu derinlik çalışma alanı için (sadece metandan oluşan gaz hidrat için) bölgede gaz hidratın oluşabileceği minimum derinlik olarak hesaplanmıştır. Aynı derinlik limiti Zander vd. (2017)'de de 665 m olarak hesaplanan minimum sınır ile uyumludur. Popescu vd. (2006), Tuna Kanalı'nın doğusunda ve batısında iki BSR alanı yorumlamış olmakla birlikte, sismik veriler göstermektedir ki, kanalın batısında 172 km²'lik bir alana yayılmış bir BSR alanı daha mevcuttur (Şekil 3c ve d). Bu çalışmada kullanılan sismik hat yoğunluğu, BSR alanlarının daha ayrıntılı olarak haritalanmasına olanak tanımıştır. Hatların daha sık toplanmasının yanı sıra bu çalışmada daha geniş frekans bandına ve daha küçük grup aralığına sahip sismik sistem kullanılması, sismik verinin çözünürlüğünün Popescu vd. (2006) tarafından verilen sismik kesitlerden daha yüksek olmasını sağlamıştır. Bu nedenle, Popescu vd. (2006)'nın "B" BSR alanındaki çoklu BSR'ler bu çalışma ile uyum içerisinde olsa da "c" alanı içerisinde bulunan sismik kesitte çoklu BSR görülmemiştir. Fakat bu çalışmada "Z" olarak ifade edilen alanda çoklu BSR'lerin varlığı kesitlerde açıkça görülmektedir (Şekil 3d).

Hyndman ve Davis (1992), BSR'leri yansıma özelliklerine göre iki ayrı sınıfta toplamıştır. Bunlardan

ilki BSR'nin yansıma genliğinin kendi içerisinde tutarlı olduğu ve çizgisel şekilde devam eden bir yansıma olarak görülmesidir. Bu tip yansımalar Tip_1 türü yansımalar ismi verilmiştir ve BSR seviyesinin altında serbest gazın varlığından söz etmek mümkün değildir (Özel vd., 2022). BSR seviyesinde sonlanan yüksek genlikli yansımaların oluşturduğu bir seviye olarak görülen ve altında serbest gaz bulunan yansıma türlerine de Tip_2 türü yansımalar denilmektedir. Hyndman ve Davis (1992)'in BSR tanımındaki yansıma karakterine göre tüm çalışma alanında Tip_1 türü BSR'ler gözlenmiştir. Alanda faylarla ilişkili gaz çıkışları ya da çamur volkanları bulunmadığından alandaki BSR'lerin tamamı Tip_1 türüne uygun olarak geliştiği düşünülmektedir.

Çalışma alanının batısında bulunan "X" BSR alanı içerisinde kalan akustik türbidite zonunda serbest gazın varlığına rağmen Tip_1 türü BSR gözlenmemiştir (Şekil 3a, b). Bunun nedeni alanın kuzeyinde akustik türbidite zonunun BSR seviyesinden daha derinde bulunmasıdır. Akustik türbidite zonu BSR alanı içerisinde olmasına rağmen bu bölgedeki gaz birikimi Tip_2 türü BSR oluşturmamıştır. Gaz birikiminin olduğu alan özellikle "X" alanının kuzeyinde BSR duraylılık zonunun oldukça altında sonlanmaktadır. Dolayısıyla her BSR altında kalan akustik türbidite zonu, Tip_2 türü yansıma karakteri göstermek zorunda değildir. BSR'nin Tip_2 türü yansıma karakterine sahip olabilmesi için gaz birikiminin BSR seviyesine kadar ulaşmış olması gerekmektedir. Bu durumda, Tip_2 BSR türünün, altında serbest gaz birikimlerine izin veren bir örtü katmanı şeklinde davrandığını söylemek mümkündür.

3.2. BSR İçermeyen Birimler

BSR'lerin sismik kesitlerin tamamında gözlenmemesinin birden fazla sebebi olabilir. Çalışma alanında BSR duraylılık zonu içerisinde kalan birçok farklı jeolojik unsur bulunmaktadır ve bunlar gaz hidrat birikimlerinin dağılım ve karakteristik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Gaz hidrat birikimlerinin özellikleri, bulunduğu ortamın sıcaklık ve basınç koşullarının yanı sıra içerisinde bulunduğu stratigrafik birimlerin fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Alanda, BSR duraylılık zonu içerisinde farklı stratigrafik birimler, paleo-kanallar, akustik türbiditeye neden

olan birimler ve MTD'ler gibi fiziksel özellikleri birbirlerinden farklı yapılar bulunmaktadır (Şekil 4).

Gaz hidrat birikimlerinin karakteristik özelliklerini etkileyen en önemli unsurlardan biri çalışma alanının birçok bölgesinde bulunan ve içerisinde BSR'lerin gözlenmediği MTD yapılarıdır. Çalışma alanında 2440 km²'lik alanlara kadar ulaşan çok sayıda MTD yapısı gözlenmiştir (Şekil 5). Bu yapılarından MTD_1 ve MTD_6'nın doğusu ve MTD_2'nin tamamı BSR seviyelerinin altında bulunmaktadır. MTD_5, alandaki diğer MTD yapılarına oranla en küçük MTD'dir ve diğer MTD'lerden farklı bir BSR seviyesi ile kesişiyor olmasıdır. Gaz hidrat duraylılık zonu içerisinde yorumlanan MTD'lerin BSR seviyesi ile kesişmediği her bölgede, MTD'nin BSR seviyesinin altında ya da üstünde olması fark etmeksizin sismik kesitlerde BSR'ler gözlenmektedir. Nasıf vd. (2020), Sakarya Kanyonu açıklarındaki MTD yapılarının altında BSR'lerin var olduğunu ancak MTD'lerin üzerinde herhangi bir BSR gözlenmediğini işaret etmektedir. Bu durumu, gaz hidratı oluşturan gazın derinlerden yükseldiği ve derinlerde bulunan MTD yapılarının gaz akışını engellediği şeklinde yorumlamışlardır.

“Y” ve “Z” BSR alanları incelendiğinde, “Y” alanına ait BSR'nin altında çalışma alanındaki en büyük ölçekli MTD yapısı bulunmaktadır. Dolayısı ile “Y” alanında oluşacak olan gaz hidratın BSR seviyesi altındaki bir serbest gazdan beslenmesi mümkün görünmemektedir. Özellikle Tip_2 türü BSR'lerde BSR seviyesi altındaki serbest gazdan gaz hidrat oluşumuna ait düşünce “Y” alanı için mümkün olmamaktadır. “Z” alanının güney batısında bulunan MTD_6 da aynı şekilde “Y” alanı altında bulunan MTD_2 gibi BSR seviyesinin hemen altında bulunmaktadır ve altında veya çevresinde serbest gaz birikimi bulunmamasına karşın, bu bölgede BSR oluşmuştur (Şekil 5).

“Z” alanı içerisinde bulunan ve bu BSR alanını ikiye ayıran bir başka MTD ise MTD_5'tir ve hem bu MTD hem de tüm çalışma alanı içerisinde bulunan tüm MTD'ler içerisinde herhangi bir BSR gözlenmemiştir. Bunun nedeni birçok çalışmanın da gösterdiği gibi (Dugan, 2012; Reece vd., 2012; Hornbach vd., 2015; Sun vd., 2018; Sun ve Alves, 2020; Nasıf vd., 2020) MTD'lerin çevre sedimanlara göre yüksek

yoğunluk, düşük porozite, düşük su içeriği ve düşük permabilite özelliklerine sahip olmasıdır. MTD'lerin oluşması ve gömülmesi sırasında meydana gelen kayma malzemesinin aşırı konsolide olması düşey yönlü sıvı ve gaz geçişini önlediğinden bu yapıların içerisinde gaz hidratların oluşumunun engellendiği düşünülmektedir. Bunun en önemli nedeninin MTD içerisindeki permeabilitenin düşük olması nedeniyle hem MTD içerisinde gaz akışının bulunmaması hem de gaz hidrat oluşumuna uygun porozitenin olmamasıdır. Sonuç olarak MTD'lerin içerisinde gaz hidrat oluşumunun mümkün olmadığı fakat MTD yapısı bulunan bölgelerin altında veya üzerlerinde gaz hidrat oluşumunun MTD'ler ile bir ilişkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Duraylılık zonu içerisinde kalan ve BSR gözlemlenmeyen bir diğer birim ise 6 numaralı birimdir (Şekil 4). “X” BSR alanındaki yansımaların tamamı 6 numaralı birimin doğusunda son bulmuştur. Bu birimin sığ kısımları gaz hidrat duraylılık zonunun içerisinde yer almasına rağmen bölgedeki BSR'lerin tamamı 6 ve 7 numaralı birimlerin sınırında sonlanmıştır ve 6 numaralı birimin hiçbir bölgesinde BSR gözlenmemiştir. Bunun nedeni, 6 numaralı birimi oluşturan sedimanların, sediman türü, tane boyutu, porozite ve permabilitesi gibi fiziksel özelliklerinin BSR gözlenen birimlerden farklı olması olabilir. Porozitesi ve permabilitesi düşük sedimandan oluşmuş bir birimin içerisinde gaz hidrat bulunmaması, yukarıda belirtilen MTD'lerin fiziksel özellikleri nedeniyle ile içerisinde gaz hidrat bulundurmamaları ile aynıdır. Ayrıca 6 numaralı seviyenin fiziksel özelliklerinin farklı olmasının sebebi ise bu birimin kanal-set yapısının başka bir kaynaktan beslenmesi de olabilir. Çalışma alanı içerisinde 6 numaralı birimin doğu kanadı gözlenmektedir ve bu birim 4 numaralı birimin batısında son bulmuştur (Şekil 4). Buna göre, birimi oluşturan ve şu an gömülü olan kanal-set yapısının çalışma alanının dışında ve batısında olması oldukça yüksek bir ihtimaldir.

3.3. Isı Akısı-MTD İlişkisi

“X” BSR alanında gözlenen BSR'lerin deniz tabanını taklit etme özellikleri, doğuya gittikçe kaybolmaktadır. Doğu kısımda deniz tabanından BSR seviyesine kadar olan derinlik 350 m iken en batıda

gözlenen BSR seviyesinin derinliği 380 m'ye kadar ulaşmıştır (Şekil 8b). Zander vd. (2017), Şekil 8'de 24.5 °C/km jeotermal gradyana göre hesaplanmış BSR seviyesi ile (sarı çizgi) gözlenen gerçek BSR seviyesi (mor çizgi) arasındaki derinlik farkını bu bölgenin yerel olarak kararlı bir durumda olmadığı düşüncesine bağlamış ve bu kararlı olmayan durumun hızlı set birikiminden kaynaklandığını ileri sürmüştür.

Bu çalışma kapsamında, bölgedeki BSR derinliğindeki düzensizliğin MTD kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Teorik olarak hesaplanan BSR seviyesi ile gerçek BSR seviyesinin birbirinden ayrıldığı nokta tam olarak MTD yapısının gözlemlendiği konuma karşılık gelmektedir. MTD_1'in doğu sınırından başlayan ve MTD sınırları içerisinde bulunan HF-5-6-7-8 ısı akışı (heat flow) ölçümlerinden elde edilen jeotermal gradyanlar (dt/dz), MTD sınırı dışındakilere oranla daha yüksektir. Bu değerlerden MTD sınırları içerisinde bulunan sedimanın ısı iletim katsayısının MTD sınırı dışında kalan ısı iletim katsayılarına oranla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 8a). MTD'lerin çevre sedimanlara göre porozitelerinin ve permeabilitelerinin düşük olduğu düşünüldüğünde, MTD yapılarını oluşturan sedimanın ısı iletim katsayılarının yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Bu yorum, Zhang vd. (2022)'nin porozitesi düşük ve sıcaklığı yüksek sedimanlarda ısı iletim katsayısının yüksek olduğunu gösteren çalışması ile uyum göstermektedir. Isı iletim katsayısının yüksek olması bölgedeki MTD nedeni ile gaz hidrat içeren sedimanda ısının daha kolay iletilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, daha kolay iletilen ısı nedeniyle olması gerekenden daha az sıcak olan ortamda, BSR'nin dengeye ulaşacağı seviye, olması gerekenden daha derinde gözlenmiştir ve Şekil 8b'de 24.5 °C/km jeotermal gradyana göre hesaplanmış sarı çizgi ile gerçek (mor renkli) BSR seviyesi arasında yaklaşık 30 m'lik bir fark oluşmuştur.

3.4. Çoklu BSR'lerin Nedenleri

Dünya denizlerinde, az sayıda alanda sismik kesitlerde çoklu BSR'ler gözlenmiştir (Foucher vd., 2002; Zhang vd., 2022). Bu alanların tamamında, güncel BSR seviyesinin altında uzanan tek bir paleo-BSR seviyesi gözlenmiştir. Tuna Deltası, dünyada

uygulmuş şekilde 5 adet BSR seviyesinin aynı anda gözlemlendiği ilk ve tek bölgedir. Set sistemleri ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülen bu BSR'ler, ilk kez Popescu vd. (2006) tarafından sismik kesitlerde gözlenmiştir.

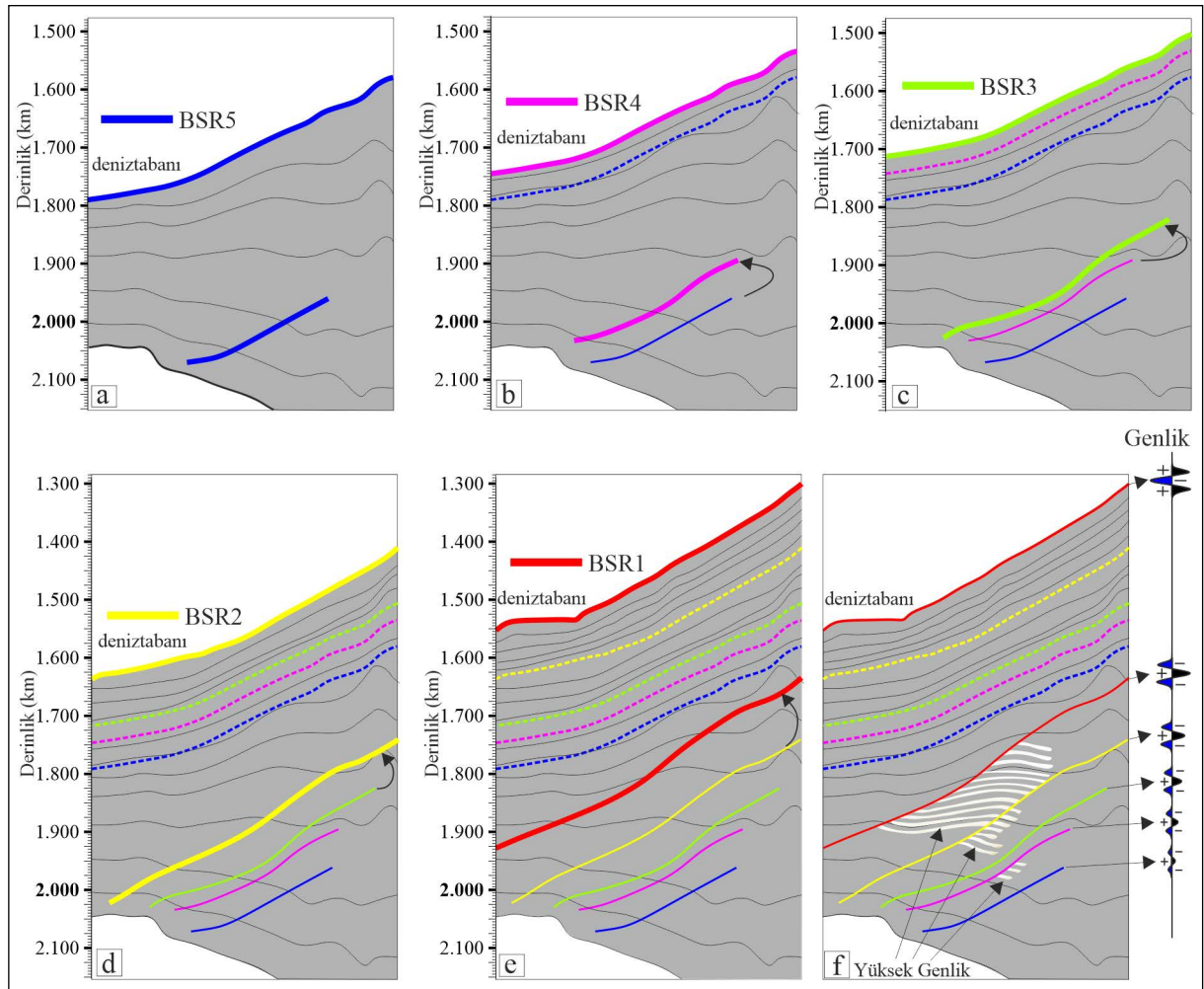
Çalışma alanında çoklu BSR'lerin gözlemlendiği iki alan bulunmaktadır. Bunlardan ilki "X" BSR alanıdır ve bu bölgede 5 seviyeden oluşan BSR'ler bulunmaktadır. İkincisi ise "Z" BSR alanıdır ve bu bölgede ise 2 seviyeden oluşan BSR'ler bulunmaktadır (Şekil 2 ve 3). Günümüzde hala tartışma konusu olan çoklu BSR'lerin oluşumuna yönelik teoriler bu bölge için de geçerlidir. Çoklu BSR oluşumuna neden olacak etkenler incelendiğinde sebeplerden birinin farklı gaz bileşimlerinin BSR'lerin oluştuğu derinlikleri doğrudan etkilediğini söylemek mümkündür. Büyük ölçüde (%99) metandan oluşan gaz hidratların içerisinde farklı oranlarda bulunabilen termojenik gazlar (etan, propan, bütan vb.), denge eğrisinde BSR seviyesini doğrudan etkilediğinden farklı gaz bileşimleri içeren gaz hidrat birikimleri olan bölgelerde, üst üste birden fazla BSR görmek mümkün olabilir.

Popescu vd. (2006)'de aynı bölge için çoklu BSR'lerin sebeplerinden birinin farklı gaz bileşimleri olabileceği fikrini sunmuştur. Çalışma alanının doğusunda bulunan "Z" BSR alanında çoklu BSR'ler üzerinden alınan 147 m'lik karot örneğinden yapılan gaz kromatografi örneğinde Pape vd. (2020), eser miktarda termojenik gaz bulgusuna rastlandığını göstermiştir. Ayrıca aynı bölgede yapılan bir başka çalışmada Chazallon vd. (2021), kromatografi sonuçlarında %99.5571 metandan oluşan bir karot örneğinde, %0.0071 etan ve %0.0002 propan bulunduğunu söylemiştir. Görüldüğü üzere, ağır hidrokarbon gazları için verilen bu oranlar, bölgedeki çoklu BSR'lerin farklı gaz bileşimlerinden oluşması için gereken değerlerden oldukça düşüktür. Dolayısı ile "Z" çalışma alanındaki çoklu BSR'lerin farklı gaz bileşimleri nedeni ile oluştuğunu söylemek oldukça zordur. Tüm çalışma alanındaki kanal-set yapısı sistemleri düşünüldüğünde birçok yapının benzer jeolojik unsurlardan oluştuğunu söylemek mümkündür. Bu yüzden "X" BSR alanı "Z" BSR alanından oldukça uzak olmasına rağmen çoklu BSR'lerin sebeplerinden biri olarak görülen farklı

gaz bileşimleri teorisinin de aynı şekilde bu bölgedeki çoklu BSR'lerin oluşum sebebi olarak görülmesi oldukça güçtür. Ancak yine de "X" alanından alınacak ve BSR seviyesine kadar ulaşacak bir karot örneği ile bunun cevaplandırılması en doğru sonucu verecektir.

Çalışma alanındaki çoklu BSR'lerin bir başka oluşum sebebi de bölgedeki sedimantasyon hızının gaz hidratın çözünme hızından daha yüksek olması olabilir. Bu durumu ifade etmek için öne sürülen kavramsal model Şekil 9'da verilmiştir. Zander vd. (2017) "X" BSR alanındaki BSR seviyelerinin

duraylılık zonunun, paleo-deniz tabanı seviyeleri ile uyumlu olacak şekilde geliştiğini ortaya koymuştur. Fakat BSR seviyelerini oluşturacak olan gazın düşey yönlü göç etmeyeceğini öne sürse de, 5 seviyeden oluşan BSR'lerin sismik kesitlerde hala görünüyor olmasının sebebinin başka bir açıklaması olması güçtür. Hızlı sedimantasyonun olduğu çalışma alanında BSR seviyelerinin yukarıya doğru taşınması normal olsa da, daha derindeki paleo-BSR'lerin sismik kesitlerde hala gözleniyor olması, bu bölgedeki gaz hidrat çözünmesinin devam ediyor olduğuna bir kanıt olabilir. Özellikle Şekil 6b'de açıkça gözlenen



Şekil 9- Çoklu BSR'lerin oluşum mekanizmasını sedimanların çökme sırasına göre açıklayan kavramsal model, a) BSR5 seviyesi ve bu seviyenin oluştuğu dönemdeki deniz tabanını gösteren model, b) BSR4 seviyesi ve bu seviyenin oluştuğu dönemdeki deniz tabanını gösteren model, c) BSR3 seviyesi ve bu seviyenin oluştuğu dönemdeki deniz tabanını gösteren model, d) BSR2 seviyesi ve bu seviyenin oluştuğu dönemdeki deniz tabanını gösteren model, e) BSR1 ve seviyesi bu seviyenin oluştuğu dönemdeki deniz tabanını gösteren model, f) BSR seviyeleri arasında bulunan gaza bağlı gelişen yüksek genlikli yansımaları ve BSR seviyelerindeki genliklerin BSR5'ten BSR1'e doğru azaldığını açıklayan model. Alandaki sedimantasyon hızının gaz hidrat çözünme hızından yüksek olması nedeni ile BSR'ler 5. seviyeden 1. seviyeye kadar yükselse de hidrat çözünmesi devam ettiği için hem çoklu BSR'ler gözlenmektedir hem de BSR seviyeleri arasında ortamdaki serbest gaz nedeni ile yüksek genlikli yansımalar gelişmiştir.

BSR1 ve BSR2 seviyeleri arasında bulunan serbest gazın varlığı zarf kesitlerindeki yüksek genlikler ile açıkça görülmektedir. Ayrıca BSR'ler üzerindeki genliklerin BSR1'den BSR5'e doğru azalması da, bölgedeki gaz konsantrasyonunun derinlere doğru azaldığını da kanıtlayabilir. Bu durumda paleo-BSR seviyesinde çözünen gaz, Zander vd. (2017)'nin iddiasının aksine düşey yönde göç ederek, saha sığ bölgedeki BSR seviyesinin altında birikiyor ve/veya daha sığ kısımlarda yeniden BSR oluşturuyor olabilir.

Gaz hidratların çözünmesi endotermik bir tepkime olduğundan çözünme sırasında buldukları ortamın soğumasına neden olmaktadır. Çoklu BSR'lerin dengeye ulaştığı derinliklerden daha derinlerde hala gözlenebiliyor olmasını sağlayan bu çözünme işlemi sırasında hidratin çözüldüğü ortamı soğutuyor olması, çözünme işlemi daha da uzatıyor ve günümüzde hala çoklu BSR'lerin bölgede varlığını sürdürmesini sağlıyor olabilir. BSR5'in genliğinin oldukça düşük, BSR1'in de yüksek olmasının yanı sıra çözünmenin hala devam ediyor olması, ortamdaki sedimentasyon hızı düşünüldüğünde gelecekte daha fazla çoklu BSR oluşmasını sağlayabilir ya da bugün en üstte görünen BSR1'in ikincil BSR seviyesi olmasını sağlayabilir. Çoklu BSR'lerin gözlemlendiği bir başka alan olan "Z" BSR alanında sadece 2 seviyeden oluşan çoklu BSR'lerin oluşum sebebinin de, yine bölgedeki sedimentasyon hızı ile ilgili düşünülmektedir.

Şekil 4'te gösterilen birimlerin set banklarının genellikle çalışma alanının batısında biriktiği görülmektedir. Güncel Tuna Kanalı'nın da set banklarını oluşturan sedimanların batı kanadının yüksek ve batıya doğru daha fazla uzanım göstermesi bu bölgedeki sedimentasyon oranının doğuya oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile "Z" BSR alanındaki sedimentasyon hızının batıda bulunan "X" BSR alanına göre daha az olması çoklu BSR'lerin 2 seviye ile sınırlı kalmasına sebep olmuş olabilir.

4. Sonuçlar

Sismik yansıma verileri, çalışma alanının gaz hidratlar açısından oldukça zengin olduğunu ortaya koymuştur. Alandaki BSR'ler 3 alana ayrılmış şekilde dağılım göstermişlerdir. Bunlardan en batıdaki "X" BSR alanı 825 km², orta alandaki "Y" BSR alanı

172 km² ve doğudaki "Z" BSR alanı ise kendi içinde ikiye ayrılmış şekilde 710 km²'dir. Tüm alanlardaki BSR türleri tabakaları kesen ve devamlı şekilde yansıma özelliği gösteren Tip-1 olarak bilinen yansımalarından oluşmaktadır. Çalışma alanında çoklu BSR'ler gözlenmiştir ve bu çoklu BSR'ler "X" alanında 5 seviyeden "Z" alanında ise 2 seviyeden oluşmaktadır.

BSR duraylılık zonu içerisinde kalan 6 adet MTD yapısı bulunmaktadır ve alandaki hiçbir MTD yapısının içerisinde BSR gözlenmemiştir. MTD'lerin oluşması sırasında meydana gelen kayma malzemesinin aşırı konsolide olması nedeni ile yapı içerisinde gaz hidratların oluşmadığı düşünülmektedir. "X" BSR alanı üzerinden alınan ısı akısı ölçümlerinde, MTD yapısının üzerindeki jeotermal gradyanların diğer alanlara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu gözlem MTD'nin ısı iletim katsayısının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, daha kolay iletilen ısı nedeniyle olması gerekenden daha az sıcak olan ortamda, BSR'nin dengeye ulaşacağı seviye, olması gerekenden daha derinde gözlenmiştir.

"Z" BSR alanından alınan karot örneklerinde eser miktarda ağır gaz gözlemlendiğinden BSR'lerin farklı gaz bileşimleri nedeni ile oluştuklarını söylemek oldukça zordur. Çalışma alanındaki çoklu BSR'lerin muhtemel sebebi, sedimentasyon hızının gaz hidratin çözünme hızından yüksek olmasıdır. 5 seviyeden oluşan BSR'lerden en alttaki BSR'nin genliğinin en düşük, en üstteki BSR'nin genliğinin ise en yüksek olması bu düşünceyi desteklemektedir. Ayrıca birinci ve ikinci seviye BSR'ler arasında serbest gazın varlığı da çözünmenin hala devam ettiğine dair bir işaretler.

Katkı Belirtme

SUGAR Projesi kapsamında verilerin toplanmasını sağlayan GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel Enstitüsü'ne, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü bünyesinde bulunan SeisLab jeofizik laboratuvarı ekibine, R/V MARIA S. MERIAN araştırma gemisinde bulunan bilimsel ekibe ve gemi mürettebatına, veri toplama sırasında kullanılan laboratuvara ait cihazların teknik desteğini sağlayan SEAMAP firmasına, bu cihazların temininde ve veri işlem laboratuvarının kurulmasında

“2003K120360” kodlu proje ile desteği olan Devlet Planlama Teşkilatı’na, SeisSpace/Promax sismik veri işlem yazılımını temin eden Landmark Graphics firmasına ve sismik verilerin yorumunda kullanılan Kingdom Suite yazılımını ücretsiz temin eden IHS Markit firmasına teşekkür ederim.

Değerlendirilen Belgeler

- Andreassen, K., Mienert, J., Bryn, P., Singh, S. C. 2000. A Double gas-hydrate related bottom simulating reflector at the Norwegian continental margin. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 912(1), 126–135.
- Andreassen, K., Nilssen, E. G., Ødegaard, C. M. 2007. Analysis of shallow gas and fluid migration within the Plio-Pleistocene sedimentary succession of the SW Barents Sea continental margin using 3D seismic data. *Geo-Marine Letters*, 27(2–4), 155–171.
- Ashi, J., Tokuyama, H., Taira, A. 2002. Distribution of methane hydrate BSRs and its implication for the prism growth in the Nankai Trough. *Marine Geology*, 187(1–2), 177–191.
- Baba, K., Yamada, Y. 2004. BSRs and Associated Reflections as an Indicator of Gas Hydrate and Free Gas Accumulation: An Example of Accretionary Prism and Forearc Basin System along the Nankai Trough, off Central Japan. *Resource Geology*, 54(1), 11–24.
- Bangs, N. L. B. 2005. Upward shifts in the southern Hydrate Ridge gas hydrate stability zone following postglacial warming, offshore Oregon. *Journal of Geophysical Research*, 110(B3).
- Bangs, N. L., Hornbach, M. J., Berndt, C. 2011. The mechanics of intermittent methane venting at South Hydrate Ridge inferred from 4D seismic surveying. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1–2), 105–112.
- Belousov, V. V., Volvovsky, B. S. 1989. Structure and Evolution of the Earths’s Crust and Upper Mantle of the Black Sea, Nauka, Moscow (in Russian).
- Bialas, J., Klauke, I., Haeckel, M. 2014. Fs Maria S. Merian Fahrbericht / Cruise Report MSM34/1 & 2 - SUGAR Site; Varna – Varna.
- Chazallon, B., Rodriguez, C., Ruffine, L., Carpentier, Y., Donval, J. P., Ker, S., Riboulot, V. 2021. Characterizing the variability of natural gas hydrate composition from a selected site of the Western Black Sea, off Romania. *Marine and Petroleum Geology*, 124, 104785.
- Cook, A. E., Goldberg, D. S., Malinverno, A. 2014. Natural gas hydrates occupying fractures: A focus on non-vent sites on the Indian continental margin and the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 58, 278–291.
- Çifci, G. 2020. Gas hydrates: The energy source of the near future. *Belt and Road Initiative Quarterly*, 2(1), 63-76.
- Dondurur, D. 2021. Gaz Hidratlar ve Çevre Denizlerimizde Gaz Hidrat Potansiyeli, Türkiye’nin Ekstrem Deniz Araştırmaları Ortamları. *Türk Deniz Araştırmaları Vakfı (TÜDAV)*, 2021, 52-75.
- Du Fornel, E. 1999. Architecture du cône profond du Danube ensismique reflexion 2D. MSc dissertation Université Montpellier II: 46 pp.
- Dugan, B. 2012. Petrophysical and consolidation behavior of mass transport deposits from the northern Gulf of Mexico, IODP Expedition 308. *Marine Geology*, 315–318, 98–107.
- Finetti, I., Bricchi, G., Del Ben, A., Pipan, M., Xuan, Z. 1988. Geophysical study of the Black Sea. *Bolletino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 30, 197–324.
- Foucher, J. P., Nouzé, H., Henry, P. 2002. Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope. *Marine Geology*, 187(1–2), 161–175.
- Ginsburg, G. D. 1998. Submarine Gas Hydrates. *VNIIOkeangeologia*.
- Haacke, R. R., Westbrook, G. K., Hyndman, R. D. 2007. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3–4), 407–420.
- Hillman, J. I., Klauke, I., Bialas, J., Feldman, H., Drexler, T., Awwiller, D., Atgin, O., Çifci, G., Badhani, S. 2018. Gas migration pathways and slope failures in the Danube Fan, Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 92, 1069–1084.
- Holbrook, W. S., Hoskins, H., Wood, W. T., Stephen, R. A., Lizarralde, D. 1996. Methane Hydrate and Free Gas on the Blake Ridge from Vertical Seismic Profiling. *Science*, 273(5283), 1840–1843.
- Hornbach, M. J., Manga, M., Genecov, M., Valdez, R., Miller, P., Saffer, D., Adelstein, E., Lafuerza, S., Adachi, T., Breitzkreuz, C., Jutzeler, M., Le Friant, A., Ishizuka, O., Morgan, S., Slagle, A., Talling, P. J., Fraass, A., Watt, S. F. L., Stroncik, N. A., Wang, F. 2015. Permeability and pressure measurements in Lesser Antilles submarine slides: Evidence for pressure-driven slow-slip failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 7986–8011.
- Horozal, Ş., Lee, G. H., Yi, B. Y., Yoo, D. G., Park, K. P., Lee, H. Y., Kim, W., Kim, H. J., Lee, K. 2009. Seismic indicators of gas hydrate and associated

- gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the bottom-simulating reflector. *Marine Geology*, 258(1–4), 126–138.
- Hyndman, R. D., Davis, E. E. 1992. A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B5), 7025–7041.
- Ivanov, M., Limonov, A., van Weering, T. 1996. Comparative characteristics of the Black Sea and Mediterranean Ridge mud volcanoes. *Marine Geology*, 132(1–4), 253–271.
- Kazmin, V. G., Schreider, A. A., Bulychev, A. A. 2000. Early stages of evolution of the Black Sea. Geological Society, London, Special Publications, 173(1), 235-249.
- Küçük, H. M. 2016. Batı Karadeniz Zonguldak-Amasra açıklarında gaz ve gaz hidratların jeolojik ve jeofizik yöntemlerle araştırılması, Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Kvenvolden, K. A. 1995. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate. *Organic Geochemistry*, 23(11–12), 997–1008.
- Lee, J. Y., Ryu, B. J., Yun, T. S., Lee, J., Cho, G. C. 2011. Review on the gas hydrate development and production as a new energy resource. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 689–696.
- Lerche, I., Bagirov, E. 1998. Guide to gas hydrate stability in various geological settings. *Marine and Petroleum Geology*, 15 (1), 427-437.
- Lericolais, G., Bourget, J., Popescu, I., Jermannaud, P., Mulder, T., Jorry, S., Panin, N. 2013. Late Quaternary deep-sea sedimentation in the western Black Sea: New insights from recent coring and seismic data in the deep basin. *Global and Planetary Change*, 103, 232–247.
- Milkov, A., Sassen, R. 2000. Thickness of the gas hydrate stability zone, Gulf of Mexico continental slope. *Marine and Petroleum Geology*, 17(9), 981–991.
- Minshull, T. A., Marín-Moreno, H., Betlem, P., Bialas, J., Bünz, S., Burwicz, E., Cameselle, A. L., Çifçi, G., Giustiniani, M., Hillman, J., Hölz, S., Hopper, J. R., Ion, G., León, R., Magalhães, V., Makovsky, Y., Mata, P., Max, M. D., Nielsen, T., Vázquez, J. 2020. Hydrate occurrence in Europe: A review of available evidence. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 735–764.
- Nasif, A., Özel, E., Dondurur, D. 2020. Seismic identification of gas hydrates: a case study from Sakarya Canyon, western Black Sea. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 29(3), 434-454.
- Nikishin, A. M., Okay, A. I., Tüysüz, O., Demirer, A., Amelin, N., Petrov, E. 2015. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 1: Basins structure and fill. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 638–655.
- Özel, Z., Dondurur, D., Klaucke, I. 2022. Seismic and geoacoustic evidence for subsurface fluid flow and seepage offshore Akçakoca, Southwestern Black Sea, Turkey. *Geo-Marine Letters*, 42(4).
- Pape, T., Bahr, A., Klapp, S. A., Abegg, F., Bohrmann, G. 2011. High-intensity gas seepage causes rafting of shallow gas hydrates in the southeastern Black Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1–2), 35–46.
- Pape, T., Haeckel, M., Riedel, M., Kölling, M., Schmidt, M., Wallmann, K., Bohrmann, G. 2020. Formation pathways of light hydrocarbons in deep sediments of the Danube deep-sea fan, Western Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 122, 104627.
- Poort, J., Vassilev, A., Dimitrov, L. 2005. Did postglacial catastrophic flooding trigger massive changes in the Black Sea gas hydrate reservoir? *Terra Nova*, 17(2), 135–140.
- Popescu, I., Lericolais, G., Panin, N., Wong, H., Droz, L. 2001. Late Quaternary channel avulsions on the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Marine Geology*, 179(1–2), 25–37.
- Popescu, I., De Batist, M., Lericolais, G., Nouzé, H., Poort, J., Panin, N., Versteeg, W., Gillet, H. 2006. Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions. *Marine Geology*, 227(3–4), 163–176.
- Posewang, J., Mienert, J. 1999. The enigma of double BSRs: indicators for changes in the hydrate stability field? *Geo-Marine Letters*, 19(1–2), 157–163.
- Reece, J. S., Flemings, P. B., Dugan, B., Long, H., Germaine, J. T. 2012. Permeability-porosity relationships of shallow mudstones in the Ursa Basin, northern deepwater Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B12), n/a-n/a.
- Riedel, M., Bahk, J. J., Scholz, N., Ryu, B. J., Yoo, D. G., Kim, W., Kim, G. 2012. Mass-transport deposits and gas hydrate occurrences in the Ulleung Basin, East Sea – Part 2: Gas hydrate content and fracture-induced anisotropy. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1), 75–90.
- Robinson, A., Rudat, J., Banks, C., Wiles, R. 1996. Petroleum geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 13(2), 195–223.
- Römer, M., Sahling, H., Pape, T., Bahr, A., Feseker, T., Wintersteller, P., Bohrmann, G. 2012. Geological control and magnitude of methane ebullition from

- a high-flow seep area in the Black Sea—the Kerch seep area. *Marine Geology*, 319–322, 57–74.
- Sloan, E. D., Koh, C. A. 2007. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. CRC Press.
- Starostenko, V., Buryanov, V., Makarenko, I., Rusakov, O., Stephenson, R., Nikishin, A., Georgiev, G., Gerasimov, M., Dimitriu, R., Legostaeva, O., Pchelarov, V., Sava, C. 2004. Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. *Tectonophysics*, 381(1–4), 211–233.
- Sun, Q., Alves, T. 2020. Petrophysics of fine-grained mass-transport deposits: A critical review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192, 104291.
- Sun, Q., Alves, T. M., Lu, X., Chen, C., Xie, X. 2018. True Volumes of Slope Failure Estimated From a Quaternary Mass-Transport Deposit in the Northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 45(6), 2642–2651.
- Thakur, N. K., Rajput, S. 2010. *Exploration of Gas Hydrates*. Springer Science and Business Media.
- Tréhu, A., Long, P., Torres, M., Bohrmann, G., Rack, F., Collett, T., Goldberg, D., Milkov, A., Riedel, M., Schultheiss, P., Bangs, N., Barr, S., Borowski, W., Claypool, G., Delwiche, M., Dickens, G., Gracia, E., Guerin, G., Holland, M., Weinberger, J. 2004. Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(3–4), 845–862.
- Tugolesov, D. A., Gorshkov, A. S., Meysner, L. B., Soloviov, V. V., Khakhalev, E. M., Akilova, Yu. V., Akentieva, G. P., Gabidulina, T. I., Kolomeytseva, S. A., Kochneva, T. Yu., Pereturina, I. G., Plashihina, I. N. 1985. *Tectonics of the Mesozoic Sediments of the Black Sea Basin*. Moscow, Nedra [in Russian].
- Vassiliev, A., Dimitrov, L. 2003. Model Evaluation of the Black Sea Gas Hydrates. *Geophysique Oceanologie*.
- Winguth, C., Wong, H., Panin, N., Dinu, C., Georgescu, P., Ungureanu, G., Krugliakov, V., Podshuveit, V. 2000. Upper Quaternary water level history and sedimentation in the northwestern Black Sea. *Marine Geology*, 167(1–2), 127–146.
- Wong, H. K., Winguth, C., Panin, N., Dinu, C., Wollschläger, M., Georgescu, P., Ungureanu, G., Krugliakov, V. V., Podshuveit, V. 1997. The Danube and Dniepr fans, morphostructure, and evolution. *GeoEcoMarina*, 2, 77–102.
- Woodside, J. M., Ivanov, M. K., Limonov, A. F. 1997. Neotectonics and Fluid Flow Through Seafloor Sediments in the Eastern Mediterranean and Black Seas: Eastern Mediterranean Sea.
- Yefremova, A. G., Zhizhchenko, B. P. 1974. Occurrence of crystal hydrates of gas in sediments of modern marine basins. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 214, 1179–1181.
- Yoo, D. G., Kang, N. K., Yi, B. Y., Kim, G. Y., Ryu, B. J., Lee, K., Lee, G. H., Riedel, M. 2013. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 47, 236–247.
- Zander, T., Haeckel, M., Berndt, C., Chi, W. C., Klauke, I., Bialas, J., Klaeschen, D., Koch, S., Atgin, O. 2017. On the origin of multiple BSRs in the Danube deep-sea fan, Black Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 462, 15–25.
- Zhang, X., Kong, G., Li, H., Wang, L., Yang, Q. 2022. Thermal conductivity of marine sediments influenced by porosity and temperature in the South China Sea. *Ocean Engineering*, 260, 111992.

