

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KISA ZAMAN FOURİER DÖNÜŞÜMÜNÜN (KZFD) SİSMİK YANSIMA
VERİLERİNE UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru ÖZCAN

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KISA ZAMAN FOURİER DÖNÜŞÜMÜNÜN (KZFD) SİSMİK YANSIMA
VERİLERİNE UYGULAMALARI**

Ebru ÖZCAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"JEOFİZİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 25 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan KARSLI

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Kısa Zaman Fourier Dönüşümünün (KZFD) Sismik Yansıma Verilerine Uygulamaları” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan KARSLI’ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Jeofizik Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma, ayrıca aramızda farklı ülkelerde olmamıza rağmen bulunduğu ülkeden sürekli destek olan Dila Deniz AĞZIPAK’a, lise yıllarından bugüne kadar süren dostluklarıyla hayatımda özel bir yere sahip olan lise arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, elimi bir an olsun bırakmayan, aldığım tüm kararlarda bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, maddi ve manevi destekleriyle bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan kıymetli annem Havva ÖZCAN’a; aramızda olsaydı bana gururla bakacağından emin olduğum canım babam Sabri ÖZCAN’a, canım kardeşlerim Av. Elif KARAKAYA ve her anında yanında olduğum, hayatıma neşe katan Eylül Miray ÖZCAN’a sonsuz teşekkürlerimi ve en derin minnettarlığımı sunarım.

Bu çalışmayı tamamlarken, Türkiye Cumhuriyeti’nin kurucusu, eşsiz lider Mustafa Kemal ATATÜRK’ü saygı, minnet ve derin bir hayranlıkla anıyorum. ATATÜRK, "Hayatta en hakiki mürşit ilimdir" sözüyle eğitimin ve bilimin, bir toplumun aydınlanma ve ilerlemesindeki temel taşlar olduğunu her daim vurgulamış, özellikle kız çocuklarının eğitimini, medeniyetin ve toplumsal kalkınmanın vazgeçilmez bir şartı olarak görmüştür. Onun izinde yürüyerek bu akademik çalışmayı tamamlamak, bana sadece bir birey olarak değil, ülkemizin aydınlık yarınlara katkıda bulunma sorumluluğunu da yeniden hatırlatmıştır. ATATÜRK’ün “Fikri hür, vicdanı hür, irfanı hür nesiller” yetiştirme hedefi doğrultusunda başlattığı eğitim devrimlerinin aydınlık ışığında ilerlemiş olmanın gururuyla, bu tezi tamamlamanın mutluluğunu yaşıyorum. Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ebru ÖZCAN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kısa Zaman Fourier Dönüşümünün (KZFD) Sismik Yansıma Verilerine Uygulamaları” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan KARSLI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/10/2024

Ebru ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Zaman-Frekans (t, f) Analizi	5
2.2. Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD)	6
2.3. Gabor Dönüşümü	8
2.4. Dalgacık Dönüşümü	9
2.5. Stockwell Dönüşümü (S-Dönüşümü).....	10
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	11
3.1. Sismik Dalgacığın Frekans Bant Genişliği, Yan Salınım ve Sismik Ayrımlılık İlişkisi	11
3.2. KZFD'nin Sıfır Fazlı Dalgacık Modeli ile Tanıtılması.....	15
3.3. KZFD'nin Gerçek Sismik İz ile Tanıtılması	16
3.4. KZFD Uygulamasında Pencere Fonksiyonunun ve Uzunluğunun Öneminin İrdelenmesi	18
3.5. KZFD Ortamında Süzgeçleme: Frekans, Zaman ve Genlik.....	27
3.6. Kepstrum Analizi: Düşey Ayrımlılık İyileştirme	34
3.7. 2B'lu Verilerde Ayrımlılık İyileştirme için KZFD-K Uygulaması: Sentetik ve Arazi Verileri.....	42
3.8. KZFD'nin Tabakalı Yapı Tahmininde Kullanılması	48
3.9. KZFD'nin Tabaka Modeli Tahmininde Gerçek Veriye Uygulanması.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
5. SONUÇLAR.....	62
6. KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KISA ZAMAN FOURİER DÖNÜŞÜMÜNÜN (KZFD) SİSMİK YANSIMA VERİLERİNE UYGULAMALARI

Ebru ÖZCAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2024, 69 Sayfa

Kısa Zaman Fourier Dönüşüm (KZFD) yöntemi sismik verilerin zaman-frekans (t , f) görüntülerinin elde edilmesine ve bu ortamda birçok işlem yapılmasına imkanı sağlar. Bu çalışmada, KZFD yönteminin sismik verilerin süzgeçlenmesinde, ayrırlılığının iyileştirilmesinde ve sismik veriden tabakalı yer modelinin kalınlık ve hız yapısı hakkında niteliksel bir tahmin yapılabilmesindeki kullanımı ve sağladığı imkanlar incelenmiştir. KZFD'nin uygulanmasında pencere fonksiyonu uzunluğu (t , f) görüntülerinin zaman ve frekans çözünürlükleri üzerindeki etkinlikleri test edilmiştir. Kısa pencereler zaman, uzun pencereler frekans çözünürlüğü sağlamıştır. KZFD'nin hem zaman hem de frekans boyutlarında süzgeçleme çeşitliği ve pratikliği sentetik ve arazi verileri üzerinde gösterilmiştir. KZFD ile Kepstrum tekniği birleştirilerek (KZFD-K) sismik yansımada dalgacıklarının yan salınımları zayıflatılıp ana salınımı daraltılarak verinin kullanışlı spektral bandı düşük ve yüksek frekans bölgesine genişletilerek sismik verilerin düşey ayrırlılığı etkin şekilde iyileştirilmiştir. Böylece, ince tabakalar ve küçük ölçekli yansımalar görüntülenebilmiştir. KZFD'nin sedimanter ortamlardaki derinlik boyunca tabaka hızları ve kalınlıkları hakkında niteliksel bir tahmin yapılabilmesindeki katkıları sentetik ve arazi verilerine uygulamaları ile gösterilmiştir. Sonuç olarak, KZFD yönteminin sismik verilerin işlenmesinde birçok uygulama imkanı ve kolaylığı sağladığı, özellikle sismik verilerin düşey ayrırlılığının artırılmasında ve tabaka modelinin tahmin edilmesinde etkin bir yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü, Düşey Ayrırlılık, Kepstrum Analizi, Tabakalı Yer Modeli Tahmini

MSc. Thesis

SUMMARY

APPLICATIONS OF THE SHORT TIME FOURIER TRANSFORM (STFT) TO SEISMIC REFLECTION DATA

Ebru ÖZCAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2024, 69 Pages

The Short Time Fourier Transform (STFT) method allows the obtaining of time-frequency (t , f) images of seismic data, enabling many processes to be performed in this environment. In this study, the use of the STFT method in filtering seismic data, improving the resolution of seismic data, and qualitatively estimating the thickness and velocity structure of the layered earth model from seismic data is investigated. The effectiveness of the window function length (t , f) on the time and frequency resolutions of the images was tested in the STFT application. Short and long windows respectively provided temporal and frequency resolution. The diversity and practicality of STFT filtering in both time and frequency dimensions are demonstrated on synthetic and field data. By combining STFT with the Cepstrum technique (STFT-C), the vertical resolution of seismic data is effectively improved by attenuating the side lobes of seismic reflection wavelets and narrowing the main lobe, thus extending the available spectral band of the data into the low and high frequency region. Thus, thin layers and small-scale reflections can be imaged. The contribution of STFT to qualitatively estimating layer velocities and thicknesses along the depth in layered sedimentary environments is demonstrated with applications to synthetic and field data. As a result, it is seen that the STFT method provides many application possibilities and convenience in the processing of seismic data and is an effective method especially in increasing the vertical resolution of seismic data and estimating the layer model.

Key Words: Short-Time Fourier Transform, Vertical Resolution, Cepstrum Analysis, Layered Subsurface Model Estimation

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	KZFD yönteminde zaman serisi, $S(t)$ 'nin pencere fonksiyonu $w(t)$ ile çarpılarak Fourier Dönüşümü'nün alınması. FD, Fourier dönüşümünü ve t_0 hesaplanan genlik spektrumunun atandığı zaman değerini gösterir (Gao ve Yan 2006'dan düzenlenmiştir).....	7
Şekil 2.	Farklı spektral genişliğe sahip Ricker dalgacıkların (a) zaman ve (b) frekans ortamı görünüşleri	11
Şekil 3.	Şekil 2'deki farklı frekans bantlarındaki sıfır fazlı Ricker dalgacıkların ana ve yan salınımları.	13
Şekil 4.	Frekans bant genişliğinin dalgacık yan ve ana salınım üzerindeki etkileri. (a) Sentetik izler ve yansıma katsayıları, (b) sismik izlerin genlik spektrumları. (a) ve (b)'deki renkler eşleşmektedir.....	14
Şekil 5.	Sıfır fazlı dalgacığın FD ve KZFD görünüşleri. (a) Ricker dalgacığı, (b) Fourier genlik spektrum ve (c) t-f görünümü.....	16
Şekil 6.	(a) Gerçek bir sismik izin (b) FD genlik ve (c) t-f spektrumu. İzin örnekleme zamanı $dt=4$ ms'dir.	17
Şekil 7.	KZFD'nin giriş-çıkış fark analizi, (a, b) giriş izi ve (t, f) spektrumu, (c, d) Ters KZFD çıkış izi ve (t, f) spektrumu, (e, f) giriş-çıkış fark izi ve (t, f) spektrumu	18
Şekil 8.	Denklemler 13-18'de verilen pencere fonksiyonları.	21
Şekil 9.	KZFD'de kısa ve uzun pencere kullanımının frekans ayrırlılığı analizi, (a) $f_1=20$ Hz ve $f_2=70$ Hz olan iki Ricker dalgacığının toplamı, (b) FD genlik spektrumu, pencere boyu (c) $m=11$, (d) $m=63$. Genişlik değeri, $\alpha=2.5$ olan Gauss penceresi kullanılmıştır.....	22
Şekil 10.	KZFD'de pencere boyunun zaman ayrırlılığı açısından analizi, (a) birbirine yakın zaman aralıklarında hesaplanan girişimli dalgacık modeli, (b) FD genlik spektrumu, pencere boyu (c) $m=11$, (d) $m=63$. Genişlik değeri, $\alpha=2.5$ olan Gauss penceresi kullanılmıştır.	23
Şekil 11.	Farklı uzunluktaki pencere için KZFD sonuçları., (a) Yapay sismik sinyal, (b) $t_w=0.009$ s ($m=9$), (c) $t_w=0.021$ s ($m=21$) ve (d) $t_w=0.035$ s ($m=35$) uzunluklu Gauss penceresi kullanılarak elde edilen zaman-frekans görüntüleri. Parametreler $dt=0.001$ s, t_w ve m sırasıyla, zaman örnekleme aralığı, pencere uzunluğu (örnek sayısı) ve pencere örnekleme sayısını göstermektedir. Frekanslar 40 Hz'den 2'şer azalmaktadır.....	25
Şekil 12.	Pencere boyunun etkisinin sıfır fazlı dalgacık üzerinde incelenmesi ($N/10, N/8, N/6, N/4, N/2, N=m$; m =pencere boyu, N =veri uzunluğu)	26
Şekil 13.	Rayleigh dalga alanları gürültüsü içeren (a) gerçek arazi izi ve (b) (t, f) görüntüsü.	27

Şekil 14.	3-10 Hz kesme frekansları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu.....	28
Şekil 15.	10-65 Hz kesme frekansları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu.....	29
Şekil 16.	0.2-0.6 s kesme zamanları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu.....	30
Şekil 17.	Verideki maksimum genliğe göre %20-50 arası genlikleri koruyan süzgeçleme. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu.....	31
Şekil 18.	Belirli bir genlik eşik değerine göre süzgeçleme sonuçları. Eşik genlik seviyesi, >~3.6 (%50) (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu	32
Şekil 19.	Zaman-frekans bant aralıklarının birlikte kullanımı sonucu (t, f) ortamı süzgeçleme sonucu. Zaman ve frekans bantları sırasıyla 0.2-0.6 s ve 13-35 Hz olarak kullanılmıştır. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu	33
Şekil 20.	1.0-2.0 s kesme zamanları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu.....	34
Şekil 21.	KZFD ve Kepstrum işlemlerinin birleştirilmesi (KZFD-K). Denklemler 15'ten 20'ye her bir adım gösterilmiştir. (a) sıfır fazlı Ricker dalgacığı, (b) genlik spektrumu, (c) faz, (d) yarım kepstrum (YK) LS işlemi, (e) LSM, (f) HRS, (g) LSMN, (h) KZFD-K sonrası (t, f) görüntüsü.....	37
Şekil 22.	Tepe frekansı 35 Hz olan Ricker dalgacığı için KZFD-K işleminin spektral karşılaştırması	38
Şekil 23.	KZFD-K 1B'lu girişimli sentetik ize uygulanması, (a) Yansıma katsayıları, giriş sentetik izi ve KZFD-K sonrası sismik iz, KZFD-K uygulamasının (b) ve öncesi (c) sonrası t-f görüntüleri, (d) giriş (siyah) ve çıkışın (kırmızı) genlik spektrumu karşılaştırması	39
Şekil 24.	Yansıma katsayıları (kırmızı) ile 35 Hz tepe frekanslı sıfır fazlı Ricker dalgacığının konvolüsyondan hesaplanan sismik yansıma izi (siyah)	40
Şekil 25.	Zaman ortamındaki görünümü (sol), frekans alanındaki genlik spektrumları (sağ) (m=pencere boyu).....	40

Şekil 26.	KZFD öncesi ve sonrası giriş-çıkış verilerinin (t, f) görünüşleri, giriş verileri (üstte), çıkış verileri (altta).....	41
Şekil 27.	Farklı tepe frekansına sahip dalgacıklar ile hesaplanan sismik izler ve KZFD-K sonuçları. (a) zaman ortamındaki görünüşleri, (b)frekans alanındaki güç spektrumu.....	42
Şekil 28.	2 Boyutlu sentetik veriye KZFD uygulaması, (a) 2 boyutlu oluşturulan sentetik veri, (b) giriş modeli, (c) KZFD uygulaması sonrası yeniden oluşturulan model, (d) genlik spektrum değişimi.....	43
Şekil 29.	2B’lu arazi verisine KZFD-K tekniğinin uygulaması. (a) Yığma kesiti, (b) KZFD-K sonrası zamansal ayrımlılığı iyileştirilmiş yığma kesiti, (c) giriş ve çıkış yığma kesitlerinin ortalama genlik spektrumu karşılaştırması.....	44
Şekil 30.	Şekil 29’daki çerçeve alanların detaylandırılması. Oklar KZFD-K sonrası zamansal ayrımlılıktaki iyileşmeleri göstermek için kullanılmıştır.....	45
Şekil 31.	Giriş (sol sütun), çıkış (orta sütun) ve genlik spektrumlarının (sağ sütun) karşılaştırılması.....	46
Şekil 32.	KZFD-K uygulamasında giriş ve çıkışlarının küp ve dilim gösterimleri.....	47
Şekil 33.	Sabit hız ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi.....	48
Şekil 34.	Gelişigüzel hız dağılımlı ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi.....	49
Şekil 35.	Derinlikle birlikte artan hız ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi.....	50
Şekil 36.	Derinlikle birlikte artan hız ve incelen tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi.....	50
Şekil 37.	Yığma verisinden seçilen izler (renkli izler).....	51
Şekil 38.	Şekil 37’den seçilen izler iz numarasına göre yeniden gösterimi.....	52
Şekil 39.	Seçilen izlerin KZFD dönüşümleri.....	54
Şekil 40.	Yığma kesitinin sığ (0.4-0.8 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 4 ile karşılaştırması.....	55
Şekil 41.	Yığma kesitinin orta (0.8-1.2 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 2 ve 3 ile karşılaştırması.....	56
Şekil 42.	Yığma kesitinin derin (1.3-1.5 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 4 ile karşılaştırması.....	57
Şekil 43.	Yığma kesitinin derin (>1.5 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 2 karşılaştırması.....	58

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DD	: Dalgacık Dönüşümü
FD	: Fourier Dönüşümü
HC	: Half Cepstrum
HRS	: Kepstrum Çıkış İzi
KZFD	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü
KZFD-K	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü-Kepstrum
KZFDYK	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü-Yarım Kepstrum
LS	: Yarım Kepstrum
LSMN	: Normalize Edilmiş Logaritmik Spektrum
S	: Stockwell Dönüşümü
STFT	: Short Time Fourier Transform
STFT-C	: Cepstral Short Time Fourier Transform
STFTHC	: Short Time Fourier Transform-Half Cepstrum
TF	: Time Frequency
TKZFD	: Ters Kısa Zaman Fourier Dönüşümü
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
ZF	: Zaman Frekans
$A(x)$	: Genlik spektrumu
I	: Sanal bileşen
R	: Gerçek bileşen
$S(t)$	: Zaman verisi
$w(t)$	: Pencere fonksiyonu
$\gamma(t)$	: Sabit genişlikli Gauss penceresi
$\theta(x)$	: Faz spektrumu

1. GENEL BİLGİLER

Sayısal sinyal analizinin sismik verilerin işlenmesindeki önemi teknolojinin gelişmesiyle büyük artış göstermiştir. Sinyaller farklı bilimsel disiplinlerdeki araştırmalarda yaygın olarak kullanılır ve kullanıldığı bilim alanına göre isimlendirilirler. Örneğin, Jeofizikte sismik ve/veya ses dalgası sinyalleri, tıpta radyolojik sinyaller, müzikte ses/akustik sinyaller gibi tanımlamalar yapılmaktadır. Sismik dalgalar; yansıma ve kırılma ilkeleri doğrultusunda, zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilir ve bu kayıt yaygın literatürde en genel haliyle “sismik veri (İng. seismic data)” olarak isimlendirilir. Sismik verilerin inceleme amaçlarına göre, bilgi taşıyan bileşenlerine “sinyal”, bilgi taşımayan bileşenlerine ise “gürültü” denilmektedir. Sismik verilerin spektral içeriğinin anlaşılması, içerdiği gürültünün veriden uzaklaştırılması ve belirtiye (anomaliye) neden olan yeraltı yapılarına ilişkin özelliklerin daha iyi tanımlanabilmesi ve/veya kestirilebilmesi için veriye Fourier Dönüşümü (FD), Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) (Potter & Steinberg, 1950; Potter, 1946), Dalgacık Dönüşümü (DD) (Morlet vd, 1982a; Morlet vd., 1982b) gibi sayısal dönüşümleri içeren “Spektral Dönüşümler” uygulanmaktadır. Bu spektral dönüşümler sinyalin zamana ve frekansa göre bileşenlerinin tespit edilmesi ve ayrıştırılması amaçlarına yönelik olarak sinyal analizinde önemli kullanım alanları bulmuştur (Båth, 1976; Daubechies, 1999; Buttkus, 2000; Sinha vd., 2005; Gao & Yan, 2006; Cheng vd., 2010; Moukadem vd., 2014).

Sinyal işlemede yüzyıllardan beri etkili şekilde kullanılan yöntem ise, temelleri sayısal analize dayanan Fourier serileri ile yapılan analizdir. Fourier Serileri (FS) olarak bilinen analiz, 1807’de Fransız matematikçi ve fizikçi Joseph Fourier tarafından ortaya konulmuştur (Meyer, 1993; Bracewell, 2000). FS bir sinyali harmoniklerine (periyodik sinüs veya kosinüs sinyalleri) ayrıştırarak analiz etme imkanı sağlamaktadır. Bununla birlikte, periyodik olmayan ya da belirli bir aralıkta periyodik olan sinyaller için (veya durağan olmayan) geliştirilen Fourier dönüşümü, bir sismik izin ortalama spektral özelliklerini analiz eder. Ancak, yerel spektral özellikleri analiz etmek için, bir sismik izin pencerelemiş bölümlerine basitçe klasik Fourier dönüşümü uygulanabilir (Wang, 2023).

Gabor (1946; 1952), zaman ve frekans bilgilerini bir arada analiz etmeye yönelik bir yöntem sunmuştur. Temellerini Gabor dönüşümünden alan Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD), sinyallerin hem zaman hem de frekans bileşenlerinin belirlenmesi gerektiği

durumlar için kullanışlıdır. Bir sinyalin kısa pencereci parçalarının FD'nden hesaplanan genlik ve faz spektrumunun zaman ve frekans (t , f) düzleminde haritalanmasını sağlayan KZFD, özellikle iletişim mühendisliği ve radyo dalgalarının analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olsa da, zaman içinde bu yöntem jeofizik biliminde özellikle sismik yansıma ve sismolojik verilerin analizinde yaygın kullanım alanı bulmuştur (Chakraborty & Okaya, 1995; Başokur vd., 2003; Wang vd., 2014; Liu vd., 2016; Liu vd., 2017; Tian, 2021). Sismik verilerin zaman-frekans analizi, verinin zamana bağılı frekans içeriğinin detaylarını anlamayı sağlar (Li vd., 2004; Wu ve Liu, 2009; Han & Van der Baan, 2013). Dolayısıyla, sismik veri işlem süreçlerinde, (t , f) ortamında süzgeçleme, ayrımıcılık iyileştirme, yerel nitelik tanımlama gibi birçok işlem gerçekleştirilebilir (Castanga & Sun, 2006; Liu vd., 2011; Huang vd., 2016; Wang ve Gao, 2017; Wang vd., 2018). KZFD, farklı pencere fonksiyonlarının kullanımı ile Fourier dönüşümü temelli olmakla birlikte, Gauss penceresinin kullanıldığı Stockwell dönüşümü (Stockwell, 1996) ve farklı dalgacık modellerinin kullanıldığı Dalgacık dönüşümü (Daubechies, 1999) ile de gerçekleştirilebilir.

Cohen (1989; 1995), zaman-frekans analizinin temel teorilerini ve uygulamalarını geniş bir çerçevede ele almıştır. KZFD'nin ilk uygulamalarından biri olan bu çalışma, zaman-frekans alanındaki teorik gelişmeleri detaylandırmaktadır. Bu kapsamda, KZFD'nin sağladığı zaman-frekans çözünürlüğü ile sinyaldeki gürültüleri azaltmayı ve sinyalin frekans içeriğinin zaman içindeki değişimini görselleştirmeyi amaçlamıştır. Süzgeçleme konusundaki önemli katkıları sayesinde, zaman-frekans alanında sinyal işleme uygulamalarında daha duyarlı çözümler sunmuştur. Zaman-frekans alanındaki süzgeçleme tekniklerinin geliştirilmesiyle sinyaldeki zamanla değişen frekans içeriğinin analizinde KZFD'nin frekans çözünürlüğünü artırdığı gösterilmiştir.

Steehgs & Drijkoningen (1995; 1996) zaman-frekans analizinin sismik stratigrafik analizde, tabaka kalınlık ve hız ilişkilerinin anlaşılmasında veya kestiriminde kullanılabileceğini sentetik ve arazi verilerine gerçekleştirdiği Wigner dönüşümünü uygulamalarla göstermişlerdir.

Stockwell vd. (1996), KZFD'nin sürekli dalgacık dönüşümünün bir uygulaması olarak, hareketli ve ölçeklenebilir bir Gauss penceresi kullanımıyla S-dönüşümü geliştirmiş ve bu dönüşümün etkinliğini göstermiştir. S-dönüşümü, Fourier spektrumu ile doğrudan ilişkili olup frekansa bağılı çözünürlük sağlaması açısından başarılıdır. S-dönüşümünün bu avantajı, sinüzoidlerin zaman eksenine göre sabitlenmesi, buna karşılık ölçeklenebilir Gauss penceresinin genişleyip ötelenmesi gerçeğinden kaynaklandığını ortaya koymuştur.

Sinha vd. (2005), sürekli dalgacık dönüşümü kullanarak durağan olmayan sinyaller için zaman-frekans haritası hesaplamaya yönelik yeni bir metodoloji üzerinde çalışmışlardır. Bilindiği üzere KZFD, zaman-frekans görüntüsü elde etmenin en geleneksel yöntemidir ve önceden tanımlanan sabit bir pencere uzunluğu ile zaman-frekans çözünürlüğü sınırlanır. Ancak frekansın zamanla değiştiği durağan olmayan bir sinyali analiz etmek için ihtiyaç duyulan zamanla değişen bir pencere kullanımı, zaman-frekans spektrumu yerine zaman-ölçek spektrumu sağlamak için dalgacıkları genişletmekte ve sıkıştırarak bu sorunun üstesinden gelmektedir. Sürekli dalgacık dönüşümü, pencere uzunluğunun öznel seçimlerini ortadan kaldırarak, durağan olmayan bir sinyal için herhangi hatalı bir zayıflama etkisi olmadan optimal bir zaman-frekans spektrumu sunar. Böylece, bu yöntem ile doğrudan hidrokarbon alanlarının belirlenmesi ve iyileştirilmiş stratigrafik görselleştirme uygulamaları için kullanılabileceğini önermişlerdir.

Baba (2012) ultrasonik görüntülemeye KZFD yöntemini kullanmış ve durağan olmayan bir sinyal analizi için, zaman-frekans çözünürlüğünün nasıl kontrol edilebileceği konusunda bir nokta yayılma fonksiyonu kullanarak, durağan olmayan sinyallerin görüntü kalitesini değerlendirmiştir. Zaman ve frekansın belirsizlik ilkesi nedeniyle, genişlik-uzunluk oranını kontrol etmenin kolay olmadığını, zaman-frekans çözünürlüğünü nokta yayılma fonksiyonu olarak tanımlandığını ve yeni bir kontrol yönteminin uygunluğunu göstermek için KZFD yöntemini kullanmıştır. Bu çalışma kapsamında, frekans çözünürlüğünün esas olarak KZFD parametreleri tarafından kontrol edildiğini ve zaman çözünürlüğünün ise, bir yumuşatma parametresi tarafından kontrol edildiğini göstermiştir.

Sattari vd. (2013), zaman-frekans analizinin, yeraltı yansıma serilerinin frekans içeriğindeki zamansal değişimlerin izlenmesi ve sismostratigrafik yorumlama açısından önemli bir araç olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, zaman-frekans dönüşümünün analizinde yüksek çözünürlüğün sağlanması ve sinyalin yerel değişimlerine duyarlılığın korunmasının kritik olduğu vurgulanmıştır. İnce tabaka karakterizasyonu ve ince tabakalı gaz rezervuar tespiti gibi sismik veri analizi için etkili bir araç olarak kullanıldığı, sentetik ve saha verilerinden elde edilen sayısal örneklerin sonuçları, bu analizin dönüşümleriyle karşılaştırıldığında dikkate değer bir performans sergilediğini, böylece zaman-frekans dönüşümünün sismik veri analizi için yararlı bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır.

Putri ve Priyono (2019), ince tabakalı yapıların tanımlanabilmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, yüksek frekans bileşenlerinin çözünürlüğünü artırmak için Kısa Zaman Fourier Dönüşümü Yarı Kepstrum (KZFDYK) yöntemini kullanmışlardır. KZFDYK

yönteminin temel prensibi, genlik spektrumunun logaritmasının alınırken, faz spektrumunun aynı kalmasıdır. Ricker dalgacığı ile oluşturdukları sentetik sismik veriye bu yöntemi uygulayarak verinin düşey ayrırlılığını (çözünürlüğünü) artırarak ince tabakalı yapıları tanımlamışlardır. Ayrıca, yöntemde Gauss penceresi kullanılmış ve sentetik verideki ayrırlılık artışını başarılı bir şekilde test etmişlerdir. Putri ve Priyono (2019) KZFDYK analizini arazi verisine de uygulayarak, analizin gerçek veriler üzerinde etkili sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında, kısa zamanlı Fourier dönüşümünün (KZFD) sismik yansıma verilerinin analizinde nasıl kullanılabileceğini ve bu yöntemin sismik sinyallerin zaman ve frekansa göre genlik bilgisinin dağılımının görüntülenmesinde, süzgeçlenmesinde, ayrırlılığının iyileştirilmesinde ve stratigrafinin tahmin edilmesinde sağladığı katkılar sentetik ve arazi verilerine uygulamalarla gösterilmiştir. KZFD'nin sismik veri analizinde kullanılması hem teorik hem de pratik uygulama ilkeleri çerçevesinde açıklanmıştır ve sismik yansıma verilerinin düşey ayrırlılığının artırılmasındaki rolü ve daha fazla geliştirme potansiyeli incelenmiştir. Zaman-frekans değişimlerinin görselleştirilmesi, veri süzgeçleme gibi amaçlarla KZFD'nin kullanımı, uygulama sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur. Bu yöntemle tek frekanslı sismik kesitlerin elde edilmesi ve bunun sismik yoruma katkıları üzerinde durulmuştur. Aynı zamanda, sismik stratigrafik analizlerde KZFD'nin kullanımına odaklanılmıştır. Yeraltı hız ve kalınlık değişimlerinin kestirilmesinde, jeolojik yapıların doğru bir şekilde yorumlanmasında KZFD'nin sağladığı katkılar ele alınmıştır.

Bu analizlerin gerçekleştirilmesi ve tezde göz önüne alınan hedeflere ulaşılması amacıyla, MATLAB ortamında geliştirilen özgün kodlar kullanılmıştır. Tezin hedefleri doğrultusunda geliştirilen tüm kodlar ilk olarak sentetik sismik yansıma model verileri üzerinde test edilmiştir ve sonra arazi verilerine uygulanmıştır. Tez kapsamında kullanılan arazi verileri (atış ve yığma verileri) Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO)'ndan temin edilmiştir. Verilerin herhangi bir konum bilgisi paylaşılmamıştır. Sonuç olarak, bu tez çalışması, KZFD'nin sismik veri analizinde sunduğu olanakları ve bu olanakların sismik yansıma verilerinin birçok açıdan analizi için gerçekleştirilen uygulama örneklerini içermektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Zaman-Frekans (t, f) Analizi

Sismik verilerin işlenmesinde ve yorumlanmasında en temel bilgi olan zaman ile anlık frekans arasındaki durağan olmayan ilişkiyi karakterize etmek için, zaman-frekans (ZF, Time-Frequency-TF) ayrıştırması kullanılmaktadır (Chen vd., 2002). Zaman-frekans analizi, ses, ışık, iletişim, tıbbi görüntüleme gibi çeşitli sinyallerin incelenmesinde ve analizinde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Zaman bölgesi, sinyal genliklerinin zaman içindeki değişimini gösterirken; frekans bölgesi, sinyalin farklı frekanslardaki genliğini göstermektedir.

Zaman-frekans analizi, son yirmi yılda jeofizik araştırmacılar tarafından özel olarak kullanılan, sinyalde sunulan harmonik bileşenlerin tanımlanması ve niceliklerinin belirlenmesi problemlerini çözmektedir (Chen vd., 2002). (Partyka vd., 1998; Castagna vd., 2003; Reine vd., 2009; Liu vd., 2011; Han vd., 2014; Chen vd., 2020; Tian, 2021).

Sinyallerin zaman ve frekans bölgelerine dönüştürülmesi Fourier Dönüşümü ile yapılmaktadır (Hlawatsch & Boudreaux-Bartels, 1992). Joseph Fourier (1768-1830) tarafından geliştirilen Fourier Dönüşümü, sinyallerin zaman bölgesinden frekans bölgesine ya da frekans bölgesinden zaman bölgesine dönüştürülmesini sağlayan matematiksel bir işlemdir. Bununla birlikte, zaman bölgesinin analizi, zaman içinde bir sinyalde meydana gelen değişiklikleri gösterirken, sinyalin bu değişimlerin nedenlerini tanımlama yeteneği sınırlıdır. Diğer yandan, frekans bölgesinin analizi ise, sinyal içindeki belirli frekans bileşenlerini izole ederken, gerçek zamanlı veri sağlamamaktadır. Frekans bölgesi analizi tanımlama ve analiz için yararlı olsa da gerçek zamanlı sürekli değişen sinyallerin analizi için uygun değildir (Gaunard & Strifors, 1996). Zaman bölgesindeki herhangi bir $f(t)$ sinyalinin Fourier dönüşümü ve frekans bölgesindeki sinyalin tekrar zaman bölgesine dönüştürülmesi için kullanılan Ters Fourier dönüşümleri, yani Fourier dönüşüm çifti aşağıda şekilde ifade edilir;

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2)$$

Genlik spektrumu (A), gerçel bileşen (R), sanal bileşen (I) ve faz spektrumu (θ) olmak üzere, genlik ve faz spektrumu hesaplamaları sırasıyla şu şekildedir.

$$F(f) = R(f) + jI(f) \quad (3)$$

$$A(f) = \sqrt{[R(f)]^2 + [I(f)]^2} \quad (4a)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left(\frac{I(f)}{R(f)} \right) \quad (4b)$$

Bununla birlikte, Fourier dönüşümünden yararlanılarak, bir sinyalin zaman-frekans dağılımının analizini veya iki boyutlu genlik ve faz bilgisi haritalamasını yapmak için pek çok yöntemden yararlanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları KZFD, Gabor, Dalgacık ve Stockwell (S) dönüşümleridir.

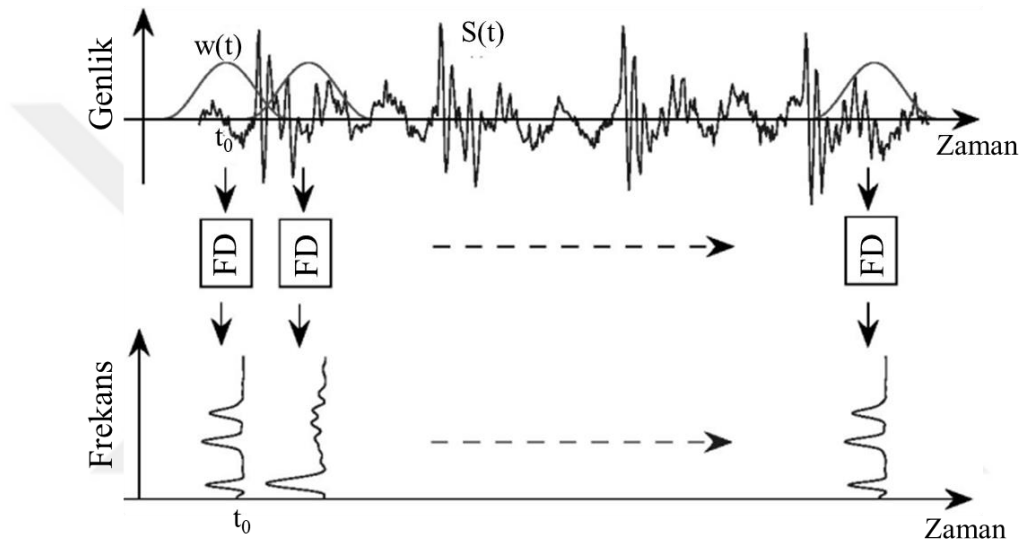
2.2. Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD)

Fourier Dönüşümü, sinyalin spektrum bileşenlerini göstermekte olup, bu bileşenlerin zaman bilgisini içermemektedir. Gabor (1946) pencereleme yöntemini kullanarak, sinyalin küçük bir parçasını zaman tanım aralığında ele almış, sinyali zaman ve frekansın fonksiyonu olarak iki boyutta ifade etmiştir. Diğer bir deyişle, KZFD, sinyali belirli zaman dilimlerine ayırarak, her bölümün Fourier dönüşümünün alınması şeklinde hesaplamaktadır. Fourier dönüşümünün yerelleştirilmesi fikrine dayanan bu teknik ilgilenilen yerde uygun bir pencere seçilerek dönüşüm işlemini gerçekleştirir (Polikar, 2001).

Bu işlem, sabit genişlikli kayan bir pencere fonksiyonu ile dönüşümü alınacak fonksiyonun çarpılması şeklinde gerçekleştirilir. Bu sayede sinyal zaman-frekans ortamına taşınmış olmaktadır (Wang, 2023). Belirli bir zamanda, t , için, pencerelenmiş sinyal $S(t)$ 'nin dönüşümü aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$KZFD(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

Bu dönüşüm Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) olarak adlandırılır (Gabor, 1946; Cohen, 1989). $S(t)$ zaman verisi, $w(t)$ pencere fonksiyonu olup, $S(t)$ zaman verisinin τ zamanına kaymış $w(t)$ pencere fonksiyonu ile çarpımının Fourier dönüşümü ile kısa zamanlı Fourier dönüşümü elde edilmektedir. Böylece, pencerenin yeni bir τ zamanına kaydırılması ile zaman frekans genlik haritası elde edilebilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. KZFD yönteminde zaman serisi, $S(t)$ 'nin pencere fonksiyonu $w(t)$ ile çarpılarak Fourier Dönüşümü'nün alınması. FD, Fourier dönüşümünü ve t_0 hesaplanan genlik spektrumunun atandığı zaman değerini gösterir (Gao ve Yan 2006'dan düzenlenmiştir)

KZFD'de, bir sinyalin analizi için seçilen pencerenin uzunluğu veya genişliği dönüşüm sonuçlarının çözünürlükleri üzerinde son derece önemlidir. Dolayısıyla, KZFD'nin başarısı uygun bir pencere ile kullanışlı olur. Zaman ayrırlılığını arttırmak, pencere genişliğini ve frekans ayrırlılığını azaltmaktadır. Buna karşılık, frekans ayrırlılığını arttırmak pencere genişliğinin artırmak, dolayısıyla zaman ayrırlılığı azalmaktadır (Cohen, 1995). Bu nedenle, zaman çözünürlüğünün artırılması zaman boyunca daha ayrıntılı bir inceleme yapılmasını sağlarken, bu durumda frekans çözünürlüğünde belirsizlikler artar; benzer şekilde, frekans çözünürlüğünü artırmak ise zaman boyunca belirsizliğe neden olmaktadır.

Bununla birlikte geniş pencere seçimi ile durağanlık koşulu ihlal edebilir. Orijinal sinyalde frekans bileşenleri birbirinden iyi ayrılıyorsa, spektral bileşenler birbirinden iyi ayrıldığı için, frekans çözünürlüğünden ödün verilebilir ve zaman çözünürlüğünde iyi bir sonuç elde edilebilmektedir (Polikar, 2001).

Pencere genişliğinin sabit olması, KZFD uygulamasında çok düşük frekanslı bileşenlerin spektrumda tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Pencere kullanımı ve seçimi, sonuçların ayrımlılığı açısından büyük önem taşır. Pencere, sinyalin sadece belirli bir bölgesinin gözlemlenmesine olanak tanıdığı gibi, sinyalin zaman bölgesinde pencerelenmesi sayesinde başlangıç ve bitiş noktalarında oluşan süreksizliklerin frekans bölgesinde neden olabileceği spektral sızıntıları önlemek için gereklidir (Randall, 1988).

KZFD, tamamen tersi alınabilir bir işlem olmakla birlikte, sinyal, ters kısa zamanlı Fourier (TKZFD) dönüşümü alınarak tekrar elde edilebilir (Allen, 1977).

$$TKZFD(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} KZFD(t, f) w(t - \tau) e^{i2\pi f \tau} df d\tau \quad (6)$$

2.3. Gabor Dönüşümü

Adını geliştiricisi olan Gabor (1946)'dan alan Gabor dönüşümü, kısa zamanlı Fourier dönüşümünün özel bir halidir. Bir sinyalin frekans ve faz içeriğinin zamanla değişimini incelemek için geliştirilmiştir. Gabor dönüşümü, bir sinyalin KZFD'nin sabit genişlikli Gauss penceresi kullanılması olarak tanımlanır (Lukacs & King, 1954; Carmona vd, 1998).

$$GD(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cdot \gamma(t - \tau) \cdot e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

Gauss pencere fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir. Burada genişliği belirleyen parametre, Poisson, σ , oranıdır.

$$\gamma(t) = e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

KZFD’de olduğu gibi Gabor dönüşümü de tamamen tersi alınabilir bir işlemdir ve aşağıdaki şekilde gösterilir (Carmona vd, 1998);

$$TGD(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} GD(t, f) \gamma(\tau) e^{i2\pi f t} df d\tau \quad (9)$$

2.4. Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık dönüşümü, KZFD ve Gabor dönüşümlerinin zaman-frekans çözünürlüğü problemini çözebilmek ve durağan olmayan sinyallerin analizini daha kaliteli hale getirmek için geliştirilen dönüşümdür. KZFD ve Gabor dönüşümlerinin aksine hem zaman hem de frekans ortamında yüksek çözünürlüğe sahiptir. Sinyal işleme ve analizinde, zaman-frekans çözümlemesi yapabilme yeteneği nedeniyle tercih edilmektedir. Bir sismik sinyali, farklı ölçeklerde ve yerel olarak incelemeyi mümkün kılar. Çok çeşitli sinyal tiplerine uygulanabilir olduğu görülmüştür (Durand & Froment, 2001; Zhang vd. 2009; Daubechies vd., 2011). Dalgacık dönüşümünde, KZFD dönüşümüne benzer olarak pencere görevini ana dalgacık denilen bir fonksiyon üstlenir, ancak bu ana dalgacık dönüşüm süresince hem ölçeklenir hem de ötelenir. Öteleme zaman ekseninde dalganın kaydırılmasına karşılık gelirken, ölçekleme ise, dalganın genişletilip daraltılmasına karşılık gelir (Arı vd., 2008).

KZFD’de dönüşüm boyunca pencere fonksiyonu genişliği sabit kalırken, dalgacık dönüşümünde sürekli değişir ve hem frekans hem de zaman alanında çözünürlük artmaktadır. Bu, dalgacık dönüşümünü Fourier dönüşümünden üstün kılmaktadır.

Dalgacık dönüşümünün en önemli bileşeni dalgacık ve ölçekleme parametresi a ’dır. Bir $x(t)$ sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü,

$$W(\tau, f) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (10)$$

integrali ile hesaplanır (Akansu ve Haddad, 1992). ψ fonksiyonu, kullanılacak olan dalgacığı temsil etmekte ve ortalaması sıfır olan hem zaman hem de frekans ortamında lokalize bir fonksiyon olmalıdır. a , ölçekleme parametresi olarak adlandırılmaktadır. Bu parametrenin

değişimi, pencere fonksiyonunun genişlemesine ya da daralmasına yol açmaktadır. Böylece, sinyalin detaylı bilgi içeren kısımları daha belirgin ya da daha kötü analiz edilmesine neden olmaktadır (Chakraborty & Okaya, 1995).

2.5. Stockwell Dönüşümü (S-Dönüşümü)

Kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve Gabor dönüşümleri, zaman-frekans analizi için sabit genişlikli pencere kullandıklarından dolayı, sinyali hem zaman hem de frekans bölgesinde yüksek ayrımlı analiz etmekte yetersiz kalmaktadır (Chu, 1996; Mansinha vd., 1997). Dalgacık dönüşümü ise, özel tanımlı bir dalgacık seçimine (Morlet, Dabucies, Haar, vd.) bağlı olduğundan ve zaman-frekans bölgesinde sinyal/gürültü oranı zayıf olan verilerde yeterli sonuç verememektedir. Ayrıca, dalgacık dönüşümünün dar bir frekans bandını yeterli netlikte ayırmayamaması ve faz bilgisine sahip olmaması sorun oluşturmaktadır (Stockwell vd., 1996; Stockwell, 2007). Bu problemleri çözebilmek için, KZFD ile sürekli dalgacık dönüşümlerinin üstün özelliklerinden yararlanarak geliştirilen yöntem S-dönüşümüdür (Stockwell, 2007). Stockwell dönüşümü olarak da adlandırılan bu yöntem, jeofizikte Theophanis ve Queen (2000) sismik kesitlerin renklendirilmesine, Irving ve Knight (2003) radar verilerinin ayrımlılığının artırılmasında, Başokur vd. (2003) deprem ivme kayıtlarının incelenmesinde ve Odebeatu vd. (2006) sismik kesitlerde gaz doygunluğunu ile ilgili belirtilerinin saptanmasında kullanılmışlardır.

$$S(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{\left[-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}\right]} e^{-i2\pi ft} dt \quad (11)$$

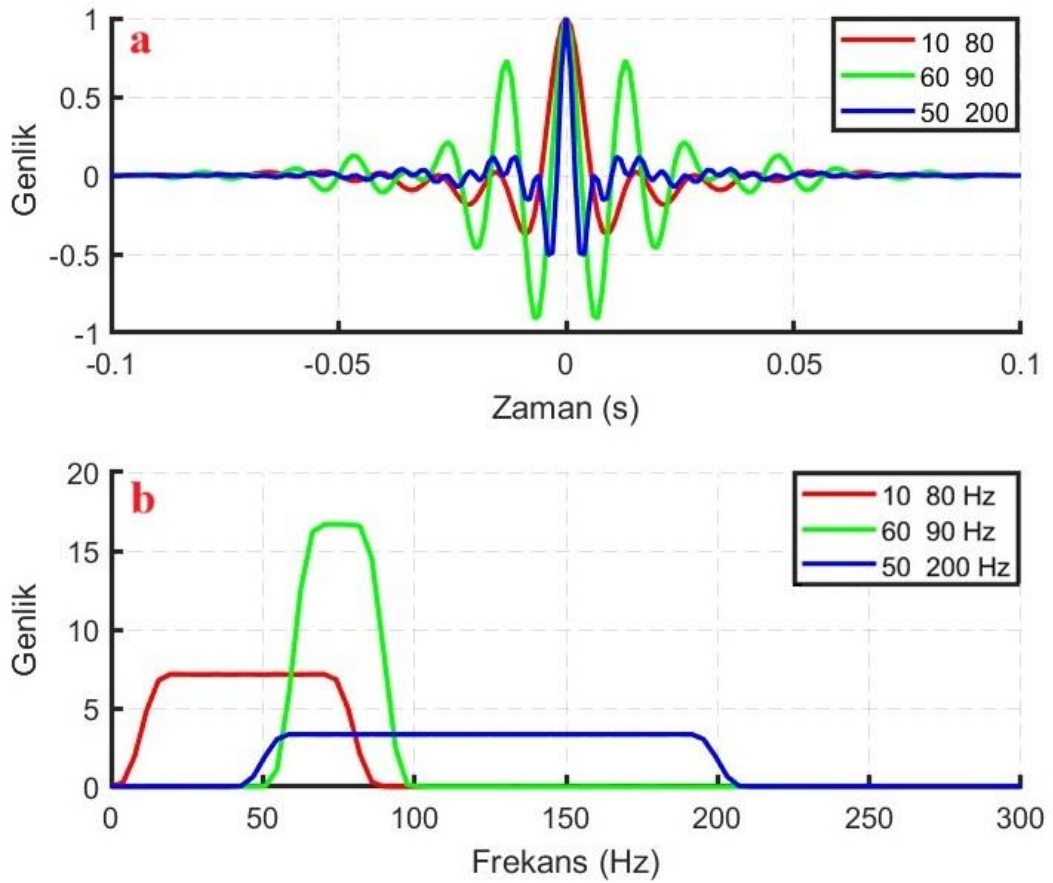
Burada t zaman, f frekans ve τ ise Gauss penceresinin zaman eksenini boyunca konumunu kontrol eden bir parametredir. Bu dönüşümde tanımlandığı gibi Gauss pencere ölçeğinin özellikleri sürekli dalgacıktan türetilir (Ditommaso vd, 2012). S-Dönüşümü tersi alınabilir bir dönüşümdür (Stockwell vd, 1996).

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) e^{i2\pi ft} dt df \quad (12)$$

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Sismik Dalgacığın Frekans Bant Genişliği, Yan Salınım ve Sismik Ayrımlılık İlişkisi

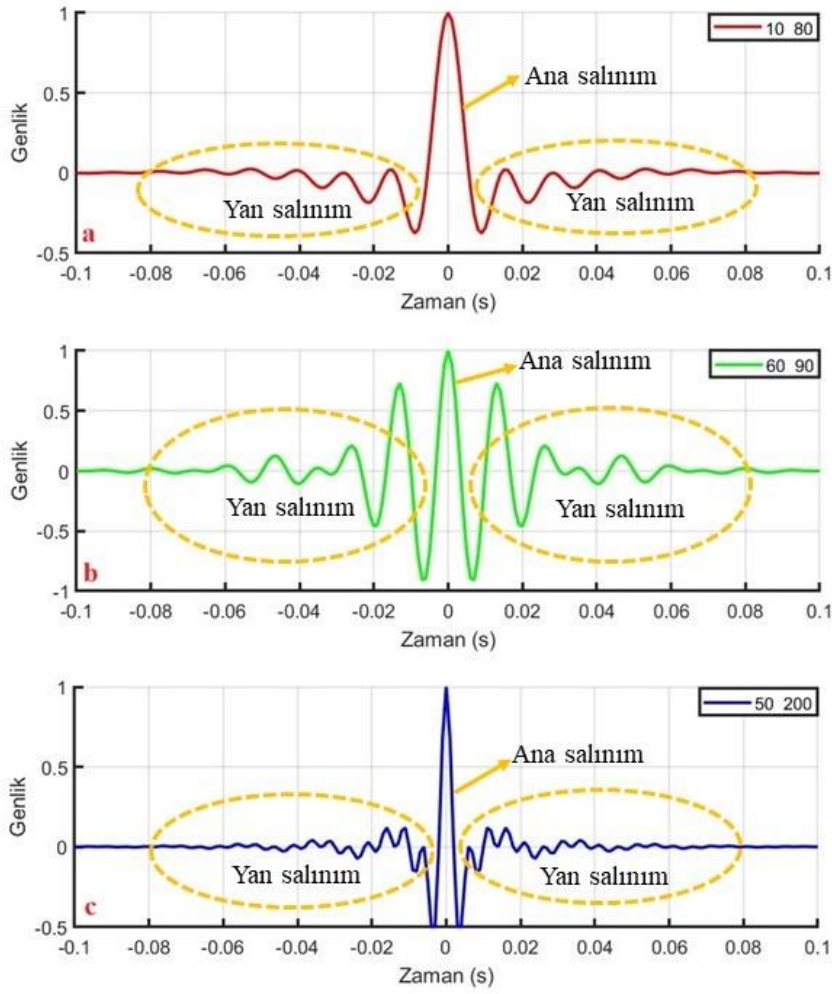
Sismik dalgacığın frekans içeriği, yan salınım (side lobe) ve sismik ayrımlılık arasındaki ilişki, sismik verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi ve yorumlanması için oldukça önemlidir. Şekil 2a, bant genişlikleri $f = [10-80, 60-90, 50-200]$ Hz, zaman uzunluğu 0.2 s ve örnekleme aralığı $dt=0.001$ s olan sıfır fazlı Ricker dalgacık modellerini ve Şekil 2b Fourier genlik spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 2. Farklı spektral genişliğe sahip Ricker dalgacıklarının (a) zaman ve (b) frekans ortamı görünüşleri

Şekil 2a ve Şekil 2b spektral genişliğin daraldıkça yan salınım genliklerinin arttığını açıkça göstermektedir. Şekil 2a'da hem ana salınımı (main lobe) en geniş hem de yan salınım genlikleri en büyük olan dalgacık (yeşil renk), Şekil 2b'deki en dar (60-90 Hz) spektruma sahiptir (yeşil renk). Buna karşılık ana salınım genişliği en dar ancak yan salınımları kısmen büyük olan ve spektral genişliği en geniş olan dalgacığın 50-200 Hz (mavi renk) olduğu görülmektedir. Diğer yandan, ana salınım genişliği kısmen dar olan ancak yan salınım genlikleri en küçük olan dalgacığın 10-80 Hz spektral bantlı dalgacık (kırmızı renk) olduğu açıktır. Bu üç durum analiz edildiğinde, dalgacık düşük frekans bölgesindeki enerjisini kaybettikçe yan salınım genlikleri artmış, spektral bantı daraldıkça da ana salınım genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, düşük frekans eksikliği yan salınım genliğini kontrol ederken, spektral bant genişliği ana salınım genişliğini kontrol eder. Bu nedenle, sismik yansılarda ayrımlılık analizlerinde düşük frekans eksikliğinin en az olduğu ve en geniş frekans bant genişliğine sahip dalgacıklar tercih edilmektedir. Sismik dalgacığın frekans içeriği, sismik dalganın taşıdığı enerji spektrumunu ifade ederken, verinin çözünürlüğünü ve ayrımlılığını önemli ölçüde etkilediği gözlenmektedir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi bir dalgacığın yan salınımı, dalgacığın ana salınımının çevresinde meydana gelir ve bu durum, dalgacığın frekans içeriği ve zaman penceresinin genişliği ile doğrudan ilişkilidir (Margrave vd., 2019). Bir sinyalin ana salınımının dışında kalan ve istenmeyen enerji dağılımları yan salınım olarak adlandırılır. Üç farklı tepe frekanslarına sahip sıfır fazlı dalgacıklar, zaman ekseninde benzer dalga formlarına sahiptir ancak tepe frekansları arttıkça sinyallerin ana salınım süreleri kısalarak daha dar bir hale gelmektedir. Bu durum yüksek frekanslı sinyallerin daha keskin ve kısa süreli olduğunu göstermektedir.

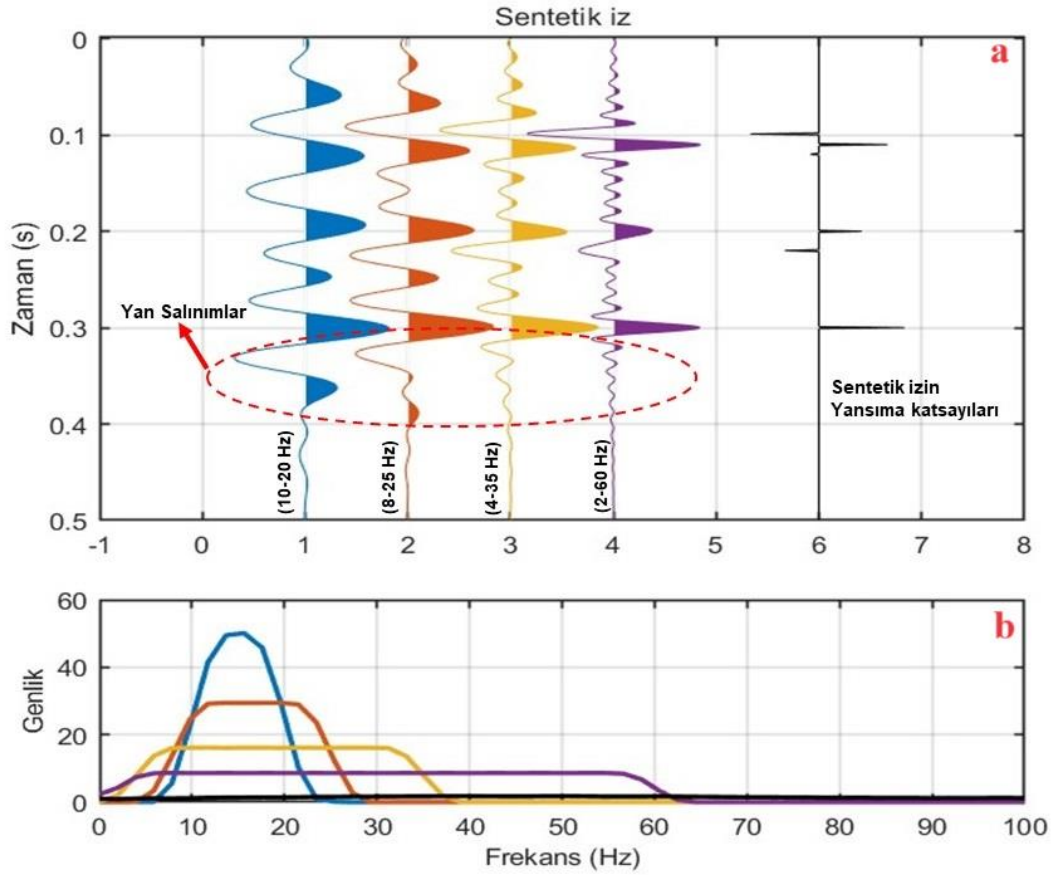


Şekil 3. Şekil 2’deki farklı frekans bantlarındaki sıfır fazlı Ricker dalgacıkların ana ve yan salınımları.

İki farklı yeraltı yapısının sismik kayıtlarda birbirinden ayırt edilebilme yeteneği, sismik ayrımlılık olarak tanımlanır. Yüksek çözünürlüklü sismik yansımalar, normal olarak yüksek frekans bileşenlerine sahip dalgacıklar kullanılarak elde edilebilir. Ancak, bu durum Şekil 3’de açıklandığı üzere yan salınımların artmasına ve sinyal-gürültü oranının düşmesine neden olabilir (Sheriff & Geldart, 1982). Yan salınımlar, sismik verilerin yorumlanmasında gürültüye neden olduğu gibi ayrımlılığı da olumsuz etkileyebilir.

Verinin düşük frekans eksikliği ve yüksek frekans soğurulmasından dolayı zamansal ayrımlılık genellikle yeterli değildir. Özellikle, düşük frekans eksikliği yansıma dalgacığında yan salınımlara yol açar ve bu durum, hidrokarbon rezervuarları, kama, kum lensleri ve ince tabaka gibi yapılardan elde edilen sismik verilerin yanlış yorumlanmasına sebep olabilir (Karslı & Şenkaya, 2018).

Dört farklı $f = [10-20, 8-25, 4-35, 2-60]$ Hz frekans bant genişliğine sahip sıfır fazlı bir dalgacık ile farklı girişim seviyelerini karakterize edecek 6 adet yansımaya katsayısı serisi konvole edilerek Şekil 4'te sunulmuştur. Hesaplamada, sismik iz süresi 0.4 s ve örnekleme zamanı $dt=0.001$ s olarak kullanılmıştır. Hesaplanan sentetik izler farklı renklerle Şekil 4a'da ve bu izlere ait genlik spektrumları Şekil 4b'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, yansımaya katsayıları izi tüm frekanslara sahipken, belirli bant genişliklerine sahip sismik izlerin düşük ve yüksek frekansları eksiktir. Ancak, çok açık olarak görülmektedir ki, frekans bant genişliği en fazla olan sinyal (mor renkli) yansımaya katsayısı serisi ile daha fazla uyum içindedir.

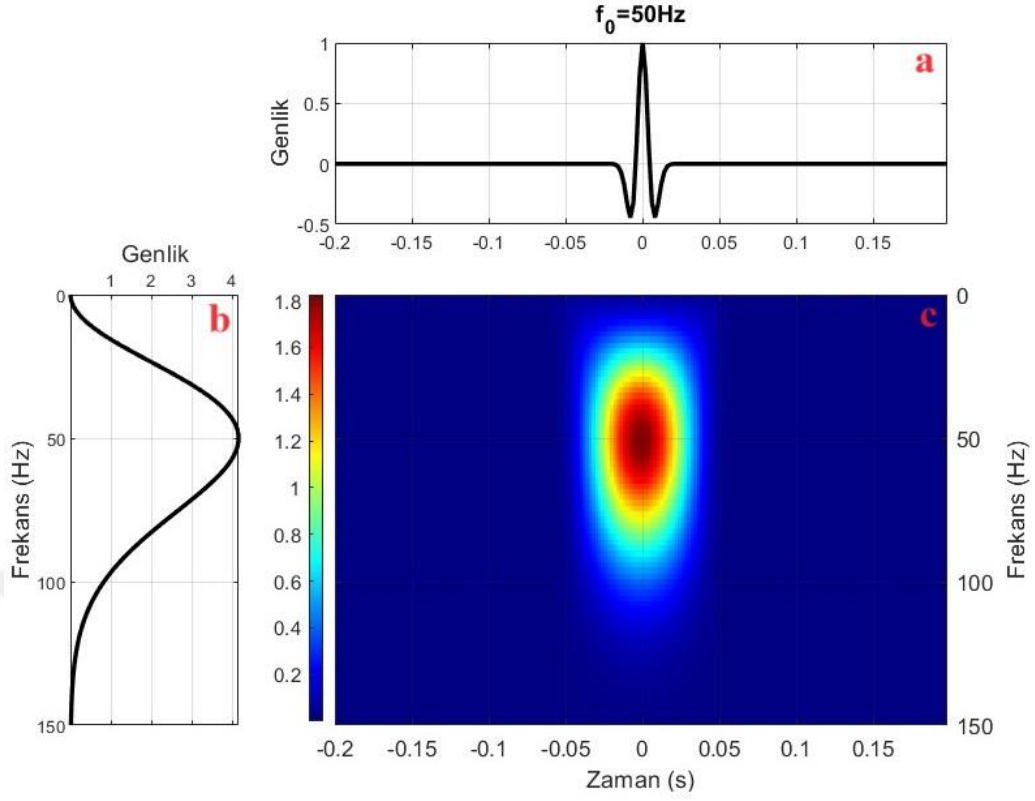


Şekil 4. Frekans bant genişliğinin dalgacık yan ve ana salınım üzerindeki etkileri. (a) Sentetik izler ve yansımaya katsayıları, (b) sismik izlerin genlik spektrumları. (a) ve (b)'deki renkler eşleşmektedir.

3.2. KZFD'nin Sıfır Fazlı Dalgacık Modeli ile Tanıtılması

Sıfır fazlı dalgacıklar, faz bileşeninin sıfır olduğu ve tüm frekans bileşenlerinin eş zamanlı olarak başladığı dalgacıklardır. Bu tür dalgacıklar, simetrik bir yapı gösterir ve sismik veri analizinde yüksek çözünürlük sağlar (Yılmaz, 2001). Sıfır fazlı dalgacıklar, özellikle yansıma olaylarının tam yerini belirlemek için kullanılır.

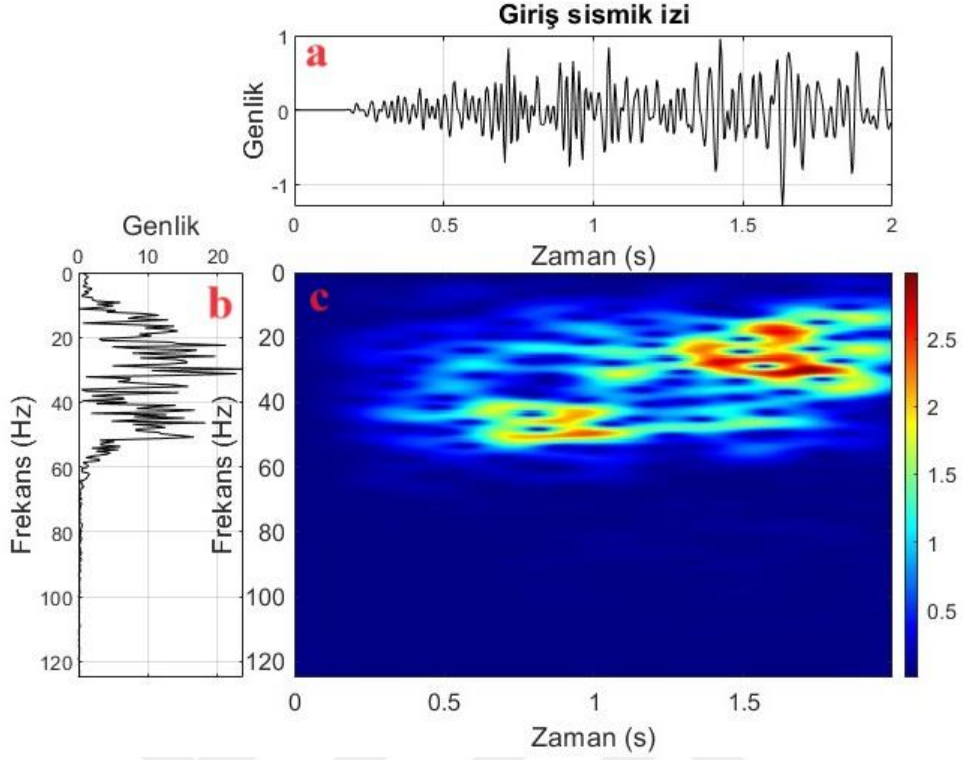
Şekil 5, tepe frekansı 50 Hz olan bir sıfır fazlı Ricker dalgacığının (Şekil 5a) Fourier genlik spektrumu (Şekil 5b) ve KZFD ile elde edilen t-f görüntüsünü (Şekil 5c) göstermektedir. Görüldüğü üzere, Fourier genlik spektrumu dalgacığın genliklerinin sadece frekansa göre değişimini gösterirken, KZFD dalgacığın genliklerinin (ve/veya enerjisinin) hem frekansa hem de zaman bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil 5c'deki görüntüde maksimum genliğin $t=0$ s ve $f=50$ Hz olduğu ve bu değerlerin hem Şekil 5a'daki maksimum genlik zamanına hem de Şekil 5b'deki maksimum genlik frekansına karşılık geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, sinyalin zaman ve frekansa yayılan diğer enerjileri $t=0$ s ve $f=50$ Hz civarında odaklanmaktadır. Böylece, bir sismik iz üzerindeki herhangi zamanda kaydedilen yansıma dalgacığının zaman konumu ve frekans içeriği (t, f) görüntüsü üzerinden tanımlanabileceği anlaşılmaktadır. (t, f) üzerindeki sinyal enerjisinin dağılımı kullanılan pencere fonksiyonun genişliği ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 5. Sıfır fazlı dalgacığın FD ve KZFD görünüşleri. (a) Ricker dalgacı, (b) Fourier genlik spektrum ve (c) t-f görünümü

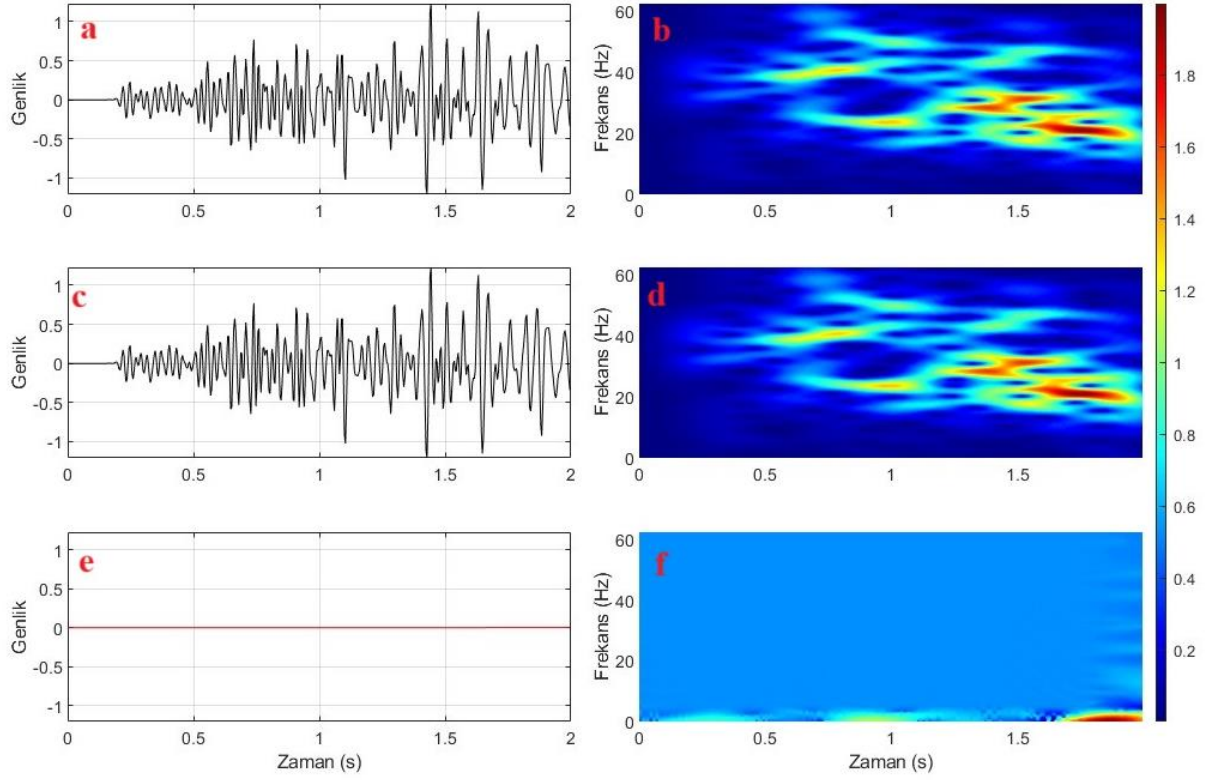
3.3. KZFD'nin Gerçek Sismik İz ile Tanıtılması

Şekil 6, gerçek bir sismik ize (Şekil 6a) FD (Şekil 5b) ve KZFD (Şekil 5c) uygulamalarının sonucunu göstermektedir. Şekil 6b'deki FD genlik spektrumuna göre verinin spektral içeriği ~15-55 Hz arasında yoğunlaşmaktadır. Ancak bu içeriğin zaman eksenini boyunca nasıl değiştiği bilgisi Şekil 6c'deki t-f spektrumunda görülmektedir. Buna göre, verinin spektral içeriği 0.25-2.0 s arasında zengindir. Bununla birlikte, ~0.5-1.25 s arasında ~40-55 Hz frekans aralığı oldukça güçlü iken, ~1.25-2 s arasında 10-35 Hz aralığındaki frekanslar oldukça güçlüdür. Böylece, zamana göre hangi frekanslar hangi zamanda nasıl değiştiği açıkça analiz edilebilmektedir.



Şekil 6. (a) Gerçek bir sismik izin (b) FD genlik ve (c) t-f spektrumu. İzin örnekleme zamanı $dt=4$ ms'dir.

Şekil 7' de KZFD ve TKZFD işlemi sonucunda elde edilen veriler sunulmuştur. Giriş izi (Şekil 7a) ile TKZFD işlemi sonucu elde edilen izin (Şekil 7c) arasındaki fark izi ise Şekil 7e'de gösterilmiştir. Fark izindeki tüm değerlerin sıfıra veya sıfıra çok yakın olması, TKZFD'nin tersinin alınabilir bir dönüşüm olduğunu doğrulamaktadır. Fark izinde sıfıra çok yakın olan bu değerler, göz ardı edilebilecek kadar küçük olsa bile, pencere boyutuna bağlıdır. Daha kısa bir pencere boyutu kullanıldığında, bu fark değerleri uzun pencere boyutuna göre daha da küçülerek sıfıra yaklaşır.



Şekil 7. KZFD'nin giriş-çıkış fark analizi, (a, b) giriş izi ve (t, f) spektrumu, (c, d) Ters KZFD çıkış izi ve (t, f) spektrumu, (e, f) giriş-çıkış fark izi ve (t, f) spektrumu

3.4. KZFD Uygulamasında Pencere Fonksiyonunun ve Uzunluğunun Öneminin İrdelenmesi

Pencere fonksiyonları, sinyalin belirli bir zaman aralığında analiz edilmesine olanak tanır. Uzun bir pencere iyi bir frekans çözünürlüğü sağlarken zaman çözünürlüğünü azaltır. Kısa bir pencere ise, iyi bir zaman çözünürlüğü sağlarken frekans çözünürlüğünü zayıflatır (Martin, 1992). Sinyal işlemede dikdörtgen, Gaussian, Hamming, Hanning, Blackman-Harris ve Kaiser gibi çeşitli pencere türleri kullanılır (Şekil 8). Uygulamada sinyalde süreksizlik oluşturmasının önüne geçilmesi açısından çoğunlukla kenarları sıfıra giden pencereler tercih edilir. Bu kapsamda bu tez kapsamında, Gauss ve Hanning pencereleri sıklıkla tercih edilmiştir.

Hamming penceresi (denklem 13), kosinüs tabanlı bir fonksiyon ile tanımlanır. $w[n]$ sinyalin her bir örneği için pencere fonksiyonu tarafından uygulanan ağırlık faktörü, L

pencere uzunluğu (örnek sayısı), n zaman eksenindeki örnek sayısı olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir (Harris, 1978);

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right), \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad (13)$$

Hamming penceresi, pencere katsayılarının optimize edilerek yan salınım seviyeleri azaltılır ve böylece sinyalin keskin kenarların etkisi minimize edilmiş olur. Yan salınım etkisini bastırarak sinyal spektrumunu temizleyerek dengeli bir analiz sağlar (Hamming, 1989).

Hanning penceresi (veya Hann penceresi, denklem 14), sinyaldeki ani kesilmelere bağlı olarak oluşan frekans alanındaki bozulmaları azaltır (Harris, 1978).

$$w[n] = 0.5 \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right)\right), \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad (14)$$

Adını Gauss dağılımından alan Gauss penceresinin (denklem 15) hesaplanmasında kullanılan, σ , standart sapma parametresidir ve pencere genişliğini kontrol eder (Harris, 1978).

$$w[n] = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{n - \frac{L-1}{2}}{\sigma \frac{L-1}{2}}\right)^2\right), \quad 0 \leq n \leq L-1 \quad (15)$$

Blackman-Harris penceresi (denklem 16), çok düşük yan salınım seviyelerine sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. Sinyalin spektrumunda istenmeyen frekans bileşenlerinin önüne geçmektedir. Dört terimli bir kosinüs serisi ile tanımlanır.

$$w[n] = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{L-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{L-1}\right) \quad (16)$$

$a_0 = 0.35875$, $a_1 = 0.48829$, $a_2 = 0.14128$, $a_3 = 0.01168$ sabit katsayılardır ve pencerenin ana salınım ve yan salınımların bastırılmasını optimize eder (Harris, 1978).

Dikdörtgen pencere (denklem 17), en basit pencere türüdür ve pencere fonksiyonu sabit bir genlikte kalarak sinyali doğrudan kesmeden kullanır. Yan salınımların yüksek olması, frekans spektrumunda istenmeyen gürültülerin ve bozulmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Harris, 1978).

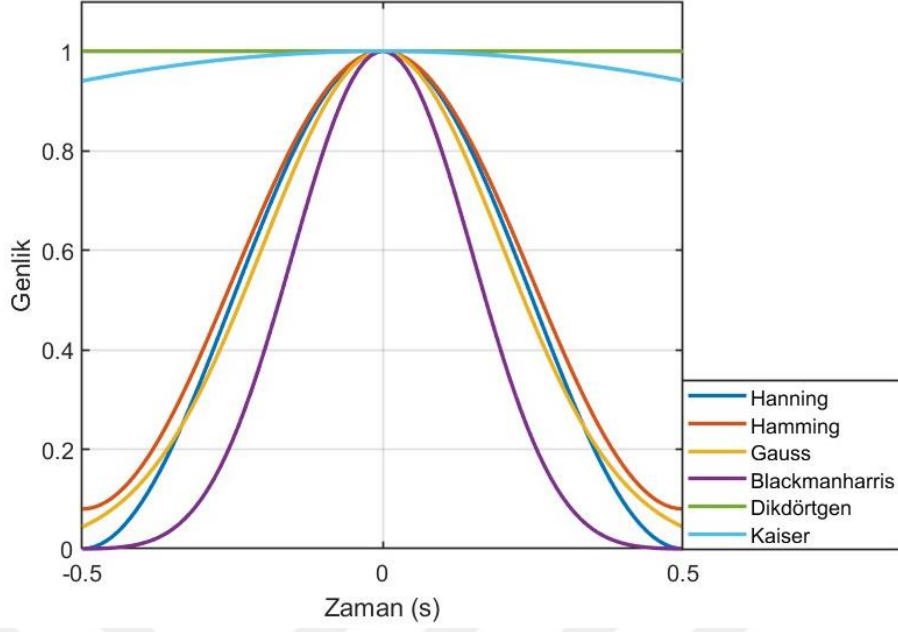
$$w[n] = 1 \quad (17)$$

Kaiser penceresi (denklem 18), hem zaman hem de frekans çözünürlüğü arasında esnek bir denge kurmayı amaçlar. Bu dengeyi beta parametresiyle sağlamaktadır.

$$w[n] = \frac{I_0 \left(\pi \beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{L-1} - 1 \right)^2} \right)}{I_0(\pi \beta)} \quad (18)$$

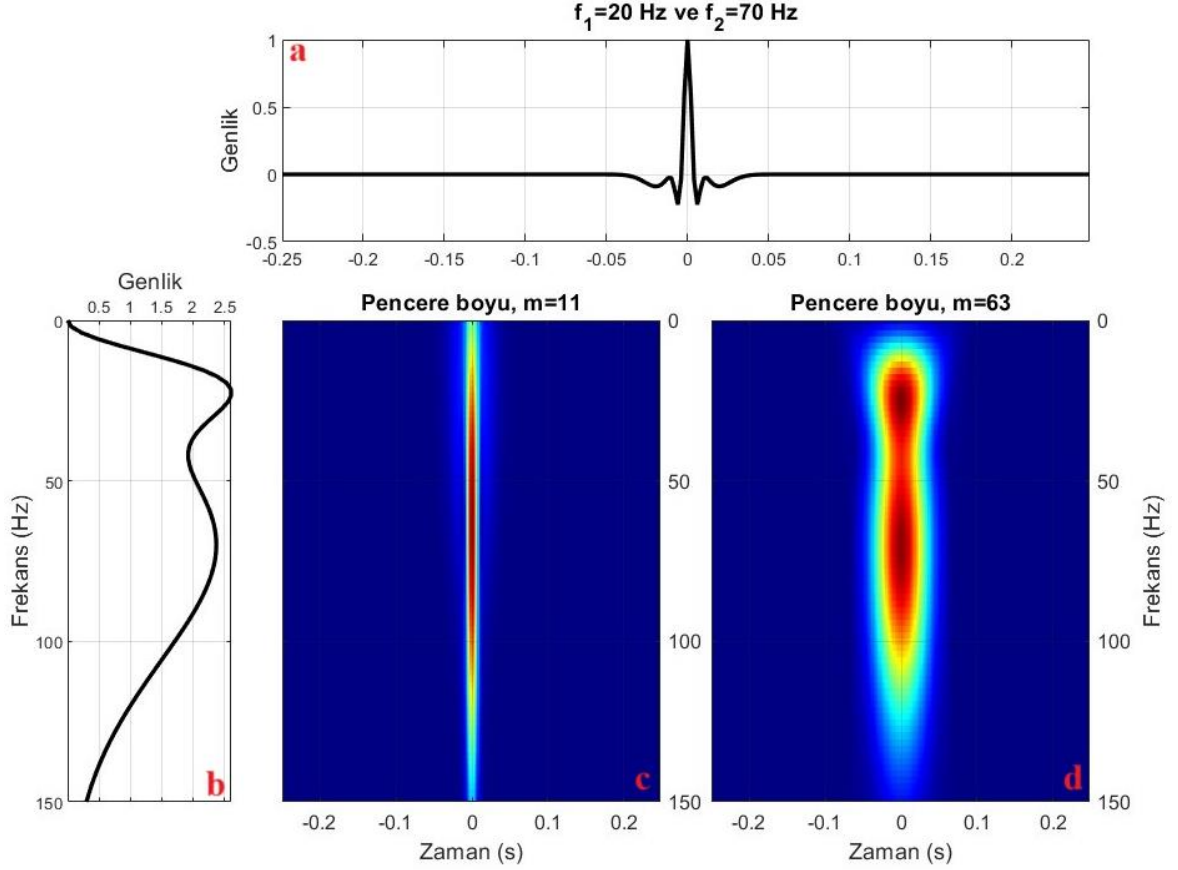
I_0 ; sıfırıncı mertebeden düzenlenen Bessel fonksiyonudur, β pencere şekillendirme parametresidir. Düşük beta değeri, ana salınımda dar, zaman çözünürlüğü yüksek; yan salınımda geniş bir çözüm sunarken; yüksek beta değeri ile ana salınım genişleyerek zaman çözünürlüğü düşer (Liang vd., 2022).

Şekil 8, yukarıda kısaca özetlenen pencere fonksiyonlarının zaman ortamı görüntülerini sunmaktadır. Tüm pencerelerin hesaplanmasında $N=101$ örnek ve $dt=0.01$ artım kullanılmıştır. Gauss ve Blackman-Harris pencerelerinin hesaplanmasında genişlik parametreleri σ ve $\beta=2.5$ kullanılmıştır.



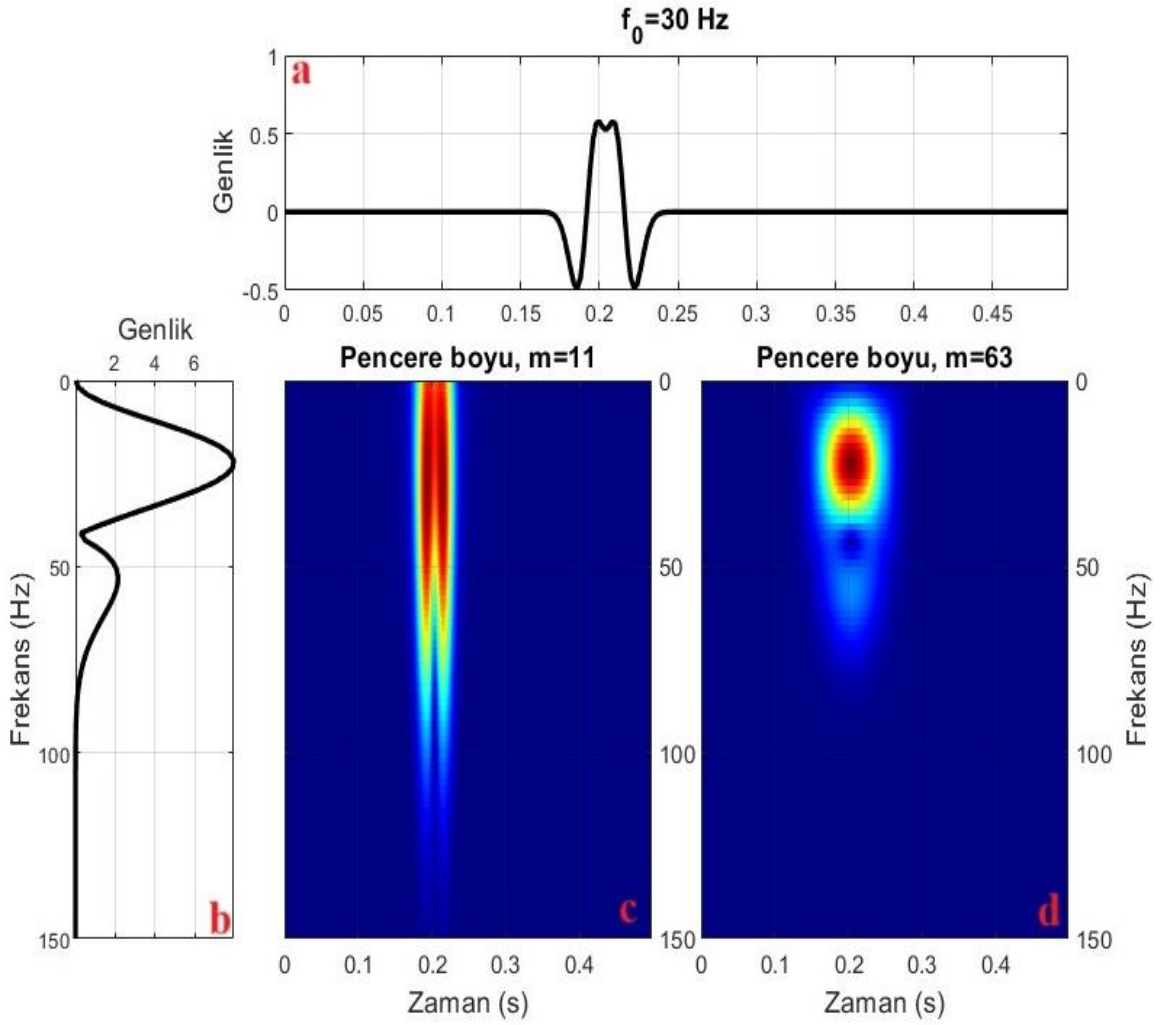
Şekil 8. Denklemler 13-18’de verilen pencere fonksiyonları.

Kısa ve uzun pencere boylarının veriye olan etkisini incelemek üzere, tepe frekansları 20 Hz ve 70 Hz olan farklı iki Ricker dalgacığı üst üste toplanarak Şekil 9’da sunulmuştur. Hesaplama zaman örnekleme aralığı $dt=0.002$ s’dir. Şekil 9a’daki toplam Ricker dalgacığı tek bir dalgacık olarak görülmektedir. Buna karşılık hesaplanan FD genlik spektrumunun $f_1=20$ Hz ve $f_2=70$ Hz tepe frekansları ile uyumlu iki pik değeri gözlenmektedir (Şekil 9b). Buna karşılık, $m=11$ ve $m=63$ örnekli iki pencere fonksiyonu ile hesaplanan (t, f) görüntüleri Şekil 9c ve d’de görülmektedir. Açık olarak kısa pencerenin ($m=11$) iki ayrı frekans içeriğini ayırt edemezken, uzun pencerenin ($m=63$) dalgacığın iki farklı tepe frekansına sahip olduğu anlaşılmaktadır. (t, f) üzerindeki maksimum genlik noktalarına bakıldığında aynı zaman değerinde farklı iki frekanslı dalgacığın üst üste toplanmış olduğu söylenebilir.



Şekil 9. KZFD’de kısa ve uzun pencere kullanımının frekans ayrırlılığı analizi, (a) $f_1 = 20$ Hz ve $f_2 = 70$ Hz olan iki Ricker dalgacığının toplamı, (b) FD genlik spektrumu, pencere boyu (c) $m=11$, (d) $m=63$. Genişlik değeri, $\alpha=2.5$ olan Gauss penceresi kullanılmıştır.

KZFD analizinde pencere uzunluğunun analizi Şekil 10’da gösterilmiştir. Bunun için, tepe frekansı 30 Hz ve $dt=0.002$ s olan Ricker dalgacığı ile ve birbirlerine çok yakın zamanlarda (0.2 s ve 0.211 s) oluşturulan yansıma katsayılarının konvolüsyonu ile girişimli bir dalgacık modeli hesaplanmıştır (Şekil 10a). Şekil 10b’deki FD genlik spektrumunda 35 Hz’de maksimum genliğe sahip bir spektrum görülmektedir. Kısa pencere boyu ($m=11$) ile hesaplanan (t, f) dönüşümünde yan yana iki enerji alanı görülürken (Şekil 10c), uzun pencere boyu ($m=63$) kullanıldığında enerjinin 35 Hz civarında odaklandığı (Şekil 10. KZFD’de pencere boyunun zaman ayrırlılığı açısından analizi, (a) birbirine yakın zaman aralıklarında hesaplanan girişimli dalgacık modeli, (b) FD genlik spektrumu, pencere boyu (c) $m=11$, (d) $m=63$. Genişlik değeri, $\alpha=2.5$ olan Gauss penceresi kullanılmıştır.Şekil 10d) açıkça görülmektedir. Böylece, kısa pencere uzunluklarının zaman ayrırlılığını artırdığını, buna karşılık frekans ayrırlılığını zayıflattığı test edilmiştir.

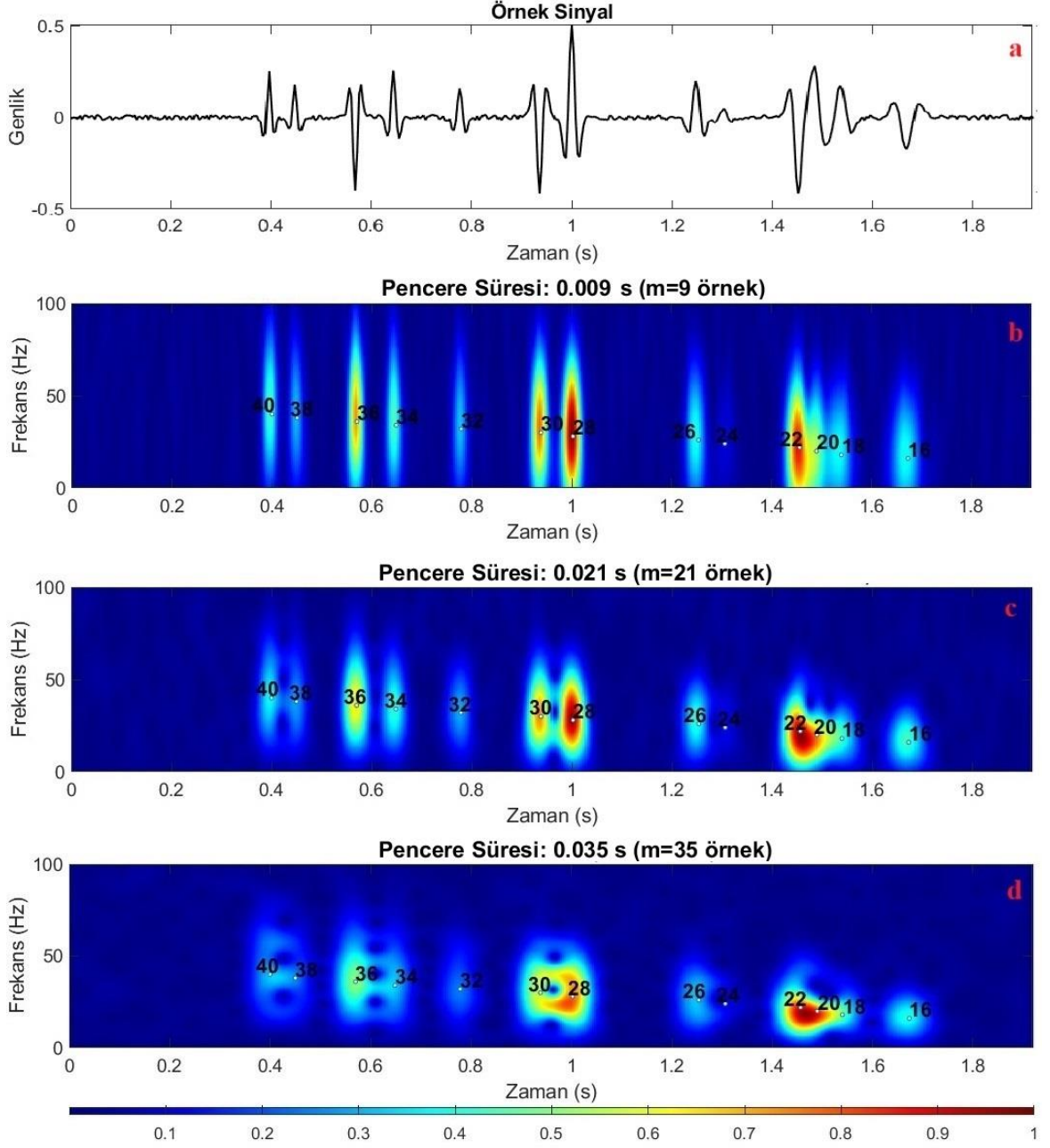


Şekil 10. KZFD’de pencere boyunun zaman ayrırlılığı açısından analizi, (a) birbirine yakın zaman aralıklarında hesaplanan girişimli dalgacık modeli, (b) FD genlik spektrumu, pencere boyu (c) $m=11$, (d) $m=63$. Genişlik değeri, $\alpha=2.5$ olan Gauss penceresi kullanılmıştır.

Şekil 11 çok tabakalı bir yer modelini temsil eden sentetik veri üzerindeki pencere uzunluğunun analizini göstermektedir. Hesaplama, birbirine yakınlıkları farklı olan 13 yansıma katsayısı, dalgacık süresi 0.5 s, örnekleme aralığı $dt=0.004$ sn olan değişen tepe frekanslı Ricker dalgacığı ile konvole edilmiştir (Şekil 11a). Sinyale bir miktar (%5) gelişigüzel gürültü eklenmiştir. Frekans içeriği gerçek soğurucu jeolojik ortamları temsil etmesi açısından yüzeyden derine doğru azalan (40 Hz’den 2’şer Hz azalarak) tepe frekansına sahip Ricker dalgacıkları kullanılmıştır. Pencere boyu 9 ms seçildiğinde (Şekil 11b), zaman çözünürlüğünün düşük, frekans çözünürlüğünün yüksek olduğu görülmektedir.

Zaman çözünürlüğünde ayrımlılığı sağlayamadığı için, frekansları birbirine yakın olduğu kısımların ayrımlılığının net olmadığı açıktır. Pencere süresi 21 ms seçildiğinde (Şekil 11c), farklı frekans bileşenleri birbirinden ayırt edilebilir hale gelmiştir. Pencere süresi 35 ms seçildiğinde (Şekil 11d) ise farklı frekans bileşenleri birbirinden ayırt edilebilir haldedir, buna karşılık zamansal ayrımlılık oldukça zayıflamıştır.

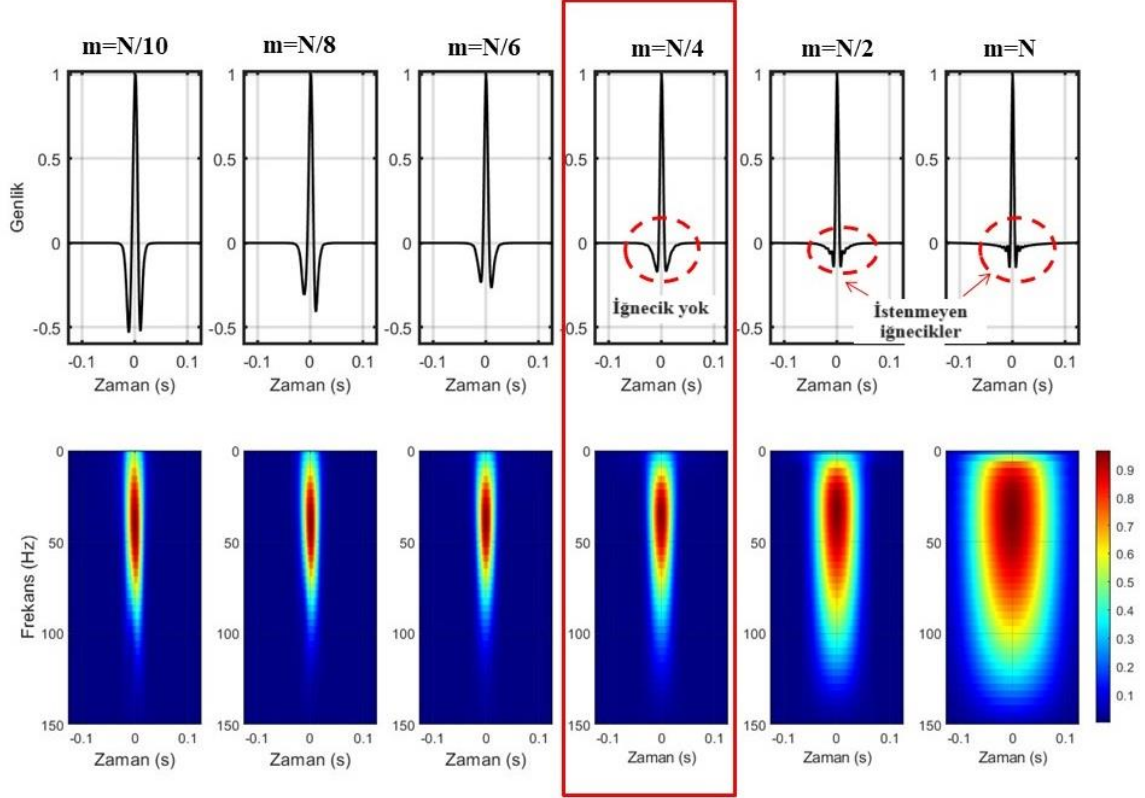




Şekil 11. Farklı uzunluktaki pencere için KZFD sonuçları. (a) Yapay sismik sinyal, (b) $t_w=0.009$ s ($m=9$), (c) $t_w=0.021$ s ($m=21$) ve (d) $t_w=0.035$ s ($m=35$) uzunluklu Gaus penceresi kullanılarak elde edilen zaman-frekans görüntüleri. Parametreler $dt=0.001$ s, t_w ve m sırasıyla, zaman örnekleme aralığı, pencere uzunluğu (örnek sayısı) ve pencere örnekleme sayısını göstermektedir. Frekanslar 40 Hz'den 2'şer azalmaktadır.

Pencere uzunluğunun seçimi işlenecek verinin yapısını bağlı olarak genellikle kullanıcı deneyimine bağlıdır. Ancak bir standart oluşturmak için pencere uzunluğu ile veri uzunluğunun ilişkilendirildiği bir analiz Şekil 12'de verilmiştir. Analizde sıfır fazlı 30 Hz'li Ricker dalgacığı kullanılmıştır. Burada N veri örnek sayısını göstermektedir. Veri sayısının

farklı oranları için elde edilen sonuçlar görüntülendiğinde yan salınım genliklerinin görece en az ve iğnecik tipi gürültülerin (işlem gürültüleri: artifacts veya glitches) olmadığı sonucun veri uzunluğunun %25'lik ($m=N/4$) pencere boyuna karşılık geldiği görülmektedir. Sıfır fazlı dalgacıkta pencere boyunun ayrırlılığa olan etkisini incelemek için test edilen pencere boyları Şekil 12'de gösterilmiştir.

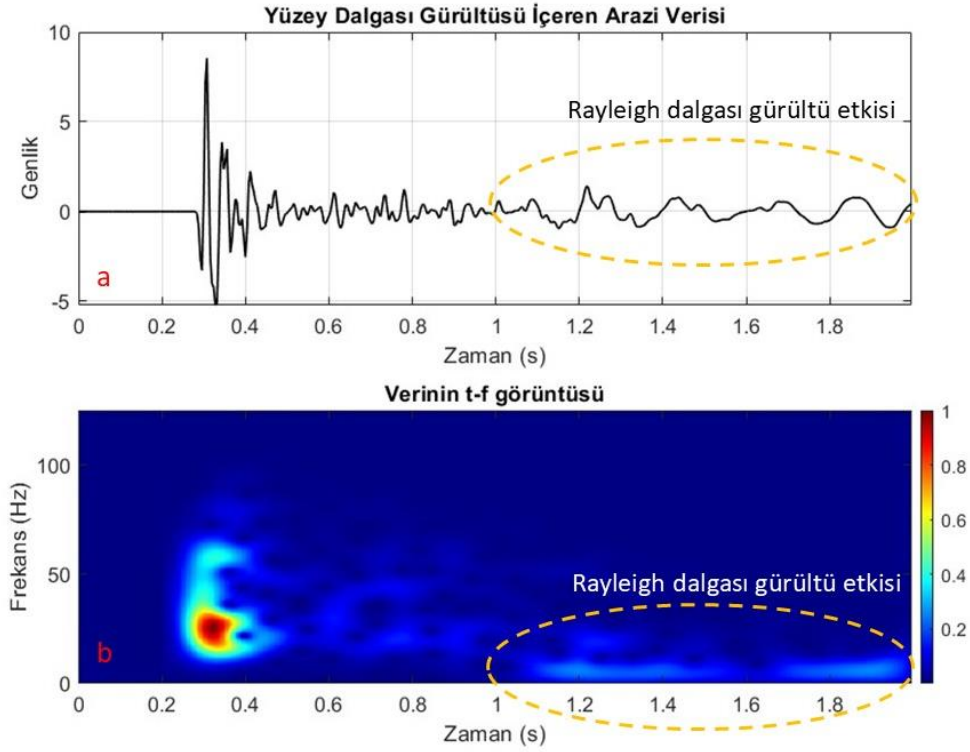


Şekil 12. Pencere boyunun etkisinin sıfır fazlı dalgacık üzerinde incelenmesi ($N/10$, $N/8$, $N/6$, $N/4$, $N/2$, $N=m$; m =pencere boyu, N =veri uzunluğu)

Artan pencere boyu, m , yan salınımların etkin bastırılmasını sağlar, fakat istenmeyen yüksek frekanslı yan salınımlar oluşur (veya iğnecik tipi gürültüler). Pencere boyunun seçiminin kesin bir kriteri olmamakla birlikte, testler pencere boyu $m=N/4$ 'ün yeterli olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, $m \gg N/4$ uzunluğunda pencere seçimi yüksek frekanslı gürültüler oluşturduğu oldukça açıktır.

3.5. KZFD Ortamında Süzgeçleme: Frekans, Zaman ve Genlik

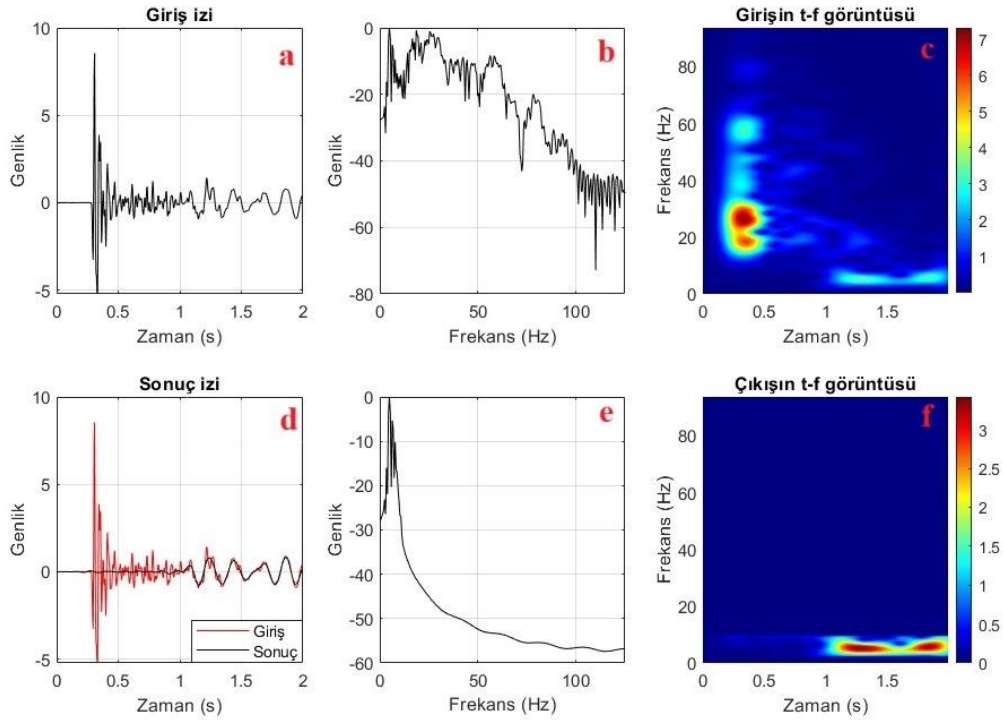
FD ortamında veriye, sadece belirlenen kesme frekansı ve/veya frekansları için süzgeç uygulanabilirken, t-f ortamında veriye frekans, zaman, genlik, frekans-zaman süzgeçleri uygulanarak verideki değişimler analiz edilebilir. (t, f) ortamında frekans süzgecinin uygulaması için Şekil 13a'daki Rayleigh yüzey dalgası gürültüsü içeren örnek bir veri kullanılmıştır. Verinin örnekleme zamanı $dt=4$ ms'dir. Rayleigh yüzey dalgası gürültüsü düşük frekanslı, düşük hızlı ve yüksek genlikli bir karaktere sahip olup, kara sismğinde kaydedilen sismik atış verilerinde özellikle derin yansımalarla girişerek onların dalga formlarını bozmakta ve maskeleymektedir.



Şekil 13. Rayleigh dalga alanları gürültüsü içeren (a) gerçek arazi izi ve (b) (t, f) görüntüsü.

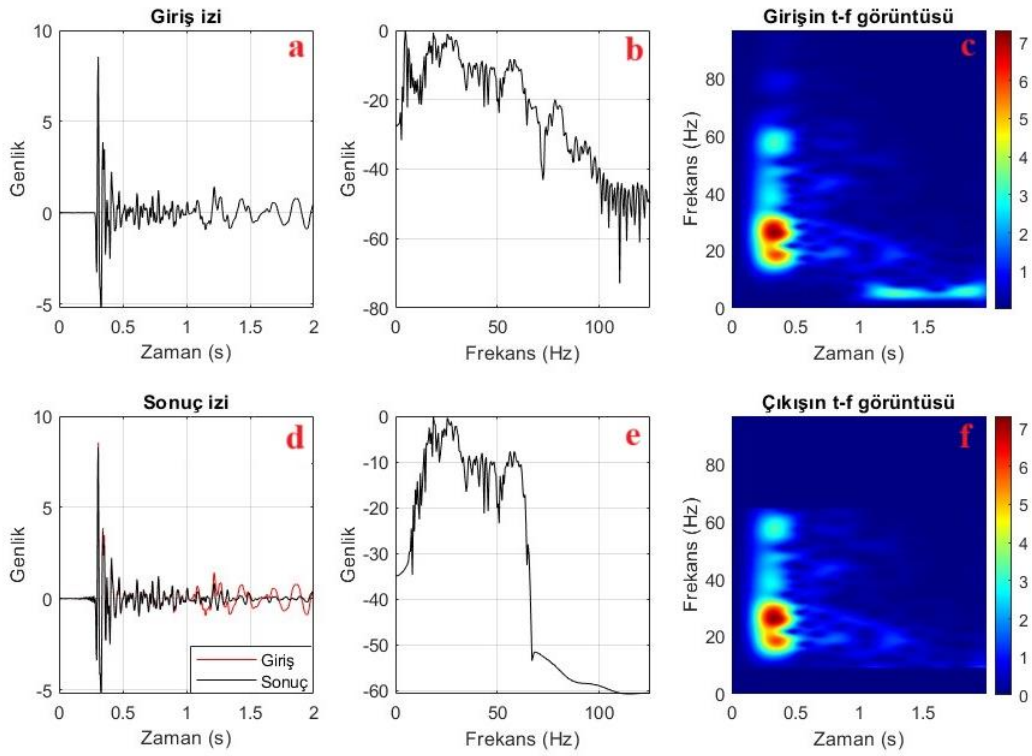
Şekil 13a'daki sismik izde Rayleigh yüzey dalgasının özellikle 1.2 s'den sonraki bölümde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere (t, f) ortamında verinin sinyal enerjisi ile gürültü enerjisinin etkin olduğu zaman ve frekans bölgeleri çok açık olarak görüntülenebilmiştir. Bu özellik, (t, f) ortamında yapılacak herhangi bir süzgeçleme için

parametre seçimi açısından kolaylık sağlar. Buna göre, Şekil 13b’de sunulan sismik izin (t, f) görüntüsü üzerinde Rayleigh yüzey dalgası enerjilerinin sadece 1.2 s’den sonra 3-10 Hz frekans bantlarında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu frekans bantlarında düzenlenen bant geçişli süzgecin (t, f) veriye uygulama sonuçları Şekil 14’da gösterilmektedir. Şekil 14a’daki giriş izinin Fourier genlik spektrumu (Şekil 14b) sinyal ve gürültüyü içeren ortalama bir spektrum sunmaktadır. Bu spektrum üzerinde gürültü etkinliği 15 Hz’e kadar izlenebilmektedir ve sinyale ait genliklerle tam olarak girişmiştir. Buna karşılık Şekil 14c’deki (t, f) görüntüsü sinyal ve gürültü enerjilerini ayırtmıştır. Bant geçişli (3-10 Hz) süzgeç uygulandığında gürültü izi elde edilmiştir (Şekil 14d ve Şekil 14e). Şekil 14f (t, f) ortamındaki gürültüye ait enerjileri hem zaman hem de frekans bölgesinde nasıl dağıldığını göstermektedir.



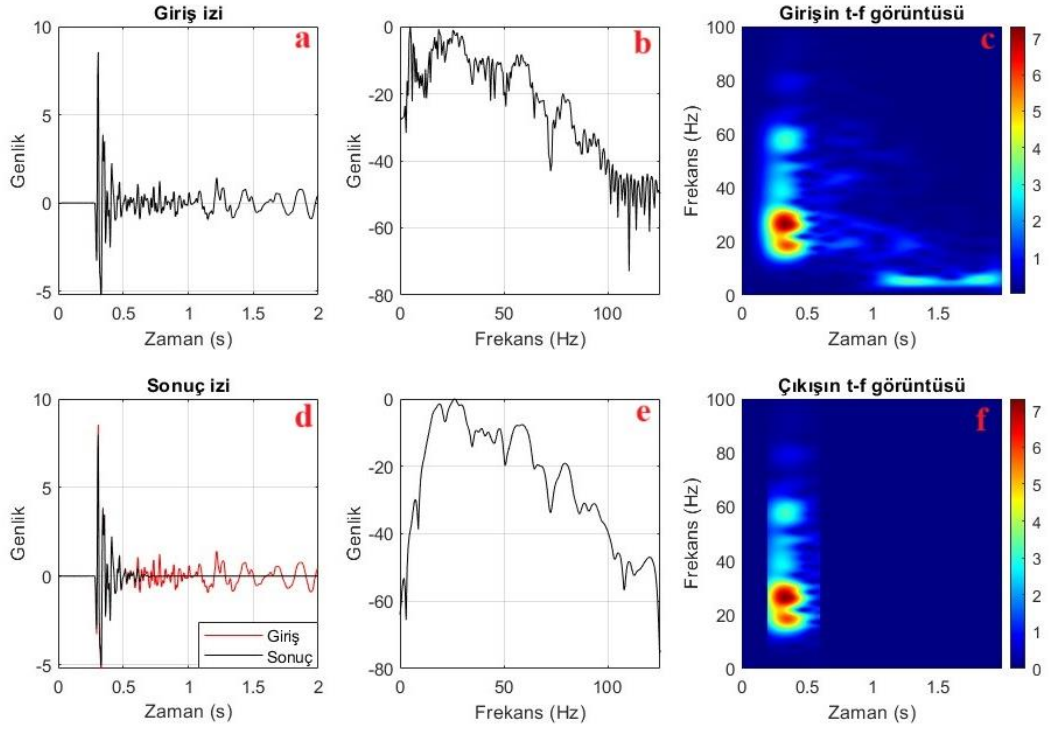
Şekil 14. 3-10 Hz kesme frekansları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

Şekil 14c’deki (t, f) görüntüsü üzerinde sinyal enerjisinin 0.2-2.0 s ve 10-65 Hz aralıklarında yoğunlaştığı görülmektedir. Buna göre, bant geçişli süzgeç 10-65 Hz aralığında uygulanmış ve sonuçlar Şekil 15’de sunulmuştur. Böylece sismik izdeki kullanışlı sinyal enerjileri korunmuştur (Şekil 15d, e ve f).



Şekil 15. 10-65 Hz kesme frekansları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

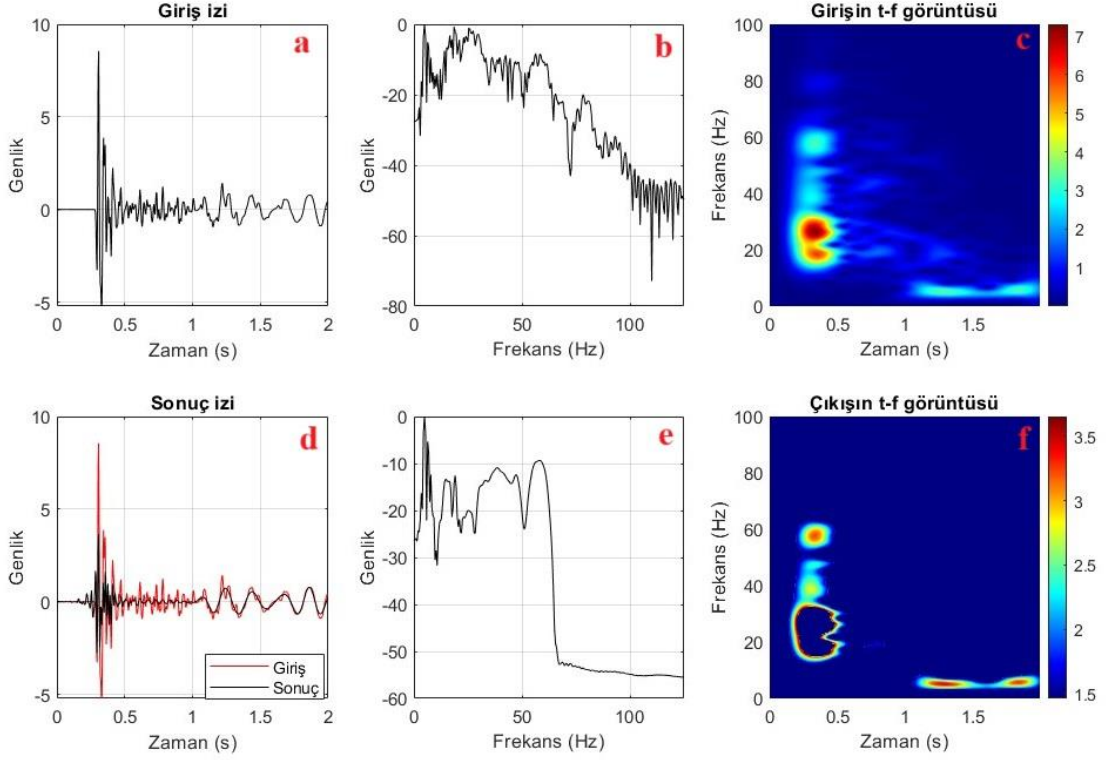
Şekil 16'da görüldüğü üzere, sismik izin t-f ortamındaki zaman süzgeçlemesi ile, incelenmesi istenen belirli bir zaman diliminde frekans bileşenleri korunmuştur. Bu zaman dilimi haricinde meydana gelen gürültü ya da istenmeyen bileşenlerin ayıklandığı gözlemlenmektedir.



Şekil 16. 0.2-0.6 s kesme zamanları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

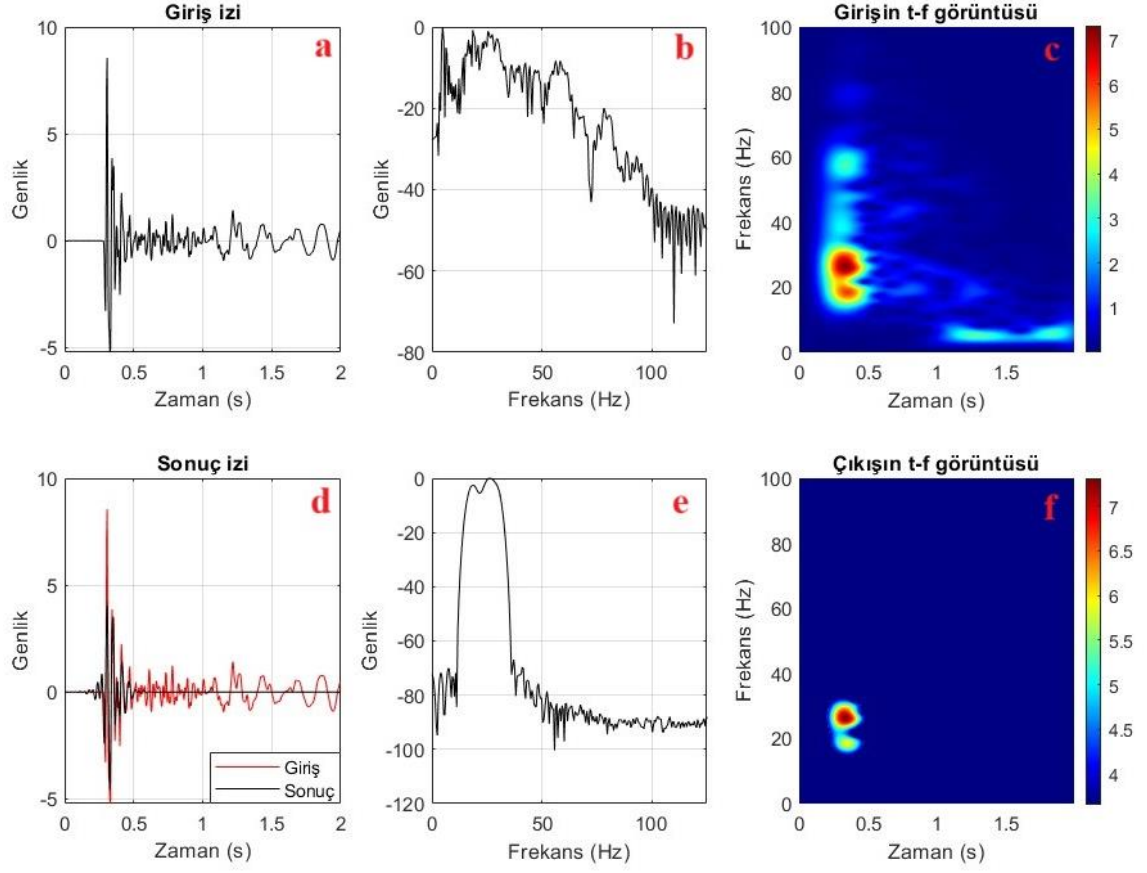
Yüksek ve düşük genlik seviyeleri, sinyalin farklı yönlerini analiz etmek için kullanılır. Her bir genlik süzgeci, verinin bir bölümünü izole ederek analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Farklı frekans ve genlik bileşenlerinin anlaşılmasında önemlidir. Sinyalin yapısını, enerjisini ve frekans bileşenlerini farklı bir perspektiften incelememizi sağlar. Bu bilgiler, sinyalin kaynağını, dinamiklerini ve zaman-frekans ilişkisini anlamada kritik öneme sahiptir.

Şekil 17 t-f ortamında genlik süzgeci uygulamasının sonuçlarını göstermektedir. Bu şekilde bir süzgeçleme verideki belirli bir genlik aralığını koruyan ve bu genlik değerlerini görece güçlendiren diğerlerini ise veriden atan bir işlemi içermektedir. Süzgeçleme işlemi sonrasında sinyalde (t,f) alanında verinin belirli bir genlik aralığındaki genlik bilgisi belirginleşmiştir (Şekil 17). Şekil 17f’de hem sinyal bölgesinde hem de gürültü bölgesindeki eş genlik seviyeleri (t, f) düzlemindeki dağılımı tanımlanabilmektedir. Şekil 17f’deki (t, f) spektrumundaki mutlak genlik aralığı ~1.4-3.6 arasında olup, Şekil 17c’deki (t, f) spektrumundaki maksimum genlik seviyesinin %20 - %50 oranlarına karşılık gelmektedir.



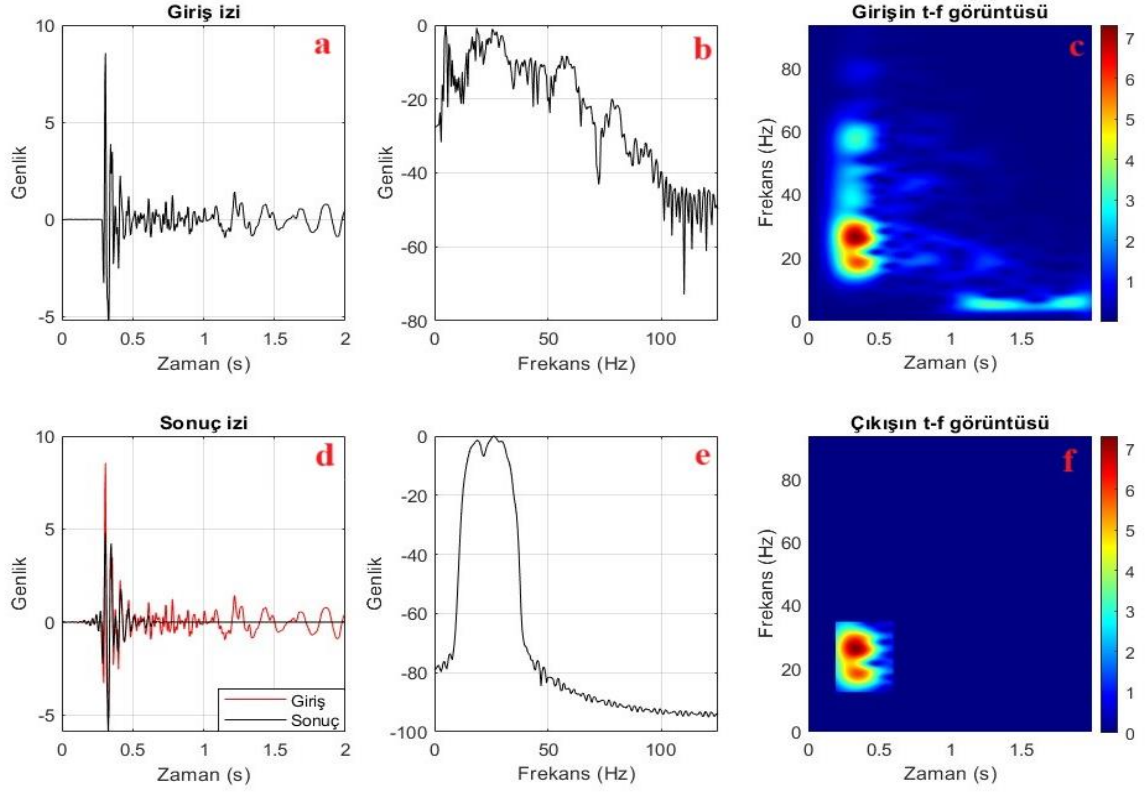
Şekil 17. Verideki maksimum genliğe göre %20-50 arası genlikleri koruyan süzgeçleme. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

Şekil 18 belirli bir eşik genlik değerinden daha yüksek genlikleri koruyan bir süzgeçlemenin sonuçlarını göstermektedir. Süzgeçlemede eşik genlik değeri ~ 3.69 ($>50\%$) olarak kullanılmıştır. Şekilden açıkça görüldüğü üzere, bu eşik değerden daha yüksek genliklere sahip enerji alanı oldukça dar bir zaman-frekans aralığında görülmekle birlikte (Şekil 18f), bu enerjileri içeren sinyal içeriği Şekil 18d’de sunulmuştur (siyah renkli). Bu türden bir süzgeçleme aynı frekans bandında üst üste toplam olarak görülen sinyal ile gürültü genliklerinin ayrıştırılması sağlayabilir. Yani herhangi bir frekanstaki toplam genliğin (veya enerjinin) ne kadarının sinyalden ne kadarının ise gürültüden kaynaklandığının bir kestirimi yapılabilir. Bununla birlikte, bu şekildeki bir süzgeçleme, klasik frekans süzgeçleme işlemlerinde aynı frekans bandına düşen sinyal ve gürültü bileşenlerinin veriden atılması yerine, sadece gürültüye ait olan genlik bileşenlerinin veriden atılmasını sağlayacağından, özellikle verinin düşük frekans bölgesindeki sinyal genliklerinin korunmasını sağlayacaktır.



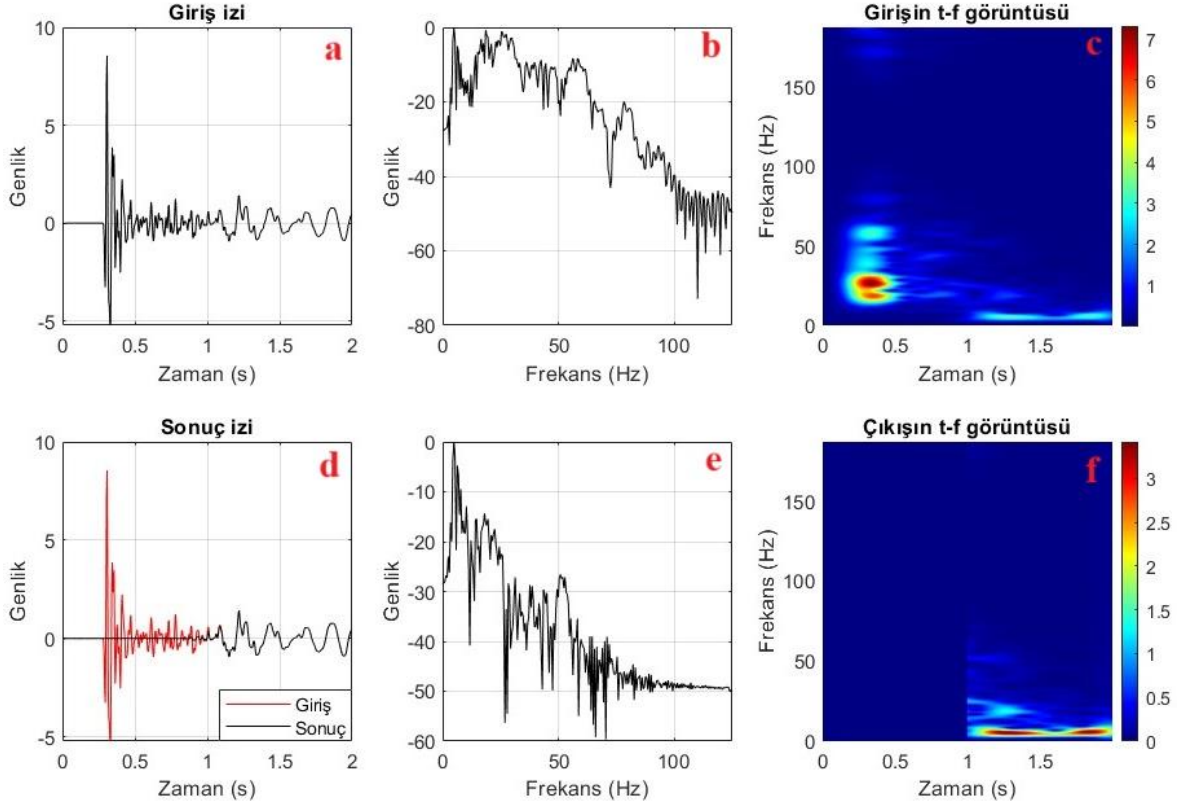
Şekil 18. Belirli bir genlik eşik değerine göre süzgeçleme sonuçları. Eşik genlik seviyesi, $> \sim 3.6$ (%50) (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

Şekil 19 (t, f) ortamında eş zamanlı olarak belirli zaman ve frekans bantları için süzgeçleme uygulamasını göstermektedir. Şekil 19c'deki (t, f) spektrumundaki sinyal enerjisinin çok yüksek olduğu (kırmızı renkler) bölümü korumak için, frekans aralığı 13-35 Hz ve zaman aralığı 0.2-0.6 s olarak seçilmiştir. Böylece, seçilen zaman ve frekans bantlarındaki spektral bilginin sismik izin hangi bölgesinde egemen olduğu görüntülenmiştir.



Şekil 19. Zaman-frekans bant aralıklarının birlikte kullanımı sonucu (t, f) ortamı süzgeçleme sonucu. Zaman ve frekans bantları sırasıyla 0.2-0.6 s ve 13-35 Hz olarak kullanılmıştır. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

Şekil 20 (t-f) ortamında zaman aralığı 1.0-2.0 s olan zaman süzgecinin uygulamasını göstermektedir. Giriş ve sonuç izleri incelendiğinde, süzgeçleme 1.0-2.0 s zaman aralığındaki tüm frekans enerjilerini (0-125 Hz) içermektedir. Aslında burada gerçekleştirilen süzgeçlemede sinyalin yüksek genlikli gürültü bileşeni (Şekil 13, eliptik alan) zayıflatılmıştır, ancak tüm frekansları içerdiği için halen daha sinyalin zayıf enerjilerini de içerdiği görülmektedir. Bu durum Şekil 14'teki süzgeçleme ile karşılaştırıldığında daha açıktır. Şekil 14'teki süzgeçlemede 3-10 Hz frekanslarındaki enerjiler korunmuş diğer tüm frekans enerjileri veriden atılmıştır. Şekil 14 ve Şekil 20'deki sonuç izlerinin (Şekil 14d ve Şekil 20d'de siyah renkli izler) 1.2-1.4 s aralığına bakıldığında Şekil 20d'deki çıkış sinyali üzerindeki küçük değişimlerin Şekil 14d'de olmadığı açıkça görülmektedir. Böylece, sadece zaman veya sadece frekans bandındaki süzgeçlemelerde aynı enerji alanına odaklanılmış olsa da sonuç izlerinde farklılıklar olacağı görülmektedir.



Şekil 20. 1.0-2.0 s kesme zamanları için t-f ortamı bant geçişli süzgeç uygulama sonuçları. (a) giriş sismik izi, girişin (b) Fourier genlik spektrumu, (c) t-f spektrumu, KZFD işlemi sonrası (d) çıkış sismik izi (siyah renkli), (e) Fourier genlik spektrumu, (f) t-f spektrumu

Yukarıdaki uygulama örneklerinden görüldüğü üzere, t-f ortamında birçok süzgeçleme avantajları kullanılabilmektedir ve sinyalin geneline değil seçilen bölümlerine doğrudan odaklanma imkanı sağlamaktadır.

3.6. Kepstrum Analizi: Düşey Ayrırlılık İyileştirme

Sismik yansıma verilerinin ayrırlılığı, yatay (yanal) ve düşey (zamansal) yönlerdeki çözümleme kapasitesini ifade eder ve bu özellik, verinin yatay ve düşey yönlerde ayırt edebileceği en dar ve ince litolojik birimlerin (tabakaların) boyutlarına bağlıdır (Knapp, 1990; Kallweit & Wood, 1982; Chopra vd., 2006). Yatay ayrırlılık, yanal yöndeki iki jeolojik yapı arasındaki uzaklık ile ilgilidir ve genellikle Fresnel zonu ile tanımlanır. Bu özellik, sismik dalga hızı, frekans ve derinlik gibi faktörlerin bir fonksiyonudur ve Fresnel zonu yarıçapını küçülten bir işlem olan sismik göç (migrasyon) ile ilişkilidir.

Düşey ayrımlılık ise, sismik verilerde ince tabakaların net bir şekilde ayırt edilmesini sağlar ve sismik dalga hızı, frekans veya dalga boyu gibi parametrelerle ilişkilidir. Düşey ayrımlılık için en bilinen kriter, tabaka kalınlığının (H), dalga boyunun ($\lambda=V/f$) dörtte birine eşit veya ondan büyük ($H \geq \lambda/4$) olan Rayleigh kriteridir. Düşey çözünürlüğü artırmak için dalga boyunun (veya periyodunun) azaltılması veya frekans bandının genişletilmesini sağlayan dekonvolüsyon çeşitleri, spektral bant genişletmesi, zaman değişken beyazlatma gibi işlemler uygulanır (Choi vd., 2019).

Sismik sinyal yer altında yayılırken, özellikle yüksek frekans bileşenlerinin zayıflamasına yol açan yer içi soğurması nedeniyle sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri hızla sönümlenir. Bu durum, kesitlerin derin kısımlarında düşey ayrımlılığın azalmasına neden olur. Yüksek frekansların zayıflaması sinyal periyodunu uzatırken, dalgacığın yan salınımları ve karmaşık jeolojik yapıların etkisiyle sismik verilerde girişimli bir yapı ortaya çıkar (Karşlı, 2002; Berkhout, 1984; Knapp, 1993).

KZFD işlemi ile birlikte kullanılan kepstrum analizi, ince tabakalar farklı nitelikler ve nicelikler içerdiği için jeofizik açısından oldukça önemlidir. 1963 yılında Bogert tarafından tanımlanmış (Liu vd., 2008) ve Fourier genlik spektrumunun logaritmasının ters Fourier dönüşümü olarak ifade edilmektedir (Sajid & Ghosh, 2014; Randall, 2016). Kepstrum analizi, bir sinyalin spektral genliğin logaritmasının hesaplanmasını içerir ve daha sonra sinyali değiştirilmiş frekans alanı olan temsili keufrens alanına dönüştürür (Childers vd, 1977; Norton & Karczub, 2003). “**Kepstrum**” terimi **spectrum** kelimesindeki; **spec** terimindeki harflerinin yerleri değiştirilmesi (tersinden yazım) ile oluşturulmuş olup, yeni bir ortamı ifade etmek için kullanılır (Bogert vd, 1963).

$\mathcal{F}[s(t)]$ ileri Fourier dönüşümü, $A(f)$ ise genlik spektrumunu tanımlamaktadır. Buradan hareketle kepstrum işlemi için önerilen işlem adımları şu şekildedir;

$$A(f) = |\mathcal{F}[s(t)]| \quad (19)$$

$$ceps(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\log[A(f)]\} \quad (20)$$

Yalnızca Fourier Dönüşümünün genliğinin kullanıldığı kepstrum işlemi “yarım kepstrum” olarak isimlendirilir. Yarım kepstrum işlemiyle, düşük frekanslar güçlendirilir. Bu işlem aşağıda gösterilmiştir.

$$LS(\tau, f) = \log_{10}(A(\tau, f)) \quad (21)$$

$A(\tau, f)$ 'nin logaritması alındığında değerleri negatif olur. Bu nedenle $LS(\tau, f)$ 'nin minimumu kendisinden çıkarılarak tüm genlik değerleri pozitif yapılır.

$$LSM(\tau, f) = LS(\tau, f) - \min[LS(\tau, f)] \quad (22)$$

Tüm spektral sonuçları dengelemek amacıyla normalize edilmiş logaritmik spektrumunun (LSMN) hesaplaması

$$LSMN(\tau, f) = LSMN(\tau, f) \left(\frac{\sum_{\tau} A(\tau, f)}{\sum_{\tau} LSM(\tau, f)} \right) \quad (23)$$

$LSMN(\tau, f)$ 'nin faz spektrumu ile birleştirilerek elde edilen yüksek ayrımlı izin

$$CLSMN(\tau, f) = LSMN(\tau, f) \exp[j * \theta(\tau, f)] \quad (24)$$

$$STFTHC(t) = \iint_{-\infty}^{+\infty} CLSMN(\tau, f) p(t - \tau) e^{j2\pi f t} df d\tau \quad (25)$$

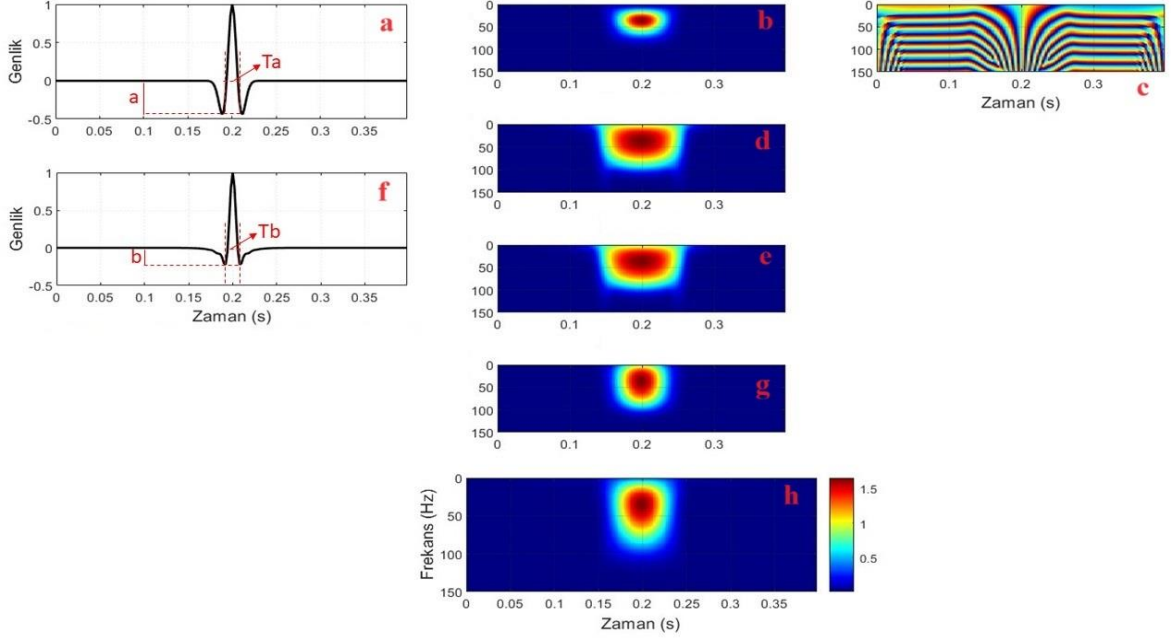
Ters KZFD'si alınarak yeniden yapılandırılması sonucuyla Kepstrum çıkış izi $HRS(t)$ elde edilmiş olur ve KZFD-K olarak kısaltılabilir.

$$HRS(t) = \text{real}[STFTHC(t)] \quad (26)$$

Görüldüğü üzere, Kısa Zaman Fourier Dönüşümü Yarım Kepstrum (KZFDYK) algoritması, YK algoritmasının KZFD'nin her bir Fourier katsayısına uygulanmasıdır. Önerilen bu yöntem sinyalin içerdiği yan salınımlarının zayıflatılmasında kullanıldığı için verinin düşük frekanslarının güçlenmesini sağlar (Sajid & Ghosh, 2014; Karlı & Şenkaya, 2018).

KZFD-K uygulamasından sonra, Şekil 21a ve Şekil 21f'de gösterilen grafiklere göre dalgacığın yan salınım genliklerinin zayıfladığı ($a > b$), ana salınının daraldığı ($T_a > T_b$)

dolayısıyla spektral bandın genişlediği gözlenmiştir. Böylece, KZFD-K sonrası sismik izin spektral içeriğinin daha geniş bir frekans spektrumuna yayıldığı ve daha fazla detay içerdiği gözlenmektedir. KZFD-K öncesindeki görüntüsünde belirsiz olan bölgeler, KZFD-K ile belirginleşmiştir. Buradan yola çıkarak KZFD-K işlemi, düşük frekanslı bileşenlerin daha net ayrılmılığına sahip olduğu ve genliklerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

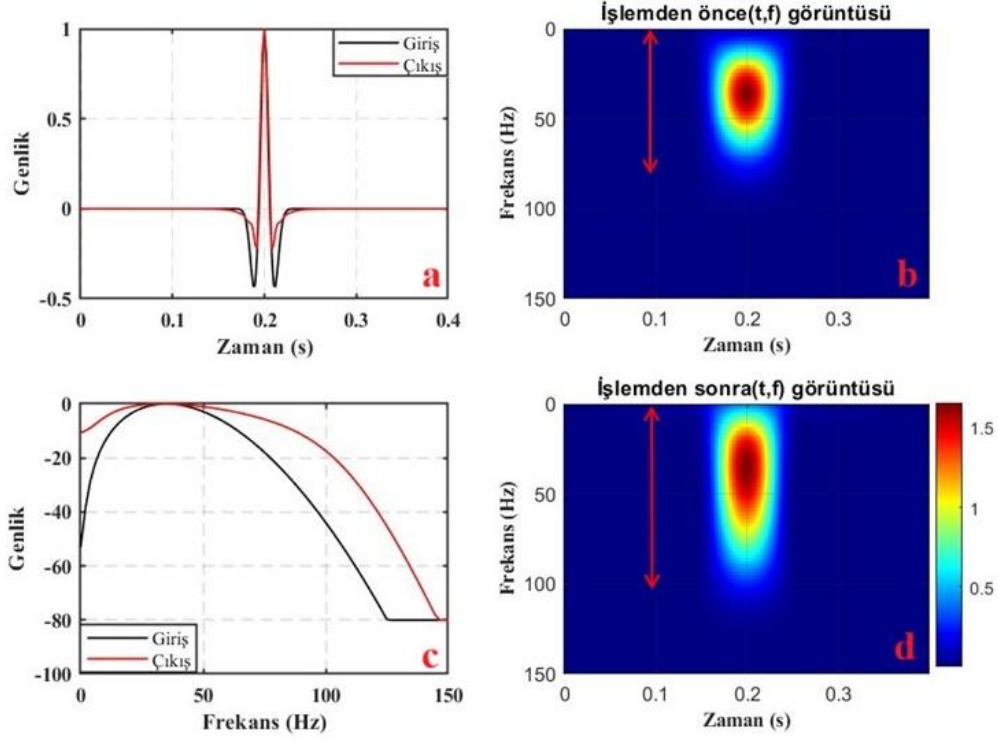


Şekil 21. KZFD ve Kepstrum işlemlerinin birleştirilmesi (KZFD-K). Denklemler 15'ten 20'ye her bir adım gösterilmiştir. (a) sıfır fazlı Ricker dalgacığı, (b) genlik spektrumu, (c) faz, (d) yarım kepstrum (YK) LS işlemi, (e) LSM, (f) HRS, (g) LSMN, (h) KZFD-K sonrası (t, f) görüntüsü

Şekil 21'deki giriş (Şekil 21a) ve çıkış (Şekil 21f) karşılaştırmaları Şekil 22'de gösterilmektedir. Açık olarak, dalgacığın ana salınımının zaman boyutunda daraldığı (Şekil 22a, kırmızı) ve frekans boyutunda ise, düşük ve yüksek frekans bölgesine doğru genişlediği görülmektedir (Şekil 22b, kırmızı). KZFD-K işlemi sonucunda dalgacığın formunda herhangi bozulma oluşmadığı, düşük ve yüksek frekanslardaki genlikler güçlendiği ve dolayısıyla ideal iğnecik spektrumuna bir yaklaşım sağlanmış olur.

Şekil 22c'deki girişin t-f spektrumundaki enerji alanının Şekil 21'deki t-f spektrumunda zamanda daraldığı, buna karşılık frekansta ~10-70 Hz aralığında olan spektral bandın ~2-100 Hz'e kadar genişlediği gözlenmektedir. Burada, düşük frekans bölgesi

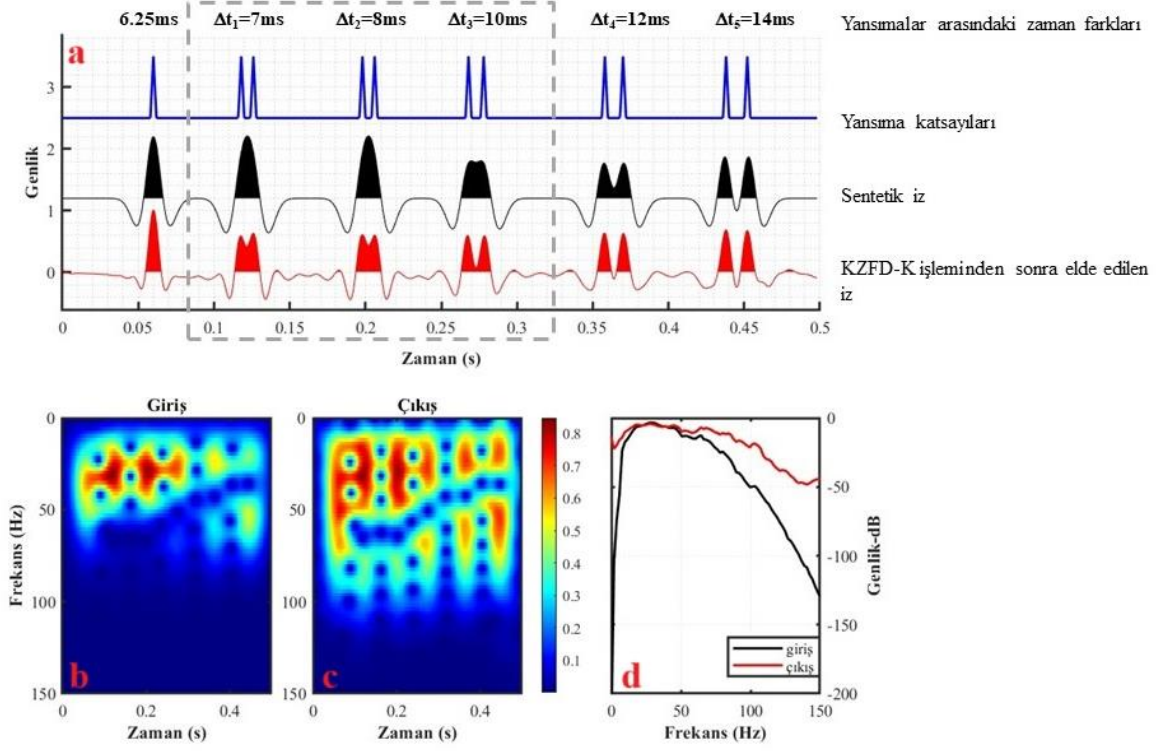
genliklerinin güçlendirilmesi, özellikle sismik verideki düşük frekanslı derin yansımaların güçlenmesini sağlaması açısından son derece önemlidir.



Şekil 22. Tepe frekansı 35 Hz olan Ricker dalgacığı için KZFD-K işleminin spektral karşılaştırması

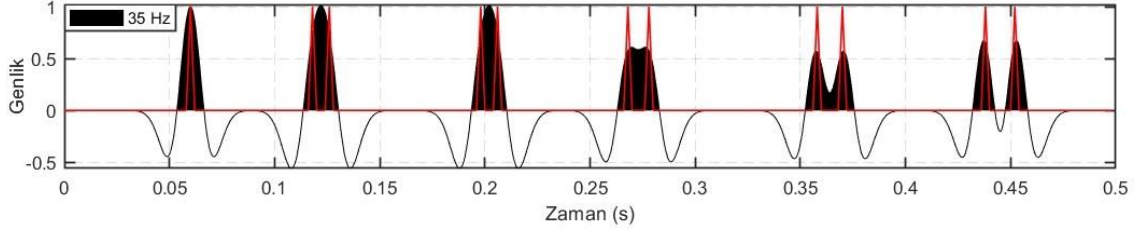
Şekil 23'te tepe frekansı 35 Hz, süresi 0.5 s ve örnekleme aralığı $dt=0.002$ s olan Ricker dalgacığı ile 11 adet yansıma katsayısının konvolüsyonal izi (Şekil 23a) görülmektedir. Şekil 23a'daki belirli zaman aralıklarında yerleştirilmiş yansıtma katsayıları (mavi), kaynak dalgacığı ile konvole edildiğinde farklı girişim derecelerini temsil eden bir sismik iz (Şekil 23a, siyah) elde edilmiştir. KZFD-K yöntemi uygulamasından sonra hesaplanan Şekil 23a (kırmızı)'da görülmektedir. Bu analiz sırasında kullanılan Gauss penceresinin uzunluğu sinyal süresinin dörtte biri olacak 0.125 s alınmıştır. Şekil 23a'da sentetik iz üzerinde ikinci ve üçüncü yansımaların tek bir yansıma olarak ortaya çıktığı ve bireysel yansıma dalgacıklarının diğer yansıma olayları üzerinde kısmen tanımlanabildiği açıkça görülmektedir. İşlem sonrasında 6.25 ms' deki tekil yansıma dışındaki tüm yansıma dalgacıkları ayrılmış olup, Şekil 23a'da (kırmızı) gösterildiği gibi bireysel yansımalar şeklinde tanımlanabilmektedir. Özellikle yansıma dalgacıklarının 7 ms, 8 ms ve 10 ms zaman aralıklarındaki çözünürlüğü önerilen yöntemin performansını göstermektedir. Giriş

ve çıkış izleri için karşılık gelen KZFD-K görüntüleri ve Fourier spektrumları Şekil 23b, c ve d' de gösterilmektedir. (t, f) görüntülerden (Şekil 23 c) ve Fourier genlik (Şekil 23d) spektrumlarından, giriş izinin spektral bant genişliği, önerilen işlemten sonra gözlemlenebilir şekilde arttığı sonucuna ulaşılmaktadır.



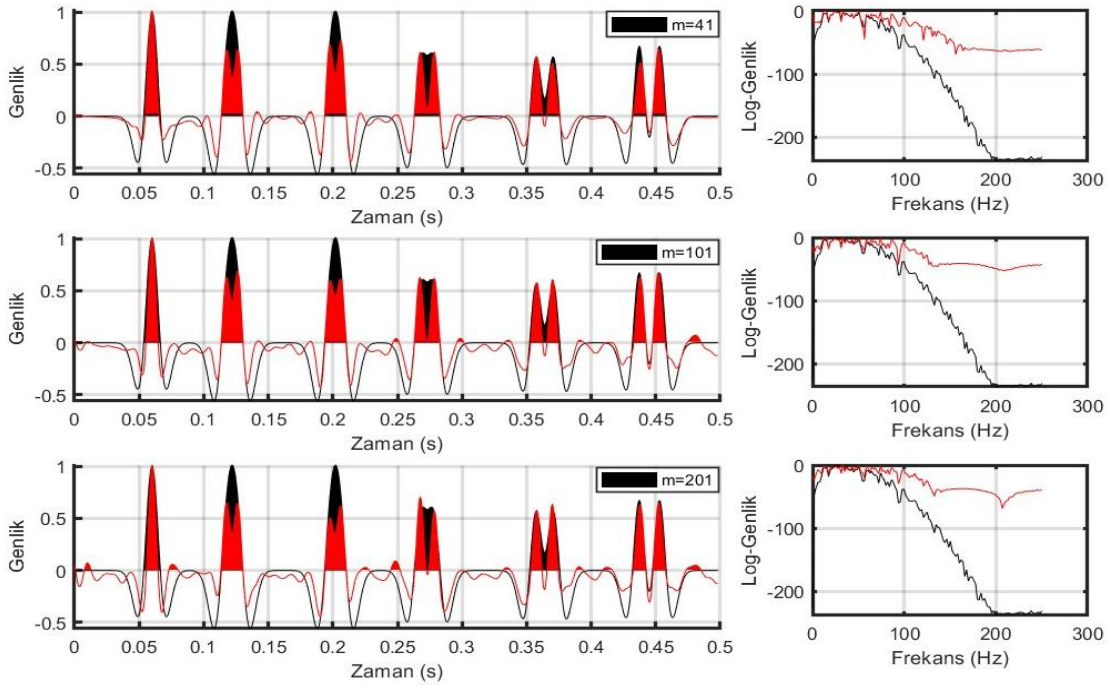
Şekil 23. KZFD-K 1B'lu girişimli sentetik ize uygulanması, (a) Yansıma katsayıları, giriş sentetik izi ve KZFD-K sonrası sismik iz, KZFD-K uygulamasının (b) öncesi ve (c) sonrası t-f görüntüleri, (d) giriş (siyah) ve çıkışın (kırmızı) genlik spektrumu karşılaştırması

Tepe frekansı 35 Hz, zaman örnekleme aralığı 2 ms ve 0.1 s kayıt uzunluğuna sahip olan Ricker dalgacığı ile yansıma katsayısı serisi konvole edilerek sentetik iz oluşturulmuştur (Şekil 24). Sismik iz modelinde görüldüğü üzere, 0.12 s ve 0.2 s'deki yansıma dalgacıkları girişerek tek bir dalgacık olarak görülmektedir. Buna karşılık 0.27 s'deki yansıma dalgacığı ise, iki ayrı yansıma dalgacığını ifade etmekle birlikte girişim seviyesi oldukça yüksektir.



Şekil 24. Yansıtma katsayıları (kırmızı) ile 35 Hz tepe frekanslı sıfır fazlı Ricker dalgacığının konvolüsyondan hesaplanan sismik yansıma izi (siyah)

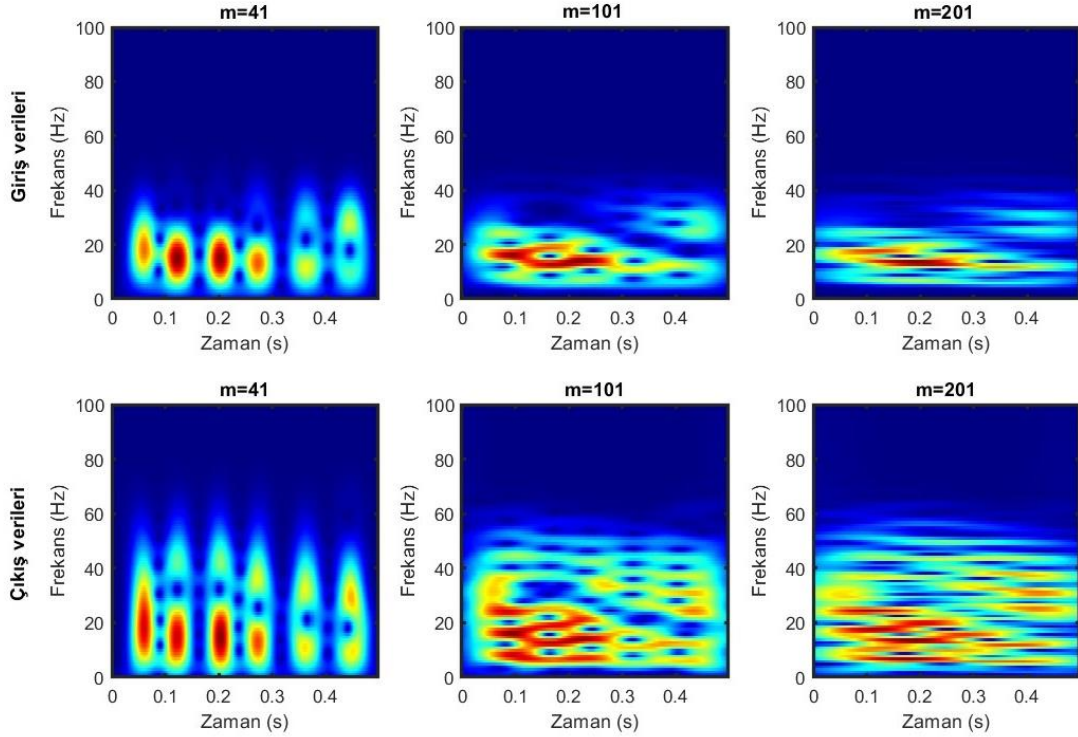
Şekil 24’deki sentetik izi, farklı uzunluktaki pencere uzunlukları ile uygulanan KZFD-K analizinin sonuçları Şekil 25’te gösterilmiştir.



Şekil 25. Zaman ortamındaki görünümü (sol), frekans alanındaki genlik spektrumları (sağ) (m=pencere boyu)

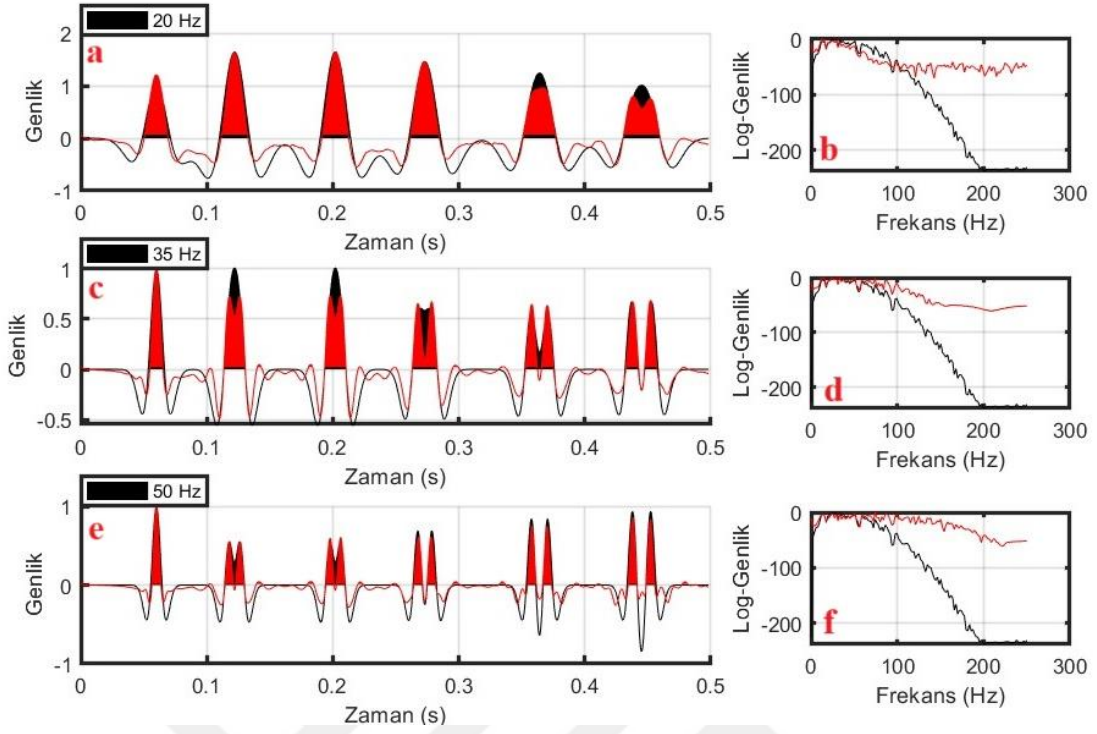
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, $m=41$ için, sentetik izin zaman ortamındaki görünümü yüksek ayrırlılığa, frekans ortamında düşük ayrırlılığa sahiptir. Sentetik izi zaman ortamında daha iyi temsil ederken, frekans ortamında yeterince ayrıntı göstermemektedir. Zaman alanındaki kısa süreli olayları daha iyi temsil eder. $m=101$ için,

sentetik iz zaman ortamında daha az, $m=201$ için; sentetik izin zaman ortamında en düşük ayrırlılığı sağladığı görülmektedir. Seçilen pencere boylarının t-f görüntü analizi Şekil 26'da gösterilmiştir. Spektral ayrırlılık için pencere boyutunun seçimi, KZFD-K işlemiyle elde edilen ayrırlılığın kalitesinde önemli rol oynamaktadır. Genel olarak bakıldığında $m=41$ örnekli pencere uzunluğu sonuçları, dalgacıkların ayrırlılığını artırdığı için diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 26. KZFD öncesi ve sonrası giriş-çıkış verilerinin (t, f) görünümüleri, giriş verileri (üstte), çıkış verileri (altta)

Şekil 27 dalgacığının tepe frekansının artışı (20, 35, 50 Hz) ile ayrırlılık ilişkisi ve KZFD-K uygulamasının sonuçlarını göstermektedir. Her bir giriş izinin frekans bant genişliği KZFD-K işleminden sonra genişlediği, özellikle 0.12s, 0.2s ve 0.27s'deki girişimli yansımaların ayrı ayrı tanımlanabilecek ölçüde ayrımlanabildiği gözlenmiştir. (Şekil 27).

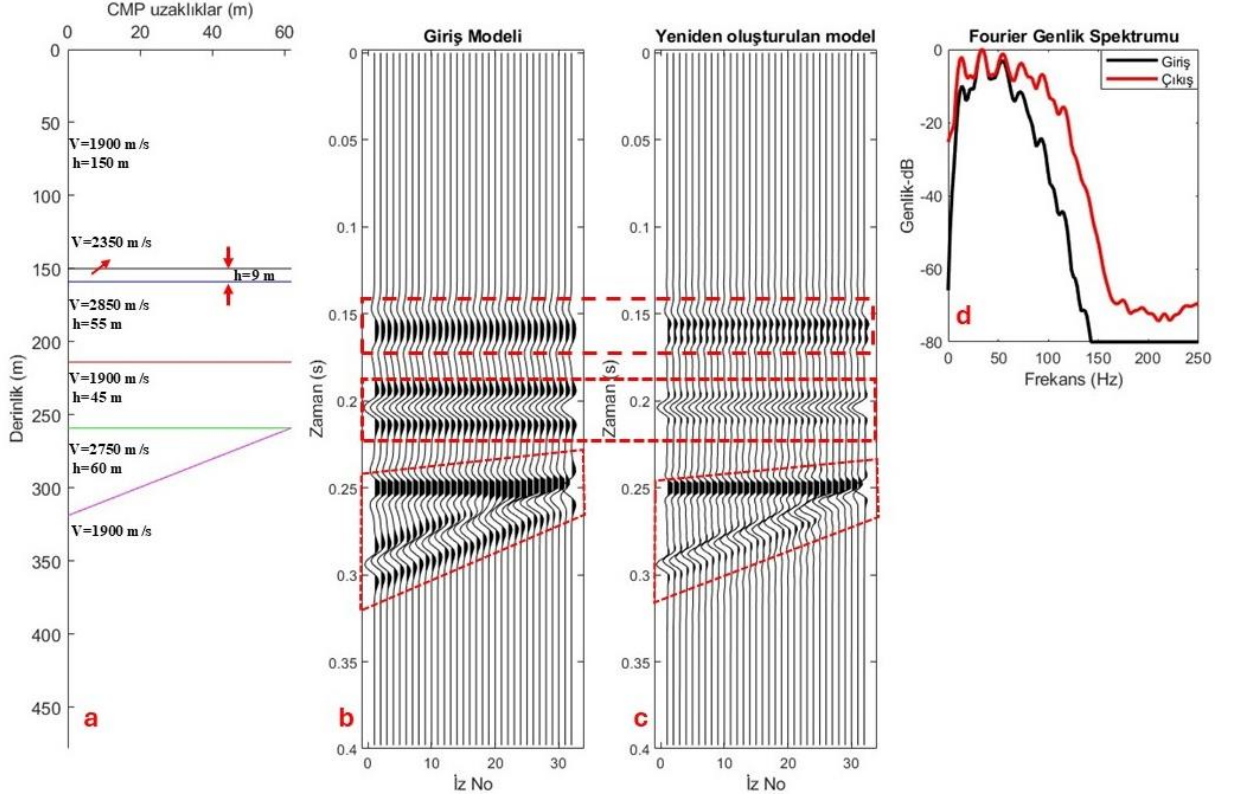


Şekil 27. Farklı tepe frekansına sahip dalgacıklar ile hesaplanan sismik izler ve KZFD-K sonuçları. (a) zaman ortamındaki görünüşleri, (b) frekans alanındaki güç spektrumu

3.7. 2B’lu Verilerde Ayrımlılık İyileştirme için KZFD-K Uygulaması: Sentetik ve Arazi Verileri

Şekil 28’de, ince tabaka ve kama tipi yapılarını içeren, tepe frekansı 40 Hz ve örnekleme aralığı $dt=0.002$ ms olan, 2B’lu sentetik bir yer modeli ve KZFD-K yönteminin uygulama sonuçları sunulmuştur. Şekil 28a’daki yer modeline göre, 150 m derinlikte 9 m kalınlığında ve hızı 2350 m/s olan ince bir tabaka, 260 m derinlikte ise, hızı 2750 m/s olan kama tipi yapıları içeren bir yer modeli oluşturulmuştur. Burada kömür damarı olarak sıklıkla karşılaşılan ince tabaka durumunda ve önemli hidrokarbon rezervuarları olan gözenekli ve geçirgen kumtaşı kama yapısının incelen tarafına doğru oluşan girişmiş yansımaların ayrımlanması hedeflenmiştir. Şekil 28b’deki sentetik kesitte, ince tabakanın üstünden ve tabanından yansımalar girişerek tek bir yansıma olarak görülürken, kama yapısında ise, yatayda ~20. izden başlayan girişim kamanın uç tarafını sınırlandırmıştır. Sentetik veriye KZFD-K yönteminin uygulama sonucu Şekil 28c’de sunulmuştur. Çok açık olarak ince tabakanın yansımaları tanımlanabilmekte ve kamanın uç sınırı ise belirgin şekilde 20. izden 25. ize uzatılmıştır. Model (Şekil 28b) ve KZFD-K (Şekil 28c) sonuç kesitleri karşılaştırıldığında tüm yansıma dalgacıklarının yan salınım genliklerinin önemli

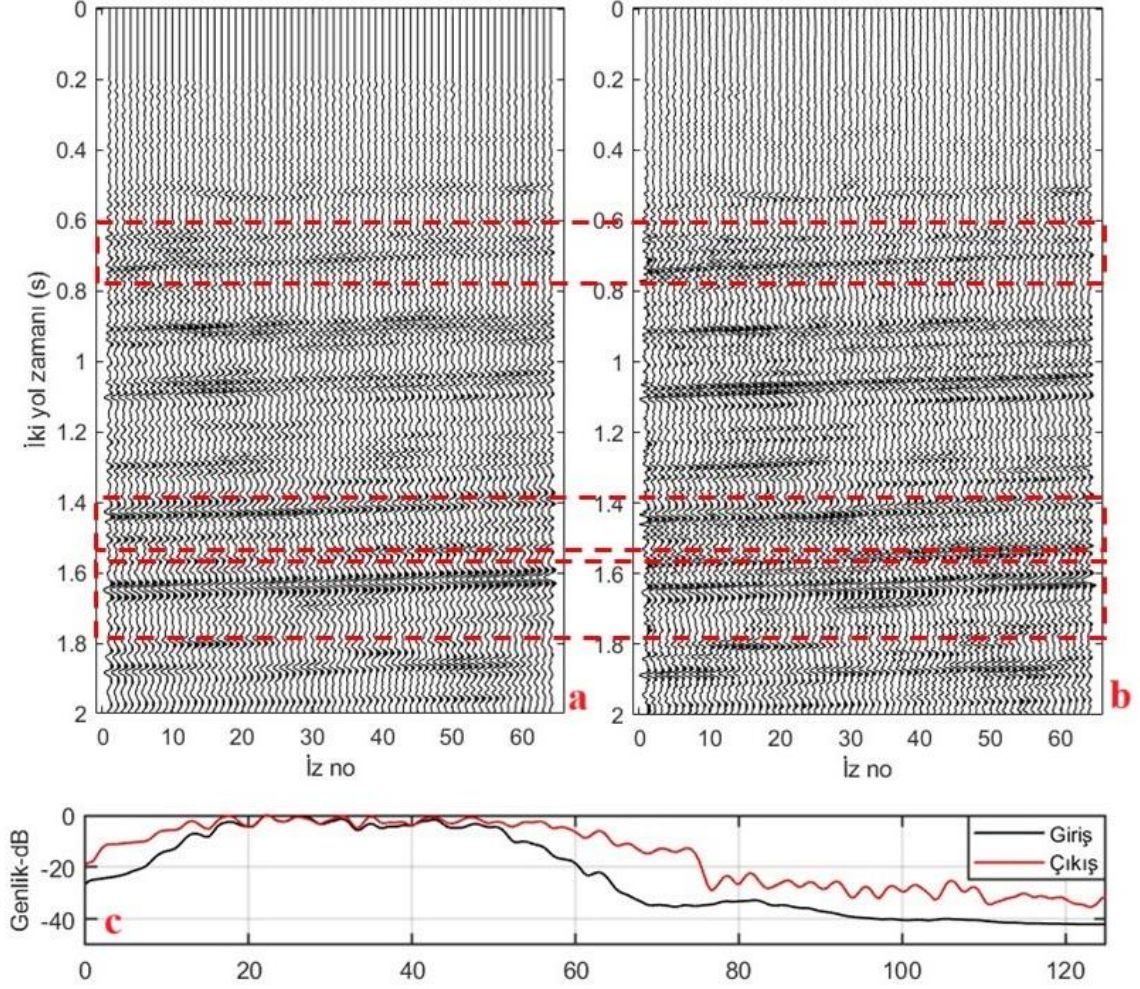
ölçüde zayıfladığı ve buna karşılık ana salınım genişliğinin daraldığı ve genliklerinin ise güçlendiği görülmektedir. Bu durum ~260 m derindeki arayüzey yansımada (0.2 s'de) belirgindir. Giriş ve çıkışın spektral karşılaştırması Fourier genlik spektrumlarının hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 28d). KZFD-K işleminden sonra girişin spektrumu (siyah) düşük ve yüksek frekans bölgesine doğru genişlemiştir (kırmızı).



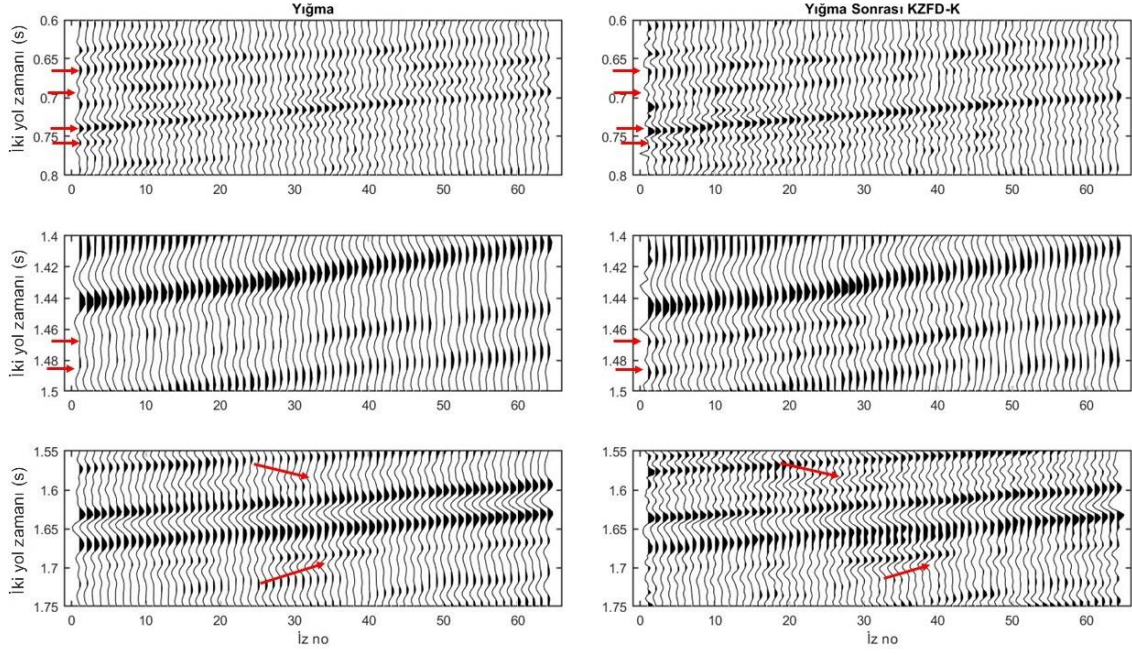
Şekil 28. 2 Boyutlu sentetik veriye KZFD uygulaması, (a) 2 boyutlu oluşturulan sentetik veri, (b) giriş modeli, (c) KZFD uygulaması sonrası yeniden oluşturulan model, (d) genlik spektrum değişimi

Şekil 29a sedimanter bir sahadan elde edilmiş gerçek bir arazi yığma kesitini göstermektedir. Verinin zaman örnekleme aralığı 4 ms'dir ve iz sayısı 64'tür. Veri genel olarak ince tabakalı bir ortamı yansıtmaktadır. Her ne kadar yüksek ayrımlı gibi görünse de özellikle derin yasıma bölgesinin ayrırlılığının iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. KZFD-K yönteminin veriye uygulama sonucu Şekil 29b'de sunulmuştur. Elde edilen kesitte zamansal ayrırlılığın iyileştiği ve yansıma genliklerinin daha güçlendiğini karşılaştırmak için çerçeve

alanlar takip edilebilir. Çerçeve alanlara daha detay bakmak için Şekil 30’de zaman kesitleri, Şekil 31’de ise hem zaman hem de spektral olarak karşılaştırmaları verilmiştir.

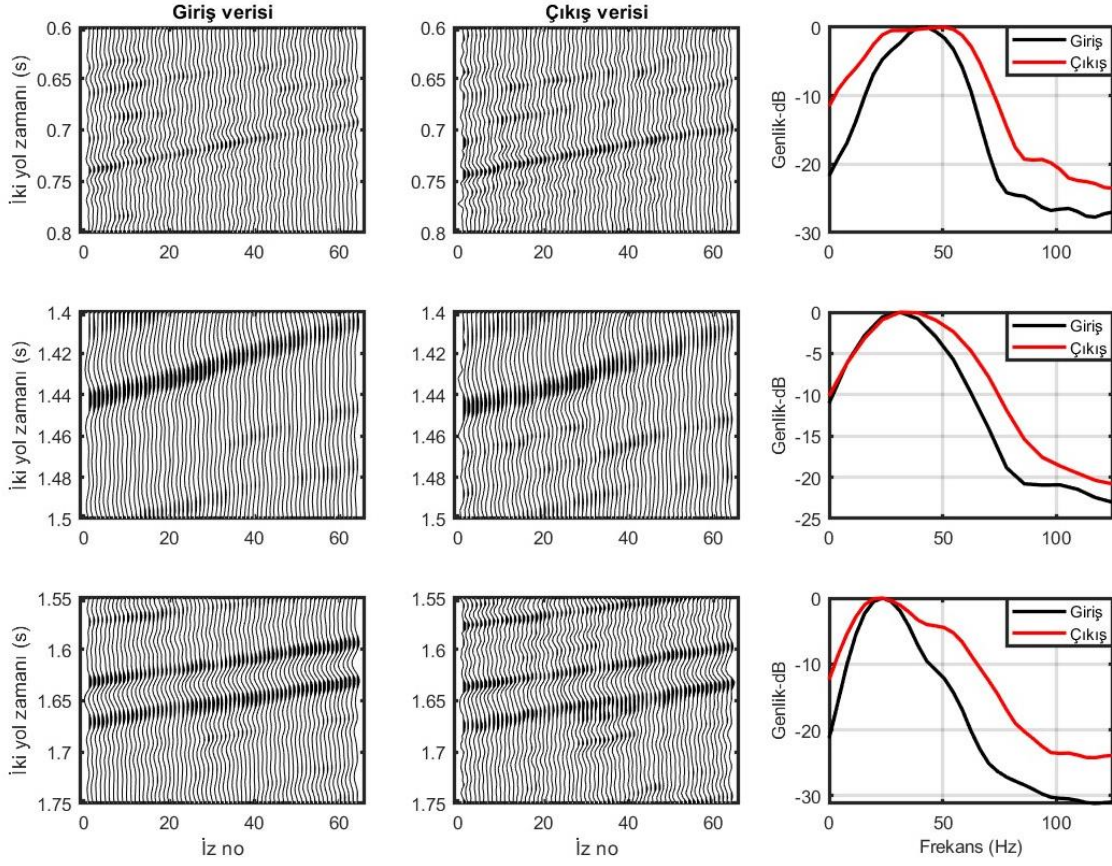


Şekil 29. 2B’lu arazi verisine KZFD-K tekniğinin uygulaması. (a) Yığma kesiti, (b) KZFD-K sonrası zamansal ayrımlılığı iyileştirilmiş yığma kesiti, (c) giriş ve çıkış yığma kesitlerinin ortalama genlik spektrumu karşılaştırması



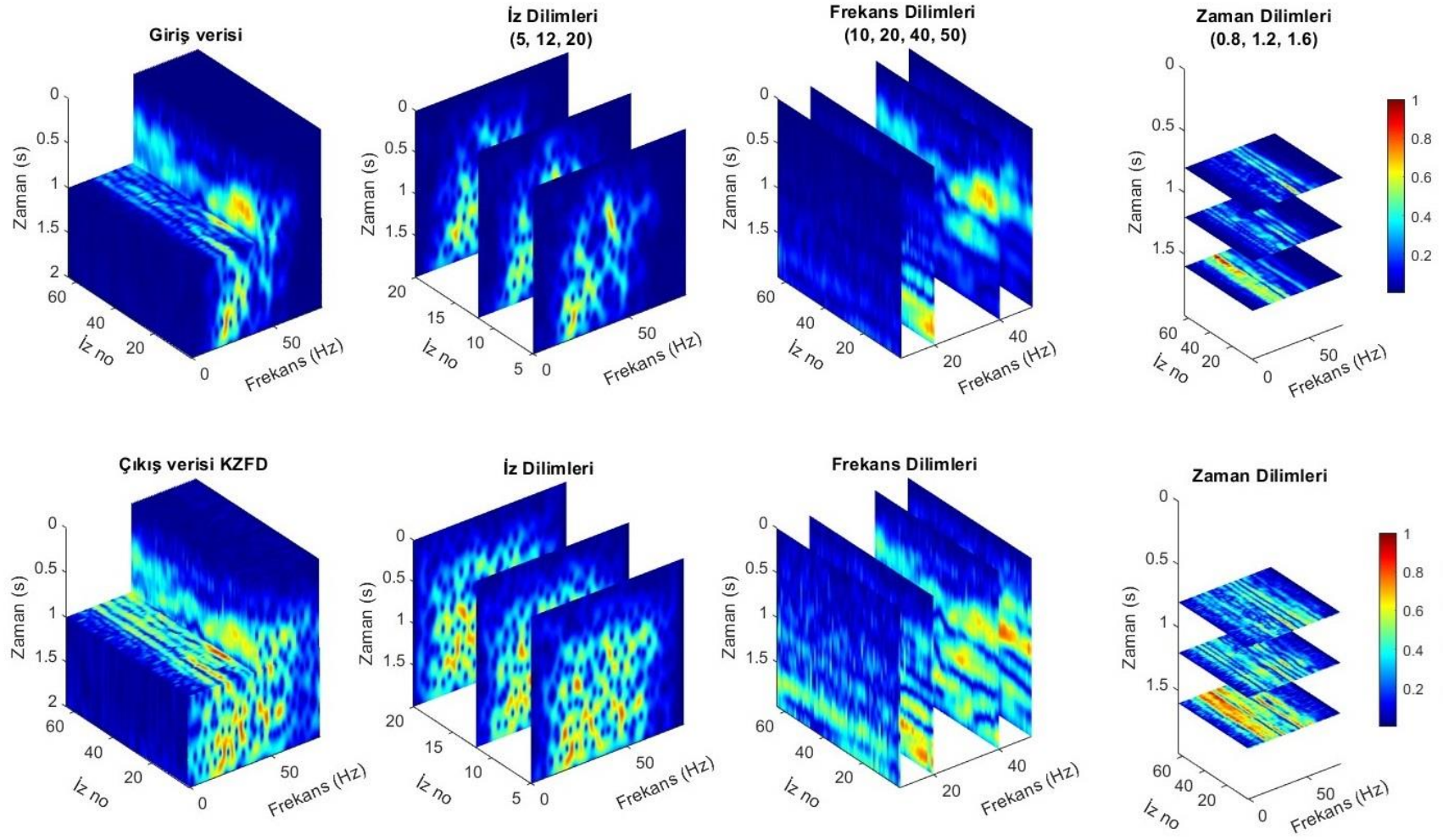
Şekil 30. Şekil 29'daki çerçeve alanların detaylandırılması. Oklar KZFD-K sonrası zamansal ayrımlılıktaki iyileşmeleri göstermek için kullanılmıştır.

Oklarla işaretlenen yansıma seviyeleri karşılaştırıldığında, KZFD-K uygulamasından sonra, küçük ölçekli yeni yansıma parçalarının varlığı, zayıf yansıma genliklerinin güçlendiği ve yansıma dalgacıklarının daraldığı (ana salınımlarının daralması) görülmüştür. Dolayısıyla, Şekil 31'deki spektral içerikler de verinin düşük ve yüksek frekansların güçlendiğini teyit etmektedir.



Şekil 31. Giriş (sol sütun), çıkış (orta sütun) ve genlik spektrumlarının (sağ sütun) karşılaştırılması.

Şekil 32, Şekil 29'deki giriş ve çıkış kesitlerinin 3B küp görünümünü sunmaktadır. Bilindiği üzere, 1B bir giriş sinyalinin (t, f) çıkışı 2B'ludur. Dolayısıyla, 2B'lu bir sismik kesitin tüm izlerini bir arada göstermek 3B'lu küp gösterimle yapılabilir. Bu şekildeki gösterim zaman, frekans ve uzaklık (veya iz numarası) boyunca dilimler (slices) elde etmeyi sağlar. Bu şekildeki gösterimlerle KZFD-K işleminden sonraki değişimler çok daha detaylı olarak izlenebilmektedir. İz numarası eksenini boyunca 5, 12 ve 20 nolu izlere ait, frekans eksenini boyunca 10, 20, 40 ve 50 Hz frekanslara ait ve zaman eksenini boyunca 0.8, 1.2 ve 1.6 s'deki dilimler gösterilmiştir. Her bir giriş dilimi çıkış dilimi ile karşılaştırıldığında verinin frekans ve genlik içeriğinin oldukça zenginleştiği görülmektedir. Bu şekildeki analizler genel olarak hem yapısal hem de stratigrafik yorumda yansıma seviyelerini, küçük ölçekli yansımaları genlik değişimini tanımlamak için önemli ölçüde katkı sağlayacağı açıktır.

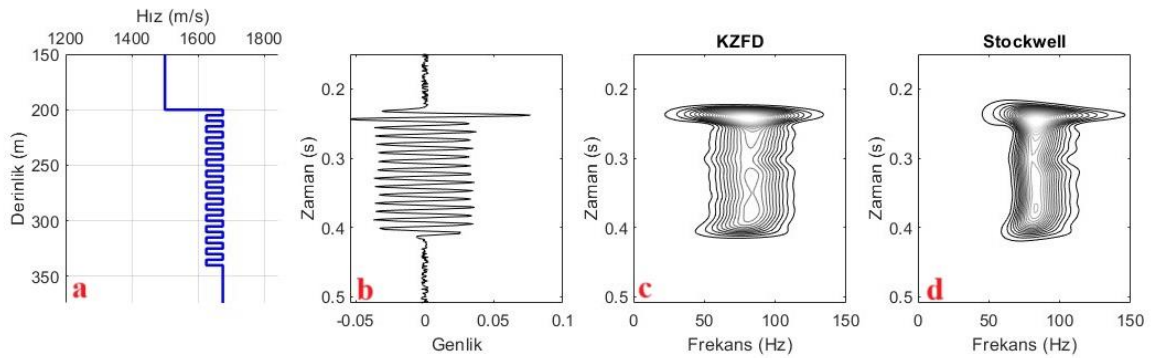


Şekil 32. KZFD-K uygulamasında giriş ve çıkışlarının küp ve dilim gösterimleri

3.8. KZFD'nin Tabakalı Yapı Tahmininde Kullanılması

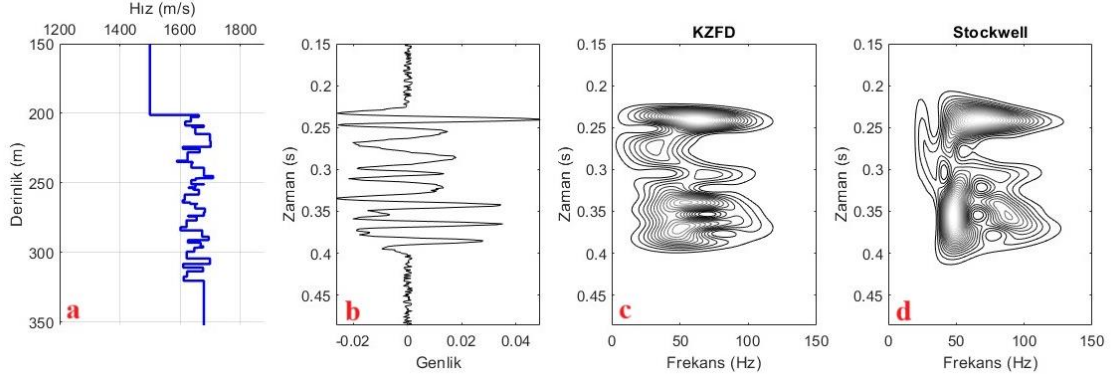
Spektral ayrıştırma teknolojisi, ince tabaka analizinde yeraltı yapılarının resiflerini ve paleo kanallarını tanımlamak için yararlı bir araçtır. Bu teknoloji, düşük frekanslı alanlar (Castagna vd., 2006) veya yerel jeolojiye bağlı olarak yüksek frekans özellikleri (Li vd., 2011; Liu vd., 2011) ile belirlenen hidrokarbon varlığını gösteren bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, KZFD sedimanter havzalardaki tabakalı yapının hız ve kalınlık tahminlerinde niteliksel bir analiz yapma imkanı sunar. Bu nedenle ilk olarak dört farklı yer modelinin KZFD ile hesaplanan (t, f) görüntüleri incelenmiştir.

Model 1, ilk tabaka hızı 1500 m/s ve kalınlığı 200 m olacak şekilde, sabit tabaka kalınlığına ($h=5$ m) ve ortalama tabaka hızına ($V=1650\pm 25$ m/s) sahip olan 30 tabakalı bir modeldir (Şekil 33). Hesaplama sıfır fazlı $f_0=80$ Hz'li Ricker dalgacığı ve zaman örnekleme aralığı $dt=0.001$ s kullanılmıştır. Sisimik iz hesaplamada %5 oranında rastgele gürültü eklenmiştir. Bu analizlerde karşılaştırma amaçları için t-f görüntüleri hem KZFD hem de Stockwell (S) dönüşümü ile hesaplanmıştır. Her iki dönüşüm sonucu karşılaştırıldığında her iki sonuç genel benzerlik göstermekle birlikte, Stockwell dönüşümünün KZFD'ye göre enerjiyi frekans bölgesinde daha sıkıştırarak 80 Hz civarında yoğunlaştırdığı görülmektedir. Ancak her iki t-f spektrumunda (Şekil 33c ve d) görüldüğü üzere, düzenli değişen yer modellerinde yüzeyden derine doğru spektral değişim oldukça kararlı davranmaktadır.



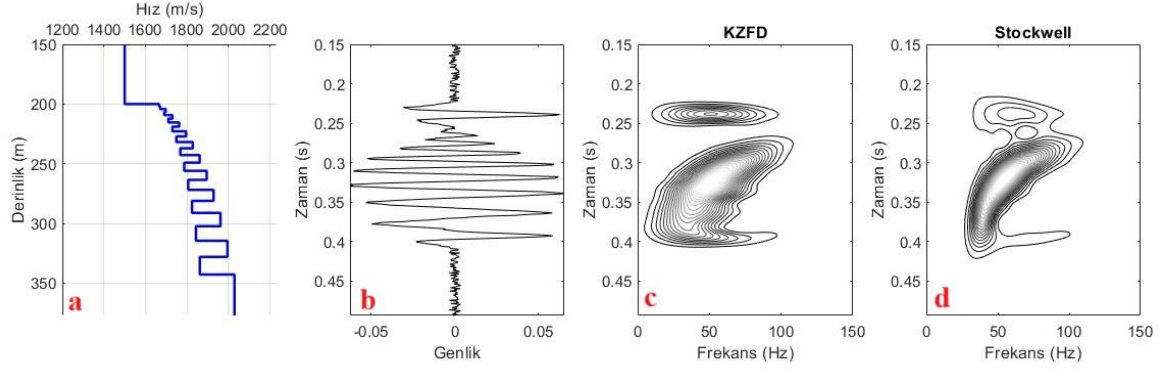
Şekil 33. Sabit hız ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi

Model 2, ilk tabakadan sonra tabakaların ortalama kalınlığının 6 m ve derine doğru %6'ı oranında değiştiği 50 tabakalı bir modeli içermektedir (Şekil 34a). Tabakaların ortalama hızı 1650 m/s ve değişim miktarı %60'tır. Model değişim oranları dikkate alınarak rastgele oluşturulmuştur. Şekil 34b'den görüldüğü üzere birçok yansıma seviyesi olmasına rağmen yüksek girişimden dolayı ancak birkaç yansıma seviyesi tanınabilir (Şekil 34b). Bu tür bir sismik yansıma verisinin t-f dönüşümündeki spektral içeriğin artan ve azalan frekans bilgisine ve düzensiz görünmesine sahip olduğu söylenebilir (Şekil 34c ve d). Öyle ki, kullanılan dalgacığın tepe frekansı 50 Hz olmasına rağmen, frekans bilgisi oldukça geniş bir alana dağılmıştır.



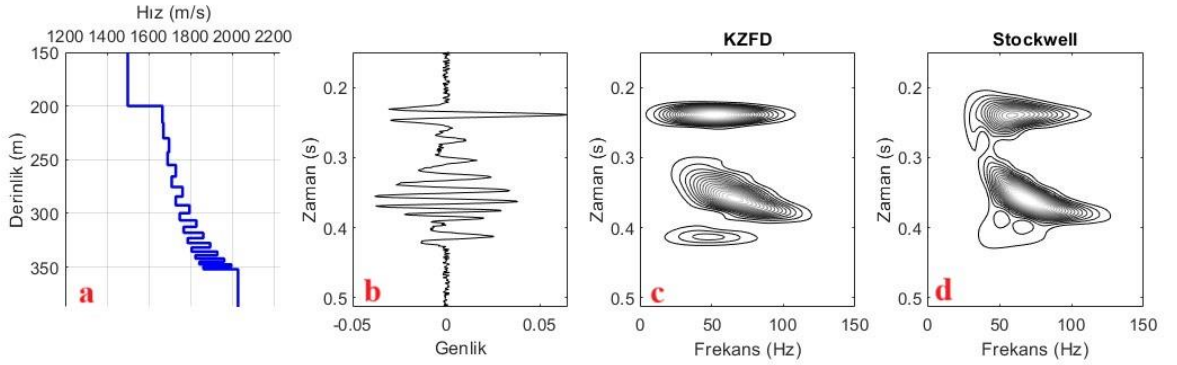
Şekil 34. Gelişigüzel hız dağılımlı ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi

Şekil 35'deki Model 3 kalınlığın ve hızın derinlikle arttığı 24 tabakadan oluşmaktadır (Şekil 35a). Sismik iz 50 Hz'li sıfır fazlı Ricker dalgacığı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 35b). KZFD ve S dönüşüm sonucu t-f görüntülerinden ilginç olarak artan kalınlıkla birlikte hızın Gaussian ortalaması ile artmasına rağmen frekans içeriği yüksekten düşüğe doğru bir azalım göstermektedir (Şekil 35c ve d). Bu durum, artan kalınlıkla ilişkili olarak soğrulmanın belirgin şekilde arttığını ve dolayısıyla derinlere doğru düşük frekanslara bir kaymanın meydana geldiğini açıkça göstermektedir.



Şekil 35. Derinlikle birlikte artan hız ve tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi

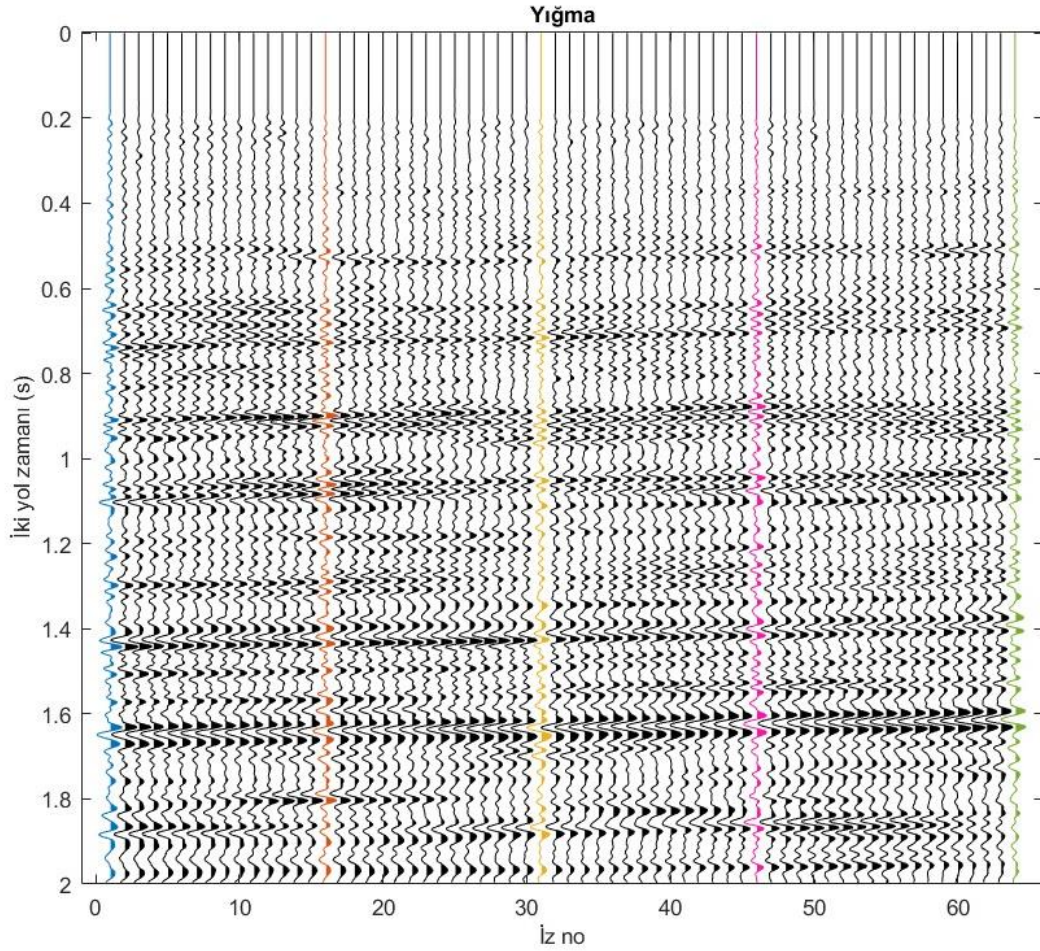
Şekil 36'daki Model 4'te hız derinlikle artarken kalınlığın azaldığı 24 tabakadan oluşmaktadır (Şekil 36a). Sismik iz 50 Hz'li sıfır fazlı Ricker dalgacığı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 36b). KZFD ve S dönüşüm sonucu t-f görüntülerinden ilginç olarak azalan kalınlıkla frekans içeriği düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru bir artım göstermektedir (Şekil 36c ve d). Bu durum çok açık olarak azalan kalınlıkla ilişkili olarak soğrulmanın azaldığı ve dolayısıyla derine doğru yüksek frekanslara doğru bir kaymanın olduğuna işaret etmektedir.



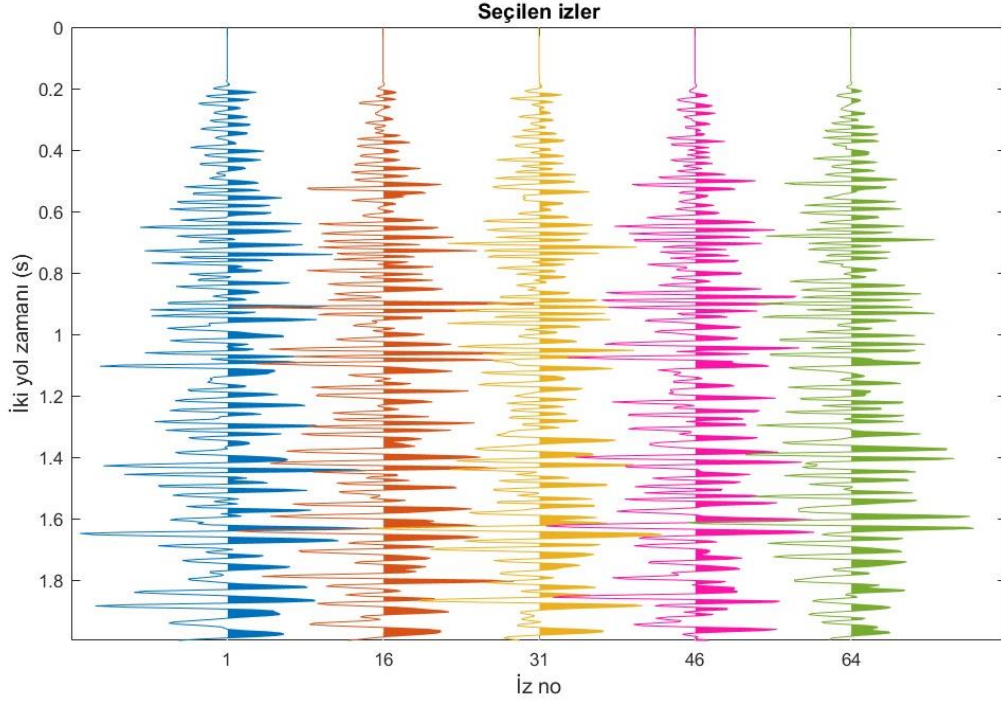
Şekil 36. Derinlikle birlikte artan hız ve incelen tabaka kalınlığına sahip bir model, (a) yer modeli, (b) sentetik iz, (c) KZFD ve (d) Stockwell dönüşümü ile (t,f) gösterimi

3.9. KZFD'nin Tabaka Modeli Tahmininde Gerçek Veriye Uygulanması

Sentetik verilere uygulanan tabaka modeli (sedimentasyon) tahmin analizi Şekil 29a'daki yığma kesitinden seçilen birkaç ize uygulanmıştır. Seçilen izler (1, 16, 31, 46, 64) Şekil 37 üzerinde renklendirilerek gösterilmiştir. İzlerin seçiminde kesitin kapsadığı profilin baş tarafından, ortasından ve sonundan örnekleme yaparak jeolojik değişimleri (hız ve kalınlık) tahmin etmek hedeflenmiştir. Sentetik modellerde hız ve kalınlık değişimlerinin bilindiği modellere göre sismik izler oluşturulmuş ve KZFD tepkileri hesaplanarak, anlamlandırılmıştır. Ancak arazi verilerinin analizinde, sismik izlerin KZFD değişimleri sentetiklerdeki benzerliklerine göre anlamlandırılarak formasyonların hız ve kalınlık değişimleri hakkında bir tahmin yapılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Her bir seçilen iz Şekil 38'te gösterilmektedir.



Şekil 37. Yığma verisinden seçilen izler (renkli izler)



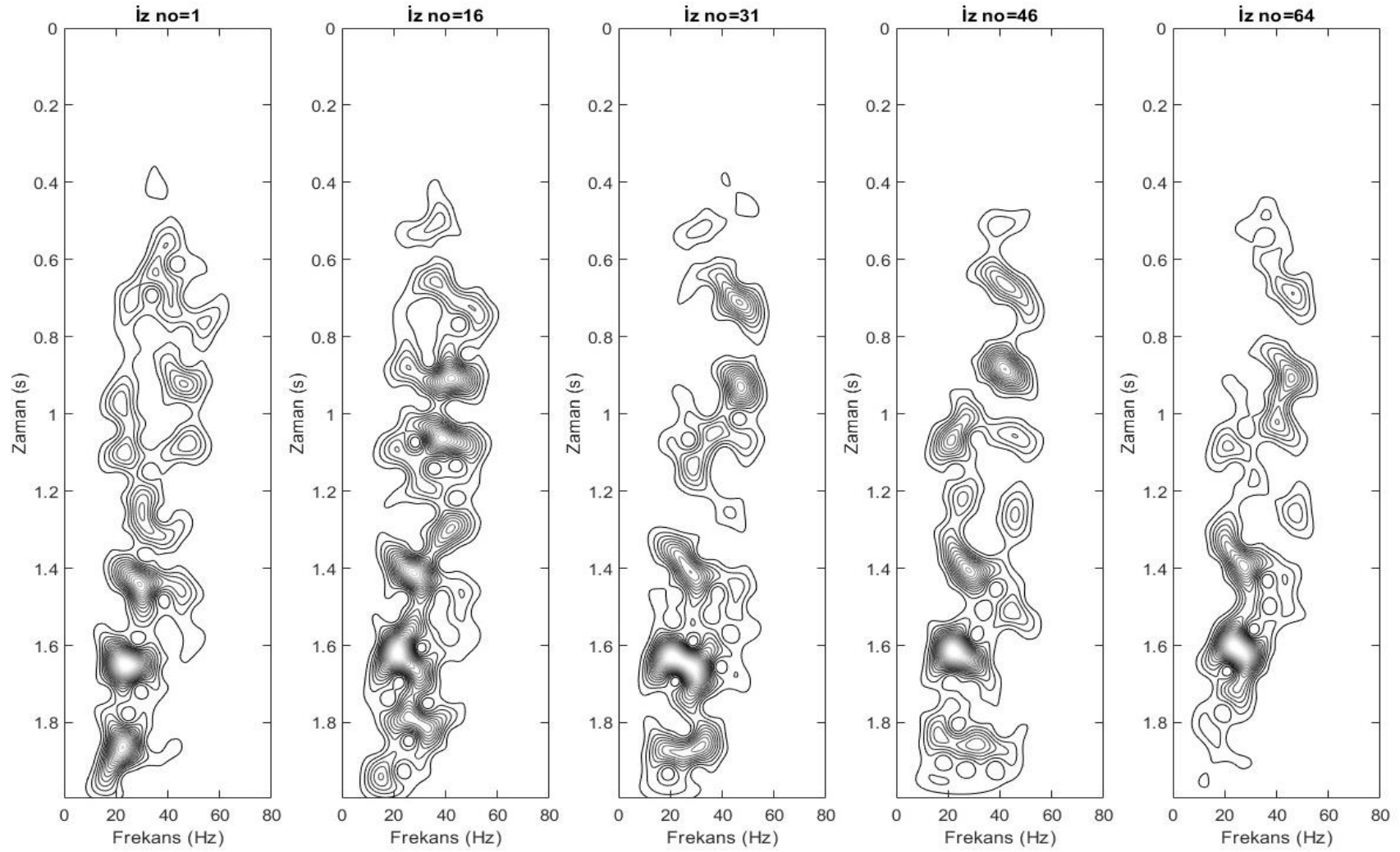
Şekil 38. Şekil 37'den seçilen izler iz numarasına göre yeniden gösterimi

Seçilen izlerin t-f görüntüleri KZFD ile hesaplanmış ve Şekil 39'da sunulmuştur. t-f görüntülerinden genel olarak derine doğru azalan bir frekans eğilimi görülmektedir. Bu kabaca artan derinlikle tabaka hızları ortalama olarak artarken kalınlıklarının da arttığına işaret etmektedir. Ancak t-f görüntüsündeki spektral içerik alt bölümlere ayrılarak değerlendirilebilir, böylece daha özel bir analiz ve tahmin yapılabilir.

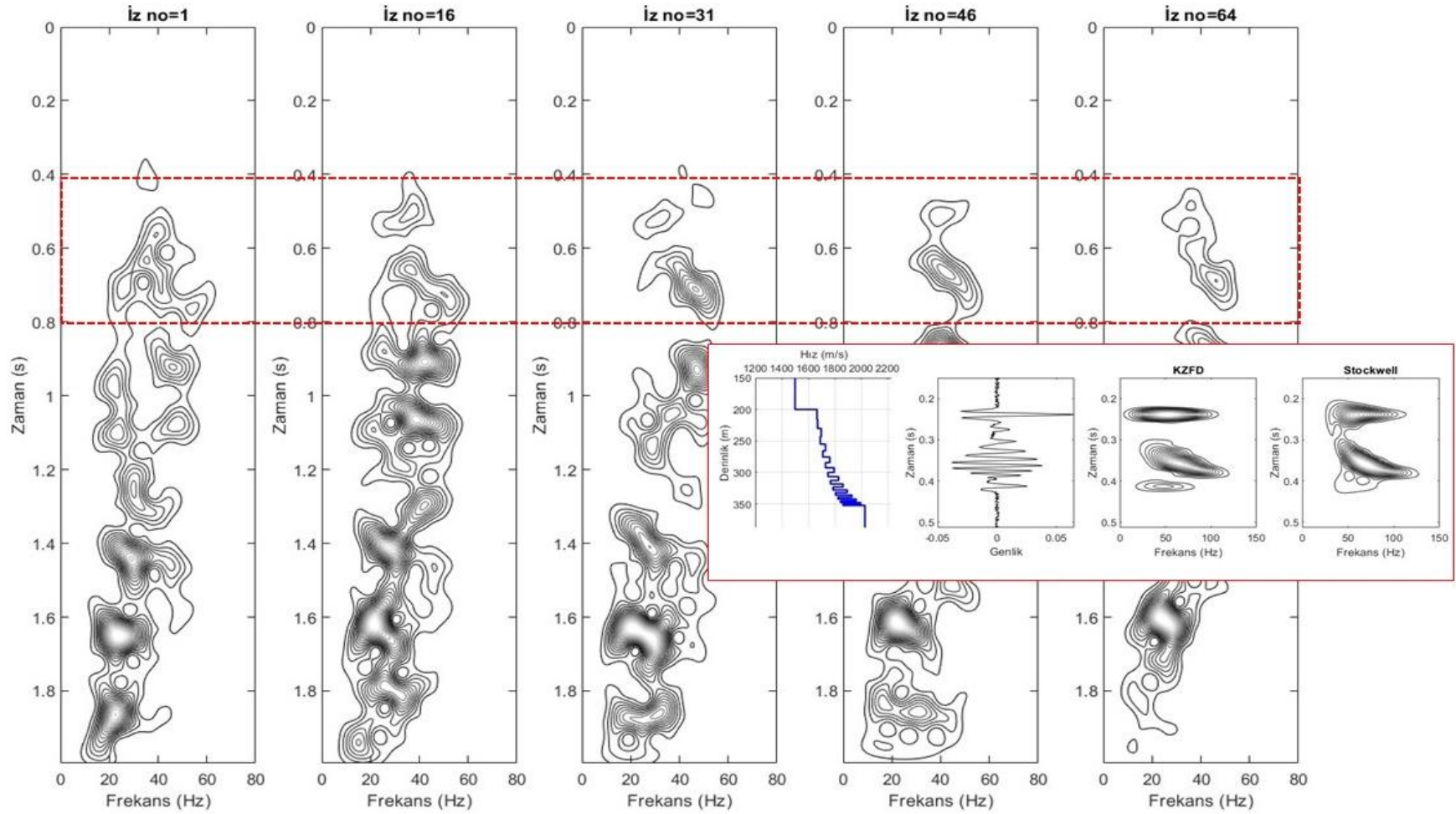
- (1) $\sim 0.4-0.8$ s aralığında tüm izlerin t-f görüntüsünde derine doğru artan bir frekans içeriği görülmektedir. Bu durum, sık derinliklerden derine doğru (temele doğru) sıkışmadan dolayı bir incelme olabileceğini işaret edebilir (Şekil 40).
- (2) $\sim 0.8-1.2$ s aralığında 1. ve 16. izlerin (t-f) görüntüsünde derinlikle çok az da olsa bir düzensizlik görülürken, 31, 46 ve 64. İzlerde belirgin şekilde azalan frekans içeriği görülmektedir. Bu yanal yönde bir tabaka kalınlaşması olarak değerlendirilebilir ve bu bir süreksizlik varlığına (fay) işaret edebilir. İz aralıkları 10 m alındığında 16-31 arası ve 31-46 izleri arası 150'şer m ve 46-64 izleri arası ise 180 m mesafedir (Şekil 41).
- (3) $> \sim 1.2$ s'den sonraki derinliklerde belirgin olarak azalan bir frekans içeriği egemendir. Bu açık olarak kalınlaşan derin yapıları temsil etmektedir. İz numaralarına göre soldan sağa doğru takip edildikçe, tabaka kalınlıklarının gelişi

güzel hız dağılımlı Model 2 ile uyumlu olduğu gözlenmektedir (Şekil 42). 1.2-1.4 s zaman aralığında ise derinlikle birlikte artan hız ve incelen tabaka kalınlığına sahip Model 4 ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. 1.4-1.6 s zaman aralığı incelendiğinde ise geliş güzel hız dağılımlı ve tabaka kalınlığına sahip Model 2 ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 43).

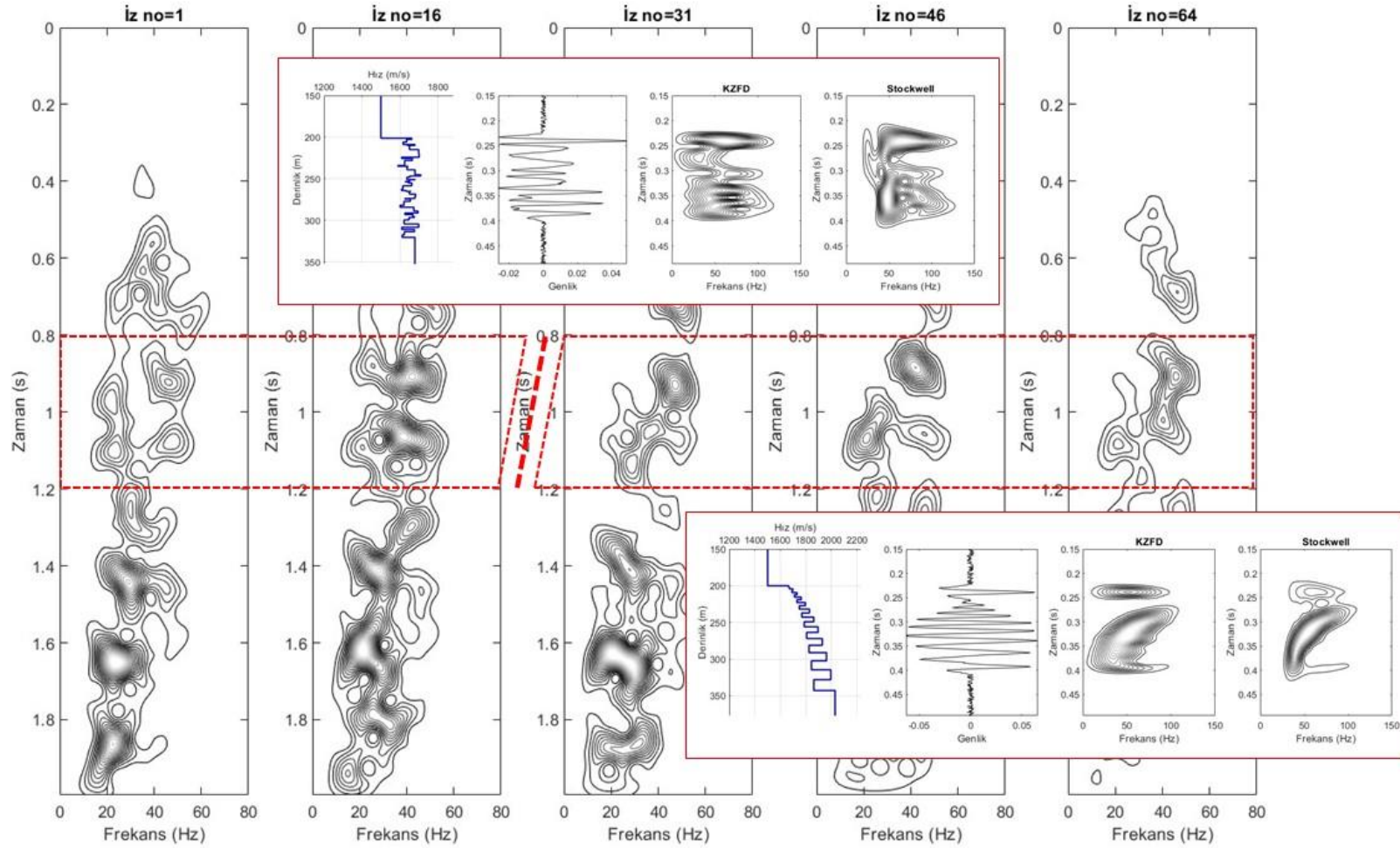




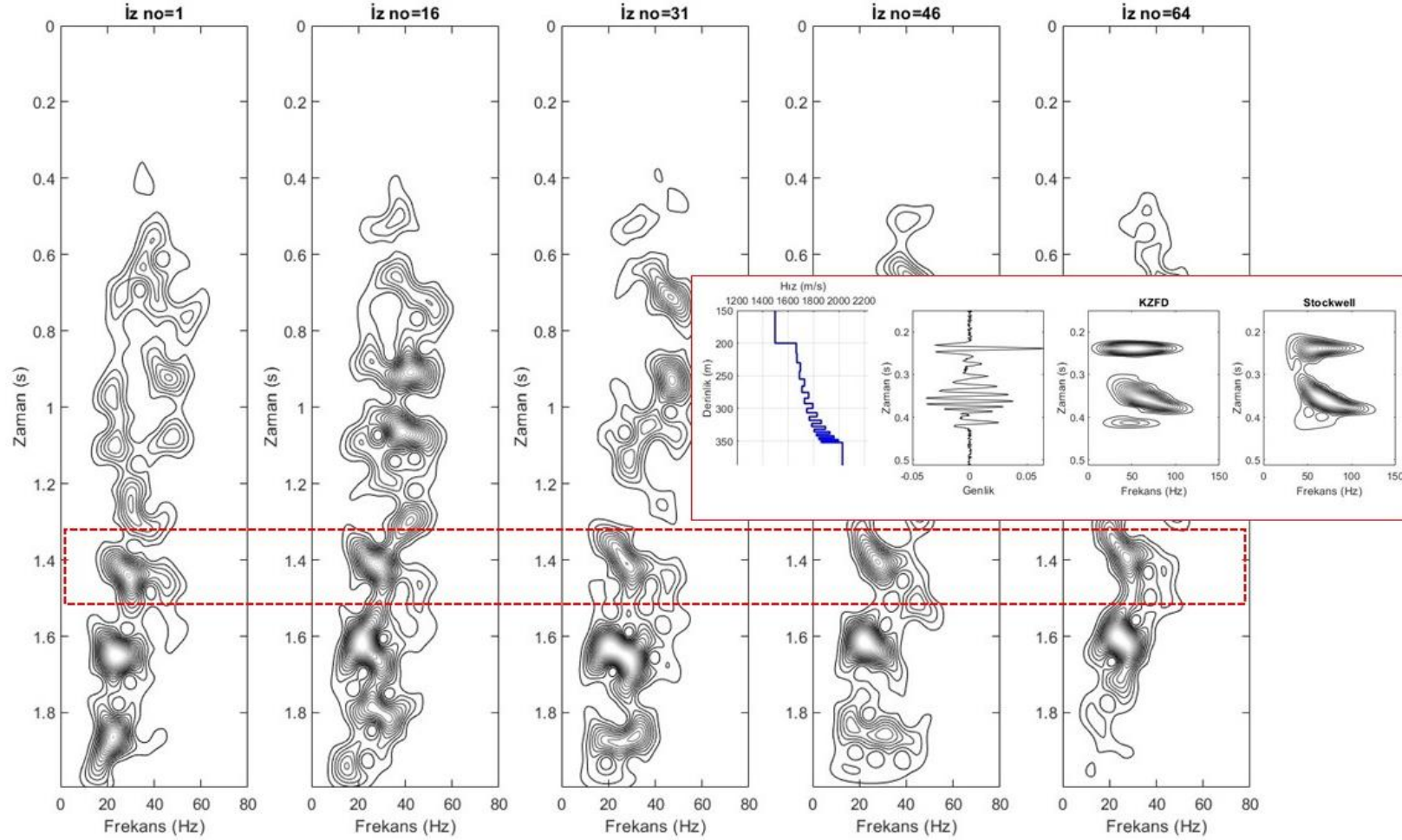
Şekil 39. Seçilen izlerin KZFD dönüşümleri



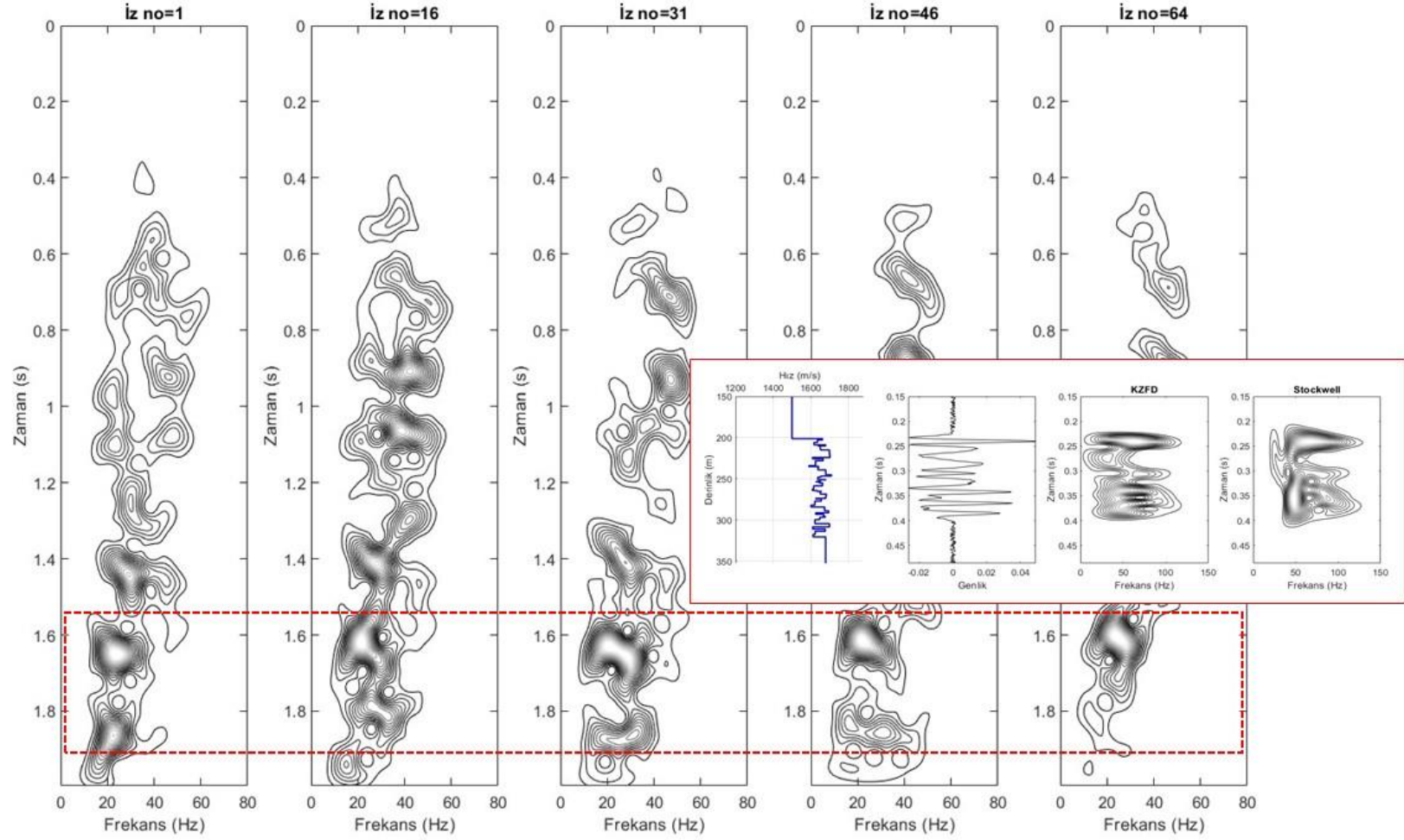
Şekil 40. Yığma kesitinin sıg (0.4-0.8 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 4 ile karşılaştırması



Şekil 41. Yığma kesitinin orta (0.8-1.2 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 2 ve 3 ile karşılaştırması



Şekil 42. Yığma kesitinin derin (1.3-1.5 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 4 ile karşılaştırması



Şekil 43. Yığma kesitinin derin (> 1.5 s) bölgesinin KZFD analizi ve model 2 karşılaştırması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında kullanılan KZFD yönteminin, sinyal analizinde zaman ve frekans boyutlarında sinyalin frekans içeriğinin zamanla nasıl değiştiğini detaylı görüntülemeye olanak sağladığı görülmüştür. KZFD'nin uygulanabilmesi ve sonuçlar üzerindeki etkisi kullanılan pencere fonksiyonlarının uzunluklarına (boyu veya örnek sayıları) bağlı olduğu örnekler üzerinde test edilerek gösterilmiştir. Kısa zaman pencerelerini zaman boyutunda, uzun pencere boylarının ise frekans boyutunda ayrımlılık sağladığı görülmüştür. Aynı anda her iki boyutta ayrımlılığı sağlayacak bir pencere uzunluğu belirlemek zordur. Ancak, sentetik veriler üzerindeki testlerle pencere uzunluğunun veri boyunun dörtte birine ($m=N/4$) veya daha kısa alınmasının (t, f) görüntüsünün hem tam olarak zamansal ayrımlılığı hem de kısmen frekans ayrımlılığı açısından yeterli olacağı belirlenmiştir.

KZFD sadece frekans boyutunda süzgeçleme değil, aynı zamanda zaman boyutunda da süzgeçleme imkanı sunmuştur. Bununla birlikte, genlik seviyelerini ayırlamak için genlik süzgeçlemesi düzenlenmede KZFD'nin oldukça yararlı olduğu görülmüştür. Zaman bandındaki süzgeçlemede sinyale ait tüm frekans bileşenlerine ait, buna karşılık frekans bandında ise tüm zaman bileşenlerine ait enerjiler çıkış sinyaline aktarılır. Dolayısıyla, (t, f) spektrumundaki aynı alanın süzgeçlenmesinde zaman veya frekans süzgeçlerinin sonuçları genel trendi benzerlik gösterse de detaylarda farklılıklar gösterecektir. Buna karşılık, süzgeçlenecek alanın hem zaman hem de frekans bantlarının eş zamanlı olarak kullanılması süzgeçlemenin etkinliğini güçlendirmektedir. Diğer yandan, genlik süzgeçlemesi aynı frekans bandına düşen sinyal ve gürültü genliklerini yaklaşık tanımlamada ve onları ayırlama kapasitesine sahip olduğu ve dolayısıyla özellikle klasik frekans süzgeçlemesinde düşük frekans bölgesindeki sinyal bilgisinin korunmasında etkin olacağı görülmüştür.

Sismik verinin düşey (zamansal) ayrımlılığının iyileştirilmesinde KZFD-K yöntemini oldukça katkı sağlamıştır. KZFD-K yöntemi, literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden farklı olarak hem düşük hem de yüksek frekans bölgelerindeki bilgileri eş zamanlı olarak iyileştirmektedir. Örneğin, geleneksel dekonvolüsyon yöntemleri, yüksek frekans bileşenlerini güçlendirme eğilimindeyken düşük frekansları göz ardı eder. Sadece düşük frekanslara odaklanan yöntemler ise, daha derin yapıları incelerken ince tabaka

- (1) kararlı davranış gösteriyor ise, bu ortamda kalınlık değişiminin standart ve hızın fazla değişmediği,
- (2) kararsız davranış gösteriyor ise, bu ortamda kalınlık ve hız değişiminin oldukça düzensiz ve/veya değişken olduğu,
- (3) sığ derinliklerden derine doğru genlikler düşük frekanslara doğru azalıyor ise, tabakaların hızı ortalama olarak artarken kalınlıklarının da arttığı,
- (4) sığ derinliklerden derine doğru genlikler yüksek frekanslara doğru artıyor ise, tabakaların hızı ortalama olarak artarken kalınlıklarının azaldığı, şeklinde bir yer modeli kestirimi/tahmini yapılabilir.

KZFD yönteminin uygulamada birçok avantajı olmasına rağmen, veri hacmi arttıkça işlem zamanının artması ve dolayısıyla daha güçlü hesaplama kapasiteli bilgisayarlarla ihtiyaç duyulmasıdır. Bununla birlikte, sismik düşey ayrımlılığı geliştirmek için literatürde yaygın kullanılan dekonvolüsyon, spektral bant genişletme ve spektral beyazlatma gibi tekniklere karşılaştırıldığında, KZFD-K tekniğinin çok fazla parametre bağımlı olmaması ve sadece pencere boyu parametresinin işlemler için yeterli olması tekniğin önemli bir üstünlüğüdür.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında kısa zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) yönteminin temel uygulama ilkeleri ve sismik yansıma verilerinin işlenmesinde kullanımı incelenmiştir. Bu kapsamda, yöntemin teorisi, kullanılan parametrelerin sonuçlar üzerine olan etkileri, veri işlem aşamasındaki yeri, kepstrum tekniği ile birleştirilerek düşey ayrımlılığın iyileştirilmesindeki katkıları ve tabakalı yer modellerinin hız ve kalınlıklarının niteliksel tahmininde kullanılabileceği sentetik ve arazi verileri üzerinde yapılan testlerle gösterilmiştir. KZFD'nün etkin kullanımı için, veri boyuna görece kısa zaman pencerelerinin zaman çözünürlüğünü artırırken, frekans çözünürlüğünü azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. KZFD yönteminin uygulanmasında pencere seçiminin bir standardı olmadığı, ancak kullanıcı deneyimine ve verinin uzunluğunun dörtte biri olacak şekilde seçilmesinin daha doğru yorumlama yapabilmeyi sağlayacağı anlaşılmıştır.

Sentetik ve arazi veriler üzerindeki uygulamalar KZFD yönteminin, verilerin zaman, frekans alanında ve belirlenen genlik seviyelerinde eş zamanlı olarak süzgeçlenmesinde son derece avantajlı olduğu deneyimlenmiştir. Böylece, sismik veriyi hem zaman hem de frekans boyutlarında detaylı inceleme olanağı sunarak verinin genel görüntü kalitesini artırmıştır. Kepstrum tekniği ile birlikte kullanılarak düşük frekans eksikliği ve yüksek frekansların soğrulmasından dolayı yetersiz kalan düşey ayrımlılığın artırılmasında etkili bir dönüşüm olarak kullanılabileceği açıkça görülmüştür. Böylece, KZFD yönteminin analiz edilmesi istenen verinin, zaman-frekans alanındaki çözünürlüğünün artırılması açısından oldukça kullanışlı olduğu, aynı zamanda sinyaldeki düşük frekanslı alanların KZFD-K sonrası spektral içeriğinin genliklerini artırarak daha geniş bir frekans spektrumuna yayılarak yorumlamayı kolaylaştıracağı görülmüştür. KZFD-K yöntemi düşey ayrımlılığı artırmak için yansıma dalgacıklarının yan salınımlarının etkin şekilde zayıflatılmasını, buna karşılık göreceli olarak ana salınının güçlenmesini sağlamıştır.

KZFD yönteminin kullanımı ile elde edilen (t, f) görüntülerinden sedimanter ortamlardaki tabakalı yapının hız ve kalınlık değişimleri hakkında niteliksel bir tahmin yapılabileceği ve böylece bu bilginin sismik yorumlamada önemli katkı sunacağı gösterilmiştir.

Sonuç olarak, sentetik ve gerçek veriler üzerinde gerçekleştirilen analizler göstermiştir ki, sismik verilerin birçok süzgeçleme analizinin gerçekleştirilmesindeki sağladığı imkanlar, düşey ayrımlılığı artırmadaki etkinliği, kalınlık ve hız değişim tahmini yapmayı kolaylaştıracağı ve dolayısıyla stratigrafik yoruma önemli katkılar sağlayacağı göz önüne alındığında KZFD yönteminin sismik verilerin işlenmesinde kullanıcılara önemli çeşitlilik sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Akansu, A., & Haddad, R. (1992). *Multiresolution signal decomposition: Transforms, subbands, and wavelets*. Academic Press.
- Allen, J. B. (1977). Short Time Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ASSP)*, 25(3), 235-238.
- Arı, N., Özen, Ş., & Çolak, Ö. (2008). *Dalgacık Teorisi* (Cilt 1). Ankara: Palme Yayıncılık.
- Baba, T. (2012). *Time-Frequency Analysis Using Short Time Fourier Transform*.
- Başokur, A., Dikmen, Ü., & Tokgöz, O. (2003). Time-frequency representation of strong-motion records for damage appraisal: examples from the Düzce earthquake (Turkey). *Near Surface Geophysics*, 1(2).
- Båth, B. (1976). Spectral analysis in geophysics, *Developments in Solid Earth Geophysics. Earth-Science Reviews*, 12(1), 563.
- Berkhout, A. J. (1984). *Seismic Resolution: A quantitative analysis of resolving power of acoustical echo techniques*. London.
- Bogert, B., Healy, M., & Tukey, J. (1963). The Quefrency Alanysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo Autocovariance, CrossCepstrum and Saphe Cracking. *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis (M. Rosenblatt, Ed)*. 15, s. 209-243. New York: Wiley.
- Bracewell, R. (2000). *The Fourier Transform and Its Applications: Third Edition*.
- Buttkus, B. (2000). *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics*.
- Carmona, R., Hwang, W., & Torr sani, B. (1998). *Pratical Time-Frequency Analysis Wavelet and Gabor Transforms with an implementation in S*. Academic Press.
- Castagna, J. P., Sinha, S. K., Routh, P. S., & Anno, P. D. (2003). Time-frequency attribute of seismic data using continuous wavelet transform. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.
- Castagna, J., & Sun, S. (2006). Comparison of spectral decomposition methods. *First Break*, 24(3), 73-79.
- Chakraborty, A., & Okaya, D. (1995). Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods. *Geophysics*, 60(6), 1906-1916.
- Chen, V., & Ling, H. (2002). *Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis* (1 b.). Artech House Publishers.

- Chen, Y., He, Y., Li, S., Wu, H., & Peng, Z. (2020). Seismic spectrum decomposition based on sparse time-frequency analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 177, 1-10.
- Cheng, W. Y., & Li, D. H. (2010). Spectral Scaling BFGS Method. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 146, 305-319. doi:<https://doi.org/10.1007/s10957-010-9652-y>
- Childers, D., Skinner, D., & Kemerait, R. (1977). The Cepstrum: A Guide to Processing. *Proceedings of the IEEE*, 65(10).
- Choi, Y., Seol, S. J., Byun, J., & Kim, Y. (2019). Vertical resolution enhancement of seismic data with convolutional U-net. *SEG International Exposition and Annual Meeting, San Antonio*, 2388-2392.
- Chopra, S., Castagna, J., & Portniaguine, O. (2006). Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. *CSEG RECORDER*, 19-25.
- Chu, P. (1996). The S-transform for obtaining localized spectra. *Marine Technology Society Journal*, 29(4), 28-38.
- Cohen, L. (1989). Time-Frequency Distributions-A Review. *Proceedings of the IEEE*, 77(7), 941-981.
- Cohen, L. (1995). *Time-frequency analysis*. Prentice Hall PTR.
- Daubechies, I. (1999). *Ten lectures on wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Daubechies, I., Lu, J., & Wu, H. (2011). Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 30(2), 243-261.
- Ditommaso, R., Mucciarelli, M., & Ponzio, F. C. (2012). Analysis of non-stationary structural systems by using a band-variable filter.
- Durak, L., & Arıkan, O. (2003). Short-time Fourier transform: Two fundamental properties and an optimal implementation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(5).
- Durand, S., & Froment, J. (2001). Artifact free signal denoising with wavelets. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 6.
- Gabor, D. (1946). Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, 93(26).
- Gabor, D. (1952). Lectures on communication theory. *Technology*(238).
- Gao, R. X., & Yan, R. (2006). Non-stationary signal processing for bearing health monitoring. *International Journal of Manufacturing Research (IJMR)*, 1(1), 18-40.

- Gaunard, G., & Strifors, H. (1996). Signal Analysis by Means of Time-Frequency (Wigner-Type) Distributions - Applications to Sonar and Radar Echoes. *Proceedings of the IEEE*, 84(9).
- Hamming, R. (1989). *Digital Filters 3rd Edition*. Minesota, New York: Dover Publications, Inc.
- Han, J., & van der Baan, M. (2013). Empirical mode decomposition for seismic time-frequency analysis. *Geophysics*, 78(2), 9-19.
- Han, L., Sacchi, M., & Han, L. (2014). Spectral decomposition and de-noising via time-frequency and space-wavenumber reassignment. *Geophysical Prospecting*, 62(2), 244-257.
- Harris, F. (1978). On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*.
- Hlawatsch, F., & Boudreaux-Bartels, G. (1992). Linear and quadratic time-frequency signal representations. *IEEE Signal Processing Magazine*, 9(2).
- Huang, Z., Zhang, J., Zhao, T., & Sun, Y. (2016). Synchrosqueezing S-Transform and Its Application in Seismic Spectral Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(2), 817-825.
- Irving, J., & Knight, R. (2003). Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 68(3).
- Kallweit, R. S., & Wood, L. C. (1982). The limits of resolution of zero-phase wavelets. *Geophysics*, 47(7), 1035-1046.
- Karlı, H. (2002). Sismik yığma izlerinin karmaşık iz analizi ile ayrımlılık açısından değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 26, 15-26.
- Karlı, H., & Şenkaya, M. (2018). Combination of Fourier Transform and Cepstrum Analysis to Improve the Vertical Resolution of Seismic Data. *9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology (ISEMG-2018)*, (s. 269-275). Antalya, Türkiye.
- 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.
- Li, H.-B., Zhao, W.-Z., Cao, H., Yao, F.-C., & Shao, L.-Y. (2004). Characteristics of Seismic Attenuation in Gas Reservoirs in the Domain of Wavelet Scales. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(5), 892-898.
- Li, Y., Zheng, X., & Zhang, Y. (2011). High-frequency anomalies in carbonate reservoir characterization using spectral decomposition. *Geophysics*, 76(3), 47-57.

- Liang, C., Teng, Z., Li, J., Yao, W., Hu, S., Yang, Y., & He, Q. (2022). A Kaiser Window-Based S-Transform for Time-Frequency Analysis of Power Quality Signals. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2).
- Liu, C.-y., Xu, S.-f., Yue, J.-h., & Wei, X.-c. (2008). Application of cepstral analysis to thin beds. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(2).
- Liu, G., Fomel, S., & Chen, X. (2011). Time-frequency analysis of seismic data using local attributes. *Geophysics*, 76(6), 23-34.
- Liu, N., Gao, J., Jiang, X., Zhang, Z., & Wang, Q. (2017). Seismic time-frequency analysis via STFT-based concentration of frequency and time. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(1), 127-131.
- Liu, W., Cao, S., & Chen, Y. (2016). Seismic time-frequency analysis via empirical wavelet transform. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(1), 28-32.
- Lukacs, E., & King, E. (1954). A Property of Normal Distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, 25, s. 389-394.
- Mansinha, L., Stockwell, R., & Lowe, R. (1997). Pattern analysis with two-dimensional spectral localisation: Applications of two-dimensional S transforms. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 239(1-3), 286-295.
- Margrave, G. F., & Lamoureux, M. P. (2019). *Numerical Methods of Exploration Seismology: With Algorithms in MATLAB®*. Cambridge University Press.
- Martin, H. (1992). Detection of gear damage by statistical vibration analysis. *IMEchE Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*, s. 395-401.
- Meyer, Y. (1993). *Wavelets Algorithms and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematic.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Giard, D. (1982a). Wave propagation and sampling theory - Part I. Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203-221.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Giard, D. (1982b). Wave propagation and sampling theory - Part II. Sampling theory and complex waves. *Geophysics*, 47(2), 222-236.
- Moukadem, A., Ould Abdeslam, D., & Dieterlen, A. (2014). *Time-Frequency Domain for Segmentation and Classification of Non-Stationary Signals*.
- Norton, M., & Karczub, D. (2003). *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*.
- Odebeatu, E., Zhang, J., Chapman, M., Liu, E., & Li, X. (2006). Application of spectral decomposition to detection of dispersion anomalies associated with gas saturation. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 25(2).

- Partyka, G., Peyton, L., & Bottjer, R. (1998). Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherency. *The Leading Edge*, 17(9), 1177-1328.
- Polikar, R. (2001). *The Wavelet Tutorial*. 2024 tarihinde <https://users.rowan.edu/~polikar/WTTutorial.html> adresinden alındı
- Potter, R. (1946). Visible speech. 91, s. 447-452. New York: Dover Publications, Inc.
- Potter, R., & Steinberg, J. (1950). Toward the Specification of Speech. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, s. 807-820.
- Putri, I. A., & Priyono, A. (2019). Thin Bed Identification Improvement Using Short-Time Fourier Transform Half-Cepstrum on "TG" Field. *PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 8(3), 103-106.
- Randall, R. (1988). *Frequency analysis*. Bruel and Kjaer.
- Randall, R. (2016). *A History of Cepstrum Analysis and its Application to Mechanical Problems*. Mechanical Systems and Signal Processing.
- Reine, C., Van Der Baan, M., & Clark, R. A. (2009). The robustness of seismic attenuation measurements using fixed- and variable-window time-frequency transforms. *Geophysics*, 74, 123-135.
- Sajid, M., & Ghosh, D. (2014). Logarithm of short-time Fourier transform for extending the seismic bandwidth. *Geophysical Prospecting*, 62(5).
- Sattari, H., Gholami, A., & Siahkoohi, H. (2013). Seismic data analysis by adaptive sparse time-frequency decomposition. *Geophysics*, 78(5).
- Sheriff, R., & Geldart, L. (1982). Exploration seismology. Volume 1: history, theory, and data acquisition. *Exploration seismology. Volume 1: history, theory, and data acquisition*.
- Sinha, S., Routh, P., Anno, P., & Castagna, J. (2005). Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, 70(6), 19-25.
- Steeghs, P., & Drijkoningen, G. (1995). Time-frequency analysis of seismic sequences. 1995 *SEG Annual Meeting*.
- Steeghs, P., & Drijkoningen, G. (1996). Time-frequency analysis of seismic reflection signals. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 5.
- Stockwell, R. G. (2007). A basis for efficient representation of the S-transform. *Digital Signal Processing*(17), 371-393. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2006.04.006>
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., & Lowe, R. (1996). Localization of the complex spectrum: The S transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(4), 998-1001.

- Theophanis, S., & Queen, J. (2000). Color display of the localized spectrum. *Geophysics*, 65(4).
- Tian, L. (2021). Seismic spectral decomposition using short-time fractional Fourier transform spectrograms. *Journal of Applied Geophysics*, 192.
- Wang, P., Gao, J., & Wang, Z. (2014). Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing transform. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(12), 2042-2044.
- Wang, Q., & Gao, J. (2017). Application of synchrosqueezed wave packet transform in high resolution seismic time-frequency analysis. *Journal of Seismic Exploration*, 26(6), 587-599.
- Wang, Q., Gao, J., Liu, N., & Jiang, X. (2018). High-Resolution Seismic Time-Frequency Analysis Using the Synchrosqueezing Generalized S-Transform. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(3), 374-378.
- Wang, Y. (2023). *Time-Frequency Analysis of Seismic Signals*. John Wiley & Sons.
- Wu, X., & Liu, T. (2009). Spectral decomposition of seismic data with reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution. *Journal of Applied Geophysics*, 68(3), 386-393.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists.
- Zhang, Y., Zhao, X., Yuan, H., & Zhang, W. (2009). Wavelet packet threshold approach to denoising piezoelectricity gyro signal. *Proceedings - 2009 International Conference on Computer Engineering and Technology, ICCET 2009*, 2.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2009-2010 öğretim yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başladı. 2015 yılında bu bölümden mezun oldu. 2020 yılında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atanarak yüksek lisans eğitime Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde devam etti. 2023-2024 öğretim yılında Montanuniversität Leoben’de Erasmus+ programına katılarak bu programı başarı ile tamamladı. 2022 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Orta derece İngilizce ve Almanca bilmektedir.