



## Deniz Sismiği Verilerinde Düşey Ayrırlılığın Artırılmasında Uygulanan Karşılaştırmalı Yöntemler

### *Comparative Methods Applied to Increase Vertical Resolution of Marine Seismic Data*

Aslıhan NASIF<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, İzmir, Türkiye

Geliş (*received*): 24 Ocak (January) 2024 Kabul (*accepted*): 10 Mayıs (May) 2024

#### ÖZ

Sismik sinyal yer içinde yayılırken, soğrulma etkisi nedeniyle yüksek frekanslarını kaybeder. Bu durum verinin özellikle derinlerde düşey ayrırlılığının azalmasına neden olur. Yer içindeki hidrokarbon birikimlerinin birçoğunun fiziksel boyutları, toplanan sismik verinin çözünürlük sınırlarının altında kaldığından, sismik verinin zamansal ayrırlılığının artırılması önem taşımaktadır. Düşey ayrırlılığın yüksek olması, sismik verilerle ince tabakaların ayırt edilebilmesini sağlar.

Bu çalışmada yığma sonrası sismik verinin zamansal ayrırlılığını artırmak için iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik izin 1. türevi, maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, adaptif dekonvolüsyon, Q dengeleme, zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW) ve spektral biçimlendirme yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uygulamalar, her bir yöntemin kendine özgü avantaj ve dezavantajlarının olduğunu göstermiştir. Sismik verideki yansıma genliklerini belirginleştiren ve süreklilikte en fazla iyileştirme yapan, aynı zamanda yansımaların salınımlı görünümünü giderme konusunda en başarılı yöntemler iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile TVSW'dir. Yansıma sürekliliği ve salınım giderme konularında en başarısız yöntemin ise spektral biçimlendirme olduğu görülmüştür. Kullanılan tüm yöntemler, sismik verinin spektrumlarında oldukça belirgin genişleme oluşturmuştur.

İğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonları ile spektral biçimlendirme yöntemlerinin birincil yansımalara paralel uzanan yüksek frekanslı ve düşük genlikli yapay olaylar ürettiği görülmüştür. Bu yapay olayların genlikleri birincil yansımalara göre çok küçük olduğundan, olasılıkla sismik veride birincil yansıma genlikleri tarafından bastırılmaktadırlar. TVSW, adaptif dekonvolüsyon ve 1. türev uygulaması dışındaki tüm yöntemler belirgin gelişigüzel gürültü üretmektedir. Bu nedenle bu üç yöntem dışındaki uygulamaların ardından sismik veriye bant-geçişli süzgeç uygulaması önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dekonvolüsyon, deniz sismiği, düşey ayrırlılık, sismik veri işlem, spektral bant

**ABSTRACT**

As seismic signal propagates within the Earth, it loses high frequencies due to absorption effects. This phenomenon leads to a decrease in vertical resolution, particularly in deeper layers. Many hydrocarbon reservoirs are below the seismic data resolution limits depending on their depths. Therefore, increasing the temporal resolution of seismic data is crucial, and high vertical resolution allows us differentiation of thin layers. In this study, various techniques were employed to enhance the temporal resolution of post-stack seismic data, including spiking deconvolution, first derivative of the seismic trace, maximum entropy (Burg) deconvolution, adaptive deconvolution, Q compensation, time-variant spectral whitening (TVSW), and spectral shaping methods, and their results were compared. Applications demonstrated that each method has its own advantages and disadvantages. Spiking and maximum entropy deconvolutions along with TVSW were found to significantly enhance reflection amplitudes and provide the most improvement in trace-by-trace consistency while effectively removing ringy appearances of reflections. The least successful method in terms of reflection continuity and removal of ringy character was spectral shaping. All applied methods resulted in significant widening of spectra in the seismic data.

It was observed that spiking and maximum entropy deconvolutions, along with spectral shaping, produced high-frequency and low-amplitude artificial events parallel to primary reflections. Since the amplitudes of these artificial events are much smaller compared to primary reflections, they are likely suppressed by the amplitudes of primary reflections in the seismic data. Except for TVSW, adaptive deconvolution, and first derivative, all other methods introduce significant random noise. Therefore, it is recommended to apply band-pass filtering to seismic data following the implementation of the methods except for TVSW, adaptive deconvolution, and first derivative.

**Keywords:** Deconvolution, marine seismic, temporal resolution, seismic data processing, spectral band.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1425312>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: aslihan.nasif@deu.edu.tr

**GİRİŞ**

Sismik veri işlemin nihai hedefi, yer içini en iyi temsil eden sismik görüntüyü elde etmektir. En iyi sismik görüntü ise, tabakaların gerçek yerlerinde ve tabaka sınırlarının keskin şekilde görüldüğü, en yüksek ayrımlılıktaki sismik kesit olarak tanımlanabilir (Al-Moughraby, 2004; Sheriff ve Geldart, 1995). Sismik yansıma verilerinin ayrımlılığı, yatay ve düşey ayrımlılık olarak tanımlanır ve sismik veri ile yatay ve düşey yönde ayırt edilebilecek en dar ve en ince tabakanın büyüklüğünü ifade eder (Knapp, 1990; Kallweit ve Wood, 1982; Chopra vd., 2006). Yatay ayrımlılık yapılar arasındaki uzaklığa bağlıdır. Fresnel zonu ile tanımlanır ve sismik dalga hızı, frekans ve derinliğin bir

fonksiyonudur. Yatay ayrımlılık migrasyon işlemiyle iyileştirilir. Düşey ayrımlılığın yüksek olması, sismik verilerle ince tabakaların ayırt edilebilmesini sağlar. Düşey ayrımlılık sismik dalga hızı, frekans veya dalga boyunun bir fonksiyonudur ve sismik dalgacığı sıkıştırarak periyodunun azaltılmasını (veya kullanışlı frekans bandının genişletilmesini) hedefleyen dekonvolüsyon gibi yöntemlerle artırılabilir (Choi vd., 2019).

Deniz sismiğinde amaca yönelik olarak kullanılan farklı türden enerji kaynakları mevcuttur. Bunlardan transduser kullanılarak üretilen sinyaller ortalama 3.5 kHz merkez

frekansındadır ve mühendislik sismiği olarak adlandırılan bu sistemlerin düşey ayrımlılığı 10 cm, fakat etki derinliği (penetrasyonu) ortalama 30 m civarındadır. Genellikle tek kanallı deniz sismiği çalışmalarında kullanılan sparker kaynağı ise ortalama 100-1000 Hz aralığında sinyal üretir. Etki derinliği 200 m civarında olan bu kaynağın düşey ayrımlılığı ortalama 50 cm'dir.

Çok kanallı sismik yansıma çalışmalarında kullanılan sismik enerji kaynağı ise hava tabancası olup, su içerisine ani ve yüksek basınçlı hava boşaltılması ile sismik sinyal üretir. Petrol endüstrisi tarafından kullanılan hava tabancaları 5-200 Hz aralığında sismik sinyal üreten güvenilir ve tekrarlanabilir sismik kaynaklardır (Dragoset, 2000; Dondurur, 2018). Bu çalışmalarda kullanılan hava tabancası enerji kaynaklarının, yeterli ayrımlılığın sağlanması için geniş frekans bantlı ve ortalama 100 Hz civarında baskın frekansa sahip sinyal üretmesi istenir (Dondurur, 2009). Kullanılan hava tabancasının hacmi ile üretilen sinyalin frekans içeriği ters orantılı olup, küçük hava tabancası hacmi yüksek frekans içeriği ve yüksek ayrımlılık, ancak düşük etki derinliği anlamına gelir. Bunun dışında, çok kanallı sismik çalışmalarda alıcı kablo (streamer) derinliği, kaydedilen sinyalin frekans bandını doğrudan etkiler. Hayalet yansıma (ghost) girişiminden oluşan frekans boşluğu (notch) nedeniyle, alıcı kablo ne kadar yüze yakın çekilirse, o kadar geniş bantlı bir spektruma sahip sinyal kaydedilir ve düşey ayrımlılık o denli yüksek olur.

Sismik sinyal yer içinde yayılırken, yer içinin soğurmasından dolayı sismik izin özellikle yüksek frekanslı bileşenleri hızlı bir şekilde sönmüleri. Bu nedenle kesitin derin kısımlarında düşey ayrımlılık daima daha düşüktür. Yüksek frekanslarının sönmülmesi nedeniyle sinyal periyodunun artması, dalgacığın yan salınımları ve ortamın karmaşık

jeolojik yapısından dolayı, sismik veriler girişimli bir karaktere sahiptir (Karslı, 2002; Berkhout, 1984; Knapp, 1993). Sismik verideki bu girişim etkisini gidermek ve ince tabakaları ayırt edebilmek için, içnecikleştirme dekonvolüsyonu başta olmak üzere, verinin zamansal ayrımlılığını artıran birçok farklı veri işlem yöntemi uygulanır.

Son yıllarda, sismik verinin spektral bant genişliğini artırmak için dekonvolüsyon yöntemleri başta olmak üzere birçok farklı teknik önerilmiştir (örn., Sacchi ve Ulrych 2007; Nose-Filho vd., 2016; Wang vd., 2022; Manenti vd., 2018; Naghadeh ve Morley, 2017; Karslı, 2006; Karslı vd., 2006; Karslı, 2011; Karslı, 2002; Zhang vd., 2023; Tian vd., 2022; Jo vd., 2022; Li vd., 2020). Her biri farklı matematik ve fizik temellerine dayanan bu yaklaşımların birbirine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur ve uygulama öncesi en uygun yöntemin ve yöntemle uygun parametrelerin seçilmesi için çok sayıda test yapılması gerekebilir. Ayrımlılık artırma amaçlı en çok kullanılan teknik olan dekonvolüsyon yöntemleri, sismik verinin frekans bandını genişletirken, spektral bandın dışındaki frekansları yükseltmez ve bant genişliği açısından sınırlı sonuçlar üretir (Karslı, 2011; Walker ve Ulrych 1983; Karslı 2006).

Bu çalışmanın amacı, G1 türü hava tabancası ile toplanmış çok kanallı bir sismik yansıma kesitinin düşey ayrımlılığının artırılması amacıyla uygulanabilecek farklı yöntemleri karşılaştırmaktır. Farklı yaklaşımların gereksinim duyduğu uygun parametre seçimleri konusundaki detayların ortaya konulabilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, migrasyon sonrası bir sismik kesitin düşey ayrımlılığının artırılmasında uygulanan adımların ve parametrelerin analizi ve uygulamalarla ortaya konulmasını kapsamaktadır. Uygulamaların etkinliğinin anlaşılabilmesi için, her bir yöntem sentetik veri üzerinde de uygulanmıştır. Farklı yöntemlerin

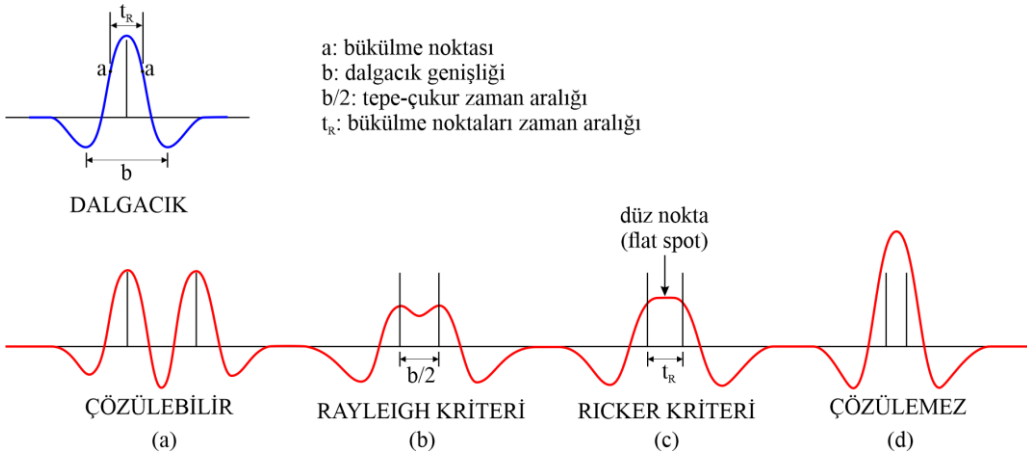
ayrımllığı artırmadaki etkinliği ve sismik yoruma sunacağı katkı, uygulamaların ardından karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

### SİSMİK VERİNİN ZAMANSAL AYRIMLILIĞI

Ayırımllık, ince bir tabakanın üst ve alt yansımalarının sismik veride ayrı yansımalar olarak ayırt edilebilmesi anlamına gelir (Kallweit ve Wood, 1982). Dalgacığın genişliği (periyodu) yeterince küçük olduğunda, ardışık iki yansıma sismik kesitte birbirinden ayırt edilebilir (Şekil 1a). Koefoed (1981), bir sismik sinyalin düşey çözünürlük gücünün üç öge tarafından kontrol edildiğini öne sürmüştür: ana salınım genişliği, yan salınım oranı ve yan kuyruk salınımları. Şekil 1'de verildiği gibi sıfır fazlı sinyaller üzerinde yapılan analizler, diğer öğelerden birini bozmak pahasına bu üç öğeden herhangi birinde bir iyileştirme yapılabileceğini göstermiştir. Sismik verinin düşey ayrımllığının tanımlanması ile ilgili olarak, Rayleigh (Jenkins ve White, 1957), Ricker (Ricker, 1953) ve Widess (Widess, 1973) kriteri olmak üzere üç kriter öne sürülmüştür. Rayleigh kriteri, sismik dalgacığın tepe-çukur ayırımının tanımlanmasına dayanır ve ardışık yansımalarından alınan dalgacıkların maksimum ve minimumları arasındaki zaman farkı, ayrımllık limiti olarak tanımlanır (Şekil 1b). Diğer bir deyişle, iki ara yüzey arasındaki mesafe, bunlardan alınan yansımaların tepe-çukur ayırımına eşit veya daha büyükse, bu iki ara yüzey sismik veri ile ayırt edilebilir. Rayleigh kriterinin limit değeri, dalgacığın birinci türevi alınarak bulunabilir (Kallweit ve Wood, 1982). Ricker kriterine göre, her iki dalgacık birbirine yaklaştıkça, ana piklerin genliği azalır ve sonunda tek bir ana maksimum haline gelir. Ricker (1953) ayrımllık limitini, her iki pik birbirine yaklaştığında oluşan sıfır eğriselliğe sahip maksimumun oluştuğu mesafe olarak tanımlamış, bu mesafede oluşan görüntü düz nokta (flat spot) olarak

adlandırılmıştır (Şekil 1c). Bu limit değeri, dalgacığın iki kez türevi alınarak bulunabilir (Kallweit ve Wood, 1982). Rayleigh ve Ricker kriterlerinin ötesinde, birbirine daha yakın mesafedeki iki ara yüzey ise sismik veri ile ayırt edilemez (Şekil 1d).

Düşey ayrımllığı etkileyen en önemli parametre sismik sinyalin dalga boyu olup,  $\lambda = V/f$  bağıntısından hesaplanabilir. Burada  $V$  sismik dalga hızı (m/s),  $f$  ise sinyalin baskın frekansdır (Hz). Widess kriterine göre, tabaka kalınlığı dalgacığın baskın frekansına karşılık gelen dalga boyunun 1/8'i kadardır. (Widess, 1973) tarafından önerilen bu kriter, homojen bir ortamdaki basitleştirilmiş bir kama modeline dayanmaktadır. Bu model, kamanın üstüne ve altına karşılık gelen eşit ve zıt yansıma katsayılarından oluşan bir modeldir. Widess'in kama modeli birçok durumda gerçek yeraltını temsil etmemektedir ve pratik uygulamalar, genellikle yanlış genlik girişimi (tuning) eğrilerinin elde edilmesine yol açmaktadır. Ayrıca, pratik uygulamalar, teorik çözünürlük sınırlarının Widess modelinin önerdiğinden çok daha iyi olduğunu göstermektedir (Chopra vd., 2006). Bununla birlikte, Ricker dalgacıkları için düşey çözünürlük sınırı ise yaklaşık olarak dalga boyunun 1/4'ü ( $\lambda/4$ ) şeklinde ifade edilebilir ve bu sınır "tuning kalınlığı" olarak da bilinir (Faleide vd., 2021). Rayleigh kriteri'ne göre  $\lambda/4$ 'den daha ince tabakalar ise sismik veri ile ayırt edilemezler. Daha kısa dalga boylu sismik sinyal daha yüksek çözüm gücüne sahiptir ve daha ince tabakalar ayırt edilebilir. Daha kısa boylu sismik sinyal elde etmenin yolu ise sinyal frekansını artırmaktır. Soğurulma nedeniyle sismik sinyalin frekansı derinlikle azalır ve sismik dalga hızı da derinlikle artar. Dolayısıyla derinliğin artması yatay ve düşey ayrımllığı azaltır. Frekans arttıkça yatay ve düşey ayrımllık artar.



**Şekil 1.** (a) Birbirinden yeterli uzaklıktaki iki ara yüzeyden alınan iki ayrı yansıma, (b) ara yüzeyler arası mesafe tepe-çukur zaman aralığı ( $b/2$ ) kadarsa Rayleigh kriteri oluşur. (c) Ara yüzeyler arası mesafe, dalgacığın eğriselliğinin değiştiği noktaların zaman aralığı kadar ( $t_R$ ) olduğunda ise Ricker kriteri oluşur. (d) Birbirine daha yakın mesafedeki iki ara yüzey ise sismik veri ile ayırt edilemez (Kallweit ve Wood, 1982).

**Figure 1.** (a) Two separate reflections obtained from two interfaces at sufficient distances, (b) Rayleigh criterion occurs when the distance between interfaces is half the peak-trough time interval ( $b/2$ ). (c) Ricker criterion occurs when the distance between interfaces is equal to the time interval at which the curvature of the wavelet changes ( $t_R$ ). (d) Two interfaces closer to each other are indistinguishable in seismic data (Kallweit and Wood, 1982).

## VERİ

Bu çalışmada, ayrımlılık artırma amaçlı uygulamalar, önce bir sıfır ofset sentetik veriye uygulanmıştır. Şekil 2a kullanılan sentetik veriyi, Şekil 2b bunun özilişki kesitini, Şekil 2c ise sentetik kesitin ortalama genlik spektrumunu göstermektedir. Sentetik verinin hesaplanmasında kullanılan derinlik modeli Şekil 2d'de görülmektedir. Model (Karslı vd., 2006) tarafından kullanılan 2B modelin bir kısmından meydana gelmektedir. Kesit, deniz tabanı yansımalarına karşılık gelen eğimli bir yansıma ve bunun altında uzanan yine eğimli bir ara yüzey üzerine onlap yaparak sona eren bir ara yüzeyden meydana gelen bir sentetik veridir. Modellemede dik geliş ışın izleme yöntemi (normal incidence ray tracing) kullanılmış, sentetik izler 40 Hz minimum fazlı kaynak dalgacığı ile hesaplanmıştır. Kullanılan

kaynak dalgacığı Şekil 2d'de verilmiştir. Sentetik veri 1 ms örnekleme aralığı ile hesaplanmış ve iz aralığı 5 m alınmıştır. Veri sadece P dalgası birincil yansımalarını içermekte, S dalgaları, tekrarlılar ve saçılmalar veride bulunmamaktadır. Sentetik kesite küresel açılım genlik düzeltmesi uygulanmıştır. Gerçekçi olması ve uygulanan yöntemlerin gelişigüzel gürültü durumundaki performansını da görebilmek adına, sentetik veriye %10 oranında gelişigüzel gürültü de eklenmiştir.

Gerçek sismik veri olarak, Ege Denizi'nde, Karaburun yarımadası açıklarında toplanmış çok kanallı sismik yansıma verisi kullanılmıştır. Sismik veri, Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'ne bağlı R/V K. Piri Reis araştırma gemisi ile toplanmış olup, veri toplama parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışmada 600 m uzunluğunda

dijital alıcı kablo ve 96 kanallı sismik kayıtçı kullanılmış, atış aralığı 18.75 m alınmıştır. Sismik kaynak olarak Generator-Injector (GI) hava tabancası kullanılmış olup, bu sismik kaynak türü kendi hava kabarcığı gürültüsünü (bubble oscillations) sönmülemektedir. Tüm çalışma sırasında NaviPac bütünleşik navigasyon sistemi ile DGPS alıcısı kullanılmış olup, yatay yöndeki konum hatası 50 cm'nin altındadır.

**Çizelge 1.** Kullanılan çok kanallı sismik hattın veri toplama parametreleri.

**Table 1.** Data acquisition parameters of the multichannel seismics line.

Sistem	NTRS-2
Kanal sayısı	96
Streamer uzunluğu	600 m
Kayıt uzunluğu	3000 ms
Gecikme zamanı	130 ms
Örnekleme aralığı	1 ms
Streamer derinliği	4 m
Atış aralığı	18.75 m
Grup aralığı	6.25 m
Kaynak	GI gun (45+105 inç3)
Kaynak derinliği	3 m
Kaynak basıncı	2000 psi (140 bar)
Minimum ofset	50 m
Bird sayısı	4 adet 5011 DigiBird
Atış sayısı	1161
CDP sayısı	7149
Katlama (fold)	16

Çok kanallı sismik veri, SeisSpace/Promax yazılımı kullanılarak işlenmiş ve veriden yorumlanabilir migrasyon kesiti elde edilmiştir. Veri işlem akışı, verideki gürültülerin tür ve miktarına bağlı olarak uygun şekilde seçilmiştir. Bu aşamada sismik veriye sırasıyla veri yükleme, gecikme zamanı giderme (delay-time correction), geometri tanımlama, spektral

analiz ve bant-geçişli süzgeç (10-220 Hz), üst kısımları silme (top mute), iz ayıklama, f-k eğim süzgeci, tekrarlı bastırma (Surface Related Multiple Elimination, SRME), CDP sıralama, hız analizi (her 500 CDP'de bir), NMO düzeltmesi, yığma, Kirchhoff zaman migrasyonu ve kazanç uygulama (automatic gain control, AGC) işlemleri uygulanmıştır. Şekil 2e, elde edilen final migrasyon kesitinin 800 ms'lik kısmını, Şekil 2f bunun özilişki kesitini, Şekil 2g ise sismik kesitin ortalama genlik spektrumunu vermektedir. Verinin frekans bandı 10-220 Hz arasında değişmekte olup, baskın frekansı 80 Hz civarındadır. Kesitin deniz tabanından itibaren ilk 500 ms'lik kısmında, üst üste yığılmış şekilde, ilerleyen delta yapılarının varlığı (Şekil 2e'de K1-K4) göze çarpmaktadır.

#### ZAMANSAL AYRIMLILIĞIN ARTIRILMASI

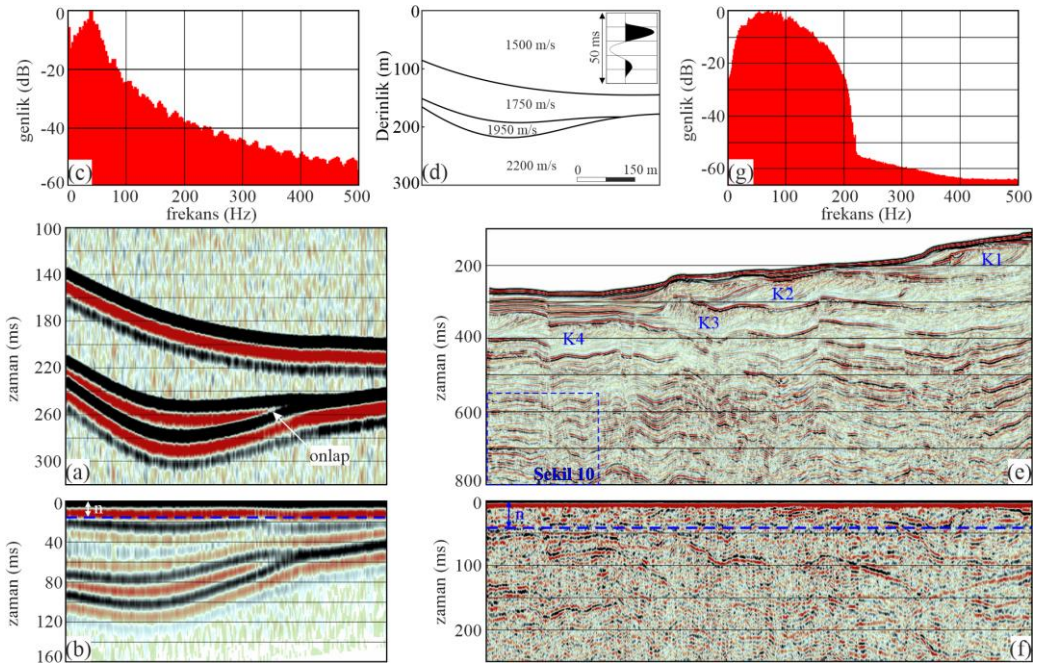
Kaydedilen sismik veri, hayalet yansımaların spektrumda oluşturduğu boşluklar (ghost notches) ve deniz dalgası gürültüsü (swell) genlikleri nedeniyle, spektrumun hem yüksek hem de düşük frekans kısmından bant sınırlı hale gelir (Dondurur, 2018). Sismik verinin zamansal ayrımlılığının artırılması için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler genellikle sismik veriden kaynak dalgacığının etkisini gidererek, verinin genlik spektrumunu düzleştirmeye veya veriden soğurulma etkisini yok ederek zamansal ayrımlılığı artırmaya yönelik yöntemlerdir.

Bu çalışmada, yığma sonrası sismik verinin zamansal ayrımlılığını artırmaya yönelik olarak iğnecikleştirme dekonvolüsyonu (spiking deconvolution), sismik izin 1. türevi, maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, adaptif dekonvolüsyon, Q dengeleme (Q compensation), zaman değişken spektral beyazlatma (time variant spectral whitening, TVSW) ve spektral biçimlendirme (spectral shaping) yöntemleri uygulanmıştır. Bahsi geçen tüm yöntemler, verinin spektral bant



genişliğini artırmaya yönelik uygulamalardır. Dolayısıyla verideki hem düşük ve hem de yüksek frekanslı gürültü genliklerinde artış meydana getirebilirler. Uygulamalar, işlemler sonrasında sentetik verinin düşük frekanslı kısmında yükseltelen genliklerin çıktının ayrımlılığını oldukça düşürdüğünü göstermiştir. Bu nedenle sentetik veriye işlemler sonrası 6

Hz yüksek geçişli süzgeç uygulanmıştır. Gerçek sismik veri ise her bir işlem sonrası 10-220 Hz bant-geçişli süzgeç ile süzölmüştür. Özellikle dekonvolüsyon uygulamalarında, dekonvolüsyon sonrası veriye uygun bir bant-geçişli süzgeç uygulamak standart bir işlem olarak görölmektedir (Yılmaz, 2001).



**Şekil 2.** (a) Kullanılan sıfır ofset sentetik veri, (b) özilişki kesiti ve (c) kesitin ortalama genlik spektrumu, (d) sentetik verinin hesabında kullanılan derinlik modeli ve minimum faz kaynak dalgacığı. (e) Kullanılan çok kanallı sismik migrasyon kesiti, (f) özilişki kesiti ve (g) kesitin ortalama genlik spektrumu. K1-K4 yığılmış formdaki deltaları, özilişki kesitleri üzerinde gösterilen  $n$  ise çalışmada uygulanan dekonvolüsyon yöntemlerinde kullanılan operatör uzunluğunu ifade etmektedir.

**Figure 2.** (a) Synthetic zero-offset data used in the study, (b) its autocorrelation section, (c) average amplitude spectrum, and (d) depth model and minimum-phase source wavelet used in the synthetic data calculation. (e) Multi-channel migrated seismic section, (f) its autocorrelation section, and (g) average amplitude spectrum. K1-K4 represent stacked deltas, and  $n$  in the autocorrelation sections indicates the operator length used in the deconvolution methods applied in the study.

### İğnecikleştirme dekonvolüsyonu (spiking deconvolution)

Dekonvolüsyon, sismik izin içerisinde kaynak sinyalinin etkisini sismik izden kaldırmaya çalışan bir işlemdir. Dondurur (2018)'de belirtildiği üzere, ideal koşullarda genel olarak dekonvolüsyon herhangi bir ize uygulandığında,

- Sismik verinin zamansal (düşey) çözünürlüğünü artırır.
- Kaynak dalgacığını veriden indirir.
- Yansımaların salınımlı karakterini zayıflatır.
- Tekrarlı yansımaları bastırır.
- Geniş bantlı sismik veri elde etmek için genlik spektrumunu düzleştirir.

Konvolüsyonel model teorisine göre (Yılmaz, 2001), kaydedilen sismik iz, kaynak sinyali ile yer içinin yansıma katsayıları serisinin basit bir konvolüsyonundan oluşur. Buna göre, kaydedilen her bir yansıma, sismik kaynak sinyalinin de içerisinde bulundurulur. Eğer sismik veriden kaynak dalgacığının etkisi indirgenebilirse, geriye sadece yer içinin yansıma katsayıları serisi kalacaktır. İğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sadece minimum fazlı sismik verilerde uygun sonuçlar üretmekte olup, giriş verisinin zamanla durağan (stationary) olması ve gürültü bileşeni de içermemesi beklenir (Yılmaz, 2001).

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} \\ a_1 & a_0 & a_1 & \dots & a_{n-2} \\ a_2 & a_1 & a_0 & \dots & a_{n-3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & a_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ h_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Eşitlik (1), n terimden oluşan bir iğnecikleştirme dekonvolüsyon operatörünü (süzgeç katsayılarını) elde etmek için kullanılan normal denklem takımını göstermektedir (Peacock ve

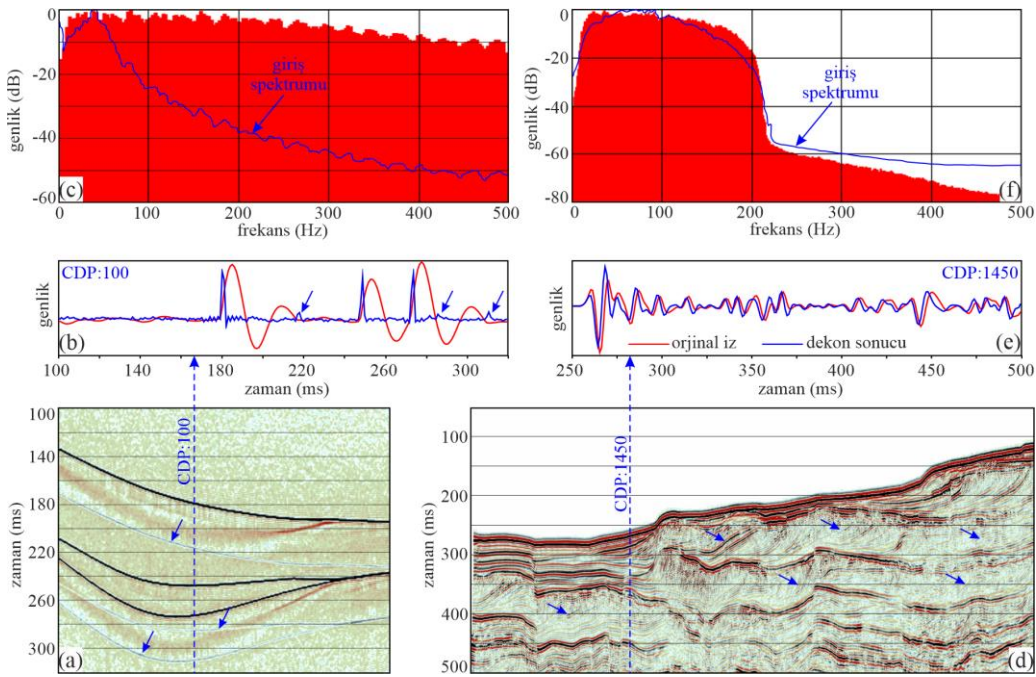
Treitel, 1969). Burada,  $a_i$  sismik dalgacığının özilişkisini ve  $h_i$  dekonvolüsyon süzgeç katsayılarını temsil etmektedir. Eşitlik (1)'deki ifade, "normal denklemler" olarak bilinir (Robinson ve Treitel, 1967). Bu simetrik özilişki matrisine "Toeplitz matrisi" denir ve Levinson algoritması ile çözülebilir. Eşitlik (1) çözülerek elde edilen  $h_i$  katsayıları, giriş sismik izi ile konvole edilerek iğnecikleştirme dekonvolüsyonu işlemi gerçekleştirilir. Günümüzde bu yöntemi kullanan dekonvolüsyon yaklaşımları Wiener-Levinson algoritması olarak bilinirler. İstatiksel olarak kaydedilen sismik izin özilişkisinin, sismik dalgacığının özilişkisine yaklaşık benzer olduğu ilk geçiş zaman paketinin uzunluğu, "operatör uzunluğu" olarak bilinir ve iğnecikleştirme dekonvolüsyonunun belirlenmesi gereken en önemli parametresidir (Yılmaz, 2001).

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan iğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 3'de verilmiştir. Dekonvolüsyon işleminde operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek ilk geçici genlik paketinin zaman uzunluğuna göre belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. İğnecikleştirme dekonvolüsyonunun, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 3a). Şekil 3b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, işlemin yansımaları bir iğneciğe dönüştürdüğünü göstermektedir. Her bir yansıma dalgacığının periyodu kısalmış, frekans bandı genişlemiştir, bunun sonucu olarak onlap kesilmesi çok daha belirgin hale gelmiştir. Buna karşın, sentetik veriye sadece yüksek geçişli süzgeç uygulandığı için, Şekil 3b'deki çıkış izinde (mavi iz) yüksek frekanslı gürültü de belirgindir. Şekil 3c, orijinal ve dekonvolüsyon sonrası sentetik verinin spektrumlarını karşılaştırmaktadır. Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin



spektrumunda da belirgindir. Dekonvolüsyon sonrası spektrumun genişlediği, Nyquist frekansına kadar (500 Hz) hemen tüm genlik bileşenlerini içerdiği görülebilir. Buna karşın, dekonvolüsyon çıktısında sentetik veride yapay olaylar meydana gelmiştir. Genlikleri oldukça düşük olan bu yapay olaylar birincil yansımalara paralel uzanmakta olup, Şekil 3a ve 3b'de mavi oklarla gösterilmiştir. Yapay olayların uygun olmayan dekonvolüsyon

operatör uzunluğundan meydana gelebileceği düşünüldükçe, bu parametre üzerinde çok sayıda test yapılmıştır. Daha uzun operatör boyları yapay olayların miktarını ve genliğini belirgin şekilde artırdığı gibi, daha kısa operatör boyları ise dekonvolüsyon işlemini etkisiz kılmaktadır. Dolayısıyla, en uygun operatör boyu olarak, Şekil 2b'deki özilişki kesitinden elde edilen değer kullanılmıştır.



**Şekil 3.** (a) İğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) İğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 3.** Spiking deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

Ayrımlılıktaki artış çok kanallı sismik veride de benzer şekildedir. Şekil 3d'de, iğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası delta yapılarının klinofom yansımaları daha belirgin hale

gelmiştir (mavi oklar). Şekil 3e'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 1450. iz, dekonvolüsyon sonrası yansımaların periyodunun bir miktar azaldığını

göstermektedir. Ayrırlılıktaki iyileşme, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası verinin ortalama genlik spektrumu karşılaştırmasında da görülmektedir (Şekil 3f). Spektrum, mevcut frekans bandı olan 10-220 Hz içerisindeki hemen tüm frekans bileşenlerinin genliklerini neredeyse eşdeğer oranda içerir. Ayrıca özellikle sığ kısımlardaki yansımalarda görülen salınımlı karakterin, iğnecikleştirme dekonvolüsyonu sonrası zayıflatıldığı anlaşılmaktadır.

### Sismik izin 1. türevi

Herhangi bir zaman fonksiyonunun türevinin veya integralinin alınması, fonksiyonun baskın frekansının değişmesine neden olur. İntegral işlemi verideki düşük frekansları belirgin hale getirirken, türev işlemi, sismik verilerdeki yüksek frekanslı bileşenlerin genliğini artırarak zamansal ayrırlılığı iyileştirir (Nasıf, 2024). Bunun nedeni, her iki işlemin de verinin spektrumunu ölçekleme özelliğinin olmasıdır.

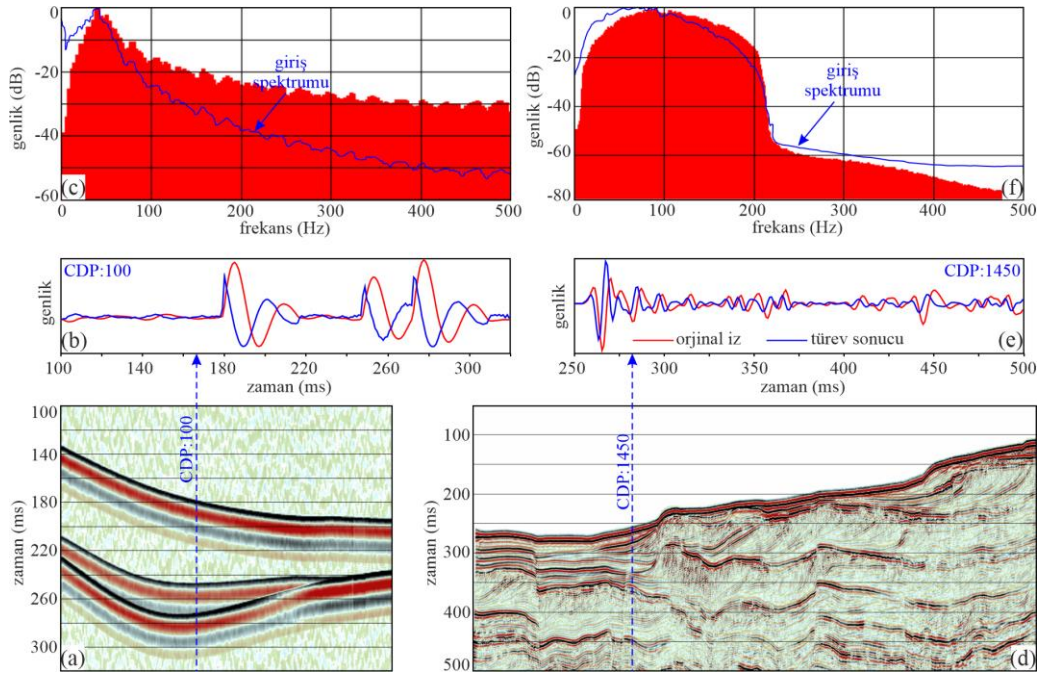
Eğer  $f(t)$  zaman serisinin Fourier dönüşümü  $F(\omega)$  ise,  $f(t)$ 'nin birinci türevinin Fourier dönüşümü (Dondurur, 2018)

$$\mathfrak{F}\left\{\frac{\partial f(t)}{\partial t}\right\} = i\omega F(\omega) \quad (2)$$

şeklinde verilir. Burada  $i=\sqrt{-1}$  ve  $\omega$  ise açısal frekanstır. Buna göre, bir zaman fonksiyonunun türevinin alınmasıyla, Eşitlik (2)'de verilen  $\omega$  çarpan faktörü nedeniyle, ilgili frekans değerlerine dayalı olarak frekans bileşenleri ağırlıklandırılır ve doğrusal bileşen (DC bileşen) yok edilir. Sonuç olarak, daha yüksek frekanslı bileşenlerin genlikleri, daha düşük frekanslara göre göreceli olarak güçlendirilmiş olur. Böylece, sismik verilerin zamansal ayrırlılığı artarken, spektral bant genişliği değişmez (Nasıf, 2024).

Türev uygulamasının çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulama sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Sismik izin zaman türevi oldukça basit bir uygulama olup, herhangi bir parametre seçimine gereksinim duyulmadan uygulanabilir. Türev işleminin, sentetik verinin ayrırlılığını artırdığı görülmektedir (Şekil 4a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi daha belirgin hale gelmiştir. Ayrırlılıktaki artış, Şekil 4b'de verilen türev öncesi ve sonrası 100. İzde ve Şekil 4c'deki sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir. 100 Hz ve üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri türev işlemi sonrası frekansla artan şekilde 10-20 dB arasında yükselmiştir (Şekil 4c). Türev sonrası yansımaların periyodunun azaldığı gözlenmekle birlikte, sentetik veriye uygulanan türev işlemi, sentetik verideki yüksek frekanslı ana yansımaları izleyen düşük frekanslı bir salınım oluşturmuştur (Şekil 4b).

Çok kanallı sismik verideki ayrırlılık artışı da belirgindir. Şekil 4d'deki kesitte ve Şekil 4e'deki 1450. izde, türev işlemi sonrası tüm yansımaların periyodunun azaldığı ve frekansının arttığı, izden ize sürekliliğinin iyileştiği, delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Ayrırlılıktaki artış verinin geç varışlarında da belirgindir (Şekil 4d). Ayrıca yansımaların salınımlı karakterinin azaldığı da görülmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda da bir miktar genişleme görülmektedir (Şekil 4f). Spektrumda, özellikle 100-200 Hz arasındaki frekans bileşenlerinin genlikleri en çok 7 dB oranında yükselmiştir. Ancak giriş ve çıkış verisinin spektrumları karşılaştırıldığında, 10-100 Hz arasındaki kısmın genliğinde de benzer oranda bir azalma söz konusudur (Şekil 4f). Bu durum, türev işleminin frekans ölçekleme etkisi nedeniyle, daha çok yüksek frekanslı bileşenler üzerinde etkili olması nedeniyledir.



**Şekil 4.** (a) Sismik izin 1. zaman türevi işlemi sonrası sıfır ofset sentetik veri, (b) türev işlemi öncesi ve sonrası sentetik verinin 100. izi, (c) türev işlemi öncesi ve sonrası sentetik kesitin ortalama genlik spektrumu. (d) Sismik izin 1. zaman türevi işlemi sonrası çok kanallı sismik veri, (e) türev işlemi öncesi ve sonrası sismik verinin 1450. izi, (f) türev işlemi öncesi ve sonrası sismik verinin ortalama genlik spektrumu.

**Figure 4.** First time derivative results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after time derivative. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after time derivative.

#### Maksimum entropi (burg) dekonvolüsyonu

Maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, entropi yaklaşımını kullanarak verideki rastgele ve öngörülebilir bileşenleri elde eder. Maksimum entropi, spektral içeriği geliştirmeyi amaçlayan alternatif bir spektral kestirim yaklaşımı olup, maksimum entropi kavramına dayanmaktadır (Dondurur, 2018). Bu yaklaşım, ilk kez Burg (1967) tarafından ses dalgası verilerine uygulanmış ve güç spektrumu hesaplamasına farklı bir yaklaşım olan bir güç spektrumu kestirim algoritması kullanarak çözünürlüğü artırmayı amaçlamıştır.

Burg (1967), Eşitlik (1) ile verilen normal denklemlerde özilişki fonksiyonunu hesaplayarak, veriye hem ileri hem de geri yönde uygulanan bir kestirim hata süzgecinin güç değerini en aza indirmiştir. Bu yöntem, bugün maksimum entropi teorisine dayanan ve "Burg algoritması" olarak bilinen güçlü bir spektral dengeleme tekniğidir (Ulrych, 1972). Burg dekonvolüsyonunun matematik temeli Ulrych (1972), Le vd. (2022) ve Theodoridis ve Cooper (1981)'de bulunabilir. Günümüzde yöntem, bazı sınırlamalarına ve dekonvolüsyon sonrası bazı yanıltıcı yapıların ortaya çıkması gibi dezavantajlarına rağmen,

sismik verinin ayrımlılığını artırma amaçlı olarak geniş çapta kullanılmaktadır (Le vd., 2022).

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan Burg dekonvolüsyonu sonuçları, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 5'te verilmiştir. Dekonvolüsyon işlemi operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. Burg dekonvolüsyonunun, iğnecikleştirme dekonvolüsyonunda olduğu gibi, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 5a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi çok daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 5b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, işlemin iz üzerindeki etkilerinin iğnecikleştirme dekonvolüsyonuna benzer olduğunu işaret etmektedir. Burg dekonvolüsyonu da yansımaları bir iğneciğe dönüştürmeye çalışmaktadır. Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da belirgindir (Şekil 5c). Orijinal verinin spektrumu ile karşılaştırıldığında spektrumun iğnecikleştirme dekonvolüsyonu çıktısına benzer şekilde genişlediği, Nyquist frekansına kadar olan yüksek frekanslı bileşenlerin genliklerinin yükseltildiği görülebilir. Buna karşın, sentetik verinin Burg dekonvolüsyonu çıktısında da yapay olaylar meydana gelmiştir. Birincil yansımalar paralel uzanan ve Şekil 5a ve 5b'de mavi oklarla gösterilen bu yapay olayların genlikleri, iğnecikleştirme dekonvolüsyonunda gözlenenlerden de küçüktür.

Çok kanallı sismik verinin de ayrımlılığında artış gözlenmekte olup, Burg dekonvolüsyonu sonrası delta klinoformlarından alınan yansımalar daha belirgindir (Şekil 5d). Yansımaların salınımlı karakteri azalmıştır.

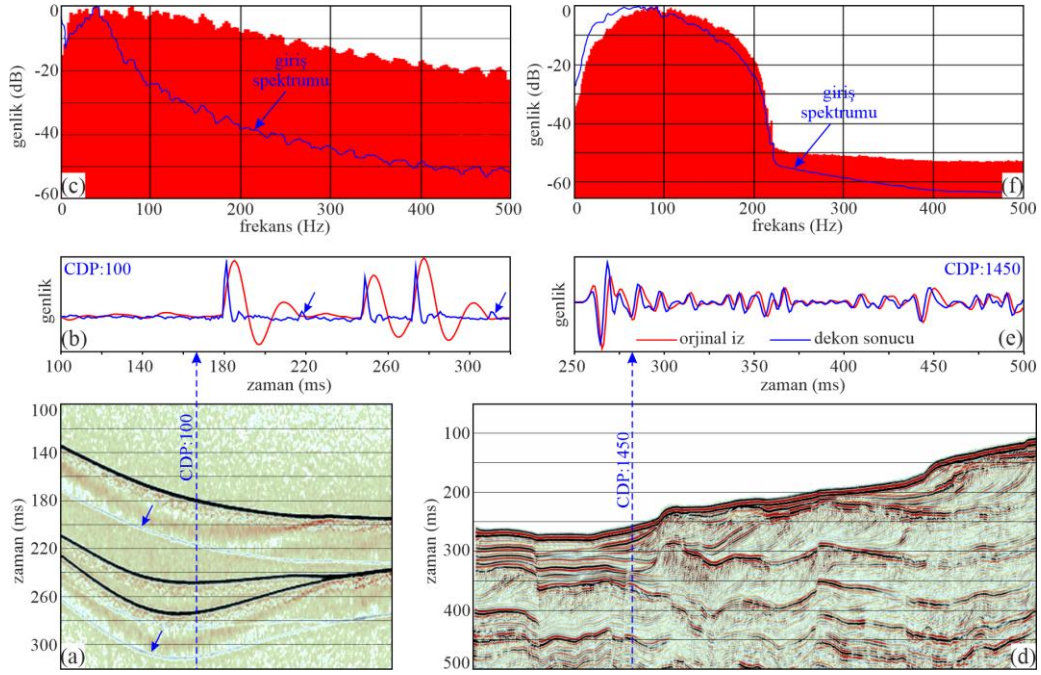
Şekil 5e'de verilen 1450. izin dekonvolüsyon öncesi ve sonrası görünümü, işlemin sismik dalgacığı sıkıştırarak periyodunu azalttığını işaret etmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda da genişleme görülmektedir (Şekil 5f). Spektrumda, özellikle 100 Hz üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri yükselmiş, düzgün değişen bir genlik spektrumu elde edilmiştir.

### Adaptif dekonvolüsyon

Kaydedilen sismik veri genellikle durağan olmayan (nonstationary) özellikler sergiler. Wiener kestirim süzgeci yaklaşımı ile uygulanan iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik verinin ayrımlılığını artırma amaçlı olarak geniş çapta uygulansa da, bu yaklaşım sismik verinin durağan olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle, durağan olmayan sismik veriler için Wiener kestirim süzgeci, her zaman mükemmel performans göstermez (Wang, 1977).

En basit haliyle, Wang (1969), bir durağan olmayan zaman serisinin, her pencerenin neredeyse durağan olduğu bir dizi alt pencereye bölünebileceğini belirtmiştir. Daha sonra, her pencere için farklı bir Wiener süzgeci belirlenir ve uygulanır. L1 veya L2 normu gibi yaklaşımlar kullanan ve farklı temellere dayanan birçok dekonvolüsyon yöntemi önerilmiş ve sismik verilere uygulanmıştır (Chapman ve Barrodale, 1983). Adaptif dekonvolüsyon yöntemleri genellikle verinin istatistiksel yapısının, dekonvolüsyon operatörünü oluşturmak için kullanılan tasarım penceresi boyunca durağan olduğunu varsayar. Süzgeç katsayıları, adaptif bir algoritma kullanılarak giriş izinin her örneği için ayrı ayrı tasarlanır (Griffiths vd., 1977) ve dekonvolüsyon parametreleri uygulama sırasında otomatik olarak güncellenir.





**Şekil 5.** (a) Burg dekonvolüsyonu sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Burg dekonvolüsyonu sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 5.** Burg deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

Adaptif dekonvolüsyon, sürekli olarak zamanla değişen bir kestirim hata süzgeci işlemidir. Bu çalışmada kullanılan yaklaşımda, bir iz örneği, geçmiş iz değerlerinin bir alt kümesinden kestirilir ve gerçek iz değeri ile bu kestirilen değer farkı hata olarak alınır. Eğer hata sıfırsa, kestirim süzgeci bir sonraki örneği kestirmek üzere değiştirilmeden bırakılır. Eğer hata sıfır değilse, her süzgeç katsayısı, hata miktarı, karşılık gelen iz değeri ve adaptasyon değerinin çarpımı ile elde edilen bir değere eşit bir miktarda artırılır.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan adaptif dekonvolüsyon sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte

Şekil 6'da verilmiştir. Dekonvolüsyon işlemi operatör boyu verilerin Şekil 2b ve 2f'de verilen özilişki kesitleri incelenerek belirlenmiş ve sentetik veri için 15 ms, çok kanallı sismik veri için ise 40 ms alınmıştır. Uygulamada, L2 normu iğnecikleştirme dekonvolüsyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Adaptif dekonvolüsyon işleminin, sentetik verinin ayrımlılığını belirgin şekilde artırdığı görülmektedir (Şekil 6a). Yansımaların frekansında ve onlap kesilmesinin sürekliliğinde artış olduğu görülmektedir. Şekil 6b'de verilen dekonvolüsyon öncesi ve sonrası 100. iz, adaptif dekonvolüsyonun sentetik iz üzerindeki etkilerini göstermektedir. İşlem, yansımaların

periyodunu azaltarak sismik dalgacığı sıkıştırmıştır. Ayrıca dalgacığın salınımlı karakterinin azaldığı da görülmektedir. Adaptif dekonvolüsyon sonrası sentetik verinin spektrumunda özellikle 60 Hz'in üzerindeki genliklerde ortalama 10 dB artış mevcuttur (Şekil 6c).

Çok kanallı sismik verinin adaptif dekonvolüsyon çıktısında (Şekil 6d) ve 1450. izin dekonvolüsyon öncesi ve sonrası görünümünde (Şekil 6e) de benzer etkiler mevcut olmakla birlikte, ayrımlılıktaki iyileşme sentetik veri kadar belirgin değildir. Sismik verinin genlik spektrumunda 100 Hz'in üzerindeki frekanslara ait genliklerin bir miktar yükseltildiği ve spektrumun genişlediği anlaşılmaktadır (Şekil 6f). Şekil 2e'de verilen orijinal migrasyon kesiti ile karşılaştırıldığında, adaptif dekonvolüsyon işleminin, çok kanallı sismik verinin geç varışlarındaki zayıf genlikli yansımaları biraz daha güçlendirdiği söylenebilir (Şekil 6d).

#### Q dengeleme (Q compensation)

Sismik sinyalin kaynaktan çıktıktan sonra yer içinde yayılırken maruz kaldığı soğurulma (absorption) etkisi, sinyalin genliğini azaltırken frekans içeriğini de düşürür. Kaynaktan üretilen sinyal genliği  $A_0$  ve kaynaktan  $r$  kadar uzaktaki sinyal genliği ise  $A_r$  olmak üzere, soğurma etkisi

$$A_r = A_0 e^{-\alpha r} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\alpha$  soğurma katsayısıdır ve

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV} \quad (4)$$

ile verilir. Burada  $f$  sinyalin frekansı,  $Q$  kalite faktörü ve  $V$  ise ortamın hızıdır. Eşitlik (3)'e göre, soğurma katsayısı  $\alpha$  ne kadar yüksekse sinyal o denli fazla soğurulur ve Eşitlik (4)'e

göre de, sinyalin yüksek frekansları düşük frekanslara oranla daha fazla sönüme uğrar.

Sismik verilerden kalite faktörü  $Q$ 'yu tahmin etmek önemli bir konu haline gelmiştir (Nunes vd., 2011). Bunun üç önemli nedeni vardır. İlk olarak, eğer  $Q$  tahminleri mevcutsa, sismik verilerin ayrımlılığı artırılabilir ve bu da stratigrafik seviyelerin detaylı bir şekilde yorumlanmasını sağlar. İkinci olarak soğurma, zaman, genlik ve frekansla birlikte sismik nitelik (attribute) sınıflandırmasının temelini oluşturur. Üçüncü olarak da  $Q$  tahminleri, doğrudan hidrokarbon göstergeleri (Direct Hydrocarbon Indicators, DHI) olarak önerilmiştir.

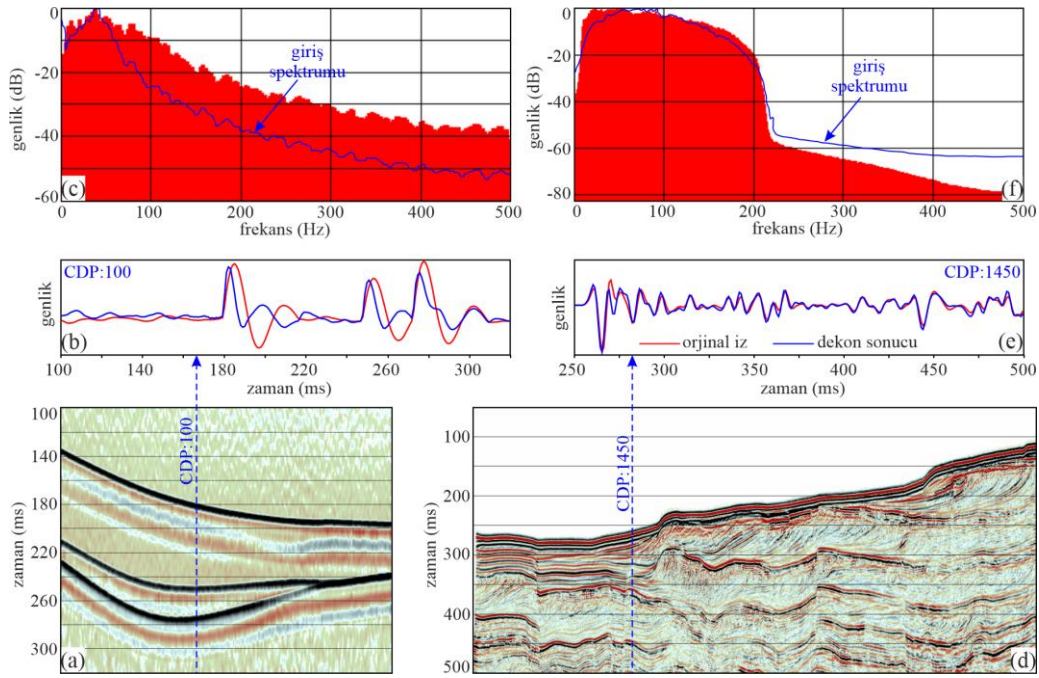
Soğurma katsayısı büyük oranda  $Q$  kalite faktörü tarafından kontrol edilir. Buna karşın, yüzey sismik verilerinden  $Q$  değerini tahmin etmeye yönelik yöntemler hala sınırlıdır (Dasgupta ve Clark, 1998). Tonn (1991), Düşey Sismik Profil (Vertical Seismic Profile, VSP) verilerinden  $Q$  değerini tahmin etmek için kullanılan on farklı yöntemi kapsamlı bir şekilde karşılaştırmıştır. Buna göre, hiçbir yöntem genel olarak diğerinden üstün değildir ve performansları gerçek genlik verilerinin mevcudiyetine ve gürültü içeriğine oldukça bağlıdır (Tonn, 1991; Chen vd., 2014). Gerçek genlik verileri mevcut değilse, en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri spektral oran yöntemidir. Bununla birlikte, frekansla yaklaşık doğrusal bir davranışı olduğu için, soğurma modeli olarak sıklıkla sabit  $Q$  modeli kullanılır. Bu model, ortamın soğurma özelliğini tek bir parametre ile tanımlamak için çok uygun bir modeldir (Nunes vd., 2011).  $Q$  değeri, jeolojide kaya mekaniğinde kullanılan Kayaç Kalite Faktörü (RQD) ile ilişkili olup, yüksek  $Q$  değerleri ortamın masif bir yapıda olduğunu işaret etmektedir. Yüksek  $Q$  değerine sahip ortamlarda sismik dalga daha az soğurulur. Yapılan uygulamalar göstermiştir ki, düşük  $Q$  değerleri için  $Q$  dengeleme işlemi daha yüksek ayrımlı sismik kesitler üretme eğilimi



göstermektedir. Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan Q dengeleme işlemi sonuçları, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 7'de verilmiştir. Q dengeleme işleminde, Q değeri sabit ve sentetik veri için  $Q=60$ , çok kanallı sismik veri için ise  $Q=80$  alınmıştır. Q dengelemenin, sentetik verinin ayrımlılığını oldukça artırdığı görülmektedir (Şekil 7a). Yansımaların frekansı artmış, onlap kesilmesi daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 7b'deki 100. izinin görünümü, sentetik verideki ayrımlılık değişimini ortaya koymaktadır. Buna göre yansımaların periyodu oldukça küçülmüş, yan salınımlarının genlikleri azalmıştır. Bununla birlikte, izdeki yüksek frekanslı gürültü varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 7b).

Ayrımlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir (Şekil 7c). Özellikle 100 Hz ve üzerindeki frekans bileşenlerinin genlikleri Q dengeleme sonrası yükselmiştir.

Çok kanallı sismik verideki ayrımlılık artışı da hem sismik kesitte (Şekil 7d), hem de 1450. iz üzerinde (Şekil 7e) oldukça belirgindir. Sismik kesitte, Q dengeleme sonrası tüm yansımaların periyodunun azaldığı ve frekansının arttığı, izden iz sürekliliğinin iyileştiği, delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği gözlenmektedir. Yansımaların salınımlı



**Şekil 6.** (a) Adaptif dekonvolüsyon sonrası sıfır ofset sentetik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Adaptif dekonvolüsyon sonrası çok kanallı sismik veri, dekonvolüsyon öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 6.** Adaptive deconvolution results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after deconvolution. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after deconvolution.

karakteri azalmıştır. Ayrırlılıktaki iyileşme 1450. izde de yansıma periyotlarının azalması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda 100 Hz'den düşük frekans bileşenlerinin genliklerinde azalma gözlenirken, 100 Hz ve üzerindeki bileşenlerin genlikleri aynı oranda artmıştır (Şekil 7f).

#### **Zaman değişken spektral beyazlatma (time variant spectral whitening)**

Zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW), sismik verilerin spektral genişliğini ve dolayısıyla düşey ayrırlılığını artırmak için kullanılan bir yöntemdir (Yılmaz, 2001; Dondurur, 2009; Dondurur, 2018). TVSW, yer içinin sismik veri üzerindeki soğurma etkilerini gidermek için ilk kez Gibson ve Larner (1982) tarafından önerilmiştir. Yöntem, sinyalin kısmi frekans bantlarının, ait oldukları zarflarının tersiyle çarpılması ve bunların toplanması esasına dayanır (Naghadeh ve Morley, 2017).

Sismik veri farklı geçirim bantlarına sahip süzgeçlerle süzülürse, sismik dalgacığın zamanla durağan olmadığı ve daha yüksek frekansların yeryüzüne yakın kısımlarda (erken varışlarda) bulunduğu görülür. TVSW uygulamasında giriş sinyali, farklı dar geçiş bantlarına sahip bir dizi bant geçiren süzgeç uygulayarak farklı frekans bileşenlerine ayrılır. Yüksek frekans bileşenleri daha hızlı soğurulduğu için düşük frekanslı bileşenlerin genliklerinin zayıflama oranları, orta ve yüksek frekanslı bileşenlerinkinden daha küçüktür. Ayrıştırma sonrasında, giriş sinyalinin farklı frekans bantlarındaki genliklerinin zarflarının tersine eşit olan, farklı kazanç fonksiyonları tanımlanır. Daha sonra bu kazanç fonksiyonları süzgeçlenmiş izlerle çarpılır ve sonuçlar toplanarak çıkış TVSW izi elde edilir. Süzgeç paneli sayısı, giriş verisinin mevcut bant genişliğine göre tasarlanır. TVSW bazen iğnecikleştirme dekonvolüsyondan sonra, daha genel olarak da zamansal ayrırlılığını artırmak için son işlem olarak migrasyon kesitlerine

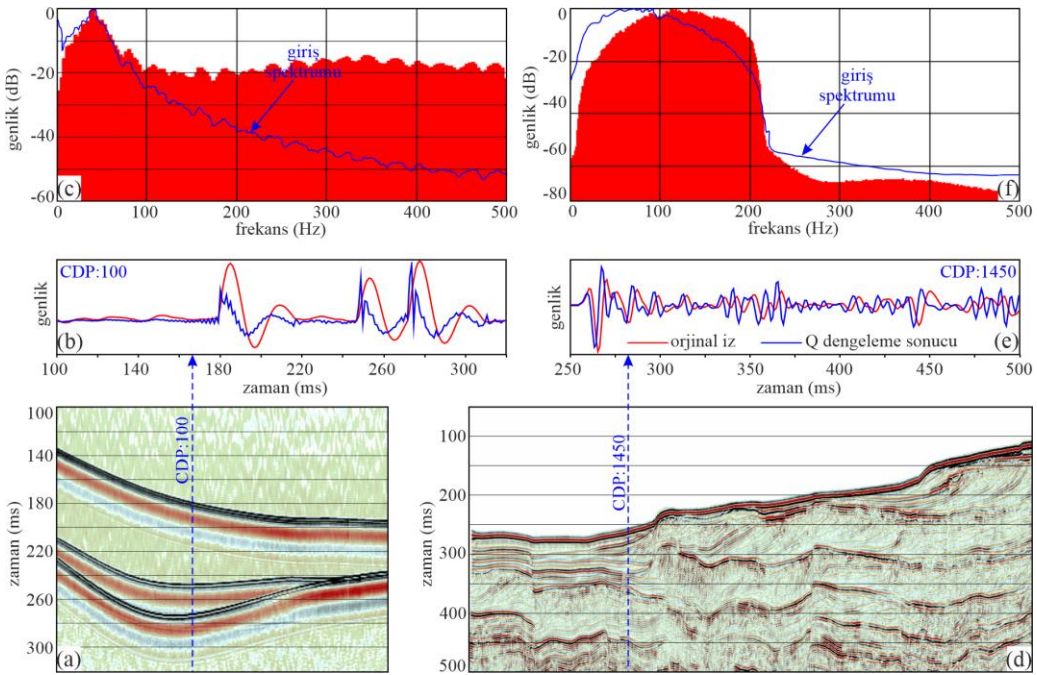
uygulanır. Yöntem, kullanışlı spektral bant içerisindeki genlikleri eşdeğer genlik seviyesine taşımayı hedefler ve spektral bantı düzgünleştirir. TVSW, aynı zamanda verideki sismik dalgacığı kısmen sıkıştıran bir işlemidir. Geleneksel Wiener dekonvolüsyonundan farkı, dekonvolüsyonun sadece sismik dalgayı sıkıştırmakla kalmayıp aynı zamanda tekrarlı yansımaları ve dalgacığın salınımlı karakterini de yok etmesidir (Dondurur, 2009). Buna karşın TVSW dalgacığı sıkıştırır, ancak sismik verinin salınımlı karakteri ve fazı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Naghadeh ve Morley (2017), yöntemin yüksek genlikleri azalttığını ve düşük genlikleri ise artırdığını, bu durumun sismik ters çözüm çalışmalarında sorun oluşturabileceğini öne sürmüştür.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan TVSW işlemi sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 8'de verilmiştir. TVSW işleminde, sentetik ve çok kanallı sismik verinin her ikisi için de 4 panelden oluşan süzgeçleme yapılmıştır. TVSW uygulamasında kesme frekans aralıkları eşit olarak kullanılabilirdiği gibi, verinin genlik spektrumu incelenerek uygun aralıklar da seçilebilir. Bu çalışmada sismik verinin genlik spektrumundaki değişim bölgeleri dikkate alınarak süzgeç kesme frekansları 8-80, 50-120, 90-150 ve 130-220 Hz olarak alınmıştır. TVSW işleminin, sentetik verinin ayrırlılığını artırdığı, onlap kesilmesinin bir miktar daha belirgin hale geldiği görülmektedir (Şekil 8a). Ancak veride ana yansımaları takip eden yan salınımlar şeklinde ortaya çıkan görece yüksek frekanslı düşük genlikli gürültüler oluşmuştur (Şekil 8b). Bu gürültülerin genliği, adaptif dekonvolüsyon ve Q dengeleme sonrası orta çıkan benzer gürültülere göre çok daha düşüktür. Ayrırlılıktaki artış, sentetik verinin spektrumunda da görülmektedir (Şekil 8c). 50-220 Hz arasındaki frekans bileşenlerinin genlikleri TVSW sonrası en az 20 dB yükselmiştir. TVSW kesme frekansı 220 Hz ile

sınırlandırıldığından, işlem bu frekansın üzerindeki bileşenlerin genliklerinde artış oluşturmamıştır.

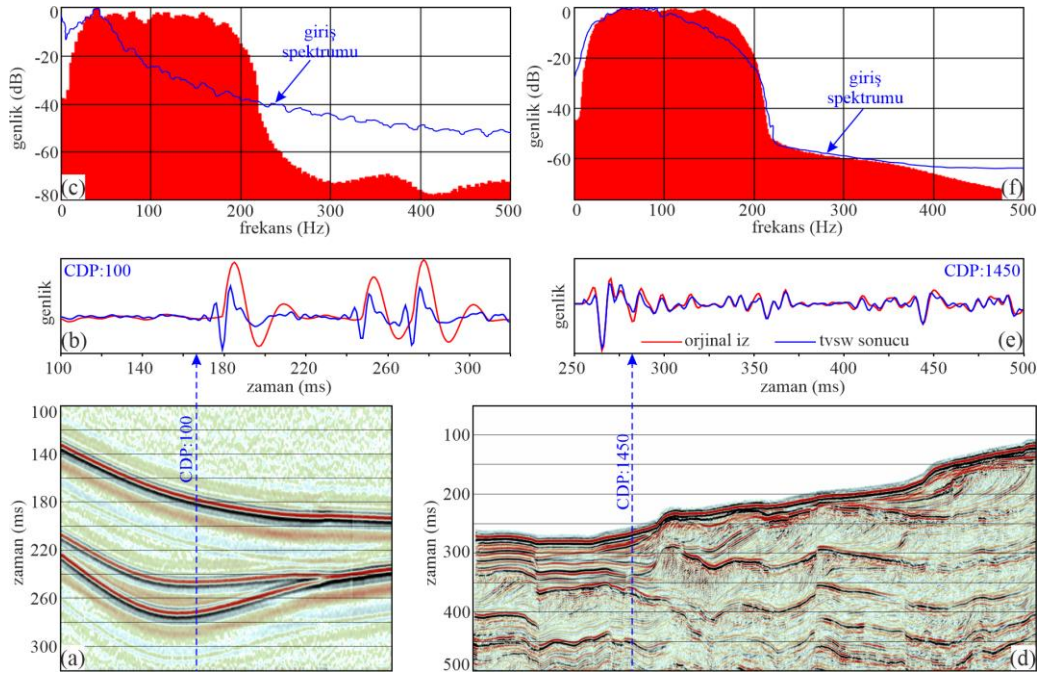
Şekil 8d'deki sismik kesitte TVSW sonrası delta klinoformlarından alınan yansımaların daha belirgin hale geldiği söylenebilir. Ancak TVSW sonrası sismik verinin ayrımlılığındaki artış özellikle verinin geç varışlarında belirgindir. Bu

kısımlarda görülen düşük frekanslı yansımaların frekanslarının TVSW tarafından yükseltildiği gözlenmiştir. Şekil 8e'de verilen 1450. izin TVSW öncesi ve sonrası görünümü, işlemin sismik dalgacığın periyodu üzerindeki etkisinin çok belirgin olmadığını işaret etmektedir. Çok kanallı sismik verinin genlik spektrumunda, özellikle 100-220 Hz arasındaki genliklerde artış meydana gelmiştir (Şekil 8f).



**Şekil 7.** (a) Q dengeleme işlemi sonrası sıfır ofset sentetik veri, dengeleme öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Q dengeleme işlemi sonrası çok kanallı sismik veri, dengeleme öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 7.** Q compensation results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after compensation. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after compensation.



**Şekil 8.** (a) Zaman değişken spektral beyazlatma sonrası sıfır ofset sentetik veri, spektral beyazlatma öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Zaman değişken spektral beyazlatma sonrası çok kanallı sismik veri, spektral beyazlatma öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 8.** Time variant spectral whitening results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after spectral whitening. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (e) its average amplitude spectrum before and after spectral whitening.

### Spektral biçimlendirme (spectral shaping)

Spektral biçimlendirme, sismik izlerin frekans ortamı spektral şekillendirmesini sağlar. İşlem, verinin fazını değiştirmeden tüm frekans bileşenlerini belirtilen bir katsayı değeri ile çarpar. Katsayı değeri, bir dizi frekans-genlik çifti ile tanımlanır. Sismik verinin frekansını yükseltmedeki temel problem, faz spektrumunu değiştirmeksizin verinin genlik spektrumunu genişletmektir. Fourier teoremine göre, bir zaman serisinin genlik ( $A(\omega)$ ) ve faz ( $\phi(\omega)$ ) spektrumları

$$A(\omega) = \sqrt{R(\omega)^2 + I(\omega)^2} \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = \text{atan} \left( \frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right) \quad (6)$$

şeklinde verilir. Burada  $I(\omega)$  sanal,  $R(\omega)$  ise gerçel bileşeni göstermektedir. Eşitlik (6)'ya göre, faz spektrumunun sabit kalması için  $I(\omega)/R(\omega)$  oranının değişmemesi gerekir. Bu durum, sadece, oranın pay ve paydasının sabit bir katsayı ile çarpılması ile sağlanabilir (Al-Moughraby, 2004). Gerçel ve sanal bileşen değerlerini yükselten ancak faz değerini değiştirmeyen bu katsayının uygulanması ile sismik verinin frekans bandı genişletilebilir. Yapılan işlem spektral biçimlendirme olarak bilinir. Spektral biçimlendirme, belirtilen frekans/genlik çiftlerine göre frekans ortamında



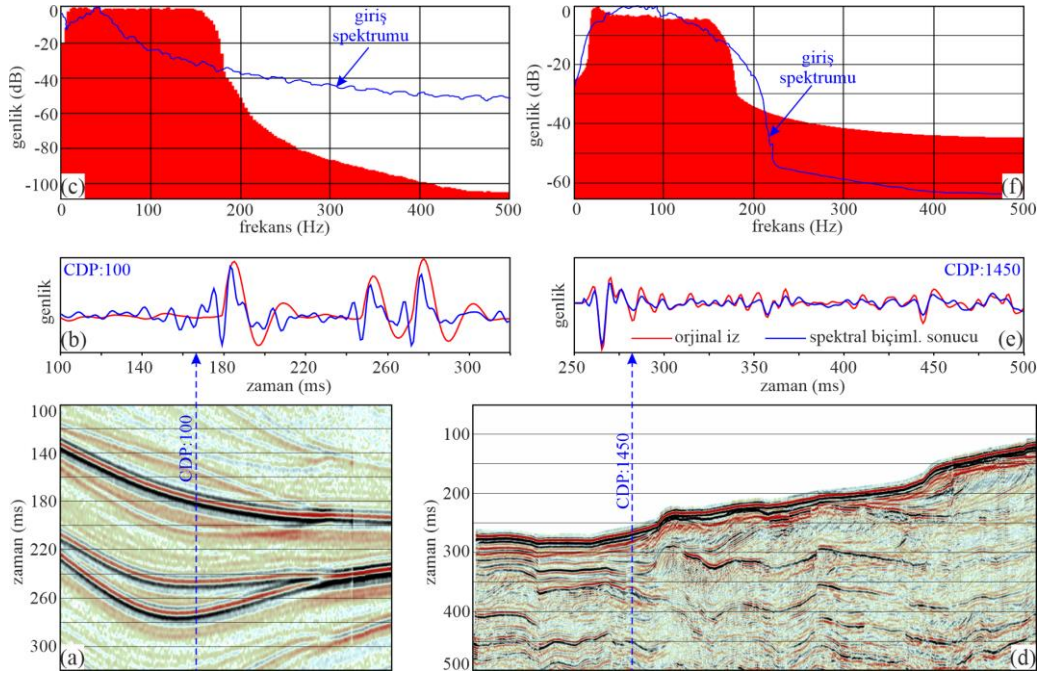
genlik ölçekleme uygular. Ölçekleme fonksiyonu ardışık frekanslar arasında doğrusal olarak enterpole edilir. Bu çalışmada spektral biçimlendirme sonrası genlikler, maksimum genliğin yüzde oranı olarak tanımlanmıştır.

Çok kanallı sismik kesite ve sentetik veriye uygulanan spektral biçimlendirme işlemi sonucu, kesitlerin ortalama genlik spektrumu ile birlikte Şekil 9'da verilmiştir. Spektral biçimlendirme işleminde, sentetik ve çok kanallı sismik verinin her ikisi için spektral genlikler maksimum genliğin % oranı olarak ölçeklenmiştir. Sentetik veri için kullanılan frekans/genlik çiftleri 6-0,8-100,150-100,180-0 olarak alınmıştır. Buna göre, spektral biçimlendirme işlemi ile spektrumun 8-150 Hz arasında kalan kısmı düzleştirilmiş, 6-8 Hz ve 150-180 Hz arası ise geçiş bölgesi olarak alınmıştır. Bu şekilde uygulanan spektral biçimlendirme ile 8 Hz altı ve 180 Hz üstü genlikler tamamen bastırılır. Çok kanallı sismik veri için ise kullanılan frekans/genlik çiftleri ise 18-0, 22-100, 150-100,180-0 olarak alınmıştır. Buna göre, işlem sonrası 22-150 Hz arası düzleştirilmiş, 18-22 Hz ve 150-180 Hz arası ise geçiş bölgesi olarak alınmıştır. 18 Hz altı ve 180 Hz üstü genlikler ise spektral biçimlendirme işlemi ile tamamen bastırılır. Spektral biçimlendirme oldukça etkili bir spektral dengeleme yöntemidir. Frekans aralığı gereğinden geniş seçildiğinde, yöntem özellikle yüksek frekanslı gürültü genliklerini de yükseltmekte ve verinin ayrımlılığını düşürmektedir. Bu nedenle spektral

biçimlendirme işleminde çok kanallı sismik verinin yüksek frekans kesme değeri 180 Hz'e kadar düşürülmüştür.

Spektral biçimlendirme işlemi, sentetik verinin ayrımlılığını oldukça yükseltmiştir (Şekil 9a ve 9b). Sentetik verinin genlik spektrumu spektral biçimlendirme işlemi sonrası, tanımlanan spektral bant aralığında (8-150 Hz) tamamen yatay hale gelmiştir (Şekil 9c). Ayrıca, yöntemin veriye bir bant-geçişli süzgeç etkisi yaptığı ve tanımlanan bant genişliği dışındaki genlikleri bastırdığı görülmektedir. Bununla birlikte, spektral biçimlendirme sonrası sentetik veride çok miktarda yapay olay meydana geldiği görülmektedir (Şekil 9a). Bu yapay olaylar görece düşük genliklere sahip olup, ana yansımalara paralel uzanan gürültülerdir.

Çok kanallı sismik verideki ayrımlılık artışı sentetik veriye oranla daha az belirgindir (Şekil 9d ve 9e). Kesitte spektral biçimlendirme sonrası yansıma genlikleri bir miktar daha belirgin hale gelmekle birlikte, işlem sonrası özellikle sığ kısımlarda düşük frekanslı bir gürültünün oluştuğu görülmektedir. Bu gürültü, olasılıkla spektrumda (Şekil 9f) 20 Hz civarı ortaya çıkan yüksek genliklere karşılık gelmektedir. Yöntem hem düşük ve hem de yüksek frekanslı bileşenlerin genliklerini artırma eğilimi gösterdiğinden, söz konusu frekans bantlarındaki gürültü genliklerinde de yükselme meydana getirebilmektedir. Bu nedenle, spektral biçimlendirme uygulanırken kullanılacak frekans bandının çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir.



**Şekil 9.** (a) Spektral biçimlendirme sonrası sıfır ofset sentetik veri, spektral biçimlendirme öncesi ve sonrası sentetik verinin (b) 100. izi, (c) ortalama genlik spektrumu. (d) Spektral biçimlendirme sonrası çok kanallı sismik veri, spektral biçimlendirme öncesi ve sonrası sismik verinin (e) 1450. izi, (f) ortalama genlik spektrumu.

**Figure 9.** Spectral shaping results. (a) Synthetic zero-offset data, (b) its 100th trace and (c) its average amplitude spectrum before and after spectral shaping. (d) Multi-channel seismic data, (e) its 1450th trace and (f) its average amplitude spectrum before and after spectral shaping.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Sismik verinin bant genişliğinin artırılması, verinin hem düşük ve hem de yüksek frekans bileşenlerine sahip olmasının sağlanması, sismik veri işlemin en önemli hedeflerinden biri olmuştur (Yılmaz, 2001; Karlı, 2011; Karlı vd., 2006). Yer altında yayılan sismik dalgaların frekansları soğrulmadan etkilenir. Ayrıca, birçok yer altı hidrokarbon rezervuarı, derinliklerine bağlı olarak sismik verinin çözünürlük sınırlarının altında bulunmaktadır. Bunlar sismik veri ile tespit edilebilse bile, veri setinin bant sınırlı doğası nedeniyle frekans genişliğini artırmadan, bu tür küçük çaplı rezervuarların haritalanması ve karakterize

edilmesi oldukça zordur (Zhang vd., 2023; Kumar vd., 2008).

Yer, sismik sinyalin yüksek frekanslarını zayıflatan bir alçak geçişli süzgeç gibi davranır. Sismik dalgacığın seyahati sırasında sinyalin baskın frekansı düşük frekanslara kayar ve ayrımlılık azalır. Bu aşamada, ayrımlılık (resolution) ve ayırt edilebilirlik (detectability) terimlerinin farklı kavramlar olduğunu belirtmek gerekir. Ayrımlılık, yeraltındaki bir tabakanın her iki sınırına ait yansımaların sismik veride ayrı yansımalar olarak ayırt edilebilmesidir (Kallweit ve Wood, 1982). Genel olarak ayrımlılık, iki olayın sismik kesitte ayrı olaylar olarak tanımlanabilmesi için gereken minimum



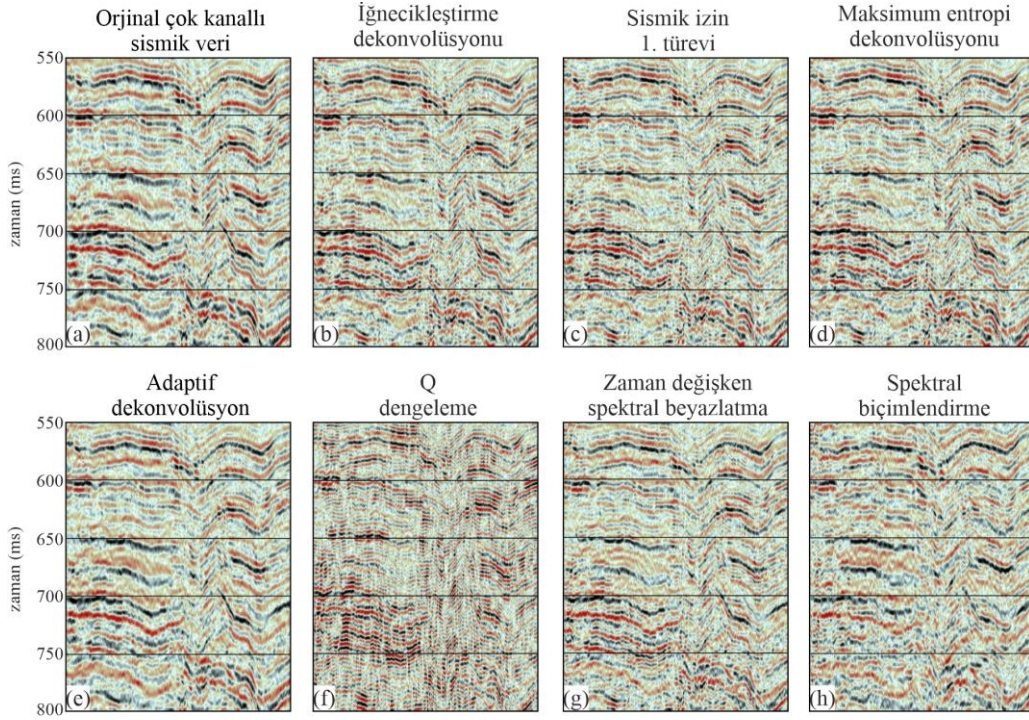
mesafedir (Şekil 1a, Sheriff ve Geldart, 1995). Ayırt edilebilirlik ise, bir yansımanın, ayrı yansıma olayları olarak tanımlanabilmesinden bağımsız olarak, sismik verideki gürültünün içerisinden ayırt edilebilecek kadar güçlü olmasıdır. Ayırt edilebilir yansımalar, sismik verinin ayrımlılığına bağlı olarak, ayrı yansımalar olarak görülebilir veya görülemeyebilir (Kallweit ve Wood, 1982).

Deniz sismiği verilerinin veri toplama parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi de, sismik verinin ayrımlılığı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Dondurur, 2018). Yüzeğe yakın çekilen alıcı kablo ile yüksek frekanslar kaydedilmesine karşın, aynı zamanda alıcılar deniz yüzeyine yakın olduğu için, sismik veri yüzey gürültülerinden de çok fazla etkilenir. Bant-geçişli süzgeç ile hem düşük hem de yüksek frekanslı gürültü genlikleri veriden atılsa da, süzgeçleme, verinin düşey (zamansal) ayrımlılığını çoğu kez artırmaz, verideki gürültü genliklerini bastırır. Düşey ayrımlılığın artırılması için sadece yüksek frekanslara ihtiyaç duyulduğu fikri yanlıştır. Ayrımlılığın artırılması için hem düşük ve hem de yüksek frekanslı bileşenlere aynı anda gereksinim vardır (Yılmaz, 2001). Dolayısıyla sismik verinin hem düşük ve hem de yüksek frekansları aynı anda içeren, geniş bir frekans bandına sahip spektrumu olması istenir (Dondurur, 2009).

Bu nedenlerle, sismik verinin bant genişliğinin artırılması önem taşımakta olup, bu çalışmada, yığma sonrası sismik verinin ayrımlılığını artırmaya yönelik farklı veri işlem yaklaşımları karşılaştırmalı şekilde uygulanmıştır. Şekil 10, ayrımlılık artırmaya yönelik uygulanan yöntemlerin, Şekil 2e'de verilen giriş migrasyon kesitinin bir kısmı üzerindeki sonuçlarının karşılaştırmalı yakınlaştırılmış görünümünü sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, yöntemlerin avantajlarının yanı sıra,

dezavantajlarının varlığını da işaret etmektedir. Bazı yöntemler ayrımlılığı artırmalarının yanı sıra izden ize sürekliliği ve yansıma genliklerini belirginleştirirken (Şekil 10b, 10c ve 10d), bazı yöntemler ise düşey ayrımlılığı belirgin şekilde iyileştirmektedir (Şekil 10b, 10d, 10f ve 10g). Çizelge 2, yöntemlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmasını vermektedir. Düşey ayrımlılığı artırma amaçlı kullanılan yöntemler, izden ize süreklilikte yaptıkları iyileştirme, sismik dalgacığın salınımını giderme, verinin spektrumunu genişletme, yapay olay üretme ve verideki gürültüyü bastırabilme kapasiteleri açısından değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Sismik verideki izden ize sürekliliğin iyileştirilmesi konusunda, çok kanallı sismik veri üzerindeki uygulamalardan, yöntemlerin yapay olaylar ve gürültüler üretme durumu ile ilgili olarak ise sentetik veriden çıkarımlar yapılmıştır.

Kesitteki birincil yansımaları belirginleştiren ve izden ize sürekliliği en fazla iyileştiren yöntemlerin iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile Q dengeleme olduğu, yansımaların sürekliliğini en fazla azaltan yöntemin ise spektral biçimlendirme olduğu anlaşılmıştır (Şekil 10, Çizelge 2). Sismik verideki yansımaların salınımlı görünümünü giderme konusunda en başarılı yöntemler de yine iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonu ile Q dengelemedir. Diğer tüm yöntemlerin bu konuda başarısız olduğu söylenebilir. Bu çalışmada kullanılan tüm ayrımlılık artırma amaçlı yöntemler, sismik verinin spektrumunda genişleme oluşturmuştur. Bunlar arasında en başarılı olanlar ise iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, sismik izin birinci türevi, TVSW ve spektral biçimlendirmedir (Çizelge 2). Bunun dışında, Burg dekonvolüsyonu ve Q dengeleme ise yüksek frekans genliklerini güçlendirirken, düşük frekanslı bileşenlerin genliklerini azaltmıştır.



**Şekil 10.** (a) Giriş migrasyon kesitine ayrımlılık artırmaya yönelik uygulanan (b) iğnecikleştirme dekonvolüsyonu, (c) sismik izin 1. Türevi, (d) maksimum entropi (Burg) dekonvolüsyonu, (e) adaptif dekonvolüsyon, (f) Q dengeleme, (g) zaman değişken spektral beyazlatma (TVSW) ve (h) spektral biçimlendirme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırmalı görünümü. Sismik kesitin tamamı Şekil 2d'de verilmiştir.

**Figure 10.** Comparison of results with (a) input migration section after applying (b) spiking deconvolution, (c) time derivative, (d) maximum entropy (Burg) deconvolution, (e) adaptive deconvolution, (f) Q compensation, (g) time variant spectral whitening (TVSW), and (h) spectral shaping methods to enhance temporal resolution. The entire seismic section is shown in Figure 2d.

Bu çalışmada kullanılan yöntemler temel olarak ayrımlılık artırmaya yöneliktir. Dolayısıyla, kullanılan yöntemlerin belirgin bir gürültü bastırma özellikleri yoktur. Hatta hemen her yöntem verinin spektrumunu düzleştirmek amacıyla, spektrumun hem düşük hem de yüksek frekanslı kısmındaki genlikleri artırma eğilimi göstermektedir. Bu durum, yöntemlerin sismik verideki gürültüleri bastırmaktan çok, özellikle verideki yüksek frekanslı gelişigüzel gürültü genliklerini artırma eğilimi gösterdiğini işaret etmektedir. Söz konusu durum,

uygulamaların sonuçlarını gösteren çıktıların hemen tamamında, özellikle kesitlerin geç varışlarında artış gösteren gelişigüzel gürültü genliklerinden ve sismik verilerin tek izinin karşılaştırmalı gösterimlerindeki yüksek frekanslı gürültüden anlaşılmaktadır (Şekil 3b'den Şekil 9b'ye ve Şekil 3e'den Şekil 9e'ye). Uygulamalarda sentetik verideki yüksek frekanslı genlikler süzülmediğinden, yöntemlerin ürettiği gürültü miktarı sentetik verinin özellikle tek iz gösterimlerinde belirgindir. Gerçek sismik veri ise bant geçişi

**Çizelge 2.** Sismik verinin ayrımlılığını artırmaya yönelik uygulanan yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.

**Table 2.** Comparison of advantages and disadvantages of the methods employed to improve the vertical resolution of seismics data.

Yöntem	İzden ize süreklilik	Salınım giderme	Spektrum genişletme	Gürültü üretme	Yapay olay üretme
İğnecikleştirme dekonvolüsyonu	çok iyi	çok iyi	çok iyi	yüksek	orta
Sismik izin 1. türevi	iyi	zayıf	orta	düşük	iyi
Burg dekonvolüsyonu	çok iyi	çok iyi	iyi	yüksek	orta
Adaptif dekonvolüsyon	orta	iyi	iyi	düşük	iyi
Q dengeleme	çok iyi	orta	iyi	yüksek	iyi
TVSW	iyi	orta	çok iyi	düşük	iyi
Spektral biçimlendirme	kötü	kötü	çok iyi	orta	kötü

süzgeç ile süzüldüğünden, uygulanan işlemler sonrası hem düşük ve hem de yüksek frekanslı yapay gürültülerden olabildiğince arındırılmıştır. Geç varışlarda görülen gelişigüzel gürültüdeki artış, birinci türev (Şekil 4), adaptif dekonvolüsyon (Şekil 6) ve TVSW (Şekil 8) çıktısında kabul edilebilir düzeydedir (Çizelge 2). Bu durum, diğer tüm yöntemlerin çıktısına uygun bir bant-geçişli süzgeç uygulamasını zorunlu kılabilir. Bu uygulama, konvansiyonel Wiener-Levinson dekonvolüsyon uygulamalarında standart bir işlemdir (Yılmaz, 2001; Dondurur, 2009; Dondurur, 2018). Bu çalışmanın temel amacı, uygulanan yöntemlerin ortaya çıkardığı yan/olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için çözümler önermekten ve bunları uygulamaktan çok, farklı ayrımlılık artırma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymak olduğundan, yöntemler tarafından üretilen düşük ve yüksek frekanslı gürültülerin detaylı analizine ve bunların veriden atılması ile ilgili yöntemlerin tartışmalarına girilmemiştir.

Uygulanan bazı yöntemlerin yapay olaylar ürettiği görülmüştür (Çizelge 2). Bu yapay olaylar, gerçek sismik veriden çok sentetik veri

üzerinde belirgindir. Bunun nedeni olasılıkla, yapay olayların genliklerinin birincil yansımalara göre çok küçük olması ve gerçek sismik veride, birincil yansıma genliklerinin altında kaybolduklarından belirgin şekilde görülmemeleridir. Bu olaylar, iğnecikleştirme ve maksimum entropi dekonvolüsyonları ile spektral biçimlendirme sonuçlarında görülen birincil yansımalara paralel uzanan yüksek frekanslı ve düşük genlikli olaylar olarak ortaya çıkabilmektedir (Şekil 3a, 5a ve 9a).

#### KATKI BELİRTME

Bu çalışmada kullanılan çok kanallı sismik veri, TÜbitak tarafından desteklenen 121Y225 kodlu TÜbitak-1001 projesi kapsamında toplanmıştır. Projenin yürütücüsü olarak veri üzerinde uygulamaların yapılmasına izin veren ve uygulamalar konusunda destek olan Prof. Dr. Derman Dondurur'a ve makaleye sağladıkları katkılardan dolayı hakemlere de teşekkür ederim.

**KAYNAKLAR**

- Al-Moughraby, B.M. 2004. Seismic Frequency Enhancement Through Spectral Shaping. PhD Thesis, University of Tulsa.
- Berkhout, A.J. 1984. Seismic Resolution: A quantitative analysis of resolving power of acoustical echo techniques. Geophysical Press Limited, London.
- Burg, J.P. 1967. Maximum entropy spectral analysis. Paper presented at the SEG 37th Meeting, Oklahoma.
- Chapman, N.R., and Barrodale, I. 1983. Deconvolution of marine seismic data using the L1 norm. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 72, 93-100.
- Chen, Z., Chen, X., Wang, Y., and Li, J. 2014. Estimation of Q factors from reflection seismic data for a band-limited and stabilized inverse Q filter driven by an average-Q model. *Journal of Applied Geophysics*, 101, 86-94.
- Choi, Y., Seol, S. J., Byun, J., and Kim, Y. 2019. Vertical resolution enhancement of seismic data with convolutional U-net. Paper presented at the SEG International Exposition and Annual Meeting, San Antonio, USA.
- Chopra, S., Castagna, J., and Portniaguine, O. 2006. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. *CSEG RECORDER*, 19-25.
- Dasgupta, R., and Clark, R.A. 1998. Estimation of Q from surface seismic reflection data. *Geophysics*, 63, 2120-2128.
- Dondurur, D. 2009. Deniz Sismiğinde Veri İşlem. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Yayını.
- Dondurur, D. 2018. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier Science Publishing Co.
- Dragoset, B. 2000. Introduction to air guns and air-gun arrays. *Leading Edge*, 19, 892-897.
- Faleide, T.S., Braathen, A., Lecomte, I., Mulrooney, M.J., Midtkandal, I., Bugge, A.J., and Planke, S. 2021. Impacts of seismic resolution on fault interpretation: Insights from seismic modeling. *Tectonophysics*, 816, 229008.
- Gibson, B., and Lerner, K.L. 1982. Comparison of spectral flattening techniques. Unpublished technical document, Western Geophysical Company.
- Griffiths, L.J., Smolka, F.R., and Trembly, L.D. 1977. Adaptive deconvolution: A new technique for processing time-varying seismic data. *Geophysics*, 42(4), 742-759.
- Jenkins, F.A., and White, H.E. 1957. *Fundamentals of optics*. McGraw Hill Publishing Co.
- Jo, Y., Choi, Y., Seol, S. J., and Byun, J. 2022. Machine learning-based vertical resolution enhancement considering the seismic attenuation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109657.
- Kallweit, R.S., and Wood, L.C. 1982. The limits of resolution of zero-phase wavelets. *Geophysics*, 47(7), 1035-1046.
- Karslı, H. 2002. Sismik yığma izlerinin karmaşık iz analizi ile ayrımlılık açısından değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 26, 15-26.
- Karslı, H. 2011. An application of the autoregressive extrapolation technique to enhance deconvolution results: a 2D marine data example. *Geophysical Prospecting*, 59, 56-65.

- Karslı, H. 2006. Further improvement of temporal resolution of seismic data by autoregressive (AR) spectral extrapolation. *Journal of Applied Geophysics*, 59, 324-336.
- Karslı, H., Dondurur, D., and Çifçi, G. 2006. Application of complex-trace analysis to seismic data for random-noise suppression and temporal resolution improvement. *Geophysics*, 71(3), V79-V86.
- Knapp, R.W. 1990. Vertical resolution of thick beds, thin beds, and thin-bed cyclothems. *Geophysics*, 55(9), 1128-1296.
- Knapp, R.W. 1993. Energy distribution in wavelets and implications on resolving power. *Geophysics*, 58, 39-46.
- Koefoed, O. 1981. Aspects of vertical seismic resolution. *Geophysical Prospecting*, 29, 21-30.
- Kumar, S., Kumari, K., and Biswal, A. 2008. Frequency enhancement of seismic data - A comparative study. *CSEG Recorder*, 33, 38-43.
- Le, L.V., Kim, T.J., Kim, Y.D., and Aspnes, D.E. 2022. Decoding 'Maximum Entropy' Deconvolution. *Entropy*, 24, 1238.
- Li, Y., Zhang, G., and Duan, J. 2020. Extended stable factor method for the inverse Q-filter. *Geophysics*, 85(3), T155-T163.
- Manenti, R.R., Souza, W.E., and Porsani, M.J. 2018. Spectral whitening based on the singular spectral analysis method. *Journal of Geophysical Engineering*, 15(4), 1460-1469.
- Naghadeh, D.H., and Morley, C.K. 2017. Enhancement of temporal resolution using improved time-variant spectral whitening. *Journal of Geophysical Engineering*, 14(4), 822-832.
- Nasif, A. 2024. Enhancing Low- and high-frequency components of the seismic data to emphasize BSRs and bright spots and implications for seismic attribute analysis. *Journal of Earth System Science*, 133(1), 14-33.
- Nose-Filho, K., Takahata, A.K., and Lopes, R. 2016. A fast algorithm for sparse multichannel blind deconvolution. *Geophysics*, 81(1), V7-V16.
- Nunes, B.I.C., de Medeiros, W.E., do Nascimento, A.F., and Moreira, J.A.M. 2011. Estimating quality factor from surface seismic data: A comparison of current approaches. *Journal of Applied Geophysics*, 75, 161-170.
- Peacock, K.L., and Treitel, S. 1969. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, 34, 155-169.
- Ricker, N. 1953. Wavelet contraction, wavelet expansion and the control of seismic resolution. *Geophysics*, 18, 769-792.
- Robinson, E.A., and Treitel, S. 1967. Principles of digital Wiener filtering. *Geophysical Prospecting*, 15, 311-333.
- Sacchi, M.D., and Ulrych, T.J. 2007. On the recovery of missing low and high-frequency information from bandlimited reflectivity data. *AGU Fall Meeting 2007, Expanded Abstracts*, S33E-05.
- Sheriff, R.E., and Geldart, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.
- Theodoridis, S., and Cooper, D.C. 1981. Application of the maximum entropy spectrum analysis technique to signals with spectral peaks of finite width. *Signal Processing*, 3, 109-122.
- Tian, Y., Gao, J., and Wang, D. 2022. Improving seismic resolution based on



- enhanced multi-channel variational mode decomposition. *Journal of Applied Geophysics*, 199, 104592.
- Tonn, R. 1991. The determination of the seismic quality factor Q from VSP Data: a comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*, 39, 1-27.
- Ulrych, T.J. 1972. Maximum entropy power spectrum of truncated sinusoids. *Journal of Geophysical Research*, 77(8), 1396-1400.
- Walker, C., and Ulrych, T.J. 1983. Autoregressive modeling of the acoustic impedance. *Geophysics* 48, 1338-1350.
- Wang, R.J. 1969. The determination of optimum gate lengths for time-varying Wiener filtering, *Geophysics*, 34, 683-695.
- Wang, R.J. 1977. Adaptive Predictive Deconvolution of Seismic Data. *Geophysical Prospecting*, 25, 342-381.
- Wang, Y., Zhang, G., and Li, H. 2022. The high-resolution seismic deconvolution method based on joint sparse representation using logging-seismic data. *Geophysics and Prospecting*, 70(8), 1313-1326.
- Widess, M.B. 1973. How thin is a thin bed. *Geophysics*, 38, 1176-1180.
- Yılmaz, Ö. 2001. *Seismic Data Analysis*. SEG Books.
- Zhang, F., Duan, C., and Lan, N. 2023. Fast sparse Bayesian learning-based seismic resolution enhancement. *Journal of Applied Geophysics*, 219, 105240.