İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZEMİN KARAKTERİZASYONU AMAÇLI RAYLEIGH DALGASI FAZ HIZI DİSPERSİYON ANALİZİNDE AKTİF VE PASİF KAYNAKLI SİSMİK DİZİLİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

DOKTORA TEZİ

Aylin KARAASLAN

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

MART 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZEMİN KARAKTERİZASYONU AMAÇLI RAYLEIGH DALGASI FAZ HIZI DİSPERSİYON ANALİZİNDE AKTİF VE PASİF KAYNAKLI SİSMİK DİZİLİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

DOKTORA TEZİ

Aylin KARAASLAN
(505122401)

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jeofizik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin Argun KOCAOĞLU

MART 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

COMPARATIVE EVALUATION OF ACTIVE AND PASSIVE SEISMIC ARRAY METHODS IN RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION ANALYSIS FOR SITE CHARACTERIZATION

Ph.D. THESIS

Aylin KARAASLAN
(505122401)

Department of Geophysical Engineering

Geophysical Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Hüseyin Argun KOCAOĞLU

MARCH 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505122401 numaralı Doktora Öğrencisi Aylin Karaaslan, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ZEMİN KARAKTERİZASYONU AMAÇLI RAYLEIGH DALGASI FAZ HIZI DİSPERSİYON ANALİZİNDE AKTİF VE PASİF KAYNAKLI SİSMİK DİZİLİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin Argun KOCAOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR ŞİŞMAN** .....
Uppsala Üniversitesi

Doç. Dr. Serdar ÖZALAYBEY .....
TÜBİTAK MAM Yer Bilimleri Araştırma Grubu

Doç. Dr. Gonca ÖRGÜLÜ .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Diğdem ACAREL .....
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 3 Ocak 2023
Savunma Tarihi : 14 Mart 2024

ÖNSÖZ

Tez çalışması kapsamında, sığ zemin karakterizasyonu amacıyla Rayleigh dalgası faz hızı dispersiyon bilgisinin elde edilmesine yönelik yenilikçi bir veri toplama ve işleme şeması olan Yüzey Dalgalarının 2-boyutlu PSİ Sonrası Çok Kanallı Analizi (2D PSI-MASW) geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, sığ zemin araştırmalarında uygulamaları yaygın olmayan ancak az sayıda alıcıdan oluşan küçük boyutlu dizilim konfigürasyonları ile faz hızı dispersiyon analizi yapılabilmesine olanak tanıyan Artalan Gürültü Gradiyometrisi (AGG) ve Aktif Kaynaklı Gradiyometri (AKG) yöntemleri kullanılmıştır. Yenilikçi bu yöntemlerden elde edilen faz hızı dispersiyon sonuçları konvansiyonel dizilim yöntemleri olan Geleneksel Frekans-Dalgasayısı (CVFK) ve Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan test ve değerlendirmeler sonucunda, 2D PSI-MASW, AGG ve AKG yöntemlerinin veri-işlem aşama ve parametreleri ile uygulamadaki sınırları belirlenerek öneriler oluşturulması amaçlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca yol gösterici olan ve bilgi birikimiyle beni her zaman yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Argun KOCAOĞLU'na içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışma süresince desteğini ve katkısını hiç bir zaman esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi Doç. Dr. Serdar ÖZALAYBEY'e ve olumlu tavrıyla beni her zaman destekleyen, birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum Prof. Dr. Ayşe KAŞLILAR ŞİŞMAN'a çok teşekkür ederim. Tez savunma jürimde yer alarak, kıymetli görüş ve değerlendirmelerini paylaşan jüri üyeleri Doç. Dr. Gonca ÖRGÜLÜ ve Dr. Diğdem ACAREL'e ayrıca teşekkürlerimi sunmak isterim.

Bu çalışmada kullanılan gerçek saha verilerinin bir bölümü, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı (BYİDS), Yer Bilimleri Araştırma Grubu (YBAG) (TÜBİTAK MAM - YBAG) tarafından yürütülerek tamamlanmış olan ve Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından desteklenen bir zemin sınıflaması ve sismik tehlike değerlendirme projesi kapsamında toplanmıştır. Tezde gradiyometrik yöntemlerin konvansiyonel yöntemler ile karşılaştırılması amacıyla kullanılan sismik dizilim veri seti TÜBİTAK MAM – YBAG ve Gaziantep Büyükşehir Belediyesi işbirliği ile hayata geçirilen zemin sınıflaması ve sismik tehlike değerlendirme projesi kapsamında toplanmıştır. Veri toplama konusundaki değerli katkılarından dolayı TÜBİTAK MAM -YBAG'daki proje ekibine ve projelerin hayata geçmesini sağlayan Bursa ve Gaziantep Büyükşehir Belediyeleri'ne teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, öğrencilik hayatım boyunca ve yaşamımın her anında yanımda olan, sevgilerini ve desteklerini hep yanımda hissettiğim aileme sonsuz teşekkürler.

Mart 2024

Aylin KARAASLAN
(Jeofizik Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxvii**
SUMMARY ..... **xxxi**
1. GİRİŞ **1**
2. ARTALAN SİSMİK GÜRÜLTÜ (ASG) VE PASİF SİSMİK İNTERFEROMETRİ **9**
3. KULLANILAN VERİ SETİ, EKİPMAN VE YÖNTEMLER **13**
3.1 Gerçek ASG Veri Seti ve Kullanılan Ekipman 13
3.2 Kullanılan Yöntemler 15
3.2.1 Geleneksel frekans-dalgasayısı (CVFK) yöntemi 15
3.2.2 2-boyutlu pasif sismik interferometri ile yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (2D PSI-MASW) yöntemi 18
3.3 2D PSI-MASW Yöntemi için Veri-işlem Aşamalarının Belirlenmesi 26
3.3.1 Zaman ortamı yığma tekniğinin belirlenmesi testi 26
3.3.2 Frekans-ortamı benzeşim prosedüründe zaman penceresi boyunun seçilmesi testi 27
3.3.3 PW-CCF'lerin uzaysal olarak yığılması testi 30
4. GERÇEK SAHA VERİLERİNİN VE SENTETİK VERİ SETLERİNİN 2D PSI-MASW VE CVFK İLE İŞLENMESİ VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI **35**
4.1 Gerçek Saha Verilerinin 2D PSI-MASW ve CVFK İle Değerlendirilerek Sonuçların Karşılaştırılması 35
4.1.1 H148 ölçüm sahası için elde edilen sonuçlar 36
4.1.2 T131 sahası için elde edilen sonuçlar 46
4.1.3 T051 sahası için elde edilen sonuçlar 53
4.1.4 SK04 sahası için elde edilen sonuçlar 57
4.1.5 DTF üzerine tartışma ve sonuçların değerlendirilmesi 64
4.2 Sentetik Veri Setleri ve Elde Edilen Sonuçlar 70
4.2.1 ASG kaynak yoğunluğu testleri 73
4.2.2 Veri boyu testleri 84
4.2.3 Dizilim geometrisi ve ASG kaynaklarının yönsel dağılımı testleri 88
4.2.4 Çoklu mod testleri 100
4.2.5 Elde Edilen FHD Sonuçlarının Çözünürlük Limitleri ve Rayleigh Enerji İntegrali Açısından Değerlendirilmesi 109

5. ARTALAN GÜRÜLTÜ GRADİYOMETRİSİ VE AKTİF KAYNAKLI GRADİYOMETRİ YÖNTEMLERİ İLE FAZ HIZI DİSPERSİYON BİLGİSİNİN ELDE EDİLMESİ 115
5.1 2B Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) Yöntemi..... 116
5.2 1B Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) Yöntemi..... 123
5.3 Sentetik Veri Setleri ve Elde Edilen Sonuçlar..... 129
5.3.1 Sentetik veri setinin özellikleri..... 129
5.3.2 AGG için veri-işlem aşamalarının ve yöntem sınırlarının belirlenmesi . 132
5.3.2.1 Kaynak yoğunluğu ve pencere boyu testleri..... 132
5.3.2.2 Pencere eleme testleri 139
5.3.2.3 Alıcı aralığı testleri 142
5.3.2.4 Kaynak gücü dağılımı testleri..... 144
5.3.2.5 İki modlu sentetik testi 149
5.3.3 AKG için veri-işlem aşamalarının ve yöntem sınırlarının belirlenmesi . 150
5.3.3.1 Uzaysal türev alma yöntemi testi..... 150
5.3.3.2 Alıcı aralığı testi 155
5.3.3.3 Ofset testi..... 156
5.3.3.4 SGO testleri 158
5.3.3.5 İki modlu sentetik testi 167
5.4 Gerçek Veri Setleri ve Elde Edilen Sonuçlar 172
5.4.1 ASG Alanının Kaynak Olarak Kullanılması..... 176
5.4.2 Saha Aracının Kaynak Olarak Kullanılması 177
5.4.3 Konvansiyonel 2B sismik dizilim ile toplanan ASG verisi için FHD sonuçlarının karşılaştırılması..... 180
5.4.4 Atış verilerinin AKG yöntemi ile değerlendirilmesi..... 184
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 201
KAYNAKLAR..... 221
ÖZGEÇMİŞ 235

KISALTMALAR

AGG : Artalan Gürültü Gradiyometrisi
AKG : Aktif Kaynaklı Gradiyometri
ASG : Artalan Sismik Gürültü
BN : Beş Nokta Kuralı
BYİDS : İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı
cm : Santimetre
CVFK : Geleneksel Frekans-Dalgasayısı
CCF : Çapraz Benzeşim Fonksiyonu
cos : Kosinüs
dB : Desibel
DTF : Dizilim Tepki Fonksiyonu
E : Doğu-Batı Bileşen
FE : Doğu-Batı Kuvvet Vektörü
FHD : Faz Hızı Dispersiyon
FN : Kuzey-Güney Kuvvet Vektörü
f-k : Frekans-Dalga sayısı
Hz : Hertz
İF : İleri Fark
m : Metre
MASW : Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi
MF : Merkezi Fark
N : Kuzey-Güney Bileşen
PSİ : Pasif Sismik İnterferometri
PW-CCF : Faz Ağırlıklandırmalı Çapraz Benzeşim Fonksiyonu
R : Radyal Bileşen
Q : Sismik Kalite ya da Sönümlenme Faktörü
SAT : Sanal Atış Topluluğu
SDG : Sismik Dalga Gradiyometrisi
SGO : Sinyal/Gürültü Oranı
sin : Sinüs

sn	**:** Saniye
T:	**:** Transvers Bileşen
tan	**:** Tanjant
TFA	**:** Zaman-Frekans Analizi
tf-PWS	**:** Zaman-Frekans Ortamı Faz Ağırlıklandırmalı Yığma
URL	**:** Birleşik Kaynak Konum Belirleyici
V_s	**:** S-dalga hızı
Vs30	**:** Zeminin üst 30 metresindeki ortalama S-dalgası hızı
YBAG	**:** Yer Bilimleri Araştırma Grubu
Z	**:** Düşey Bileşen
1B	**:** 1-boyutlu
2B	**:** 2-boyutlu
2D PSI-MASW	**:** Yüzey Dalgalarının 2-boyutlu PSİ Sonrası Çok Kanallı Analizi

SEMBOLLER

$\mathbf{A_x}$, $\mathbf{B_x}$	: 1B gradiyometri katsayıları
$\mathbf{B_r(r)}$, $\mathbf{A_r(r)}$	: 2B gradiyometri katsayıları
$\mathbf{c}$	: Faz hızı
$\mathbf{CCF_i}$	: i. zaman penceresi için benzeşim
$\mathbf{Cov(X, Y)}$	: X ve Y arasındaki kovaryans
$\mathbf{C_{ps}(\tau, f)}$	: Zaman-frekans ortamı faz yığması
$\mathbf{D_{max}}$	: En büyük alıcı açıklığı
$\mathbf{D_{min}}$	: En küçük alıcı aralığı
$\boldsymbol{F}$	: Fourier dönüşümü
$\boldsymbol{\mathcal{F}^{-1}}$	: Ters Fourier dönüşümü
$\mathbf{f_c}$	: Merkez frekansı
$\mathbf{f'(x_0)}$	: f(x) fonksiyonunun x_o noktasındaki türevi
$\mathbf{G(x)}$, $\mathbf{G_r(r)}$	: Geometrik yayılma,
$\mathbf{h}$	: Türev örnekleme aralığı
$\mathbf{H}$	: Hilbert dönüşümü
$\mathbf{k}$	: Dalga sayısı
$\mathbf{k_{max}}$	: En büyük dalga sayısı
$\mathbf{k_{min}}$	: En küçük dalga sayısı
$\mathbf{k^d_{min}}$	: Diyagonal yöndeki dalga sayısı çözünürlük limiti
$\mathbf{k^l_{min}}$	: Dalga sayısı üst çözünürlük limit
$\mathbf{k^u_{min}}$	: Dalga sayısı alt çözünürlük limiti
$\mathbf{k^v_{min}}$	: 1B sanal dizilimin dalga sayısı çözünürlük limiti
$\mathbf{k_x}$	: x yönündeki dalga sayısı
$\mathbf{k_y}$	: y yönündeki dalga sayısı
$\mathbf{n}$	: Zaman penceresi sayısı, alıcı sayısı
$\mathbf{p}$, $\mathbf{p_r}$	: Yatay dalga yavaşlığı
$\mathbf{r}$	: Radyal mesafe
$\mathbf{\Re(\theta)}$	: Radyasyon örüntüsü
$\mathbf{S}$	: S dönüşümü

$\mathbf{S^{-1}}$: Ters S dönüşümü

$\mathbf{S_L(\tau, f)}$: Doğrusal yığmanın S dönüşümü

$\mathbf{t}$: Zaman

$\mathbf{T}$: Periyot

$\mathbf{u}$: Yer değiştirme sinyali

$\mathbf{U}$: Yer değiştirme sinyalinin Hilber dönüşüm

$\mathbf{u_A}$: A alıcısındaki ASG spektrumu

$\mathbf{u_B}$: B alıcısındaki ASG spektrumu

$\mathbf{U_m}$: Merkez alıcıdaki yerdeğiştirme

$\mathbf{u_x}$: Yer değiştirme sinyalinin uzaysal türevi

$\mathbf{u_t}$: Yer değiştirme sinyalinin zamansal türevi

$\mathbf{U_x}$: x yönündeki uzaysal türevin integrallenmiş, dar-bant süzgeçlenmiş ve kısa zaman pencerelerine bölünmüş hali

$\mathbf{U_y}$: y yönündeki uzaysal türevin integrallenmiş, dar-bant süzgeçlenmiş ve kısa zaman pencerelerine bölünmüş hali

$\mathbf{U_r}$: Radyal gradyan bileşeni

$\mathbf{U_1, U_2}$: Özvektörler

$\mathbf{x}$: Alıcı uzaklığı

$\mathbf{x_o}$: Referans alıcı lokasyonu

$\boldsymbol{\lambda_1, \lambda_2}$: Özdeğerler

$\boldsymbol{\emptyset, \theta}$: Kaynak yönü, azimut

$\boldsymbol{\phi}$ **(t)** : Anlık faz

$\boldsymbol{\psi}$ **(t)** : Yer değiştirmenin uzaysal türevine ait anlık faz

$\boldsymbol{\omega}$ **(t)** : Anlık açısal frekans

$\boldsymbol{\omega_n}$: n. merkez açısal frekansı

$\boldsymbol{\alpha}$: Gauss süzgeç fonksiyonunun çözünürlüğü

$\boldsymbol{\delta}$: Sayısal türev hesabındaki hata eşik değeri

$\mathbf{\Delta x, \Delta y}$: x ve y yönündeki alıcı aralığı

$\boldsymbol{\lambda}$: Dalga boyu

$\boldsymbol{\tau}$: Zaman gecikmesi

$\boldsymbol{\pi}$: Pi sayısı

$\mathbf{*}$: Karmaşık eşlenik

$\mathbf{|.|}$: Mutlak değer ya da zarf fonksiyonu

$\mathbf{\{.\}}$: Spektral yumuşatma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Ölçüm sahalarında kullanılan alıcı, alıcı çifti ve vektör sayıları. **25**
Çizelge 4.1 : İki tabakalı basit yer modeli parametreleri. **108**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : (a) Çalışma alanının kuzey-batı Türkiye'deki konumu kırmızı dikdörtgen ile (b) ölçüm sahalarının Bursa ilindeki konumları ise kırmızı daireler ile gösterilmektedir **14**
Şekil 3.2 : (a) H148, (b) T131 (c) SK04 ve (d) T051 ölçüm sahalarında kullanılan dizilim geometrileri. **15**
Şekil 3.3 : CVFK yönteminin uygulanması ve CVFK panelinin elde edilmesi **17**
Şekil 3.4 : Yığılmış final PW-CCF'nin hesaplanmasında kullanılan veri-işlem akışı. **20**
Şekil 3.5 : MASW'de uygulanan faz-kayması dönüşümü şeması..... **22**
Şekil 3.6 : Ölçüm sahalarındaki tüm olası alıcı çiftleri için alıcılar arası vektörlerin (kırmızı noktalar) uzaysal dağılımı..... **24**
Şekil 3.7 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında 001-024 alıcı çifti için doğrusal yığma (solda) ve tf-PWS (sağda) ile elde edilen CCF'ler **26**
Şekil 3.8 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında, doğrusal yığma (solda) ve tf-PWS (sağda) ile, tüm alıcı çiftleri için üretilen CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak elde edilen 2D PSI-MASW panelleri..... **27**
Şekil 3.9 : H148 sahasında 1 ve 24 nolu alıcılar arasında 100 sn, 60 sn, 20 sn ve 10 sn pencere uzunlukları kullanılarak elde edilen PW-CCF'ler **28**
Şekil 3.10 : H148 sahasında tüm alıcı çiftleri için üretilen PW-CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak 100 sn, 60 sn, 20 sn ve 10 sn pencere uzunlukları ile elde edilen 2D PSI-MASW panelleri. **29**
Şekil 3.11 : H148 sahasında 67 m alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinden hesaplanan PW-CCF'ler ve tüm bunların yığılması ile elde edilen uzaysal olarak yığılmış PW-CCF. **32**
Şekil 3.12 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında, tüm alıcı çiftleri için üretilen CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak hesaplanan PW-CCF'ler uzaysal olarak yığılmadan (solda) ve uzaysal olarak yığıldığında (sağda) elde edilen 2D PSI-MASW panelleri **33**
Şekil 4.1 : 4 farklı sahada toplanan ASG kayıtlarının spektrogramları (üstte) ve Fourier genlik spektrumları (altta)..... **36**
Şekil 4.2 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT. **37**

Şekil 4.3 : H148 sahası için, (a) temel mod ve (b) 1. yüksek mod için ASG kaynaklarının 6 Hz merkez frekansındaki yönlü dağılımı. Renkler benzeşime dayalı göreceli hüzme gücünü temsil etmektedir. Hat 1-24 ve Hat 25-48'in yönleri alıcı numaralarıyla (örn. Alıcı 1 ve Alıcı 24 şeklinde) belirtilmektedir. ∅ = 0°, 90°, 180°, 270° işaretlemeleri, dizilim geometrisine göre duraylı faz yönlerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bir standart sapma içindeki tahmini faz hızları grafiklerde oklarla sunulmaktadır. (c) Hat 1–24 ve (d) Hat 25–48'den elde edilen SAT panelleri (6 Hz'de dar bant filtrelenmiş). Hat 1-24'ten (e) yüksek modları ve (f) temel modu eleyen f-k filtrelemesi ile oluşturulan SAT panelleri.. ..... **38**
Şekil 4.4 : H148 sahası için, (a) 3 Hz merkez frekansındaki temel mod ASG kaynaklarının yönlü dağılımı. (b) Hat 1–24 'ten ve (c) Hat 25–48'den elde edilen SAT panelleri. **41**
Şekil 4.5 : H148 ölçüm sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri **42**
Şekil 4.6 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'nin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. **43**
Şekil 4.7 : H148 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak temel mod (üstte), 1. yüksek mod (ortada) ve 2. yüksek mod (altta) için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi **45**
Şekil 4.8 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT. **46**
Şekil 4.9 : T131 ölçüm sahasında, (a) temel ve (b) 1. yüksek modlar için 6 Hz merkez frekansında ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, (c) Hat 1–24 'ten ve (d) Hat 25–72 'den elde edilen SAT panelleri **47**
Şekil 4.10 : T131 sahasında, a) temel mod için 4 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı. b) Hat 1-24'ten ve c) Hat 25-72'den elde edilen SAT panelleri **49**
Şekil 4.11 : T131 ölçüm sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri **50**
Şekil 4.12 : T131 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'nin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. **51**
Şekil 4.13 : T131 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak (a), (b) temel ve (c), (d) 1. yüksek modlar için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. **52**
Şekil 4.14 : T051 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT **54**

Şekil 4.15 : T051 sahasında, (a) 14 Hz ve (b) 3 Hz merkez frekanslarında temel mod için ASG kaynaklarının yönsel dağılımı. (c) 14 Hz ve (d) 3 Hz'de ∅ = 90° hattından elde edilen filtrelenmiş SAT'ler ve ∅ = 90° hattındaki olası tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerin (e) nedensel olmayan ve (f) nedensel kısımlarından hesaplanan PSI-MASW panelleri. **55**
Şekil 4.16 : T051 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'lerin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. **56**
Şekil 4.17 : T051 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak temel mod için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. **57**
Şekil 4.18 : SK04 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT **57**
Şekil 4.19 : SK04 sahasında, Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 12.5 Hz merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve 1. yüksek mod için 12.5 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta)..... **58**
Şekil 4.20 : SK04 sahasında, Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 4 Hz merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve temel mod için 4 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta) **59**
Şekil 4.21 : SK04 sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri. **60**
Şekil 4.22 : SK04 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'lerin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. **61**
Şekil 4.23 : SK04 sahasında, b) Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 15 Hz Merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve 15 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta). **62**
Şekil 4.24 : SK04 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak, (a), (b) temel ve (c), (d) 1. yüksek modlar için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. **63**
Şekil 4.25 : (a), (c), (e) ve (g) sırasıyla, H148, T131, T051 ve SK04 sahalarında kullanılan orijinal 2B dizilimlerin DTF'lerini; (b), (d), (f) ve (h) aynı sıra ile 1B sanal dizilimin (kırmızı) DTF 'si ile 2B dizilimin farklı yönlerdeki DTF 'si arasındaki karşılaştırmayı gösterir **65**
Şekil 4.26 : Sentetik ASG sismogramlarının üretilmesinde kullanılan parametreler ve sismogramların üretilmesinin şematik gösterimi **71**
Şekil 4.27 : Sentetik veri setlerinin üretilmesinde kullanılan, SK04 ölçüm sahasına ait 1B P-dalgası hız, S-dalgası hız, yoğunluk, Qp ve Qs modelleri (üstte), 2B yelpaze şekilli dizilim geometrisi (ortada) ve 2B dizilimden hesaplanan alıcılar arası vektörler (altta) **73**

Şekil 4.28 : 1 nolu alıcı için 300, 600, 1200 ve 7200 kaynak sayısı için üretilen ASG sentetik verileri. **75**
Şekil 4.29 : Yukarıdan aşağıya 300, 600, 1200 ve 7200 kaynaklı sentetikler için uzaysal kaynak dağılımları. **76**
Şekil 4.30 : Yelpaze şekilli dizilim için 2D PSI-MASW analizinde kullanılan 1B sanal dizilim (üstte), 300 kaynaklı ASG sentetiği için uzaysal olarak yığılmış SAT (altta). **77**
Şekil 4.31 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için (a) 4 Hz ve (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, uzaysal olarak yığılmış ve (c) 4 Hz ve (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri **78**
Şekil 4.32 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan, (a) 2D PSI-MASW paneli, (b) CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin karşılaştırması.. ..... **79**
Şekil 4.33 : 600 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması **80**
Şekil 4.34 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması **81**
Şekil 4.35 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için a) 4 Hz b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, uzaysal olarak yığılmış ve c) 4 Hz ve d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. **82**
Şekil 4.36 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması **83**
Şekil 4.37 : Veri boyu testinde kullanılan farklı uzunluktaki sentetik ASG kayıtları. **85**
Şekil 4.38 : 7200 kaynaklı ve yukarıdan aşağıya sırasıyla 300 sn, 900 sn, 1800 sn, 2700 sn ve 3600 sn uzunluğunda ASG sentetikleri için hesaplanan 2D PSI-MASW panelleri (a), (c),(e), (g), (i) ve CVFK panelleri (b), (d), (f), (h), (j). **86**
Şekil 4.39 : 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak (a) 300 sn, (b) 900 sn, (c) 1800 sn, (d) 2700 sn ve (e) 3600 sn veri boyları için işaretlenen FHD eğrileri ve modelden hesaplanan teorik eğrinin karşılaştırıldığı paneller. **87**
Şekil 4.40 : ASG sentetiklerinin üretilmesinde kullanılan artı şeklinde ve 48 alıcıdan oluşan 2B dizilim geometrisi (üstte) ve tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT **88**
Şekil 4.41 : Artı şeklinde dizilim için (a) 4 Hz (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal olarak yığılarak ve (c) 4 Hz ve (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, (e), (f) 1-24 ve (g), (h) 25-48 alıcı hatlarından oluşturularak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. **89**

Şekil 4.42 : Simetrik artı ve yelpaze şeklinde 2B dizilim geometrileri için hesaplanan 2D PSI-MASW (üstteki iki sıra, solda) ve CVFK (üstteki iki sıra, sağda) panelleri, panellerden işaretlenen FHD eğrileri ve bu eğrilerin teorik eğri ile karşılaştırılması (altta). **90**
Şekil 4.43 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıkları için seçilen ASG kaynaklarının yelpaze (a) ve artı dizilimle (b) birlikte sunulan konumları. **92**
Şekil 4.44 : ASG kaynakları için, yelpaze dizilim ile CVFK'den hesaplanan (a) 4 Hz, (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal yığma ile elde edilen ve (c) 4 Hz, (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, yelpaze dizilimin 0°-180° doğrultusu boyunca uzanan hat üzerindeki alıcı çiftlerinden oluşturan ve (e) 4 Hz, (f) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. **93**
Şekil 4.45 : 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için, artı dizilim ile CVFK'den hesaplanan (a) 4 Hz, (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal yığma ile elde edilen ve (c) 4 Hz, (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, (e), (f) 1-24 ve (g), (h) 25-48 alıcı hatlarından oluşturularak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri **94**
Şekil 4.46 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ve artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW (solda) ve CVFK (sağda) panelleri ve işaretlenen FHD eğrileri **96**
Şekil 4.47 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ve artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW ve CVFK panellerinden işaretlenen FHD eğrilerinin teorik FHD eğrisi ile karşılaştırması. **97**
Şekil 4.48 : Yelpaze (b), (c) ve artı (e), (f) dizilimler kullanılarak hesaplanan yığılmış CCF'lerin aynı mesafeler için hesaplanan Green fonksiyon sinyalleri (a), (d) ile karşılaştırması **99**
Şekil 4.49 : SK04 modeli kullanılarak, 7200 (üstte) ve 300 (ortada) ASG kaynağı için üretilen iki modlu sentetik veri setlerinden 2D PSI-MASW ve CVFK kullanılarak elde edilen paneller ve işaretlenen FHD eğrileri (altta). **101**
Şekil 4.50 : T131 ölçüm sahası için oluşturularak çok modlu sentetik verilerin üretilmesinde kullanılan 1B P-dalgası hız, S-dalgası hız, yoğunluk modelleri (üstte), Qp ve Qs modelleri (ortada) ve yelpaze (sol altta) ve antisimetrik artı (sağ altta) geometrili dizilimler için tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT'ler **103**
Şekil 4.51 : Yelpaze dizilim (a), (b), (e) ve artı dizilim (c), (d), (f) geometrileri için üretilen 3 modlu ASG sentetiklerinden 2D PSI-MASW (a), (c) ve CVFK (b), (d) kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen temel, 1. yüksek, 2. yüksek mod ve teorik FHD eğrilerinin karşılaştırması (e), (f)… **104**
Şekil 4.52 : Sentetik ASG verisinin üretilmesinde kullanılan 2B yelpaze dizilimin DTF'sini (üstte); 1B sanal dizilimin (kırmızı) DTF 'si ile 2B dizilimin farklı yönlerdeki DTF 'si arasındaki karşılaştırmayı (altta) gösterir **107**
Şekil 4.53 : İki tabakalı basit yer modeli ile yelpaze dizilim için tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT'ler. **108**

Şekil 4.54 : Yelpaze dizilim geometrisi ile iki tabakalı basit yer modeli için üretilen 3 modlu ASG sentetiklerinden 2D PSI-MASW (sol üstte) ve CVFK (sağ üstte) kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod eğrilerinin ve teorik FHD eğrilerinin karşılaştırması (altta) **109**
Şekil 4.55 : SK04 hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta) **111**
Şekil 4.56 : T131 hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta) **113**
Şekil 4.57 : İki tabakalı, basit hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta). **114**
Şekil 5.1 : AGG yönteminde kullanılan alıcı konfigürasyonu..... **119**
Şekil 5.2 : AGG yönteminde uygulanan veri-işlem akışı. **122**
Şekil 5.3 : 7 Hz merkez frekansı için AKG uygulaması ile örnek analiz şeması (a) gradiyometrik alıcı grubundaki merkez alıcıya ait sinyalin zamansal türevi, (b) zamana bağlı B katsayısı, (c) yerdeğiştirme sinyalinin Hilbert dönüşümüne ait zarf, (d) zamanın fonksiyonu olarak faz hızı, (e) yerdeğiştirme sinyalinin uzaysal türevine ait Hilbert dönüşümünün zarfı, (f) 7 Hz için elde edilen faz hızı değeri (beyaz dikdörtgen) ve teorik faz hızı eğrisi (siyah eğri) **128**
Şekil 5.4 : ASG sentetiklerinin üretilmesinde kullanılan artı şeklindeki gradiyometrik dizilim geometrisi **130**
Şekil 5.5 : Q etkisi eklenmemiş (üstte) ve eklenmiş (ortada) sentetik atış verisi sismogramları. Q etkisi eklenmiş sentetik atış verisinde 30m, 60m, 90m ve 120m ofsetlerindeki sismogramlar (altta) **131**
Şekil 5.6 : Q etkisi eklenmemiş (solda) ve eklenmiş (sağda) sentetik atış verilerinde 30m, 60m, 90m ve 120m'deki sismogramların genlik spektrumları..... **132**
Şekil 5.7 : a) 7200, b) 1200, c) 600 ve d) 300 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan AGG panelleri..... **133**
Şekil 5.8 : Kullanılan 2B gradiyometik dizilim ile (a) tekil kaynak (0°) ve (b) 0° ve 45° azimutlarındaki iki kaynak için şematik gösterimler verilmektedir. Alıcılara (c), (f) 0° azimutundan ulaşan tekil sinyaller, (d), (g) 0° ve 45° azimutlarından ulaşan ve zamanda örtüşen sinyaller ve (e), (h) 0° ve 45° azimutlarından ulaşan ancak zamanda örtüşmeyen sinyaller için AGG kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve kaynak azimutları **136**
Şekil 5.9 : Üst iki sırada 600 kaynaklı sentetik için (a) 12 sn, (b) 6 sn, (c) 3 sn ve (d) 1 sn pencere boyları ile, alt iki sırada 300 kaynaklı sentetik için (e) 12 sn, (f) 6 sn, (g) 3 sn ve (h) 1 sn pencere boyları ile hesaplanan AGG panelleri. **138**
Şekil 5.10 : 1200 kaynaklı (solda) ve 300 kaynaklı (sağda) sentetik veri setlerinin analizi esnasında doğrusallık ve benzeşime göre gerçekleştirilen pencere eleme işlemleri sonrasında kalan pencere sayıları. **141**

Şekil 5.11 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için a) pencere elemesi olmadan, b) yalnızca doğrusallığa, c) yalnızca benzeşime ve d) doğrusallık ve benzeşime göre pencere elemesi ile hesaplanan FHD panelleri **141**
Şekil 5.12 : 600 kaynaklı ASG sentetiği için (a) pencere elemesi olmadan, (b) doğrusallık ve benzeşime göre pencere elemesi ile hesaplanan FHD panelleri. Elemede kullanılan ortalama benzeşim değeri 0.73'tür. **142**
Şekil 5.13 : 300 kaynaklı sentetik veri seti için (a) 1m, (b) 2m, (c) 3m ve (d) 5m alıcı aralıkları ile hesaplanan FHD panelleri..... **143**
Şekil 5.14 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için, kaynak güç dağılımı manipüle edilen ASG kaynak dağılımları. Mavi daireler genliği orijinal haliyle korunan, kırmızı daireler ise genliği 10 ile çarpılan ASG kaynaklarını gösterir. **146**
Şekil 5.15 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için 1 nolu alıcıya ait, kaynak güçleri manipüle edilen (siyah) ve orijinal haliyle korunan (kırmızı) 200 sn uzunluğundaki sinyaller **146**
Şekil 5.16 : Kaynak gücü üretildiği şekilde korunan (rastgele dağılmış kaynak gücü) (solda) ve kaynak gücü dağılımı manipüle edilen (sağda) 1200 kaynaklı sentetik veri setleri için AGG ile hesaplanan FHD panelleri **147**
Şekil 5.17 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için kaynak güç dağılımı manipüle edilen ASG kaynak dağılımları. **148**
Şekil 5.18 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için 1 nolu alıcıya ait, kaynak güçleri manipüle edilen (üstte) ve orijinal haliyle korunan (altta) 60 sn uzunluğundaki sinyaller.. ..... **148**
Şekil 5.19 : 7200 ASG kaynağı için kaynak gücü orijinal haliyle korunan (uzaysal olarak rastgele ve dengeli kaynak gücü) (solda) ve kaynak gücü dağılımı manipüle edilen (sağda) sentetik veri setlerinden AGG ile hesaplanan FHD panelleri. **149**
Şekil 5.20 : İki modlu sentetik veri seti için CVFK (solda) AGG (sağda) yöntemleri kullanılarak hesaplanan FHD panelleri. **150**
Şekil 5.21 : AKG yöntemi ile, hesaplanan tek modlu sentetik atış verisinden, 30 m ofsetindeki Δx=1m aralıklı alıcı grupları kullanılarak İF (a), MF (b) ve (c) BN ile hesaplanan FHD panelleri. **154**
Şekil 5.22 : AKG yöntemi ile tek modlu sentetik atış verisi için, 30 m ofsetinde (a) Δx=1m, (b) Δx=2m, (c) Δx=3m ve (d) Δx=4m aralıklı alıcı grupları kullanılarak hesaplanan FHD panelleri. **155**
Şekil 5.23 : AKG yöntemi ile tek modlu sentetik atış verisi için, (a)10m, (b) 30m (c) 50m, (d) 70m, (e) 90m ve (f) 110m kaynak-alıcı grubu ofseti için hesaplanan FHD panelleri **157**
Şekil 5.24 : H148 ölçüm noktasında merkez atışından 30 m uzaklıktaki bir alıcıda kaydedilen aktif atış sinyalleri (siyah) ve artalan sismik gürültüyü (kırmızı) içeren kayıtlar (solda) ve bu kayıtların genlik spektrumları (sağda) **158**
Şekil 5.25 : Sentetik atış verisine SG0= 5 dB (sol üst), SG0= 10 dB (sağ üst), SG0= 20 dB (sol alt) ve SG0= 30 dB (sağ alt) oranlarında eklenen beyaz gürültü ve gradiyometrik alıcı brubundaki ilk alıcının sismogramı..... **159**
Şekil 5.26 : (a) SG0= 5dB, (b) SG0= 10dB, (c) SGO= 20dB ve (d) SGO= 30dB oranlarında beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verilerinden AKG yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri. **160**

Şekil 5.27 : SG0= 10dB beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verisinin (a) 30m, (b) 50m, (c) 80m ve (d) 110m ofsetlerinde AKG yöntemi ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD panelleri **160**
Şekil 5.28 : (a) 30m, (b) 50m, (c) 80m ve (d) 110 m ofsetlerindeki ham sentetik atış sismogramları (siyah) ve SGO= 10 dB düzeyinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sismogramlar (kırmızı) **162**
Şekil 5.29 : (a) SG0= 5dB, (b) SG0= 10dB, (c) SGO= 20dB ve (d) SGO= 30dB oranlarında beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verilerinden MASW yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri. **163**
Şekil 5.30 : 30 m ofset ve SGO=12 dB için; gerçek ASG verisi (sol üstte), bu verinin genlik spektrumu (sağ üstte), sentetik atış verisi ve gerçek ASG verilerinin sismogramları (sol altta) ve genlik spektrumları (sağ altta) **164**
Şekil 5.31 : 30 m ofsetinde SGO=12, 5, 7 ve 3 dB için gerçek ASG (gürültü) ve sentetik atış verileri (sinyal). **165**
Şekil 5.32 : 30 m ofsetinde SGO=12, 5, 7 ve 3 dB için gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden AKG ile hesaplanan FHD panelleri **166**
Şekil 5.33 : 30, 80 ve 110 m ofsetlerinde SGO= 3 dB için gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden AKG ile hesaplanan FHD panelleri. **167**
Şekil 5.34 : SK04 hız modeli için üretilen iki modlu sentetik atış verisinden, AKG yöntemi ile 30m (sol üst), 50m (sağ üst), 80m (sol alt) ve 110m (sağ alt) kaynak-alıcı ofsetlerinde hesaplanan FHD panelleri **168**
Şekil 5.35 : İki modlu sentetik atış verisinden AKG (solda) ve MASW (sağda) yöntemleri ile hesaplanan FHD panelleri. **170**
Şekil 5.36 : İki tabakalı, basit hız modeli için oluşturulan 3 modlu sentetik atış verisi (sol üstte), AKG analizinde kullanılan alıcı grubuna ait sismogramların genlik spektrumları (sağ üstte) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD paneli (altta). **171**
Şekil 5.37 : G168 kodlu sahanın konumu (sol üstte), konvansiyonel sismik dizilim ölçümlerinde kullanılan 2B dizilim geometrisi (sağ üstte), gradiyometrik verilerin toplanması için kullanılan 2B dizilim geometrisinin sahadaki yerleşimi (sol altta) ve gradiyometrik dizilim geometrisi (sağ altta). .. **173**
Şekil 5.38 : Jeofon setinin Huddle test için sahadaki yerleşimi. **174**
Şekil 5.39 : Yukarıdan aşağıya sırasıyla, Huddle test esnasında toplanan ASG kayıtlarından alınan 25 sn'lik sismogramlar, tüm alıcılara ait kayıtlardan seçilen, üst üste çizdirilmiş 5 sn'lik sismogramlar, peş peşe üç atışın gözlenebildiği 20 sn'lik atış kaydı ve tüm alıcılar için üst üste çizdirilmiş 2sn uzunluğundaki atış kaydı sismogramları. **175**
Şekil 5.40 : AGG analizinde kullanılan üçlü alıcı grubundaki 540 sn'lik örnek ASG kayıtları (üstte), bu kayıtlardan hesaplanan genlik spektrumları (altta). **176**
Şekil 5.41 : AGG yöntemi ile dört farklı alıcı üçlüsündenden hesaplanan FHD panelleri. **177**
Şekil 5.42 : AGG analizinde kullanılan alıcılardaki 60 sn'lik kayıtlar (üstte), bu kayıtlardan hesaplanan genlik spektrumları (ortada) ve merkez alıcı için yapılan zaman-frekans analizinden elde edilen panel (altta) **178**
Şekil 5.43 : AGG analizinde, saha aracının ürettiği gürültü kaydının tümünün (solda) ve 25-55 sn aralığında seçilen bölümünün (sağda) kullanılması ile hesaplanan FHD panelleri. **179**
Şekil 5.44 : Saha aracının kaynak olarak kullanılması durumunda AGG yöntemi ile elde edilen sinyal yönlerinin (kaynak azimutlarının) histogramı. **180**

Şekil 5.45 : Üstte, 2B konvansiyonel dizilimin merkezinde, 5 m yarıçap içindeki alıcı geometrisi verilmektedir. AGG yönteminde kullanılabilecek alıcı üçlüleri farklı renklerde oklarla işaretlenmiştir. Altta, gradiyometrik alıcı üçlülerinden birindeki ASG kayıtlarının AGG ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD paneli sunulmaktadır. **181**
Şekil 5.46 : G148 ölçüm sahası için konvansiyonel 2B dizilim kayıtlarından hesaplanan (a) 2D PSI-MASW paneli, (b) CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin ve AGG panelinden işaretlenen temel mod FHD eğrisinin karşılaştırılması **183**
Şekil 5.47 : Gradiyometrik dizilim ve yapılan atışların sahadaki konumunu gösteren şema. **184**
Şekil 5.48 : 35 m ofsetinde yapılan 104 nolu atışın, gradiyometrik dizilimi oluşturan alıcılardaki atış kayıtları (üstte), 1-12 nolu alıcılar tarafından kaydedilen (ortada) aktif atış kayıtları ve ortadaki atışın 2 sn'lik kaydının genlik spektrumu (altta) **185**
Şekil 5.49 : 1 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 50m, 45m, 40m, 35 m, 30m, 25m ve 20m ofsetindeki vuruşların 1 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). **187**
Şekil 5.50 : 12 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 12 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda) **190**
Şekil 5.51 : 13 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 13 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda) **191**
Şekil 5.52 : 24 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 24 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve artalan gürültü sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). **192**
Şekil 5.53 : 1 nolu (üstte) ve 13 nolu (altta) alıcılar tarafında 50m ofsetindeki patlatmaların sırasıyla 1 ve 13 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda) **193**
Şekil 5.54 : AKG yöntemi kullanılarak, 1 nolu kanal yönünde, 35 m ofsetinde gerçekleştirilen atışın orijinal alıcı aralığı Δx=1m korunarak ve alıcı aralıklarının küçük miktarda ($\pm$10 cm ve $\pm$20 cm) saptırılması ile hesaplanan FHD panelleri. **195**
Şekil 5.55 : 1 nolu alıcı tarafından 35 m ofsetinde yapılan atış için 5'li alıcı grubundaki tüm alıcı aralıklarının sahada uygulanması hedeflenen Δx=1 m'den $\pm$ 10 cm ve $\pm$ 20 cm kadar saptırılması sonucunda FHD panelinde oluşan faz hızı kaymalarını gösterir grafik. **196**
Şekil 5.56 : G168 sahasında (a), (b) merkez atışından, (c) 2 nolu atıştan ve (d) 3 nolu atıştan MASW ile hesaplanan FHD panelleri **197**
Şekil 5.57 : Konvansiyonel sismik dizilimin merkezinden gerçekleştirilen atış için MASW yöntemi ile hesaplanan FHD paneli. **198**

ZEMİN KARAKTERİZASYONU AMAÇLI RAYLEIGH DALGASI FAZ HIZI DİSPERSİYON ANALİZİNDE AKTİF VE PASİF KAYNAKLI SİSMİK DİZİLİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

ÖZET

Tez çalışmasının temel odak noktası, sığ zemin karakterizasyonu amaçlı Rayleigh dalgası faz hızı dispersiyon (FHD) bilgisinin belirlenmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan konvansiyonel yöntemlerle, günümüze kadar sınırlı uygulamaya sahip olan ancak önemli potansiyel taşıyan yenilikçi yöntemlerin karşılaştırılmasıdır. Bu bağlamda, tezin ilk bölümünde Pasif Sismik İnterferometri (PSİ) prosedürü kullanılarak 2-boyutlu Pasif Sismik İnterferometri Sonrası Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (2D PSI-MASW) yöntemi adı verilen bir veri toplama ve işleme şeması geliştirilmiştir. Bu bölümde, 2D PSI-MASW yöntemi ile elde edilen FHD özellikleri, Geleneksel Frekans-Dalgasayısı (CVFK) yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının temel hedeflerinden biri, yerel ölçekli FHD analizi çalışmaları için önerilen 2D PSI-MASW prosedürünün temel veri-işlem adımları ve parametrelerinin belirlenmesi ve yerel ölçekli PSİ uygulamalarında 2B sismik dizilimlerin izotropik olmayan ASG kaynak dağılımının FHD belirleme üzerindeki sapma etkisini azaltma konusundaki performansının incelenmesidir. Bu amaçla, Türkiye'nin Bursa ilinde yer alan dört farklı sahada konumlandırılan yerel ölçekli 2B sismik dizilimler aracılığıyla toplanan sismik dizilim verileri ile tez kapsamında üretilen sentetik veri setleri kullanılmaktadır. İzlenen veri işleme şemasında, öncelikle toplanan ASG verilerine Pasif Sismik İnterferometri (PSİ) ilkeleri uygulanarak çok yönlü Çapraz Benzeşim Fonksiyonu (CCF) sanal atış toplulukları oluşturulmaktadır. Ardından, FHD'nin belirlenmesi için elde edilen bu sanal atış topluluklarına Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) yöntemine özgü faz-kayması dönüşümü uygulanmaktadır. 2D PSI-MASW yöntemi olarak adlandırılan bu veri toplama ve işleme şeması, tezin özgün çıktısıdır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar, 2D PSI-MASW yönteminde kullanılan 2B sismik dizilimlerin sunduğu çok yönlü CCF'lerin FHD belirleme süreçlerindeki sapmaları etkili bir şekilde azaltabildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, özellikle ASG kaynaklarının durağan faz yönlerinde yoğunlaşmadığı durumlarda, 1B tekil alıcı hatlarından yetersiz veya eksik FHD bilgileri elde edilebilmektedir. Ayrıca, 1B tekil alıcı hatlarından elde edilen FHD bilgilerinin birbirini tamamladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, PSİ prosedüründe güvenilir ve eksiksiz FHD görüntüleme için uzaysal olarak iyi dağılmış 2B dizilim konfigürasyonlarının kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, sahada pratik olarak kullanılabilecek sınırlı alıcı sayısı da göz önünde bulundurularak, ideal uzaysal örneklemenin sağlanması için, tez kapsamında incelenen ve geniş bir yönsel ve mesafesel çeşitlilik sağlayan yelpaze şekilli 2B dizilimlerin kullanılması özellikle tavsiye edilmektedir. 2D PSI-MASW yöntemi uygulamasında yelpaze şekilli alıcı

diziliminin kullanılması ile, ASG dalga alanının yönlü kaynaklardan oluşması durumunda dahi, FHD bilgisi çok düşük (%1) hatalar ile elde edilebilmektedir.

Çalışmada aynı zamanda, gerçek saha verileri ve üretilen sentetik veri setleri üzerinden 2D PSI-MASW yönteminin uygulama sınırlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, yöntemin veri işleme aşamaları ve parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin FHD performansları, veri setinin uzunluğu, ASG dalga alanındaki kaynakların yoğunluğu ve yönsel dağılımı, değişken yeraltı hız yapısı, dalga alanında çoklu modların varlığı, kullanılan sismik dizilim geometrisinin etkileri üzerinden karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, her iki yöntem ile aynı koşullar altında ve aynı sismik dizilim konfigürasyonları kullanılarak hesaplanan FHD panelleri çözünürlük, doğruluk ve mod elde etme performansları açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, 2D PSI-MASW yöntemi kullanılarak geniş bir frekans bandında CVFK ile eşdeğer temel mod Rayleigh dalgası FHD bilgisi sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, özellikle belirgin bir antisimetriye sahip 2B dizilim konfigürasyonları kullanıldığında, 2D PSI-MASW yönteminin CVFK yönteminden daha iyi mod çözünürlüğü ve ayrımı sunabildiği görülmektedir.

Ayrıca, 2D PSI-MASW yöntemi, CVFK analizi sırasında gözlenemeyen ancak aynı aktif atış verisine benzer bir SAT oluşturabilme özelliği ile dikkat çekmektedir. Bu özellik sayesinde, yöntemin en belirgin avantajlarından biri, SAT'lerdeki Rayleigh dalga treninin doğrudan gözlenebilmesidir. 2D PSI-MASW veri-işlem şemasının uygulanması için yazılan kodlar, CVFK analizine göre çok daha hızlı FHD sonuçları üretmektedir. Bu avantaj, hesaplanan FHD panellerinin saha ölçümleri sırasında hızlıca incelenebilmesini mümkün kılmakta, bu da ilgili ölçüm noktası için yeterli kayıt uzunluğu gibi önemli parametrelere kayıt esnasında, yerinde karar verilebilmesini sağlamaktadır. Tüm bu avantajlarıyla birlikte, 2D PSI-MASW yöntemi özellikle 2B dizilimlerin sağladığı geniş uzaysal örnekleme sayesinde, sığ ölçekli mühendislik sismolojisi çalışmalarında güvenilir Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde etmek açısından konvansiyonel yöntemlere iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntemin, sismik veri-işleme süreçlerindeki hız ve doğruluk avantajlarıyla birlikte kullanılmasının, yerel ölçekli FHD analizlerine önemli katkı sunacağı değerlendirilmektedir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, 1-2 m gibi çok küçük alıcı aralıklarına sahip az sayıda alıcıdan oluşan sismik dizilim konfigürasyonları ile toplanan atış ve ASG verilerinin uzaysal gradyanlara dayalı olarak analiz edilmesi esasına dayanan Aktif Kaynaklı Gradiyometri (AKG) ve Artalan Gürültü Gradiyometrisi (AGG) yöntemleri kullanılarak Rayleigh dalgası FHD görüntülerinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Elde edilen FHD sonuçları, konvansiyonel yöntemler olan CVFK ve MASW sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu karşılaştırmalar, her iki yöntemin değişen koşullar altında nasıl davrandığını anlamak için yapılmakta, elde edilen sonuçlar, AKG ve AGG yöntemlerinin FHD belirleme yeteneklerini ve kullanıldıkları koşullardaki performanslarını açıklığa kavuşturacak şekilde detaylı olarak incelenmektedir.

Tez çalışması kapsamında, literatürdeki uygulamaları sınırlı olan AGG ve AKG yöntemlerinin FHD belirleme performanslarını etkileyen veri işleme adımları, parametreler ve yöntemlerin uygulama sınırlarını belirlemek amacıyla çeşitli testler gerçekleştirilmektedir. AGG ve AKG yöntemlerinin FHD belirleme performansları, değişken ASG kaynak yoğunluğu ve dağılımı, pencere boyu, alıcı aralığı, uzaysal türev

alma yöntemi, Sinyal/Gürültü Oranı (SGO), mod içeriği gibi koşullara bağlı olarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeler, AGG ve AKG yöntemlerinin uygulama sınırlarını belirlemeye yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

Sentetik veri setlerinden ve gerçek saha verilerinden elde edilen bulgular, gradiyometrik yöntemlerin FHD belirleme performanslarının, SGO'nun azalmasına neden olan gürültü kaynakları ve saha koşullarındaki potansiyel alıcı-zemin kuplajı ve/veya alıcı konumlandırma problemlerinden daha olumsuz bir şekilde etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca, gradiyometrik yöntemlerin, yüksek modlara ait faz hızlarını belirleme konusunda konvansiyonel dizilim yöntemleri ve 2D PSI-MASW kadar başarılı olmadığı görülmüştür. Bunun temel nedeni, AGG ve AKG yöntemlerinin çalışma prensipleri gereği, zaman ortamında hesaplanan uzaysal türevler üzerinden FHD belirlenmesidir. Dolayısıyla, yeraltı hız modeline de bağlı olarak, farklı modlara ait faz hızlarının ilgilenilen frekans bandında birbirine çok yakın olması ve dolayısıyla sinyallerinin zamanda örtüşmesi durumunda, yöntemlerin yüksek modlara ait faz hızlarını ayırma konusunda başarılı olamadığı durumlar ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, uzun alıcı açıklığına sahip (> 100 m) çok kanallı (en az 24 kanal) alıcı dizilimleri ile uygulanan konvansiyonel dizilim yöntemleri ve 2D PSI-MASW, birden çok moda ait FHD bilgisinin elde edilmesi konusunda daha iyi bir performans sergilemektedir.

Buna karşılık, gradiyometrik yöntem uygulamalarında FHD bilgisi, çok küçük alıcı aralıklarına (1-2 m) ve sınırlı sayıda (3-5) alıcıya sahip yoğun sismik dizilim konfigürasyonlarıyla elde edilebilmektedir. Bu yönüyle gradiyometrik yöntemler, sahada pratik ve hızlı bir şekilde uygulanabilen basit dizilim konfigürasyonları sayesinde, özellikle yoğun şehir alanlarında veya geniş açılımlı alıcı dizilimlerinin uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. AGG ve AKG yöntemlerinin FHD performansları, SGO'nun özellikle kuplaj problemleri veya diğer gürültü kaynakları nedeniyle düşmesinden etkilenmekle birlikte, yöntemlerin zeminin ilk 30 metresindeki ortalama S-dalgası hızını (Vs30) belirleme ve buna bağlı olarak zemin sınıfını tespit etme amacıyla yapılan sığ zemin çalışmalarında kullanılmaları, pratik ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır.

COMPARATIVE EVALUATION OF ACTIVE AND PASSIVE SEISMIC ARRAY METHODS IN RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION ANALYSIS FOR SITE CHARACTERIZATION

SUMMARY

The primary focus of the thesis is to compare conventional methods, widely utilized in the literature for determining Rayleigh wave phase velocity dispersion (PVD) information, with innovative methods that have seen limited application but hold significant potential. In this context, the first section of the thesis introduces a data acquisition and processing scheme named 2D Passive Seismic Interferometry (PSI) followed by Multi-Channel Analysis of Surface Waves (2D PSI-MASW). The PVD characteristics obtained through the 2D PSI-MASW method are evaluated by comparing them with the results obtained from the Conventional Frequency-Wavenumber (CVFK) method.

The main objectives of the thesis are to determine the fundamental data processing steps and parameters for the 2D PSI-MASW procedure and to investigate its performance in reducing the biasing effect of the non-isotropic Ambient Seismic Noise (ASN) source distribution on the determination of PVD in local-scale PSI applications. To achieve this goal, seismic array data collected through local-scale 2D seismic arrays positioned in four different sites in the Bursa province of Turkey, along with synthetic datasets generated within the scope of the thesis, are utilized. In the adopted data processing scheme, the collected ASN data undergoes the application of PSI principles to create multi-directional virtual shot gathers (VSGs) from Cross-Coherency Functions (CCFs). Subsequently, these VSGs are subjected to the phase-shift transformation specific to the MASW method for determining PVD information. Termed as the 2D PSI-MASW method, this data acquisition and processing scheme represents a distinctive contribution of the thesis.

The results obtained within the scope of the thesis demonstrate that the multi-directional CCFs provided by the 2D PSI-MASW method effectively reduce deviations in the PVD determination processes. However, in situations where ASN sources are not concentrated around stationary phase directions, insufficient or incomplete PVD information can be obtained from 1D individual receiver lines. Additionally, it has been determined that the PVD information obtained from individual 1D receiver lines complements each other. These findings underscore the importance of utilizing spatially well-distributed 2D array configurations for reliable and comprehensive PVD imaging in PSI procedures. In this context, considering the limited number of receivers that can be practically used in the field, it is particularly recommended to employ fan-shaped 2D arrays examined within the scope of the thesis to ensure ideal spatial sampling. When employing the 2D PSI-MASW method utilizing a fan-shaped receiver array, even in the presence of directional sources constituting the ASN wavefield, PVD information is achievable with exceptionally minimal errors, as low as 1%.

The study also aims to determine the application limits of the 2D PSI-MASW method using real field data and synthetic datasets generated. Various tests were conducted to determine the data processing steps and parameters of the method. The PVD performances of the 2D PSI-MASW and the CVFK methods were comparatively evaluated based on factors such as the length of the dataset, density and directional distribution of sources in the ASN wave field, subsurface velocity structure, presence of multiple modes in the wave field, and the effects of the seismic array geometry used. In this context, PVD panels calculated under the same conditions and using the same seismic array configurations with both methods were extensively examined in terms of resolution, accuracy, and mode retrieval performance. The results indicate that the 2D PSI-MASW method can provide fundamental mode Rayleigh wave PVD information equivalent to CVFK across a broad frequency range. Additionally, it is observed that the 2D PSI-MASW method can offer better mode resolution and separation than the CVFK method, especially when using 2D array configurations with pronounced antisymmetry.

Moreover, the 2D PSI-MASW method stands out for its capability to generate a VSG resembling the active shot data, which remains unobservable during CVFK analysis. This feature allows one of the method's most significant advantages, the direct observation of Rayleigh wave trains in SATs. The codes written for the implementation of the 2D PSI-MASW data processing scheme produce PVD results much faster compared to CVFK analysis. This advantage enables the rapid examination of obtained PVD panels during field measurements, allowing for the on-site determination of crucial parameters such as sufficient recording length. With all these advantages, the 2D PSI-MASW method is considered a good alternative to conventional methods in shallow engineering scale seismology studies, especially due to the extensive spatial sampling provided by 2D array configurations. It is believed that this method can significantly contribute to local-scale PVD analyses by being employed more efficiently in seismic data processing, benefiting from its advantages in terms of speed and accuracy.

In the second part of the thesis, the goal is to process active shot gather and ASN data collected through seismic array configurations with a limited number of receivers and very small receiver intervals (1-2 m). This processing aims to obtain Rayleigh wave PVD images using the Active Source Gradiometry (ASG) and Ambient Noise Gradiometry (ANG) methods, which rely on the analysis of spatial gradients. The obtained PVD results are evaluated comparatively with the results of conventional methods such as CVFK and MASW. These comparisons are conducted to understand the behavior of both methods under diverse conditions and the results obtained are thoroughly examined to clarify the PVD performances of the ASG and ANG methods in their respective application scenarios.

In the scope of the thesis, various tests are conducted to determine the data processing steps, parameters, and methodological constraints affecting the PVD determination performances of the ASG and ANG methods, which have limited applications in the literature. The PVD performances of ASG and ANG methods are evaluated based on conditions such as variable ASN source density and distribution, analysis window length, receiver spacing, spatial derivattion method, Signal-to-Noise Ratio (SNR), mode content, etc. These assessments provide important information for determining the application limits of the ASG and ANG methods.

Findings obtained from synthetic datasets and real field data indicate that the PVD determination performances of gradiometric methods are more adversely affected by noise sources causing a decrease in SNR and potential receiver-ground coupling and/or receiver positioning problems in the field than conventional seismic array methods.

Additionally, it has been observed that gradiometric methods are not as successful as conventional array methods and 2D PSI-MASW in determining phase velocities associated with higher modes. The main reason for this is that, due to the operational principles of the AGG and AKG methods, FHD is determined via spatial derivatives calculated in the time domain. Therefore, depending on the subsurface velocity structure, situations arise where phase velocities of different modes are very close to each other within the relevant frequency band, resulting in overlapping signals in time. As a result, the methods fail to separate phase velocities associated with higher modes. On the other hand, conventional array methods and 2D PSI-MASW applied using multi-channel (at least 24 channels) receiver arrays with long apertures (>100 m) demonstrate better performance in obtaining FHD information related to multiple modes.

In the context of gradiometric method applications, PVD information can be acquired by employing densely arranged seismic array configurations with a constrained number of receivers (3 to 5), featuring small receiver intervals (u1-2 m). In this aspect, gradiometric methods offer a significant advantage by being practically and rapidly applicable in the field with simple array configurations, especially in urban areas or situations where long-aperture receiver arrays are not feasible. Despite the impact of noise sources or receiver-ground coupling issues causing a reduction in the SNR, the PVD performances of the ASG and ANG methods, especially in local-scale site characterization studies aiming to determine the average S-wave velocity in the top 30 meters of the ground (Vs30) for subsequent site classification, offer a practical and cost-effective alternative.

1. GİRİŞ

Zemine ait S dalgası hız (V_s) yapısının elde edilmesi, mühendislik sismolojisi çalışmalarında kritik bir rol oynamaktadır. V_s yapısının belirlenmesi ile zeminin sertliği, kesme dayanımı ve dinamik davranışı hakkında bilgi edinilebilmekte ve bu bilgiler, saha karakterizasyonu, jeoteknik araştırmalar ve çeşitli mühendislik projeleri için temel oluşturmaktadır. Literatürde V_s yapısının belirlenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan konvansiyonel yüzey dalgası analiz yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler, zemin içinde yayınan yüzey dalgalarının frekans-faz hızı dağılımını (dispersiyon) kullanarak V_s 'in derinlikle değişimini ortaya çıkarmaktadır.

Tez kapsamında, Rayleigh dalgası faz hızı dispersiyon (FHD) bilgisinin belirlenmesi konusunda literatürde yaygın şekilde kullanılan konvansiyonel yöntemler ile mühendislik sismolojisi çalışmalarındaki uygulamaları günümüze kadar kısıtlı kalmış ancak önemli potansiyel taşıdığı değerlendirilen yenilikçi yöntemlerin kıyaslanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, tez çalışmasının ilk bölümünde Pasif Sismik İnterferometri (PSİ) prosedürünün kullanıldığı ve Yüzey Dalgalarının 2-boyutlu PSİ Sonrası Çok Kanallı Analizi (2D PSI-MASW) yöntemi olarak adlandırılan bir veri toplama ve işleme şeması oluşturulmuştur. Bu bölümde 2D PSI-MASW yöntemi ile elde edilen FHD özelliklerinin Geleneksel Frekans-Dalgasayısı (CVFK) yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapılarak sonuçlar değerlendirilmektedir.

Zeminin üst 30 metresindeki ortalama S-dalgası hızı (Vs30) 'a dayalı zemin sınıflama (örn. Wills ve diğ., 2000; Kanlı ve diğ., 2006; Lee ve Tsai, 2008; Zor ve diğ., 2010), jeoteknik zemin karakterizasyonu (Stokoe ve diğ., 1994; Foti, 2000, 2005; Rix ve diğ., 2000) , zemin tepki analizi (örn. Malagnini ve diğ., 1993; Bozdağ ve Kocaoğlu, 2005; Parolai ve diğ., 2006) ve sismik tehlike değerlendirme (örn. Field, 2000; Campbell ve Bozorgnia, 2008) çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güvenilir ve tam bir yüzey dalgası FHD'sinin hesaplanması, çeşitli ters çözüm algoritmaları (Horike, 1985; Yamanaka ve Ishida, 1996; Beaty ve diğ., 2002; Wathelet ve diğ., 2004, Kocaoğlu ve Fırtana, 2011) kullanılarak doğru zemin hız profillerinin elde edilebilmesi için esastır.

Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW, Park ve diğ., 1999) yüksek frekans bandındaki yüksek çözünürlük gücü sayesinde zemin hız yapısı hakkında bilgi elde etmek için en çok tercih edilen aktif kaynaklı yüzey dalgası yöntemlerinden biridir. MASW yönteminde Rayleigh dalgaları yapay sismik kaynaklar kullanılarak (balyoz, ağırlık düşürme, vb.) üretilmekte ve düşey bileşen alıcılar ile kaydedilmektedir. Yöntemin saha uygulaması hızlı ve pratik olmasına karşın, kullanılan sismik kaynakların türüne de bağlı olarak yalnızca yüksek frekans bandında (>5–10 Hz) enerji üretilebilir. Dolayısıyla, yöntemin araştırma derinliği genellikle birkaç on metre ile sınırlıdır (Park ve diğ., 2007; Park, 2013).

FHD eğrilerinin daha düşük frekans bandında (< 5 Hz), bir başka deyişle daha uzun dalga boyları için elde edilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri de Artalan Sismik Gürültü (ASG) dalga alanından yararlanmaktır. ASG dalga alanı dünya yüzeyinde atmosferik/okyanusal olaylardan (<1 Hz) ve antropojenik faaliyetlerden (>1 Hz) kaynaklanan mikro-titreşimciklerden meydana gelmektedir (Longuet-Higgins, 1950; Asten ve Henstridge, 1984; Satoh ve diğ., 2001; Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2006). ASG dalga alanı hem yüzey hem de cisim dalgalarını içeren bir dalga alanı olup, cisim ve yüzey dalgaları arasındaki oran, bulunulan konuma ve zamana bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2006). Yüzey kaynakları yerin iç yapısını hem yerel hem de küresel ölçekte incelemek için kullanılabilecek yüzey dalgası modlarını üretmekte, böylece ASG dalga alanındaki düşük frekanslı yüzey dalgalarının varlığı, aktif kaynak çalışmalar ile elde edilenden daha derin hız yapısını belirlemek için gerekli bilgiyi sağlamaktadır. Bu nedenle, pasif yüzey dalgası yöntemlerinin uygulanmasıyla ASG dalga alanından FHD eğrilerinin elde edilmesi zemin karakterizasyonu için pratik, müdahalesiz (non-invasive) ve uygun maliyetli bir alternatif sunar (örn. Asten ve Henstridge, 1984; Bettig ve diğ., 2001; Kind ve diğ., 2005; Di Giulio ve diğ., 2006; Thelen ve diğ., 2006; Picozzi ve diğ., 2009). CVFK (Lacoss ve diğ., 1969), Uzaysal Otokorelasyon (Aki, 1957; Okada, 2003) ve Kırılma Mikrotremörü (Louie, 2001) FHD eğrilerinin hesaplanması için kullanılan konvansiyonel pasif yüzey dalgası yöntemleridir. Pasif ve aktif yüzey dalgası yöntemlerinin bir arada kullanılması ile ise geniş bir derinlik aralığı için yerel ölçekli zemin hız yapısı belirlenebilmektedir (Park ve diğ., 2005; Stephenson ve diğ., 2005; Zor ve diğ., 2010).

PSİ yöntemi son dönemde yer altı hız yapısının elde edilmesi amaçlı çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (örn. Shapiro ve diğ., 2005; Yao ve diğ., 2006;

Moschetti ve diğ., 2007; Yang ve diğ., 2007; Lin ve diğ., 2008; Stehly ve diğ., 2009; Kästle ve diğ., 2018; Lu ve diğ., 2018; Movaghari ve Doloei, 2019). PSİ'de, yüzey dalgalarının grup ve faz hızı bilgileri alıcı çiftlerinde eş zamanlı olarak kaydedilen ASG dalga alanının çapraz ilişkisinin hesaplanması yolu ile ampirik Green's fonksiyonlarından elde edilmektedir (Shapiro ve Campillo, 2004; Snieder, 2004; Sabra ve diğ., 2005a; Snieder ve Wapenaar, 2010; Wapenaar ve diğ., 2010).

Gerçek Green fonksiyonunun tek bir alıcı hattı kullanılarak oluşturulan çapraz ilişki fonksiyonlarından yaklaşık olarak tahmin edilmesi için ASG dalga alanının yaygın (diffuse) olması gerektiği bilinmektedir (Campillo ve Paul, 2003; Shapiro ve Campillo, 2004; Snieder, 2004). Aksi takdirde, ya alıcı hattı baskın kaynak yönleri (diğer bir deyişle duraylı faz bölgesi, alıcı hattının uçlarına yakın ve ASG dalga alanındaki sinyallerin yapıcı girişime uğradığı bölge) boyunca yönlendirilmeli (Snieder, 2004; Sabra ve diğ., 2005b; Halliday ve diğ., 2008) ya da ASG dalga alanını çok çeşitli yönlerde örnekleme yeteneğine sahip 2B sismik dizilim konfigürasyonları kullanılmalıdır (Tsai ve Moschetti, 2010).

Daha önce yapılan bazı çalışmalarda, Rayleigh dalgalarının grup veya faz hızı dispersiyon özelliklerini PSİ ilkelerini kullanarak belirlemek için tekil bir alıcı hattı boyunca toplanan ASG kayıtlarından hesaplanan çapraz ilişki fonksiyonları kullanılmıştır (örn. O'Connell ve Turner, 2011; Chávez-García ve Yokoi, 2015; Cheng ve diğ., 2015; 2016; Le Feuvre ve diğ., 2015; Pan ve diğ., 2016; Xia ve diğ., 2017; Xu ve diğ., 2017; Zhou ve diğ., 2018; Di Giulio ve diğ., 2020). Tek bir alıcı hattından, çapraz ilişki fonksiyonları ile üretilen sanal atış topluluklarında, özellikle ASG'yi oluşturan gürültü kaynaklarının dağılımının izotropik olmadığı durumlarda, yüzey dalgası paketlerinin nedensel olmayan (negatif zaman gecikmesi) ve nedensel (pozitif zaman gecikmesi) kısımlarda simetrik şekilde oluşmadığı gözlenmektedir (Cheng ve diğ., 2016, 2018; Xu ve diğ., 2017; Zhou ve diğ., 2018). Bu nedenle tek bir alıcı hattı kullanılan güncel bazı PSİ tabanlı çalışmalarda FHD analizinde bu tür kaynak dağılımlarından kaynaklanan sapma (biasing) etkilerini en aza indirmek için çeşitli veri işleme ve seçme prosedürleri geliştirilmiştir (örn. Le Feuvre ve diğ., 2015; Cheng ve diğ., 2016, 2018; Xia ve diğ., 2017; Zhou ve diğ., 2018). Bu prosedürler gürültü kaynaklarının hat doğrultusunda bulunması (örn. trafik gürültüsü), bilinen bir alıcı hattının baskın kaynak yönüne göre hizalanması (örn. nehir veya kıyı şeridi) ya da zeminin ortalama faz hızı ile ilgili önceden bilgi sahibi olunması gibi koşullarda

çalışabilmektedir. Bu nedenle, yukarıda sıralanan ve benzeri gerekli koşulların sağlanmadığı durumlarda bu prosedürlerin FHD analizindeki sapmaları azaltma etkileri geçersiz hale gelebilir. (Cheng ve diğ., 2018; Zhou ve diğ., 2018).

Tezin temel amaçlarından biri yerel ölçekli FHD analizi çalışmaları için önerilen 2D PSI-MASW yönteminin temel veri-işlem adımları ve parametrelerinin belirlenmesi, yöntemin FHD performansının konvansiyonel bir pasif kaynaklı dizilim yöntemi olan CVFK yöntemi ile karşılaştırılması ve yerel ölçekli PSİ uygulamalarında 2B sismik dizilimlerin izotropik olmayan ASG kaynak dağılımının FHD belirleme üzerindeki sapma etkisini azaltma konusundaki performansını incelemektir. Bu amaçla çalışmada Türkiye'nin Bursa ilinde bulunan dört farklı sahada konuşlandırılan yerel ölçekli 2B sismik dizilimler tarafından toplanan ASG verileri ve tez kapsamında üretilen sentetik veri setleri kullanılmaktadır. Takip edilen veri-işlem şemasında öncelikle toplanan ASG verilerine PSİ ilkeleri uygulanarak çok yönlü Çapraz Benzeşim Fonksiyonu (CCF) sanal atış toplulukları oluşturulmaktadır. Sonrasında FHD'nin elde edilmesi için CCF'lerden oluşturulan bu sanal atış toplulukları üzerine MASW yöntemindeki faz-kayması dönüşümü uygulanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan veri toplama ve işleme şeması kısaca 2D PSI-MASW yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen bu yöntemi gerçek saha verileri uygulamalı olarak sunan bir makale yayımlanmıştır (Karaaslan ve diğ., 2021). PSİ ilkeleri kullanılarak, 2B dizilimin, alıcı çifti mesafelerine dayalı olarak 1B sanal dizilime izdüşürülmesi ve CCF'lerden oluşturulan sanal atış toplulukları (SAT)'lerin MASW yöntemi ile analiz edilmesi tezin özgün fikridir ve 2D PSI-MASW'nin temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışma, gerçek saha verileri ve üretilen ASG sentetikleri üzerinden 2D PSI-MASW yönteminin uygulamadaki sınırlarını, yöntemin veri işlem aşamalarını ve parametrelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, yöntemin veri işleme aşamaları ve parametrelerinin belirlenmesi için çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin FHD performansları, veri setinin uzunluğu, ASG dalga alanındaki kaynakların yoğunluğu ve yönsel dağılımı, değişken yeraltı hız yapısı, dalga alanında çoklu modların varlığı ve kullanılan sismik dizilim geometrisinin etkileri üzerinden karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, her iki yöntem ile aynı koşullar altında ve aynı sismik dizilim konfigürasyonları kullanılarak hesaplanan FHD panelleri çözünürlük, doğruluk ve mod elde etme performansları açısından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar 2D PSI-

MASW yöntemi kullanılarak geniş bir frekans bandında CVFK ile eşdeğer bir temel mod Rayleigh dalgası FHD bilgisi sağlanabildiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, 2D PSI-MASW yönteminin özellikle önemli bir antisimetriye sahip 2B dizilim konfigürasyonları kullanıldığında CVFK yönteminden daha iyi mod çözünürlüğü ve ayrımı sunabildiği gösterilmektedir.

İlk kez Langston (2007a) tarafından önerilen Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) Yöntemi, temelde 1B ya da 2B (Langston, 2007b) sismik dizilim kayıtlarından, düzlem dalga yayınımı varsayımı ile yatay dalga yavaşlığı ve geometrik yayılmanın uzaklıkla değişiminin elde edilmesi için geliştirilmiştir. Yöntemin temeli, kaydedilen sismik dalga alanının uzaysal ve zamansal değişimleri (türevleri) kullanılarak, dalga alanının hız ve geometrik yayılma bilgisinin belirlenmesine dayanmaktadır (Langston, 2007a; 2007b ve 2007c). SDG yöntemi, önceki çalışmalarda büyük depremlerin neden olduğu kuvvetli yer hareketi kayıtlarının analizinde kullanılan bir yöntemdir (Bodin ve diğ., 1997). Bunun yanı sıra, ABD'deki bir çalışmada, Langston ve diğ. (2006), konsolide olmamış sedimanlardaki kuvvetli yer hareketinin derinlikle uzaysal değişimini incelemek amacıyla kaydettikleri sismik dizilim verisine SDG analizi uygulamışlardır.

Bu analiz yöntemi, Langston (2007a)'da doğrusal dizilim ile toplanan sismik kırılma veri setleri üzerinde uygulanarak Love dalgalarının yatay hızlarındaki ve göreceli geometrik yayılmalarındaki değişimler gözlenmiştir. Langston (2007b) çalışmasında, SDG yöntemi, bölgesel bir 2B dizilim tarafından kaydedilen lokal deprem verilerine uygulanarak, sismik dalgaların genlik/faz özellikleri, yatay yavaşlıkları, yayılma yönleri ve radyal geometrik yayılmalarındaki değişimler gibi önemli bilgiler elde edilmiş, yöntemin karmaşık sismogramlarda bulunan çeşitli dalga yayılma sistemlerini çözümleme potansiyeli ortaya konmuştur. Langston ve Liang (2008)'de SDG yöntemi deprem verilerinin analizinde kullanılmış ve çeşitli uzun periyotlu teleseismik dalgaların azimut ve hızları elde edilmiştir. Sismik dalga gradiyometri yönteminin uygulandığı başka bir çalışmada, deprem kayıtları analiz edilerek Rayleigh dalgalarının faz hızları belirlenmiştir. Bu çalışmada, yöntemin %10 düzeyinde bir ASG bulunması durumunda dahi doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Liang ve Langston, 2009). Ayrıca, SDG yönteminin, diğer konvansiyonel yöntem uygulamalarıyla elde edilemeyen, dalga alanındaki genlik değişimleri konusunda bilgi sağladığı belirlenmiştir.

Langston (2007a) tarafından sunulan SDG analizi, temel olarak frekans ortamında spektral oranlamaya dayanmaktadır. Bununla birlikte, frekans ortamı gradiyometri analizi Langston ve Hammer (2001) tarafından da belirtilen spektral oranlamanın potansiyel problemlerini (spektral boşluk, vb.) barındırmaktadır. Bu problemleri aşmak amacıyla, analitik sinyallere dayanarak geometrik yayılmanın ve yatay dalga hızının değişiminin elde edilmesini zaman ortamında uygulanabilen bir başka yöntem önerilmiştir (Langston, 2007c). Yöntemin sunduğu yenilikler arasında, sismik dalga alanının yayılma yönü ile ilgili bilgilerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi de yer almaktadır. Çalışmada ayrıca, SDG yönteminin kuvvetli yer hareketi ve küçük ölçekli kırılma veri setlerine uygulanması sonucunda dalga alanındaki uzaysal farklılıkları belirleyerek, detaylı tomografik çalışmalarda frekans-dalga sayısı ya da hüzmeleme gibi sismik dizilim yöntemlerini tamamlayıcı bir özellik taşıdığı öne sürülmüştür. Bir başka çalışmada (Poppeliers, 2010), sismik dalga gradiyometri analizi öncesinde sürekli dalga dönüşümü (wavelet transform) uygulanarak sismik dalga alanı dar bant geçişli süzülmüş seismogram gruplarına ayırılmış, böylece dalga yayılma parametrelerinin hem zaman ve hem de frekansa dayalı olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Poppeliers & Punoševac (2013) tarafından yürütülen çalışma ile SDG yönteminin teorisi polarize edilmiş dalga alanı kullanılarak üç boyuta genişletilmiş, yöntemin dalga yayılım yönlerinin tahmin edilmesindeki güvenilirliği ve gürültüye karşı duyarlılığı incelenmiştir.

Literatürde çoğunlukla global ve bölgesel ölçekte çalışılmış olan SDG, Liang (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile küçük ölçekli jeofon dizilimlerine uygulanarak yüzeye yakın yeraltı yapısının belirlenmesi konusunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, göreceli olarak yeni bir teknik olan SDG'nin mühendislik sismolojisi çalışmaları için umut vadeden, ancak güçlü ve zayıf yönleri kapsamlı şekilde değerlendirilmesi gereken bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Barker ve Langston (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SDG uygulaması amaçlı saha ölçümlerinin piyasada bulunan jeofonlar kullanılarak gerçekleştirilebilme potansiyeli incelenmiştir. Küçük ölçekli kırılma ve gradiyometri testleri, SDG yöntemi kullanılarak P ve yüzey dalgalarının hızlarının doğru bir şekilde belirlenebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, piyasada bulunan jeofonlarla oluşturulan yoğun ve küçük ölçekli dizilimler kullanılarak yapılan gradiyometrik çalışmaların güvenilir ve başarılı

olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, çalışmada aynı zamanda yöntemin kalibre edilmemiş alıcılar ve alıcı-zemin kuplajına oldukça duyarlı olduğu da belirtilmiştir.

2B gradiyometrik dizilimler üzerinden, ölçüm belirsizliklerinin gradiyometrik dalga parametrelerinin doğruluğuna olan etkilerinin araştırıldığı bir başka çalışmada (Poppeliers ve Evans, 2015) minimum pratik dizilim açıklığı araştırılmakta ve gradiyometrik dizilimler için tasarım önerileri yapılmaktadır. Çalışmada, alıcı lokasyonlarındaki belirsizliğin, doğruluğu ve hassasiyeti alıcının kendi tepkisinden kaynaklı belirsizlik kadar etkileyebildiği görülmüştür. Poppeliers ve Evans (2015) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, 2B gradiyometrik dizilimler üzerinden, ölçüm belirsizliklerinin gradiyometrik dalga parametrelerinin doğruluğuna olan etkileri araştırılmaktadır ve bu bağlamda en küçük ve en büyük dizilim açıklığı incelenmekte, gradiyometrik dizilimler için tasarım önerileri sunulmaktadır. Çalışma, alıcı konum belirsizliğinin, özellikle alıcının kendi tepkisinden kaynaklanan belirsizlik kadar doğruluğu ve hassasiyeti etkileyebildiğini göstermektedir. Liang ve diğ. (2023), SDG yönteminin geçmişten günümüze kadar gelişimini, bu konuda yapılan güncel çalışmaları (Ridder ve Biondi, 2015; Liu ve Holt, 2015; Langston ve Ayele, 2016; Ridder ve Curtis, 2017; Sollberger ve diğ., 2019, Cao ve diğ. 2020), geliştirilen analiz prosedürlerini ve elde edilen sonuçları içeren bir literatür inceleme çalışması gerçekleştirmişlerdir.

SDG yöntemi, FHD bilgisini az sayıda alıcı ve küçük alıcı açılımlarıyla aktif (deprem, patlatma) veya pasif (ASG dalga alanı) sismik kaynaklardan yayınan Rayleigh dalgası sinyallerinden elde etme potansiyeline sahiptir. Edme ve Yuan (2016), SDG analizini yerel ölçekli, 2B alıcı dizilimi kullanılarak kaydedilen ASG kayıtlarına ilk kez uygulayarak mühendislik ölçeğinde Rayleigh dalgası FHD bilgisini belirlemişlerdir. Tez kapsamında Artalan Gürültü Gradiyometrisi (AGG) olarak anılan bu yöntem ile, ortamda güçlü ASG kaynaklarına ait sismik sinyallerin yayınması durumunda FHD bilgisi doğru şekilde elde edilebilmektedir. Tez çalışması çerçevesinde, Langston (2007c) tarafından önerilen zaman ortamı yaklaşımına dayanan SDG yöntemi ile Aktif Kaynaklı Gradiyometri (AKG) ve AGG uygulamalarının Rayleigh dalgası FHD bilgisinin elde edilmesindeki başarısının belirlenmesi hedeflenmektedir. Elde edilen FHD sonuçları, konvansiyonel yöntemler olan CVFK ve MASW sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Literatürdeki uygulamaları kısıtlı olan AGG ve AKG uygulamalarının FHD belirleme performanslarını etkileyen veri-işlem adımları ve parametrelerinin ve yöntemlerin uygulama sınırlarının belirlenmesine

yönelik testler gerçekleştirilmektedir. AGG ve AKG yöntemlerinin FHD belirleme performansları, değişken ASG kaynak yoğunluğu ve dağılımı, pencere boyu, alıcı aralığı, uzaysal türev alma yöntemi, Sinyal/Gürültü Oranı (SGO), mod içeriği gibi koşullara bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Sentetik veri setlerinden ve gerçek saha verilerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda, SDG yöntemlerinin FHD belirleme performanslarının, SGO'nun düşmesine neden olan gürültü içeriğinden ve sahada gerçekleşebilecek kuplaj ve metraj sorunlarından yüksek oranda olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, gradiyometrik yöntemlerin, yüksek modlara ait faz hızlarının belirlenmesi konusunda 2D PSI-MASW yöntemine ve konvansiyonel dizilim yöntemleri olan CVFK ve MASW'ye göre dezavantajlı olabildikleri görülmüştür. Öte yandan, konvansiyonel dizilim yöntemleri ve 2D PSI-MASW gibi uzun alıcı açıklığına sahip (> 100 m) çoklu alıcı dizilimler kullanılarak yapılan FHD analizi, daha geniş bir frekans bandında etkili bir performans sergilemektedir. Bununla beraber, SDG uygulamalarında FHD bilgisi çok küçük alıcı aralıkları (en fazla 1-2 m) ile yoğun şekilde yerleştirilmiş az sayıda alıcıya sahip (3-5 alıcılı) dizilim konfigürasyonları ile elde edilebilmektedir Dolayısıyla, gradiyometrik yöntemlerin, çok alıcılı olarak uygulanabilen dizilim yöntemlerine karşı sağladıkları en önemli avantaj, basit dizilim konfigürasyonları sayesinde sahada pratik ve hızlı uygulanabilmeleridir. Bu avantaj, özellikle yoğun şehirleşmenin olduğu alanlarda veya geniş açılımlı alıcı dizilimlerinin uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda daha kritik hale gelmektedir. AGG ve AKG yöntemlerinin FHD performansları, özellikle SGO'nun kuplaj problemleri veya diğer gürültü kaynakları nedeniyle düşmesinden etkilenmekle birlikte, Vs30 değeri ve buna bağlı olarak zemin sınıfının belirlenmesi için yapılan sığ zemin çalışmalarında pratik ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır.

2. ARTALAN SİSMİK GÜRÜLTÜ (ASG) VE PASİF SİSMİK İNTER-FEROMETRİ

Artalan sismik gürültü (ASG), yerin çeşitli doğal ve antropojenik kaynaklar tarafından oluşturulan mikron genlikli titreşimcikleridir. Bir sismik kaynak olarak ASG, küresel ölçekten mühendislik ölçeğine uzanan başarılı uygulamaları nedeniyle son yıllarda literatürde bir çok farklı sismolojik çalışmada artan bir ilgi ile kullanılmaktadır (Bozdağ ve Kocaoğlu, 2005; Sabra ve diğ., 2005a; Shapiro ve diğ., 2005; Bensen ve diğ., 2007; Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2009; Zor ve diğ., 2010; Foti ve diğ., 2011, Lin ve diğ., 2013; Mordret ve diğ., 2013; Roux ve diğ., 2016; Molnar ve diğ., 2021; Louie ve diğ., 2022). Doğal ve antropojenik süreçler ASG alanının oluşumuna katkıda bulunmakta ve frekans içeriğinde belirleyici olmaktadır. ASG'nin frekans içeriği 0.001-100 Hz gibi geniş bir aralıkta değişmektedir (Asten ve Henstridge, 1984; Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2006; Nishida ve diğ., 2009; Nishida, 2017).

ASG alanı genel anlamda frekans içeriğine ve kaynağına göre gruplandırılmaktadır. ASG alanının sismik uğultu (seismic hum) olarak adlandırılan çok düşük frekans (0.001-0.02 Hz) içeriğine sahip bölümü okyanus dalgalarından kaynaklanmaktadır (Nishida, 2017). Mikroseizm olarak adlandırılan düşük frekanslı (< 1 Hz) ASG alanı okyanus ve deniz dalgaları, büyük meteorolojik olaylar ve yerin atmosfer ile etkileşimi gibi doğal süreçler kaynaklıdır (Longuet-Higgins, 1950; Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2006). Kaynağı doğal ya da antropojenik olabilen 1-5 Hz frekans bandındaki ASG alanı mikroseizmler ile mikrotremörler arasında bir geçiş bölgesi olarak düşünülebilir ve kaynağı lokal meteorolojik olaylar ve kentsel gürültülerdir. İnsan aktivitelerinin sonucu olarak ortaya çıkan antropojenik kaynaklar ise özellikle kentsel alanlarda daha yüksek frekanslı (> 1 Hz) ASG alanını neydana getirmektedir (Asten ve Henstridge, 1984; Bonnefoy-Claudet ve diğ., 2006).

Deprem kaynaklı sismik dalgaların aksine, ASG'nin belirgin tek bir kaynağı yoktur, zamanda sürekliliğe ve genellikle rastgele bir doğaya sahiptir. Bu özellikleri ile ASG, analiz için duraylı ve bol miktarda veri sağlamaktadır (Bensen ve diğ., 2007). Bu nedenle literatürde ASG'nin lokal, bölgesel ve global sismoloji ölçeğinde çok sayıda

farklı uygulaması yer almaktadır. ASG dalga alanının kullanıldığı sismoloji uygulamalarından biri de 2000'li yılların ortalarından beri yer altı hız yapısının elde edilmesi amaçlı çalışmalarda yaygın olarak kullanılan PSİ prosedürüdür (örn. Shapiro ve diğ., 2005; Yao ve diğ., 2006; Moschetti ve diğ., 2007; Yang ve diğ., 2007; Lin ve diğ., 2008; Stehly ve diğ., 2009; Kästle ve diğ., 2018; Lu ve diğ., 2018; Movaghari ve Doloei, 2019). PSİ'de, yaygın (diffuse) bir dalga alanı yaratan ASG sinyalleri yer yüzeyine yerleştirilmiş bir dizi alıcı tarafından toplanır ve farklı alıcı çiftleri arasındaki ASG kayıtlarına ait çapraz ilişki fonksiyonlarının hesaplanması ile Green fonksiyonuna bir yaklaşım yapılır (örneğin, Weaver & Lobkis 2001a,b, 2004; Derode et al. 2003; Snieder, 2004; Wapenaar, 2004; Larose et al. 2005).

PSİ, yüzey dalgası dispersiyonunun küresel ve bölgesel ölçekte belirlenmesindeki yüksek performansının (Yao ve diğ., 2008; Bensen ve diğ., 2009; Nishida ve diğ., 2009; Yang ve diğ., 2010; Ritzwoller ve diğ., 2011; Palomeras ve diğ., 2017; Taylor ve diğ., 2019; Guerin ve diğ., 2020; Yang ve diğ., 2020) yanı sıra yerel ölçekli çalışmalarda da etkin bir şekilde kullanılma potansiyeline sahiptir (Huang ve diğ., 2010; Lin ve diğ., 2013; Behm ve diğ., 2014; Pan ve diğ., 2016; Xu ve diğ., 2016; Vassallo ve diğ., 2019; Wang ve diğ., 2019). Rayleigh dalgası faz hızlarını elde etmek için PSİ'yi farklı yüzey dalgası analiz yöntemleriyle birleştiren yerel ölçekli sismoloji çalışmaları geniş bir yelpaze oluşturmaktadır (örn. O'Connell ve Turner, 2011; Chávez-García ve Yokoi, 2015; Cheng ve diğ., 2015, 2016; Le Feuvre ve diğ., 2015; Lontsi ve diğ., 2016; Peruzzetto ve diğ., 2018; Zhang ve diğ., 2019). Bununla birlikte, literatürde konvansiyonel dizilim yöntemleri ile PSİ tabanlı yöntemleri güvenilir FHD bilgilerinin elde edilmesi açısından karşılaştıran az sayıda çalışma bulunmaktadır (örn. Cheng ve diğ., 2016; 2018; Lontsi ve diğ., 2016; Pan ve diğ., 2016; Xu ve diğ., 2017; Harba ve diğ., 2019; Karaaslan ve diğ., 2021).

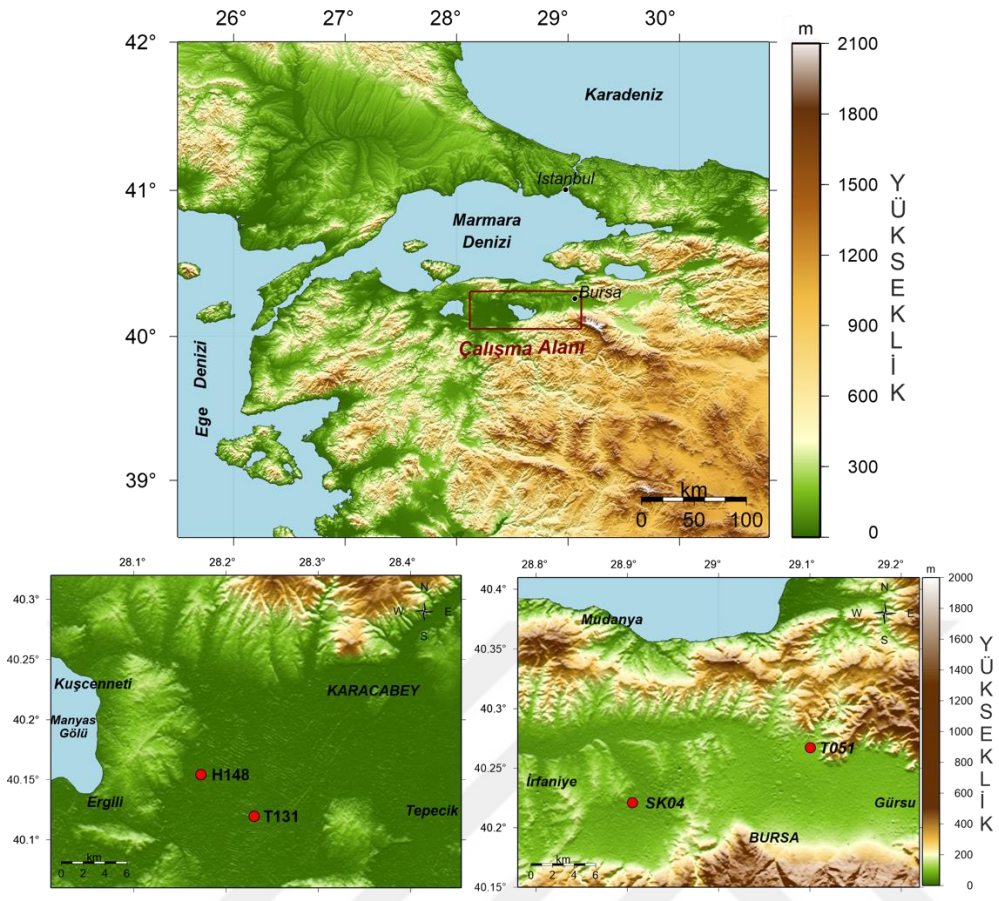
Yerel ölçekli PSİ, mühendislik amaçlı yerel zemin çalışmalarında kullanımı özellikle değerli olan bir tekniktir. Bunun en önemli sebeplerinden biri konvansiyonel sismik ya da jeoteknik yöntemlerle kıyaslandığında, kısa ölçüm süreleri, herhangi bir sismik kaynak gerektirmemesi ve tahribatsız uygulanabilmesi ile düşük maliyetli ve pratik bir alternatif olarak öne çıkmasıdır. Bunun yanı sıra, yeterli kayıt süreleri ve amaca uygun olarak dizayn edilmiş sismik dizilim konfigürasyonları ile uygulanacak bir PSİ, yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlüğe sahip olacaktır. Bu özellikleri ile konvansiyonel jeofizik/jeoteknik yöntemlere ek ya da alternatif olarak uygulanabilecek bir yöntem

olan PSİ, yüzey dalgalarının FHD'sinin modellenmesi ile zemin tabakalarının kalınlıklarının, sismik hızlarının ve elastik özelliklerinin belirlenmesini, dolayısıyla yerel zemin davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Yeraltı hız yapısının ve dolayısıyla yerel zemin koşullarının PSİ gibi yenilikçi yöntemler ile detaylı şekilde belirlenmesi zemin büyütmesi, zemin sınıflaması ve mikrozonlama, zemine özgü sismik tehlike değerlendirme çalışmalarının daha doğru ve etkin yürütülmesine katkı sağlayacaktır. PSİ yöntemleri, özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu ve aktif kaynaklı yöntem uygulamalarının hem sismik kaynak kullanımının zorluğu hem de SGO'nun düşük kalması nedeniyle kısıtlı kaldığı şehir alanlarında yerel deprem tehlikesinin belirlenmesi, şehir planlaması, alt ve üst yapı tasarımlarının optimize edilmesi gibi deprem risk azaltma stratejilerine katkıda bulunacaktır.

3. KULLANILAN VERİ SETİ, EKİPMAN VE YÖNTEMLER

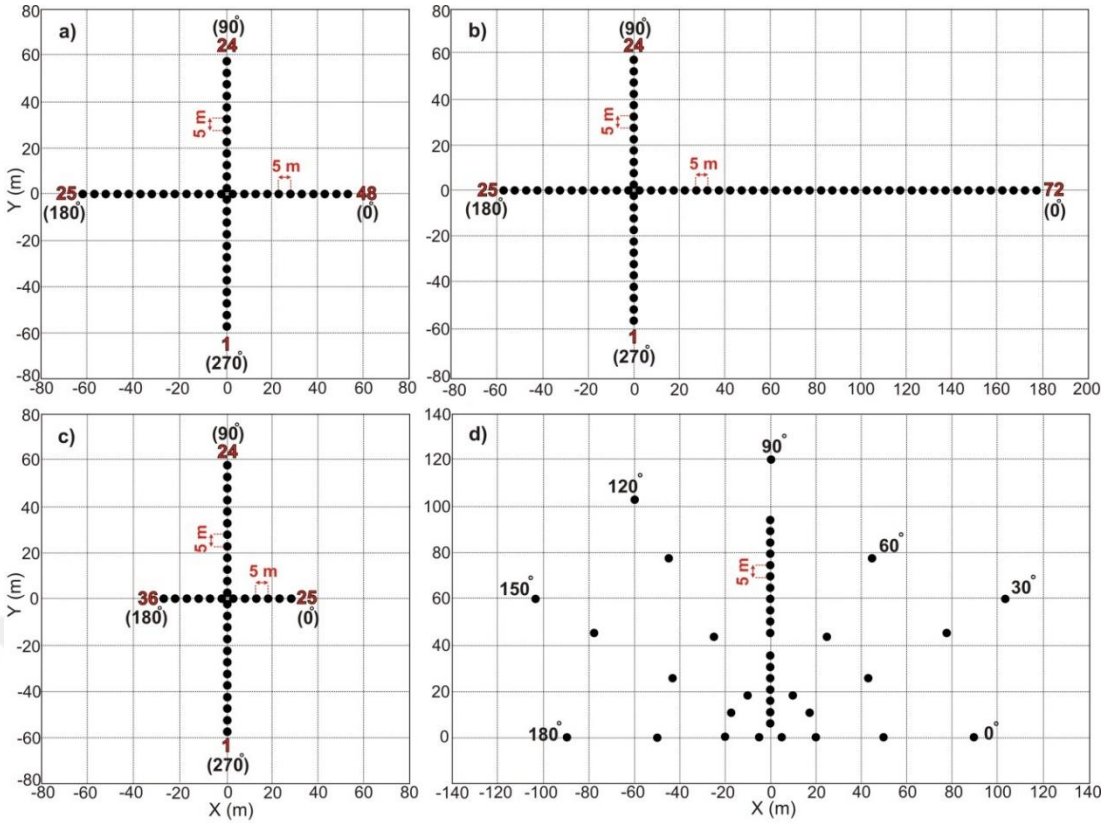
3.1 Gerçek ASG veri seti ve kullanılan ekipman

Tez kapsamında, amaca yönelik olarak üretilen sentetik ASG veri setleri ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik Başkan Yardımcılığı (BYİDS), Yer Bilimleri Araştırma Grubu (YBAG) tarafından 2013 yılında tamamlanan Bursa İli için Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi (Zor ve diğ., 2013) kapsamında sahada toplanan veriler seçilerek kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin performanslarının farklı sismik dizilim geometrisi, değişken zemin ve ASG alanı koşullarında karşılaştırılabilmesi için sentetik veri üretimi ve gerçek saha verilerinin seçimi dizilim geometrilerinin, zemin yapısının ve saha konumlarının birbirinden farklı koşulları yansıtmasına özen gösterilerek yapılmıştır. Bunun yanı sıra, proje kapsamında il bazında çok sayıda sahada toplanan sismik dizilim veri seti içinden veri kalitesi yüksek düzeyde olan sahaların seçilmesi önceliklenmiştir. Bu seçimde kayıt esnasında veri kaybının (alıcı olarak kullanılan jeofon ya da kayıtçının çalışmaması ya da kusurlu çalışması, veri kesintileri, kuplaj ve serim problemleri vb. durumlar) olmaması ya da en düşük düzeyde olması en önemli parametrelerden biri olmuştur. Şekil 3.1'de, Bursa şehrindeki çalışma alanının Türkiye'deki konumu ve ölçüm sahaları gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : (a) Çalışma alanının kuzey-batı Türkiye'deki konumu kırmızı dikdörtgen ile (b) ölçüm sahalarının Bursa ilindeki konumları ise kırmızı daireler ile gösterilmektedir.

Ölçüm sahalarında kullanılan sismik dizilim geometrileri Şekil 3.2'de verilmektedir. H148, T131 ve SK04 sahalarındaki veriler, 5 m'lik tekdüze alıcı aralığına sahip birbirine dik iki alıcı hattından oluşan 2B artı şekilli bir dizilim geometrisi ile toplanmıştır. Bu sahalardaki ölçümlerde aynı sıra ile toplam 48, 72 ve 36 alıcı kullanılmıştır ve alıcı dizilimlerindeki en büyük alıcı açıklıkları H148 ve SK04 sahaları için 115 m, T131 sahası için ise 235 m'dir. Diğer taraftan, T051 sahasında yelpaze şeklinde yarı dairesel bir dizilim geometrisi kullanılmıştır. Bu dizilim, aralarında 30'ar derecelik açı bulunan yedi alıcı hattından oluşmaktadır. Hatlar boyunca alıcı aralıkları ışınsal olarak 5'ten 120 m'ye kadar artmakta, yalnızca merkezdeki (90°) alıcı hattında tekdüzeye yakın 5 m'lik bir alıcı aralığı bulunmaktadır. Bu dizilim geometrisinde en büyük alıcı açıklığı 208 m'dir.



Şekil 3.2 : (a) H148, (b) T131 (c) SK04 ve (d) T051 ölçüm sahalarında kullanılan dizilim geometrileri. Artı şekilli dizilimler için alıcı numaraları hatların uçlarında verilmektedir. Alıcı hatlarının göreceli açısal yönleri de şekiller üzerinde belirtilmektedir.

ASG ölçümlerinde alıcı olarak Mark Products 4.5 Hz düşey bileşen jeofonlar kullanılmaktadır. Artı şekilli geometriye sahip H148, T131 ve SK04 sahalarında Geode kayıt sistemleri kullanılırken, yelpaze şekilli geometriye sahip T051 sahasında ise saha uygulamalarında Geode sisteme göre çok daha esnek kullanım sağlayan kablosuz Trimble Reftek 125A (TEXAN) kayıtçılar tercih edilmiştir. Zaman örneklemesi tüm sahalarda 16 milisaniye olarak ayarlanmıştır. Kayıt uzunluğu H148, T131 ve SK04 ölçüm sahalarında 1 saat 5 dakika, T051'de ise 1 saat 30 dakikadır.

3.2 Kullanılan Yöntemler

3.2.1 Konvansiyonel frekans-dalgasayısı (CVFK) yöntemi

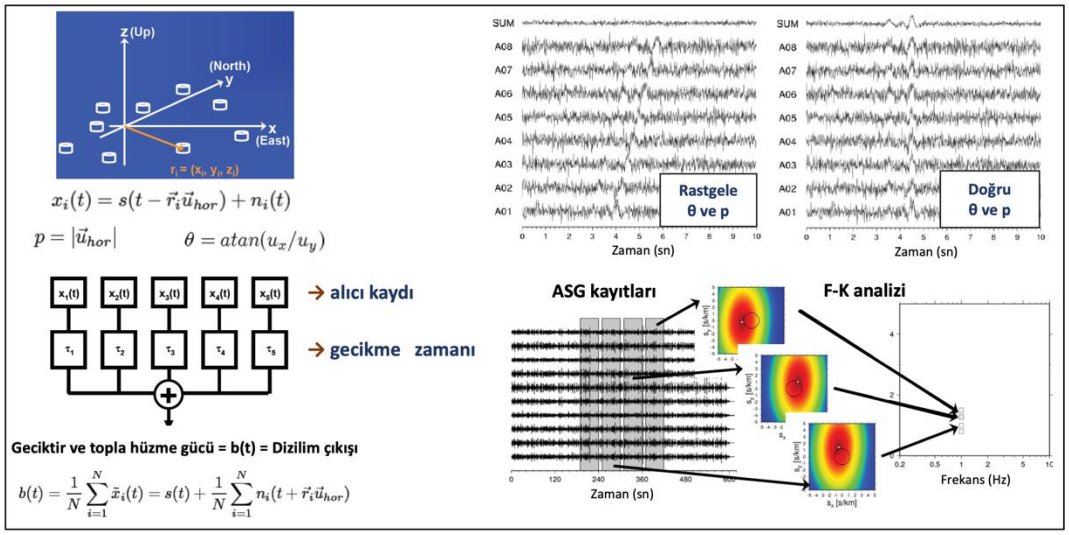
2B dizilimler ile toplanan ASG verilerinden Rayleigh dalgası FHD eğrilerinin elde edilmesi ve 2D PSI-MASW yöntemi kullanılarak elde edilen faz hızı dispersiyon sonuçlarının karşılaştırılması için konvansiyonel sismik dizilim yöntemlerinden biri olan CVFK yöntemi (örn. Lacoss ve diğ., 1969; Ohrnberger ve diğ., 2004)

kullanılmıştır. CVFK yönteminde, ASG dalga alanının düzlem dalgalardan oluştuğu varsayılmaktadır. Buna göre; 2B bir sismik dizilim boyunca yayınan bir düzlem dalgası için, alıcı konumlarına (yani alıcılar arası mesafe ve azimut) ve dalganın yayılma hızına bağlı olarak farklı alıcılar arasındaki seyahat sürelerinde farklılıklar ortaya çıkar. Düzlem dalganın yayılma hızını ve azimutunu elde etmek için bir geciktirme ve toplam hüzmeleme (delay-and-sum beamforming) prosedürü uygulanmaktadır (Rost ve Thomas, 2002). Bu prosedürde verilen deneme azimutları ve hızları için her bir alıcıdaki sinyallerin fazları alıcılar arası mesafelere göre kaydırılır ve tüm alıcılardaki sinyaller toplanır.

Faz hızı dispersiyon panellerinin elde edilmesi için hüzme gücü spektrumunun frekans ortamı yaklaşımı ile hesaplandığı GEOPSY yazılım paketinin (www.geopsy.org) CVFK aracı kullanılmaktadır (Wathelet ve diğ., 2010). Hesaplama, $\pm f_c \times 0.05$ Hz bant genişliğine sahip merkez frekanslarında (f_c), tekil zaman pencerelerinin uzunluğunun $\frac{50}{f_c}$ olacak şekilde f_c ile ters orantılı olarak değiştiği %25 örtüşmeli bir kayan zaman penceresi analizi kullanılarak gerçekleştirilir. Her bir f_c ve tekil zaman penceresi için, dalga sayısı ortamında benzeşime dayalı göreceli bir hüzme gücü spektrumu (a semblance-based relative beam-power spectrum) hesaplanır ve maksimum hüzme gücüne karşılık gelen dalga sayısı vektörü, her bir zaman penceresinde benzeşimi (coherency) en yüksek düzeyde olan düzlem dalgası ya da dalgalarının ortamdaki gerçek yayılma azimutunun ve hızının tahmini için kullanılır (Ohrnberger ve diğ., 2004; Wathelet ve diğ., 2008). Yöntemin doğası gereği, ASG dalga alanında farklı konumlardaki kaynaklar tarafından ya da farklı modlarda yayınarak dizilime ulaşan birden çok düzlem dalga olması durumunda, değişen hüzme güçlerine sahip birden çok dalga sayısı vektörü elde edilebilmektedir.

Benzeşime dayalı hüzme gücü veya bağıl hüzme gücü (Ohrnberger ve diğ., 2004; Gibbons ve diğ., 2008), Rayleigh dalgasının dizilimi oluşturan alıcılara yüksek benzeşimle ya da uyumla ulaşıp ulaşmadığının bir göstergesidir. Bu nedenle belirli bir zaman penceresi için tahmin edilen faz hızının ve azimutun kalitesini temsil etmek için kullanılmaktadır. CVFK işleminin sonucunda, her bir zaman penceresi için hesaplanan tüm tahmini faz hızlarının normalize edilmiş histogramı frekansın fonksiyonu olarak oluşturulur ve bir faz hızı dispersiyon görüntüsü (CVFK paneli) elde edilir. Elde edilen CVFK panelinden Rayleigh dalgası mod branşlarına ait faz hızı eğrileri, Foti ve diğ. (2018) tarafından önerilen istatistiksel bir yaklaşım kullanılarak hesaplanan ortalama

faz hızları ve standart sapmaları üzerinden belirlenir. CVFK yönteminde uygulanan geciktirme ve toplam hüzmeleme prosedürü ve GEOPSY ile CVFK panelinin elde edilmesi Şekil 3.3'te şematik olarak sunulmaktadır (Ohrnberger, 2008).



Şekil 3.3 : CVFK yönteminin uygulanması ve CVFK panelinin elde edilmesi. Sesarray kurs notlarından (Ohrnberger, 2008) oluşturulmuştur.

CVFK yöntemi, sahada kullanılabilen kısıtlı sismik dizilim geometrileri nedeniyle düşük frekanslarda sınırlı uzaysal çözünürlük sağlamaktadır. 2B bir dizilimin dalga sayısı çözünürlük sınırı, en büyük alıcı açıklığına (D_{max}) bağlı olarak değişir ve farklı azimutlar boyunca çözülebilen en küçük dalga sayısını (k_{min}) belirler. Dalga sayısı çözünürlük (resolution) ve örtüşme (aliasing) sınırlarının belirlenmesi için dizilim tepki fonksiyonu (DTF) (Asten ve Henstridge, 1984; Wathelet ve diğ., 2008) tez kapsamında, ihtiyaca uygun şekilde uyarlanan MATLAB kodu ile hesaplanmıştır. MATLAB kodu ile hesaplanan DTF'lerin doğrulaması literatürde sismik dizilim çalışmalarında yaygın olarak kullanılan SESARRAY yazılımı içerisinde bulunan BUILD ARRAY aracının (www.geopsy.org) sonuçları ile yapılmıştır.

Alıcı dizilimlerinin uzaysal çözünürlük kapasitelerini belirlemek için farklı yönlere karşılık gelen üst (k_{min}^{u}) ve alt (k_{min}^{l}) dalga sayısı çözünürlük limitleri kullanılabilmektedir. Zor ve diğ. (2010)'da tanımlandığı şekliyle k_{min}^{u} ve k_{min}^{l} DTF'nin merkezinde, ana-salınımın yarı yüksekliğindeki dış ve iç genişlikler olarak alınmaktadır. 2B dizilimlerde en küçük alıcı aralığı (D_{min}) azimuta bağlı farklılıklar gösterebildiğinden, dizilimin örtüşme limitini tanımlayan maksimum çözülebilir dalga sayısı (k_{max}) da (Wathelet ve diğ., 2008) dizilim geometrisine bağlıdır. Örneğin; en büyük

alıcı açıklığına sahip olan T131 sahasındaki dizilim için k_{min}^{l} ve k_{min}^{u} sırasıyla 0.026 $rad/$m ve 0.092 $rad/$m olarak belirlenmektedir. H148 sahasında kullanılan dizilim için çözünürlük limitleri 0.066 rad/m ve 0.07 $rad/$m değerlerini almaktadır. T051 sahasındaki dizilim geometrisi, benzer D_{max} ile farklı yönler boyunca uzanacak şekilde dizayn edilmiştir. Dolayısıyla, k_{min}^{l} ve k_{min}^{u} değerleri birbirine çok yakın olacak şekilde 0.042 rad/m and 0.051 $rad/$m olarak belirlenmiştir. En az alıcı sayısı ve en kısa alıcı açıklığına sahip bir dizilim geometrisi ile ölçüm yapılan SK04 sahası için ise k_{min}^{l} ve k_{min}^{u} değerleri sırasıyla 0.058 rad/m ve 0.184 rad/m olarak hesaplanmıştır. Son olarak, k_{max} değerleri T131, H148, T051 ve SK04 sahaları için sırasıyla 1.25, 1.74, 1.27 ve 1.07 $rad/$m olarak elde edilmiştir. Dalga sayısı çözünürlük ve örtüşme limitleri CVFK panellerinde güvenilir FHD bilgisinin elde edilebileceği güvenilir alanı belirlemek için kullanılmaktadır.

3.2.2 2-boyutlu pasif sismik interferometri ile yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (2D PSI-MASW) yöntemi

Bu tez çalışmasında ASG dalga alanını oluşturan Rayleigh dalgalarının FHD özelliklerini belirlemek için tez çalışması kapsamında geliştirilen (Karaaslan ve diğ., 2021) yeni ve özgün bir yöntem olan 2D PSI-MASW yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde, her bir alıcı çifti için faz ağırlıklandırmalı olarak yığılmış çapraz benzeşim fonksiyonlarının (CCF) elde edilebilmesi için ASG kaydı kısa zaman aralıklarına bölünmekte ve alıcı çiftleri arasındaki CCF'ler, Prieto ve diğ. (2009; 2011) tarafından önerilen frekans-ortamı benzeşim prosedürü (frequency-domain coherency procedure) ile kısa zaman pencerelerinde hesaplanmaktadır. CCF'lerde yüksek frekanslı yapay gürültülerin oluşmasının önüne geçmek için frekans-ortamı benzeşim prosedüründen önce doğrusal olmayan bir veri işleme adımı olan zaman ortamı normalizasyonunun (örneğin; 1-bit normalizasyonu) uygulanmaması tercih edilmektedir (Sabra ve diğ., 2005a; Zhou ve diğ., 2018).

Hesaplamanın kısa zaman pencerelerinde yapılması ile spektral beyazlatma etkin şekilde uygulanmakta ve kısa zaman pencerelerinde hesaplanan CCF'lerin zaman ortamında yığılması ile elde edilen PW-CCF'lerin sinyal-gürültü oranı (SGO) iyileştirilmiş olmaktadır (Bensen ve diğ., 2007). Zaman ortamında yığma işleminin gerçekleştirilmesi için geleneksel doğrusal yığma yerine Schimmel ve Paulssen (1997) tarafından önerilen zaman-frekans ortamı faz ağırlıklandırmalı yığma (tf-PWS) tekniği

kullanılmaktadır. tf-PWS'in kullanılması ile ASG dalga alanındaki faz uyumlu sinyallerin güçlendirilmesi sağlanmaktadır. Böylelikle daha yüksek SGO'ya sahip CCF'ler ve dolayısıyla daha doğru FHD bilgisi elde edilebilmektedir.

tf-PWS, doğrusal olmayan bir yığma tekniğidir ve izlerin S-dönüşümü ayrıştırmasına dayanır. S-dönüşümü, ilk kez Stockwell ve diğ. (1996) tarafından önerilen doğrusal bir zaman-frekans analiz yöntemidir. S-dönüşümünün en önemli avantajları, frekansın yanında faz bilgisini de koruma yeteneği ve sinyal özelliklerindeki değişikliklere adapte olabilmesi ile istatistiksel özellikleri zamanla değişen sinyallerin zamanla değişen frekans içeriklerinin belirlenmesini sağlamasıdır. Bu sayede, sismik sinyallerin hem faz hem de frekansının eşzamanlı olarak analiz edilebilmesi imkanını sunmaktadır (Stockwell, 2007; Zhu, 2020).

tf-PWS tekniğinde faz-ağırlıklandırmalı yığma (yığılmış final PW-CCF) Denklem 3.1'deki gibi elde edilmektedir. Dizilimdeki her bir alıcı için ham ASG verisinden faz ağırlıklandırmalı yığma ile final PW-CCF'nin elde edilmesinde kullanılan veri işlem akışı Şekil 3.4'te sunulmaktadır.

$$PW\text{-}CCF(\tau) = S^{-1}\left[C_{ps}(\tau, f)S_L(\tau, f)\right] \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'deki $C_{ps}(\tau, f)$ zaman-frekans ortamı faz yığması (time-frequency phase stack) genliğe duyarlı olmayan ve Schimmel ve diğ. (2011)'de Denklem 3.2 ile tanımlanan bir benzeşim ölçüsüdür.

$$C_{ps}(\tau, f) = \left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i(\tau,f)e^{j2\pi f\tau}}{|S_i(\tau,f)|}\right|^a \tag{3.2}$$

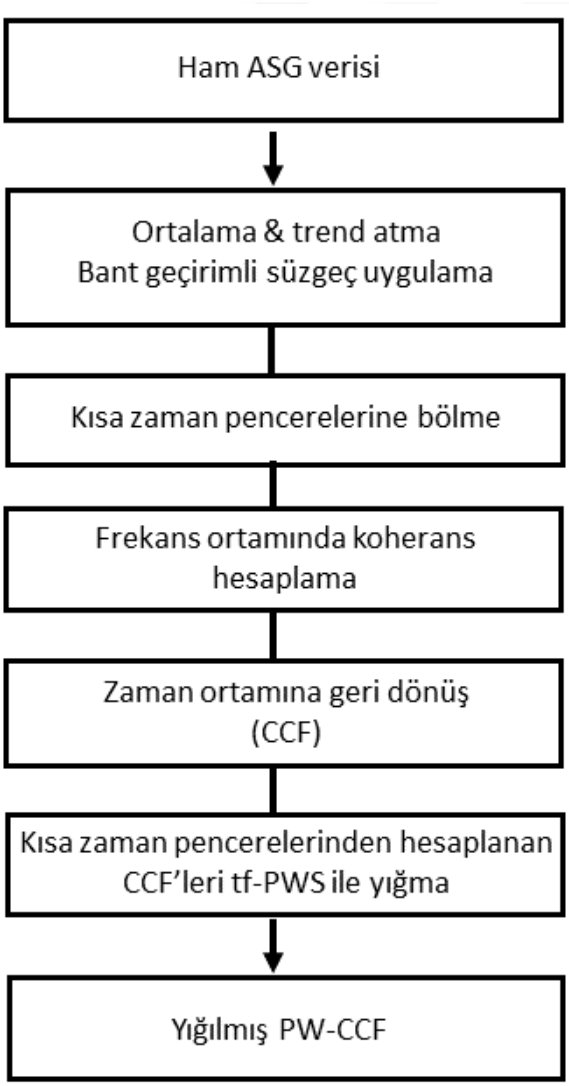
Bu denklemde $S_i(\tau, f)$, $CCF_i(\tau)$'nun S-dönüşümünü, n yığılacak zaman penceresi sayısını, a ise dönüşümün keskinliğini belirleyen ve Schimmel & Gallart (2007)'de 2 olarak alınması önerilen bir tamsayıdır. Denklem 3.1'de $S^{-1}[\,.\,]$ ters S-dönüşümünü göstermektedir ve $C_{ps}(\tau, f)$ izlerin faz-uyumlu bölümlerinin güçlendirilmesini sağlayan bir ağırlıklandırma faktörü olarak kullanılır. $S_L(\tau, f)$ ise doğrusal yığmanın S-dönüşümüne karşılık gelmektedir. Doğrusal yığma Denklem 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$CCF(\tau) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} CCF_i(\tau) \tag{3.3}$$

Burada $CCF_i(\tau)$ *i.* zaman penceresi için frekans-ortamı benzeşim prosedürü ile hesaplanan benzeşimi gösterir ve Denklem 3.4'teki gibi hesaplanır:

$$CCF_i(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{u_A(f)u_B^*(f)}{\{|u_A(f)|\}\{|u_B(f)|\}}\right] \quad (3.4)$$

Bu denklemde u_A ve u_B sırasıyla A ve B alıcılarındaki ASG'nin spektrumlarıdır. $\mathcal{F}^{-1}[\,.\,]$ ters Fourier dönüşümünü, yıldız işareti (*) karmaşık eşleniği, | . | köşeli parantez mutlak değeri ve {.} kıvrımlı parantez spektral yumuşatmayı göstermektedir. Denklem 3.4 ile uygulanan prosedür, çapraz ilişki hesaplamasından önce ASG spektrumunun yalnızca faz bilgisini koruyan bir frekans-ortamı spektral beyazlatmanın uygulanmasına karşılık gelmektedir. CCF'lerin hesaplanmasında etkili bir spektral beyazlatma yapabilmek ve duraysız sayısal etkileri önlemek amacıyla, 21 noktalı hareketli ortalama spektral yumuşatma uygulanmaktadır.



Şekil 3.4 : Yığılmış final PW-CCF'nin hesaplanmasında kullanılan veri-işlem akışı.

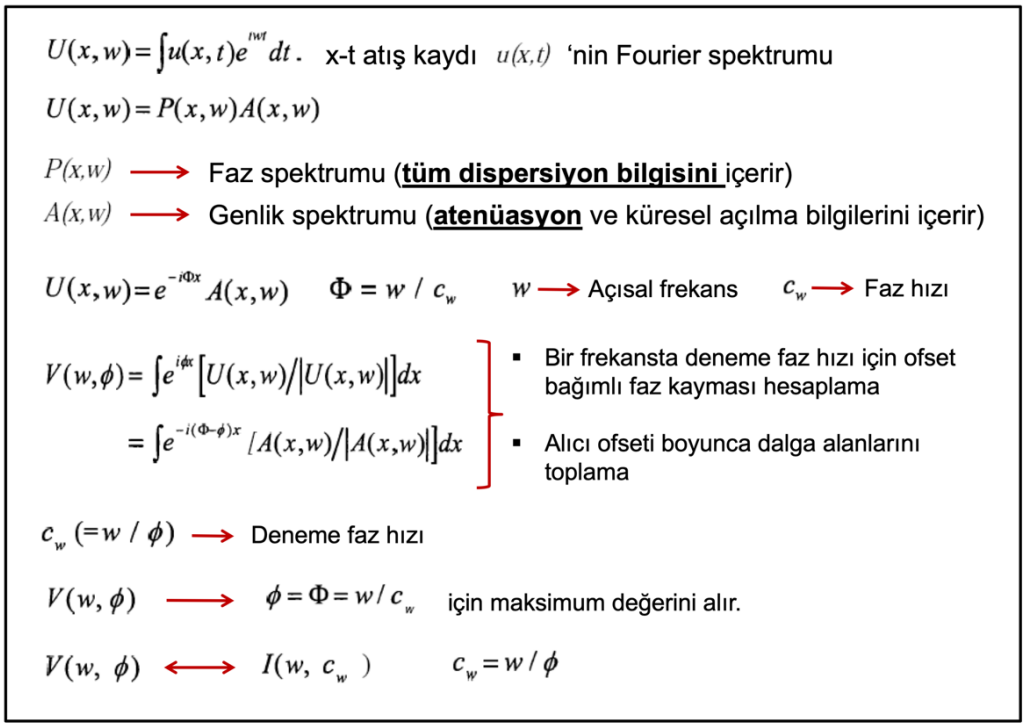
Denklem 3.4 ile $CCF_i(\tau)$'yu hesaplamak için tez kapsamında hazırlanan MATLAB kodu, yığılmış final PW-CCF'leri elde etmek için ise Corr_stack_v04 yazılım paketi (Schimmel ve Gallart, 2007; Schimmel ve diğ., 2011) kullanılmaktadır.

Veri işlemin son aşamasında, yığılmış final PW-CCF'lerden Rayleigh dalgalarının FHD özelliklerini elde etmek için MASW'de uygulanan faz-kayması dönüşümü kullanılmaktadır (Park ve diğ., 1998; Park ve diğ., 1999). MASW, yüzey dalgalarının çoklu modlarına ait FHD görüntüsünün çok alıcılı bir atış toplama tekniği kullanılarak elde edilebildiği bir aktif kaynaklı dizilim yöntemidir. Bu yöntem, her frekansta deneme faz hızları için ofsete bağlı faz kaymalarının uygulanmasına ve ardından faz kaydırılmış dalga alanının ofset üzerinden toplanmasına dayanır. MASW'nin çalışma prensibi sayesinde, birden fazla alıcının eş zamanlı olarak kullanılmasıyla maksimum hüzme gücü elde edilmiş olmaktadır.

MASW'de, eşit alıcı aralıklı, çok kanallı doğrusal bir alıcı dizilimi ile toplanan aktif atış kayıtları kullanılmaktadır ve analizde uzaysal çözünürlük ve örtüşme limitleri CVFK yöntemine benzer şekilde alıcı diziliminin maksimum açıklığına ve alıcı aralığına bağlıdır. Maksimum açıklığın, düşük frekans bileşenlerinin yayınmasıyla ilişkilendirilen uzun dalga boylarını, yani küçük dalga sayılarını, güvenilir şekilde örnekleyebilmek için yeterli uzunlukta olması gerekmektedir. Konservatif bir yaklaşım ile, maksimum dizilim açıklığının genel olarak istenen maksimum araştırma derinliğinden iki veya üç kat daha uzun olması önerilir. En küçük alıcı aralığının ise, yer yüzeyine yakın katmanların hızlarını çözümleyebilmek için gerekli olan yüksek frekanslı dalgaların yayılması ile ilişkilendirilen kısa dalga boylarının güvenilir bir şekilde örneklenebilmesine uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Dalga boyu, dizilimde kullanılan alıcı aralığının 2 katı ve daha uzun olan sinyaller uzaysal örtüşmeye uğrayacağından dizilimdeki alıcı aralığı (sığ zemin karakterizasyonu çalışmalarında genel olarak 0.5-4m) sinyalde beklenen minimum dalga boyuna uygun olarak belirlenmektedir (Foti ve diğ., 2018). MASW'de yakın alan etkileri, kaynak-alıcı ofsetinin analiz edilen sinyallerin dalga boyuna göre kısa kaldığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler, dizilimde kaydedilen sismik sinyallerde bozulmalara neden olabilmektedir. Bunun sonucunda, FHD bilgisi özellikle düşük frekans bandında doğru şekilde elde edilememekte ve faz hızları olduğundan düşük kestirilebilmektedir (Yoon ve Rix, 2009; Li ve Rosenblad, 2011; Roy ve Jakka, 2017; Rahimi ve diğ., 2022). Buna karşılık, uzak alan etkileri, yüksek frekanslı sinyallerin enerjilerinin, artan kaynak-alıcı

mesafesiyle birlikte hızla azalmasına neden olan sönümleme etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, uygulamada kaynak ofsetinin hem yakın alan etkilerinden hem de uzak alandaki sönümlenmeden kaçınılabilecek mesafelerde (~5-20 m), ilgilenilen en uzun dalga boyu ve yeterli SGO'nun (≥ 10 dB) sağlanması da gözetilerek seçilmesi önerilmektedir (Foti ve diğ., 2018; Tremblay ve Karray, 2019).

MASW analizi, tez kapsamında kullanılmak üzere uyarlanan MATLAB kodu ile uygulanmaktadır. MASW'de uygulanan faz-kayması dönüşümü Şekil 3.5'te özetlenmiş olup ayrıntıları Park ve diğ. (1998)'de sunulmaktadır.

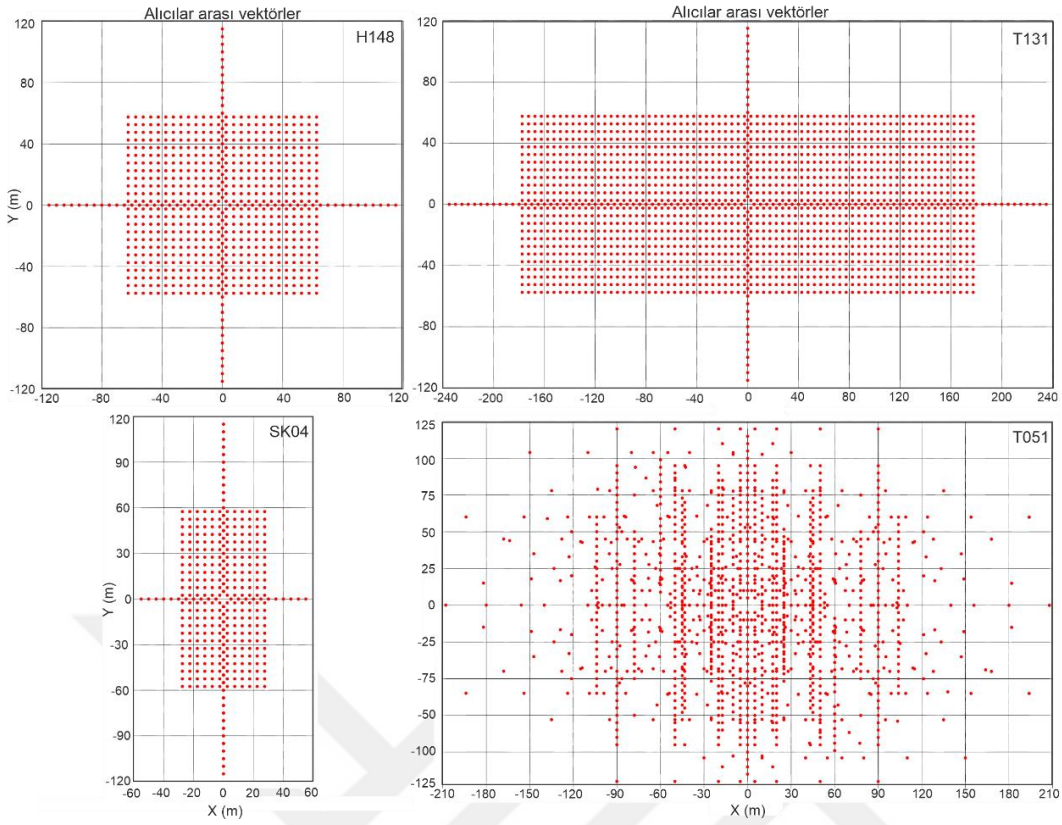


Şekil 3.5 : MASW'de uygulanan faz-kayması dönüşümü şeması. Park ve diğ. (1998)'den oluşturulmuştur.

1B sanal atış topluluğu (SAT)'nun elde edilmesi için yığılmış PW-CCF'lerin alıcı çifti aralıklarına bağlı olarak 1B bir alıcı hattına aktarılması, bir başka deyişle bu alıcı hattı üzerine izdüşürülmesi gerekmektedir. Bu işlemi yaparken ASG sinyallerinin, düz havza yapıları için yaygın olarak benimsenen şekilde yanal olarak homojen 1B ortamda yayındığı varsayılmaktadır. Bu işlemde karşılıklılık ilkesine (Aki ve Richards, 1980; Wapenaar, 2004) dayanarak 2B dizilimde yer alan her alıcı hem kaynak hem de alıcı olarak ele alınmakta ve 1B SAT topluluğu bu prensiple oluşturulmaktadır. Oluşturulan SAT'ler, negatif (nedensel olmayan) ve pozitif (nedensel) gecikme zamanlı olarak çift taraflıdır ve negatif ve pozitif

gecikme zamanlarında oluşan dalga formları, alıcı çiftleri arasında zıt yönlerde seyahat eden dalgaları temsil etmektedir. Eğer ASG kaynakları izotropik ise, negatif ve pozitif gecikme zamanlarında aynı sinyaller ortaya çıkacaktır. Bununla birlikte, ASG alanı genellikle izotropik olmayıp, genlik ve spektral içeriklerde yönlere göre asimetri göstermektedir. Bu nedenle, çift taraflı sinyallerin ortalanarak tek taraflı simetrik bileşene dönüştürülmesi PSİ'de yaygın bir uygulamadır (Bensen ve diğ., 2007). Bu çalışmada da, simetrik bileşen SAT'nin oluşturulması için, öncelikle negatif tarafın zaman gecikmesi terslenmekte, sonrasında pozitif ve negatif tarafların ortalamaları alınmaktadır. 2D PSI-MASW'de Rayleigh dalgası FHD bilgisinin elde edilmesi için oluşturulan bu simetrik 1B SAT'lere standart MASW veri-işlemi uygulanmaktadır.

MASW analizi sonucunda her bir frekansta deneme faz hızlarına karşılık gelen normalize edilmiş hüzme gücü değerlerinden oluşan, 2D PSI-MASW paneli olarak adlandırılan bir FHD görüntüsü (paneli) hesaplanmaktadır. Çoklu yüzey dalgası modlarına ait FHD eğrileri bu panel üzerinden maksimum hüzme gücü değerleri işaretlenerek belirlenmektedir. Her ölçüm sahasında ASG kaynaklarının izotropik şekilde dağılmış olmayabileceği göz önünde bulundurularak, 2D PSI-MASW ile FHD bilgilerinin doğru ve eksiksiz belirlenmesinde PSİ yaklaşımı ile sağlanan yönsel ve mesafesel çeşitlilik uzaysal örnekleme açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. PSİ yaklaşımı ile artan uzaysal örneklemeyi daha iyi gösterebilmek adına ölçüm sahalarında kullanılan 2B dizilimler için olası tüm interferometrik alıcı çiftlerinden hesaplanan alıcılar arası vektörler Şekil 3.6'da sunulmaktadır.



Şekil 3.6 : Ölçüm sahalarındaki tüm olası alıcı çiftleri için alıcılar arası vektörlerin (kırmızı noktalar) uzaysal dağılımı. Alıcılar arası vektörler Şekil 3.2'de sunulan 2B sismik dizilim geometrileri ile aynı oryantasyonda gösterilmektedir. Saha kodları sağ üst köşede verilmektedir.

Bu vektörler, bir alıcıdan diğerine hesaplanan yayınma mesafesine ve yönüne karşılık gelir (Kennett ve diğ., 2015). Alıcılar arası vektörlerin dağılımı oluşturulurken PSİ prosedüründeki karşılıklılık ilkesine göre her alıcı hem kaynak hem de alıcı olarak değerlendirilmiştir. Buna göre alıcılar arası vektörler tüm alıcı çiftleri üzerinden çift yönlü olarak hesaplanmakta (Şekil 3.2a ve d) ve sonuç olarak toplam alıcılar arası vektör sayısı alıcı çifti sayısının iki katı kadar olmaktadır. Örneğin, H148 sahasında kullanılan dizilim geometrisinde toplam n = 48 alıcı bulunmaktadır. Buradan [n (n – 1)/2] kullanılarak, toplam 1128 alıcı çifti ve dolayısıyla 2256 adet alıcılar arası vektör oluşur. Saha ölçümlerinde kullanılan alıcı, alıcı çifti ve vektör sayıları Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Ölçüm sahalarında kullanılan alıcı, alıcı çifti ve vektör sayıları.

Saha Kodu	Alıcı Sayısı (n)	Alıcı Çifti Sayısı [n (n-1)/2]	Vektör Sayısı n (n-1)
H148	48	1128	2256
T131	72	2556	5112
T051	42	861	1722
SK04	36	630	1260

2B dizilimler kullanılarak elde edilen alıcılar arası vektörlerin dağılımı, 1B dizilim geometrisi ile elde edilebilen tek yönlü örneklemeye kıyasla hem yönsel hem de mesafesel açıdan çok daha iyi bir uzaysal örnekleme sağlamaktadır (Şekil 3.6). H148 sahasında, alıcılar arası vektörler ile yaklaşık 60 m mesafeye kadar çok çeşitli yönler kapsanmakta, öte yandan daha uzun alıcılar arası mesafeler (60-115 m) alıcıların yoğun bir şekilde konuşlandırıldığı baskın yönler boyunca elde edilmektedir (Şekil 3.2a). T131 sahasında kullanılan antisimetrik dizilim sonucunda alıcılar arası vektörler X yönünde yaklaşık 180 m'ye kadar yoğun bir örnekleme sağlamakta, Y yönünde ise yoğun örneklemenin sağlandığı mesafe H148'dekine benzer şekilde 60 m ile sınırlı kalmaktadır (Şekil 3.2b ve Şekil 3.6). SK04 sahasında kullanılan 2B dizilim en az alıcı sayısına ve en kısa alıcı açıklığına sahip olduğundan (Şekil 3.2c), bu dizilimden oluşan alıcılar arası vektörlerin uzaysal örneklemesi de diğer sahalardakine göre daha zayıf kalmaktadır. SK04 için elde edilen alıcılar arası vektörler T131 sahasındakine benzer şekilde antisimetrik bir dağılım ile Y ve X yönlerinde sırasıyla 60 ve 30 m'ye kadar yoğun uzaysal örnekleme sağlamaktadır. T051 sahasındaki sismik dizilim düzeni, H148 sahasındakine göre daha uzun alıcılar arası mesafeleri içermekte ve yönsel ve mesafesel olarak iyi dağılmış bir alıcılar arası vektör kapsamı sağlayan birden fazla alıcı hattını barındırmaktadır. Alıcılar arası vektörler çoğunlukla 90° alıcı hattı yönünde yoğunlaşmıştır ve alıcılar arası mesafeler özellikle 100 m'ye kadar hemen hemen tüm yönlerde oldukça yoğun bir şekilde örneklenmektedir (Şekil 3.2d ve Şekil 3.6).

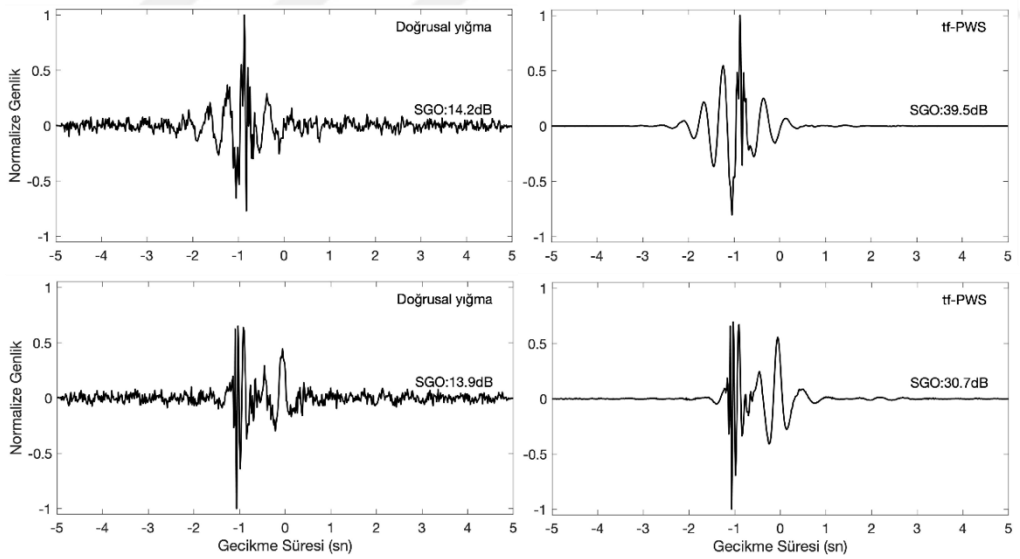
PSİ sayesinde, 2B dizilimdeki hat içi ve hatlar arası alıcı çiftleri çok çeşitli yön ve mesafelerin örneklenmesine ve ASG kaynaklarının izotropik olmayan dağılımından kaynaklanabilecek sorunların üstesinden gelinmesine veya bastırılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, 2D PSI-MASW yönteminin daha güvenilir ve eksiksiz Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde etmek için tek bir alıcı hattı kullanılmasından çok daha avantajlı olduğu söylenebilir.

3.3 2D PSI-MASW Yöntemi için Veri-işlem Aşamalarının Belirlenmesi

3.3.1 Zaman ortamı yığma tekniğinin belirlenmesi testi

2D PSI-MASW yönteminde kullanılacak olan zaman ortamı yığma tekniğine karar verilebilmesi için geleneksel doğrusal yığma ve zaman-frekans ortamı faz ağırlıklandırmalı yığma (tf-PWS) teknikleri uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. H148 ve T131 sahalarında toplanan ASG verilerinden, iki farklı yığma tekniği kullanılarak elde edilen yığılmış CCF'ler ve 2D PSI-MASW panelleri üretilmiştir. H148 ve T131 sahaları veri-işlem testlerine en uygun veri setlerini sunmaktadır çünkü bu sahalar için hesaplanan CVFK ve 2D PSI-MASW panellerinde 3 farklı mod (temel mod ile 1. ve 2. yüksek modlar) branşı gözlenebilmektedir.

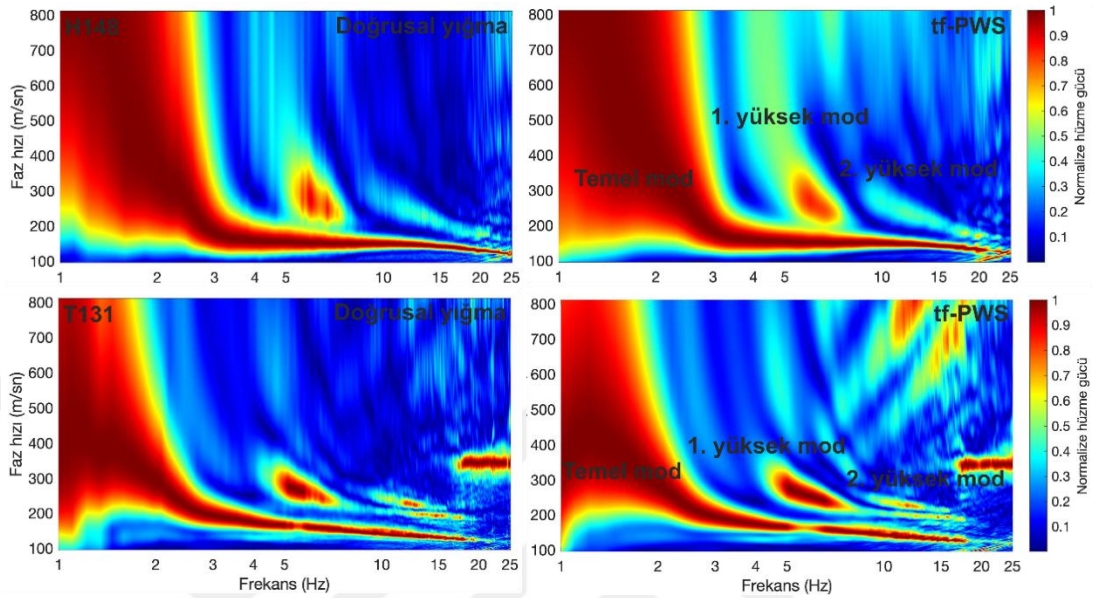
Öncelikle, iki farklı teknik ile elde edilen yığılmış CCF'ler hem görsel olarak hem de Sinyal-gürültü oranı (SGO) açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 3.7). SGO hesaplanırken Rayleigh dalgası paketinin gözlendiği -3 ile 1 sn aralığı sinyal bölümü, dalga paketinin kuyruğunda kalan 1 ile 5 sn aralığı ise gürültü bölümü olarak alınmıştır. Sonuç olarak; tf-PWS ile hesaplanan CCF'in SGO'sunun doğrusal yığma ile hesaplanan CCF'inkine göre 2-3 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.7 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında 001-024 alıcı çifti için doğrusal yığma (solda) ve tf-PWS (sağda) ile elde edilen CCF'ler. Kullanılan yığma tekniği sağ üst köşede, SGO değerleri ise iz üzerinde sağ tarafta gösterilmektedir.

İki farklı yığma tekniği ile, tüm alıcı çiftleri için üretilen CCF'lerin simetrik bileşenlerinin MASW ile işlenmesi sonucunda üretilen faz hızı panelleri mod ayrımlılığı ve

modların hüzme güçlerindeki değişim açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 3.8). Geleneksel doğrusal yığma yerine tf-PWS'nin kullanılması ile üretilen faz hızı panellerinde mod branşlarının ayrımlılığı artmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek modların hüzme güçleri yükselerek branşlar daha belirgin ve kolay işaretlenebilir hale gelmektedir.



Şekil 3.8 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında, doğrusal yığma (solda) ve tf-PWS (sağda) ile, tüm alıcı çiftleri için üretilen CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak elde edilen 2D PSI-MASW panelleri. Saha kodları sol üst köşede, kullanılan yığma tekniği sol üst köşede, mod bilgileri ise tf-PWS ile hesaplanan paneller üzerinde gösterilmektedir.

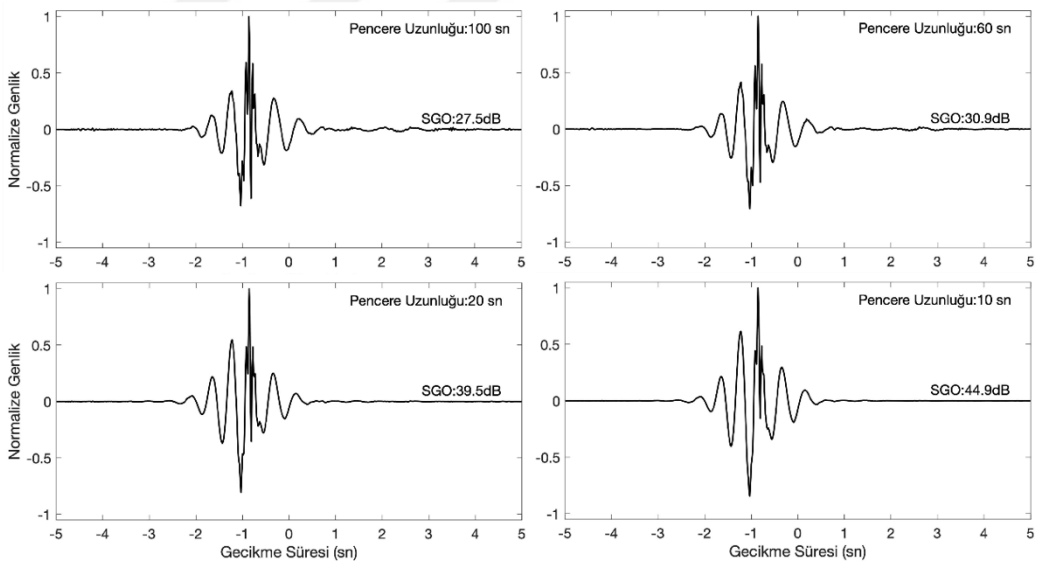
Sonuç olarak, tf-PWS'nin kullanılması ile beklendiği gibi ASG dalga alanındaki faz uyumlu sinyaller güçlendirilerek daha yüksek SGO'ya sahip yığılmış CCF'ler ve dolayısıyla daha doğru, çözünürlüğü daha yüksek ve dolayısıyla belirsizliği daha düşük FHD bilgisi elde edilebilmektedir. Bu nedenle, gerçek saha verilerinin yığılmış CCF'lerinin hesaplanmasında zaman ortamı yığma tekniği olarak tf-PWS'in kullanılmasına karar verilmiştir.

3.3.2 Frekans-ortamı benzeşim prosedüründe zaman penceresi boyunun seçilmesi testi

Frekans-ortamı benzeşim prosedürü ile PW-CCF'lerin hesaplanmasında duraysız sayısal etkilerden kaçınarak etkili bir spektral beyazlatma yapabilmek ve yüksek bir SGO oranı ile yüksek ve dengeli mod hüzme güçleri elde edebilmek için farklı zaman pencere uzunlukları kullanmanın etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, H148 sahasında toplanan ASG verisinden, farklı pencere uzunlukları kullanılarak PW-CCF'ler ve 2D PSI-MASW panelleri üretilmiştir. Farklı pencere uzunlukları ile elde edilen PW-

CCF'ler SGO açısından, hesaplanan faz hızı panelleri ise mod ayrımlılığı ve modların hüzme güçlerindeki değişim açısından karşılaştırılmıştır.

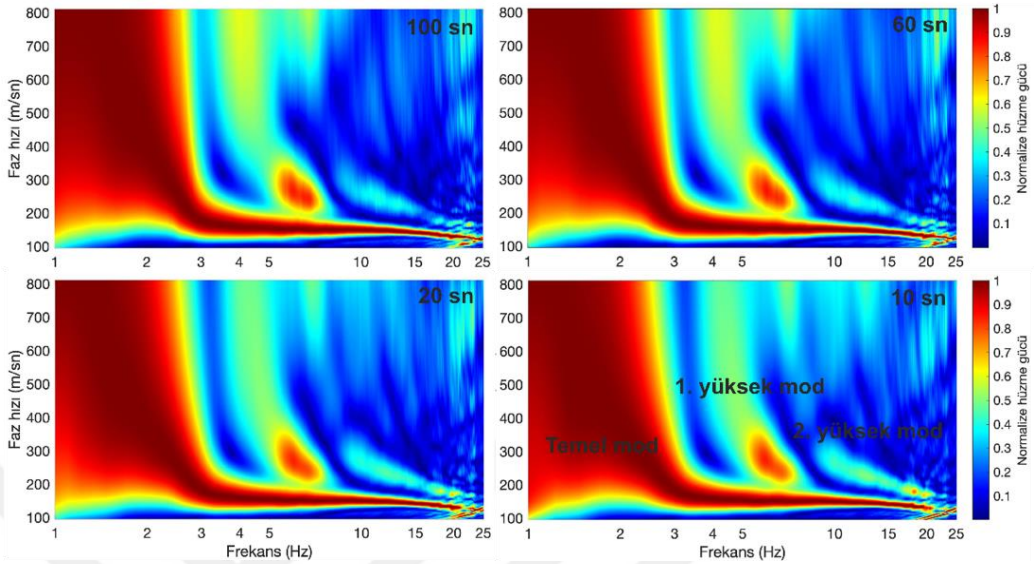
Şekil 3.9'da H148 sahası için 1. ve 24. alıcılar arasında 100 sn, 60 sn, 20 sn ve 10 sn pencere uzunlukları kullanılarak hesaplanan PW-CCF'ler sunulmaktadır. SGO hesaplaması bir önceki bölümdekiyle aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; pencere uzunluğu azaldıkça hesaplanan PW-CCF'lerdeki SGO artmaktadır. 100 sn pencere uzunluğu ile elde edilen PW-CCF için hesaplanan SGO 27.5 dB seviyesindeyken pencere uzunluğunun 10 sn'ye çekilmesi ile SGO 44.9 dB seviyesine ulaşmaktadır. 100 sn pencere uzunluğu ile elde edilen PW-CCF'te Rayleigh dalga paketinden sonra gelen yüksek genlikli salınımlar ve bu salınımların genliklerinin azalan pencere uzunluğu ile düştüğü ilk bakışta da gözlenebilmektedir (Şekil 3.9). Hesaplamanın kısa zaman pencerelerinde yapılmasının spektral beyazlatmanın etkin şekilde uygulanmasına katkı sağladığı ve kısa zaman pencerelerinde hesaplanan CCF'lerin zaman ortamında yığılması ile elde edilen PW-CCF'lerin SGO'sunun iyileştirildiği önceki çalışmalarda da tartışılmıştır (Bensen ve diğ., 2007; Medeiros ve diğ., 2015).



Şekil 3.9 : H148 sahasında 1 ve 24 nolu alıcılar arasında 100 sn, 60 sn, 20 sn ve 10 sn pencere uzunlukları kullanılarak elde edilen PW-CCF'ler. Pencere uzunlukları sağ üst köşede, SGO değerleri ise iz üzerinde sağ tarafta gösterilmektedir.

Şekil 3.10'da H148 sahasında tüm alıcı çiftleri için üretilen PW-CCF'lerin simetriK bileşenleri ile farklı pencere uzunlukları kullanılarak hesaplanan 2D PSI-MASW panelleri sunulmaktadır. Daha kısa (≤ 20 sn) pencerelerin kullanılması faz hızı panelinde gözlenen yüksek mod branşlarının hüzme gücünü ve mod ayrımlılığını göreceli

olarak arttırmakta, özellikle 2. yüksek mod branşının daha belirgin şekilde takip edilmesini ve daha geniş bir frekans bandında kesintisiz işaretlenebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.10 : H148 sahasında tüm alıcı çiftleri için üretilen PW-CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak 100 sn, 60 sn, 20 sn ve 10 sn pencere uzunlukları ile elde edilen 2D PSI-MASW panelleri. Kullanılan pencere uzunlukları sol üst köşede, mod bilgileri ise 10 sn pencere uzunluğu ile elde edilen panel üzerinde gösterilmektedir.

Bununla birlikte, pencere uzunluğunun azaltılması zamansal yığma işlemine girecek olan pencere sayısını dolayısıyla veri-işlem süresini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle hem veri-işlem süresi hem de elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak iyi bir SGO oranı, yüksek mod branşları için göreceli yüksek hüzme gücü ve mod ayrımlılığı ile birlikte iyi dengelenmiş bir spektrum elde edilmesini sağlayan 20 saniyelik zaman penceresi uzunluğu kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca, 20 sn'lik zaman penceresi uzunluğu ilgilenilen en düşük frekans olan $f_c = 2$ Hz için $\frac{40}{f_c}$'ye karşılık gelen bir analiz penceresi sağlamakla birlikte, hem CVFK veri-işleminde kullanılan frekans bağımlı analiz penceresi uzunluğu olan $\frac{50}{f_c}$, ye hem de Medeiros ve diğ. (2015) tarafından sunulan pencere uzunluğu seçimi yaklaşımına uygun bir seçenek olmaktadır.

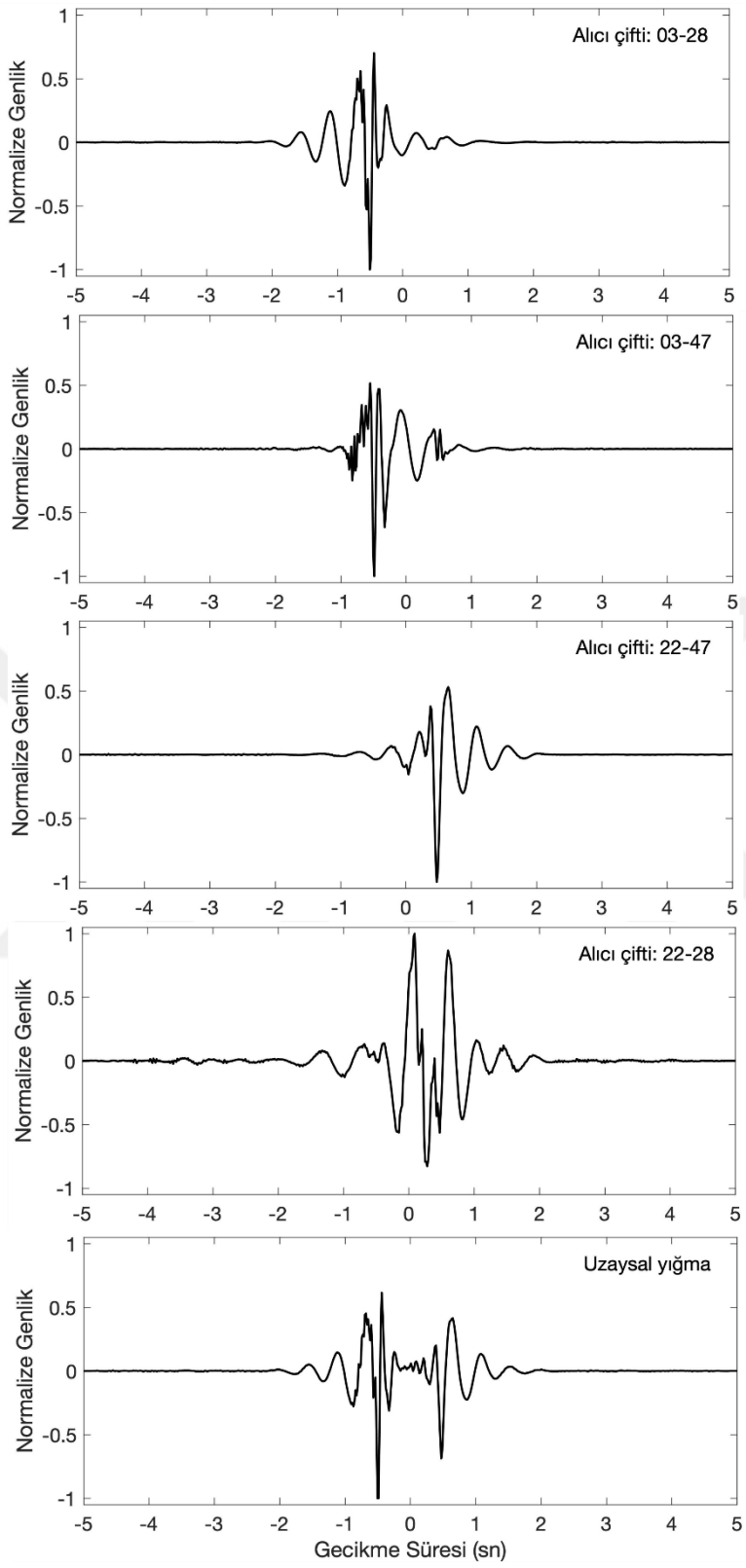
3.3.3 PW-CCF'lerin uzaysal olarak yığılması testi

Bu bölümde, hesaplanan PW-CCF'lerin alıcılar arası mesafelerine göre uzaysal olarak yığılmasının 2D PSI-MASW panellerine ve dolayısıyla elde edilen FHD bilgisine katkısının olup olmayacağı incelenmiştir. Testin amacı birbirine çok benzer ya da aynı alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinden üretilen PW-CCF'lerin yığılması ile elde edilen final PW-CCF'teki Rayleigh dalgası paketlerinin güçlendirilmesi ve sonuç olarak daha yüksek doğruluklu ve ayrımlı FHD bilgisi elde edilmesidir. Bu amaçla, uzaysal yığma aralığı 0.4 m, alıcılar arası mesafe tarama aralığı ise 0.5 - 1 m olarak belirlenmiştir. Bu işlemin sonucunda örneğin, 4.8 ve 5.2 m alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinden hesaplanan tüm PW-CCF'ler yığılmakta ve uzaysal olarak yığılmış PW-CCF'ler orta değer olan 5.0 m'ye atanmaktadır. Bu işlem tüm alıcılar arası mesafelerin taranması ile tekrarlanmakta ve sonuçta uzaysal olarak yığılmış PW-CCF'lerden oluşan sanal atış topluluğu (SAT) elde edilmektedir (Şekil 4.2, Şekil 4.8, Şekil 4.14, Şekil 4.18).

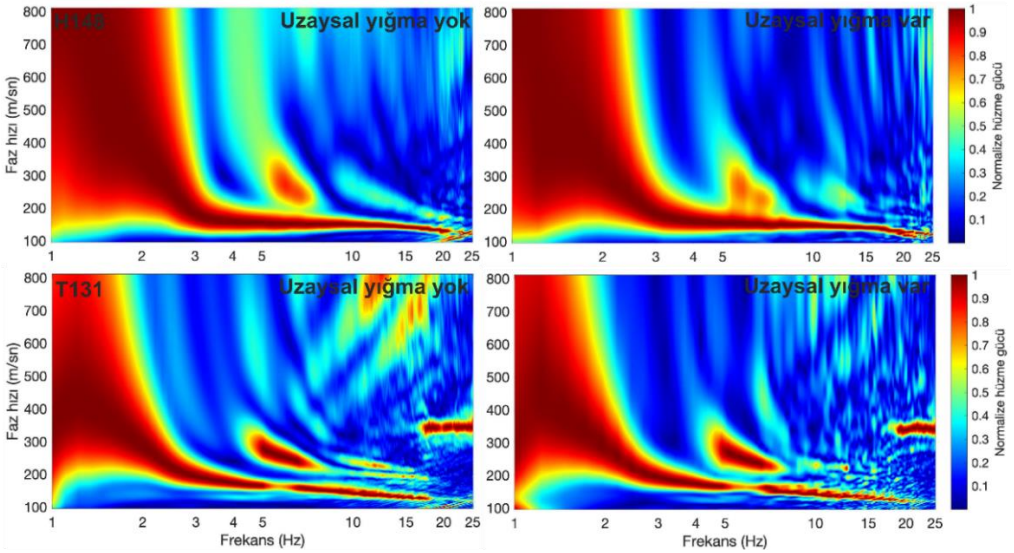
Şekil 3.11'de H148 sahası için gerçekleştirilen uzaysal yığma işlemi ile 66.8 m – 67.2 m aralığına düşen, dolayısıyla 67 m alıcılar arası mesafeye atanan 4 farklı PW-CCF ve bunların yığılması ile elde edilen uzaysal olarak yığılmış PW-CCF örnek olarak gösterilmektedir. Kullanılan alıcı çiftlerinin tümünün 2B dizilimdeki gerçek alıcılar arası mesafeleri bire bir aynı (67.17 m) olmasına karşın her bir alıcı çiftinden hesaplanan PW-CCF'te oluşan Rayleigh dalgası paketlerinin genlik ve frekans içeriği açısından birbirinden çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra, iki alıcı çifti (03-28 ve 03-47) için sinyal paketinin büyük bölümü nedensel kısımda, diğer iki alıcı çifti (22-47 ve 22-28) için ise nedensel olmayan kısımda gözlenmektedir. Bu nedenle, farklı alıcı çiftlerine ait PW-CCF'lerde münferit olarak var olan sinyaller yığma işlemi sonucunda yıkıcı girişime uğramakta ve uzaysal yığılmış PW-CCF'teki Rayleigh dalgası sinyalleri güçlenmemekte, aksine zayıflamaktadır.

H148 ve T131 sahalarında, mevcut tüm alıcı çiftleri kullanılarak, uzaysal yığma yapılmadan ve uzaysal yığma ile elde edilen PW-CCF'lerden hesaplanan 2D PSI-MASW panelleri Şekil 3.12'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Her iki saha için uzaysal yığma uygulanarak elde edilen 2D PSI-MASW panellerindeki FHD bilgisinde kayıp ve bozulmalar göze çarpmaktadır. H148 sahası için uzaysal yığma uygulanarak elde edilen 2D PSI-MASW panelinde temel ve 1. yüksek mod ayrımlılığının oldukça azaldığı, 2. yüksek modun ise neredeyse tamamen tanımsız hale geldiği görülmektedir.

T131 sahası için uzaysal yığma ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde ise benzer şekilde 1. ve 2. yüksek modların ayrımlılığı tamamen ortadan kalkmakta, bu durum 2. yüksek mod branşının tanımlanarak işaretlenebilmesini de imkansız hale getirmektedir. Bunun yanında, temel mod branşı için yüksek frekanslardaki çözünürlük azalmakta ve FHD belirleme hataları artmaktadır. 1. yüksek mod FHD bilgisi ise ~ 8 Hz ve üzerindeki frekanslar için elde edilemez hale gelmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda uzaysal yığmanın 2D PSI-MASW veri-işlem şemasına bir katkısının olmadığı, aksine FHD bilgisini bozucu etki yarattığı görülmüştür.



Şekil 3.11 : H148 sahasında 67 m alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinden hesaplanan PW-CCF'ler ve tüm bunların yığılması ile elde edilen uzaysal olarak yığılmış PW-CCF. Alıcı çiftlerinin kanal numaraları ve uzaysal yığma bilgisi sağ paneller üzerinde üst köşede verilmektedir.



Şekil 3.12 : H148 (üstte) ve T131 (altta) sahalarında, tüm alıcı çiftleri için üretilen CCF'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak hesaplanan PW-CCF'ler uzaysal olarak yığılmadan (solda) ve uzaysal olarak yığıldığında (sağda) elde edilen 2D PSI-MASW panelleri. Saha kodu sol üst, uzaysal yığma bilgisi ise sağ üst köşede gösterilmektedir. Mod branşı bilgileri Şekil 3.10'dan takip edilebilir.

İzotropik ASG kaynak dağılımının bulunduğu saha koşulları için birbirine yakın alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinin uzaysal yığmaya dahil edilmesinin uzaysal yığılmış PW-CCF'te yapıcı girişime katkı sağlaması ve dolayısıyla daha enerjetik Rayleigh dalgası paketleri oluşturması beklenir. Bunun doğal sonucu olarak da SGO artacak ve daha doğru ve eksiksiz bir FHD bilgisi elde edilebilecektir. Ancak, H148 ve T131 sahaları için aynı ya da çok yakın alıcılar arası mesafeye sahip ancak farklı doğrultulardaki alıcı çiftlerine ait PW-CCF'lerin uzaysal olarak yığılması tam tersi yönde bir sonuç vermektedir. Bunun sebebinin, izotropik olmayan bir ASG kaynak dağılımına (Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.9, Şekil 4.10) sahip bu sahalar için, uzaysal yığmaya giren alıcı çiftlerine ait PW-CCF'lerdeki sinyallerin bozucu girişime uğraması olduğu değerlendirilmektedir. Bekleneceği gibi bu durum faz gecikmesi bilgisini bozarak FHD sonuçlarını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak, faz gecikmesi bilgisini saklayabilmek ve daha doğru ve eksiksiz FHD bilgisi elde edebilmek için 2D PSI-MASW veri-işlem şemasında PW-CCF'lerin uzaysal olarak yığılmadan kullanılmasına, uzaysal olarak yığılmış PW-CCF'lerin ise yalnızca görüntüleme amacıyla oluşturulmasına karar verilmiştir (bkz. Bölüm 4.1.1).

4. GERÇEK SAHA VERİLERİNİN VE SENTETİK VERİ SETLERİNİN 2D PSI-MASW VE CVFK İLE İŞLENMESİ VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

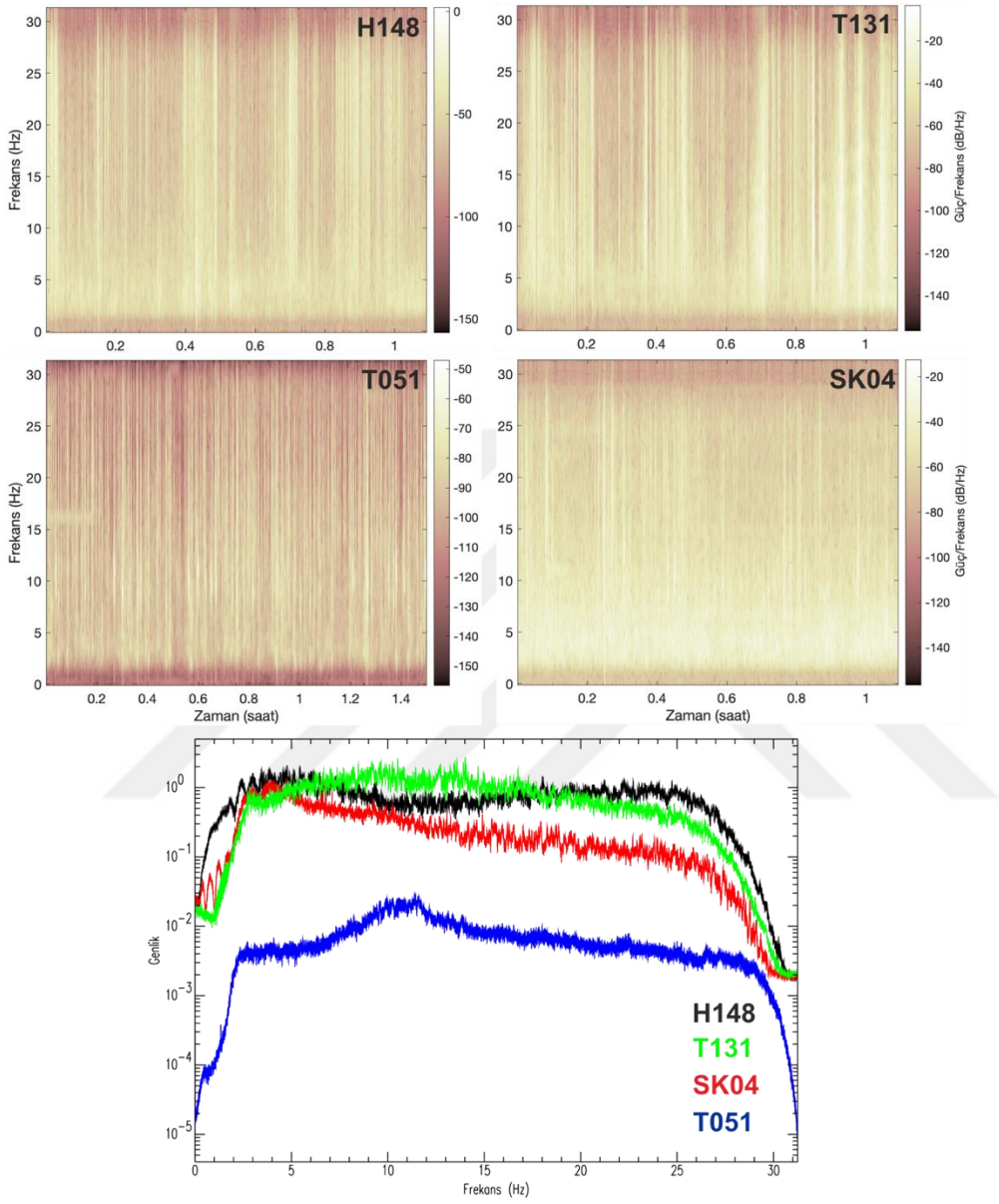
Bu bölümde, gerçek saha verileri ve üretilen sentetik ASG veri setlerinden 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak hesaplanan Rayleigh dalgası FHD panelleri, yöntemlerin çalışma prensipleri, kullanılan sismik dizilimlerin uzaysal limitleri, Rayleigh enerji integrali, v.b dikkate alınarak karşılaştırılmakta ve elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Gerçek saha verileri için öncelikle tekil 1B alıcı hatlarından elde edilen SAT'lerin nedensel ve nedensel olmayan kısımları analiz edilerek PSI-MASW panelleri elde edilmiştir. Sonrasında bu paneller, dizilimdeki tüm alıcı çiftleri için üretilen SAT'lerin simetrik bileşenleri kullanılarak elde edilen 2D PSI-MASW panelleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, CVFK yönteminden kestirilen ASG kaynak dağılımı ile tekil 1B alıcı hatlarından elde edilen PW-CCF'lerde ortaya çıkan Rayleigh dalgası paketleri arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu analizin amacı, interferometrik yaklaşımda tek bir alıcı hattı yerine 2B bir dizilim kullanmanın önemini ortaya koymaktır.

Sentetik ASG veri setleri, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin FHD belirleme performanslarının değişken ASG kaynak yoğunluğu ve yönsel dağılımı, kullanılan dizilim geometrisi, zemin hız yapısı, toplam veri boyu, mod içeriği, v.b koşullara bağlı şekilde karşılaştırılması ve yöntemlerin sınırlarının araştırılması amaçlanarak üretilmiştir. İlerleyen bölümlerde gerçek saha verilerinden ve üretilen sentetik veri sertlerinden elde edilen FHD sonuçları paylaşılarak değerlendirilmektedir.

4.1 Gerçek Saha Verilerinin 2D PSI-MASW ve CVFK ile Değerlendirilerek Sonuçların Karşılaştırılması

Her iki yöntemi kullanarak FHD analizi için frekans bandını belirlemek için, 4 ölçüm sahasında toplanan ASG kayıtlarının spektral özellikleri incelenmiştir. Bu kayıtların genlik spektrumları ve spektrogramları incelendiğinde geniş bir frekans aralığında ASG alanında yeterli sinyal gücünün sağlandığı görülmektedir (Şekil 4.1). Bu nedenle,

16 milisaniyelik bir zaman örneklemesi için 31,25 Hz olan Nyquist frekansı da göz önünde bulundurarak, analiz için kullanılabilir frekans bandı 1-25 Hz olarak belirlenmiştir.

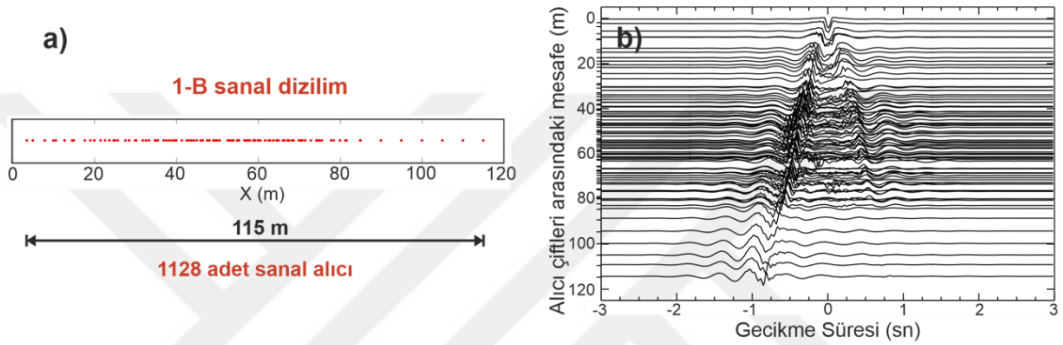


Şekil 4.1 : 4 farklı sahada toplanan ASG kayıtlarının spektrogramları (üstte) ve Fourier genlik spektrumları (altta). Spektrogramlar ve genlik spektrumları her bir saha için dizilimin 1 nolu kanalına ait ham kayıtlardan hesaplanmıştır. Saha kodları paneller üzerinde verilmektedir.

4.1.1 H148 ölçüm sahası için elde edilen sonuçlar

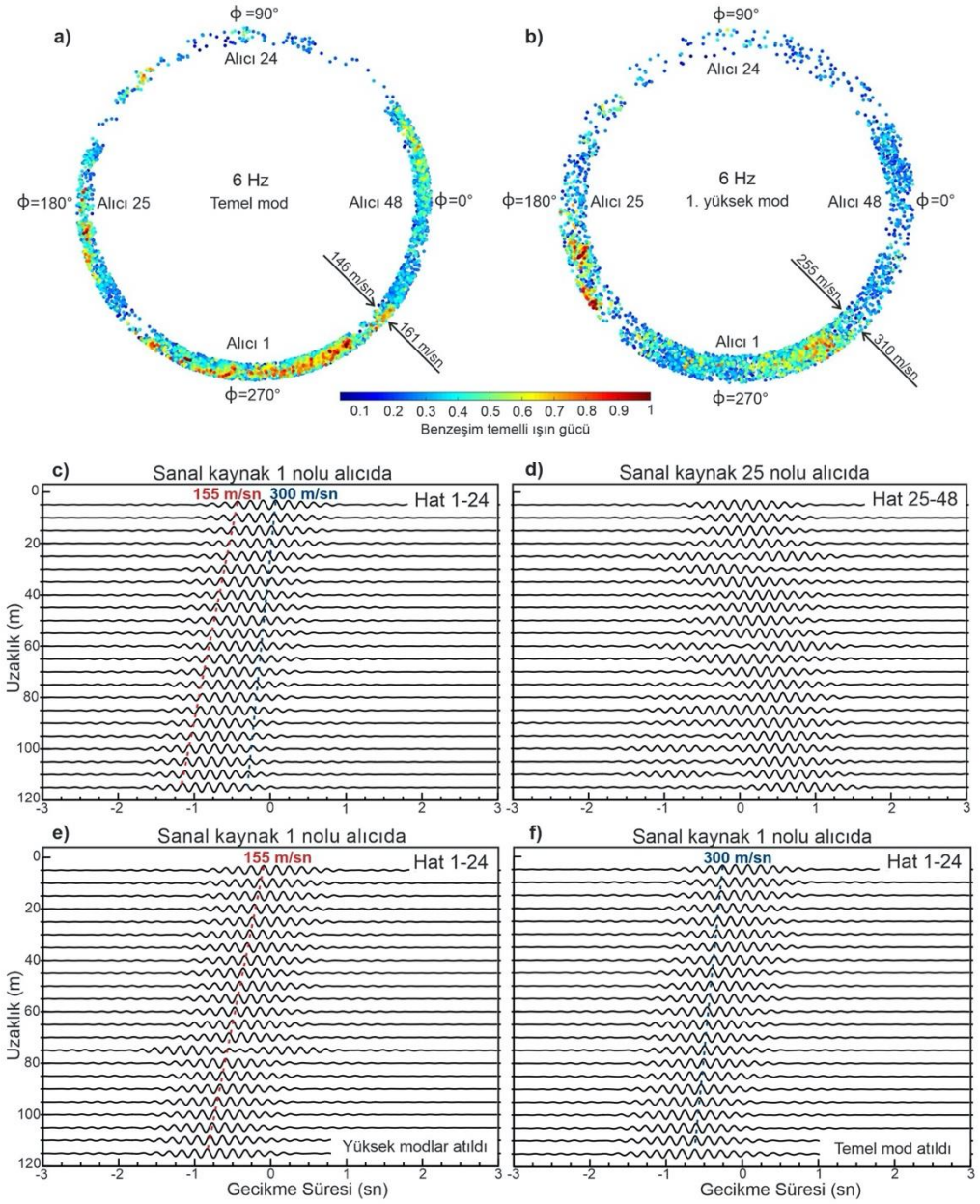
H148 sahası için, MASW analizinde kullanılan 1B sanal dizilim 1128 sanal alıcı çiftinden oluşmaktadır ve en büyük alıcı açıklığı D_{max} = 115 m'dir. 2B orijinal dizilim için de aynı D_{max} geçerlidir. Öte yandan, elde edilen SAT, aynı veya çok benzer

alıcılar arası mesafelere sahip bir çok alıcı çiftine sahiptir (Şekil 4.2a). Bu nedenle, SAT'lerde ortaya çıkan Rayleigh dalgası sinyallerinin net bir şekilde gözlenebilmesi için görüntüleme aşamasında Bölüm 3.3.3'te anlatılan uzaysal yığma prosedürü kullanılmıştır. Uzaysal yığma prosedürü, SAT'lerdeki mesafe örtüşmesini azaltmakta, böylece Rayleigh dalgası sinyalleri açıkça görünür hale gelmektedir (Şekil 4.2b). Uzaysal olarak yığılmış SAT'ler yalnızca görüntüleme amacıyla hesaplanmış olup, orijinal faz gecikmesi bilgisini saklayabilmek için MASW veri-işleminde uzaysal olarak yığılmış olanlar değil, 1B sanal dizilimi oluşturan tüm PW-CCF'ler kullanılmaktadır.



Şekil 4.2 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT.

ASG kaynaklarının belirli bir merkez frekansındaki yönsel dağılımını sunmak için, CVFK çıkış dosyasından analizde kullanılan tüm zaman pencereleri için standart sapma sınırları içinde elde edilen faz hızları, bunlara karşılık gelen yönler ve hüzme gücü değerleri seçilmektedir. Daha sonra, ASG kaynaklarının yönsel dağılımını gösteren bir halka grafiği oluşturulmaktadır. Halka grafiğinde çizilen vektörün yarıçapı faz hızı değerine karşılık gelmekte, yönü ise dizilim merkezine göre tanımlanmaktadır. Grafikteki renkler, benzeşime dayalı göreceli hüzme gücü değerlerini temsil eder (Şekil 4.3). Dizilim geometrilerine (Şekil 3.2) göre duraylı faz yönlerini tanımlamak için yön işaretleyicileri ∅ = 0, 90, 180, 270° 'de verilmektedir. ASG kaynaklarının yönlü dağılımı ile tekil 1B alıcı hatlarından (Hat 1-24 ve Hat 25-48) elde edilen nedensel ve nedensel olmayan SAT' ler arasındaki ilişki, sırasıyla 6 Hz ve 3 Hz merkez frekansları için Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmaktadır. Ek olarak, tekil hatlar üzerindeki tüm alıcı çiftlerinin dahil edildiği SAT'lerin nedensel olmayan ve nedensel kısımları kullanılarak hesaplanan PSI-MASW panelleri de karşılaştırma için Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : H148 sahası için, (a) temel mod ve (b) 1. yüksek mod için ASG kaynaklarının 6 Hz merkez frekansındaki yönlü dağılımı. Renkler benzeşime dayalı göreceli hüzme gücünü temsil etmektedir. Hat 1-24 ve Hat 25-48'in yönleri alıcı numaralarıyla (örn. Alıcı 1 ve Alıcı 24 şeklinde) belirtilmektedir. ∅ = 0°, 90°, 180°, 270° işaretlemeleri, dizilim geometrisine göre duraylı faz yönlerini tanımlamak için kullanılmıştır. Bir standart sapma içindeki tahmini faz hızları grafiklerde oklarla sunulmaktadır. (c) Hat 1–24 ve (d) Hat 25–48'den elde edilen SAT panelleri (6 Hz'de dar bant filtrelenmiş). Hat 1-24'ten (e) yüksek modları ve (f) temel modu eleyen f-k filtrelemesi ile oluşturulan SAT panelleri. SAT'lerdeki ilk ve son izler, sırasıyla sanal kaynak alıcısı ile ikinci alıcı (en üstteki iz) ve sanal kaynak alıcısı ile son alıcı (en alttaki iz) arasında hesaplanan PW-CCF'leri gösterir. Nedensel olmayan kısım, sanal kaynak alıcısından son alıcıya giden dalgaları, nedensel kısım ise son alıcıdan sanal

kaynak alıcısına giden dalgaları temsil eder. SAT'ler üzerindeki kesikli çizgiler, temel mod (kırmızı) ve 1. yüksek mod (mavi) için faz hızı eğimlerini gösterir.

6 Hz merkez frekansında ASG kaynaklarının büyük bölümünün hem temel mod hem de 1. yüksek mod için ∅ = 270° civarında bulunduğu görülmektedir (Şekil 4.3a ve b). Bu nedenle, ASG kaynakları tarafından bu yönden yayılan dalgalar yapıcı girişime uğrayarak Alıcı 1'den Alıcı 24'e doğru seyahat eden iyi gelişmiş Rayleigh dalgaları ile sonuçlanmaktadır. Bu durağan faz yönünden elde edilen faz hızları da nispeten daha yüksek hüzme gücü değerlerine sahiptir. Bu, Hat 1-24'ün SAT' sinin nedensel olamayan kısmında benzeşimi ve enerjisi yüksek temel ve 1. yüksek mod Rayleigh dalgalarını gözlemlememiz gerektiği anlamına gelmektedir. ∅ = 90° civarında konuşlanan ASG kaynakları çok daha düşük yoğunluk ve tutarlılığa sahip dağılım göstermektedir. Bu durumun nedensel kısımda her iki mod için Alıcı 24'ten Alıcı 1'e seyahat eden yüksek enerjili Rayleigh dalgalarının oluşmasının önüne geçmesi beklenir. Şekil 4.3(c)–(f)'de Hat 1-24 ve Hat 25-48'in 6 Hz-dar bant filtreli SAT'leri sunulmaktadır. Burada Alıcı 1 ve 25 sanal kaynaklar olarak düşünülmekte ve sonuç olarak oluşturulan SAT'lerde toplam 23 iz bulunmaktadır.

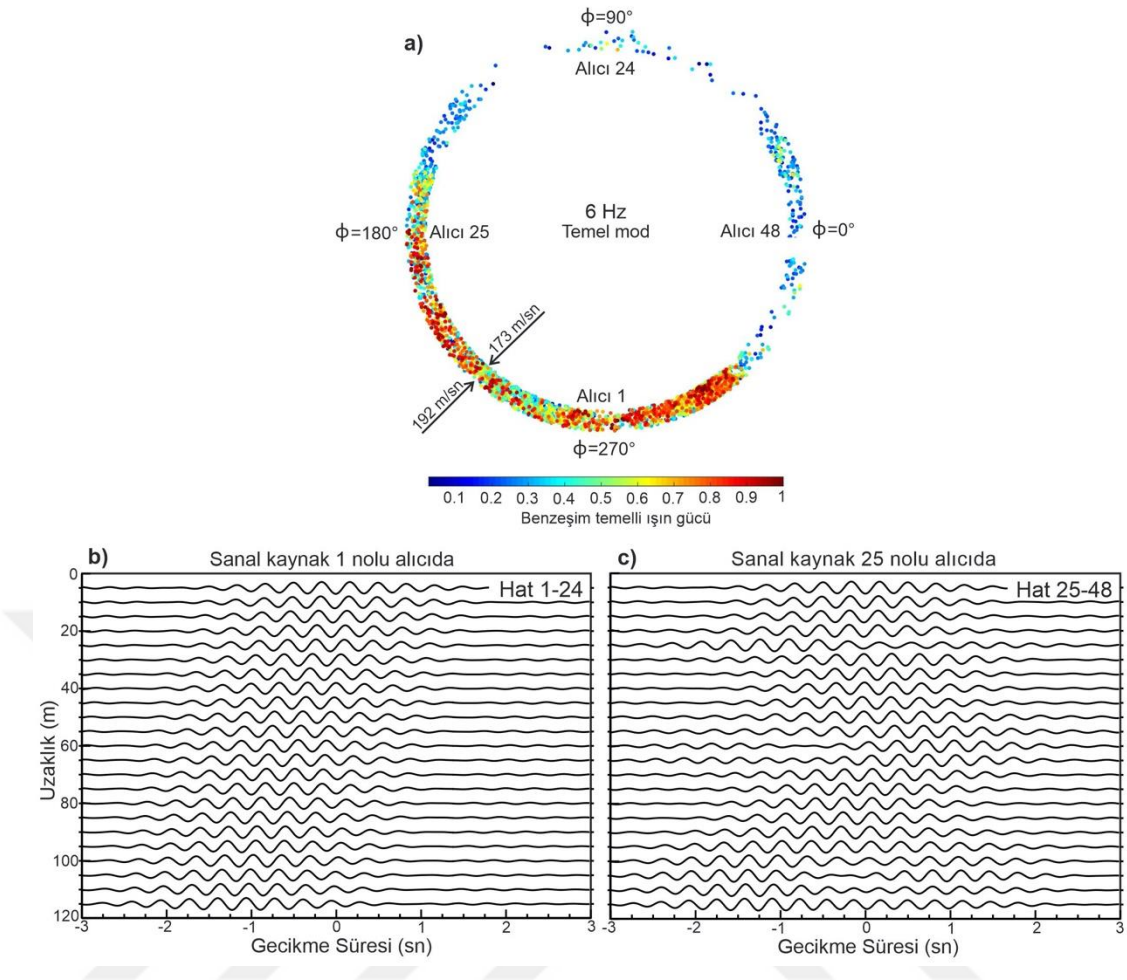
Filtrelenmiş SAT' lerde, ASG kaynaklarının yönlü dağılımının etkisi açıkça görülebilmekte ancak Hat 1-24 için kat edilen kısa mesafeler nedeniyle iki modun sinyalleri zamanda birbirinden yeterince ayrılamamakta ve bu nedenle örtüşme meydana gelmektedir. Hat 1-24'ün nedensel olmayan kısmından hesaplanan PSI-MASW panelinde (Şekil 4.5) 6 Hz frekansındaki maksimum hüzme güçlerine karşılık gelen faz hızları çekilerek SAT'de temel ve 1. yüksek mod faz hızı eğim çizgileri çizilmiştir (Şekil 4.3c). İki mod zamanda örtüştüğü için, 155 m/sn faz hızıyla hareket eden temel modu ve 300 m/sn 'lik bir faz hızı ile hareket eden 1. yüksek modu temsil eden iki ayrı dalga paketi SAT üzerinde görülmemektedir. Bu nedenle, tutarlı temel ve 1. yüksek mod Rayleigh dalgası paketlerini net bir şekilde göstermek için Hat 1-24'e ait SAT *f–k* filtre ile filtrelenmiştir. İlk olarak, temel mod Rayleigh dalgalarını ortaya çıkarmak için SAT'deki yüksek mod enerjisini bastıran bir *f-k* filtresi uygulanmıştır (Şekil 4.3e). Ardından, temel mod enerjisini eleyen bir *f-k* filtresi uygulanarak 1. yüksek mod Rayleigh dalgalarının daha iyi görülmesi sağlanmıştır (Şekil 4.3f).

f-k filtre ile filtrelenmiş SAT'lerden görülebileceği gibi, iki modun dalga paketleri filtrelemeden sonra gözle ayrılabilir hale gelmekte ve faz hızı eğim çizgileri, temel ve 1. yüksek mod dalgalarının doğrusal hareketini açıkça takip etmektedir. PSI-MASW

panelinde (Şekil 4.5) yüksek çözünürlüklü Rayleigh dalgası mod karakteristiği sağlayan bu tutarlı ve enerjisi yüksek Rayleigh dalgaları (Şekil 4.3c, e ve f), CVFK yönteminden elde edilen ASG kaynak yönleriyle de uyumludur. Özetle, temel ve 1. yüksek modlar için 6 Hz'deki FHD bilgilerinin, Hat 1-24'ten oluşturulan SAT'nin nedensel olmayan kısmından saptanabileceği görülmektedir. Buna karşılık, aynı SAT'nin nedensel kısmı kullanılarak herhangi bir FHD bilgisi çıkarılamamaktadır (Şekil 4.5). Bu nedenle, H148 ölçüm sahası için Hat 1-24 kullanılarak elde edilen PSI-MASW sonuçlarının CVFK yöntemi ile kestirilen ASG kaynak dağılımları ile çok iyi bir uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır.

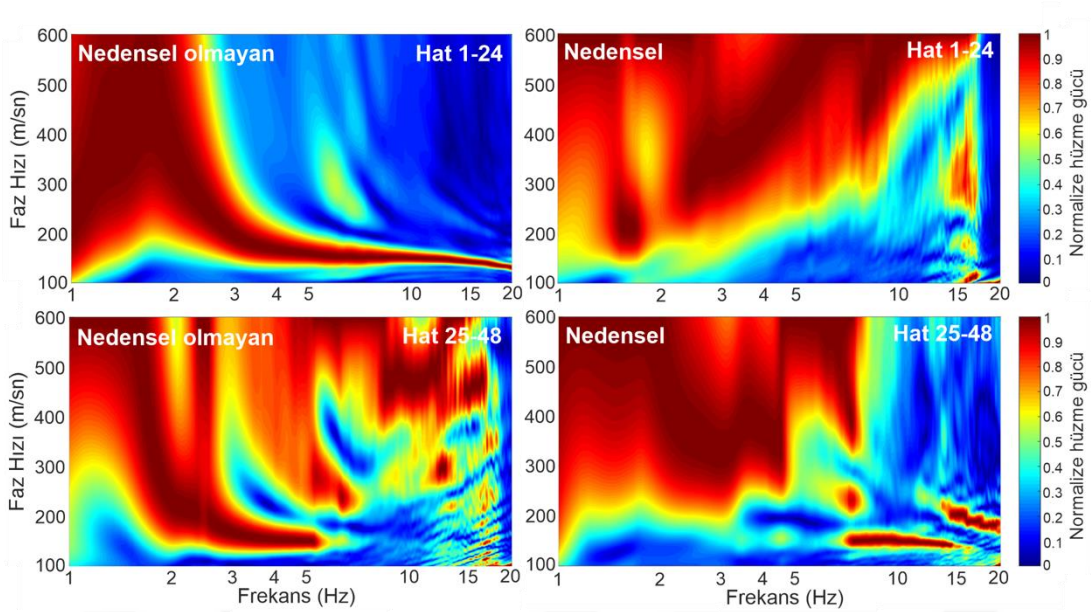
$\emptyset$ = 180° civarındaki seyrek dağılımlı ASG kaynakları temel ve daha yüksek modlar için nispeten yüksek hüzme gücü değerlerini göstermektedir (Şekil 4.3a ve b). Bu yön alıcı 25'ten alıcı 48'e seyahat eden dalgalara karşılık gelmekte ve 25–48 hattının SAT'sinin nedensel olmayan kısmında görülen tutarlı, ancak daha düşük enerjili dalgaları üretmektedir (Şekil 4.3d). Bu nedenle, her iki modun faz hızları, SAT'nin nedensel olmayan kısmından elde edilen FHD panelinde geri kazanılabilmektedir (Şekil 4.5). Öte yandan, 25-48 hattının SAT'sinin nedensel kısmında oluşan dalgalar, fazın düzensiz olarak değiştiği karmaşık bir davranış göstermektedir (Şekil 4.3d). Bu durumun, $\emptyset$ = 0°'de bulunan yoğun dağılımlı ancak düşük hüzme gücü gösteren ASG kaynaklarının, enerjisi yüksek ancak faz-uyumsuz dalgalar üretmesinden kaynaklandığı yorumlanmaktadır (Şekil 4.3a, b ve d). Bu nedenle, SAT'nin nedensel kısmından elde edilen panelde her iki modun faz hızları zayıf bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.5).

Sadece temel mod enerjisinin mevcut olduğu 3 Hz merkezi frekansı için benzer bir analiz Şekil 4.4'te sunulmaktadır. ASG kaynaklarının yönsel dağılımı Şekil 4.4(a)'da, birbirine dik iki alıcı hattından oluşturulan SAT'ler ise Şekil 4.4(b) ve (c)'de sunulmaktadır.



Şekil 4.4 : H148 sahası için, (a) 3 Hz merkez frekansındaki temel mod ASG kaynaklarının yönlü dağılımı. (b) Hat 1–24 'ten ve (c) Hat 25–48'den elde edilen SAT panelleri. Grafiklerin detaylı açıklaması Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

ASG kaynakları ∅ = 270° ve ∅ = 180° (Şekil 4.4a) civarında yüksek hüzme gücü değerleri verecek şekilde yoğunlaşmıştır. Bunlar sırasıyla Alıcı 1'den Alıcı 24'e ve Alıcı 25'ten Alıcı 48'e doğru durağan faz yönlerine karşılık gelmektedir. ASG kaynaklarının bu frekanstaki izotropik olmayan dağılımının, her iki alıcı hattından elde edilen SAT'lerin nedensel olmayan kısımlarında enerjisi yüksek Rayleigh dalgaları ile sonuçlanması beklenmektedir (Şekil 4.4b ve c). Bu sayede, SAT'lerin nedensel olmayan kısımlarından hesaplanan FHD panelleri üzerinde temel mod faz hızları belirlenebilmektedir (Şekil 4.5).

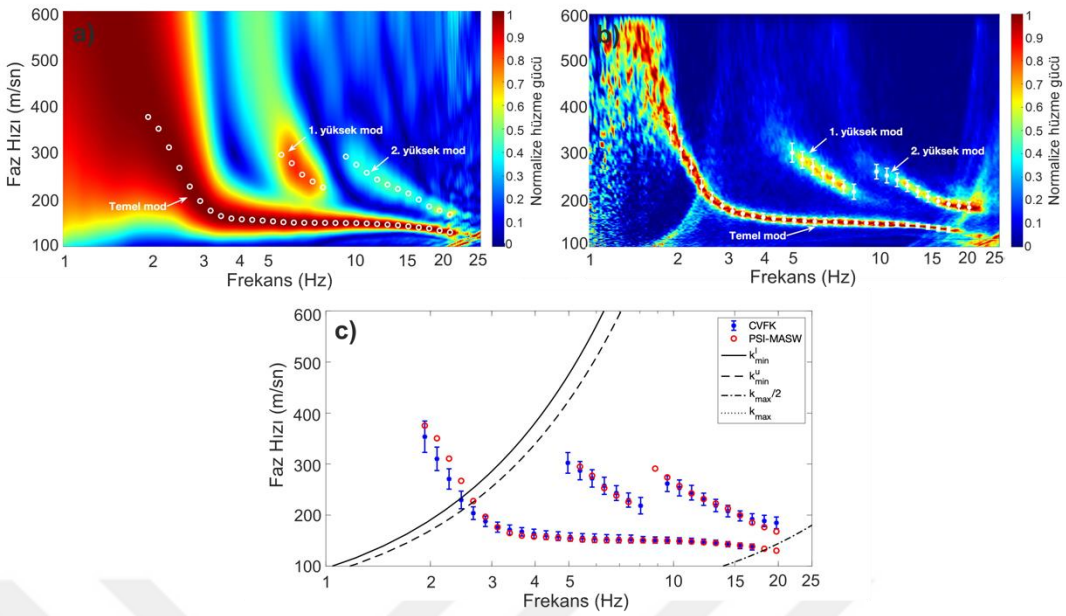


Şekil 4.5 : H148 ölçüm sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri. Hesaplamada kullanılan alıcı hatları ve SAT kısımları (nedensel olmayan veya nedensel) sırasıyla görüntülerin sağ üst ve sol üst kısmında belirtilmiştir.

ASG kaynakları, bu sahadaki her iki alıcı hattı için durağan faz yönlerine sahip izotropik olmayan bir dağılım göstermektedir. Buna bağlı olarak Şekil 4.5'te SAT'nin hem nedensel hem de nedensel olmayan kısımlarının, FHD panellerindeki temel ve yüksek mod karakteristiklerinin oluşmasına katkı sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.6(a), (b) ve (c)'de sırasıyla 1128 adet simetrik bileşen SAT'nin MASW analizi sonucunda hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli ve her iki yöntem ile elde edilen FHD eğrilerinin karşılaştırması sunulmaktadır.

2D PSI-MASW panelinde temel ve daha yüksek modların FHD eğrileri, her bir frekans için normalize edilmiş maksimum hüzme gücü ile işaretlenmiştir (Şekil 4.6a). Öte yandan, CVFK panelinde ortalama faz hızları ve karşılık gelen standart sapmalar şeklinde sunulmaktadır (Şekil 4.6b). Genel olarak, her iki FHD paneli, farklı Rayleigh dalgası modları olarak kolayca ayırt edilerek tanımlanabilen dispersiyon branşları göstermektedir (Şekil 4.6a ve b).



Şekil 4.6 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'nin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. Temel, 1. yüksek ve 2. yüksek Rayleigh dalgası modları için işaretlenen dispersiyon eğrileri, (a) ve (b)'de beyaz dairelerle gösterilmektedir. CVFK için hesaplanan standart sapmalar, (b)'de beyaz hata çubukları ile işaretlenmiştir. 2D PSI-MASW panelindeki (a) renk skalası normalize edilmiş hüzme gücünü, CVFK panelindeki (b) renk skalası ise normalize edilmiş sayımı (count) gösterir. (c)'de hata çubukları içeren mavi yıldızlar ve kırmızı daireler, sırasıyla CVFK ve 2D PSI-MASW yöntemleriyle kestirilen FHD eğrilerini gösterir. Kullanılan 2B dizilim için çözünürlük ve örtüşme limit eğrileri lejantta sunulan tanımlarıyla siyah çizgiler olarak sunulmaktadır.

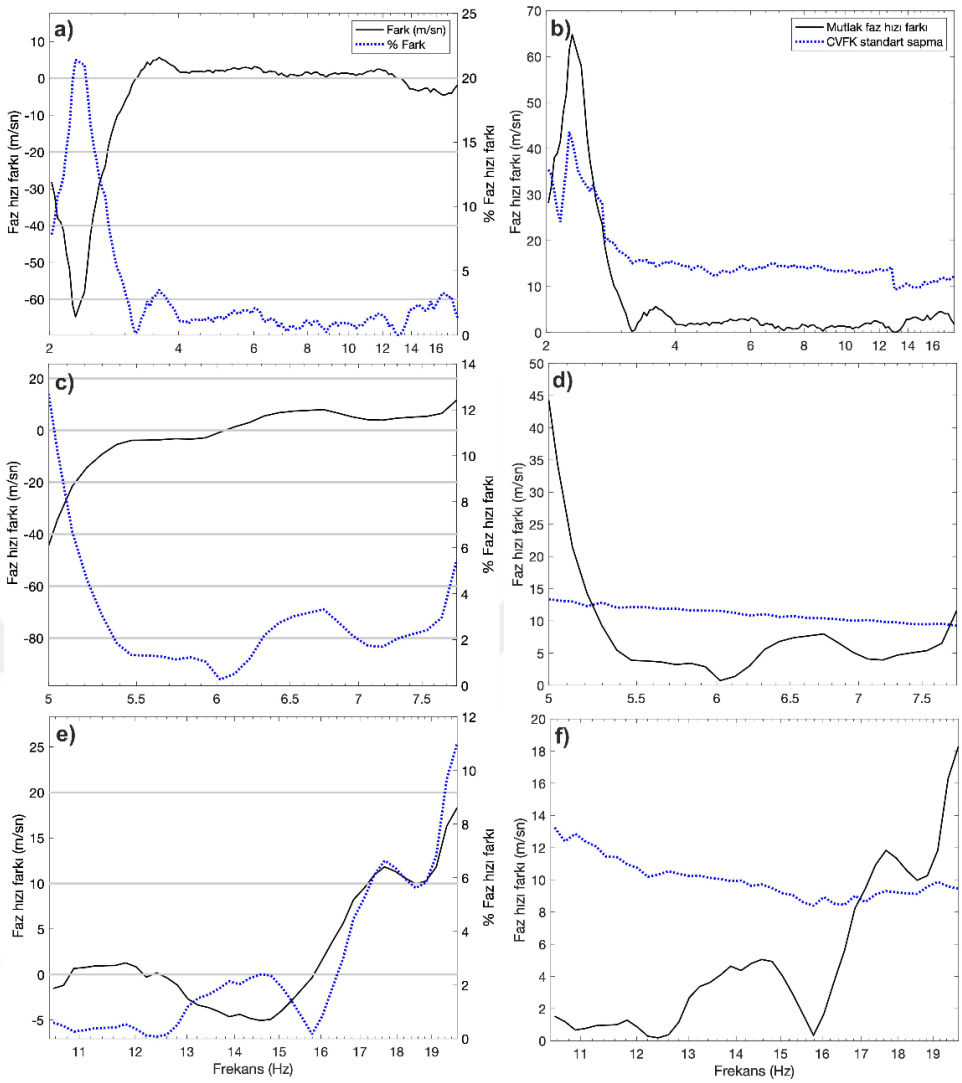
Temel mod, düşük frekans bandındaki CVFK panelinde iyi tanımlandığından, her iki panelde de düşük frekans ucunda yaklaşık 1,9 Hz'e kadar, çözünürlük sınırlarını aşacak şekilde, işaretlenmiştir. (Şekil 4.6). Temel mod açısından iki yöntemin performansları oldukça benzerdir ve seçilebilecek faz hızlarının frekans aralığı, yüksek frekans ucundaki fark dışında birbirine çok yakındır.

2D PSI-MASW panelinde temel mod faz hızları yaklaşık 20 Hz'e kadar tahmin edilebilirken, CVFK panelindeki çözünürlük 17 Hz'in ötesinde düşük kalmaktadır. Bununla beraber, her iki yöntemle 1. ve 2. yüksek modlar için faz hızlarının oldukça benzer frekans bir bandında elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.6). Temel mod için, 2D PSI-MASW yöntemi, çözünürlük sınırlarının ($\leq$ 2,6 Hz) aşıldığı frekanslarda CVFK yönteminden % 6-14 daha yüksek faz hızları vermektedir. Öte yandan, çözünürlük ve

örtüşme limitleri dikkate alındığında, her iki yöntemle elde edilen faz hızları, CVFK'den hesaplanan standart sapmalar içinde oldukça benzerdir (Şekil 4.6c).

2D PSI-MASW ile elde edilen nihai FHD panelindeki (Şekil 4.6a) temel ve 1. yüksek modların kestirilmesinde özellikle Hat 1-24'ün PW-CCF topluluğunun nedensel olmayan kısmı etkilidir (Şekil 4.5a). Bu hattın PW-CCF'inin nedensel kısmı ise yararlı bir FHD bilgisi sağlamamaktadır (Şekil 4.5b). Öte yandan, Hat 25-48'den oluşturulan SAT'nin nedensel olmayan kısmı, düşük frekans bandında iyi tanımlanmış temel ve 1. yüksek mod branşları gösteren bir FHD paneli üretirken, nedensel kısımdan elde edilen panelde ise daha yüksek frekanslarda temel ve 2. yüksek mod branşları kestirilmektedir (Şekil 4.5c ve d).

Şekil 4.7'de H148 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak elde edilen temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod faz hızı farkları CVFK'den belirlenen standart sapmalar ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Faz hızı farkları, her bir mod branşı için, aynı frekansta CVFK ile elde edilen faz hızından 2D PSI-MASW ile elde edilen faz hızının çıkarılması şeklinde hesaplanmıştır. Buna göre; dizilimin çözünürlük limitlerinin dışı ($f < 2.5$ Hz ve $f > 17$ Hz) da analize dahil edildiğinde, faz hızı farkları genel anlamda hiç bir mod için 65 m/sn'yi ve % 25'i aşmamaktadır (Şekil 4.7a-f). Temel mod için hesaplanan faz hızı farkları çözünürlük limitleri içerisinde (2.5 Hz $< f <$ 17 Hz) 30 m/sn'nin, dolayısıyla %10'un ve CVFK'den elde edilen standart sapmaların altında kalmaktadır (Şekil 4.7a ve b). 1. yüksek mod için hesaplanan faz hızı farkları 45 m/sn'nin ve % 20'nin altındadır. Bu mod için 5 Hz'de yaklaşık %20 olan faz hızı farkı 5.5 Hz'e kadar hızla düşerek daha yüksek frekanslarda % 6'nın ve standart sapmanın altında kalmaktadır (Şekil 4.7c ve d). 2. yüksek mod faz hızı farkları 17 Hz'e kadar % 10 seviyesinin ve standart sapmanın altında kalarak 17 Hz'den 20 Hz'e kadar yükselmekte ve % 25 seviyelerine ulaşmaktadır (Şekil 4.7e ve f). Tüm modlar için eksi ve/veya artı yönlü farkların bir arada elde edilmesi yöntemlerden herhangi birinin faz hızlarını değişen frekans ile sistematik bir şekilde olduğundan büyük ya da küçük belirleme yönünde bir eğiliminin olmadığını göstermektedir.

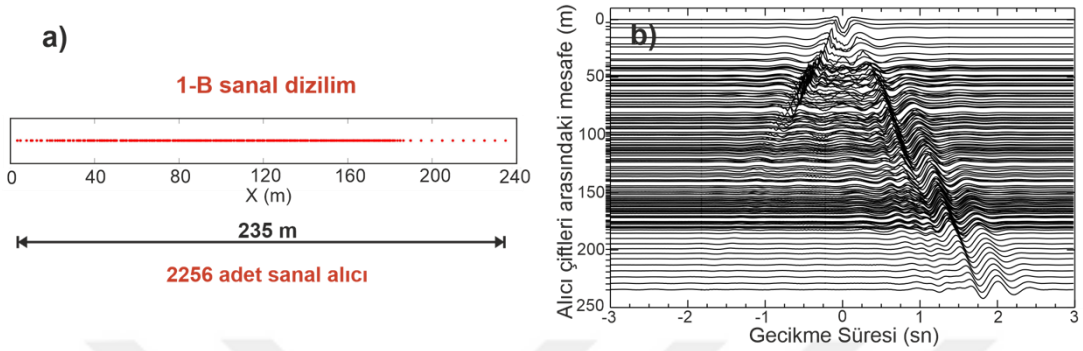


Şekil 4.7 : H148 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak temel mod (üstte), 1. yüksek mod (ortada) ve 2. yüksek mod (altta) için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. Lejant şeklin sağ üst bölümünde paylaşılmaktadır. Sol tarafta (a), (c), (e) faz hızı farkları hem m/sn cinsinden hem de % olarak verilmektedir. Sağ tarafta (b), (d), (f) ise mutlak faz hızı farkları CVFK standart sapma değerleri ile birlikte sunulmaktadır.

H148 sahası için elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, 1B sanal dizilimin simetrik bileşen SAT'leri MASW ile analiz edildiğinde, hem temel hem de yüksek modlar için iyi tanımlı FHD görüntüleri elde edilebilmektedir. Yapılan bu analizler, H148 sahasında ASG verilerinin 2B bir sismik dizilim yerine yalnızca 1B 25-48 hattı ile toplanmış olması durumunda, sahadaki izotropik olmayan ASG kaynak dağılımı nedeniyle çok daha düşük çözünürlüklü ve yetersiz mod ayrımına sahip bir FHD görüntüsünün elde edileceğini göstermiştir.

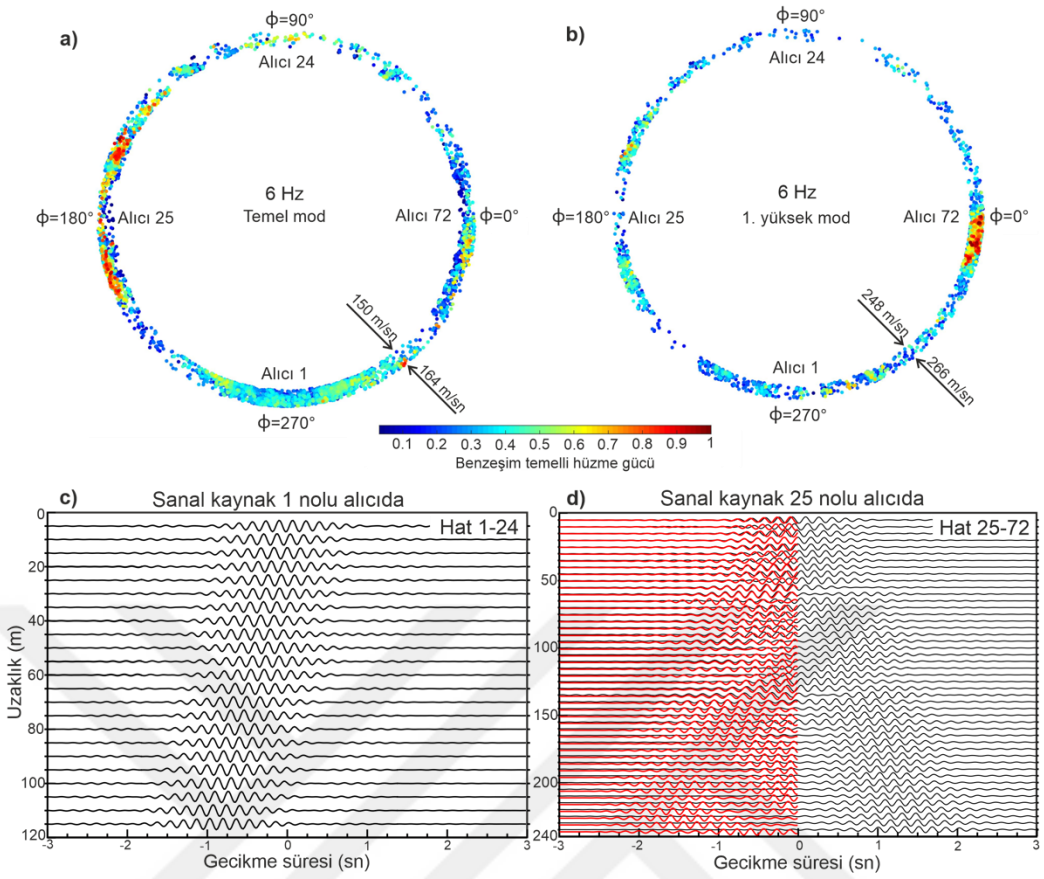
4.1.2 T131 ölçüm sahası için elde edilen sonuçlar

T131 sahası için kullanılan 1B sanal dizilim ve uzaysal olarak yığılmış SAT Şekil 4.8'de sunulmaktadır. 2D PSI-MASW analizinde kullanılan SAT 2256 sanal alıcı çiftinden oluşmaktadır ve en büyük alıcı açıklığı D_{max} = 235 m'dir.



Şekil 4.8 : H148 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT.

T131 sahası için ASG kaynaklarının seçilen frekanslardaki yön dağılımı ve birbirine dik 1B alıcı hatlarından (Hat 1–24 ve Hat 25–72) elde edilen SAT'ler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Karşılaştırma için, bu hatlardaki olası tüm alıcı çiftleri için üretilen simetrik SAT'lerin nedensel olmayan ve nedensel kısımları işlenerek elde edilen PSI-MASW görüntüleri de Şekil 4.11'de verilmektedir.

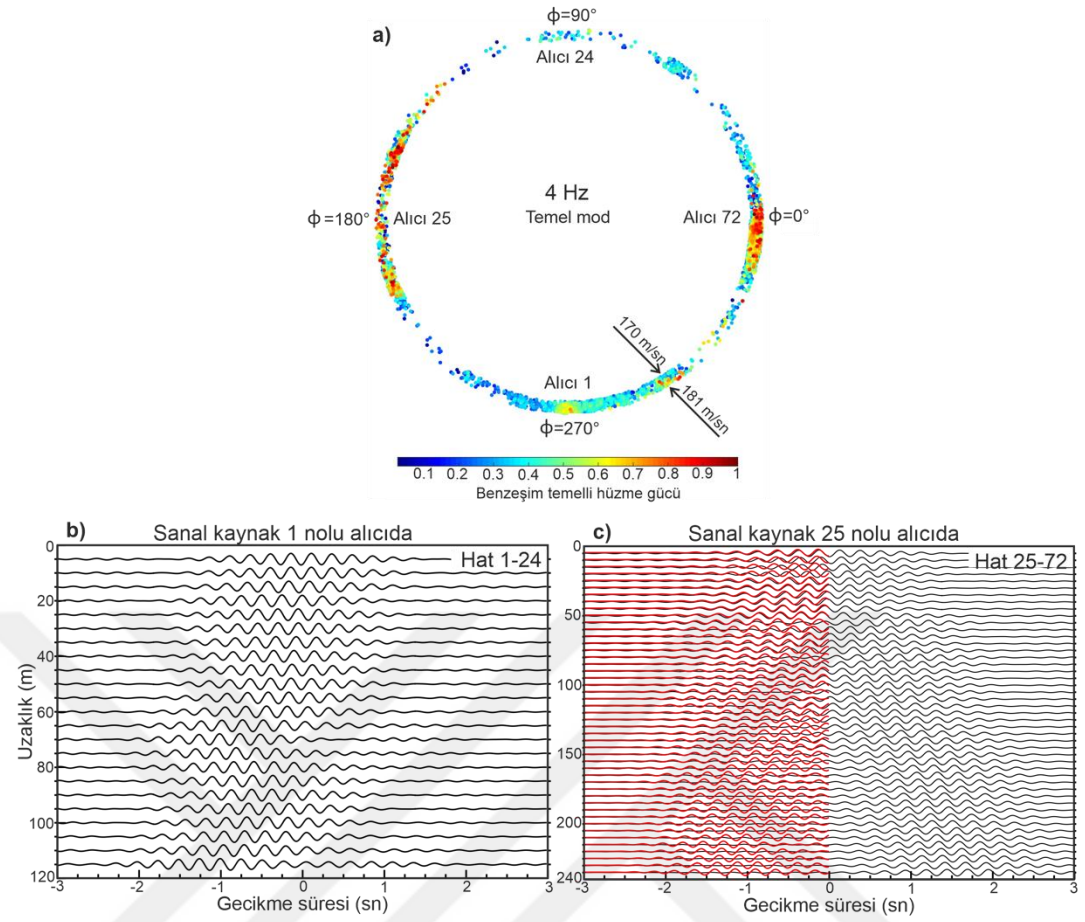


Şekil 4.9 : T131 ölçüm sahasında, (a) temel ve (b) 1. yüksek modlar için 6 Hz merkez frekansında ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, (c) Hat 1–24 'ten ve (d) Hat 25–72 'den elde edilen SAT panelleri. Hat 25-72'den elde edilen SAT için, hem genlik normalizasyonu uygulanmamış orijinal çift taraflı izler (siyah) hem de genlik normalizasyonu sonrası nedensel olmayan izler (kırmızı) görselleştirme için aynı panelde sunulmaktadır. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

6 Hz frekansında, Hat 1-24'ten elde edilen SAT, CVFK'den tahmin edilen ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (Şekil 4.9a) ile de tutarlı şekilde nedensel olmayan kısımda belirgin temel mod Rayleigh dalgaları göstermektedir (Şekil 4.9c). Bu dağılıma göre, Ø = 270° civarında bulunan kaynaklar Alıcı 1 yönünden gelen Rayleigh dalgalarını oluşturacak duraylı faz yönleri sağlamalıdır. Öte yandan, bu hattan elde edilen SAT'nin nedensel kısmında ne temel ne de 1. yüksek mod için net Rayleigh dalgası enerjisi gözlemlenememektedir (Şekil 4.9c) çünkü ASG kaynakları Ø = 90° civarında seyrek olarak dağılmıştır (Şekil 4.9a ve b). Sonuç olarak, nedensel kısımdan elde edilen FHD paneli herhangi bir yararlı bilgi sağlamazken temel mod bilgileri nedensel olmayan kısımdan elde edilen FHD panelinden belirlenebilmektedir (Şekil 4.11).

25-72 hattından elde edilen PW-CCF'in nedensel olmayan ve nedensel kısımlarından hesaplanan FHD panellerinde iyi tanımlanmış temel ve 1. yüksek mod branşları gözlenmektedir (Şekil 4.11). Bu durum aynı zamanda ASG kaynaklarının yönsel dağılımı ile de tutarlıdır. Bu dağılımda ASG kaynakları temel mod için ∅ = 180° civarında ve 1. yüksek mod için ∅ =0° civarında yüksek hüzme gücü değerleri ile yoğun bir şekilde yer almaktadır (Şekil 4.9a ve b). Bu nedenle, 25-72 hattından elde edilen SAT'nin sırasıyla nedensel olmayan ve nedensel kısımlarında tutarlı temel ve 1. yüksek mod dalgaları gözlemlenmesi beklenmektedir. Ancak beklenen bu durum ilk bakışta net olarak görülmemektedir (Şekil 4.9d). Bunun nedeni, nedensel olmayan kısımdaki tutarlı temel mod dalgalarının, nedensel kısımda bulunan 1. yüksek mod dalgalarından çok daha düşük genliğe sahip olmasıdır. Dolayısıyla, SAT nin nedensel olmayan kısmındaki temel mod dalgalarını düzgün bir şekilde görüntüleyebilmek için, bu kısma genlik normalizasyonu uygulanmış (Şekil 4.9d, kırmızı izler), ardından da normalize edilen izler orijinal iki taraflı SAT üzerine çizdirilmiştir (Şekil 4.9d, siyah izler). Bu normalizasyon işleminden sonra, faz uyumlu dalgalar SAT 'nin nedensel olmayan kısmında açıkça görülebilir hale gelmiştir. SAT'nin nedensel olmayan kısmından hesaplanan FHD paneli aynı zamanda 6 Hz civarında daha düşük hüzme gücü değerleri ile 1. yüksek mod faz hızlarını da göstermektedir (Şekil 4.11). Özetle, temel mod faz hızları büyük oranda nedensel olmayan kısmın işlenmesiyle sağlanırken 1. yüksek mod faz hızları ise genel anlamda nedensel kısımdan elde edilmektedir.

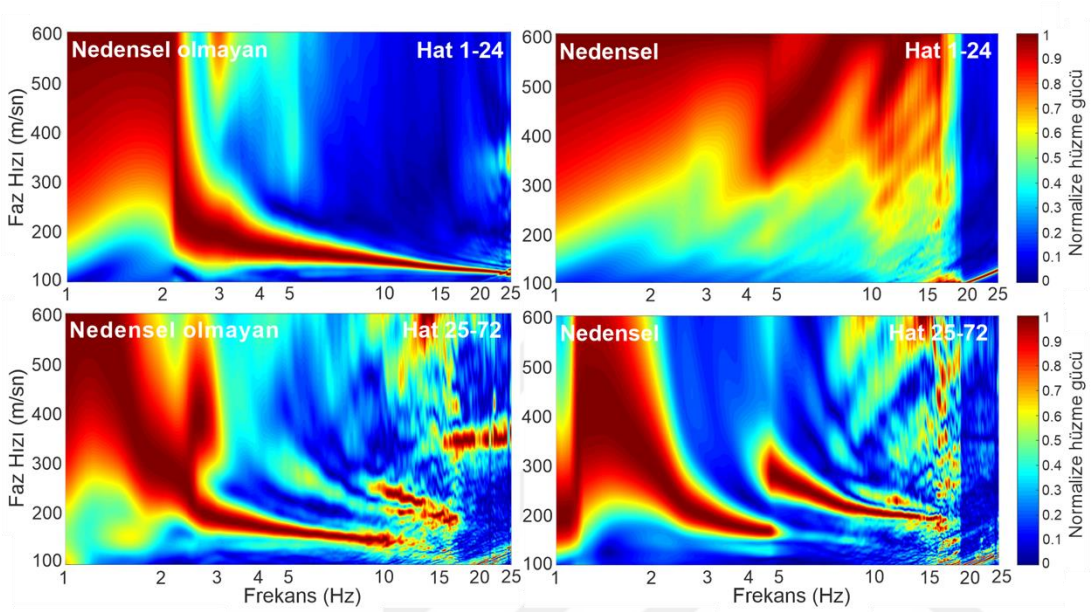
4 Hz merkez frekansındaki temel mod için ASG'nin yönsel dağılımı, Hat 1-24'ün SAT'sinin nedensel olmayan kısmında açık bir şekilde gözlenen temel mod dalgalarıyla da tutarlı şekilde, ∅ = 270° civarında kaynak konsantrasyonu göstermektedir (Şekil 4.10a). Öte yandan, ∅ = 90° civarında ASG kaynaklarının zayıf olması nedeniyle nedensel kısımda tutarlı Rayleigh dalgaları gözlemlenememektedir (Şekil 4.10b). Sonuç olarak, Hat 1-24'ten elde edilen SAT'nin nedensel olmayan kısmı kullanılarak iyi tanımlanmış temel mod bilgisi veren bir FHD paneli hesaplanırken, ∅ = 90°'de ASG kaynaklarının çok zayıf olması (Şekil 4.10a) ile de uyumlu şekilde nedensel kısımdan elde edilen FHD panelinden yararlı bir faz hızı bilgisi elde etmek mümkün olmamaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.10 : T131 sahasında, a) temel mod için 4 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı. b) Hat 1-24'ten ve c) Hat 25-72'den elde edilen SAT panelleri. Hat 25-72'den elde edilen SAT için, hem orijinal (normalizasyon öncesi) çift taraflı izler (siyah) hem de genlik normalizasyonu yapılmış nedensel olmayan izler (kırmızı) görselleştirme için aynı panelde gösterilmektedir. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

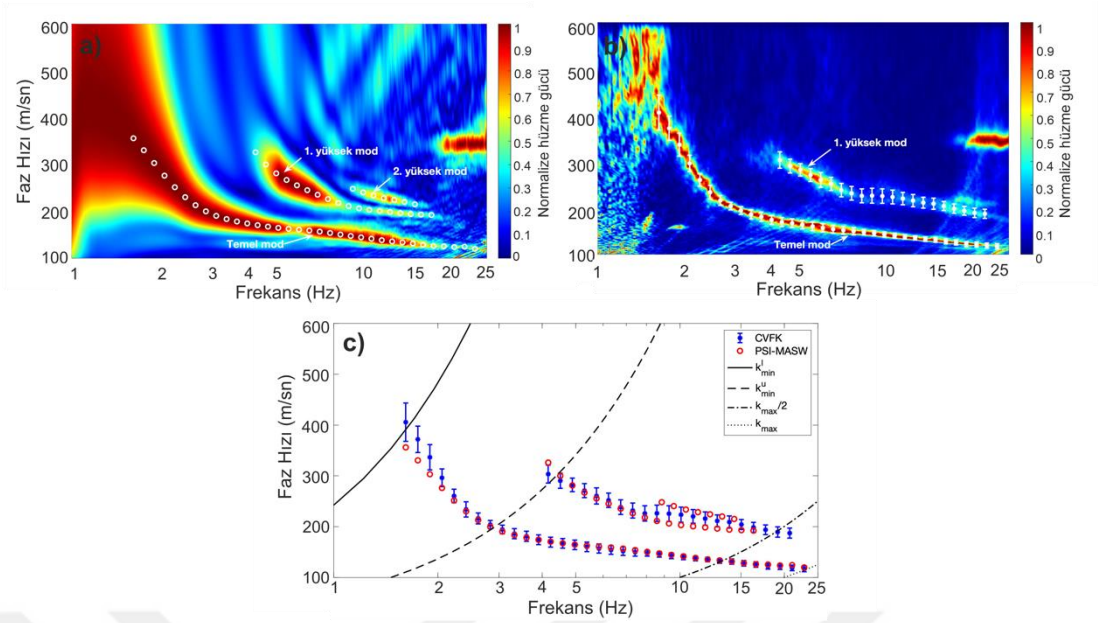
Hat 25-72 doğrultusunda ASG kaynakları Ø = 0° civarında yoğunlaşmış görünürken tam tersi yöndeki Ø = 180° civarında çok daha düşük yoğunluklu olarak bulunmakta, bu da iki yön arasında antisimetrik bir kaynak dağılımına neden olmaktadır (Şekil 4.10a). Bu duraylı faz yönleri Hat 25-72'den elde edilen SAT'nin her iki tarafında tutarlı Rayleigh dalgası sinyalleri ile sonuçlanması beklenen nispeten yüksek hüzme gücü değerleri göstermektedir. Ø = 180° civarında kaynakların dağılımı seyrek olduğu için nedensel olmayan kısımda gözlenmesi beklenen dalga paketlerinin görünürlüğü nedensel kısımdaki yüksek enerjili dalgalar (Şekil 4.10c, siyah izler) tarafından gölgelenmektedir. Bu nedenle, SAT'nin nedensel olmayan kısmının genliği, 6 Hz için yapıldığı gibi kendi içinde normalize edilmiş ve orijinal iki taraflı izler üzerine

çizdirilmiştir. Bu sayede tutarlı fazlara sahip ancak daha düşük genlikli Rayleigh dalgaları görünür hale gelmiştir (Şekil 4.10c, kırmızı izler). Sonuç olarak, Hat 25-72 için, 4 Hz'de, SAT'nin hem nedensel olmayan hem de nedensel kısımları kullanılarak elde edilen FHD panellerinde iyi tanımlanmış temel mod özellikleri elde edildiği söylenebilir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : T131 ölçüm sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.5 'teki ile aynıdır.

T131 sahası için 2D PSI-MASW ile CVFK yöntemleri kullanılarak elde edilen Rayleigh dalgası FHD panelleri ve bu yöntemler kullanılarak elde edilen FHD eğrilerinin karşılaştırması Şekil 4.12'de sunulmaktadır. Buna göre; 2D PSI-MASW panelinde temel modun yanı sıra 1. ve 2 yüksek modlar da ayırt edilebilirken (Şekil 4.12a), CVFK panelinde yalnızca temel ve 1. yüksek modlar tanımlanabilmektedir (Şekil 4.12b). Temel mod faz hızları her iki yöntem ile ~1.6–23 Hz frekans bandında kesintisiz olarak elde edilebilmekte ancak faz hızlarındaki fark (% 13) çözünürlük sınırının civarında standart sapmadan yüksek kalmaktadır (Şekil 4.12c). Her iki yöntem kullanılarak elde edilen FHD eğrilerinin çözünürlük limitleri dışında veya çevresinde önemli ölçüde farklılık göstermesi düşük frekans bandında faz hızlarını güvenilir şekilde belirlemek için bu limitlere uymanın önemini göstermektedir.



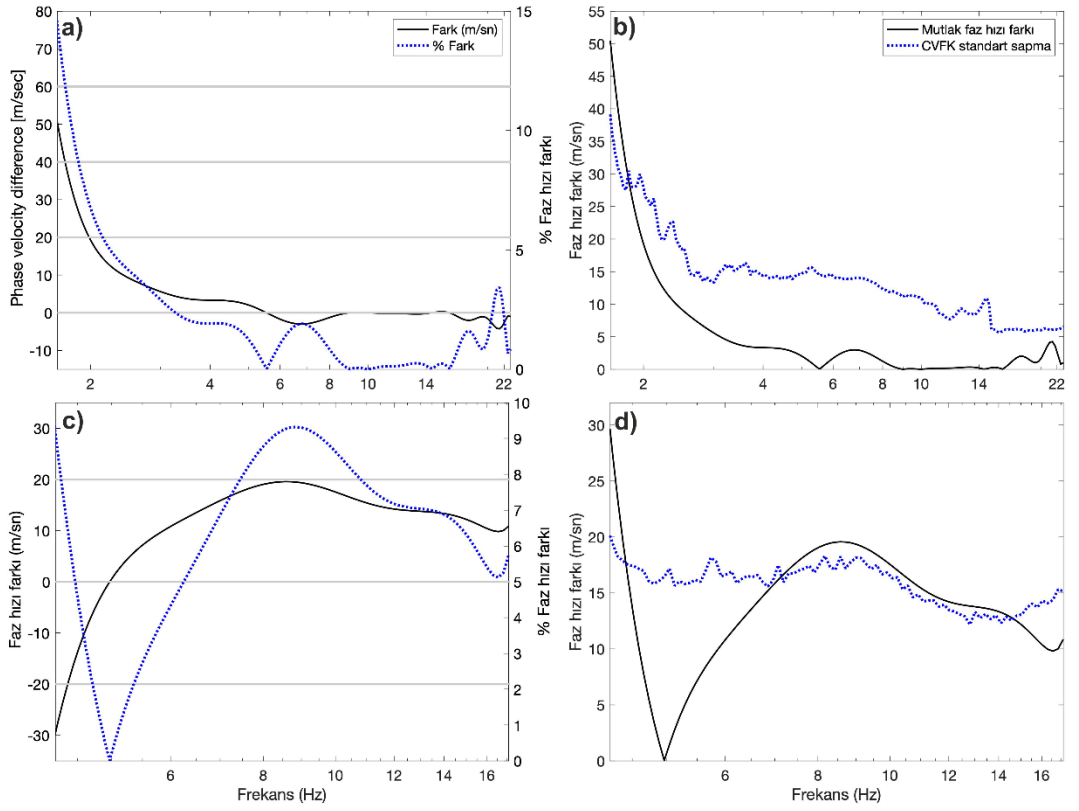
Şekil 4.12 : T131 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'nin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.6'daki ile aynıdır.

2D PSI-MASW panelinde 1. yüksek mod ile ilişkilendirilen iyi tanımlanmış bir hüzme gücü maksimumu 4 Hz'den 16 Hz'e kadar takip edilebilmektedir (Şekil 4.12a). Öte yandan, CVFK paneli 1. yüksek mod için yalnızca 4 ile 7 Hz frekans bandında iyi tanımlanmış bir dispersiyon karakteristiği göstermektedir. CVFK panelinde 7-15 Hz frekans bandında 1. yüksek modun FHD eğrisinin sürekliliğini takip etmeyi zorlaştıran bir enerji eksikliği gözlenmektedir (Şekil 4.12b). CVFK panelinde 15 ile 20 Hz arasında zayıf enerji ile tanımlanan bir dispersiyon branşı 1. yüksek modun devamı olarak yorumlanmaktadır. Bu saha için elde edilen en önemli sonuç ise, 2D PSI-MASW panelinde net bir ayrım ile gözlenebilen 2. yüksek mod branşına (Şekil 4.12a) karşılık CVFK panelinde 6 ile 14.4 Hz frekans aralığında ilgili modun herhangi bir imzasının bulunmamasıdır (Şekil 4.12b).

Dizilimin uzaysal çözünürlük ve örtüşme limitleri dahilinde, iki yöntemle elde edilen temel mod faz hızları arasındaki farklılıklar artan frekansla azalmakta ve standart sapmalar içinde kalmaktadır. İki yöntem ile hesaplanan faz hızları oldukça benzerdir ve faz hızı farkları 2 Hz'nin ötesinde hızla % 6 'nın altına düşmektedir (Şekil 4.12c ve Şekil 4.13).

T131 ölçüm sahası tarım yapılan bir bölgede yer almaktadır. Bu nedenle, iki FHD panelinde de 17-25 Hz frekans bandında, dispersiyon göstermeyen, ortalama 345 m/sn faz hızına sahip branşın ASG kaydı sırasında yakın alanda çalışan tarım makineleri tarafından üretilen ses dalgası (hava dalgası)'ndan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.12a ve b). 2D PSI-MASW panelinde gözlenen sabit hızlı bu branşın ses dalgası hızı ile örtüşmesi, yani doğru faz hızlarının elde edilmiş olması, ses dalgalarının kaynağı olduğu düşünülen tarım makinesinin alıcı dizilim hatları doğrultusunda yer aldığına işaret etmektedir.

Şekil 4.13'te T131 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak elde edilen temel ve 1. yüksek mod faz hızı farkları CVFK'den belirlenen standart sapmalar ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Buna göre, faz hızı farkları genel anlamda her iki mod için de 80 m/sn'nin ve % 15'in altında kalmaktadır.



Şekil 4.13 : T131 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak (a), (b) temel ve (c), (d) 1. yüksek modlar için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. Detaylı bilgi için Şekil 4.7'ye bakınız.

Temel mod açısından dizilimin yaklaşık çözünürlük limiti olan 1.6 Hz'de 80 m/sn seviyesine ulaşan faz hızı farkları artan frekans ile hızla düşerek 3.5-4 Hz'de neredeyse sıfır seviyesine inmekte, daha yüksek frekanslarda ise bu seviyede salınmaktadır. 2

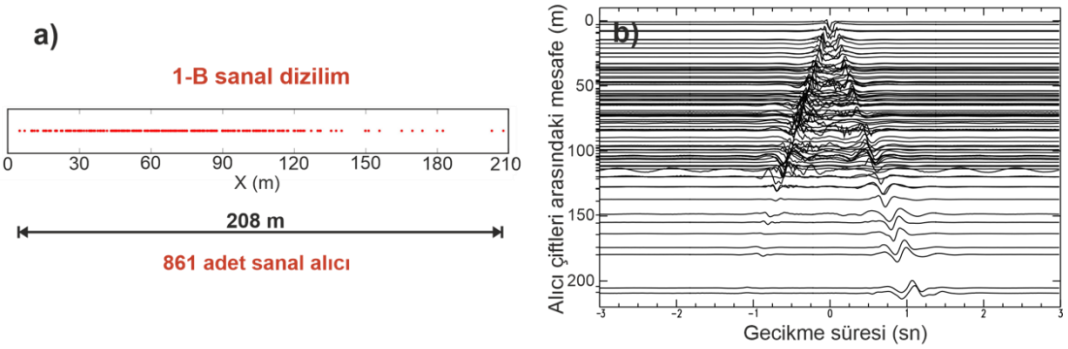
Hz'den yüksek frekanslarda tüm faz hızı farkları % 6'nın altında hesaplanmıştır ve CVFK standart sapma değerlerinin altında kalmaktadır (Şekil 4.13a ve b).

2D PSI-MASW panelinde hem 1. hem de 2. yüksek mod faz hızları belirlenebilmektedir. CVFK panelindeki ikincil branş ise bu iki yüksek modun faz hızlarının karışımından oluşmakta ve 1. yüksek mod olarak işaretlenebilmektedir. Buna rağmen, 1. yüksek mod için faz hızı farkları genel anlamda 30 m/sn'yi ve % 10'u aşmamaktadır (Şekil 4.13c ve d). Faz hızı farklarının ~ 10-20 m/sn aralığında salındığı 7-15 Hz frekans bandı CVFK panelinde mod karmaşasının gerçekleştiği bölgeye karşılık gelmektedir (Şekil 4.12b). Bu frekans bandında elde edilen faz hızı farkları CVFK standart sapmalarının da bir miktar üzerinde seyretmektedir. CVFK panelinde 1. ve 2. yüksek modlar ayrımlanamadığından bu beklenen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.

Özetle, T131 sahasında Hat 1-24'ten hesaplanan SAT'nin nedensel olmayan kısmı kullanılarak yalnızca temel mod faz hızları elde edilmektedir. Buna karşın, FHD bilgisi açısından bu hattın nedensel kısımdan hiçbir katkı gelmemektedir. Öte yandan, iyi tanımlanmış yüksek mod FHD bilgisi tamamıyla Hat 25–72'ten sağlanmaktadır (Şekil 4.11). Hat 25-72'den elde edilen SAT'nin nedensel olmayan kısmından hesaplanan PSI-MASW panelinde temel mod faz hızları nispeten yüksek frekanslara (15 Hz) kadar yüksek hüzme gücü değerleri ile hesaplanmaktadır. Buna karşılık, nedensel kısım kullanılarak hesaplanan panelde temel mod hüzme gücü değerleri artan frekansla birlikte hızla düşmekte ve 5 Hz'in ötesinde yüksek modlar belirgin şekilde baskın hale gelmektedir. Aynı panelde temel mod faz hızlarının çözünürlüğünün daha düşük frekans bandında (< 3 Hz) oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Elde edilen bu sonuçlara dayanarak, T131 sahasındaki ASG ölçümlerinde Hat 1-24'ün tek başına kullanılması durumunda yalnızca temel mod faz hızlarının elde edilebileceği net bir şekilde söylenebilir. Bu nedenle T131 sahası, özellikle izotropik olmayan ASG kaynak dağılımı durumunda, 2B dizilim oluşturacak şekilde birbirine dik konuşlandırılan iki alıcı hattının yüksek kaliteli FHD panellerinin üretilmesine katkısını görebilmek açısından çok güzel bir örnektir.

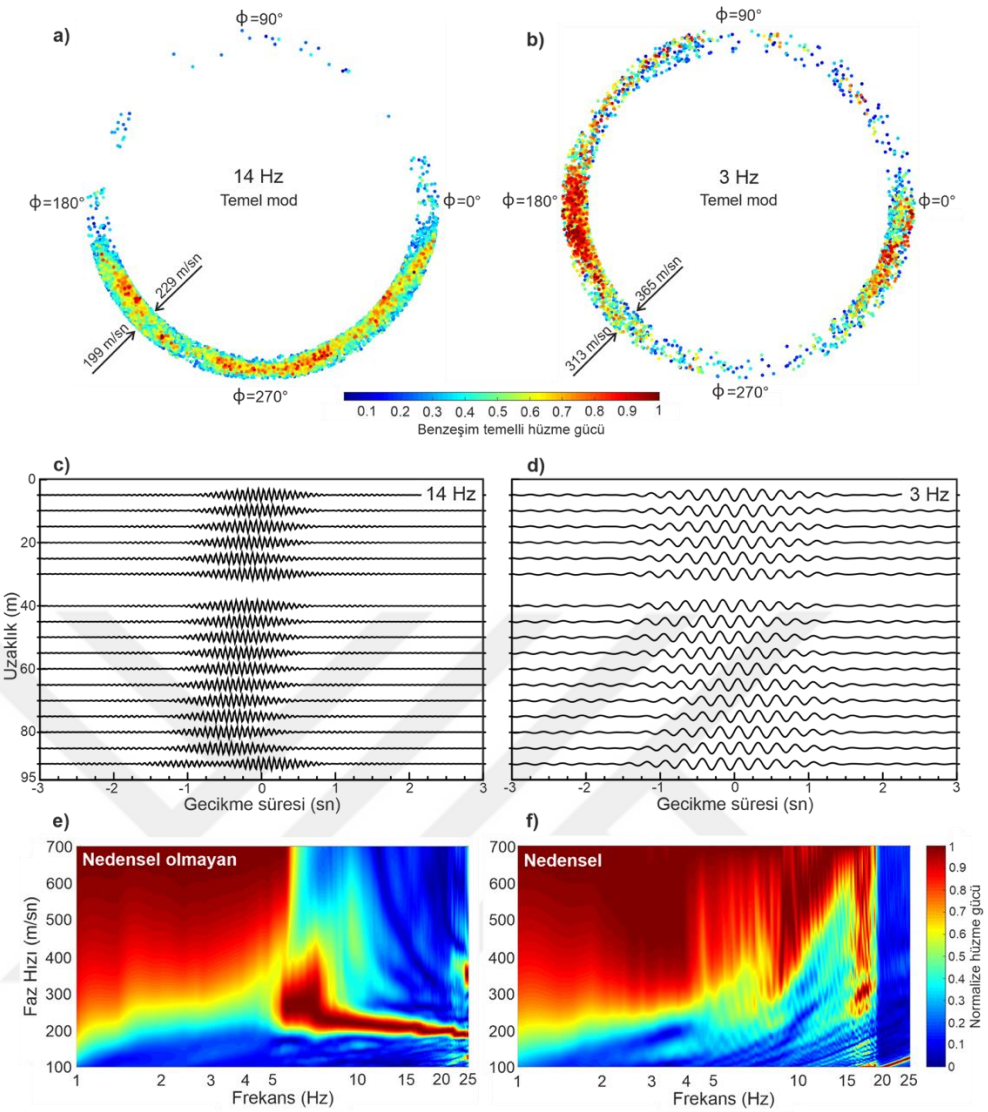
4.1.3 T051 sahası için elde edilen sonuçlar

T051 sahası için oluşturulan 1B sanal dizilim ve uzaysal olarak yığılmış SAT Şekil 4.14'te verilmektedir. 2D PSI-MASW analizinde kullanılan SAT 861 sanal alıcı çifti içermektedir ve dizilimin en büyük alıcı açıklığı D_{max} = 208 m'dir.



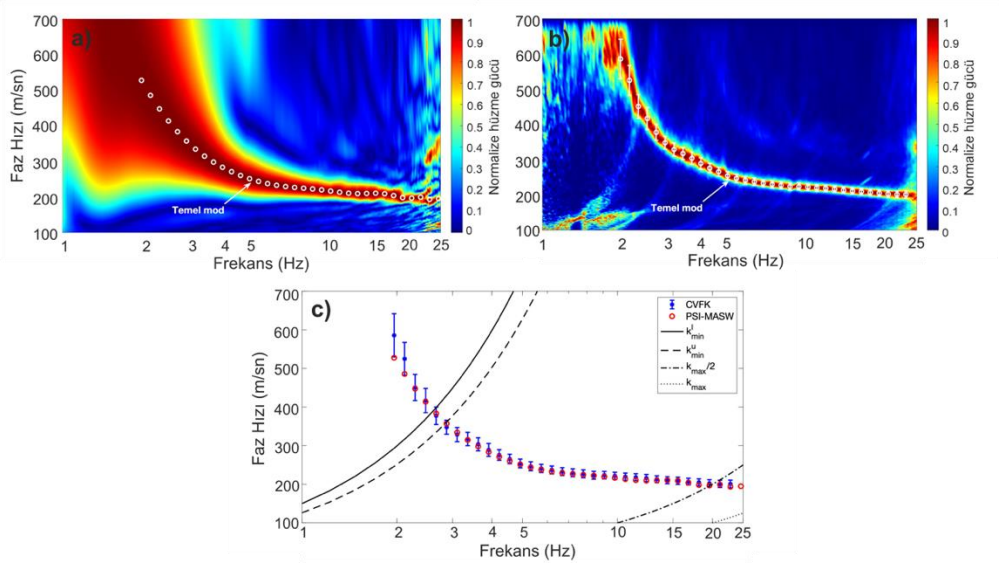
Şekil 4.14 : T051 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT.

İlerleyen bölümde, seçilen 14 ve 3 Hz merkez frekansları için CVFK'den kestirilen ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (Şekil 4.15 a ve b) ve göreceli yönü Ø = 90° olan alıcı hattından (Şekil 3.2) oluşturulan SAT'ler (Şekil 4.15 c ve d) sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, karşılaştırma amaçlı olarak bu hattan elde edilen SAT'nin nedensel olmayan ve nedensel kısımları kullanılarak hesaplanan PSI-MASW panelleri de paylaşılmaktadır (Şekil 4.15 e ve f). ASG kaynakları 6 ve 25 Hz frekansları arasında (14 Hz'deki ASG dağılımı örnek olarak sunulmuştur, Şekil 4.15a) esas olarak duraylı faz yönü olan Ø = 270° civarında konuşlanmış gözükmektedir. Bu nedenle Ø = 90° hattından elde edilen SAT'lerin nedensel olmayan kısmı kullanılarak hesaplanan FHD panelinde bu frekans bandında iyi gelişmiş temel mod karakteristikleri belirlenmektedir (Şekil 4.15e). Öte yandan, 6 Hz'den düşük frekanslarda (3 Hz'deki ASG dağılımı örnek olarak sunulmuştur, Şekil 4.15b), Ø = 90° ve Ø = 270° yönlerinde ASG kaynaklarının çok seyrek olarak bulunması (Şekil 4.15b) ile de uyumlu şekilde, bu alıcı hattından elde edilen SAT'ler herhangi bir FHD bilgisi sağlamamaktadır (Şekil 4.15e ve f). Bununla birlikte, T051 sahasındaki alıcılar arası vektörlerin yoğun uzaysal örneklemesi (Şekil 3.6) sayesinde, özellikle 2 ile 6 Hz arasında diğer tüm yönlerden sağlanan tamamlayıcı FHD bilgisi ile, geniş bir frekans bandında (~2–23 Hz) CVFK sonuçları ile de çok iyi uyum gösteren bir FHD eğrisi elde etmek mümkün olmaktadır (Şekil 4.15). Elde edilen bu sonuç, T051 sahasında ASG dalga alanının izotropik olmayan doğası da göz önünde bulundurulduğunda, kullanılan 2B sismik dizilimin yeterli yönsel örneklemeye sahip olmasının güvenilir ve eksiksiz bir FHD eğrisi elde edilmesindeki önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.15 : T051 sahasında, (a) 14 Hz ve (b) 3 Hz merkez frekanslarında temel mod için ASG kaynaklarının yönsel dağılımı. (c) 14 Hz ve (d) 3 Hz'de ∅ = 90° hattından elde edilen filtrelenmiş SAT'ler ve ∅ = 90° hattındaki olası tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerin (e) nedensel olmayan ve (f) nedensel kısımlarından hesaplanan PSI-MASW panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülebilir.

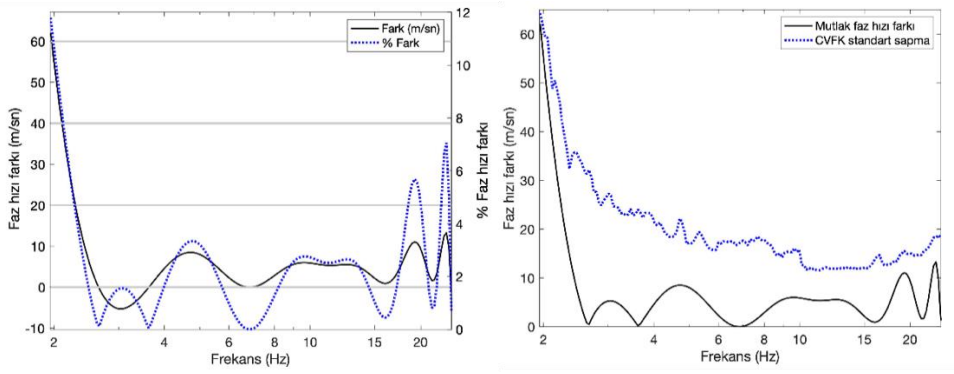
T051 sahası için 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ile elde edilen FHD eğrilerinin karşılaştırması Şekil 4.16'da sunulmaktadır. T051 sahası için her iki yöntem kullanılarak hesaplanan FHD panelleri iyi tanımlı bir temel mod bilgisi sağlamaktadır ve 2.3–22.8 Hz'lik geniş bir frekans aralığı için neredeyse aynı temel mod Rayleigh dalgası faz hızları elde edilmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 : T051 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'lerin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.6'daki ile aynıdır.

İki yöntem arasındaki faz hızı farkları çözünürlük limitinin önemli ölçüde dışında kalan 1.95 Hz hariç % 7 seviyesini geçmemektedir. 1.95 Hz frekansında ise elde edilen faz hızlarında ~ %12 gibi daha yüksek bir fark oluşmaktadır. Temel mod FHD eğrisinin çözünürlük limitinin dışında kalan frekansları (< 2.5 Hz, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17) da dahil edecek şekilde işaretlenmesinin sebebi 2D PSI-MAW ve CVFK panellerinde mod branşı devamlılığının bu frekanslarda da gözlemlenebilmesidir.

T051 sahasında, dizilim çözünürlük limitleri içerisinde, CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak birbiri ile çok uyumlu faz hızı sonuçları elde edilmiştir (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). Düşük frekans ucunda çözünürlük limitlerinin dışı (< 2.5 Hz) da dahil edildiğinde bu saha için elde edilen faz hızı farkları 65 m/sn'yi ve % 12'yi aşmamaktadır. Temel mod branşı için çözünürlük limitine çok yakın olan 2 Hz'de faz hızı farkları hızla düşmeye başlamakta ve 2.5-20 Hz bandında 0-12 m/sn gibi oldukça düşük bir seviye etrafında salınmaktadır. Tüm branş boyunca elde edilen faz hızı farkları CVFK panelinden hesaplanan standart sapmaların altında kalmaktadır (Şekil 4.17).

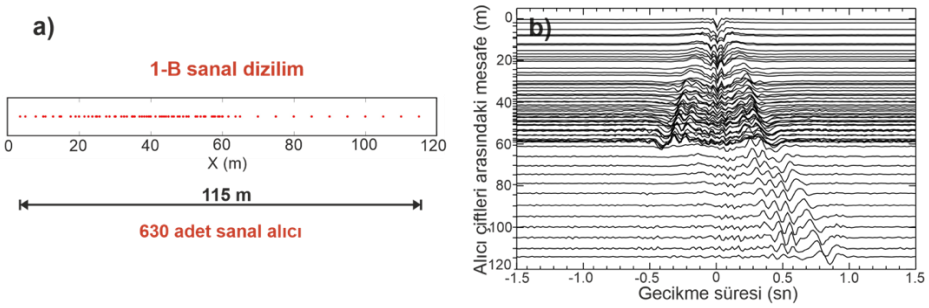


Şekil 4.17 : T051 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak temel mod için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. Detaylı bilgi için Şekil 4.7'ye bakınız.

T051 sahasında hem 2D PSI-MASW hem de CVFK yöntemleri ile tez çalışmasındaki en kaliteli faz hızı sonuçları elde edilmiştir. Diğer sahalara ait FHD panellerinde temel ve yüksek mod branşları çoğunlukla dağınık hüzme gücüne sahiptir ve bu nedenle FHD eğrileri daha yüksek standart sapmalar içermektedir (Şekil 4.6, Şekil 4.12 ve Şekil 4.22). T051 için elde edilen FHD panelinde ise faz hızları en düşük belirsizliklere sahiptir (Şekil 4.16). Bunun nedeni, saha ölçümünde kullanılan yelpaze şeklindeki geometrinin (Şekil 3.2) çok daha yoğun bir uzaysal örnekleme sağlaması, dolayısıyla analiz edilen tüm sahalar arasında en iyi alıcılar arası vektör dağılımını sunmasıdır (Şekil 3.6).

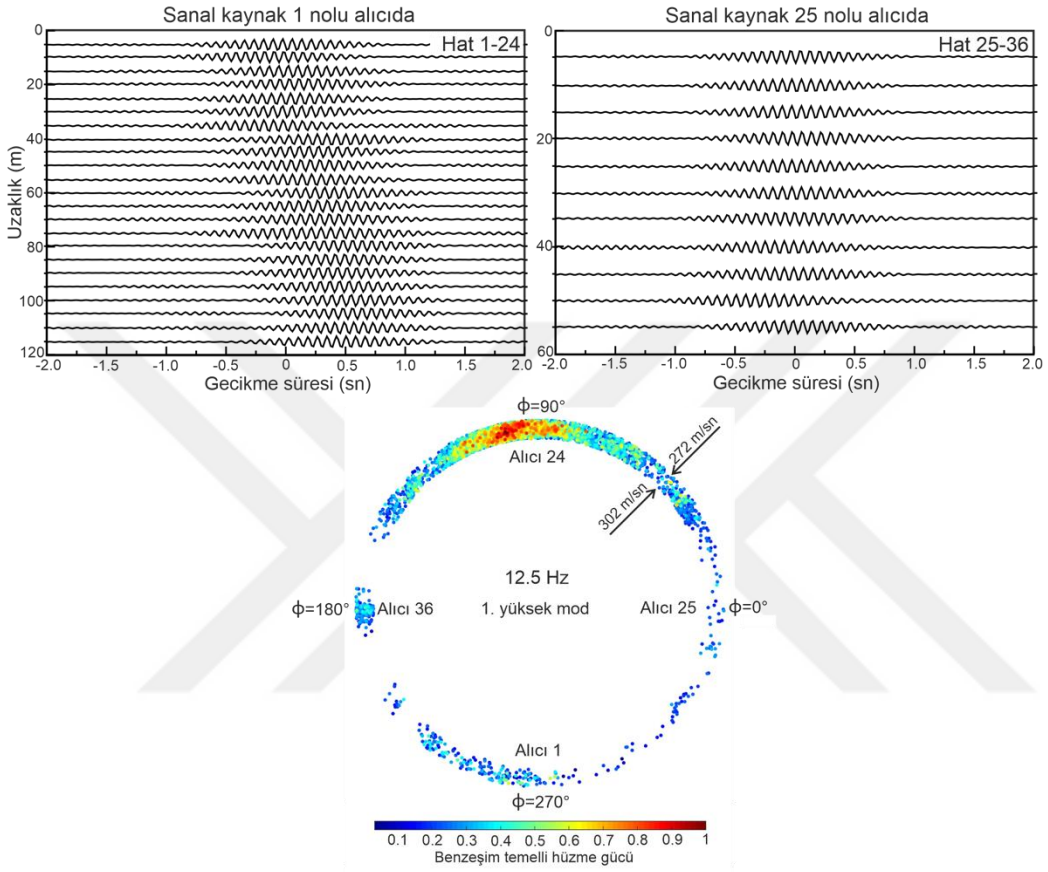
4.1.4 SK04 sahası için elde edilen sonuçlar

SK04 sahası için 2D PSI-MASW analizinde kullanılan 1B sanal dizilim ve uzaysal olarak yığılmış SAT Şekil 4.18'de verilmektedir. 2D PSI-MASW analizinde kullanılan SAT 630 sanal alıcı çifti içermektedir ve dizilimdeki en büyük alıcı açıklığı D_{max} = 115 m'dir.



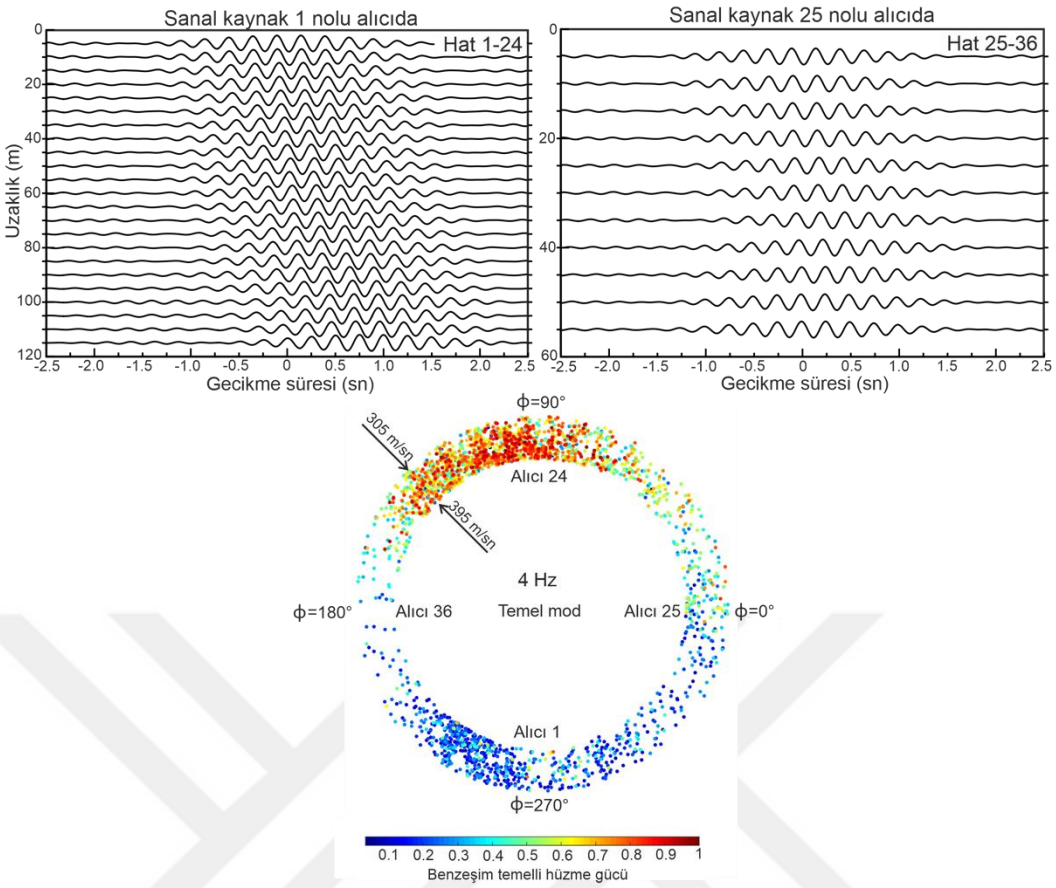
Şekil 4.18 : SK04 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilim, (b) iyi gelişmiş bir Rayleigh dalgası paketi gösteren uzaysal olarak yığılmış, nedensel olmayan ve nedensel kısımları temsil eden, negatif ve pozitif zaman gecikmelerine sahip SAT.

ASG kaynaklarının CVFK analizi ile kestirilen yönsel dağılımı Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de 12.5 Hz ve 4 Hz merkez frekansları için sunulmaktadır. Hat 1-24 ve Hat 25-36'dan elde edilen SAT'lerin nedensel olmayan ve nedensel kısımları kullanılarak hesaplanan PSI-MASW panelleri ise Şekil 4.21'de karşılaştırma amacıyla verilmektedir.



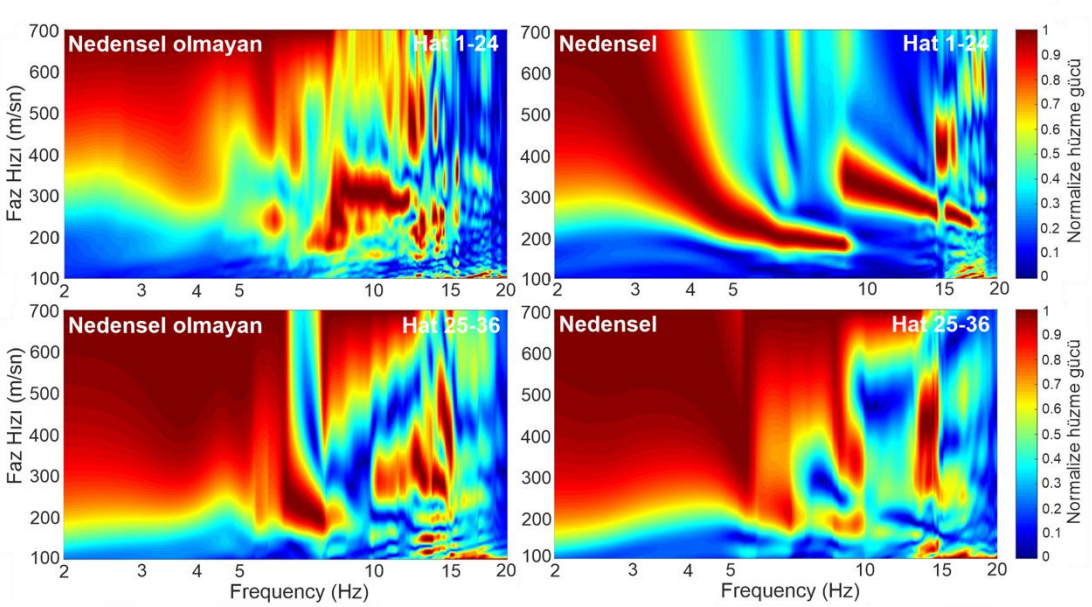
Şekil 4.19 : SK04 sahasında, Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 12.5 Hz merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve 1. yüksek mod için 12.5 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta). Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de, ASG kaynaklarının Ø=90° civarında yüksek hüzme gücü ile yoğunlaştığı ve bu sayede seçilen merkez frekanslar için Hat 1-24'ün SAT'lerinin nedensel kısmında tutarlı ve yüksek enerjili temel ve 1. yüksek mod sinyallerinin oluşmasını sağladığı görülmektedir. Sonuç olarak, FHD bilgisinin neredeyse tamamı, Hat 1-24'ten elde edilen SAT'nin nedensel kısmından çıkarılmaktadır (Şekil 4.21).



Şekil 4.20 : SK04 sahasında, Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 4 Hz merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve temel mod için 4 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta). Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

Öte yandan, Hat 25-36 için duraylı faz yönleri olarak kabul edilebilecek Ø=0° ve Ø=180° civarında ASG kaynak yoğunluğu oldukça düşüktür. Bu nedenle, hattan elde edilen SAT'lerin iki kısmında da tutarlı sinyaller gözlemlenememektedir (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20). Bu durum Hat 25-36'dan hesaplanan FHD panellerinde zayıf temel ve yüksek mod karakteristikleri ile sonuçlanmaktadır (Şekil 4.21).

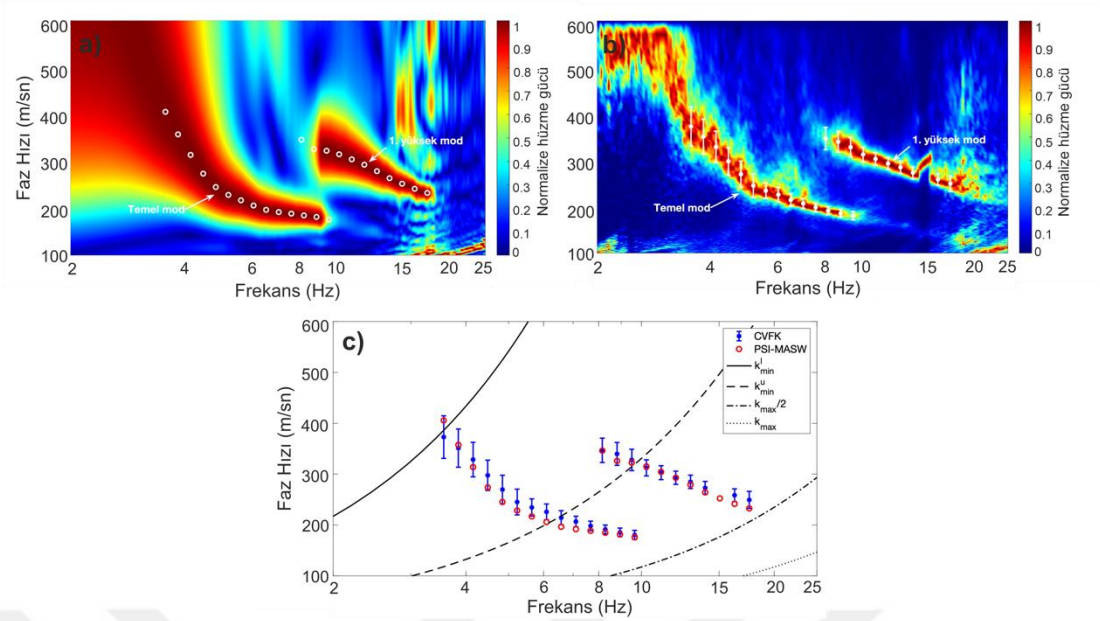


Şekil 4.21 : SK04 sahasında, tekil 1B alıcı hatlarındaki tüm alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'lerden hesaplanan PSI-MASW panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.5'teki ile aynıdır.

Elde edilen sonuçlara dayanarak, SK04 sahasında, yalnızca Hat 25-36 için elde edilen SAT'den hesaplanan PSI-MASW FHD panelinde çok daha düşük çözünürlüklü hatta ayrımlanamayan temel ve 1. yüksek mod branşları elde edildiği söylenebilir.

2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak elde edilen FHD panelleri ve iki yöntem kullanılarak elde edilen FHD eğrilerinin karşılaştırması Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Buna göre; temel mod Rayleigh dalgası için dizilim çözünürlük/örtüşme limitleri ve standart sapmalar içinde kalan 3.5-10 Hz frekans bandında iyi tanımlanmış ve sürekli bir FHD branşı belirlenebilmektedir (Şekil 4.22).

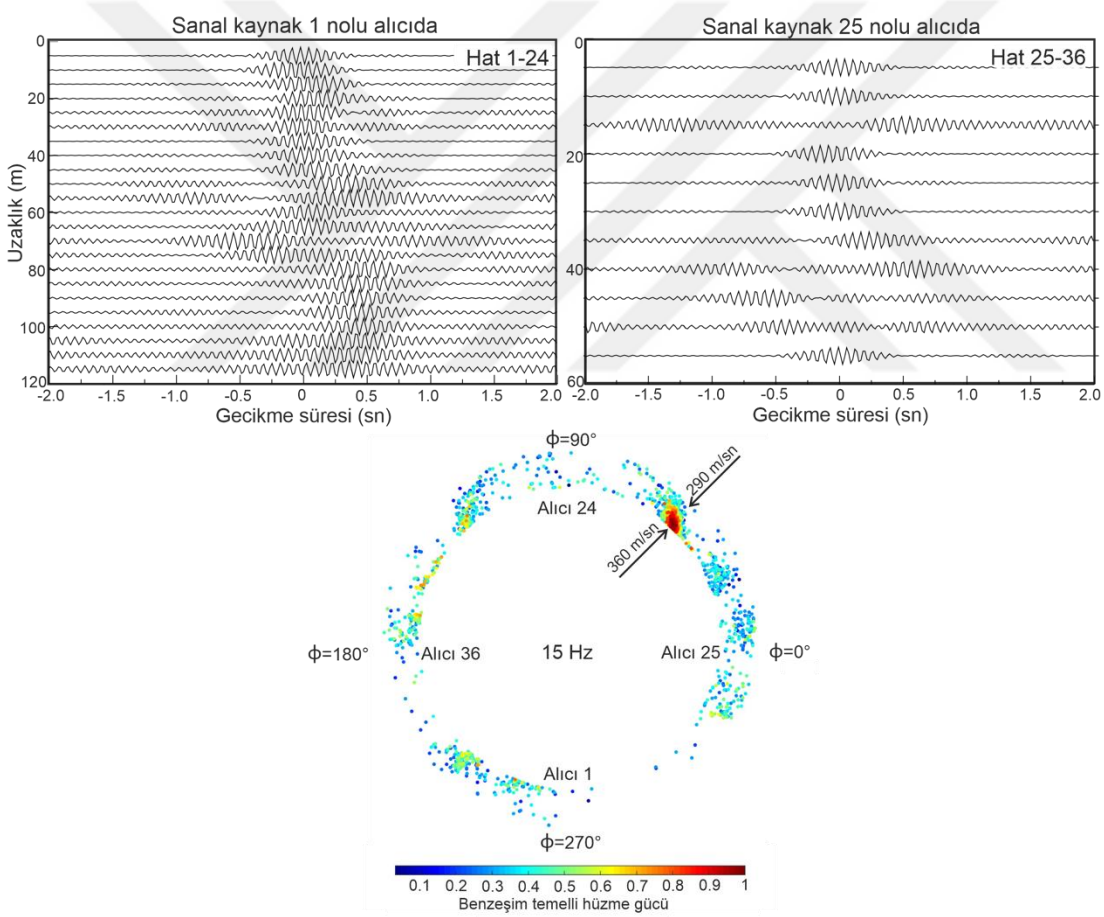
Temel mod FHD eğrileri, dizilim çözünürlük limiti (~ 3.5 Hz) civarında birbirine çok yakındır ve aralarında % 8.3 mertebesinde farklılıklar bulunmaktadır. Faz hızı farkları 7 Hz'de % 7.5'e düşer ve bu frekansın ötesinde iki yöntemin FHD eğrileri hemen hemen aynıdır (Şekil 4.22c, Şekil 4.24).



Şekil 4.22 : SK04 ölçüm sahası için, (a) 1B sanal dizilimden elde edilen simetrik bileşen SAT'lerin MASW kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (b) orijinal 2B dizilim kayıtlarının CVFK kullanılarak analiz edilmesi ile hesaplanan CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin karşılaştırılması. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.6'daki ile aynıdır.

1. yüksek mod için, elde edilen FHD eğrilerindeki farklılıklar oldukça küçüktür ve 15 Hz'den yüksek frekanslar dışında standart sapmalar içinde kalmaktadır (Şekil 4.22c ve Şekil 4.24). Öte yandan, CVFK panelinde yaklaşık 15 Hz'de bir faz hızı sıçraması gözlenmekte ancak 2D PSI-MASW panelinde buna karşılık gelen bir sıçrama bulunmamaktadır (Şekil 4.22a ve Şekil 4.22b). SK04 ölçüm sahası, şehir merkezinde, bir inşaat alanının yakınında yer almaktadır ve veri toplama sırasında yakındaki bir iş makinesinin (dozerin) sürekli olarak çalıştığı bilinmektedir. Bu sahada toplanan ham ASG kayıtları incelendiğinde, 900 devir/dakika ile çalıştığı bilinen iş makinesinin aktivitesi ile ilişkilendirilebilecek, genlikleri yaklaşık 15 Hz'de en yüksek değerlerine ulaşan ve sürekli yayınan periyodik sinyaller tespit edilmiştir. Bu sinyallerin CVFK panelinde yarattığı hız sıçraması, faz hızlarının 15 Hz etrafında işaretlenmesini engellemektedir (Şekil 4.22b). CVFK panelinde gözlenen faz hızı sıçramasının muhtemelen iş makinesi tarafından üretilen yakın alan sinyallerinin düzlem dalga yaklaşımını ihlal etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (düzlemsel olmayan ya da küresel dalga yayılımı, örn. Scherbaum ve diğ., 2005; Almendros ve diğ., 1999).

Buna karşılık, 2D PSI-MASW panelinde 1. yüksek mod için herhangi bir sıçrama görülmemekte, FHD branşı yaklaşık 18 Hz'e kadar kesintisiz olarak seçilebilmektedir (Şekil 4.22a). Ancak, 2D PSI-MASW panelinde, 15 Hz frekansında faz hızları ~ 360 – 480 m/sn aralığında tanımlı ve 2. yüksek mod olarak yorumlanabilecek bir branş oluşmaktadır. Bu branşın, iş makinesi sinyallerinin alıcı hatlarına yönlü olarak ulaşması nedeniyle, yöntemin bu yönlü sinyaller için görünür faz hızları elde etmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Aynı FHD değerleri, Şekil 4.21'deki Hat 1-24 nedensel panelinde de 15 Hz'de yaklaşık 420 m/sn faz hızı ile belirgin şekilde gözlenmektedir. İş makinesi tarafından üretilen sinyaller ile ilgili daha detaylı analiz yapabilmek için 15 Hz merkez frekansındaki ASG kaynak yönlerinin dağılımı ve Hat 1-24 ve Hat 25-36 kullanılarak elde edilen SAT'ler Şekil 4.23'te sunulmaktadır.

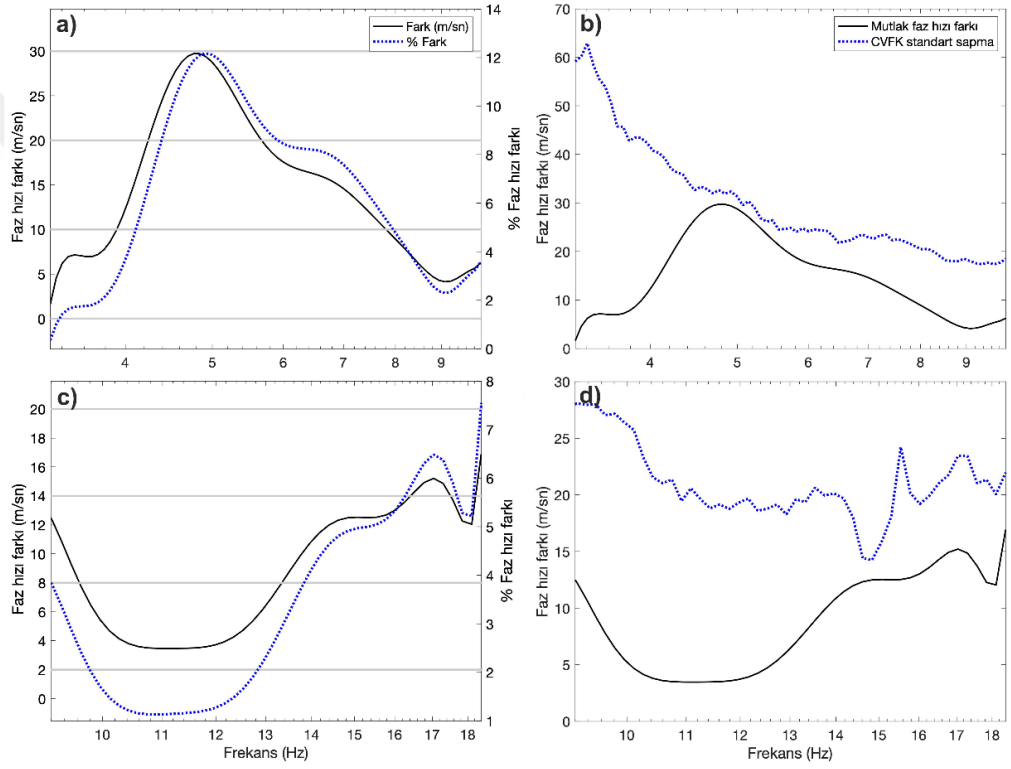


Şekil 4.23 : SK04 sahasında, b) Hat 1-24'ten (sol üstte) ve Hat 25-36'dan (sağ üstte) elde edilen, 15 Hz Merkez frekansında süzülmüş SAT panelleri ve 15 Hz merkez frekansındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı (altta). Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

Şekil 4.23'te, 15 Hz için sahip ASG kaynaklarının yaklaşık olarak 45° yönünde yüksek hüzme güçleri göstererek yoğunlaştığı belirgin şekilde görülmekte ve Hat 1-24'ün

SAT'sinin nedensel kısmında yüksek enerjili sinyaller oluşmaktadır. Sonuç olarak; sahadaki iş makinesinin artı şekilli dizilim geometrisindeki alıcı hatlarına göre ~ 40-50° yön aralığında çalıştığı söylenebilir. 2D PSI-MASW panelindeki görünür (yüksek) faz hızlarına sahip branşın da bu nedenle oluştuğu yorumu yapılmaktadır çünkü elde edilen görünür faz hızları $V_{\text{görünür}} = V_{ses_sinyali}/\cos(45°)$ ile de yaklaşık olarak uyumludur.

SK04 sahasında temel ve 1. yüksek mod branşları için CVFK ve 2D PSI-MASW ile elde edilen faz hızı farkları 2-30 m/sn aralığındadır ve % 20'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : SK04 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW kullanılarak, (a), (b) temel ve (c), (d) 1. yüksek modlar için elde edilen faz hızlarının karşılaştırmalı analizi. Detaylı bilgi için Şekil 4.7'ye bakınız.

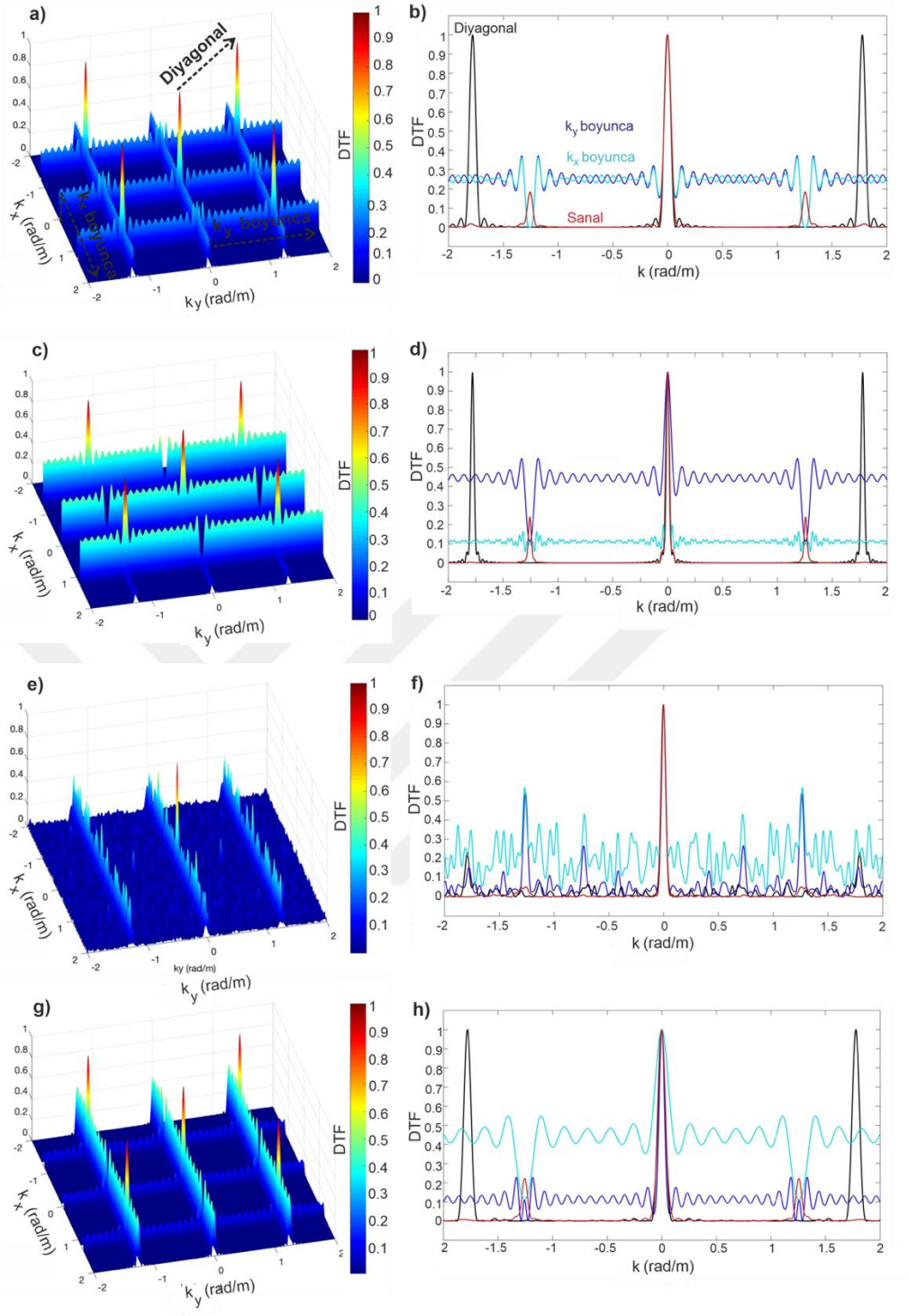
Temel mod için faz hızı farkları ~ 4 Hz'de hızla yükselişe geçerek 5 Hz'e kadar 0-10 m/sn seviyelerinden 30 m/sn seviyesine ulaşmakta ve buradan itibaren hızla düşerek 8-10 Hz frekans bandında 2-4 m/sn gibi çok düşük bir aralıkta seyretmektedir. Bu branş için tüm faz hızı farkları CVFK'den hesaplanan standart sapmaların altındadır. 1. yüksek mod için 9 Hz civarında ~ 12 m/sn olan faz hızı farkları hızla azalarak 10-13 Hz frekans bandında 4-6 m/sn gibi çok düşük bir seviyede kalmakta, 13 Hz'de tekrar yükselişe geçerek 18-19 Hz civarında ~ 17 m/sn'ye ulaşmaktadır (Şekil 4.24a

ve b). 1. yüksek mod için hesaplanan tüm bu farklar % 1 - % 8 aralığında değişmekte ve standart sapmaların altında kalmaktadır (Şekil 4.24 c ve d).

4.1.5 DTF üzerine tartışma ve sonuçların değerlendirilmesi

Farklı ölçüm sahalarından elde edilen sonuçlara dayanarak, 2D PSI-MASW yönteminin geniş bir frekans aralığında (2–23 Hz) CVFK yöntemiyle karşılaştırılabilir FHD sonuçları sağladığı sonucuna varılmıştır. İki yöntemle elde edilen temel mod faz hızları, genel olarak maksimum dizilim açıklığı tarafından belirlenen teorik çözünürlük sınırlarına (k_{min}) yakın ya da bunun ötesindeki düşük frekanslarda en fazla %14 farklılık göstermektedir (Şekil 4.6, Şekil 4.12, Şekil 4.16 ve Şekil 4.22). Bunun sebebi, kullanılan yöntemlerin ikisinin de düşük frekans bandında görünür faz hızlarına neden olabilen uzaysal çözünürlük sınırlamalarından muzdarip olmasıdır (Wathelet ve diğ., 2008; Foti ve diğ., 2018). Bu nedenle, düşük frekans bandında gözlenen faz hızı farklarının kullanılan sismik dizilimlerin çözünürlük kapasitelerinin kısıtlılığından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. 2D PSI-MASW yöntemi, tüm sahalarda geniş bir frekans aralığında CVFK yöntemiyle benzer faz hızları vermesine karşın, T131 sahasında CVFK'den daha iyi bir mod performansı göstermektedir (Şekil 4.12). Temel mod ve yüksek mod faz hızlarının birlikte kullanılmasının zemine ait sığ V_s profillerinin daha yüksek doğrulukla belirlenmesine önemli katkı sağladığı bilindiğinden, bu sonuç oldukça önemlidir (örn. Xia ve diğ., 2000; Luo ve diğ., 2007).

İlerleyen bölümde, elde edilen bu sonuç ölçüm sahalarında kullanılan sismik dizilimlerden hesaplanan DTF'lerin karşılıklı olarak değerlendirilmesi ile açıklanmaktadır. DTF, değişen frekanslarda farklı yayınım hızları gösteren sismik dalgalar için dizilim konfigürasyonu ile belirlenen dalga sayısı çözünürlüğünü ve örtüşme koşullarını tanımlayan uzaysal (yumuşatıcı) bir filtre gibi davranmaktadır (Picozzi ve diğ., 2010). Böylece dizilimdeki alıcıların uzaysal dağılımı, özellikle minimum alıcı aralığı ve maksimum dizilim açıklığı, tarafından kontrol edilen DTF, dizilimin dalga alanının FHD özelliklerini çözme performansını belirler. İdeal durumda, bir DTF'nin dar bir ana salınım genişliğine ve düşük genlikli yan salınımlara sahip olması beklenir. Dalga sayısı ortamındaki DTF'leri hesaplamak için normal bir kartezyen karelaj kullanılmıştır (Wathelet ve diğ., 2008). Her saha için sırasıyla CVFK ve 2D PSI-MASW yöntemlerinde kullanılan orijinal 2B ve sanal 1B dizilimlerin DTF'leri hesaplanmakta ve karşılaştırılmaktadır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 : (a), (c), (e) ve (g) sırasıyla, H148, T131, T051 ve SK04 sahalarında kullanılan orijinal 2B dizilimlerin DTF'lerini; (b), (d), (f) ve (h) aynı sıra ile 1B sanal dizilimin (kırmızı) DTF 'si ile 2B dizilimin farklı yönlerdeki DTF 'si arasındaki karşılaştırmayı gösterir. DTF ‘ler (a)’da tanımlanan yönler için $\boldsymbol{k_x}$ (camgöbeği), $\boldsymbol{k_y}$ (mavi) ve diyagonal (siyah) olarak sunulmaktadır.

Orijinal 2B dizilim konfigürasyonlarından hesaplanan DTF'ler (Şekil 4.25a, c, e ve g), k_x , k_y ve diyagonal dalgasayısı yönleri boyunca alınan enine kesitler ile de gösterilmektedir (Şekil 4.25b, d, f ve h).

H148 sahası için elde edilen DTF'nin diyagonal yöndeki dalga sayısı çözünürlüğü (k^d_{min}), dizilimin çözünürlük alt limiti (k^l_{min}) olarak belirlenmekte ve 0.066 rad/m değerini almaktadır ($k^l_{min} = k^d_{min}$). Bu sahadaki original 2B dizilimin simetrik olması sebebiyle dalga sayısı çözünürlüğü üst limiti k^u_{min}, k_x ve k_y yönlerinde birbirine eşit ve 0.07 rad/m olarak elde edilmektedir. Orijinal 2B dizilimin DTF'si dalga sayısı çözünürlük limitleri ve yan salınım genlikleri açısından önemli bir yön bağımlılık göstermemekte ve tüm yönler için yan salınım genlikleri 0.4 seviyesinin altında kalmaktadır. Bu saha için 1B sanal dizilimin DTF' si de k^l_{min} ve k^u_{min}'e çok yakın olan 0.072 rad/m 'lik bir dalgasayısı çözünürlük sınırına (k^v_{min}) sahiptir ve maksimumu yaklaşık 1.25 rad/m'de 0.18 olmak üzere oldukça düşük genlikli yan salınımlar göstermektedir (Şekil 4.25a ve b). Bu durum, 2B dizilimin kullanıldığı CVFK analizi için mod ayırma kabiliyetinin yönsel olarak sabit kalması ile sonuçlanmaktadır. H148 sahasındaki çoklu mod branşlarının faz hızları birbirine yakın seyretmesine rağmen (Şekil 4.6) hem CVFK hem de 1B sanal dizilimin kullanıldığı 2D PSI-MASW ile elde edilen faz hızı panellerinde yeterli çözünürlük ve mod ayrımlılığının sağlandığı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile dizilim limitleri içerisinde kalan geniş bir frekans bandında (2.5 – 17 Hz) mod ayrımlılığı yüksek faz hızı panelleri hesaplanmakta ve her iki yöntem kullanılarak birbirine çok yakın faz hızlarına sahip mod branşları belirlenebilmektedir (Şekil 4.6).

T131 sahası için, DTF'nin dalga boyu çözünürlüğü alt limiti (k^l_{min}), k_x yönünde 0.026 rad/m olarak elde edilmektedir. Benzer şekilde, diyagonal yöndeki dalga sayısı çözünürlük limiti (k^d_{min}), 0.035 rad/m gibi küçük bir değere sahiptir (Şekil 4.25c ve d). Öte yandan, DTF'nin dalga sayısı çözünürlüğü üst limiti k^u_{min}, k_y yönü boyunca k^l_{min}'den 3.5 kat daha büyük olan 0.092 rad/m olarak gözlenmektedir. Bu durum, orijinal artı şekilli dizilimin, k_y yönündeki alıcı hattının k_x yönündeki alıcı hattından iki kat kısa olduğu antisimetrik bir geometriye sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.2b). Antisimetrik dizilim geometrisinin bir sonucu olarak, DTF, diyagonal yönde büyük bir örtüşme yan salınımının bulunduğu 1.75 rad/m'ye kadar başka herhangi bir yan salınım göstermemektedir. Öte yandan, k_x yönü boyunca genlikler 0.1

seviyesinde seyretmekte ve önemli bir yan salınım genliği oluşmamaktadır. Son olarak, k_y yönü boyunca elde edilen yanıt, 0.45 genlik seviyesi civarında salınan ve 1.25 rad/m yakınındaki tepe noktasında 0.5'i aşan oldukça yüksek genlikli yan salınımlar göstermektedir (Şekil 4.25 c ve d).

Orijinal 2B dizilimin DTF'sinin dalga sayısı çözünürlük limitleri ve yan salınım genlikleri açısından yön bağımlılık göstermesi; mod ayırma kabiliyetini olumsuz etkilemektedir (Şekil 4.25d). T131 sahasında yüksek modların faz hızı branşları birbirine çok yakın olduğundan (Şekil 4.12), CVFK yöntemi bu modları k_y yönü boyunca ve bu yön civarında ayıramamaktadır (Şekil 4.25c ve d). Sonuç olarak, iki modun gerçek faz hızlarının ortalamasını gösteren bir ara faz hızı elde edilmektedir (Şekil 4.12b ve c). Öte yandan, 1B sanal dizilimin DTF' si, k_{min}^{l} 'ye yakın 0.032 rad/m'lik bir dalgasayısı çözünürlük sınırına (k_{min}^{v}) sahiptir ve maksimumu yaklaşık 1.25 rad/m'de 0.24 olmak üzere düşük genlikli yan salınımlar göstermektedir (Şekil 4.25d).

T131 sahası için iki yöntemin mod ayırma kapasitelerini belirlemek amacıyla, 12 Hz frekansında elde edilen faz hızı ve dalga sayısı değerlerini kullanarak örnek bir analiz sunulmaktadır. Şekil 4.12(a) 'da gösterilen 2D PSI-MASW panelinden, temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için 12 Hz 'de sırasıyla $c_0 = 135\, m/sn$, $c_1 = 197\, m/sn$ ve $c_2 = 225\, m/sn$ faz hızları elde edilmekte ve bu üç moda karşılık gelen dalga sayıları sırasıyla $k_0 = 0.558\, rad/m$, $k_1 = 0.383\, rad/m$ ve $k_2 = 0.335\, rad/m$ olarak belirlenmektedir.

Faz hızı belirlemede mod ayrımlılığının sağlanabilmesi için modların örtüşmemesi ve dalga sayısı alanında yeterli çözünürlük koşulları ile ayırt edilebilmeleri gerekir (Foti ve diğ., 2018). 12 Hz'de 1. yüksek ve 2. yüksek modlar, dalga sayısı alanında $d_k = k_1 - k_2 = 0.048\ rad/m$ ile ayrılmaktadır. Böylece, orijinal 2B dizilim için, d_k'dan küçük k_{min}^{l} ve k_{min}^{d} değerleri sayesinde k_x ve diyagonal yönler boyunca k_1 ve k_2 çözülebilirken, k_y yönündeki k_{min}^{u} d_k'nın neredeyse iki katı olduğu için yeterli çözünürlük elde edilememektedir. Öte yandan, k_{min}^{v} d_k'dan daha küçüktür ve bu nedenle 1B sanal dizilim k_1 ve k_2'yi çözebilmektedir.

Ek olarak, T131 sahasında 2D PSI-MASW yöntemi kullanılarak CVFK'ya eşdeğer temel ve yüksek mod performansı elde edilmesi, iki yöntemin çalışma prensipleri ile açıklanabilir. CVFK yönteminde, kısa zaman pencereleri kullanılarak ASG dalga alanındaki baskın düzlem dalganın faz hızı ve yönü belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu

nedenle, 2D PSI-MASW yönteminde olduğu gibi alıcı çiftleri arasındaki tutarlı ASG sinyallerini güçlendiren PSİ tabanlı zamansal yığmanın avantajından yararlanılamamaktadır. Başka bir deyişle, CVFK yönteminde tek seferde bir zaman penceresi işlendiğinden, ASG dalga alanı bu zaman penceresinde dizilim boyunca yüksek hüzme gücü ile sonuçlanmayan sinyaller içeriyorsa, yöntem tutarsız faz hızları ve yönleri üretecektir. Bununla birlikte, CCF' lerin PSİ tabanlı olarak zamansal yığılması, farklı zaman pencerelerinde ve farklı alıcı çiftleri arasında eşit olmayan ve rastgele dağılan bu türden zayıf enerjili sinyallerin güçlendirilmesine yardımcı olur.

T051 sahasında kullanılan 2B dizilim diğer sahalardakinden farklı şekilde alıcıların bir çok farklı yönü ve mesafeyi örneklediği bir yelpaze geometrisine sahiptir (Şekil 3.2d ve Şekil 3.6d). Bu nedenle T051 sahası için hesaplanan DTF'de yön bağımlılık diğer sahalardakine oranla oldukça düşüktür ve alt ve üst çözünürlük limitleri birbirine oldukça yakındır. k^l_{min}, k_x yönünde 0.042 rad/m, k^u_{min}, k_y yönünde 0.051 rad/m, k^d_{min} ise 0.044 rad/m olarak elde edilmektedir (Şekil 4.25 e ve f). DTF'de, yan salınımlar özellikle k_x yönü boyunca yüksek sayılabilecek genlikler (0.06-0.43 genlik aralığında) göstermekle birlikte hem k_x hem de k_y yönünde 1.25 rad/m'ye kadar 0.5 eşiğini aşmamaktadır. Diyagonal boyunca yan salınımlar oldukça düşük seviyede kalmakta ve 1.8 rad/m'de maksimum 0.22'ye ulaşmaktadır. Bununla birlikte, 1B sanal dizilimden hesaplanan DTF'den elde edilen k^v_{min}, k^l_{min} 'ye çok yakın 0.044 rad/m'lik bir değere sahiptir ve yan salınımlar 0.1 seviyesinin altında kalarak belirgin bir genlik piki göstermemektedir (Şekil 4.25f). Kullanılan alıcı diziliminin sağladığı yoğun uzaysal örnekleme sayesinde T051 sahası için CVFK ve 2D PSI-MASW ile FHD panelleri yüksek çözünürlük ve güvenilirlikle hesaplanmakta ve her iki yöntem kullanılarak elde edilen temel mod faz hızı branşları geniş bir frekans bandında (~2–23 Hz) birbiri ile çok iyi uyum göstermektedir (Şekil 4.16).

SK04 sahasında T131'dekine benzer şekilde antisimetrik ancak daha az kanal sayısına ve daha küçük açılıma sahip bir dizilim geometrisi kullanılmıştır (Şekil 3.2c). Bu nedenle en kısıtlayıcı çözünürlük limitleri SK04 sahası için geçerli olmaktadır. Bu sahadaki dizilim geometrisi için hesaplanan DTF'de k^l_{min}, dizilimin uzun hattı boyunca, k_y yönünde 0.058 rad/m, k^u_{min} kısa hat boyunca, k_x yönünde 0.184 rad/m olarak belirlenmekte, k^d_{min} ise 0.082 rad/m olarak elde edilmektedir. DTF, diyagonal yönde büyük bir örtüşme yan salınımının bulunduğu 1.75 rad/m'ye kadar herhangi bir yan

salınım göstermemektedir. Salınım genlikleri, k_y yönü boyunca ortalama 0.1 seviyesinde seyretmekte ve maksimum olduğu noktalarda 0.22'ye ulaşmaktadır. Bununla beraber, k_x yönü boyunca ortalama 0.45 genlik seviyesinde salınan ve 1.07 rad/m'deki tepe noktasında 0.5'i aşan yüksek genlikli yan salınımlar gözlenmektedir (Şekil 4.25g ve h). Sanal dizilimin çözünürlük limiti k_{min}^{v} ise k_{min}^{d}'e çok benzer şekilde 0.076 rad/m değerini almakta ve neredeyse sıfır seviyesinde ve yaklaşık 1.25 rad/m'de maksimum 0.22 değerini alan yan salınımlar göstermektedir.

SK04 sahasında kullanılan dizilim ve dolayısıyla bu dizilim için oluşan DTF diğer sahalardakine göre çok daha sınırlayıcı olmasına karşın temel ve 1. yüksek mod faz hızı branşları hem CVFK hem de 2D PSI-MASW yöntemleri ile ayrımlı ve yüksek çözünürlüklü olarak elde edilebilmektedir (Şekil 4.22). Bu başarılı sonucun, modların frekans ortamında örtüşmemesinden ve aynı zamanda aynı frekanstaki faz hızlarının birbirinden yeterli derecede farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonucu daha iyi açıklayabilmek ve mod ayrımlılığını değerlendirebilmek adına, modların frekans ortamında örtüştüğü 10 Hz frekansında elde edilen faz hızı ve dalga sayısı değerleri ile örnek bir analiz yapılabilir. Şekil 4.22(a)'da verilen 2D PSI-MASW panelinden, temel ve 1. yüksek mod faz hızları 10 Hz'de sırasıyla $c_0 = 174\, m/sn$ ve $c_1 = 320\, m/sn$ olarak elde edilmekte ve bu faz hızlarına karşılık gelen dalga sayıları sırasıyla $k_0 = 0.361\, rad/m$ ve $k_1 = 0.196\, rad/m$ olarak belirlenmektedir. Buna göre, temel ve 1. yüksek modlar dalga sayısı alanında $d_k = k_0 - k_1 = 0.165\ rad/m$ ile ayrılmaktadır. Orijinal 2B dizilim için, k_{min}^{l} ve k_{min}^{d} değerleri d_k'nın yarısından daha küçüktür. Bu sayede k_y ve diyagonal yönler boyunca k_0 ve k_1 çözünürlüğü oldukça yüksektir. k_x yönünde oluşan k_{min}^{u} ile d_k'nın değerleri de birbirine çok yakındır. Bu nedenle, bu yöndeki çözünürlüğün de modları ayırmak için yeterli düzeyde olduğu ve original 2B dizilimin kullanıldığı CVFK yöntemi ile modlara ait faz hızlarının başarılı şekilde ayrımlanarak belirlendiği değerlendirilmektedir. Ayrıca, 1B sanal dizilim için elde edilen k_{min}^{v} (Şekil 4.25h) de d_k'nın yarısından küçük bir değer almakta, dolayısıyla k_0 ve k_1 2D PSI-MASW yöntemi ile de çözülebilmekte ve sonuç olarak iyi ayrımlanmış çoklu mod branşları belirlenebilmektedir.

Bölüm içinde yukarıda T131 sahası için mod ayırma kapasitesi ile ilgili sunulan örnek analiz, bu saha özelinde 2D PSI-MASW yönteminde kullanılan 1B sanal dizilimin DTF 'sinin düşük genlikli yan salınımlara sahip küçük bir k_{min}^{v} sağladığını ve böylece 1. ve 2. yüksek mod branşlarını CVFK yönteminden daha başarılı bir şekilde ayırmayı

mümkün kıldığını açıkça göstermektedir (Şekil 4.12). Öte yandan, H148 ve T051 sahalarında kullanılan orijinal 2B dizilimler için hesaplanan DTF' lerin dalga sayısı çözünürlük limitleri hemen hemen tüm yönlerde aynıdır. Ayrıca, 1B sanal dizilimlerin DTF' lerinin çözünürlük limitleri, orijinal 2B dizilimlerinkine çok benzerdir (Şekil 4.25c–f). Buna göre, H148 ve T051 sahaları için 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile elde edilen FHD özelliklerinde kullanılan dizilimlerin DTF performanslarından kaynaklı önemli bir farklılık gözlenmemesi, bu sahalar için elde edilen sonuçlarla da uyumlu şekilde, beklenen bir durumdur (Şekil 4.6 ve Şekil 4.16). SK04 sahasında kullanılan orijinal 2B dizilim T131'deki gibi antisimetrik ancak tüm sahalar içinde en kısıtlı uzaysal örneklemeyi sağlayan bir geometriye sahiptir. Dolayısıyla bu saha için beklenen, DTF'den belirlenen sınırlayıcı çözünürlük limitleri nedeniyle, güvenilir faz hızlarının daha dar bir frekans bandında belirlenebilmesidir. Buna karşın, SK04 sahası için FHD paneli yüksek çözünürlük ile elde edilmekte ve çoklu mod branşları yeterli ayrımlılıkla işaretlenebilmektedir. Bunun nedeninin, temel ve 1. yüksek modların enerjik olduğu frekans bantlarının örtüşmemesinin yanı sıra modlar için aynı frekanstaki faz hızlarının birbirinden yeterince uzak olması, dolayısıyla zaman ortamında da birbirlerinden yeterince ayrımlı şekilde seyahat etmeleri olduğu değerlendirilmektedir.

4.2 Sentetik Veri Setleri ve Bu Veri Setlerinden Elde Edilen Sonuçlar

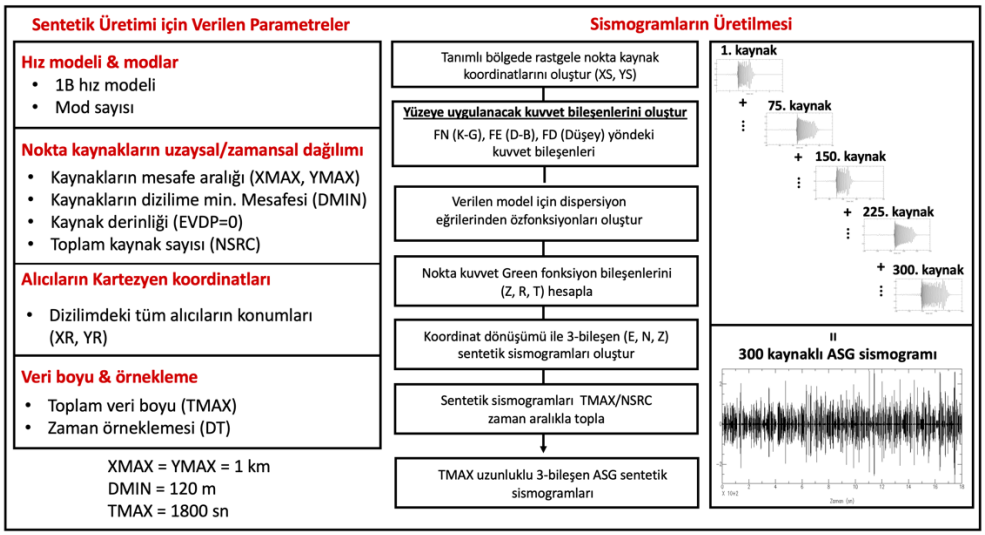
Tezin bu bölümünde 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin faz hızı dispersiyon belirleme performanslarının değişken ASG kaynak yoğunluğu ve yönsel dağılımı, 2B dizilim geometrisi, veri boyu ve mod içeriği koşullarına bağlı olarak irdelenerek karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle, önceki bölümlerde FHD sonuçları paylaşılan gerçek veri setlerinden biri olan SK04 sahası için ters çözüm ile üretilen S-dalgası hız modeli kullanılarak sentetik Green's Fonksiyonları üzerinden hesaplanan dürtüsel kaynak sinyallerini içeren Kuzey-Güney (N), Doğu-Batı (E) ve Düşey (Z) bileşen sismogramlar üretilmiştir. Üretilen bu sismogramların toplanması ile ASG'ye benzeyen bir veri seti (tez boyunca sentetik ASG verisi olarak anılacaktır) oluşturulmaktadır.

Sentetik ASG verilerinin üretilmesinde mod toplama tekniği kullanılmakta ve yüzey dalgaları simüle edilmektedir. Öncelikle, yer yüzeyinde (kaynak derinliği: 0 m), 120m ile 1 km mesafe aralığında rastgele uzaysal dağılımlı ve rastgele büyüklüklü olacak şekilde belirlenen 3-bileşen nokta kuvvet FN (Kuzey-Güney), FE (Doğu-Batı) ve FZ

(Düşey) kuvvet vektörlerinin yanıtı olan Green's fonksiyonlar hesaplanmaktadır. Kullanılan, FN, FE ve FZ kuvvet vektörleri -1 ile 1 arasında rastgele olarak üretilmektedir. Sonrasında, Green's fonksiyonlardan koordinat dönüşümü ile coğrafi koordinat sisteminde 3-bileşen (E, N, Z) sentetik sismogramları elde edilmektedir. Elde edilen bu sismogramların toplanması ile ASG sentetikleri oluşturulmaktadır. Tez çalışması kapsamında Rayleigh dalgalarının FHD bilgisinin elde edilmesi amaçlandığından, yalnızca Z bileşen sentetikler değerlendirilmektedir.

Sentetik veri setleri, Herrmann (2013) tarafından yayımlanan kaynak kod üzerinde ihtiyaç duyulan düzenlemeler yapılarak oluşturulmuştur. Koda ve öğretici örneklere erişim için şu URL'yi ziyaret edebilirsiniz:[https://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/TUTORIAL/HFAMBIENTNOISE/hfambientnoise.html]. Sentetik ASG sismogramlarının oluşturulmasında kullanılan parametreler ve sismogramların üretilmesi Şekil 4.26'da şematik olarak verilmektedir.

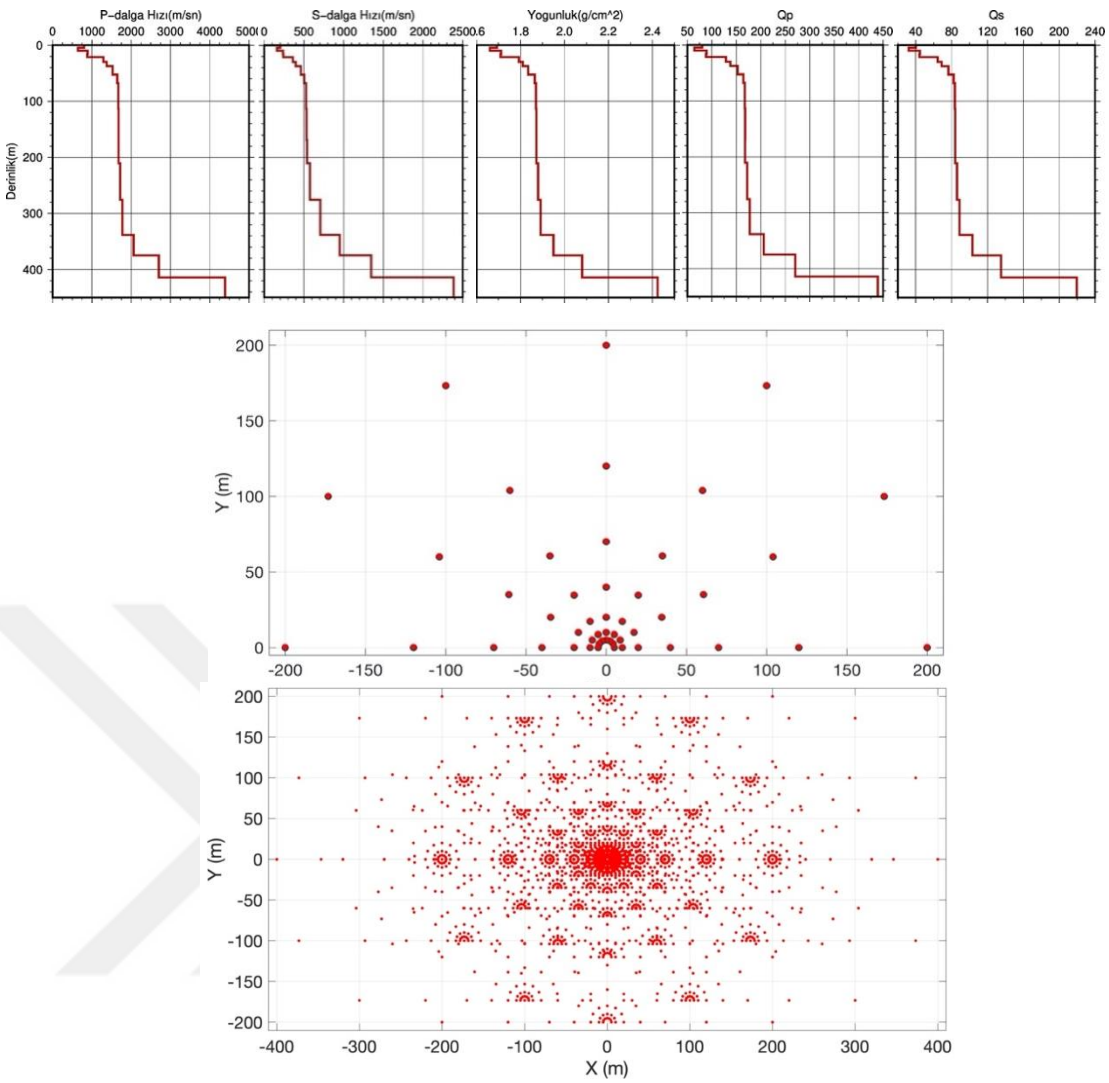
Farklı ASG kaynak yoğunluğuna sahip sentetik veri setlerinin üretilebilmesi için öncelikle rastgele uzaysal dağılımlı 7200 kaynaktan oluşan bir ASG dalga alanı simüle edilmiştir. Böylece, örneğin Şekil 4.27'de verilen yelpaze şekilli alıcı diziliminde olduğu gibi, 49 alıcı ve 3-bileşen için toplam 7200 x 49 x 3 = 1.058.400 adet Green's fonksiyon sismogramı içeren bir veri tabanı oluşturulmuş olmaktadır. Sonrasında, istenilen daha düşük kaynak yoğunluklarında ASG sentetiği üretmek için bu veri tabanından çekilen sismogramlar toplanmaktadır.



Şekil 4.26 : Sentetik ASG sismogramlarının üretilmesinde kullanılan parametreler ve sismogramların üretilmesinin şematik gösterimi.

Sentetik testler için SK04 sahasına ait hız modelinin tercih edilmesinin nedeni gerçek veri setinde ikincil Rayleigh dalgası modunun da gözlenmiş olmasının yanı sıra temel ve 1. yüksek modlar arasındaki hız ayrımlılığının yeterince yüksek olmasıdır. Sentetik veri setlerinin üretilmesi aşamasında her bir adımda yöntemlerin performanlarını etkileyecek bir parametre değiştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sentetik veri setlerinin üretilmesinde kullanılan SK04 sahasına ait 1B P-dalgası hız, S-dalgası hız, yoğunluk, S-soğurulma (Qp) ve P-soğurulma (Qs) modelleri, 2B dizilim geometrisi ve 2B dizilimden hesaplanan alıcılar arası vektörler Şekil 4.27'de sunulmaktadır. Kullanılan yelpaze tipi dizilim geometrisinde alıcılar 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° ve 180° azimutlarında 5, 10, 20, 40, 70, 120 ve 200 m mesafelerinde yer almaktadır. Buna bağlı olarak, oluşan toplam 2352 alıcılar arası vektör, oldukça iyi bir yönsel dağılıma sahiptir ve geniş bir mesafe aralığında (2.58-400m) uzaysal örnekleme sağlamaktadır. Alıcıların daha kısa aralıklı olarak konuşlandırıldığı, dizilim merkezine yakın alanda, 40-50 m yarıçaplı bölge için alıcılar arası vektör yoğunluğu çok yüksektir. Bununla birlikte, merkezden uzaklaştıkça vektör yoğunluğu azalmakta ancak yönsel örnekleme yeterli düzeyde kalmaktadır.

Üretilen sentetik verilerin zaman örneklemesi 8 msn, toplam veri boyu ise 1800 sn'dir. Veri boyu testi için aynı kaynak dağılımına sahip 300sn, 900 sn, 2700 sn ve 3600 sn uzunluğunda ve dizilim geometrisi testi için artı dizilim geometrisine sahip veri setleri de üretilmiştir (bkz. Bölüm 4.2.2 ve 4.2.3). Tek modlu sentetikler Q etkisi eklenmeden, çok modlu sentetikler ise Q etkisi ile üretilmiştir.



Şekil 4.27 : Sentetik veri setlerinin üretilmesinde kullanılan, SK04 ölçüm sahasına ait 1B P-dalgası hız, S-dalgası hız, yoğunluk, Qp ve Qs modelleri (üstte), 2B yelpaze şekilli dizilim geometrisi (ortada) ve 2B dizilimden hesaplanan alıcılar arası vektörler (altta).

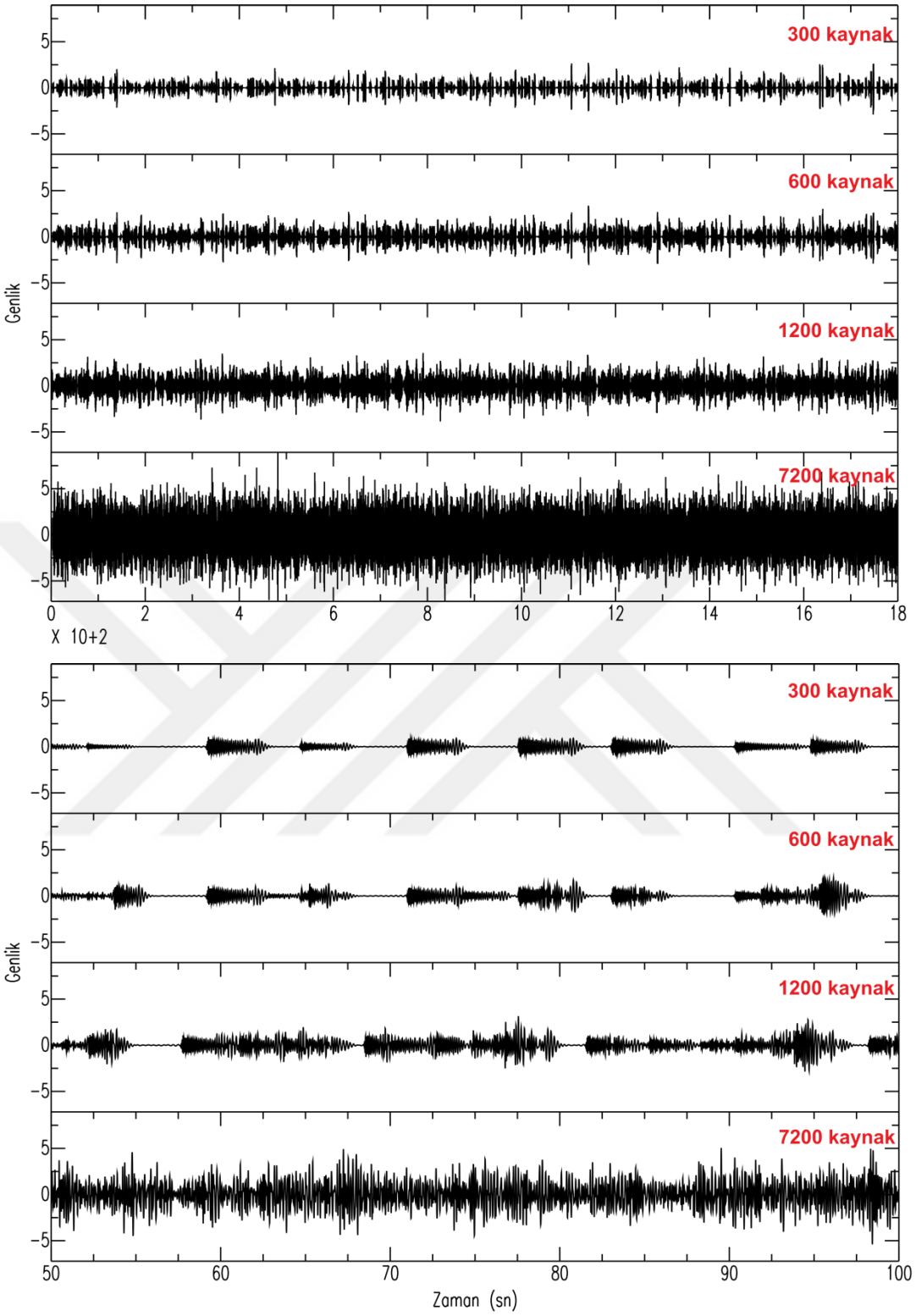
4.2.1 ASG kaynak yoğunluğu testleri

Toplam 300, 600, 1200 ve 7200 ASG kaynağına sahip 1800 sn uzunluğundaki sentetik veri setleri üretilerek 2D PSI-MASW ve CVFK ile analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada amaç ASG kaynak yoğunluğunun yöntemlerin faz hızı belirleme performansları üzerindeki etkisini araştırmaktır. Düzenlenerek kullanılan kodun çalışma prensibinde, tekil ASG sinyalleri farklı mesafe ve azimutlarda rastgele dağılmış kaynaklardan birbirinden bağımsız şekilde üretilen Green's fonksiyonlardan oluşmakta ve bu tekil sinyaller zaman ortamında toplanarak belirlenen uzunluktaki sentetik veri oluşturulmaktadır. Veri boyu 1800 sn olarak sabit tutulduğundan, kaynak

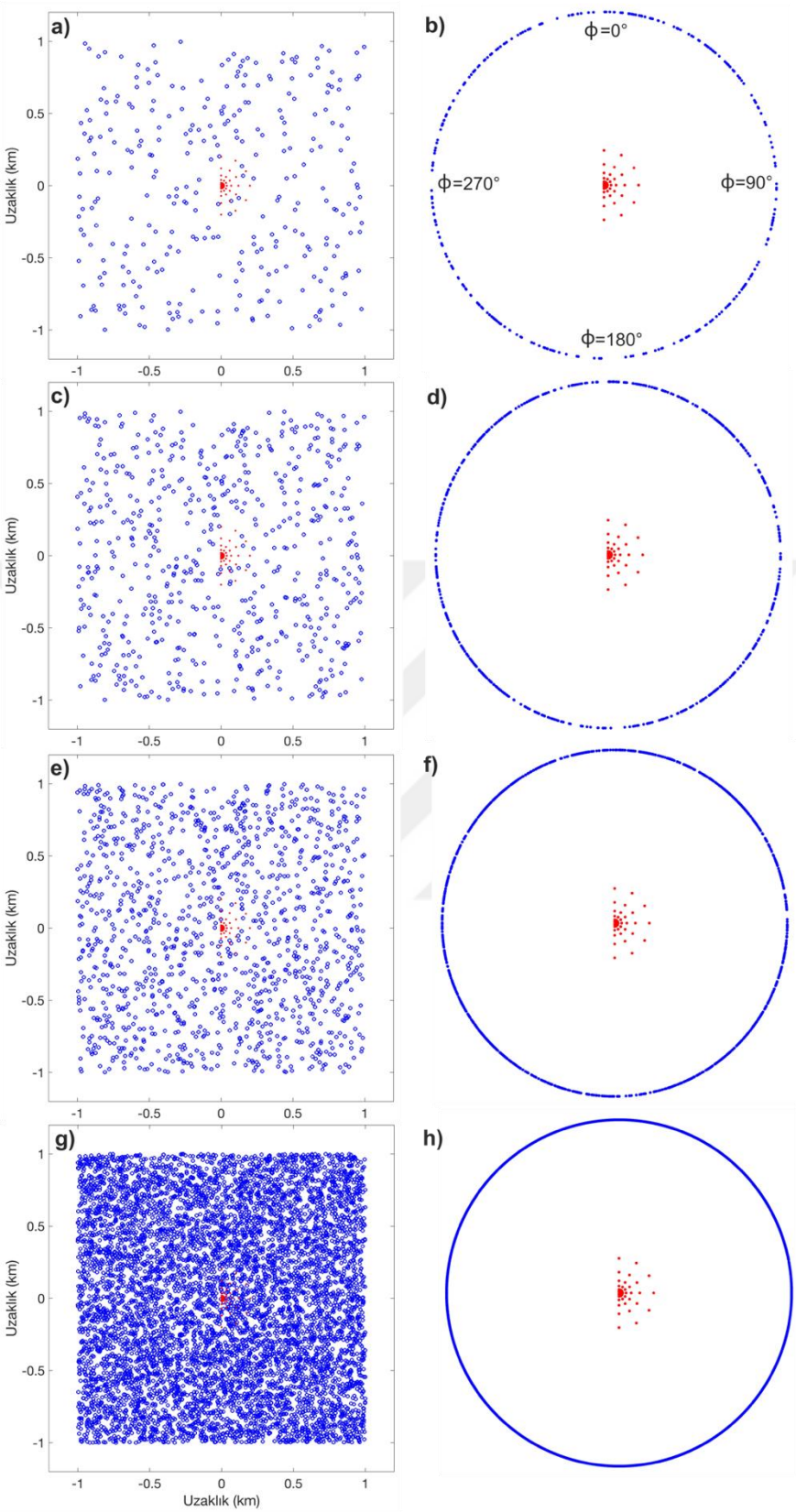
sayısı arttıkça (yoğun kaynak dağılımı) her bir kaynak tarafından üretilen sismogramlardaki sinyallerin zaman ortamında üst üste örtüşme oranı da artmaktadır. Aksine kaynak sayısı azaldıkça (seyrek kaynak dağılımı) zamandaki bu örtüşme de azalmaktadır. Buna göre; ASG sentetiği oluşturulurken 300, 600, 1200 ve 7200 kaynak sayısı için farklı kaynaklar tarafından üretilen sismogramlar sırasıyla 6sn, 3 sn, 1.5 sn ve 0.25 sn'de bir toplanmaktadır. Şekil 4.28'de değişen kaynak yoğunluğu için üretilen ASG sentetikleri arasındaki zamanda örtüşme farkı 1 nolu alıcı verisi üzerinden gösterilmektedir. 300 kaynaklı sentetik verideki sinyaller zamanda oldukça ayrımlı iken 7200 kaynaklı sentetik veride sinyaller zaman ortamında büyük oranda örtüşmüş durumdadır.

Değişen kaynak yoğunlukları için ASG kaynaklarının 2B sismik dizilim çevresindeki uzaysal dağılımı Şekil 4.29'da verilmektedir. Buna göre; tüm kaynak yoğunlukları için mesafe ve azimut açısından rastgele bir kaynak dağılımının elde edildiği ve izotropik yani yön bağımsız kaynak dağılımının sağlandığı görülmektedir. 300 kaynak ile üretilen ASG sentetiği için hesaplanan 2D PSI-MASW ve CVFK panelleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.32'da sunulmaktadır.

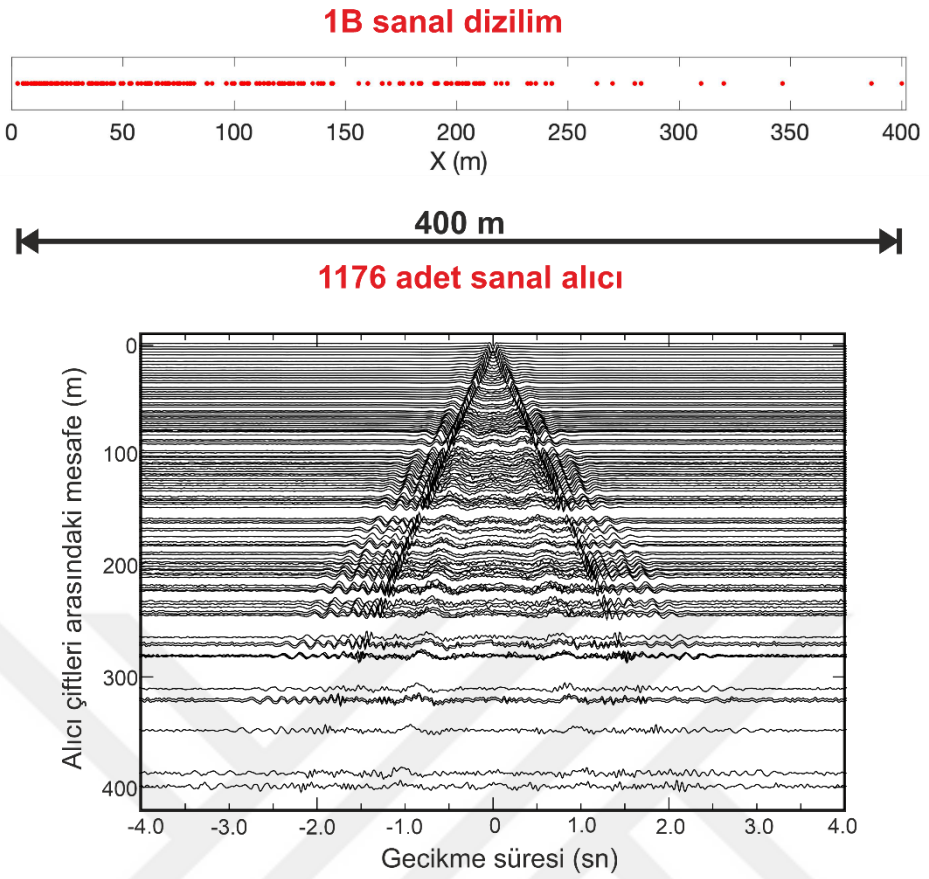
2B yelpaze şekilli dizilimden oluşturulan ve 2D PSI-MASW analizinde kullanılan 1B sanal dizilim ve 300 kaynaklı sentetik ASG verisinden oluşturulan uzaysal olarak yığılmış SAT Şekil 4.30'da verilmektedir. 2D PSI-MASW analizinde kullanılan SAT 1176 sanal alıcı çifti içermekte ve dizilimin en büyük alıcı açıklığı D_{max} = 400 m olmaktadır. Uzaysal yığılmış SAT oluşturulurken yığma aralığı 1 m, alıcılar arası mesafe tarama aralığı ise 2 m olarak kullanılmıştır (bkz. Bölüm 3.3.3). SAT'nin nedensel olmayan ve nedensel kısımlarında simetrik ve güçlü Rayleigh dalgası paketlerinin gözlenmesi, sentetiklerin üretilmesinde kullanılan ASG kaynak dağılımının izotropi koşullarını yeterince sağladığının (Şekil 4.29) ve kullanılan yüzey dalgası simülasyon kodunun doğru şekilde çalıştığının en önemli göstergesidir. 600, 1200 ve 7200 kaynaklı sentetiklerden oluşturulan uzaysal olarak yığılmış SAT'lerde de benzer şekide, simetrik ve güçlü Rayleigh dalgası paketleri görülmektedir (Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.36).



Şekil 4.28 : 1 nolu alıcı için 300, 600, 1200 ve 7200 kaynak sayısı için üretilen ASG sentetik verileri. Üstte 1800 sn uzunluğundaki tüm veri seti, altta ise 50-100 sn zaman aralığında yakınlaştırılmış sismogramlar sunulmaktadır.

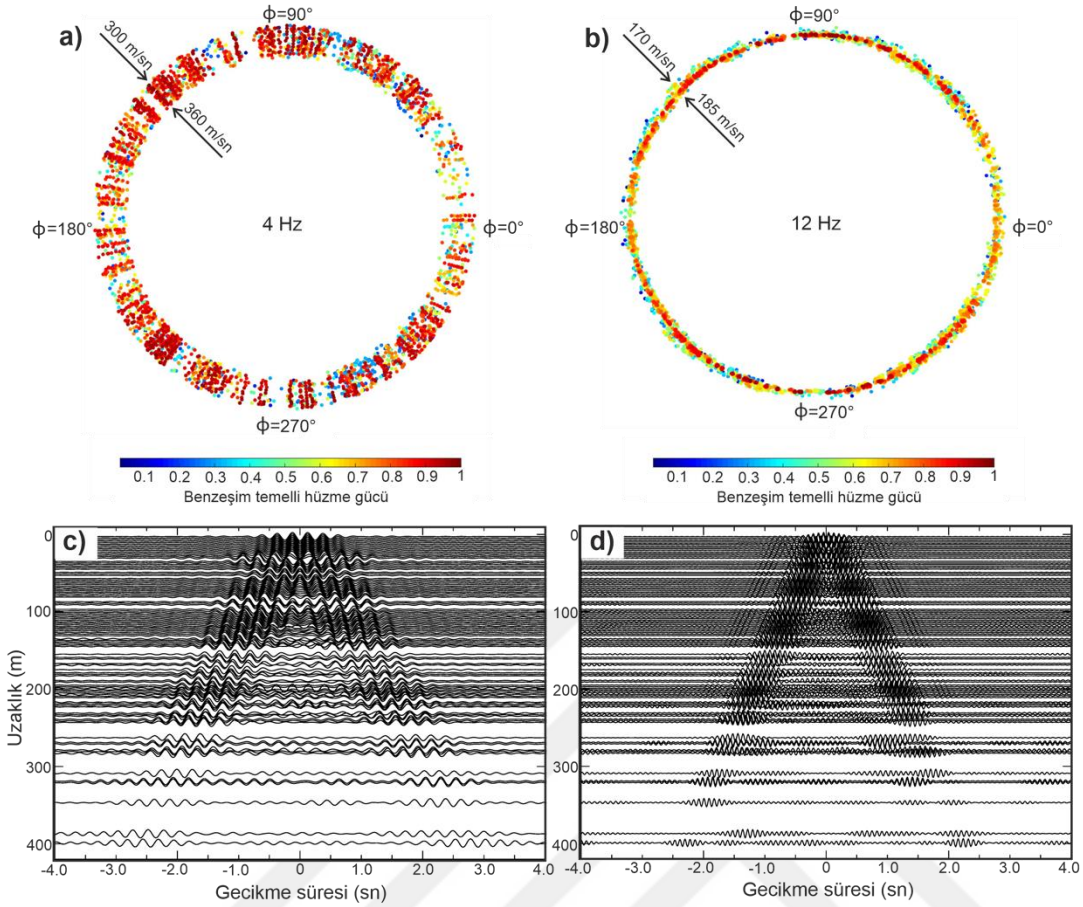


Şekil 4.29 : Yukarıdan aşağıya 300, 600, 1200 ve 7200 kaynaklı sentetikler için uzaysal kaynak dağılımları. (a), (c), (e), (g) uzaysal dağılımı ve (b), (d), (f), (h) yönsel dağılımı gösterir. Kırmızı daireler 2B dizilimi oluşturan alıcıları, mavi daireler ise ASG kaynaklarını göstermektedir.



Şekil 4.30 : Yelpaze şekilli dizilim için 2D PSI-MASW analizinde kullanılan 1B sanal dizilim (üstte), 300 kaynaklı ASG sentetiği için uzaysal olarak yığılmış SAT (altta). SAT'de nedensel olmayan ve nedensel kısımlarda iyi gelişmiş ve simetrik Rayleigh dalgası paketleri görülmektedir.

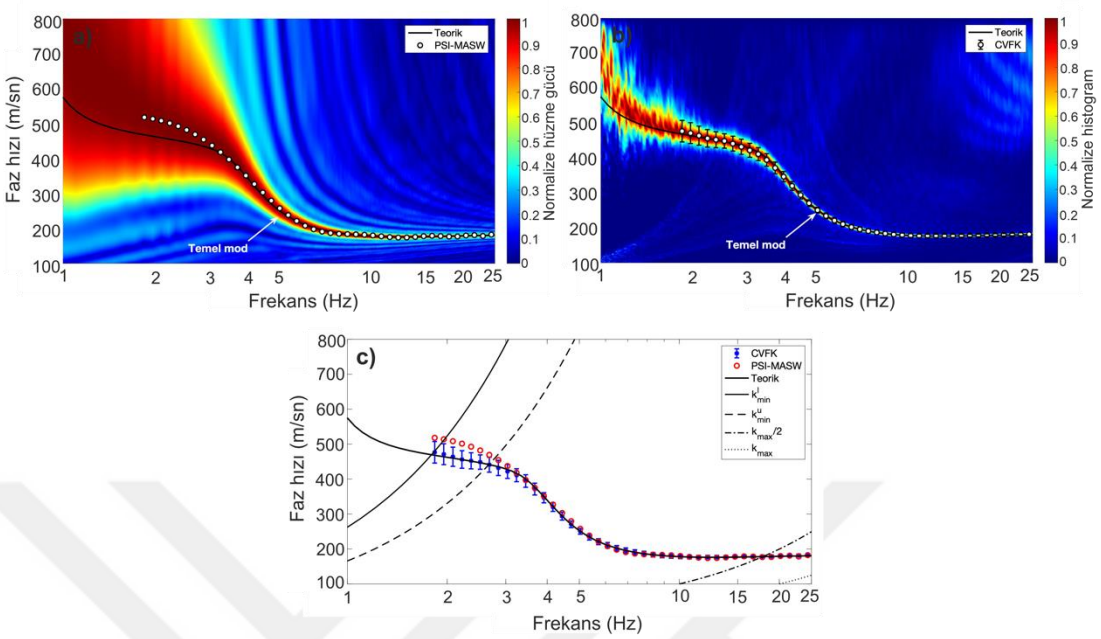
Sentetik verilerin üretilmesinde kullanılan ASG kaynak dağılımlarının, farklı kaynak yoğunlukları için izotropik olduğu Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Üretilen sentetiklerin gerçekten izotropik bir ASG kaynak dağılımını simüle edip etmediğini görebilmek için ise, 4 ve 12 Hz merkez frekansları için CVFK'den elde edilen ASG yönsel dağılımları ve 2D PSI-MASW'den hesaplanan yığılmış ve yine aynı merkez frekanslarda süzülmüş SAT'ler oluşturulmuştur (Şekil 4.31). Her iki merkez frekansı için, CVFK'den elde edilen ASG kaynak yönlerinin homojen bir dağılım göstermesi (Şekil 4.31a, b) ve 2D PSI-MASW'den hesaplanan SAT'lerin nedensel olmayan ve nedensel kısımlarında oldukça enerjik ve oldukça simetrik Rayleigh dalgası paketlerinin görülmesi (Şekil 4.31c, d), ASG sentetiklerinin izotropik ASG dalga alanını simüle edecek şekilde oluşturulabildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.31 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için (a) 4 Hz ve (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, uzaysal olarak yığılmış ve (c) 4 Hz ve (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

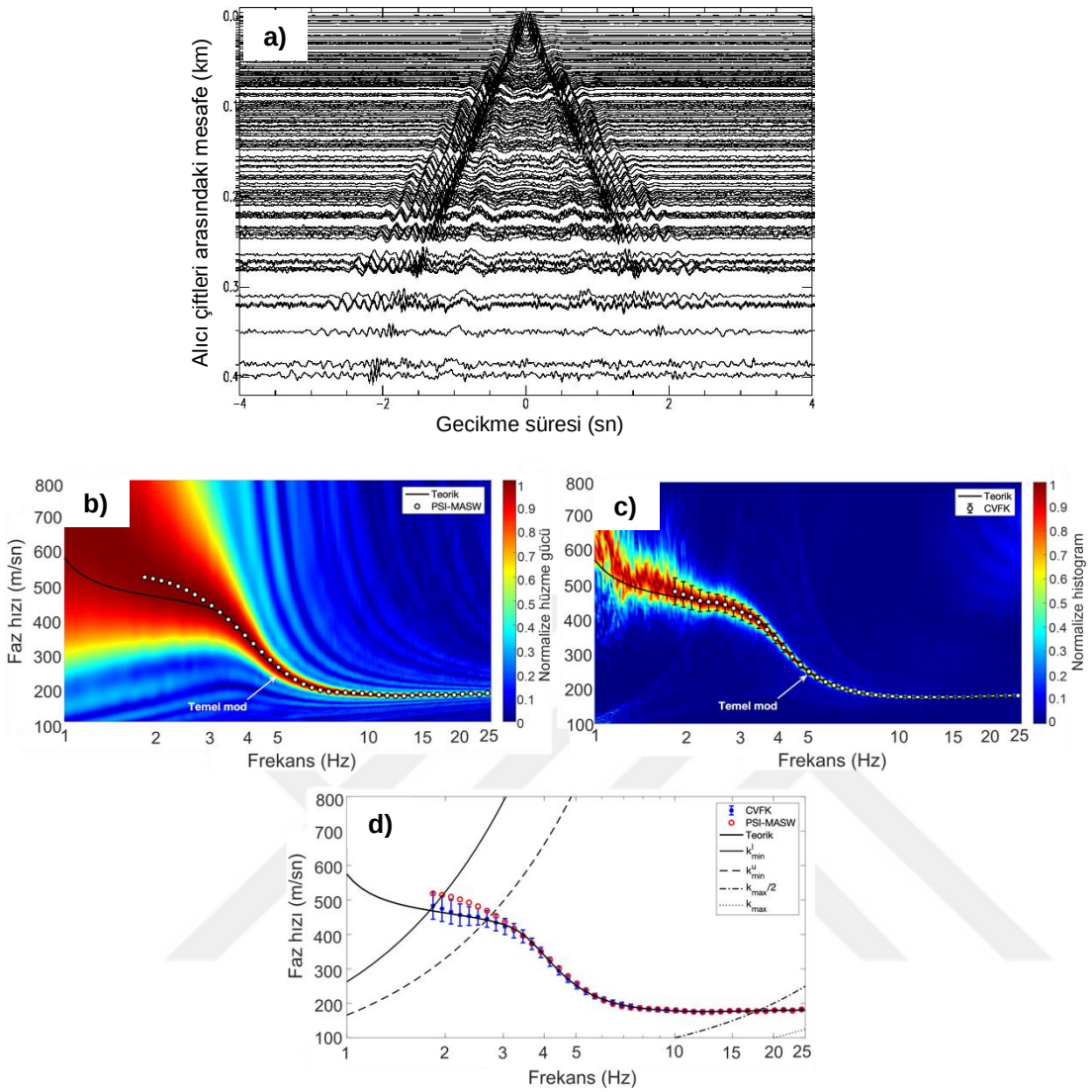
300 kaynaklı ASG sentetiğinin 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile işlenmesi sonucunda hesaplanan paneller Şekil 4.32'de verilmektedir. FHD panellerinde iki yöntem ile işaretlenen faz hızı farklarının dizilimin uzaysal limitleri (~2-25 Hz) içerisinde < 30 m/sn'nin altında kaldığı ve teorik dispersiyon eğrisinin iki yöntemle de büyük oranda doğru şekilde belirlendiği görülmektedir. İki yöntem ile işaretlenen faz hızları arasındaki farklar uzaysal limitler içerisinde kalan bölgede %4'ün altında, 0-5 m/sn olarak elde edilmekte ve CVFK'den elde edilen standart sapmaların da altında kalmaktadır. Uzaysal çözünürlük limitlerinin aşıldığı düşük frekanslarda (< 3 Hz) ise faz hızı farkları 10-20 m/sn aralığında değişmekte ve en yüksek %8 civarında değer almaktadır. Faz hızı panellerinde dikkat çeken unsurlardan biri, çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekanslar için 2D PSI-MASW ile faz hızlarının teorik hızlardan % 6 - % 8 oranında yüksek kestirilmesi, CVFK ile ise teorik faz hızlarının daha küçük farklar ile belirlenmesidir. Buna karşılık, her iki yöntemin hata sınırları da göz önüne

alındığında, faz hızlarının benzer şekilde, teorik değerlerden yüksek kestirildiği söylenebilir.



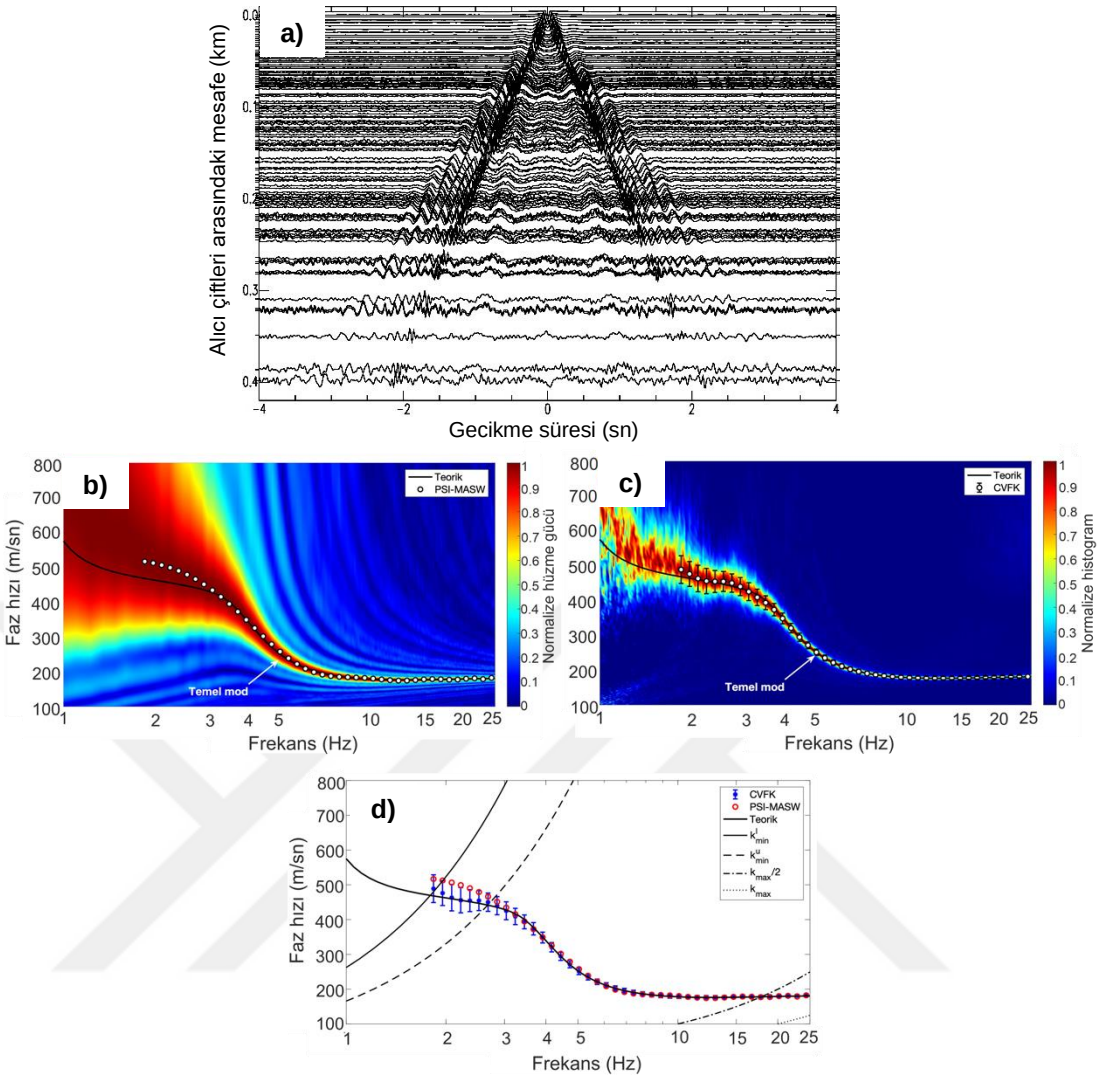
Şekil 4.32 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan, (a) 2D PSI-MASW paneli, (b) CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin karşılaştırması. Modelden hesaplanan sentetik faz hızı dispersiyonu düz siyah eğri ile, temel Rayleigh dalgası modu için işaretlenen dispersiyon eğrileri, (a) ve (b)'de beyaz dairelerle gösterilmektedir. CVFK için hesaplanan standart sapmalar, (b)'de siyah hata çubukları ile işaretlenmiştir. 2D PSI-MASW panelindeki (a) renk skalası normalize edilmiş hüzme gücünü, CVFK panelindeki (b) renk skalası ise normalize edilmiş sayımı (count) gösterir. (c)'de hata çubukları içeren mavi yıldızlar ve kırmızı daireler, sırasıyla CVFK ve 2D PSI-MASW yöntemleriyle kestirilen FHD eğrilerini gösterir. Kullanılan 2B dizilim için çözünürlük ve örtüşme limit eğrileri lejantta verilen tanımlarıyla siyah çizgiler olarak sunulmaktadır.

Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.36'da 600, 1200 ve 7200 kaynaklı ASG sentetikleri için uzaysal yığılmış SAT'ler ile bu SAT'lerin 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak işlenmesi sonucunda hesaplanan FHD panelleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 4.33 : 600 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması. Açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

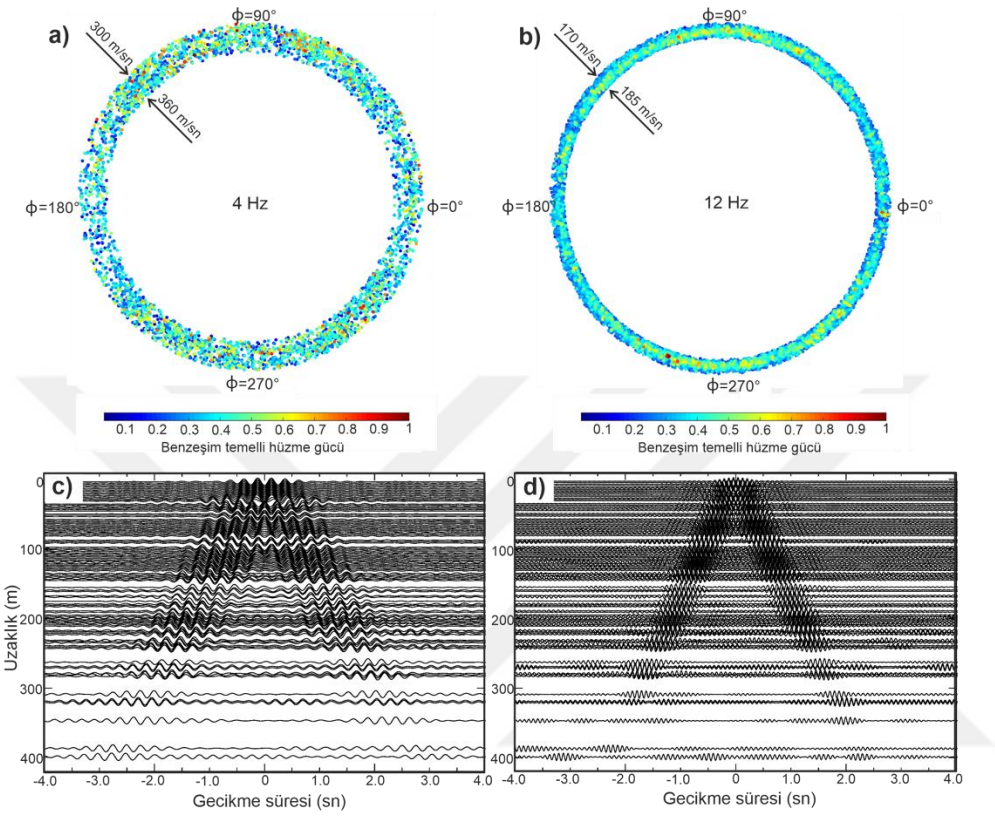
600 kaynaklı ASG sentetiğinin işlenmesi sonucunda hesaplanan paneller karşılaştırmalı olarak incelendiğinde (Şekil 4.33), iki yöntem ile işaretlenen faz hızı farklarının 300 kaynaklı sentetikten elde edilen sonuçlara göre azaldığı görülmektedir. Uzaysal çözünürlük limitlerinin dışında kalan düşük frekanslar için farklar 20 m/sn'nin ve CVFK'den elde edilen standart sapmaların altındadır. Uzaysal limitler içerisinde kalan bölgede ise faz hızı farkları 0-6 m/sn (< % 3) gibi çok düşük bir aralıktadır. Tüm frekans bandı göz önünde bulundurulduğunda ise farkların % 10'u geçmediği belirlenmektedir.



Şekil 4.34 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması. Şekil açıklamaları Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

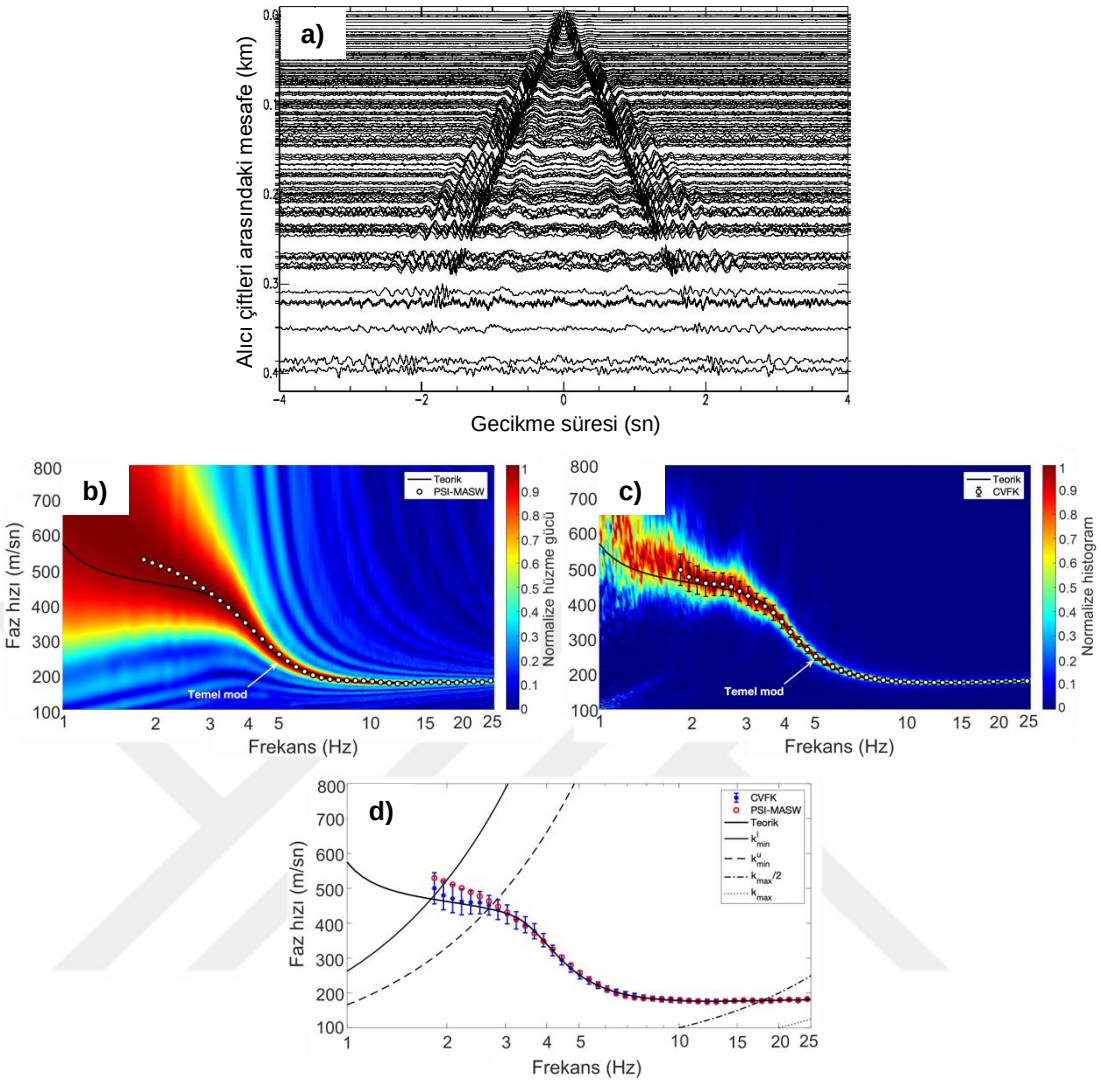
Üretilen sentetiklerin izotropik ASG kaynak dağılımını doğru şekilde simüle ettiğini gösterebilmek adına, 7200 kaynaklı sentetik veri seti için de 4 ve 12 Hz merkez frekanslarında CVFK'den elde edilen ASG yönsel dağılımları ve 2D PSI-MASW'den hesaplanan yığılmış ve yine aynı merkez frekanslarda süzülmüş SAT'ler sunulmuştur (Şekil 4.35). Buna göre; 300 kaynaklı sentetikte olduğu gibi, CVFK'den elde edilen ASG kaynakları yönsel anlamda oldukça homojen bir dağılım göstermektedir. Ayrıca, 7200 kaynaklı sentetiğin üretilmesinde 300 kaynaklı sentetiğe göre 24 kat fazla kaynak kullanıldığından, ASG kaynakları tüm yönleri çok daha yoğun örnekleyecek şekilde dağılmaktadır. Dolayısıyla, 2D PSI-MASW'den hesaplanan SAT'lerin nedensel olmayan ve nedensel kısımlarında yüksek enerjili ve neredeyse tamamen simetrik

Rayleigh dalgası paketleri görülmektedir. Her iki yöntemle, farklı kaynak yoğunlukları ve farklı frekanslar için elde edilen bu sonuçlar (Şekil 4.31, Şekil 4.35), oluşturulan sentetikler ile izotropik bir ASG dalga alanının başarılı şekilde simüle edilebildiğini gösterir niteliktedir.



Şekil 4.35 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için a) 4 Hz b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, uzaysal olarak yığılmış ve c) 4 Hz ve d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

1200 ve 7200 kaynaklı ASG sentetiklerinden elde edilen FHD panellerinde CVFK standart sapmaları artış göstermekte, 7200 kaynaklı sentetik için dizilimin uzaysal çözünürlük limitinde (~ 1.8 Hz) en yüksek değeri olan 50 m/sn'ye ulaşmaktadır (Şekil 4.34, Şekil 4.36). 7200 kaynaklı sentetik için her iki yöntemle işaretlenen faz hızlarından elde edilen farklar tüm frekans bandında standart sapmaların altında kalmaktadır. Bu kaynak dağılımları için, uzaysal limitler içerisinde kalan bölgedeki faz hızı farkları 15 m/sn'den ve % 4'ten düşüktür.



Şekil 4.36 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için (a) uzaysal olarak yığılmış SAT (b) hesaplanan 2D PSI-MASW paneli, (c) hesaplanan CVFK paneli, (d) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel mod FHD eğrilerinin ve teorik eğrinin karşılaştırılması. Şekil açıklamaları Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

Özetle, kaynak yoğunluğu arttıkça 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile elde edilen faz hızları arasındaki farklar azalmakta, CVFK'den hesaplanan standart sapmalar ise artmaktadır. Bununla beraber, kaynak yoğunluğunun artmasıyla uzaysal çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekans bandında CVFK ile kestirilen faz hızları bir miktar yükselip teorik eğriden uzaklaşırken, 2D PSI-MASW ile elde edilen faz hızlarında belirgin bir değişim olmamaktadır.

Testin sonucunda, kaynak yoğunluğunun değişmesinin yöntemlerin faz hızı performansları üzerinde kritik bir etkisinin olmadığı, buna karşılık CVFK ile elde edilen faz hızlarının dizilimin uzaysal çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekans bandında (< 2-3 Hz) artan kaynak yoğunluğunun sonucu olarak teorik eğriden uzaklaşma

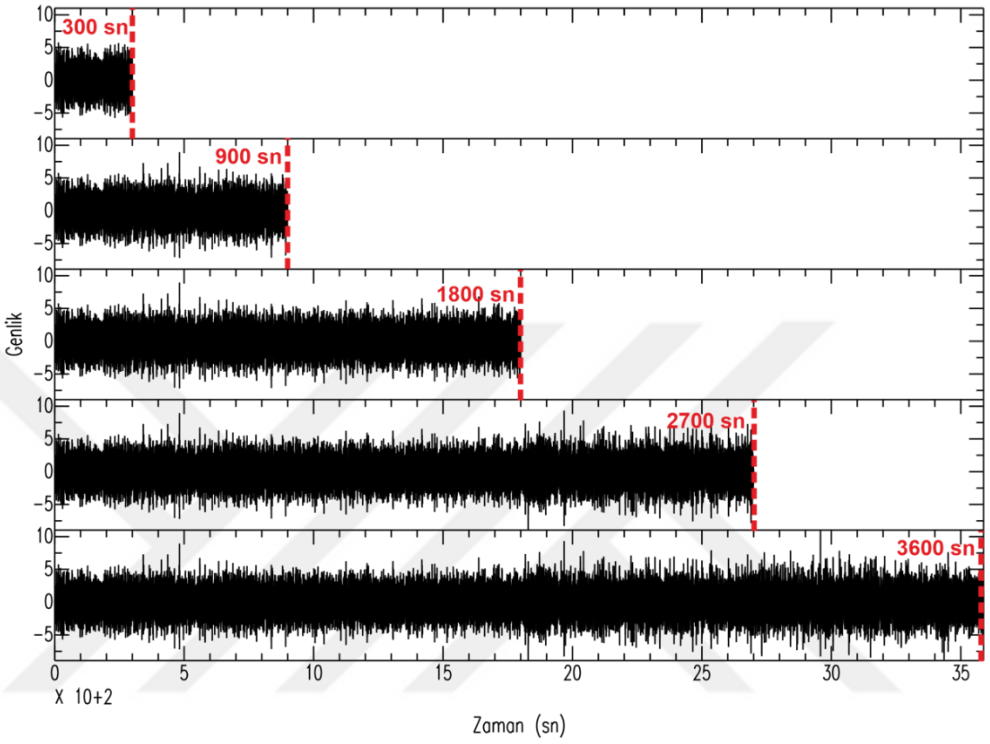
eğiliminde olduğu ve hesaplanan standart sapmaların da benzer şekilde bir miktar yükseldiği görülmektedir. 2D PSI-MASW yöntemi için ise tüm kaynak yoğunlukları için uzaysal çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekans bandında (< 3 Hz) faz hızlarının teorik eğriden yüksek kestirildiği belirlenmektedir. Buna karşılık, uzaysal çözünürlük limit eğrileri arasında kalan bölgede ve limitler dışındaki düşük frekans bandında, her iki yöntemin teoriden beklendiği gibi ve DTF üzerine tartışmanın yapıldığı bölümde (bkz. Bölüm 4.1.5) açıklandığı şekilde, FHD bilgisini bir miktar yüksek kestirdiği sonucu elde edilmiştir.

CVFK yönteminin doğası gereği faz hızı analizi gerçekleştirilen tekil pencerelerde tek ve güçlü bir ASG kaynağından üretilen sinyalin bulunması avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle kaynak yoğunluğu arttıkça, faz hızı analiz penceresinde farklı ASG kaynaklarına ait sinyallerin zamanda örtüşmesi de artmaktadır. Bunun sonucu olarak, CVFK ile faz hızlarının daha hatalı kestirilmesi söz konusu olmaktadır. Buna karşılık, bu test için üretilen ASG sentetiklerinde olduğu gibi izotropik bir kaynak dağılımı sağlanması durumunda 2D PSI-MASW yönteminin faz hızı belirleme performansının değişen kaynak yoğunluğu ile önemli bir değişim göstermediği belirlenmektedir. Kaynak yoğunluğu değişiminin yöntemlerin faz hızı belirleme performansları üzerinde önemli bir etkisinin olmamasının, aynı zamanda, kullanılan 2B dizilim geometrisinin geniş bir uzaysal kapsama sağlaması olduğu değerlendirilmektedir.

4.2.2 Veri boyu testleri

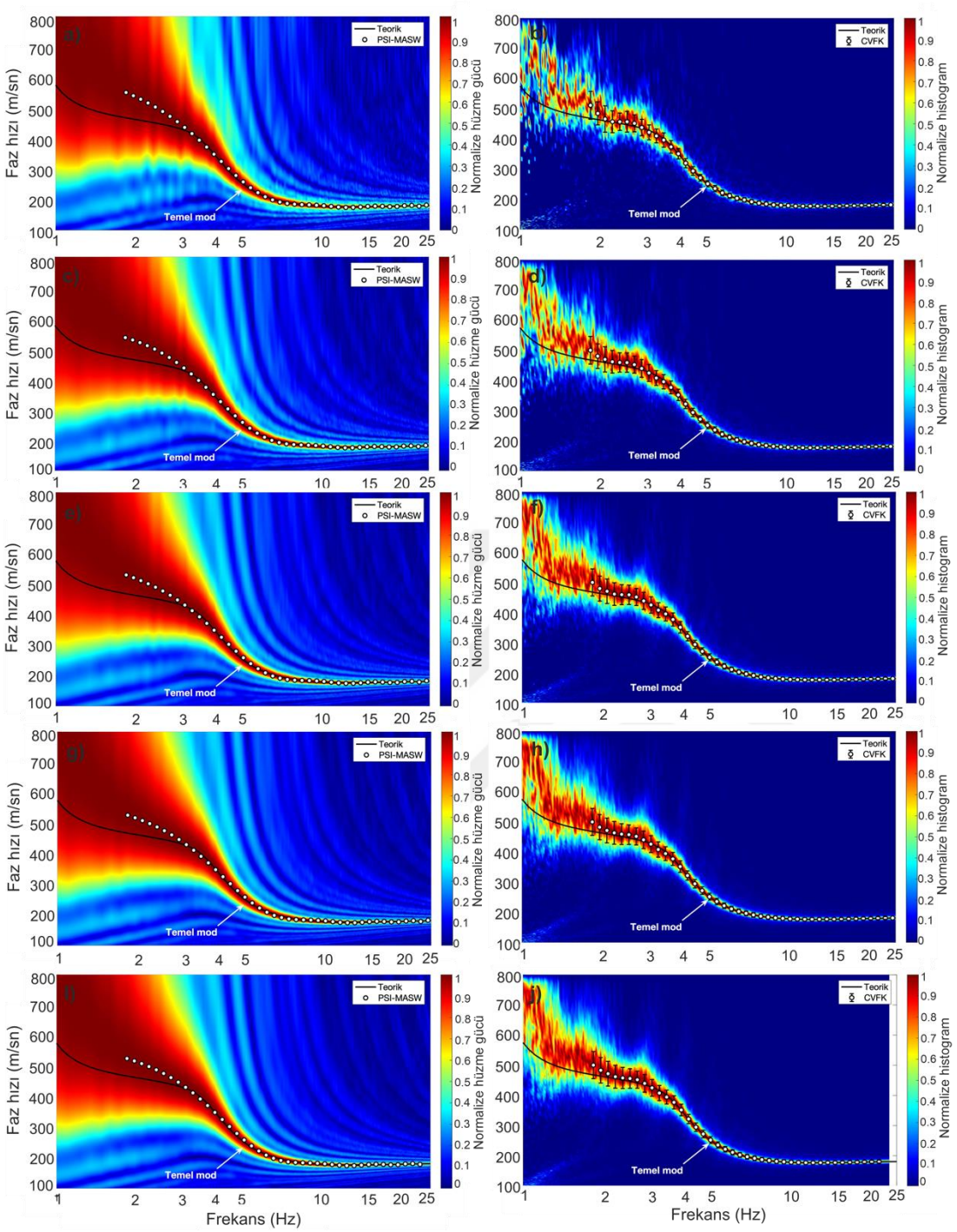
Kullanılan ASG veri boyunun 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin faz hızı dispersiyon belirleme performanslarına olan etkisini incelemek için 7200 kaynaklı ve 300 sn (5 dakika), 900 sn (15 dakika), 1800 sn (yarım saat), 2700 sn (45 dakika) ve 3600 sn (1 saat) uzunluğundaki sentetik veri setleri (Şekil 4.37) oluşturulmuştur. Bu veriler analiz edilerek sonuç FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen FHD eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.38, Şekil 4.39). Her iki yöntemde FHD bilgisi ASG verilerinin kısa pencerelere bölünerek analiz edilmesi ile elde edilmektedir. 2D PSI-MASW yönteminde, alıcı çiftleri arasındaki CCF'ler kısa zaman pencerelerinde frekans-ortamı benzeşim prosedürü ile hesaplanmaktadır. Bunun yanı sıra, zaman ortamı yığma işlemi ile ASG alanındaki sinyallerin güçlendirilebilmesi ve oluşturulan SAT'lerde yüksek SGO'ya sahip bir Rayleigh dalga treninin gözlenebilmesi için yeterli uzunlukta verinin analize dahil edilmesi gereklidir. Benzer şekilde, CVFK yönteminde de faz hızları her

bir f_c için tekil zaman pencerelerinde hesaplanarak istatistiksel yaklaşım ile histogramlanmakta ve CVFK paneli bu şekilde oluşturulmaktadır. Dolayısıyla, bu panel üzerinden belirlenen faz hızlarının doğruluğunu artırmak, belirsizliklerini azaltmak ve standart sapmalarını en aza indirgemek için yeterli uzunlukta bir ASG veri setine ihtiyaç duyulmaktadır.

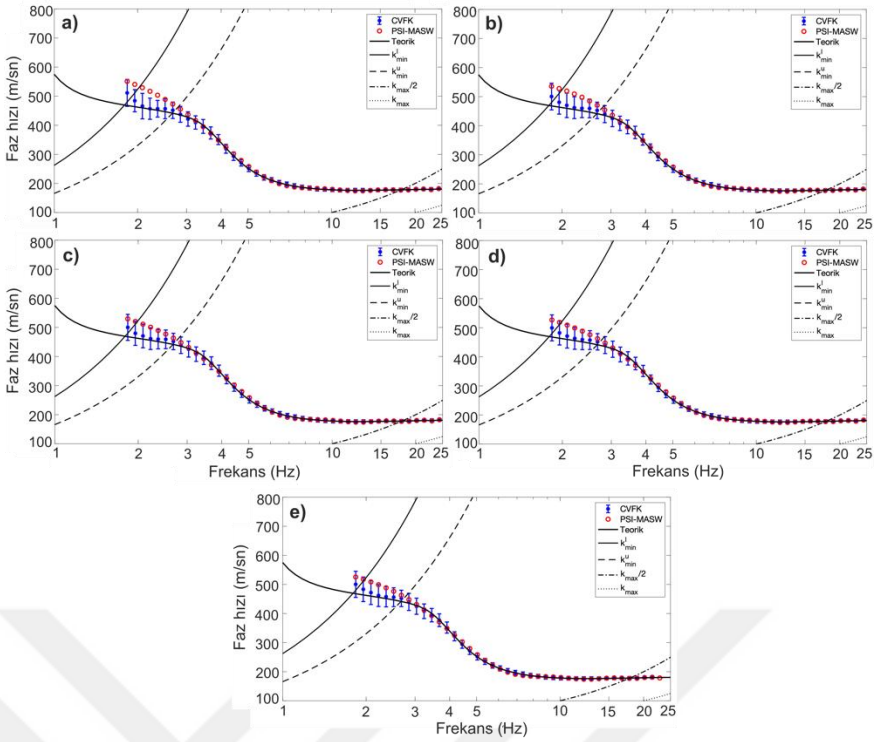


Şekil 4.37 : Veri boyu testinde kullanılan farklı uzunluktaki sentetik ASG kayıtları.

Şekil 4.38'den de takip edilebileceği gibi, analizde kullanılan veri boyunu 3600 sn'den 300 sn'ye doğru kısaltmak her iki yöntem ile işaretlenen faz hızlarının düşük frekans bandında (< 3 Hz) teorik eğriden uzaklaşmasına ve özellikle 2D PSI-MASW yöntemi için FHD'nin daha yüksek kestirilmesine neden olmaktadır. Yüksek frekans bandı (> 3 Hz) için ise veri boyunun değiştirilmesi FHD sonuçları üzerinde etkili olmamaktadır. Bunun yanı sıra, veri boyunun 1800 sn ile 3600 sn arasında değiştirilmesinin, düşük frekans bandında (< 3 Hz) işaretlenen FHD eğrilerinde göz ardı edilebilecek kadar küçük değişikliklere neden olduğu görülmektedir (Şekil 4.38, Şekil 4.39).



Şekil 4.38 : 7200 kaynaklı ve yukarıdan aşağıya sırasıyla 300 sn, 900 sn, 1800 sn, 2700 sn ve 3600 sn uzunluğunda ASG sentetikleri için hesaplanan 2D PSI-MASW panelleri (a), (c),(e), (g), (i) ve CVFK panelleri (b), (d), (f), (h), (j). Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'deki ile aynıdır.



Şekil 4.39 : 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak (a) 300 sn, (b) 900 sn, (c) 1800 sn, (d) 2700 sn ve (e) 3600 sn veri boyları için işaretlenen FHD eğrileri ve modelden hesaplanan teorik eğrinin karşılaştırıldığı paneller. Açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

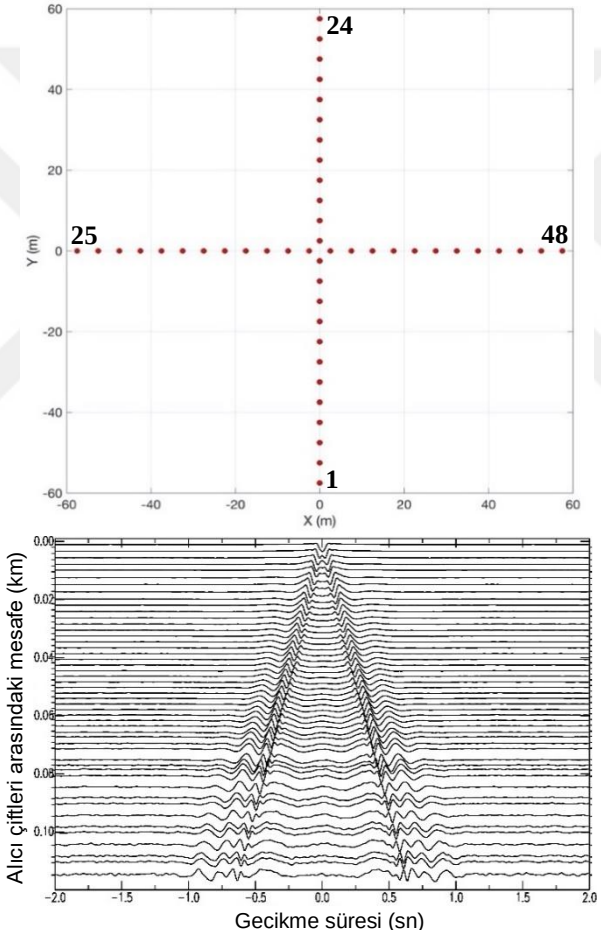
Kullanılan veri boyunun kısalması ile 2D PSI-MASW yönteminde zamansal yığmaya giren çapraz ilişki pencere sayısı da azalmaktadır. Yüksek frekanslı Rayleigh dalgaları SAT'lerde hızlı şekilde ortaya çıkarken, düşük frekanslı Rayleigh dalgası paketlerinin doğru faz bilgisi ile oluşabilmesi için daha fazla pencere sayısına ve daha uzun zamansal yığmaya ihtiyaç duyulmaktadır. CVFK yönteminde ise analiz penceresinin genişliği f_c ile orantılıdır. Dolayısıyla, kullanılan veri boyu kısaldıkça düşük frekans FHD bilgisinin hesaplandığı pencere sayısı da azalmaktadır. Buna karşılık, kullanılan kısa veri boyları yüksek frekans bandı için yeterli sayıda analiz penceresini sağlamaktadır.

Testten elde edilen sonuçlar değerlendirilirken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, sentetik veriler oluşturulurken ASG kaynakları uzaysal olarak iyi dağılmış, izotropik bir ASG dalga alanı ve uzaysal örneklemesi hem azimut hem de mesafe açısından oldukça yeterli bir dizilim kullanılmış olmasıdır. Gerçek saha ortamında bu koşullar hem ASG dalga alanı hem de alıcı dizilim geometrisi açısından çoğu zaman geçerli olmamaktadır. Buna karşın, elde edilen sonuçlar doğrultusunda, düşük frekans

bandındaki FHD bilgisini en düşük hata ile elde edebilmek için veri boyunun 1800 sn ya da daha uzun olması gerektiği degerlendirilmektedir.

4.2.3 Dizilim geometrisi ve ASG kaynaklarının yönsel dağılımı testleri

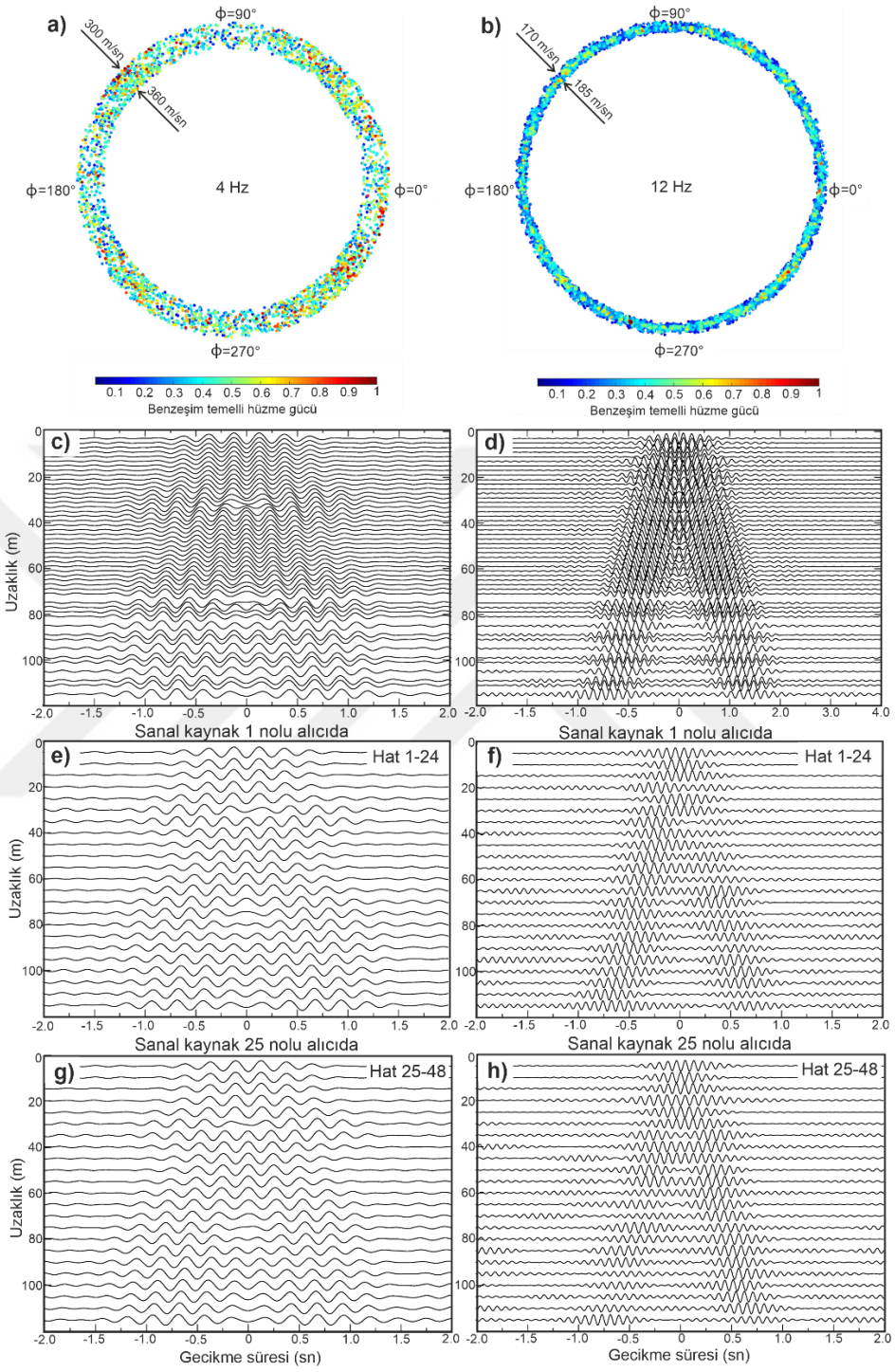
Bu bölümde, hem dizilim geometrisinin hem de ASG kaynaklarının yönsel dağılımının, CVFK ve 2D PSI-MASW yöntemleri ile FHD belirleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için, 5m aralıklı 48 alıcıdan oluşan, simetrik artı şeklinde geometriye sahip 2B bir dizilim için 7200 kaynaklı ve 1800 sn uzunluğunda sentetik ASG veri seti oluşturulmuştur. Kullanılan dizilim geometrisi ve tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT Şekil 4.40'ta sunulmaktadır.



Şekil 4.40 : ASG sentetiklerinin üretilmesinde kullanılan artı şeklinde ve 48 alıcıdan oluşan 2B dizilim geometrisi (üstte) ve tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT.

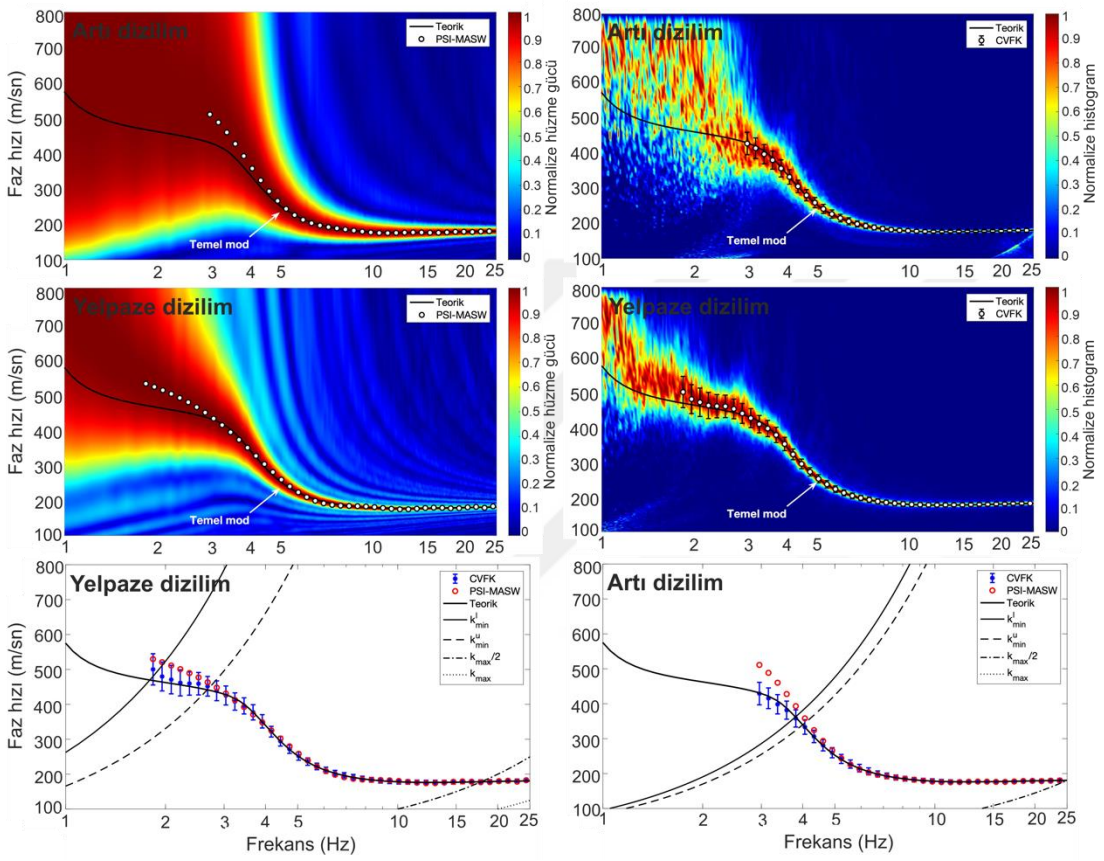
Artı dizilim kullanılarak oluşturulan sentetik veri seti için, 4 ve 12 Hz merkez frekanslarında CVFK'den elde edilen ASG yönsel dağılımları, 2D PSI-MASW ile tüm alıcı çiftlerinden ve yalnızca Hat 1-24 ve Hat 25-48 üzerindeki alıcı çiftlerinden

hesaplanan yığılmış ve yine aynı merkez frekanslarında süzülmüş SAT'ler Şekil 4.41'de sunulmaktadır.



Şekil 4.41 : Artı şeklinde dizilim için (a) 4 Hz (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal olarak yığılarak ve (c) 4 Hz ve (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, (e), (f) 1-24 ve (g), (h) 25-48 alıcı hatlarından oluşturularak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

ASG kaynaklarının yönsel olarak oldukça homojen dağıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, hem tüm alıcı çiftlerinden hem de tekil 1B alıcı hatlarından elde edilen SAT'lerde oldukça simetrik ve enerjik Rayleigh dalgası paketleri gözlenebilmektedir. Kullanılan dizilim geometrisi dışında bire bir aynı parametreler ve aynı ASG kaynak dağılımı için yelpaze ve artı şeklinde dizilim (Şekil 4.27, Şekil 4.40) ile 2D PSI-MASW ve CVFK kullanılarak elde edilen FHD panelleri Şekil 4.42'de sunulmaktadır.



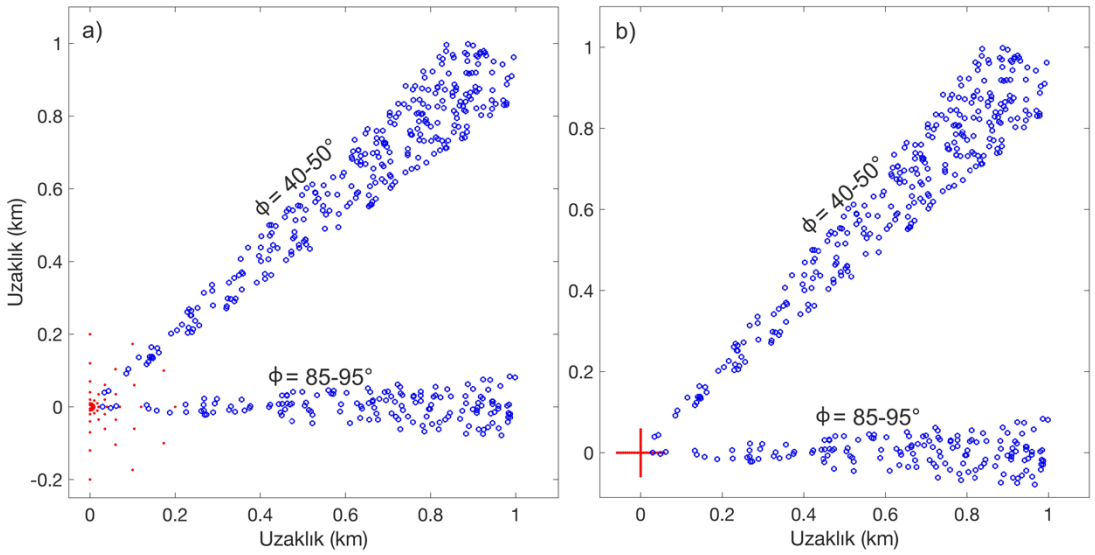
Şekil 4.42 : Simetrik artı ve yelpaze şeklinde 2B dizilim geometrileri için hesaplanan 2D PSI-MASW (üstteki iki sıra, solda) ve CVFK (üstteki iki sıra, sağda) panelleri, panellerden işaretlenen FHD eğrileri ve bu eğrilerin teorik eğri ile karşılaştırılması (altta). Dizilim geometrisi bilgisi panellerin üzerinde verilmektedir. Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

Faz hızları, artı dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde ~ 5 Hz ve altındaki frekanslarda teorik eğriden oldukça yüksek kestirilmekte ve frekansın düşmesi ile teorik FHD eğrisi ile işaretlenen eğri arasındaki fark artmaktadır. Yelpaze dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde ise FHD eğrisi ~3 Hz frekansına kadar teorik eğri ile oldukça uyumludur. CVFK ile hesaplanan FHD panelleri incelendiğinde, yelpaze dizilim kullanılmasının düşük frekanstaki (< 5 Hz) çözünürlüğü bir miktar arttırdığı gözlenmektedir.

Artı dizilim kullanılarak 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD eğrisinde düşük frekanstaki faz hızları yelpaze dizilimdekine göre daha yüksek kestirilme eğiliminde olduğundan, bu dizilim için her iki yöntem ile işaretlenen eğriler arasındaki fark da daha yüksektir. Bunun yanı sıra, her iki yöntem ile işaretlenen FHD eğrileri yüksek frekans bandında (> 5 Hz) birbirleriyle ve teorik eğriyle daha iyi örtüşmektedir (Şekil 4.42).

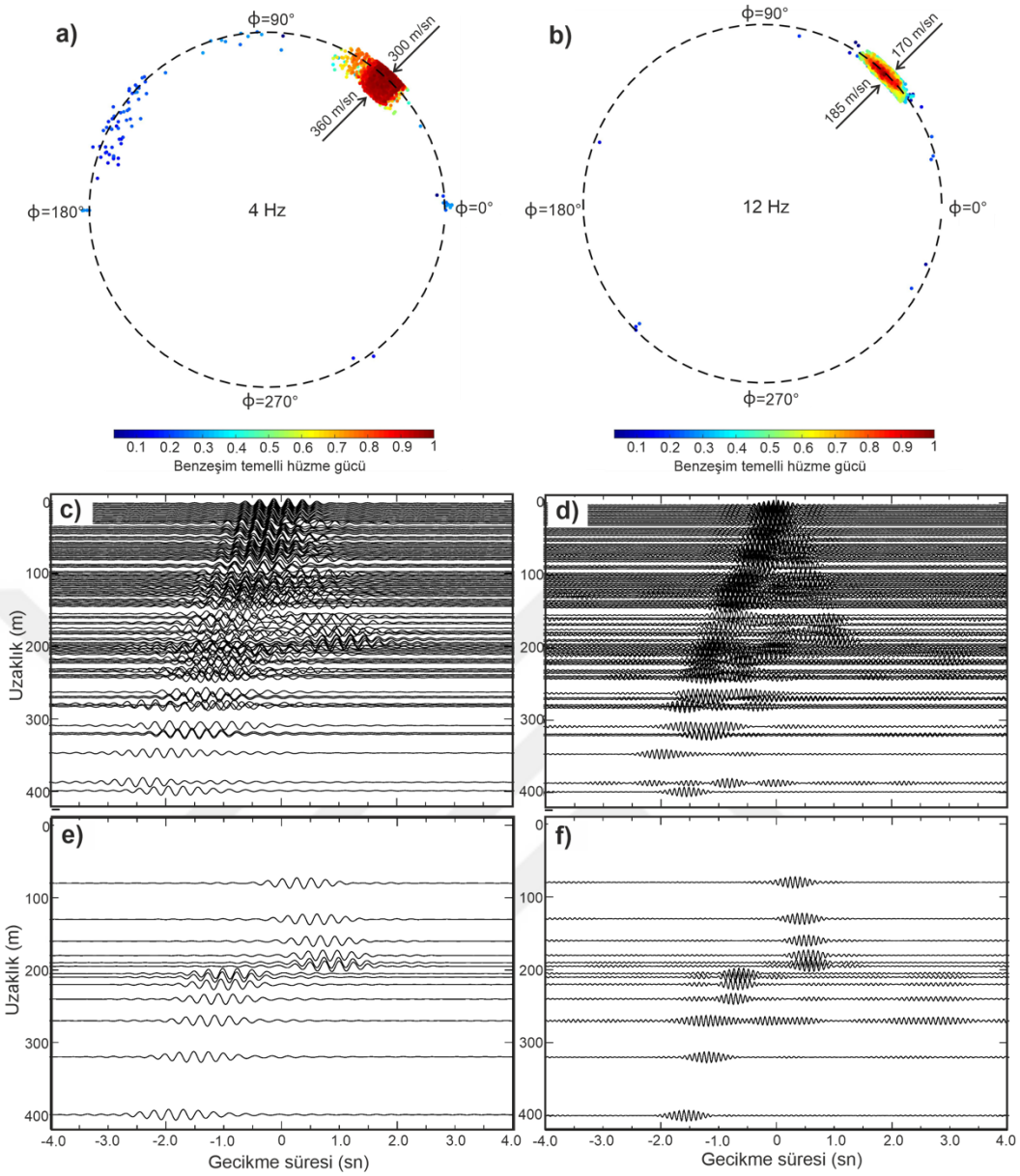
Uzaysal çözünürlük limitleri açısından değerlendirildiğinde, yelpaze dizilimin özellikle düşük frekans bandında daha doğru FHD bilgisi vermesinin nedeninin kullanılan dizilim geometrisinin daha uzun bir alıcı açıklığına sahip olması ve daha zengin bir uzaysal örnekleme sağlaması olduğu söylenebilir. Yelpaze dizilim ile elde edilen en büyük alıcı açıklığı 400 m iken, artı dizilimde bu açıklık 115 m'ye düşmektedir. Bu durumda, CVFK çözünürlük limitleri de artı dizilim için düşük frekans bandında daha kısıtlayıcı olmaktadır. FHD panellerinde düşük frekans bandında teorik eğriden olan sapmaları gösterebilmek için eğriler 3 Hz frekansına kadar işaretlenmiş olmakla birlikte, artı dizilimin sağladığı çözünürlük alt limitine göre FHD eğrisi düşük frekans ucunda yaklaşık 4 Hz'e kadar işaretlenmelidir. Buna karşılık, yelpaze dizilim ile düşük frekanstaki limit değeri 2 Hz'e kadar ulaşmaktadır. Bu da FHD bilgisinin yelpaze dizilim ile daha geniş bir frekans bandında elde edilmesini sağlamaktadır.

Testin bir sonraki aşamasında, ASG dalga alanının izotropik dağılım gösteren kaynaklar yerine belirli bir azimut aralığında konuşlanmış, yönlü kaynaklardan oluşması durumunda her iki yöntemin FHD belirleme performansları incelenmiştir. Bu amaçla, yalnızca 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında bulunan ASG kaynakları seçilerek artı ve yelpaze dizilim için sentetik veri setleri oluşturulmuştur. Toplam 7200 ASG kaynağından 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarına düşen kaynak sayısı sırasıyla 298 ve 155'tir. Her iki dizilim için, yönlü ASG kaynakları ile oluşturulan sentetik veri setlerinden FHD panelleri hesaplanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.43'te 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıkları için seçilen ASG kaynaklarının uzaysal dağılımları, kullanılan alıcı dizilimleri ile birlikte verilmektedir. Şekil 4.44'te ise 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için, yelpaze dizilim ile 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında hesaplanan ASG kaynaklarının yönsel dağılımı ve aynı frekanlarda süzülmüş SAT panelleri sunulmaktadır.



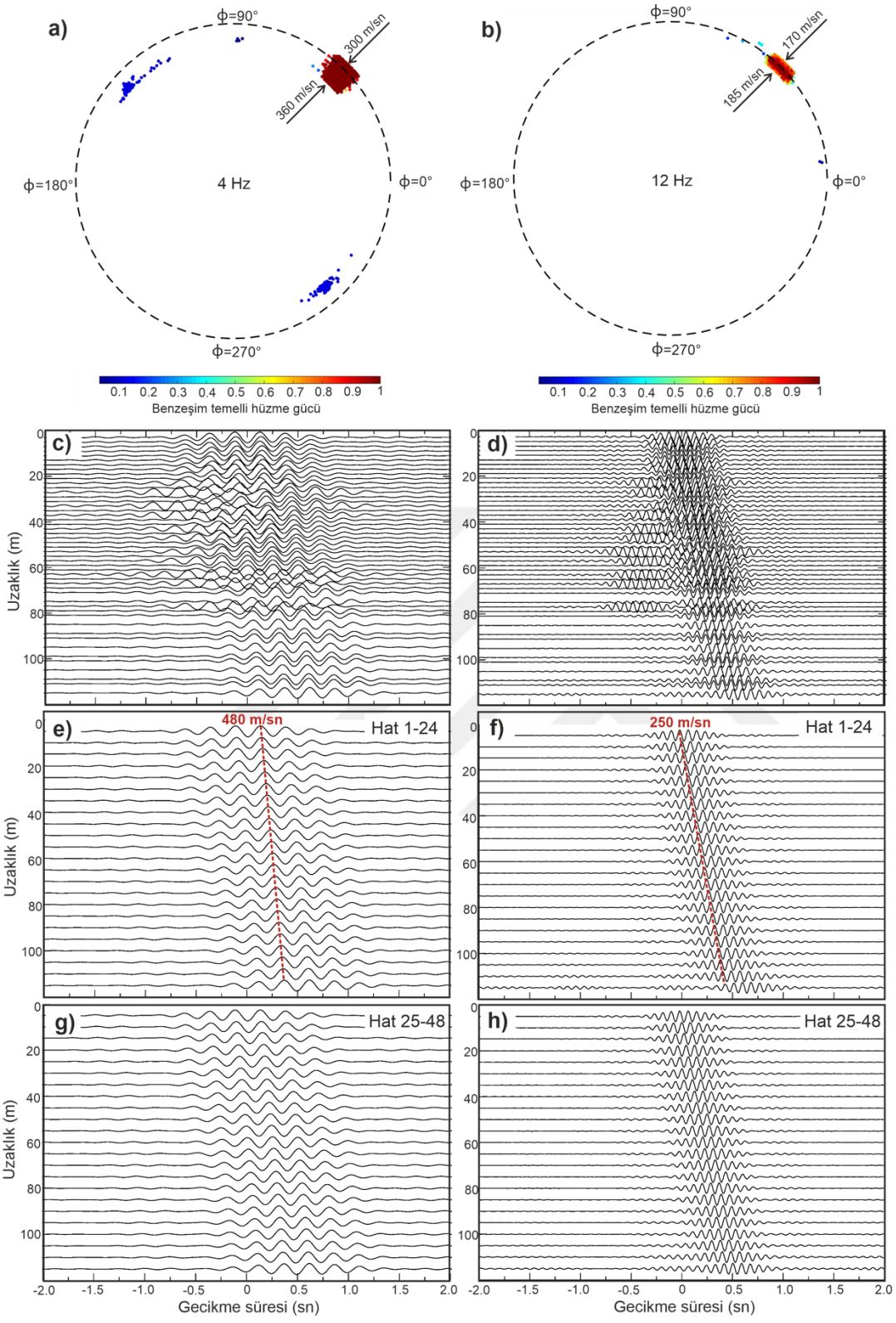
Şekil 4.43 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıkları için seçilen ASG kaynaklarının yelpaze (a) ve artı dizilimle (b) birlikte sunulan konumları. Kırmızı daireler sismik dizilim geometrisini, içi boş mavi daireler ise kaynakların konumlarını gösterir.

Yelpaze dizilim kullanılarak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekansları için CVFK'den hesaplanan kaynakların yönsel dağılımı, 40°-50° azimut aralığındaki ASG kaynakları kullanılarak oluşturulan dağılım ile uyumlu şekilde elde edilmektedir (Şekil 4.44a ve b). Hesaplanan SAT panellerindeki Rayleigh dalgası paketleri ise, izotropik ASG kaynak dağılımı ile hesaplanan SAT'lerdeki (Şekil 4.35) kadar simetrik ve faz uyumlu bir görüntüye sahip değildir. Oldukça sınırlı bir azimut aralığına karşılık gelen ve dizilimdeki hat doğrultularıyla tam olarak örtüşmeyen bu kaynak dağılımı için bu beklenen bir sonuçtur. ASG kaynaklarının yönlü dağılımı nedeniyle dizilimin 0°-180° doğrultusu boyunca uzanan hat üzerindeki alıcı çiftlerinden oluşturularak süzülen SAT'lerde de Rayleigh dalgası paketleri nedensel olmayan ve nedensel kısımlar için simetrik değildir. SAT'lerdeki Rayleigh dalgası paketleri, bu hat üzerindeki alıcı çiftlerinin yönsel uzanımının baskın kaynak yönü olan 40°-50° azimutuna göre konumuna bağlı olarak nedensel olmayan ya da nedensel kısımlarda oluşmaktadır (Şekil 4.44 c-f).



Şekil 4.44 : 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için, yelpaze dizilim ile CVFK'den hesaplanan (a) 4 Hz, (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal yığma ile elde edilen ve (c) 4 Hz, (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, yelpaze dizilimin 0°-180° doğrultusu boyunca uzanan hat üzerindeki alıcı çiftlerinden oluşturan ve (e) 4 Hz, (f) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

Şekil 4.45'te ise 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için, artı dizilim ile 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında hesaplanan ASG kaynaklarının yönsel dağılımı ve aynı frekanslarda süzülmüş SAT panelleri sunulmaktadır.

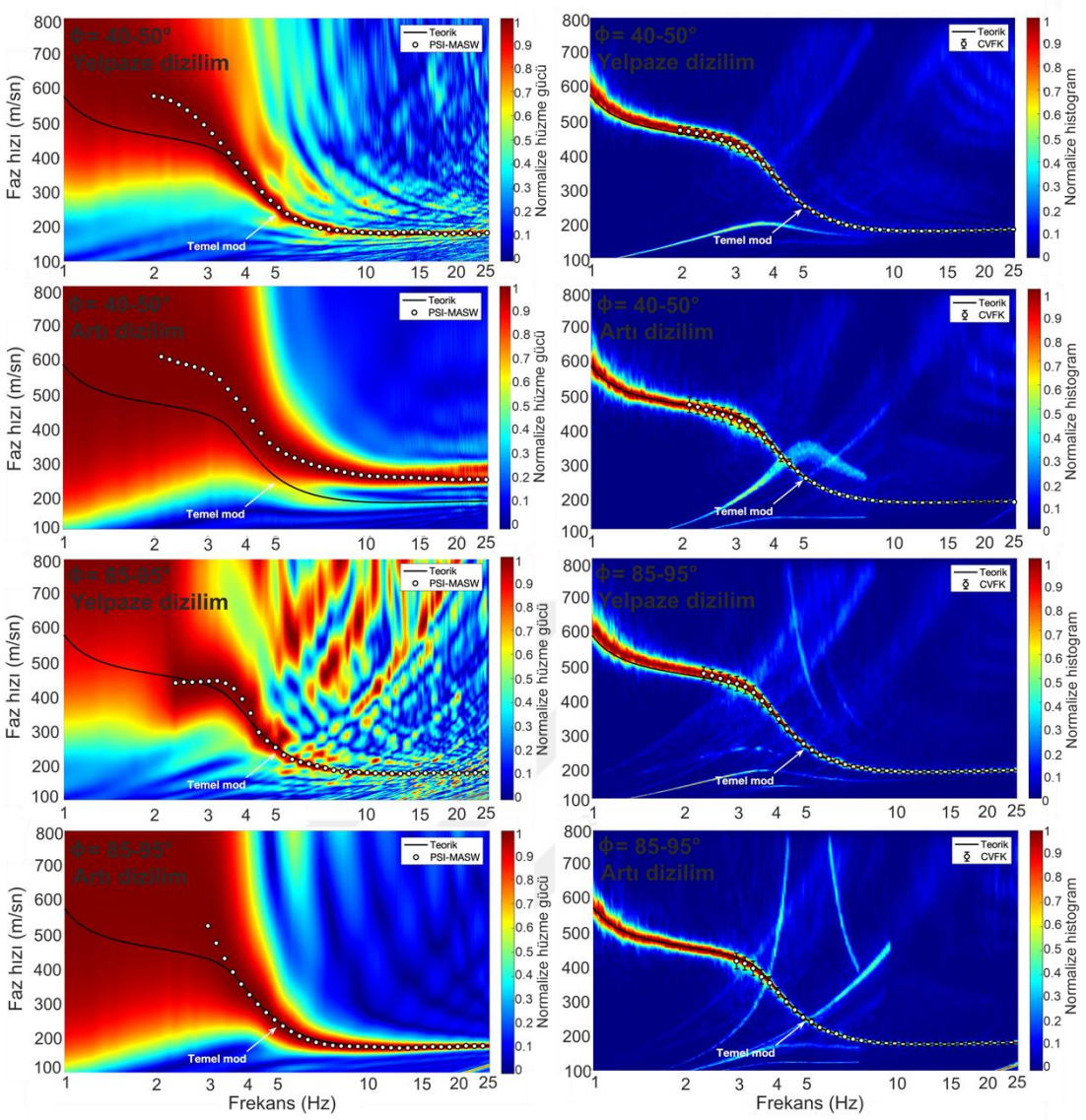


Şekil 4.45 : 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için, artı dizilim ile CVFK'den hesaplanan (a) 4 Hz, (b) 12 Hz merkez frekanslarındaki ASG kaynaklarının yönsel dağılımı, tüm alıcı çiftlerinden uzaysal yığma ile elde edilen ve (c) 4 Hz, (d) 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri, (e), (f) 1-24 ve (g), (h) 25-48 alıcı hatlarından oluşturularak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekanslarında süzülmüş SAT panelleri. Ayrıntılı açıklama Şekil 4.3'teki ile aynıdır.

Artı dizilim kullanılarak, 4 Hz ve 12 Hz merkez frekansları için CVFK'den hesaplanan kaynakların yönsel dağılımı, sentetiklerin üretilmesinde kullanılan 40°-50° azimut aralığındaki ASG kaynak dağılımı (Şekil 4.29) ile uyumlu şekilde elde edilmektedir (Şekil 4.45a ve b). Buna karşılık, tüm alıcı kullanılarak elde edilen SAT panellerinde, oldukça faz uyumsuz ve simetrik olmayan Rayleigh dalgası paketleri görülmektedir (Şekil 4.45c ve d). 40°-50° azimut aralığında verilen ASG kaynakları ile bu dizilimdeki hat doğrultuları arasında 45°'lik bir açı bulunmaktadır (Şekil 4.43). Buna bağlı olarak, tekil 1B alıcı hatlarındaki (1-24 ve 25-48) alıcı çiftlerinden oluşturulan SAT'lerin yalnızca nedensel kısımlarında enerjik olan ve görünür faz hızları ($V_{görünür} = V_{gerçek}/\cos(45°)$) ile tanımlı Rayleigh dalgası paketleri ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.45 e-h). Örneğin, Hat 1-24 için 4 Hz ve 12 Hz frekanslarında süzülmüş SAT'lerdeki görünür faz hızları sırasıyla yaklaşık 480 m/sn ve 250 m/sn olarak okunmaktadır. Buna karşılık, teorik FHD eğrisinde bu frekanslara karşılık gelen faz hızları 340 m/sn ve 180 m/sn olarak belirlenmektedir. Yani, SAT'lerde gözlenen faz hızları teorik değerlerden ~ %30 daha yüksektir.

Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de yukarıda detaylı şekilde sunulan kaynak dağılımları için 2D PSI-MASW ve CVFK kullanılarak elde edilen FHD panelleri ve işaretlenen eğriler sunulmaktadır. 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW panelinde, 4 Hz ve altındaki frekanslarda çok daha belirgin olmakla birlikte, neredeyse tüm frekans bandında faz hızlarının teorik eğriden yüksek kestirildiği, CVFK panelinde ise bu durumun yalnızca 3 Hz'den düşük frekanslarda gerçekleştiği ve faz hızı farklarının 2D PSI-MASW'dakine göre çok daha düşük kaldığı gözlenmektedir.

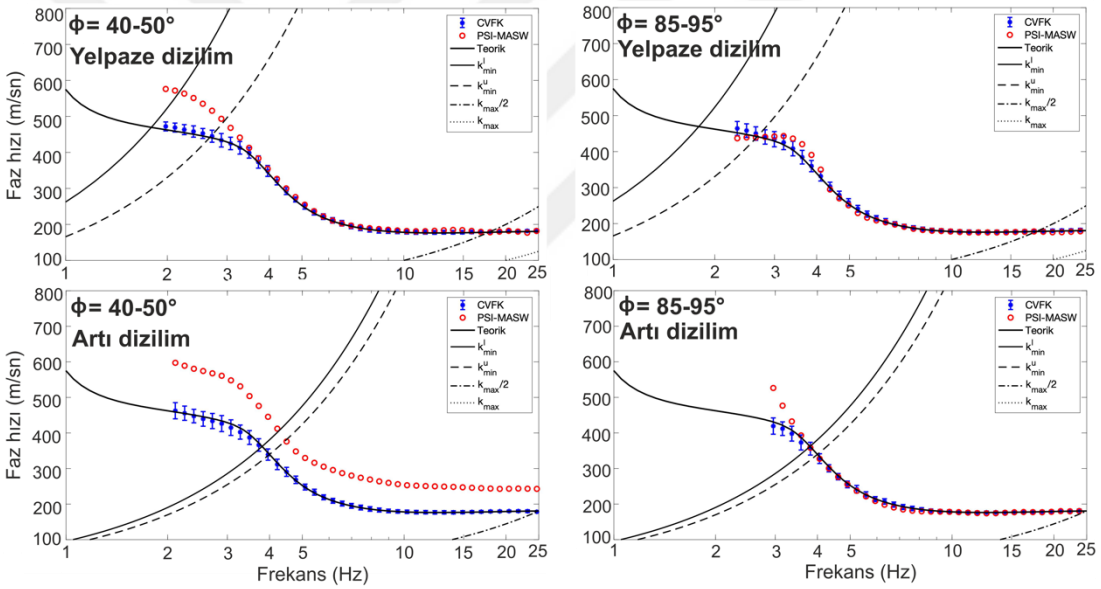
Aynı ASG kaynak dağılımı için artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW panelinde teorik faz hızlarını takip eden branştan daha yüksek hüzme gücü ile tanımlı ve daha yüksek hızlı bir branş oluşmaktadır. Bu branş, temel mod FHD branşında tüm frekans bandı için topyekün bir seviye kayması ile oluşmakta ve ikincil mod olarak yorumlanabilecek yapay bir görüntü oluşturmaktadır. Panelden işaretlenen faz hızları ile teorik hızlar arasındaki farklar % 28- % 40 aralığında oldukça yüksek değerler almaktadır. CVFK panelinde ise dizilim geometrisinin değiştirilmesi önemli bir fark yaratmamakta, düşük frekanslardaki (< 4 Hz) faz hızları teorik hızlardan bir miktar düşük elde edilmekle birlikte, en büyük faz hızı farkları %2 oranındadır (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).



Şekil 4.46 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ve artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW (solda) ve CVFK (sağda) panelleri ve işaretlenen FHD eğrileri. Dizilim geometrisi ve azimutal kaynak aralığı bilgisi panellerin üzerinde verilmektedir. Şekil ile ilgili detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

85°-95° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ile hesaplanan CVFK panelinden işaretlenen faz hızları genel olarak teorik FHD eğrisini doğru bir şekilde takip etmekle birlikte yaklaşık 5 Hz frekansından itibaren düşük frekans bandındaki faz hızları teorik değerlere göre yüksek kestirilmektedir. 2D PSI-MASW panelinde ise FHD branş ayrımlılığı düşmekte, yüksek frekans bandında elde edilen faz hızları teorik eğriye oturmakla birlikte, düşük frekans bandındaki (< 6 Hz) faz hızları teorik eğri etrafında salınmaktadır (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).

85°-95° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW panelinde, 3.5 Hz ve altındaki frekanslardaki faz hızları olduğundan yüksek kestirilmekte, teorik ve hesaplanan faz hızları arasındaki farklar 3 Hz frekansında % 22'yi bulmaktadır. Daha yüksek frekans bandında ise hesaplanan faz hızları küçük farklar ile teorik eğri etrafında salınmaktadır. Aynı koşullar altında CVFK yöntemi ile hesaplanan panelde ise faz hızları düşük frekans bandında (< 5 Hz) olduğundan düşük kestirilmekte, buna karşılık yüksek frekans bandında (> 5 Hz) teorik eğri ile neredeyse bire bir uyumlu sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, 40°-50° azimut aralığında seçilen ASG kaynakları için artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW paneli dışında, hesaplanan tüm FHD panellerinin genel bir değerlendirmesi olarak, yüksek frekans bandında (> 5 Hz) her iki yöntemle FHD bilgisinin teorik faz hızlarına oldukça yakın şekilde elde edildiği söylenebilir.



Şekil 4.47 : 40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında seçilen ASG kaynakları için yelpaze dizilim ve artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW ve CVFK panellerinden işaretlenen FHD eğrilerinin teorik FHD eğrisi ile karşılaştırması. Kullanılan azimut aralığı ve dizilim geometrisi bilgileri panellerin sol üst köşesinde verilmektedir. Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

Yalnızca 40°-50° azimut aralığındaki ASG kaynaklarının seçilmesi hem yelpaze hem de artı dizilim için dezavantaj oluşturmaktadır. Bunun sebebi, bu kaynaklar tarafından üretilen sinyallerin dizilimdeki alıcılara hatların doğrultusunda olmayan yönlerden ulaşmasıdır. Yelpaze dizilimde, 30° ve 60°'lerde, bu azimut aralığını ortalayan iki alıcı hattı bulunmakta, dolayısıyla kaynak dağılımındaki azimutlar ile alıcı hatları arasındaki maksimum yön farkı 10° olmaktadır. Artı dizilimde ise 0° ve 90°'lerde, birbirine

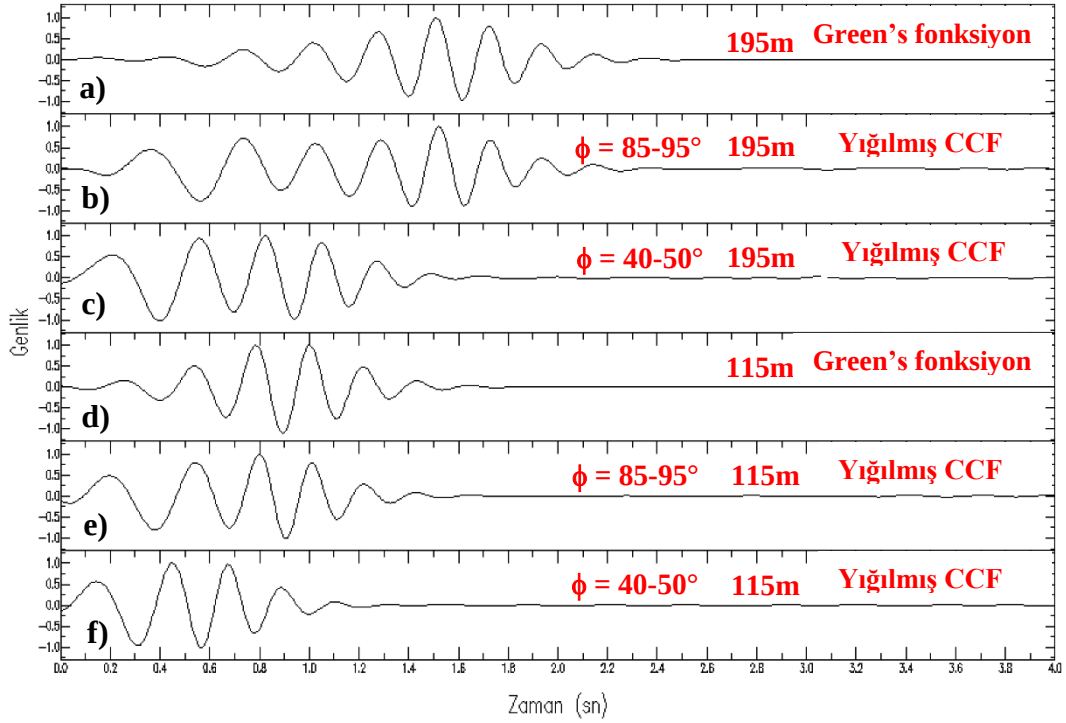
dik iki alıcı hattı bulunmakta, kaynak azimutları ile alıcı hatlarının doğrultusu arasındaki fark 40°'ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 4.43).

Öncelikle, ASG sinyallerinin yalnızca kısıtlı bir azimut aralığındaki kaynaklardan yayınması, 2D PSI-MASW yönteminin interferometrik çalışma prensibindeki izotropik ASG dalga alanı gerekliliğini ihlal etmektedir. Bunun sonucu olarak, hem yelpaze hem de artı dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panellerinde faz hızları olduğundan yüksek kestirilmektedir. Bununla beraber, 40°-50° azimut aralığındaki ASG kaynaklarının seçilmesi durumunda, artı dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde yüksek mod olarak yorumlanabilecek yapay bir FHD branşı oluşmakta, yelpaze dizilim ile işaretlenen FHD branşı ise yalnızca < 4 Hz bandında teorik eğriden yüksek olarak elde edilmektedir. Aynı koşullar altında, yelpaze dizilim ile FHD bilgisinin özellikle düşük frekans bandında artı dizilime göre daha doğru elde edilmesi, yelpaze dizilimdeki alıcı geometrisinin uzaysal olarak daha iyi bir dağılım göstermesinden, dolayısıyla ASG kaynaklarının izotropik olmayan dağılımını artı dizilime göre daha iyi telafi etmesinden kaynaklanmaktadır.

2D PSI-MASW yönteminde ASG dalga alanının 1B sanal dizilim boyunca yayındığı varsayılarak dalga alanının yalnızca hızı belirlenmeye çalışılmaktadır. 2D PSI-MASW yöntemi kullanılarak, yelpaze dizilim ile, 40°-50° azimut aralığında seçilen kaynak dağılımı için iyi bir FHD performansı elde edilmiştir. Artı dizilimle ise bu kaynak koşulları altında, beklendiği şekilde, yüksek görünür faz hızları belirlenmiştir. CVFK yöntemi yön ve faz hızı çiftleri belirleme üzerine çalıştığı için böyle bir sorun yaşanmamaktadır. Artı dizilim kullanıldığında, 2D PSI-MASW için yönsel örnekleme açısından olabilecek en olumsuz senaryolardan biri ortaya çıkmakta, dolayısıyla faz hızları görünür olmaktadır. Teorik olarak, elde edilen görünür faz hızları $V_{\text{görünür}} = V_{gerçek}/\cos(45°)$ ile uyumludur (Şekil 4.47). Yani, Şekil 4.47'de 40°-50° azimut aralığı için artı dizilim ile hesaplanan FHD karşılaştırma panelinde, kırmızı daireler ile işaretlenen faz hızları cos (45°) ile çarpıldığında, görünür hızlar düzeltilerek gerçek faz hızları ile bire bir uyumlu değerler elde edilebilmektedir. Yelpaze dizilim kullanılması durumunda ise bu şekilde belirgin görünür faz hızlarının oluşmadığı çarpıcı bir şekilde görülmektedir. Bunun sebebi, dizilimin 30° ve 60° azimutları doğrultusunda uzanan kollarının ASG dalga alanını 10° fark ile algılaması ve görünür faz hızlarının yalnızca cos (10°)= 0.98 değeri kadar sapmış olarak elde edilmesidir. Ayrıca bu

sonuçlar, ASG sentetiklerinin kaynak yönleri (azimutlar) açısından istenen şekilde üretilmiş olduğunu da doğrulamaktadır.

40°-50° ve 85°-95° azimut aralıklarında seçilen ASG kaynakları için, yelpaze ve artı dizilim kullanılarak, sırasıyla 195 m ve 115 m alıcılar arası mesafeye sahip alıcı çiftlerinden hesaplanan CCF'lerin aynı yer modeli ve aynı mesafeler için hesaplanan Green's fonksiyon sinyalleri ile 1-5 Hz frekans bandındaki karşılaştırması Şekil 4.48'de sunulmaktadır. Karşılaştırma öncesinde; CCF'ten Green's fonksiyona geçiş için CCF'lerin türevi alınmış (Gouedard ve diğ., 2008), Green's fonksiyonlar ise CCF'lerin hesaplanmasında uygulandığı gibi, genlik dengelemesi ile beyazlatılmıştır.



Şekil 4.48 : Yelpaze (b), (c) ve artı (e), (f) dizilimler kullanılarak hesaplanan yığılmış CCF'lerin aynı mesafeler için hesaplanan Green fonksiyon sinyalleri (a), (d) ile karşılaştırması. Sinyaller 1 -5 Hz frekans bandında süzülmüştür.

Buna göre; düşük frekans bandında 2D PSI-MASW panellerinde gözlenen FHD bilgisine uygun şekilde, hem yelpaze hem artı dizilim kullanılarak 85°-95° azimut aralıklarındaki ASG kaynakları için hesaplanan CCF'lerdeki sinyaller Green's fonksiyon sinyalleri ile faz ve genlik anlamında çok daha uyumludur. Buna karşılık, 40°-50° azimut aralıklarındaki ASG kaynakları için hesaplanan CCF'lerdeki sinyaller, Green's fonksiyonlar ile benzer bir uyum göstermemektedir. Özellikle artı dizilim kullanılması durumunda, Green's fonksiyon ile CCF arasında önemli faz farkları

oluşmaktadır. Bunun sebebi, yönsel örneklemesi kısıtlı alıcı dizilim doğrultularından farklı olarak seçilen ASG kaynak azimutları nedeniyle CCF'lerde görünür faz hızlarında yayınan Rayleigh dalgası paketlerinin oluşmasıdır.

Yalnızca 85°-95° azimut aralığındaki ASG kaynaklarının seçilmesi durumunda her iki yöntemle elde edilen FHD panellerinde önemli bir bozulma gözlenmemektedir. Bunun nedeni, bu azimut aralığındaki kaynaklardan üretilen sinyallerin dizilimdeki alıcı hatları doğrultusunda yayınmasıdır. Özellikle artı dizilim ile hesaplanan 2D PSI-MASW panelinde, işaretlenen FHD eğrisinin düşük frekans bandında teorik eğri ile izotropik kaynak dağılımı koşulunda elde edilen eğriden daha uyumlu olduğu gözlenmektedir. İzotropik kaynak dağılımı durumunda, faz hızları düşük frekans bandında 5 Hz frekansı civarında olduğundan yüksek kestirilmeye başlanırken, bu kaynak dağılımı ile düşük frekans sınırı 3.5 Hz'e kadar düşmektedir (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).

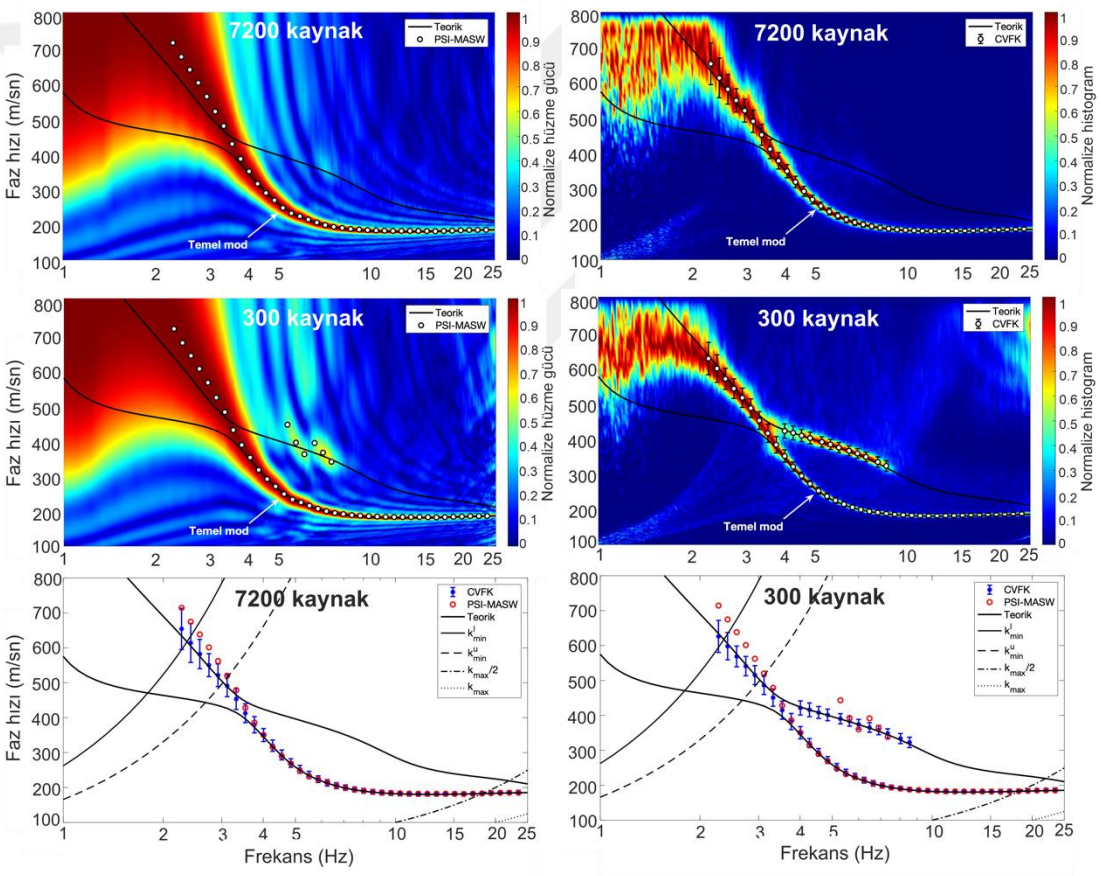
Test kapsamında elde edilen en önemli sonuçlardan biri, 2D PSI-MASW yöntemi için en zorlayıcı koşulları oluşturan, ASG sinyallerinin artı dizilime 40°-50° azimut aralığından ulaşması durumunda dahi CVFK yöntemi ile elde edilen FHD branşının teorik eğri ile oldukça uyumlu olmasıdır. Bu durum, CVFK yönteminin ortamda yönlü ASG kaynaklarının bulunmasından olumsuz etkilenmediğini göstermektedir. Bunun sebebi, 2D PSI-MASW'e karşıt olarak, yöntemin çalışma prensibinin, ASG dalga alanında baskın olan tekil düzlem dalgalarının yön ve hızlarını belirlemeye yönelik olmasıdır. Dolayısıyla, teorileri gereği, birbirinden farklı ASG dalga alanı koşullarının oluşmasına dayalı temelleri olan 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin, yönlü ASG kaynaklarına olan cevapları da birbirinden farklı olmaktadır.

4.2.4 Çoklu mod testleri

Testlerde, ASG dalga alanında temel ve yüksek mod Rayleigh dalgalarının bulunması durumunda 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin bu modların faz hızlarını belirleme performansları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle SK04 yer modeli kullanılarak, 7200 ve bu 7200 kaynak içerisinden seçilen 300 kaynak için yelpaze dizilim ile üretilen 1800 sn uzunluğundaki, Q etkisi eklenmiş ASG sentetik veri setleri analiz edilerek FHD panelleri elde edilmiştir. Sonrasında, T131 (Şekil 4.50) ve iki tabakalı basit (Çizelge 4.1) yer modelleri için 7200 kaynaklı, Q etkisi eklenmiş çok modlu ASG sentetikleri üretilerek benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Q, alçak

geçişli bir süzgeç gibi davranarak yüksek frekanslı enerjileri, yani küçük dalga boylarını sönümlemektedir. Yer modellerine Q etkisinin eklenmesinin sebebi, temel mod enerjisinin daha çok sönümlenmesini, böylece yüksek modların daha görünür hale gelmesini sağlamaktır.

SK04 yer modeli için elde edilen FHD panelleri Şekil 4.49'da sunulmaktadır. 7200 kaynaklı sentetik veri için her iki yöntem ile hesaplanan panellerde, 3.5-25 Hz frekans bandında temel mod branşı net bir şekilde takip edilebilirken, 1. yüksek mod branşına ait faz hızlarının belirlenemediği gözlenmektedir. Buna karşılık, düşük frekans bandında (< 3.5 Hz) hem 2D PSI-MASW hem de CVFK panelleri, 1. yüksek mod branşına ait faz hızlarını takip eden bir görüntü sunmaktadır.



Şekil 4.49 : SK04 modeli kullanılarak, 7200 (üstte) ve 300 (ortada) ASG kaynağı için üretilen iki modlu sentetik veri setlerinden 2D PSI-MASW ve CVFK kullanılarak elde edilen paneller ve işaretlenen FHD eğrileri (altta). Kullanılan kaynak sayıları panellerin üstünde gösterilmektedir. Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

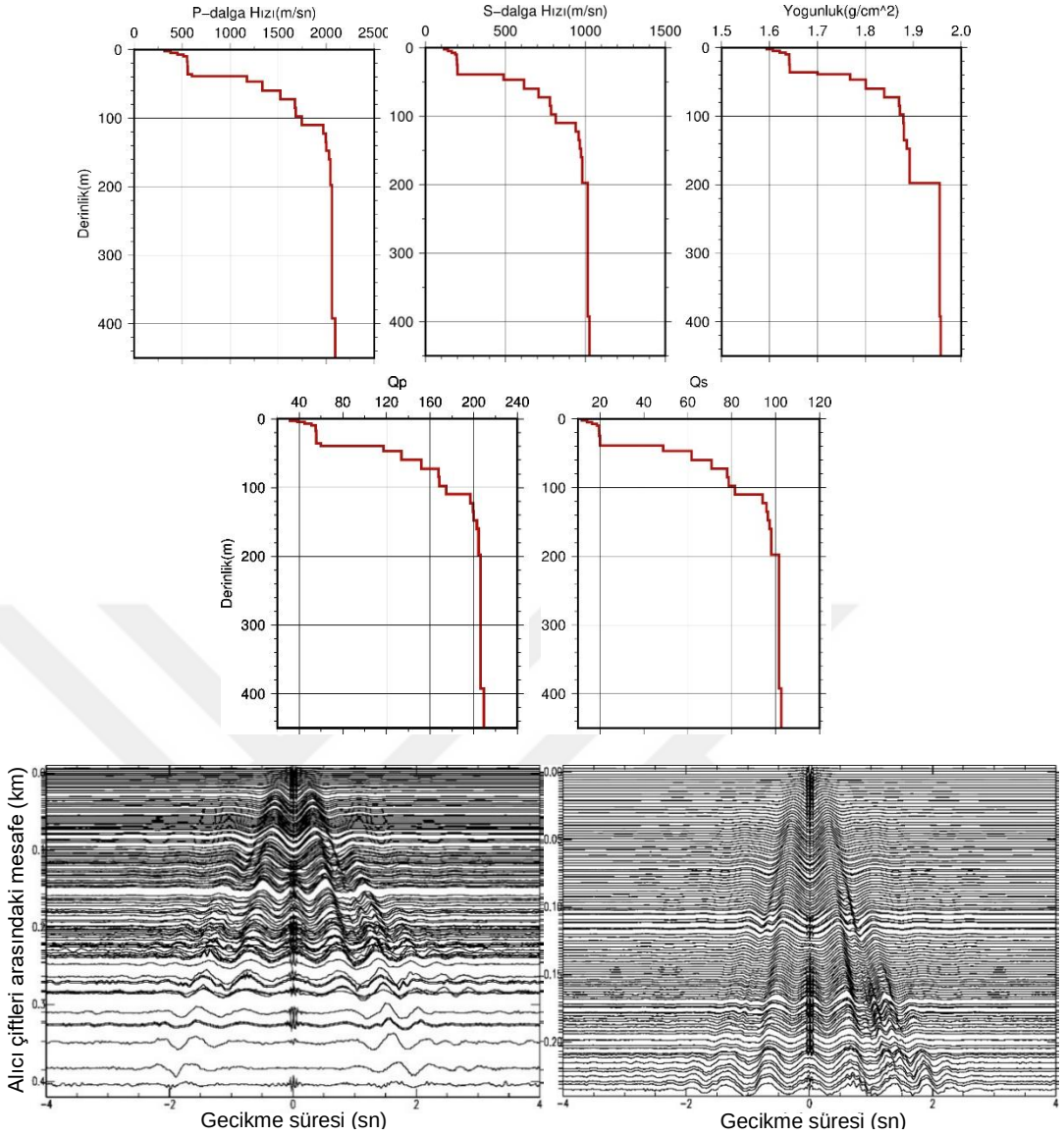
Panellerde yüksek hüzme gücü/histogram sayısı ile temsil edilen tekil branş düşük frekans bandında yaklaşık 3.5 Hz'e kadar teorik temel mod faz hızları ile uyumlu olarak belirlenirken, daha düşük frekans bandında 1. yüksek mod faz hızlarını takip

etmektedir. Ayrıca, 2D PSI-MASW panelinde düşük frekanstaki (< 3.5 Hz) 1. yüksek mod faz hızlarının da teorik hızlardan biraz yüksek kestirildiği görülmektedir.

300 kaynaklı sentetik veri için CVFK yöntemi ile hesaplanan panelde hem temel mod hem de 1. yüksek mod FHD branşları net bir şekilde takip edilebilmekte, 1. yüksek mod FHD eğrisi ~ 4-9 Hz frekans bandında teorik eğriyle uyumlu şekilde işaretlenebilmektedir. Buna karşılık, 2D PSI-MASW panelinde, ~5-8 Hz frekans bandında, teorik 1. yüksek mod faz hızlarına yakın ve birbirini takip eden iki ayrı mod (1. ve 2. yüksek modlar) branşı şeklinde yorumlanabilecek, temel moda göre oldukça düşük hüzme güçlü bir FHD görüntüsü bulunmaktadır. 7200 kaynaklı duruma benzer şekilde, 300 kaynaklı sentetik için her iki yöntem ile hesaplanan panellerde yüksek hüzme gücü/histogram sayısı ile temsil edilen tekil branş yaklaşık 3.5-25 Hz frekans bandında teorik temel mod faz hızları ile bire bir örtüşmekte, daha düşük frekans bandında (< 3.5 Hz) 1. yüksek mod faz hızlarını takip etmektedir. Ayrıca, bu kaynak koşulu için de 2D PSI-MASW panelinde düşük frekanstaki (< 3.5 Hz) 1. yüksek mod faz hızlarının olduğundan yüksek kestirildiği belirlenmektedir (Şekil 4.49).

Elde edilen sonuçlara göre; 7200 kaynaklı sentetik veride olduğu gibi ASG dalga alanının çok sayıda kaynaktan oluşması durumunda 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile temel ve 1. yüksek mod faz hızlarının tüm frekans bandında ayrımlı bir şekilde belirlenemediği, panellerde gözlenen tekil branşın ise yüksek ve düşük frekans bantlarında sırasıyla temel ve 1. yüksek modu takip ettiği söylenebilir. Buna karşılık, 300 kaynaklı sentetik veriden elde edilen panellerde teorik 1. yüksek mod branşı ile uyumlu FHD bilgisi gözlenmiş olup, özellikle CVFK yöntemi ile ~4-9 Hz frekans bandında teorik 1. yüksek mod eğrisi ile bire bir uyumlu bir branş işaretlenebilmiştir. Bu durum, kaynak yoğunluğunun azalması sonucunda, Rayleigh enerji integrallerine bağlı olarak, temel mod enerjisinin yüksek modlara oranla azalması, dolayısıyla yüksek mod enerjisinin daha görünür hale gelmesi ile açıklanabilir (bkz. Şekil 4.55).

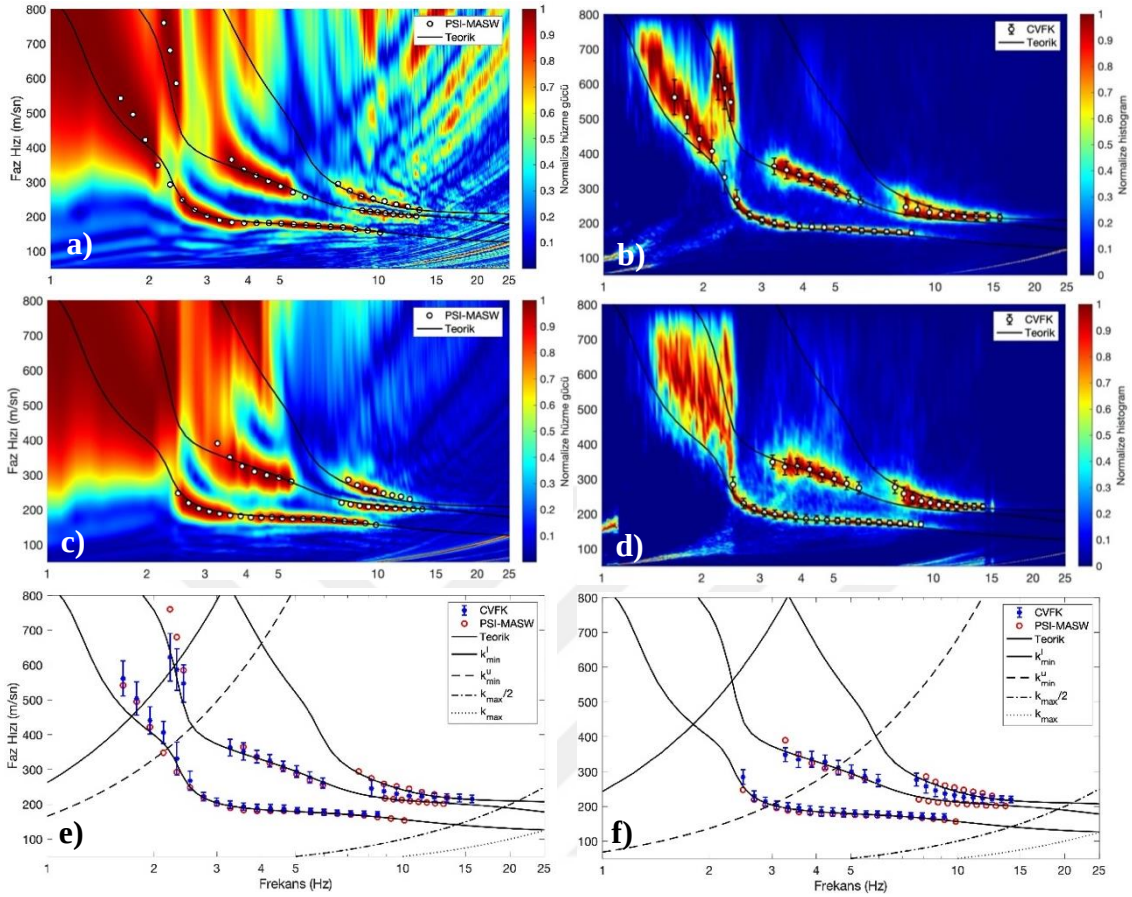
Birden çok modlu testlere bir örnek de T131 sahası için üretilen 1B hız modeli (Şekil 4.50) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı, sahada toplanan gerçek veri setleri için elde edilen FHD sonuçlarının sentetik veri setleri ile de bir değerlendirmesinin yapılmasıdır. Bu amaçla, 3 modlu ve Q etkisi eklenmiş, 7200 kaynaklı ASG sentetikleri, yelpaze (Şekil 4.27) ve T131 saha ölçümlerinde kullanılan antisimetrik artı dizilim (Şekil 3.2) geometrileri için üretilmiştir.



Şekil 4.50 : T131 ölçüm sahası için oluşturularak çok modlu sentetik verilerin üretilmesinde kullanılan 1B P-dalgası hız, S-dalgası hız, yoğunluk modelleri (üstte), Qp ve Qs modelleri (ortada) ve yelpaze (sol altta) ve antisimetrik artı (sağ altta) geometrili dizilimler için tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT'ler.

Şekil 4.51'de yelpaze ve antisimetrik artı dizilim geometrileri kullanılarak üretilen çok modlu ASG sentetiklerinden hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır. Yelpaze dizilim ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin ikisinin de düşük frekans (< 2 Hz) temel mod faz hızlarını olduğundan yüksek kestirdiği ancak CVFK'den işaretlenen faz hızları ile teorik temel mod FHD eğrisi arasındaki farkların daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.51a, b, e). Temel modun daha yüksek frekans bandında (> 2.5 Hz) kalan bölümü için her iki yöntem de teorik eğriyle uyumlu sonuçlar vermekte ancak 2D PSI-MASW kullanılarak elde

edilen temel mod FHD branşı, nispeten daha yüksek bir frekansa (10 Hz) kadar takip edilebilmektedir.



Şekil 4.51 : Yelpaze dizilim (a), (b), (e) ve artı dizilim (c), (d), (f) geometrileri için üretilen 3 modlu ASG sentetiklerinden 2D PSI-MASW (a), (c) ve CVFK (b), (d) kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen temel, 1. yüksek, 2. yüksek mod ve teorik FHD eğrilerinin karşılaştırması (e), (f). Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

1. yüksek modun düşük frekans bandındaki (< 6 Hz) bölümü için, her iki yöntemle hesaplanan faz hızları teorik eğri etrafında salınmaktadır. CVFK yöntemi ile hesaplanan panelde 1. yüksek mod branşının 3 Hz'in altındaki bölümünde teorik eğriye daha yakın faz hızları işaretlenebilmektedir. 2D PSI-MASW ile hesaplanan panelde ise 1. yüksek mod faz hızları daha yüksek kestirilmekte ve 2.3 Hz'den daha düşük frekanslarda CVFK standart sapmalarının dışında kalmaktadır. 6 Hz'in üstünde 1. ve 2. yüksek mod FHD branşları CVFK yöntemi ile birbirinden ayrılamamakta, ~8-12.5 Hz frekans bandında iki moda ait faz hızları arasında değerler elde edilmektedir. ~12.5 Hz'in üstünde ise CVFK yöntemi ile yalnızca 2. yüksek moda ait faz hızları kestirilmektedir. Bununla beraber yüksek modlar, 2D PSI-MASW yöntemi ile başarılı

şekilde ayrımlanmakta ve teorik FHD eğrisi ile oldukça uyumlu faz hızları göstermektedir (Şekil 4.51a, b, e).

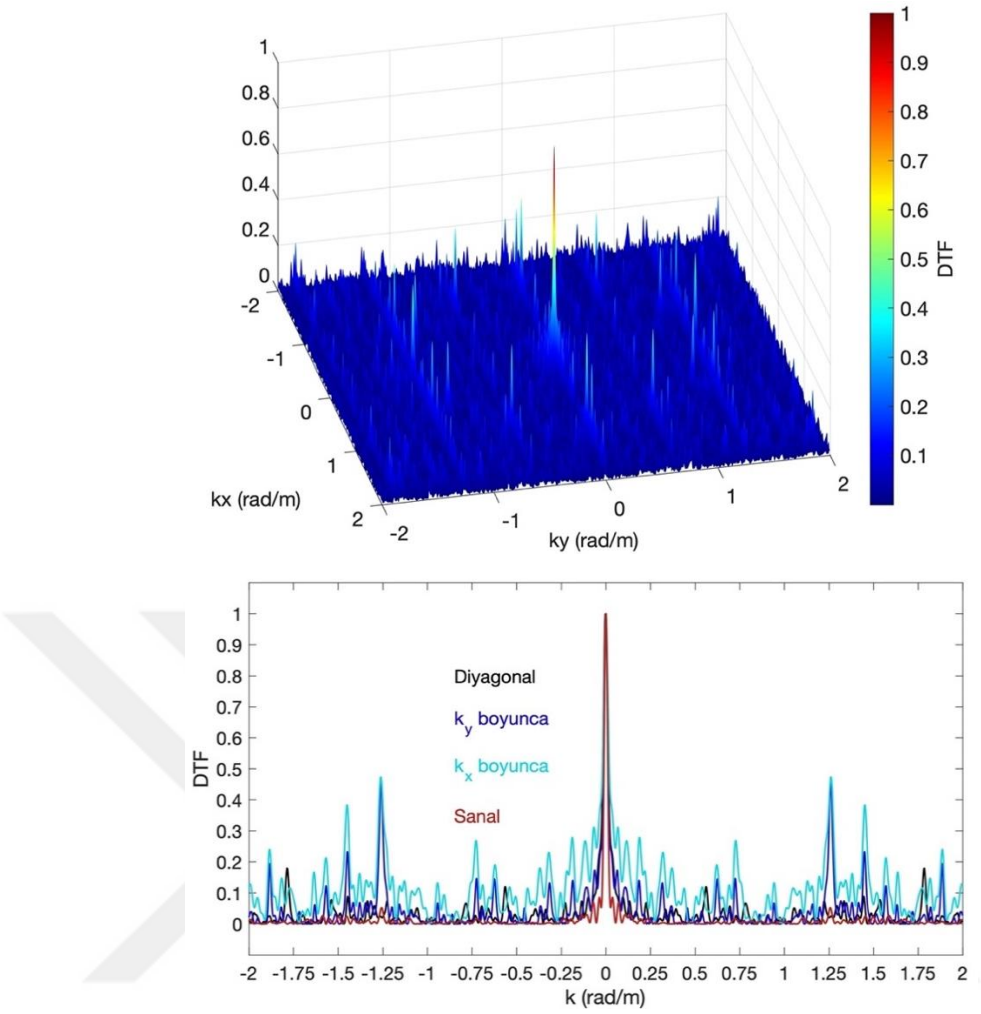
Antisimetrik artı dizilim ile elde edilen CVFK panelinde, temel mod faz hızları, genel anlamda teorik eğriden bir miktar yüksek kestirilmektedir. 2D PSI-MASW yöntemi ile elde edilen temel mod faz hızları ise düşük frekanslarda (~ < 5 Hz) tam tersi yönde bir sonuç ile olduğundan bir miktar düşük belirlenmektedir (Şekil 4.51c, d, f). Yelpaze dizilim ile elde edilen sonuçlara benzer şekilde, temel mod branşının 2D PSI-MASW yöntemi kullanılarak daha yüksek frekansa (10 Hz) kadar işaretlenebildiği görülmektedir. 1. yüksek modun düşük frekans bölümünde (< 6 Hz) her iki yöntem ile işaretlenen faz hızları teorik FHD etrafında salınım göstermektedir.

1. ve 2. yüksek mod faz hızları, antisimetrik artı dizilim kullanılması durumunda da CVFK yöntemi ile ayrılamamaktadır. Yöntem, 11.7 Hz'e kadar iki modun faz hızlarını ortalamakta, daha yüksek frekanslarda (> 11.7 Hz) ise 2. yüksek mod faz hızlarını kestirmektedir (Şekil 4.51d, f). Buna karşılık, 2D PSI-MASW ile iki moda ait branşlar çok iyi bir şekilde ayrımlanmakta ancak 1. yüksek mod branşına ait faz hızları olduğundan bir miktar düşük elde edilirken, 2. yüksek mod branşı için ise yüksek kestirilme durumu söz konusudur. Bununla beraber, iki mod için, teorik ve 2D PSI-MASW'dan kestirilen faz hızları arasındaki farklar oldukça küçüktür (Şekil 4.51c, f).

Temel mod faz hızı branşı, yelpaze dizilim ile, daha düşük frekanslara (~ 1.6 Hz) kadar takip edilebilmekte ancak 2.5 Hz'in altında faz hızları her iki yöntemle olduğundan yüksek kestirilmektedir. Bununla beraber, antisimetrik artı dizilim kullanılması durumunda, 2.5 Hz'in altındaki temel mod faz hızlarının dizilimin uzaysal çözünürlük limitleri nedeniyle işaretlenemediği göz önünde bulundurulduğunda, yelpaze dizilimin düşük frekans bandında beklenen şekilde avantaj sağladığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuç, yelpaze dizilimin daha yüksek bir maksimum alıcı açıklığına (400 m) ve çoklu yönlerde uzaysal örneklemeye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Antisimetrik artı dizilimin maksimum alıcı açıklığı (235 m) ve yönsel örneklemesi ise göreceli olarak düşüktür. Bununla birlikte, 2D PSI-MASW ile, 1. ve 2. yüksek mod faz hızı branşlarının antisimetrik artı dizilim kullanılarak daha iyi ayrımlandığı ve FHD panelindeki yüksek frekans (> 5 Hz) çözünürlüğünün de bu dizilim ile daha iyi sağlandığı gözlenmektedir. Yüksek frekanstaki bu çözünürlük üstünlüğünün, antisimetrik dizilimde çok yoğun olan küçük alıcı aralıklarının sağladığı yoğun örneklemeden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ancak, yüksek modlar için işaretlenen faz hızı branşları

açısından değerlendirildiğinde, yelpaze dizilimin, teorik faz hızı eğrileri ile göreceli olarak daha uyumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Bu sonucun ise yelpaze dizilim ile sağlanan çok yönlü örneklemeden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.27). 2D PSI-MASW yönteminin doğası gereği, yelpaze dizilimin kullanılması ile ASG dalga alanı çok farklı yönlerdeki alıcı çiftleri ile algılanmakta, dolayısıyla çoklu yönlerden elde edilen PW-CCF'lerin 1B SAT haline getirilip analiz edilmesi sonucunda daha doğru FHD bilgisi sağlanabilmektedir.

Bu sentetik test ile asıl amaçlanan, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin yüksek mod branşlarını ayırma konusundaki kabiliyetlerinin incelenmesi ve gerçek saha verisinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmasıdır. Bu bağlamda, T131 sentetik ASG verisi için, 2D PSI-MASW yönteminin dizilim geometrisinden bağımsız olarak, 1. ve 2. yüksek mod branşlarını ayırma konusunda CVFK yöntemine göre önemli bir avantaj sağladığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuç, T131 sahasında toplanan gerçek veri setlerininin değerlendirilmesi ile üretilen sonuçlar ile tamamen örtüşmekte ve kullanılan 2B dizilimlerin ve bunlar üzerinden oluşturulan sanal dizilimin DTF'leri üzerinden de açıklanabilmektedir (Şekil 4.25c, d ve Şekil 4.52). Şekil 4.52'de 2B yelpaze dizilim için hesaplanan DTF ve bunun sanal dizilimin DTF'i ile karşılaştırması verilmektedir.



Şekil 4.52 : Sentetik ASG verisinin üretilmesinde kullanılan 2B yelpaze dizilimin DTF'sini (üstte); 1B sanal dizilimin (kırmızı) DTF 'si ile 2B dizilimin farklı yönlerdeki DTF 'si arasındaki karşılaştırmayı (altta) gösterir. 2B dizilimin farklı yönler için DTF'leri $\boldsymbol{k_x}$ (camgöbeği), $\boldsymbol{k_y}$ (mavi) ve diyagonal (siyah) olarak sunulmaktadır.

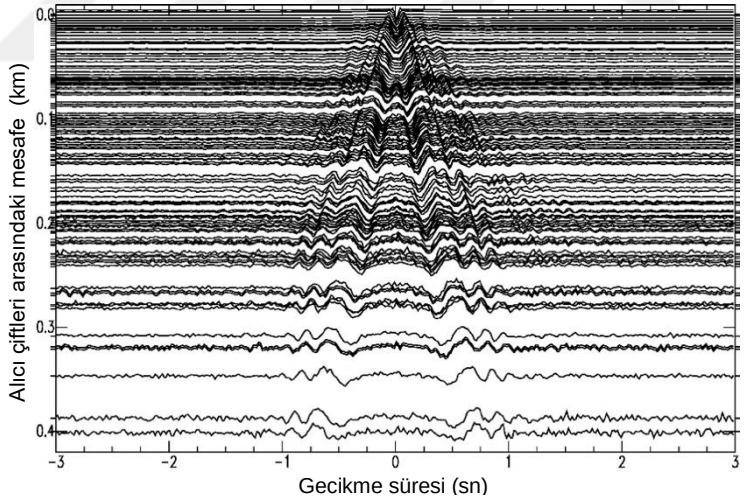
2B yelpaze dizilimin DTF'sinde yön bağımlılık düşüktür ve k_{min}^{l}ve k_{min}^{u} birbirine oldukça yakındır. k_{min}^{u}, k_x yönünde 0.038 rad/m, k_{min}^{l} k_y yönünde 0.026 rad/m olarak belirlenmektedir. k_{min}^{d} ise 0.030 rad/m olarak elde edilmektedir (Şekil 4.52). Yan salınımlar, özellikle k_x yönünde göreceli yüksek genlikler (~ 0.08-0.5) göstermektedir. Bununla birlikte, 1B sanal dizilimden hesaplanan DTF'den elde edilen k_{min}^{v}, k_{min}^{l} 'den daha düşük olarak 0.022 rad/m 'lik bir değere sahiptir ve yan salınımlar 0.05 gibi çok düşük bir seviyenin altında kalmaktadır. Sanal dizilimin hem k_{min}^{v}'inin hem de yan salınım genliklerinin 2B dizilime göreceli olarak düşük kalması nedeniyle 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panelindeki yüksek mod branşı çözünürlüğünün ya da başka bir deyişle ayrımlılığının CVFK'den elde edilen

sonuçlara göre daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Benzer değerlendirme, Bölüm 4.1.5'te T131 sahasında antisimetrik dizilim ile toplanan gerçek ASG veri seti için de yapılmıştır. Detaylı tartışma için ilgili bölüme başvurulabilir.

Bu bölümde, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin çok modlu FHD belirlemedeki performanslarını farklı bir yer modeli ile de inceleyebilmek adına iki tabakalı, yarı sonsuz ortam üzerinde tek bir katmanın bulunduğu, basit bir hız modeli için 3 mod içeren bir sentetik ASG veri seti oluşturulmuştur. Veri seti yine yelpaze dizilim (Şekil 4.27) kullanılarak üretilmiştir . Kullanılan 1B S-dalgası hız modeli Çizelge 4.1'de, bu model ile üretilen sentetik veriden hesaplanan uzaysal olarak yığılmış SAT ise Şekil 4.53'te verilmektedir.

Çizelge 4.1 : İki tabakalı basit yer modeli parametreleri.

Kalınlık (m)	V_p (m/sn)	V_s (m/sn)	Yoğunluk (g/cm^2)	Q_p	Q_s
10	346	200	1.60	40	20
0	1385	800	2.50	100	40

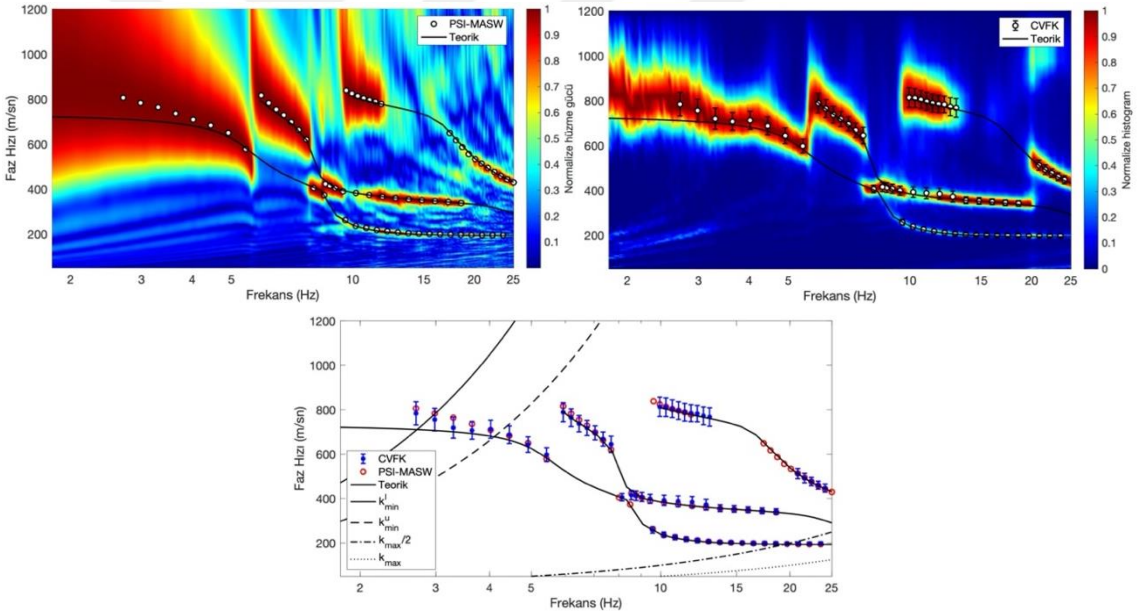


Şekil 4.53 : İki tabakalı basit yer modeli ile yelpaze dizilim için tüm alıcı çiftlerinden elde edilen uzaysal olarak yığılmış SAT'ler.

Hesaplanan FHD panelleri Şekil 4.54'te sunulmaktadır. Buna göre; 5 Hz'in altındaki faz hızları, her iki yöntem için teorik temel mod FHD branşından daha yüksek kestirilmektedir. Ancak 2D PSI-MASW panelinden işaretlenen temel mod FHD branşı için, bu frekans bölgesinde, faz hızlarının olduğundan yüksek kestirilme oranı daha fazladır. Yüksek frekans bandında (> 6 Hz), temel mod faz hızları iki yöntemle de

teorik FHD branşıyla bire bir uyumlu şekilde elde edilebilmektedir. Buna karşılık, temel ve 1. yüksek modların öpüştüğü 7-8 Hz bandında, bu iki moda ait FHD branşları 2D PSI-MASW ile ayrımlanabilirken, CVFK ile mod ayrımlılığı sağlanamamaktadır.

Düşük frekans bandında (< 7 Hz), CVFK ile belirlenen 1. yüksek mod faz hızı branşının teorik FHD eğrisiyle daha uyumlu olduğu görülmektedir. 1. yüksek mod için, ~9-13 Hz frekans bandında, CVFK yöntemi ile belirlenen FHD branşı olduğundan bir miktar yüksek kestirilmekle birlikte, yüksek frekans bandında (~ 8-20 Hz) her iki yöntemle elde edilen faz hızı branşları teorik eğri ile çok yüksek oranda uyumludur. 2. yüksek mod branşı için, yöntemlerin FHD belirleme performansları benzer ve elde edilen faz hızları teorik eğri ile neredeyse bire bir uyum içindedir. Bununla beraber, FHD panellerindeki yüksek frekans bandı (> 16 Hz) göz önünde bulundurulduğunda, 2D PSI-MASW ile 2. yüksek mod bilgisinin daha geniş bir frekans bandında (17-25 Hz) elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 4.54).



Şekil 4.54 : Yelpaze dizilim geometrisi ile iki tabakalı basit yer modeli için üretilen 3 modlu ASG sentetiklerinden 2D PSI-MASW (sol üstte) ve CVFK (sağ üstte) kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod eğrilerinin ve teorik FHD eğrilerinin karşılaştırması (altta). Detaylı açıklamalar Şekil 4.32'dekiyle aynıdır.

4.2.5 Elde edilen FHD sonuçlarının uzaysal çözünürlük limitleri ve Rayleigh enerji integrali açısından değerlendirilmesi

Bu bölümde, önceki bölümde farklı hız modelleri için sunulan FHD sonuçlarının daha detaylı değerlendirilmesi, hem 2D PSI-MASW ve CVFK ile hesaplanan panellerde, düşük frekanslardaki temel mod faz hızlarının olduğundan yüksek kestirilmesinin hem

de yöntemlerin mod branşlarını belirleme konusundaki performanslarının nedenleriyle açıklanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, sentetik atış topluluğu verileri, Herrmann (2013) tarafından sunulan kaynak kod düzenlenerek üretilmiştir. İlgili kod ve örnek uygulamalar için güncel URL: [https://www.eas.slu.edu/eqc/eqc_cps/TUTORIAL/LessonB/index.html] kullanılabilir. Sentetik atış topluluğu verilerinde alıcı aralığı 5 m, en uzun ofset ASG sentetiklerinin üretildiği yelpaze dizilimin en büyük alıcı açıklığı ile uyumlu şekilde 400 m ve örnekleme aralığı 8 msn'dir. Üretilen sentetik atış toplulukları, atış topluluklarının MASW yöntemi ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD panelleri ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için kullanılan hız modellerinden hesaplanan Rayleigh enerji integralleri Şekil 4.55-Şekil 4.57'de verilmektedir.

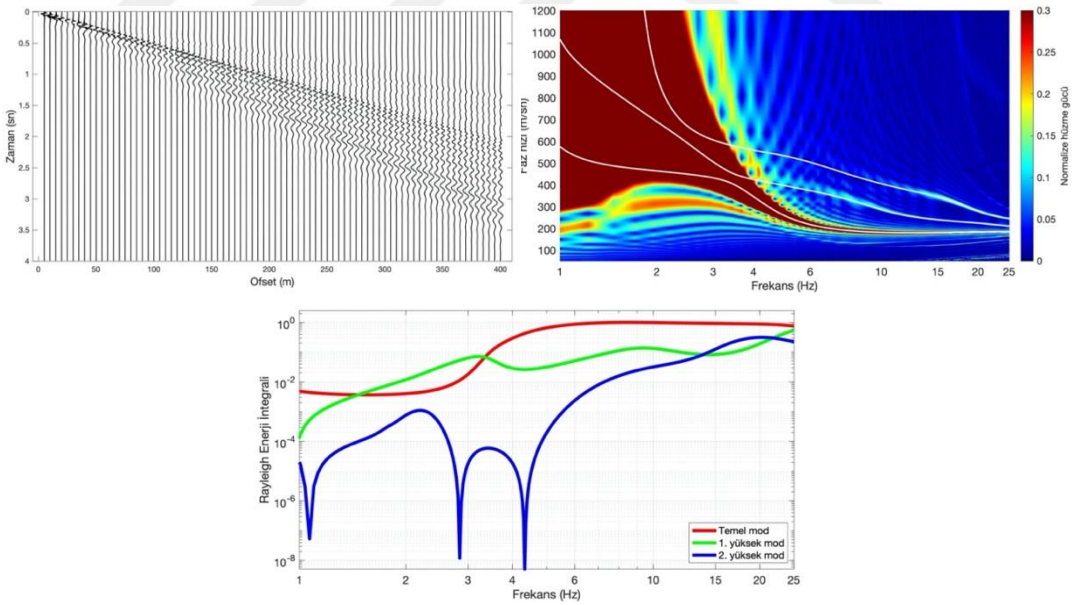
Rayleigh enerji integrali, sismogramdaki Rayleigh dalgası enerji dağılımını frekansın fonksiyonu olarak vermekte, bu sayede Rayleigh dalgasının farklı modları için frekansa bağlı enerji içeriğini analiz etmeye olanak tanımaktadır (Harkrider 1964; Harkrider 1970; Jerez ve diğ., 2016). Rayleigh enerji integrali, kaynak türü ve derinlikten bağımsız olarak, çok katmanlı elastik tabaka ve mod yayılma özelliklerinin belirlediği frekansa bağlı bir fonksiyondur ve Rayleigh genlik tepkisi olarak da adlandırılmaktadır (Harkrider, 1970). 1B tabakalı yer modeli için, sentetik sismogramlar mod toplama tekniği ile üretilirken, Rayleigh enerji integrali de her bir mod için frekansın fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır (Herrmann, 2013). Rayleigh enerji integrali, derinlik üzerinden Rayleigh yer değiştirme fonksiyonunun integraline dayalı olarak elde edilmektedir. Dolayısıyla, ortamdaki her bir moda ait yer değiştirme enerjisi ile orantılıdır.

Üretilen sentetik verilerde gelişen modların spektral içeriği bu enerji integralleri ile belirlenmekte olup, bu nedenle Rayleigh dalgası enerji integralinin, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile hesaplanan FHD panellerinden belirlenen mod branşlarının daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyacağı değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, sentetik atış topluluklarının MASW ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD panellerinin ve buradan belirlenen mod branşlarının önceki bölümde ASG sentetiklerinden elde edilen FHD sonuçları ile karşılaştırılması ile, ASG sentetiklerinin sağlıklı üretilip üretilmediğinin bir sağlamasını daha yapmak mümkün olmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde, test edilen tüm hız modelleri için, sentetik atış topluluklarından hesaplanan FHD panellerinin (Şekil 4.55-Şekil 4.57), önceki bölümde aynı hız

modelleri için üretilen ASG sentetikleri üzerinden 2D PSI-MASW ile hesaplanan paneller (Şekil 4.49, Şekil 4.51 ve Şekil 4.54) ile neredeyse bire bir örtüştüğü görülmektedir. Buna dayanarak, ASG sentetiklerinin sağlıklı bir şekilde üretilebildiği değerlendirmesi yapılabilmektedir.

SK04 hız modeli kullanılarak, farklı kaynak yoğunlukları için oluşturulan ASG sentetiğinden 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panellerinde, 1. yüksek mod branşı ~3-20 Hz frekans bandında ya hiç gözlenememekte ya da çok düşük enerjiler ile teorik eğriden sapmış şekilde elde edilmektedir (Şekil 4.49). Bunun en önemli sebebi, kullanılan hız modeli nedeniyle 1. yüksek moda ait enerji integralinin bu frekans bandında temel mod enerji integraline göre 50-100 kat düşük, 2. yüksek moda ait enerji integralinin ise tüm frekans bandında temel mod enerji integralinin çok altında kalmasıdır. Buna karşılık, SK04 hız modeli için sentetik atış topluluğundan hesaplanan FHD panelindeki (Şekil 4.55) yüksek mod branşları, ASG sentetiğinden 2D PSI-MASW ile elde edilen paneldekinden daha görünür durumdadır. Bunun sebebi ise, yüksek modların enerjilerinin görünür olabilmesi için renk ölçeğinin 0.3 ile sınırlandırılmasıdır.

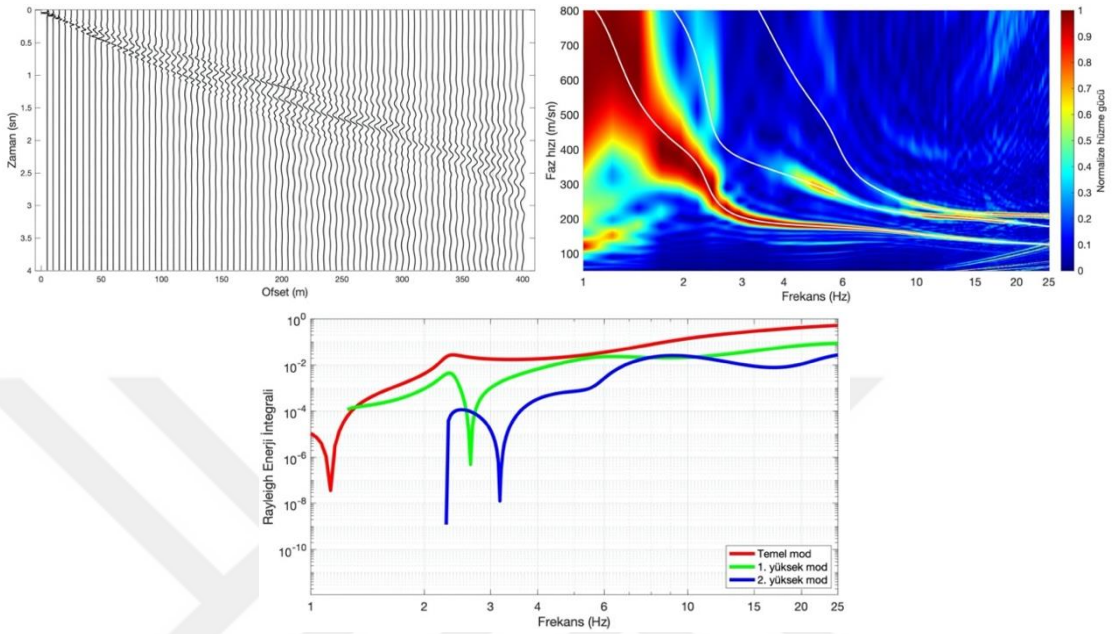


Şekil 4.55 : SK04 hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta). Atış topluluğunda, her alıcıdaki sinyal kendi içinde maksimum genliğe normalize edilmiştir. Teorik faz hızı eğrileri FHD paneli üzerinde beyaz eğriler ile gösterilmiş ve yüksek modların görünür olması için renk ölçeği 0.3 ile sınırlandırılmıştır. Enerji integralleri, temel moda ait maksimum enerji değerine normalize edilerek çizdirilmiştir.

Bununla birlikte, temel mod enerji integralinin düşük frekans bandında (< 4 Hz) hızlı bir azalış göstererek 100 kat düşük bir seviyeye geldiği, 1. yüksek mod enerji integralinin ise 3 Hz'den düşük frekanslarda temel modun üstünde kaldığı görülmektedir. SK04 hız modeli için oluşturulan ASG verisinden hesaplanan 2D PSI-MASW panellerinde (Şekil 4.49), düşük frekanstaki faz hızlarının, teorik 1. yüksek mod branşı ile uyumlu kestirilmesinin en önemli sebebinin bu olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, çok modlu testlerde kullanılan tüm hız modelleri için üretilen FHD panellerinde (Şekil 4.49, Şekil 4.51, Şekil 4.54), düşük frekans bandındaki (~ < 4 Hz) faz hızları genel anlamda yüksek kestirilmektedir. Bunun nedeninin ise, kullanılan dizilimin uzaysal çözünürlük limitlerinin (k^u_{min} ve k^l_{min}) sınırlaması olduğu yorumlanmaktadır. Ayrıca, testlerde kullanılan yelpaze şeklinde geometri için, sanal dizilimin uzaysal çözünürlük limiti (k^v_{min}) de 2B orijinal dizilimden hesaplanan k^l_{min} değerine yakındır (Şekil 4.52). Testlerde kullanılan tüm hız modelleri için üretilen ASG sentetikleri üzerinden hesaplanan FHD panelleri incelendiğinde, temel mod faz hızlarının uzaysal çözünürlük limitleri ile sınırlanan düşük frekanslardan itibaren yüksek kestirilmeye başlandığı ve düşen frekansla birlikte teorik ve hesaplanan faz hızları arasındaki farkın açıldığı görülmektedir (Şekil 4.49, Şekil 4.51, Şekil 4.54). Elde edilen bu sonuçlar, Bölüm 4.1.5'te DTF üzerinden detaylı şekilde tartışılan uzaysal çözünürlük limitlerinin (k^u_{min} ve k^l_{min}), faz hızlarının doğru elde edilebildiği bölgenin düşük frekans bandındaki sınırlarını belirlediği bilgisi ile de uyumludur. Bu nedenle, hem CVFK hem de 2D PSI-MASW'den hesaplanan FHD panellerindeki faz hızları, k^u_{min} ve k^l_{min} arasında kalan bölgede ve daha düşük frekans bandında, olduğundan yüksek kestirilmektedir.

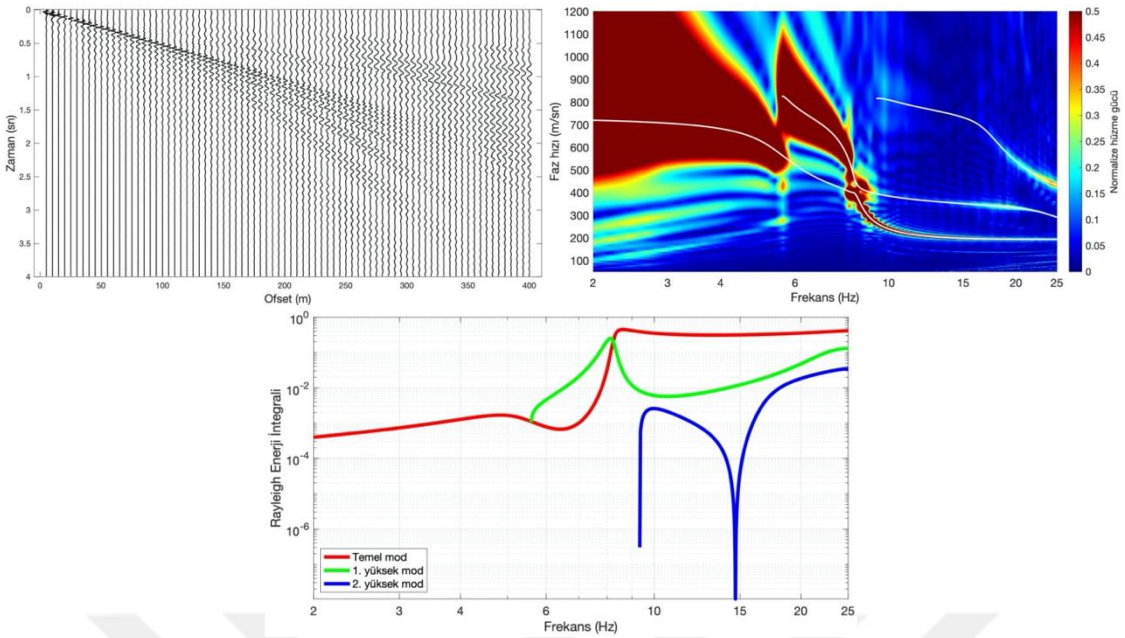
Çok modlu testlerdeki FHD sonuçları yorumlanırken ayrıca, Rayleigh enerji integrallerinin, modların bağıl enerji dağılımını, buna bağlı olarak da FHD panellerindeki mod görünürlüklerini etkilediği de göz önünde bulundurulmalıdır. SK04 yer modelinden üretilen sentetik veri için, özellikle düşük frekans bandındaki temel mod Rayleigh enerjisinin 1. yüksek moda göre bir miktar düşük kalması (Şekil 4.55), bu frekanslarda temel mod yerine 1. yüksek mod faz hızlarının kestirilmesine neden olmaktadır (Şekil 4.49). Buna karşılık, örneğin T131 yer modelinden hesaplanan temel mod Rayleigh enerji integrali, çok geniş bir frekans bandında (2.5-25 Hz), azalan frekansla birlikte kademeli bir azalım göstermekte ve düşük frekansta yüksek mod enerjilerinin altında kalmamaktadır (Şekil 4.56). Bu nedenle, düşük frekans bandında (< 3 Hz) teorik temel

mod faz hızlarını veren FHD panelleri elde edilebilmektedir (Şekil 4.51). İki tabakalı basit yer modeli için hesaplanan temel mod Rayleigh enerji integralleri ise düşük frekans bandında (< 8 Hz) azalış göstermekte ve yaklaşık 6 Hz'e kadar 1. yüksek mod enerji integralinin altında kalmaktadır (Şekil 4.57).



Şekil 4.56 : T131 hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta). Açıklamalar Şekil 4.55'teki ile aynıdır.

Kullanılan hız modeline bağlı olarak gelişen Rayleigh enerji integrallerinin, her iki yöntem ile çoklu modların FHD bilgisinin doğru şekilde belirlenmesi üzerindeki etkisinin ne kadar yüksek olduğuna en güzel örnek iki tabakalı basit hız modeli için elde edilen sonuçlarda görülmektedir (Şekil 4.54, Şekil 4.57). Örneğin; 1. yüksek mod enerji integrali ~ 5-8 Hz frekans bandında temel modun üstünde kalmaktadır. Bunun sonucu olarak hesaplanan FHD panellerinde temel mod faz hızı branşı kesintiye uğramakta ve bu frekans aralığı için 1. yüksek mod branşının bir parçası elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, ~17 Hz'de 2. yüksek mod enerji integrali yükseliş göstererek 1. yüksek mod ile aynı seviyeye yaklaşmakta, dolayısıyla hesaplanan FHD panellerinde, 1. yüksek mod branşı 17-25 Hz bandında kesintiye uğrayarak, bu aralıkta 2. yüksek mod faz hızları en güçlü şekilde gözlenmektedir.



Şekil 4.57 : İki tabakalı, basit hız modeli için üretilen 3 modlu sentetik atış topluluğu (sol üstte), bu atış topluluğunun MASW ile analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli (sağ üstte) ve temel, 1. yüksek ve 2. yüksek modlar için hesaplanan Rayleigh dalgası enerji integralleri (altta). FHD panelinde yüksek modların görünür olması için renk ölçeği 0.5 ile sınırlandırılmıştır. Açıklamalar Şekil 4.55'teki ile aynıdır.

5. 2B VE 1B SİSMİK DALGA GRADİYOMETRİ YÖNTEMLERİ İLE FAZ HIZI DİSPERSİYON BİLGİSİNİN ELDE EDİLMESİ

Tezin bu bölümünde, 2B ve 1B Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) yöntemleri, ASG ve atış topluluğu verilerine uygulanarak Rayleigh dalgası FHD bilgisinin elde edilmesi çalışmaları yapılmış, elde edilen sonuçlar konvansiyonel sismik dizilim yöntemleri olan CVFK ve MASW'den elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Gradiyometrik yöntemlerin FHD bilgisi belirleme performansını etkileyen veri-işlem adımları ve parametreler üzerinden testler gerçekleştirilmiş, en uygun veri-işlem prosedürleri ve parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yöntemlerin FHD bilgisini elde etme konusundaki avantaj ve dezavantajlarının ve uygulama sınırlarının belirlenmesi için üretilen sentetik ve sahada toplanan gerçek veri setleri kullanılmıştır.

SDG yöntemi ilk kez Langston (2007a, b ve c) çalışmaları ile aktif (atış) ya da pasif (ASG) verilerinin uzaysal gradyanlar kullanılarak analiz edilmesi için sunulmuştur. SDG Yöntemi, 1B ya da 2B yoğun alıcı dizilim kayıtlarını oluşturan cisim ya da yüzey dalgası alanının uzaysal gradyanları kullanılarak ortamdaki dalganın hızı, azimutu, geometrik yayılması ve radyasyon örüntüsü gibi özelliklerinin belirlenmesine olanak tanıyan bir yöntemdir. SDG'nin temeli uzaysal dalga alanı gradyanlarına dayanmaktadır. Birbirine yakın şekilde konuşlandırılmış dizilim alıcılarında gözlemlenen sismik dalga şekilleri arasındaki küçük farklılıklar birçok faktörün etkisiyle ortaya çıkabilmekte, bu da uzaysal gradyanları etkilemektedir (Langston, 2007a). Gradiyometrik dizilimi oluşturan alıcılar civarındaki hız ve dalga yayılma yönü, alıcılardaki dalga şekillerinin uyumluluğunu etkilemekte, bu da alıcılardaki kayıtların dalga şekilleri arasında farklılıklara neden olmaktadır. Benzer şekilde, geometrik yayılma ve radyasyon örüntüsü ise gradiyometrik dizilimi oluşturan alıcılar arasındaki göreceli dalga genliklerini etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, SDG ile dalga alanındaki küçük farklılıklar, bir başka deyişle uzaysal dalga gradyanı kullanılarak faz hızı, dalga yayılma yönü (azimut), geometrik yayılma ve radyasyon örüntüsü gibi temel dalga yayılma parametreleri belirlenebilmektedir (Liang ve diğ., 2023).

SDG Yöntemi uygulamasında kullanılan alıcı dizilimlerinin kıca alıcı aralıklarına sahip yoğun dizilimlerden oluşması, dalga alanının uzaysal gradyanlarının daha doğru şekilde hesaplanmasını sağlamakta, bu sayede dalga denkleminin doğrudan kullanılmasına imkan tanımaktadır (Liang ve diğ., 2023).

İzotropik ve elastik bir ortamta 1B homojen dalga denklemi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \left(\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r}\right)\left(\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}\right)u = 0 \tag{5.1}$$

Denklem 5.1'de u, c ve r sırasıyla ilgili dalga alanını (yer değiştirme, hız ya da ivme), faz hızını ve dalga yayılma yönündeki konumu temsil eder.

Kısa alıcı aralıklarına sahip, küçük çaplı bir alıcı dizilimi için, ortamdaki faz hızının sabit olduğu kabul edildiğinde dalga denklemi basitleşerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{1}{c}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \tag{5.2}$$

Bu nedenle, SDG yönteminde dalga alanının birinci dereceden uzaysal ve zamansal gradyanları, faz hızınının ve diğer ortam özelliklerinin elde edilmesinde kullanılabilmektedir. SDG yönteminde 1B dizilim kullanılması durumunda, yönü bilinen bir yüzey dalgasının faz hızı ve geometrik yayılması, 2B dizilim kullanılması durumunda ise hız ve geometrik yayılmanın yanı sıra, dalga yayılma yönü (azimut) ve radyasyon örüntüsü parametreleri de dalga denklemine dayalı olarak belirlenebilmektedir.

5.1 2B Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) Yöntemi

2B-SDG yöntemi Langston (2007b) tarafından yapılan çalışma ile önerilmiştir. Bu yöntemde, 2B alıcı dizilimleri kullanılarak kaydedilen bir sismik dalganın yer değiştirmesi hem silindirik hem de kartezyen koordinatlarda temsil edilen lokal bir coğrafi koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Kullanılan koordinat sistemlerinde, x ve y eksenleri Doğu ve Kuzey yönlerde uzanmakta, azimut (θ) ise y ekseni boyunca saat yönünde r yarıçap vektörüne doğru ölçülmektedir (Langston, 2007b).

Silindirik koordinatlarda seyahat eden bir dalganın yer değiştirmesi Denklem 5.3'teki gibi gibi ifade edilebilir.

$$u(t, r, \theta) = G_r(r)R(\theta)f(t - p_r(r)(r - r_0)) \tag{5.3}$$

Buradan radyal ve azimutal türevler, Denklem 5.4 ve Denklem 5.5'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial u(t,r,\theta)}{\partial r} = A_r(r)u(t,r,\theta) + B_r(r)\frac{\partial u(t,r,\theta)}{\partial t} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial u(t,r,\theta)}{\partial \theta} = \Re(\theta)u(t,r,\theta) \quad (5.5)$$

Burada;

$$A_r(r) = \frac{G_r'(r)}{G_r(r)} \quad (5.6)$$

$$B_r(r) = -[p_r + \frac{\partial p_r}{\partial r}(r - r_0)] \quad (5.7)$$

ve

$$\Re(\theta) = \frac{R'(\theta)}{R(\theta)} \quad (5.8)$$

olarak tanımlanır.

Denklem 5.6, 5.7 ve 5.8'de tanımlanan gradiyometrik katsayıların belirlenerek integre edilmesi ile sırasıyla geometrik yayılma ($G_r(r)$), yatay dalga yavaşlığı (p_r) ve radyasyon örüntüsü ($\Re(\theta)$) elde edilebilmektedir.

Silindirik yer değiştirmeyi kartezyen koordinatlarda ifade edebilmek için aşağıdaki dönüşüm eşitlikleri kullanılır.

$$x = r\,sin\theta \quad (5.9)$$

$$y = r\,cos\theta \quad (5.10)$$

Bu durumda, silindirik türevler kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial u}{\partial x}\sin\theta + \frac{\partial u}{\partial y}\cos\theta \quad (5.11)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{\partial u}{\partial x}\cos\theta - \frac{\partial u}{\partial y}\sin\theta \quad (5.12)$$

2B dizilim ile kaydedilen sismik dalga için yer değiştirme kartezyen koordinatlarda aşağıdaki gibi verilebilir:

$$u(t,x,y) = G(x,y)f\left(t - p_x(x - x_0) - p_y(y - y_0)\right) \quad (5.13)$$

Deklem 5.13'te geometrik yayılma ve radyasyon örüntüsü bilgileri G(x,y) tarafından taşınmakta olup, p_x ve p_y ise x ve y yönlerindeki yatay dalga yavaşlığı bileşenleridir.

Denklem 5.13'ün türevinin alınması ile ise Denklem 5.14 ve Denklem 5.15 elde edilmektedir.

$$\frac{\partial u(t,x,y)}{\partial x} = A_x(x)u(t,x,y) + B_x(x)\frac{\partial u(t,x,y)}{\partial t} \tag{5.14}$$

$$\frac{\partial u(t,x,y)}{\partial y} = A_y(y)u(t,x,y) + B_y(y)\frac{\partial u(t,x,y)}{\partial t} \tag{5.15}$$

Denklem 5.11'deki türev alma işlemi x ve y üzerinden gerçekleştirildiğinde Denklem 5.16 ve Denklem 5.17 elde edilir.

$$A_r(r) = A_x(x)\sin\theta + A_y(y)\cos\theta \tag{5.16}$$

$$B_r(r) = B_x(x)\sin\theta + B_y(y)\cos\theta \tag{5.17}$$

Denklem 5.12'deki türev alma işleminin gerçekleştirilmesi ile ise aşağıdaki ifade hesaplanır:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta} = \left[A_x(x)\cos\theta - A_y\sin\theta\right]u + \left[B_x(x)\cos\theta - B_y(y)\sin\theta\right]\frac{\partial u}{\partial t} \tag{5.18}$$

Denklem 5.18'deki türev, azimut açısının belirlenmesi için kullanılmaktadır:

$$\theta = tan^{-1}\frac{B_x(x)}{B_y(y)} \tag{5.19}$$

Yer yüzeyinde tekil bir noktada aşağıdaki koşullar geçerli olacağı için;

$$p_x = -B_x(x_0) \tag{5.20}$$

$$p_y = -B_y(y_0) \tag{5.21}$$

$$p_r = p_x\sin\theta + p_y\cos\theta \tag{5.22}$$

$$\theta = tan^{-1}\frac{p_x}{p_y} \tag{5.23}$$

ve

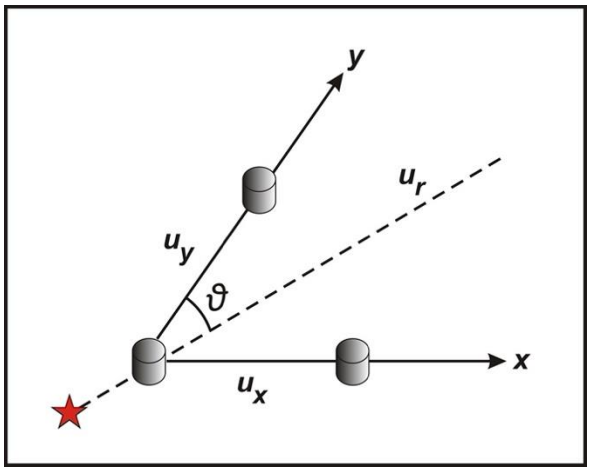
$$\frac{1}{r}\,\Re(\theta) = A_x\,(x)\cos\theta - A_y\,(y)\sin\theta \tag{5.24}$$

olarak belirlenebilir.

Dolayısıyla, 2B-SDG yönteminde x ve y yönlerindeki yatay dalga yavaşlıkları, oluşturulan 2B ve küçük alıcı aralıklı bir gradiyometrik dizilim ile belirlenebilir ve radyal yavaşlık (faz hızı) ve azimut bilgileri Denklem 5.22 ve Denklem 5.23 üzerinden hesaplanabilir. 2B-SDG yöntemi, bu tez kapsamında ASG verilerine uygulandığından, Artalan Gürültü Gradiyometri (AGG) yöntemi olarak isimlendirilmektedir ve tezin ilerleyen bölümlerinde bu isim ile anılacaktır.

AGG yöntemi, Edme ve Yuan (2016) tarafından yapılan bir çalışmayla mühendislik ölçeğinde uygulama bulmuştur. Bu çalışmada, birbirine yakın şekilde konuşlandırılan üç adet alıcı ile kaydedilen ASG dalga alanı AGG yöntemi ile analiz edilerek zemine ait Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde edilmiştir. Tez kapsamında, genel anlamda Edme ve Yuan (2016) tarafından önerilen veri toplama ve işleme akışı takip edilmekte, birbirine çok yakın şekilde yerleştirilmiş alıcı üçlülerinde kaydedilen ASG sinyallerinin zamansal ve uzaysal türevleri üzerinden yatay görünür hız ve azimut belirlenmektedir.

Sahada uygulaması en pratik ve ekonomik alıcı konfigürasyonun kurulması hedeflendiğinde yöntemin çalışması için, ASG dalga alanının biri merkezde, diğerleri birbirine dik doğrultularda yerleştirilmiş üç alıcı kullanılarak toplanması gerekmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: AGG yönteminde kullanılan alıcı konfigürasyonu.

AGG yöntemi uygulaması yazılan bir MATLAB kodu ile gerçekleştirilmekte ve faz hızlarının frekansa bağlı hesaplanabilmesi için öncelikle ASG kayıtları ilgilenilen frekans bandı boyunca belirlenen merkez frekansları için dar-bant süzülmektedir. Merkez frekansına bağlı genişlikte dar-bant süzgeç, *iirpeak* fonksiyonu ile oluşturularak uygulanmaktadır.

AGG yönteminde, farklı azimutlardaki ASG kaynaklarından yayınarak gradiyometrik alıcı dizilimine ulaşan düzlem dalgaların zamanda örtüşmesi durumunda, bu dalgaların yayılım yönleri (azimutları) ve faz hızları doğru belirlenememektedir. Bu durum, gradiyometrik alıcı dizilimine farklı azimutlardan eş zamanlı ulaşan çoklu varışların üst üste binmesi sonucunda ortaya çıkar. Sonuç olarak, dalga yayınım yönlerini ortalayan ya da bu yönlerin toplamını yansıtan karışık bir azimut elde edilir. Dolayısıyla, faz hızının doğru bir şekilde belirlenmesi de mümkün olmaz. Bunun önüne geçebilmek ve aynı zaman penceresi içerisine çoklu varışların girmesinden ve tekil düzlem dalga yaklaşımının bozulmasından kaçınmak için tüm veri çok kısa zaman pencerelerine bölnerek analiz edilmekte ve FHD bilgisinin çıkarılması amacıyla ASG dalga alanından daha fazla faydalanabilmek için zaman pencereleri % 50 örtüşmeli olarak kullanılmaktadır. Sonrasında, bu kısa zaman pencereleri üzerinden benzeşim ve doğrusallık analizleri yapılmaktadır. Çoklu varışların eş zamanlı olarak yer aldığı pencereler eliptik polarizasyon özelliği gösterir ve bu özellikleri sayesinde doğrusallık analizi ile elenebilirler. Bu işlem, doğru azimut ve faz hızı değerlerinin yalnızca tekil varışların olduğu doğrusal polarizasyon özelliklerine sahip pencerelerden elde edilmesini amaçlamaktadır.

Doğrusallığın belirlenmesi için kullanılan polarizasyon analizi ve bu analizin aşamaları için Vidale (1986), Baillard ve diğ. (2014) çalışmalarından faydalanılmıştır. Bu analizde, x ve y yönünde yerleştirilmiş olan alıcılarda kaydedilen ASG'nin uzaysal türevinin zaman ortamı integrali alınmış, dar-bant filtrelenmiş ve kısa pencerelere ayrılmış versiyonlarından (X ve Y) kovaryans matrisi Denklem 5.25 ile hesaplanmaktadır:

$$C = \begin{bmatrix} Cov(X,X) & Cov(X,Y) \\ Cov(Y,X) & Cov(Y,Y) \end{bmatrix} \tag{5.25}$$

Burada N örnek sayısına sahip pencerelerde hesaplanan X ve Y arasındaki kovaryans şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$Cov(X,Y) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i Y_i \tag{5.26}$$

Sonraki adımda, özdeğer ayrıştırma yapılarak, temel bileşenler belirlenmektedir. Bunun için, birim öz vektörler (U_1, U_2) ile bağlantılı öz değerler (λ_1, λ_2) elde edilir. Özdeğerler, $\lambda_1 \geq \lambda_2$ şeklinde düzenlenir ve $\lambda_i U_i$ polarizasyon elipsoidinin başlıca eksenlerini oluşturur (Denklem 5.27).

$$C \times U_i \equiv \lambda_i U_i \;\; i\epsilon[1,2] \tag{5.27}$$

Polarizasyon parametresi olan doğrusallık (rectilinearity) ise Denklem 5.28 ile hesaplanır:

$$Doğrusallık \;\equiv 1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \tag{5.28}$$

Örneğin; dairesel kutuplanma için Doğrusallık = 0 ve doğrusal kutuplanma için (λ_1= 1 ve λ_2 = 0) Doğrusallık = 1 olarak elde edilecektir.

Buradan, maksimum polarizasyon yönü, yani azimut Denklem 5.29 ile hesaplanır.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \tag{5.29}$$

Radyal gradyan bileşeni (U_r) ise aşağıdaki gibi (Denklem 5.30) belirlenir:

$$U_r = U_x \sin\theta + U_y \cos\theta \tag{5.30}$$

Denklem 5.30'daki U_x ve U_y, dizilimdeki merkez alıcı ile sırasıyla x ve y yönündeki alıcılar arasındaki uzaysal gradyanın integrallenerek merkez frekanslar için dar-bant süzgeçlenmesi ve kısa zaman pencerelerine bölünmesi ile elde edilmektedir.

Son aşama olarak faz hızı (c), Denklem 5.31 ile hesaplanır:

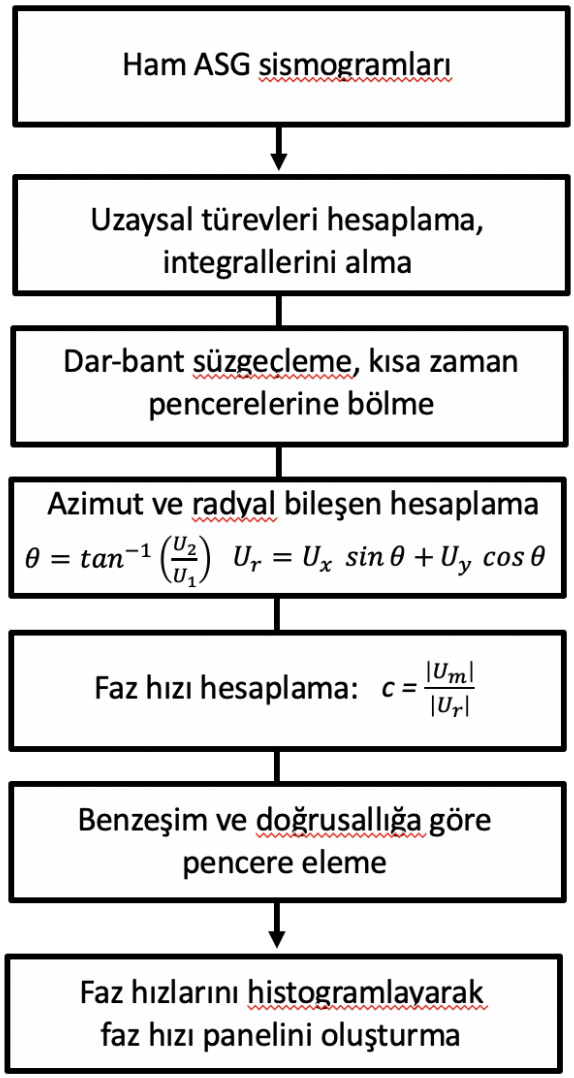
$$c = \frac{|U_m|}{|U_r|} \tag{5.31}$$

Denklem 5.31'deki $|U_m|$ ve $|U_r|$ sırasıyla, merkez alıcıda kaydedilen yer değiştirmenin ve radyal gradyanın hilbert dönüşümlerinin zarfını ifade etmektedir.

Benzeşim analizi ile eleme prosedürü bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiştir. Bu prosedürde, analiz zaman penceresi içerisinde birden çok sayıda kaynaktan ulaşan sinyallerin bulunması durumunda, bu sinyallerin girişime uğraması sonucunda dizilimdeki alıcıların kayıtları arasındaki benzeşimin azalabileceği fikrinden yola çıkılmaktadır. Çünkü, gradiyometrik dizilim kayıtlarında, aynı frekans içeriğine sahip iki dalgadan birinin genliği diğerine göre nispeten küçük ise, gradiyometrik yöntemin çalışmasında istikrarsızlık meydana gelmemektedir. Ancak, eğer birbirine yakın genliğe sahip iki veya daha fazla dalga sinyalde iç içe geçiyorsa, o belirli zaman ve konum için analizde gerçek dışı bir sonuç elde edilebilir ya da hiçbir sonuç elde edilemeyebilir (Langston, 2007a). Bu nedenle, her bir zaman penceresi için, dizilimde x ve y yönündeki alıcılar arasındaki benzeşim hesaplanarak, tüm pencerelerden elde

edilen ortalama benzeşimin altında benzeşim seviyesine sahip olan pencereler analizden elenmektedir. Böylece, AGG analizinde yalnızca alıcılar arası benzeşim düzeyi belirli bir seviyenin üstünde olan zaman pencereleri kullanılmış olmaktadır (bkz. Bölüm 5.2.2.2).

AGG yöntemi uygulaması için tez kapsamında yazılan MATLAB kodunun doğru şekilde çalıştığı öncelikle basit sentetik veri setleri üzerinden gerçekleştirilen testler ile teyit edilmiştir. AGG yönteminin bu kod ile uygulanması için kullanılan veri-işlem akışı Şekil 5.2'de özetlenmektedir.



Şekil 5.2 : AGG yönteminde uygulanan veri-işlem akışı.

5.2 1B Sismik Dalga Gradiyometri (SDG) Yöntemi

Langston tarafından 2007 yılında yayımlanan çalışmalarda, küçük alıcı aralıklı ve yoğun yerleştirilmiş 1B dizilimler için dalga alanının uzaysal gradyanları kullanılarak faz hızı ve geometrik yayılma bilgilerinin elde edilebildiği frekans (Langston, 2007a) ve zaman ortamı (Langston, 2007c) 1B-SDG yöntemleri sunulmuştur.

Sismik dalgaların uzaysal gradyanı, yer değiştirme ve hız arasındaki ilişkiyi belirleyen iki gradiyometrik katsayı ile açıklanmaktadır. Gradiyometrik katsayılardan biri, geometrik yayılma bilgisini ifade ederken, diğeri yatay dalga yavaşlığı (hızı) hakkında bilgi taşımaktadır. 1B-SDG yönteminin temeli, sismik dalganın genlik ve fazı hakkında bilgi sağlayan üç sismogram (yer değiştirmenin kendisi ile zamansal ve uzaysal türevleri) arasında, gradiyometrik katsayılar üzerinden tanımlanan zaman-bağıl ilişkiye dayanmaktadır (Langston, 2007c).

Geometrik yayılmaya ve uzaklığa bağlı olarak değişen bir hıza sahip bir cisim ya da yüzey dalgasının yer değiştirmesi şu şekilde gösterilebilir:

$$u(t,x) = G(x)\, f\,(t - p(x - x_0)) \tag{5.32}$$

Denklem 5.32'de tanımlanan yer değiştirme, düşey olarak homojen olmayan bir ortamda yayınan cisim dalgalarını ve malzeme özelliklerinin dalga boyundan daha büyük ölçeklerde değiştiği ortamlarda yüzey dalgalarını modellemektedir (Langston, 2007a).

Burada G(x) geometrik yayılmaya, *p* uzaklık *x* ile değişen yatay dalga yavaşlığına, x_0 ise referans bir uzaklığa karşılık gelmektedir. 5.32 denkleminin x'e göre türevinin alınması ile Denklem 5.33 elde edilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A(x)u + B(x)\frac{\partial u}{\partial t} \tag{5.33}$$

Denklem 5.33 *A(x)* ve *B(x)* katsayıları üzerinden birbiriyle ilişkili üç zaman serisi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu zaman serileri yer değiştirmenin kendisi ile yer değiştirmenin uzaysal ve zamansal türevleridir (Langston, 2007c). Denklem 5.33 çözülerek elde edilecek olan gradiyometri katsayıları *A(x)* ve *B(x)*, dalga ve yayıldığı ortam ile ilgili sırasıyla geometrik yayılma ve yatay dalga yavaşlığı (hızı) bilgilerini içermektedir.

Gradiyometri katsayıları;

$$A(x) = \frac{G'(x)}{G(x)} \tag{5.34}$$

ve

$$B(x) = \frac{\partial}{\partial x}[-p(x - x_0)] = -[p + \frac{\partial p}{\partial x}(x - x_0)] \tag{5.35}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Denklem 5.34'te verildiği gibi, geometrik yayılma, *A(x)* katsayının $[x_0, x]$ arasında integralinin alınması ile elde edilmektedir.

$$\int_{x_0}^{x} A(x)dx = \ln \frac{G(x)}{G(x_0)} \tag{5.36}$$

B(x) katsayısının $[x_0, x]$ aralığında integralinin alınması sonucunda yatay dalga yavaşlığı ya da onun tersi olan yatay dalga hızı elde edilebilmektedir (Denklem 5.37).

$$p = -\frac{1}{(x - x_0)} \int_{x_0}^{x} B(x)dx \tag{5.37}$$

Eşitlik 5.37'd3 L'Hospital kuralı kullanılırsa limit $x \rightarrow x_0$'a giderken;

$$p(x_0) = -B(x_0) \tag{5.38}$$

eşitliği elde edilmektedir.

Buna göre, Denklem 5.33'te tanımlanan ilişki kullanılarak, bir noktadaki sismik dalgaya ait yer değiştirmenin kendisinin, uzaysal türevinin ve dalga alanının zamansal türevinin ölçülmesi durumunda, geometrik yayılma ve yatay dalga yavaşlığı (hızı) belirlenebilmektedir. Gradiyometri katsayıları *A(x)* ve *B(x)* frekans ya da zaman ortamında belirlenebilir. Tez kapsamında kullanılan zaman ortamı yaklaşımı ilerleyen bölümde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Denklem 5.33'ün analitik sinyal kavramı ile ele alınması sonucunda gradiyometri katsayılarının hesaplanması ve dalga alanının faz bilgisinin korunması mümkün olmaktadır. Langston (2007c) tarafından sunulan gradiyometrik zaman ortamı yaklaşımı, tez boyunca Aktif Kaynaklı Gradiyometri (AKG) Yöntemi olarak anılacaktır, Denklem 5.33 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$u_x = Au + Bu_t \tag{5.39}$$

Denklem 5.39'un Hilbert dönüşümünün alınarak, *-i* ile çarpılması ve eşitliğin kendisine eklenmesi durumunda Denklem 5.40'taki analitik sinyal elde edilir.

$$U_x = AU + BU_t \tag{5.40}$$

Aşağıdaki denklemlerde *H* simgesi ile ifade edilen Hilbert dönüşümü doğrusal bir operatör olduğundan Denklem 5.41 yazılabilir.

$$U_x = AU + B\frac{\partial}{\partial t}U \tag{5.41}$$

Denklem 5.42'de anlık frekans anlık fazın zamansal türevi olarak verilmektedir:

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \tag{5.42}$$

Anlık faz ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\phi(t) = \tan^{-1}\left[\frac{-H[u(t)]}{u(t)}\right] \tag{5.43}$$

Bu durumda, yer değiştirmenin uzaysal türevine ait anlık faz aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\psi(t) = tan^{-1}\left[\frac{-H[u_x(t)]}{u_x(t)}\right] \tag{5.44}$$

Anlık frekans, Denklem 5.44 ile hesaplanan anlık fazın türevi alınarak orijinal zaman sinyali *u(t)* 'ye bağlı şekilde elde edilebilmektedir.

$$\omega(t) = \frac{1}{|U|^2}\{\dot{u}(t)H[u(t)] - u(t)H[\dot{u}(t)]\} \tag{5.45}$$

Denklem 5.45'te ω(t) zamana bağlı olarak hesaplanan anlık frekansı**,** $|U|$ orijinal zaman sinyalinin hilbert transformu üzerinden alınan zarf fonksiyonunu, $\dot{u}(t)$ ise orijinal sinyalin zamansal türevini göstermektedir. Denklem 5.45'in düzenlenmesi ile Denklem 5.46 elde edilir.

$$|U,_x|e^{i(\psi-\phi)} = A|U| + B\frac{\partial|U|}{\partial t} + iB|U|\omega(t) \tag{5.46}$$

Denklem 5.46'nın gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı denklemler olarak yazılarak düzenlenirse *A(x)* ve *B(x)* katsayılarının anlık faz ve genlik kullanılarak hesaplanması Denklem 5.47 ve Denklem 5.48'deki gibi olur:

$$B = \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U,_x|}{|U|} \sin(\psi - \phi) \tag{5.47}$$

$$A = \frac{|U,_x|}{|U|} \cos(\psi - \phi) - \frac{1}{\omega(t)} \frac{|U,_x|}{|U|^2} \frac{\partial |U|}{\partial t} \sin(\psi - \phi) \tag{5.48}$$

Tez kapsamında, AKG uygulaması ile FHD bilgisinin elde edilmesi amacıyla bir MATLAB kodu yazılmıştır. Frekansa bağlı FHD bilgisi elde edildiği için, bu kodda tüm sinyaller öncelikle belirlenen merkez frekanslar için dar bantlarda süzülmektedir. Sonrasında, süzülen sinyallerden 5.45 ve 5.47 nolu denklemler kullanılarak sırasıyla anlık frekans ve zamana bağlı *B* katsayısı hesaplanmaktadır. Ardından, her bir merkez frekansı için Rayleigh dalgası faz hızları, Denklem 5.38 ile zamanın fonksiyonu olarak elde edilebilmektedir. AKG analizlerinde Dziewonski (1969)'da önerilen Gauss süzgeci kullanılmıştır.

Gauss süzgeci, n. merkez frekans ω_n için şu şekilde verilir:

$$H_n(\omega) = e^{-\alpha\left(\frac{\omega-\omega_n}{\omega_n}\right)^2} \tag{5.49}$$

Süzgeç fonksiyonunun çözünürlüğünü α parametresi belirlemektedir. Buna göre; zaman ortamında artan çözünürlük frekans ortamında çözünürlüğün azalmasına karşılık gelmektedir. Süzgeç fonksiyonunda, ω_n'e bağlı göreceli bant genişliği (BAND) uygulanmaktadır.

Bu durumda kullanılan süzgeç fonksiyonu;

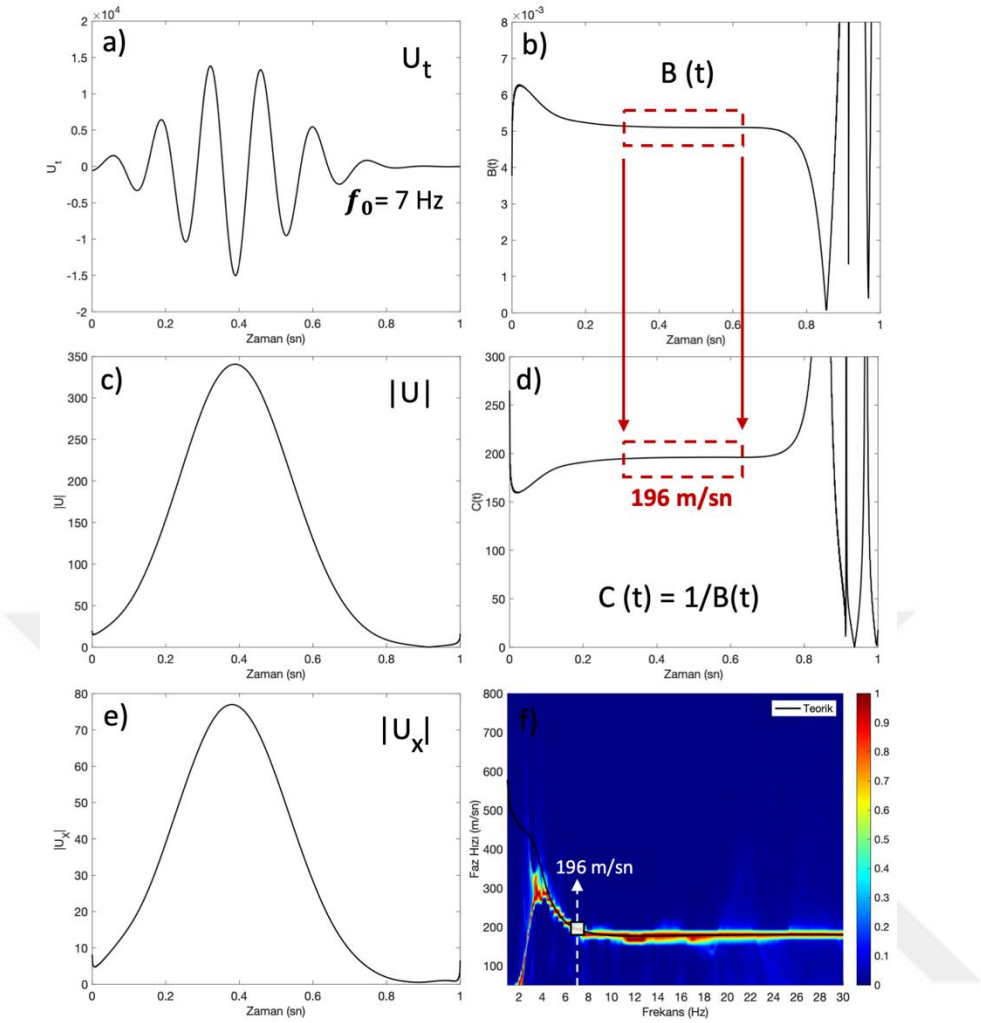
$$H_n(\omega) = \begin{cases} 0 & ; \quad \omega < (1 - BAND).\omega_n \quad için \\ e^{-\left(\frac{\omega-\omega_n}{\omega_n}\right)^2} & ; \quad (1 - BAND).\omega_n \le \omega \le (1 + BAND).\omega_n \quad için \\ 0 & ; \quad \omega > (1 + BAND).\omega_n \quad için \end{cases} \tag{5.50}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

AKG yönteminde uygulanan önemli veri-işlem adımları ve elde edilen parametrelerin gösterildiği örnek bir analiz şeması Şekil 5.3'te sunulmaktadır. AKG ile FHD analizi yapılırken öncelikle sinyaller belirli bir frekans bandında süzülür. Şekil 5.3a'da

gradiyometrik alıcı grubundaki merkez alıcıya ait sinyallerin $f_c = 7\,Hz$ merkez frekansında süzülmüş hali görülmektedir. Sonrasında, gradiyometrik dizilimi oluşturan alıcıların süzülmüş sinyalleri üzerinden uzaysal türev hesaplanmaktadır. Yer değiştirme sinyalinin uzaysal türevi u_x, analizin temelini oluşturmakta ve birçok aşamasında yer almaktadır (Denklem 5.44 ve 5.47). Yer değiştirme sinyalinin zamansal türevi u_t ise, gradiyometrik alıcı grubundaki merkez alıcıya ait sinyal üzerinden alınmaktadır (Şekil 5.3). Yer değiştirme sinyalinin zamansal türevi anlık frekans ω(t)'nin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Denklem 5.45). Ardından, hesaplanan ω(t), B katsayısının elde edilmesinde kullanılmaktadır (Denklem 5.47). Şekil 5.3c'de yer değiştirme sinyaline ait Hilbert dönüşümünün zarfı $|U|$ zamanın fonksiyonu olarak sunulmaktadır. Denklem 5.45'te tanımlandığı şekliyle ω(t)'nin hesaplanmasında kullanılan $|U|$, B katsayısının elde edilmesinde kullanılan eşitlikte de yer almaktadır (Denklem 5.47). Yer değiştirme sinyalinin uzaysal türevine ait Hilbert dönüşümünün zarfı $|U_x|$ de Şekil 5.3'te verilmektedir. B katsayısı ise zaman ortamında $\frac{|U_x|}{|U|}$ oranı ile elde edilmektedir (Denklem 5.47).

AKG yöntemi ile FHD analizinde, B katsayısının hesaplanmasında kullanılan yerdeğiştirme sinyaline ve yer değiştirmenin uzaysal türevine ait anlık fazlar da elde edilmektedir (ϕ ve ψ). 5.43 ve 5.44 nolu denklemler kullanılarak elde edilen anlık fazlar ϕ ve ψ, Denklem 5.47 üzerinden B katsayısının hesaplanmasında yer almaktadır. Şekil 5.3b'de zamanın fonksiyonu olarak hesaplanan B katsayısı sunulmaktadır.



Şekil 5.3 : $\mathbf{f_c = 7\ Hz}$ merkez frekansı için AKG uygulaması ile örnek analiz şeması (a) gradiyometrik alıcı grubundaki merkez alıcıya ait sinyalin zamansal türevi, (b) zamana bağlı B katsayısı, (c) yerdeğiştirme sinyalinin Hilbert dönüşümüne ait zarf, (d) zamanın fonksiyonu olarak faz hızı, (e) yerdeğiştirme sinyalinin uzaysal türevine ait Hilbert dönüşümünün zarfı, (f) $\mathbf{f_c = 7\ Hz}$ için elde edilen faz hızı değeri (beyaz dikdörtgen) ve teorik faz hızı eğrisi (siyah eğri). Analiz için kullanılan pencere boyu 1 sn'dir.

Şekilden takip edilebileceği gibi, *B* katsayısı yaklaşık olarak 0.3-0.63 sn zaman aralığında, belirli bir seviyede sabit şekilde seyretmektedir. Bu zaman aralığı için, $\frac{|U_x|}{|U|}$ oranından ilgili frekans için hesaplanan *B* katsayıları doğru FHD bilgisini veren bir değer almaktadır. Sinyal enerjisinin bulunduğu bu zaman aralığının dışında, $|U|$ ve $|U_x|$ sıfıra yakın değer almakta ve $\frac{|U_x|}{|U|}$ oranı üzerinden hesaplanan *B* katsayısının doğru değerden saptığı görülmektedir (Şekil 5.3a ve b).

Son olarak, ilgili frekans değerindeki faz hızları Denklem 5.38 kullanılarak zamanın fonksiyonu olarak elde edilmektedir (Şekil 5.3f). Şekilden de görülebileceği gibi faz

hızları, *B* katsayısına benzer şekilde, yaklaşık olarak 0.3-0.63 sn aralığında sabit bir değerde (196 m/sn) seyretmektedir. Kırmızı çerçeve ile işaretlenen 0.3-0.63 sn zaman aralığı dışında faz hızı bu sabit değerden uzaklaşmakta ve salınım göstermektedir. $f_c = 7$ Hz için elde edilen faz hızı değerlerinin belirli bir faz hızı aralığında oluşturulan hız sınıfları üzerinden histogramlanması ile FHD panelinin ilgili bölümü oluşturulmuş olmaktadır (Şekil 5.3f). Bu histogramda, her bir merkez frekansı için tanımlanan faz hızı sınıflarına düşen değerlerin tekrarlama sayıları belirlenerek faz hızının dağılım fonksiyonu hesaplanmaktadır. Histogramda bir merkez frekansında en çok tekrarlanan faz hızı sınıfı 1 (kırmızı) değeri ile ifade edilmekte, daha az tekrarlama sayısına sahip faz hızı sınıfları ise 0 (lacivert) ile 1 aralığında değer almaktadır. Şekil 5.3f 'de en çok tekrarlanma sayısını veren faz hızının 196 m/sn olduğu görülmektedir. Bu faz hızı değeri, zamanın fonksiyonu olarak elde edilen faz hızı *C(t)*'nin histogramlanması ve ilgili frekansta tüm zamanlar boyunca en çok tekrarlanan faz hızı sınıfının saptanması ile elde edilmiştir. Gradiyometrik alıcı grubu tarafından kaydedilen sinyallerin, verilen her bir merkez frekansı için süzülmesi ve yukarıda detaylı olarak anlatılan veri-işlem aşamalarının merkez frekansları için tekrarlanması sonucunda, ilgilenilen tüm frekans aralığında bütünleşik bir FHD paneli hesaplanabilmektedir.

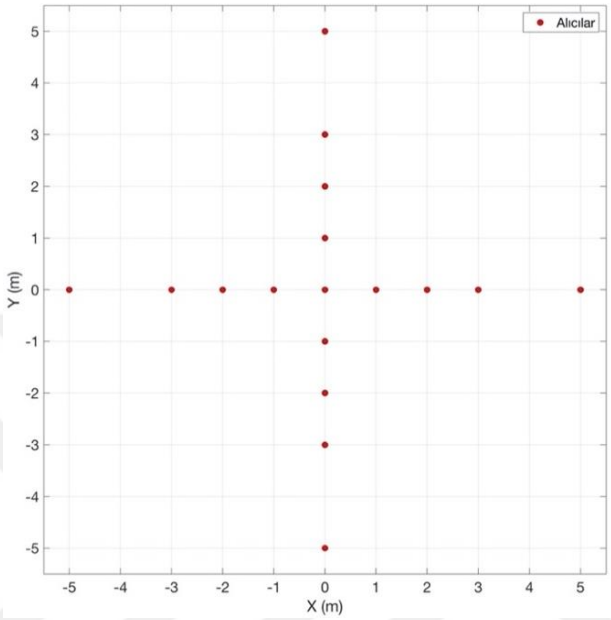
5.3 Sentetik Veri Setleri ve Elde Edilen Sonuçlar

5.3.1 Sentetik veri setinin özellikleri

AGG ve AKG yöntemlerinin FHD belirleme performanslarının değişken ASG kaynak yoğunluğu ve dağılımı, pencere boyu, alıcı aralığı, uzaysal türev alma yöntemi, SGO, mod içeriği, vb. koşullara bağlı olarak değerlendirilmesi ve elde edilen sonuçların konvansiyonel yöntemler olan CVFK ve MASW'den elde edilen FHD sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra, yöntemlerin veri-işlem adımları ve parametrelerinin belirlenmesi için sentetik veri setleri kullanılarak testler yapılması hedeflenmektedir.

Bu amaçla, SK04 sahası için üretilen 1B hız modeli (Şekil 4.27) için küçük alıcı aralıklı (1-5 m), 1B (doğrusal) ve 2B gradiyometrik alıcı dizilim geometrileri ile sentetik atış ve ASG verileri üretilmiştir. Bunun yanı sıra, AKG'nin konvansiyonel aktif kaynaklı yüzey dalgası analizi yöntemi olan MASW ile karşılaştırılması amaçlı olarak 1B, çok alıcılı (120 m dizilim açıklığına sahip) sentetik atış verileri de oluşturulmuştur.

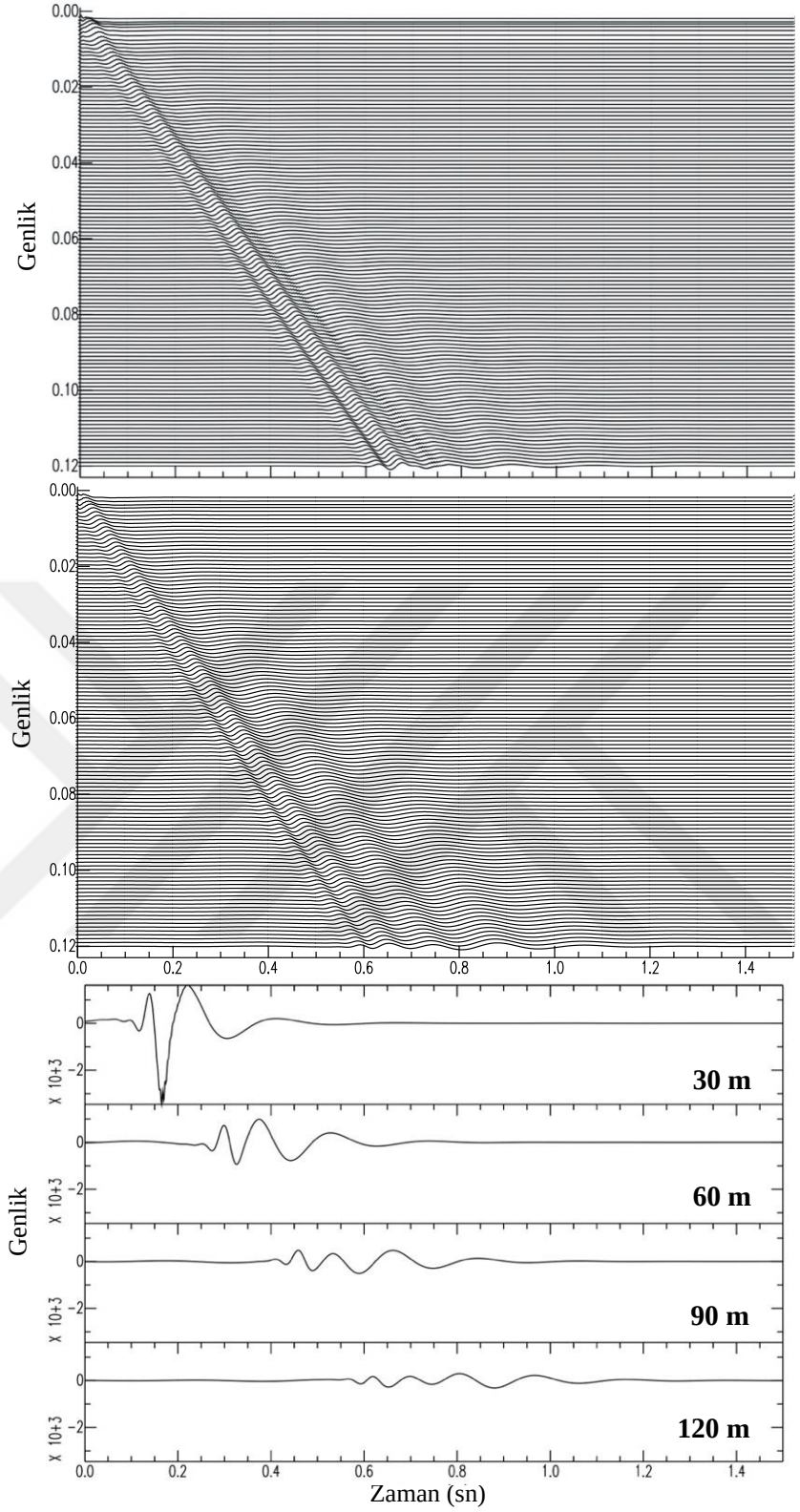
AGG ve AKG analizlerinde kullanılmak üzere üretilen tüm sentetik veri setlerinin zaman örneklemesi, zamansal türev hesaplamalarında sık örneklemeye ihtiyaç duyulduğundan, sırasıyla 2 msn ve 1 msn olarak belirlenmiştir. AGG yöntemini test etmek amacıyla üretilen sentetik ASG verisi için kullanılan artı şeklindeki gradiyometrik alıcı dizilimi Şekil 5.4'te sunulmaktadır.



Şekil 5.4 : ASG sentetiklerinin üretilmesinde kullanılan artı şeklindeki gradiyometrik dizilim geometrisi.

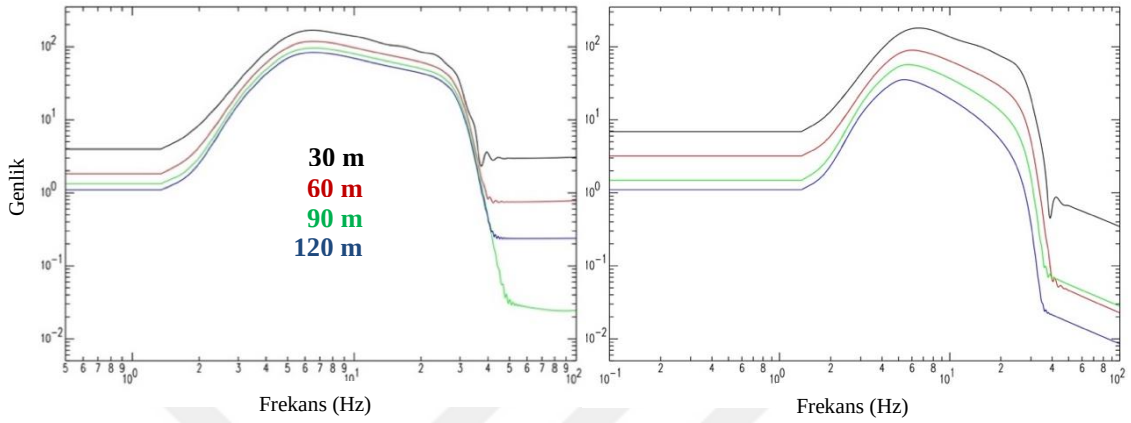
Dizilim, birbirine dik iki alıcı hattından oluşmakta ve merkezinde (0m, 0m) bir adet alıcı bulundurmaktadır. Diğer alıcılar hatların 1m, 2m, 3m ve 5m'lerinde yer almaktadır. Yöntemlerin sınırlarının belirlenmesi için yapılan bazı testlerde sentetik verisine soğrulma ya da bir başka deyişle sismik Q etkisi, beyaz gürültü ya da gerçek ASG gürültüsü eklenmiştir. İlerleyen bölümlerde sentetik veri setleri ile yapılan testlerden elde edilen FHD sonuçları detaylı şekilde sunulmaktadır. Sentetik verilerin üretilmesinde kullanılan SK04 hız modeli ile ilgili diğer detaylar ve bilgiler Bölüm 4.2'de paylaşılmaktatır.

Şekil 5.5'te Q etkisi eklenmemiş ve eklenmiş sentetik atış verileri, Şekil 5.6'da ise bu verilerden hesaplanan genlik spektrumlarının artan kaynak-alıcı ofseti için karşılaştırması verilmektedir.



Şekil 5.5 : Q etkisi eklenmemiş (üstte) ve eklenmiş (ortada) sentetik atış verisi sismogramları. Q etkisi eklenmiş sentetik atış verisinde 30m, 60m, 90m ve 120m ofsetlerindeki sismogramlar (altta). Tüm sismogramlar 0.1-100 Hz frekans bandında süzülmüş ve ilk 0-1.5 sn'lik bölümleri gösterilmiştir.

Q eklenmemiş veri seti için farklı ofsetlerdeki sinyal genlikleri ilgilenilen frekans bandında (~1-30 Hz) yalnızca geometrik yayılmanın etkisi ile azalmaktadır. Buna karşılık, Q etkisi eklenen veri seti için artan ofset ile sinyal genliklerinin beklenen şekilde, özellikle yüksek frekans bandında (> 4 Hz) büyük ölçüde azaldığı net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : Q etkisi eklenmemiş (solda) ve eklenmiş (sağda) sentetik atış verilerinde 30m, 60m, 90m ve 120m'deki sismogramların genlik spektrumları. Ofset bilgisi soldaki panelde verilmektedir.

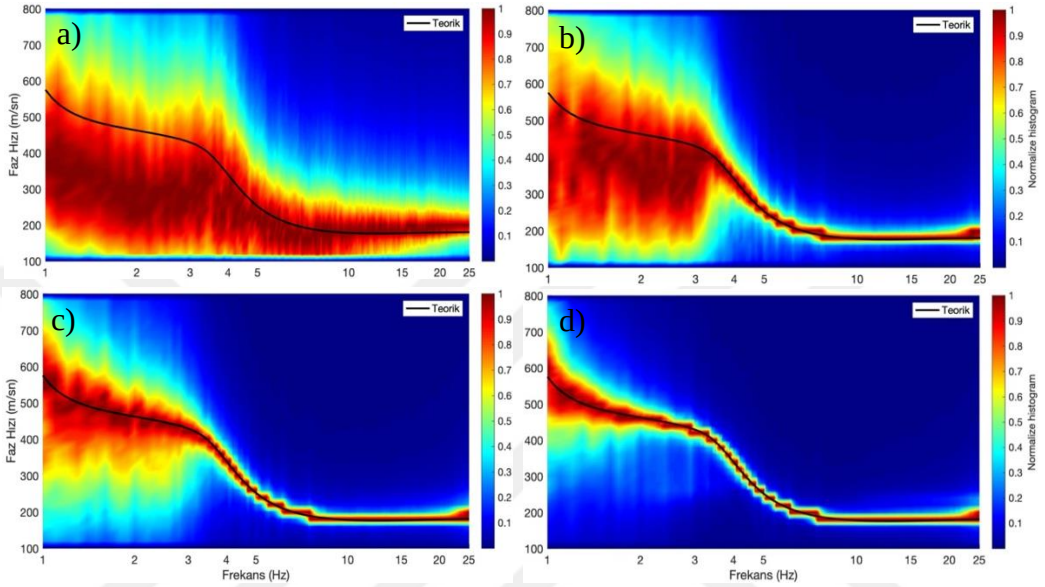
5.3.2 AGG için veri-işlem aşamalarının ve yöntem sınırlarının belirlenmesi

5.3.2.1 Kaynak yoğunluğu ve pencere boyu testleri

Bu bölümde ASG dalga alanındaki kaynak yoğunluğunun ve analiz penceresi boyunun AGG yönteminin FHD belirleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılan kaynak dağılımları Bölüm 4.2.1'deki ile aynıdır. Şekil 5.7'de 7200, 1200, 600 ve 300 kaynak kullanılarak hesaplanan sentetik ASG veri setlerinden 1m alıcı aralığı için, herhangi bir pencere eleme işlemi uygulanmadan elde edilen FHD panelleri verilmektedir. Buna göre; 7200 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan FHD panelinde genel anlamda çözünürlük çok düşüktür ve düşük frekanslara (< 5 Hz) doğru daha da düşmektedir. Bu kaynak dağılımı için yüksek frekans bandında (> 5 Hz) teorik faz hızlarına yakın değerler elde edilirken, düşük frekans bandında (< 5 Hz) ise faz hızlarının doğru kestirilemediği görülmektedir.

1200 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan FHD panelinde ise çözünürlüğün düştüğü ve faz hızlarının teorik eğri ile uyumlu elde edilemediği frekans değeri ~ 4 Hz'in altına kaymaktadır. 600 kaynaklı ASG sentetiği için elde edilen FHD panelinde tüm frekans bandında teorik faz hızı eğrisi ile uyumlu bir FHD branşı gözlenirken,

düşük frekans bandında (< 3 Hz) çözünürlük azalmaktadır. Buna karşılık, 300 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan paneldeki çözünürlük tüm frekans bandında oldukça yüksektir ve FHD branşı teorik eğri ile bire bir uyumludur. Tüm kaynak koşulları için hesaplanan FHD panellerinde 20 Hz frekansının üstünde faz hızlarının olduğundan yüksek kestirildiği gözlenmektedir. Bunun sebebi, yüksek frekans bandında, hesaplanan faz hızlarındaki uzaysal türev kaynaklı hataların artmasıdır.



Şekil 5.7 : a) 7200, b) 1200, c) 600 ve d) 300 kaynaklı ASG sentetiği için hesaplanan AGG panelleri. Modelden hesaplanan sentetik faz hızı dispersiyonu düz siyah eğri ile gösterilmektedir. Sağdaki renk skalası normalize edilmiş histogramı (sayımı) gösterir. Analiz pencere boyu ve alıcı aralığı olarak sırasıyla 3 sn ve 1 m kullanılmıştır.

AGG prosedüründe ASG verisi kısa zaman pencerelerine bölünerek analiz edilmekte ve yöntem ile doğru FHD bilgisinin elde edilebilmesi için analiz penceresi içerisinde tek bir kaynaktan yayınan güçlü sinyallerin bulunması gerekmektedir. Analiz penceresinde çoklu ASG kaynaklarından yayınan sinyallerin üst üste binmesi durumunda, yöntem bu sinyallerin yönünü ve hızını doğru kestirememektedir. Önceki bölümlerde de paylaşıldığı gibi, sentetiğin üretilmesinde kullanılan kaynak sayısı arttıkça farklı kaynaklardan üretilen sinyallerin zamanda örtüşmeleri de artmakta ve dolayısıyla girişime uğramaları söz konusu olmaktadır (Şekil 4.28). Bu nedenle, ASG kaynaklarının çok yoğun olduğu 7200 kaynaklı sentetikte farklı kaynaklardan yayınan sinyallerin zamanda örtüşme oranı daha yüksek olmakta ve sinyallerin yapıcı, yıkıcı ya da karmaşık girişime uğrama ihtimali artmaktadır. Bu durumda, farklı ASG kaynaklarından dizilime ulaşan dalgaların fazları ve genliklerinin karmaşık bir şekilde

birleşmesinin, hatta bazı durumlarda yıkıcı girişim ile birleşen sinyallerin güçsüzleşmesinin ya da enerjisini tamamen kaybetmesinin söz konusu olabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, bu kaynak yoğunluğu için AGG ile hesaplanan düşük çözünürlüklü FHD panelinde faz hızları geniş bir frekans bandında doğru elde edilememektedir. Bununla birlikte, ASG sentetiğinin oluşturulmasında kullanılan kaynak sayısı azaldıkça AGG ile hesaplanan panellerdeki FHD bilgisinin doğruluğu artmakta, en az sayıda kaynaktan (300 kaynak) oluşturulan sentetik veri seti için teorik eğri ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 5.7).

FHD panellerinde kaynak sayısının artmasının özellikle düşük frekans bandında bozucu etki yarattığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, sinyallerin frekans içeriği ile ilişkilendirilerek açıklanabilir. Düşük frekanslı sinyaller genellikle daha uzun dalga boylarına sahiptir ve bir ortam içinde daha fazla mesafeyi kat edebilir. Şöyle ki, düşük frekanslı bir sinyal, ortam içinde dalga boylarını oluştururken daha uzun bir süreye ihtiyaç duyar ve bu süre zarfında sismik dalgalar daha geniş bir alana yayılır. Bu durum, farklı kaynaklardan gelen düşük frekanslı sinyallerin yüksek frekanslılara oranla zamanda daha çok örtüşmesine ve birbirleriyle daha çok etkileşimde bulunmasına neden olur. Bu nedenle, düşük frekanslı sinyallerin aynı anda çeşitli ASG kaynaklarından yayılması durumunda, bu sinyaller birbirleriyle çakışarak birbirlerini iptal edebilir, bir başka deyişle yıkıcı girişime uğrayabilir. Yapılan testin sonucu olarak, ASG dalga alanını oluşturan kaynak yoğunluğu ve dolayısıyla farklı kaynaklar tarafından üretilen sinyallerin zamanda örtüşmesi arttıkça AGG yönteminin FHD belirleme performansının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir.

Bu aşamada, farklı ASG kaynaklarından ulaşan sinyallerin zaman ortamında örtüşmesi durumunda AGG yöntemi ile FHD analizinin nasıl etkilendiğini göstermek için basit sentetik veri setleri üzerinden bir örnek sunulmaktadır (Şekil 5.8). Bu amaçla, düzlem dalga yaklaşımı ile kaynak-alıcı geometrisi ve dalga yayılma prensiplerine dayanarak basit sentetik sismogramlar üreten bir MATLAB kodu yazılmıştır. Bu kodda, alıcı konumlarına belirlenen frekans bandında, farklı frekans içeriği ile ulaşan düzlem dalga sinyalleri toplanarak sentetik sismogramlar oluşturulmaktadır.

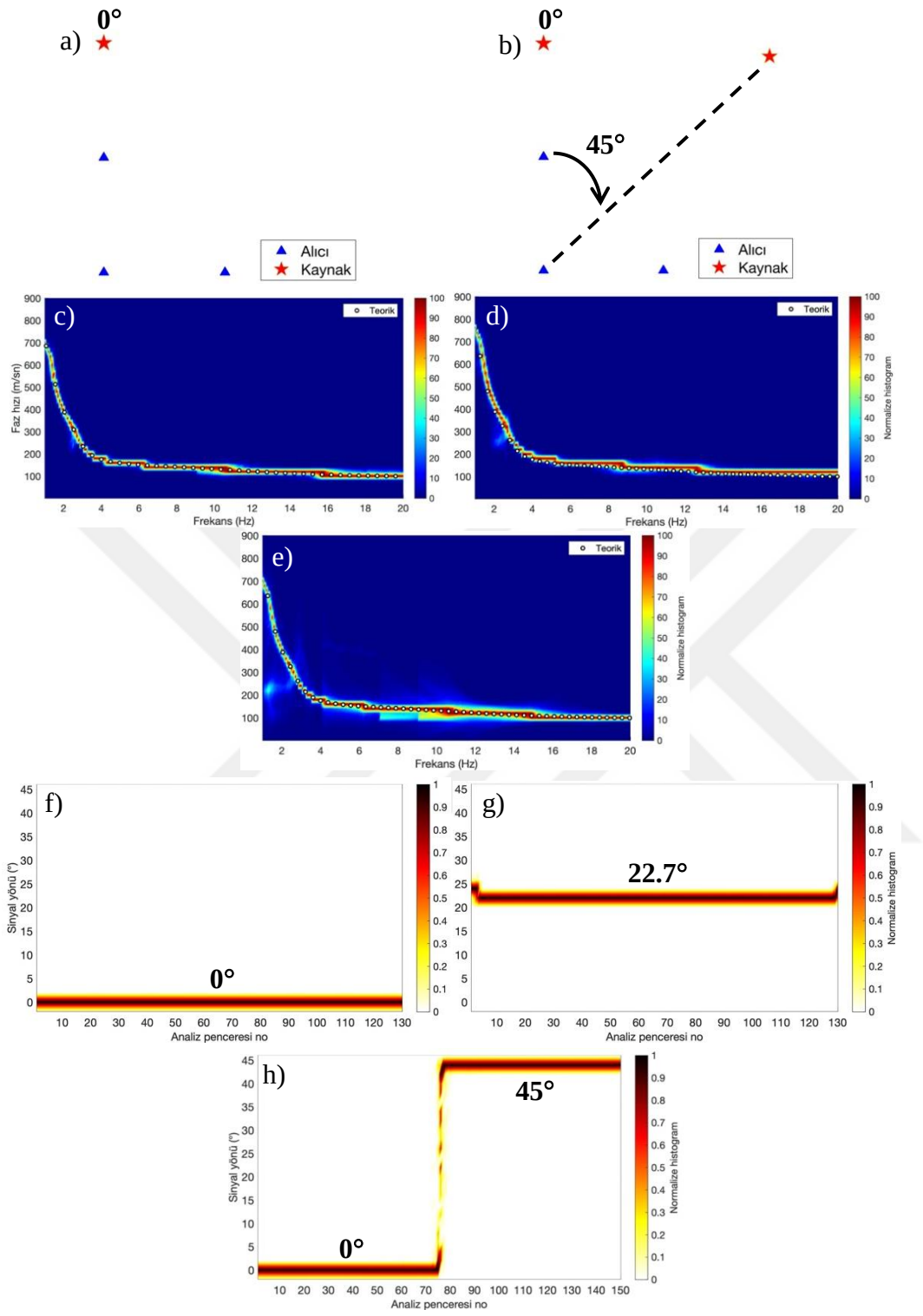
İlk olarak, dispersif temel mod Rayleigh dalgası treninin kendini 5 kez tekrar ettiği ancak üretilen sinyallerin zaman ortamında birbirinden ayrımlı olduğu 130 saniyelik bir sentetik sismogram oluşturulmuştur. Bu sentetik sismogramın üretilmesinde tekil

bir kaynak kullanılmakta ve alıcılara 0° azimutundan ulaşmaktadır (Şekil 5.8a). Sonrasında, iki temel mod Rayleigh dalgası treninin farklı azimutlardan, eş zamanlı olarak yayınması durumunda yöntemin bu kaynak azimutlarını ve dolayısıyla faz hızlarını doğru belirleyip belirleyemeceğini gözlemlemek amacıyla bir sentetik veri seti üretilmiştir. Bunun için Rayleigh dalgası temel mod dalga trenlerinden birinin 0° azimutundan, diğer dalga treninin ise 45° azimutundan yayındığı durum için üretilen sinyaller üst üste toplanarak sismogramlar oluşturulmuştur (Şekil 5.8b). Sentetik sismogramların uzunluğu yine 130 saniyedir ve farklı azimuttan yayınan iki sinyalin toplamından oluşan dispersif dalga treni sismogram boyunca 5 kez tekrarlanmaktadır.

Son olarak, iki temel mod Rayleigh dalgası treninin farklı azimutlardan ancak farklı zamanlarda yayınması durumunda yöntemin kaynak azimutlarını ve faz hızlarını doğru belirleyip belirleyemeceğini gözlemlemek amacıyla bir sentetik veri seti üretilmiştir. Bu veri setinde Rayleigh dalgası temel mod dalga trenlerinden biri 0° azimutundan, diğer dalga treni ise yine 45° azimutundan yayınmaktadır (Şekil 5.8b). Sentetik sismogramlar bu iki dalga treninin art arda eklenmesi ile oluşturulmuştur. Sismogramların uzunluğu 150 saniyedir ve ilk 75 saniyelik bölümlerinde yalnızca 0°'den yayınan sinyaller bulunurken, son 75 saniyelik bölümlerinde ise yalnızca 45°'den yayınan sinyaller bulunmaktadır. Sismogramlar boyunca her iki azimuttan yayınan dalga trenleri 3'er kez tekrar etmektedir.

Analiz penceresinde, tek bir azimuttan (0°) yayınan tekil kaynak sinyallerinin bulunması ya da farklı yönlerden yayınan (0° ve 45° azimutları) ancak zamanda örtüşmeyen kaynaklara ait sinyallerin bulunması durumunda AGG yöntemi ile FHD bilgisinin teorik eğri ile uyumlu bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 5.8c ve e). Buna karşılık, farklı yönlerden (0° ve 45° azimutları) yayınan kaynak sinyallerinin analiz zaman penceresinde örtüşerek girişime uğraması ile AGG yöntemi ile FHD bilgisinin teorik eğriden ~% 8-15 oranında yüksek kestirildiği belirlenmektedir (Şekil 5.8d).

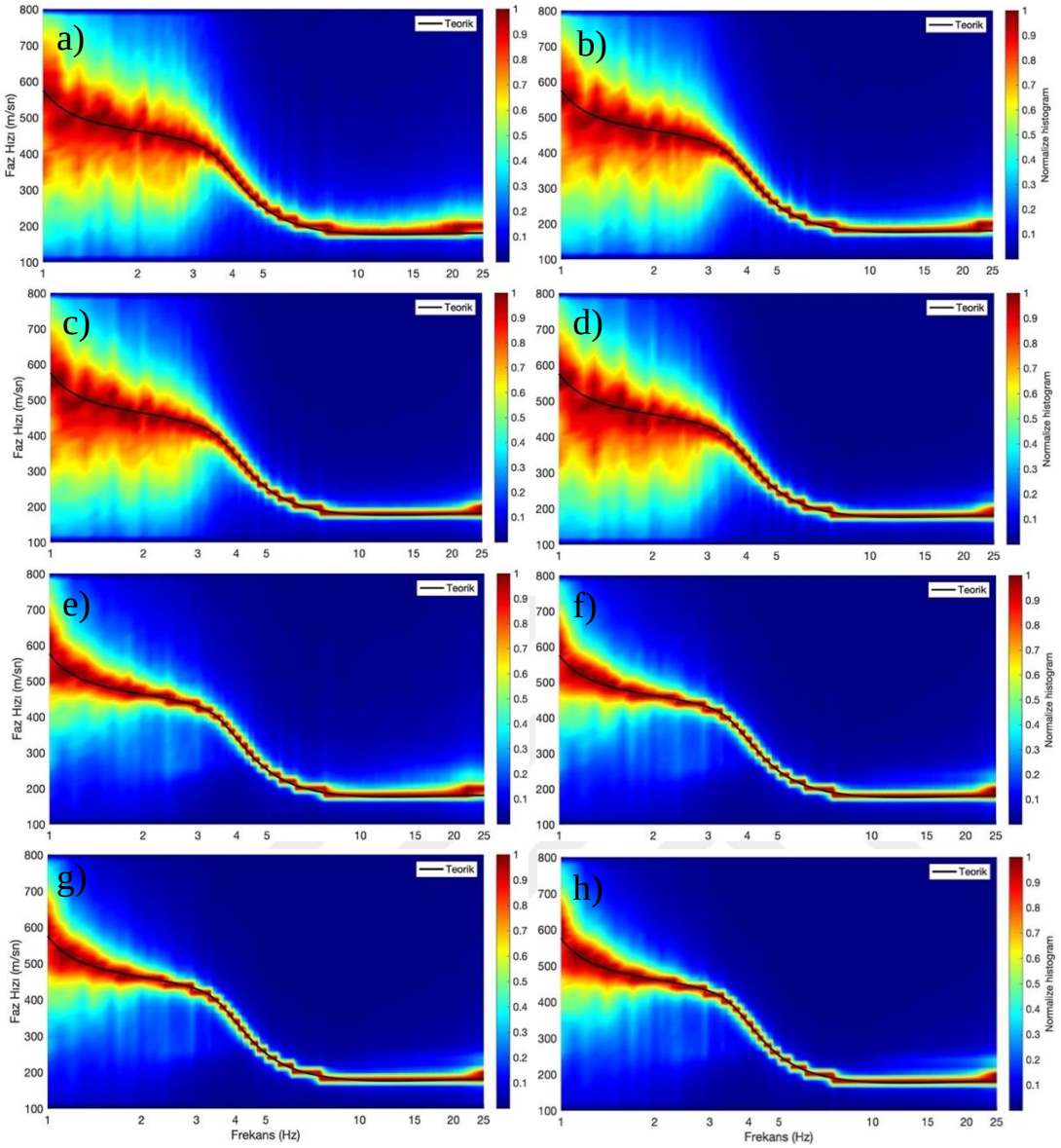
0° azimutundan yayınan tekil kaynak sinyali ve 0° ve 45° azimutlarından yayınan ve ayrık zaman pencerelerinde bulunan sinyaller için kaynak azimutları doğru değerinde elde edilmektedir (Şekil 5.8f ve h). Buna karşılık, 0° ve 45° azimutlarından yayınan ve örtüşen zaman pencerelerinde bulunan sinyaller için farklı analiz pencerelerinden elde edilen kaynak azimutları 20.1-26.3° aralığındadır ve ortalamaları 22.7° olarak belirlenmektedir (Şekil 5.8g). Yani, AGG yöntemi ile hesaplanan kaynak azimutları, gerçek azimutların yaklaşık ortalaması şeklinde elde edilmektedir.



Şekil 5.8 : Kullanılan 2B gradiyometik dizilim ile (a) tekil kaynak (0°) ve (b) 0° ve 45° azimutlarındaki iki kaynak için şematik gösterimler verilmektedir. Alıcılara (c), (f) 0° azimutundan ulaşan tekil sinyaller, (d), (g) 0° ve 45° azimutlarından ulaşan ve zamanda örtüşen sinyaller ve (e), (h) 0° ve 45° azimutlarından ulaşan ancak zamanda örtüşmeyen sinyaller için AGG kullanılarak hesaplanan FHD panelleri ve kaynak azimutları. Teorik faz hızı eğrisi beyaz daireler ile gösterilmiştir. Alıcı aralığı 1m, pencere boyu 1sn olarak kullanılmıştır.

Bunun sonucu olarak, FHD bilgisi, gerçek kaynak azimutları ile elde edilen azimutların arasındaki yön farkının kosinüsü ile doğru orantılı şekilde yüksek kestirilmektedir (Şekil 5.8d ve g). Örneğin; 0° ve 45° azimutlarını ortalayan 22.7° için oluşan yön farkı cos (22.7°)= 0.92 olmaktadır. AGG ile azimut belirlemedeki hatadan oluşan bu farkın FHD bilgisinde ortalama %8'lik bir sapmaya neden olduğu belirlenmektedir.

Sonraki adımda, en iyi FHD sonuçlarını veren analiz penceresi boyunun belirlenmesi ile ilgili testler yapılarak uygun pencere boyu belirlenmiştir. Bunun için her bir kaynak yoğunluğu için 12 sn, 6sn, 3 sn ve 1 sn uzunluğunda pencere boyları ile AGG analizi yapılmış ve FHD panelleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9'da 600 ve 300 kaynaklı sentetikler için farklı pencere boyları kullanılarak hesaplanan paneller sunulmaktadır. Buna göre; pencere boyunun kısalması ile, FHD bilgisi daha yüksek doğrulukla elde edilmekte, özellikle yüksek frekans bandında (> 3-5 Hz) teorik eğri ile daha uyumlu faz hızları belirlenmektedir.



Şekil 5.9 : Üst iki sırada 600 kaynaklı sentetik için (a) 12 sn, (b) 6 sn, (c) 3 sn ve (d) 1 sn pencere boyları ile, alt iki sırada 300 kaynaklı sentetik için (e) 12 sn, (f) 6 sn, (g) 3 sn ve (h) 1 sn pencere boyları ile hesaplanan AGG panelleri. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

1 ve 3 sn pencere boyları kullanılarak hesaplanan FHD panellerinde elde edilen faz hızı branşları teorik eğri ile oldukça uyumludur (Şekil 5.9). Analiz pencere boyunun mümkün olduğunca kısa seçilmesi ile elde edilen FHD bilgisindeki doğruluğun artması AGG yönteminin doğru çalışması için gerekli olan koşullar ile de uyumludur. AGG yönteminde FHD bilgisinin doğru belirlenebilmesi için analiz penceresinin içine tek bir ASG kaynağından yayınan sinyallerin düşmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, pencere boyu uzatıldıkça, ASG dalga alanının özelliklerine de bağlı olarak, analiz penceresinin içine birden fazla kaynaktan yayınan sinyallerin girme ihtimali artmaktadır.

Buna karşıt olarak, pencere boyunun kısaltılması ile, analiz penceresinin içinde tekil sinyal varışlarının bulunma ihtimali yükselmektedir. Bu nedenlerle, AGG analizlerinde kısa pencere boylarının (≤ 3 sn) kullanılmasına karar verilmiştir.

Bunların yanı sıra, hesaplamalarda örtüşmeli analiz penceresi kullanımının daha doğru ve yüksek çözünürlüklü FHD bilgisi sağlayıp sağlamayacağı test edilmiştir. Bu amaçla, 1200 ve 300 kaynaklı sentetik veri setleri için örtüşmesiz, %25 örtüşmeli ve %50 örtüşmeli pencereleme ile FHD panelleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre; artan oranda örtüşmeli pencere kullanmanın AGG yöntemi ile elde edilen FHD panellerinde görünür bir iyileşme sağlamadığı söylenebilir. Buna karşın; ASG'nin rastgele doğası gereği, veriden daha verimli şekilde FHD bilgisi çıkarmak için daha çok sayıda ve farklı sinyaller içeren pencerelerin kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirildiğinden örtüşmeli pencere kullanımının AGG prosedüründe yer almasının sonuçlara katkısının olacağı öngörülmektedir. ASG, rastgele doğasından kaynaklı olarak zaman içinde değişken frekans ve genlik özellikleri gösterebilir. Örtüşmeli pencere kullanımı, belirli bir zaman dilimindeki veri segmentlerinin birbirini kısmen örtmesine olanak tanıdığı için, özellikle bazı ölçüm sahalarında karşılaşılabilecek değişken karaktere sahip ASG alanı ile başa çıkmak adına daha etkili bir yöntem olacağı değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, analiz için belirlenen zaman pencerelerinin örtüşmeli olması, veri setinin geniş bir yelpazesini kapsayarak, maksimum bilgi çıkarılmasına olanak tanımaktadır. Toplam veri uzunluğu sentetik veri setindeki gibi 1800 sn olduğunda, FHD panellerinin üretilmesinde kullanılan pencere sayısı örtüşmesiz pencereleme kullanılması durumunda 600 olurken, %25 ve %50 örtüşmeli pencereleme kullanılması durumunda sırasıyla 799 ve 1199'a çıkmaktadır. %50 oranındaki örtüşmenin, bu bağlamda optimal bir denge sağlayarak, analiz sürecindeki doğruluk ve hassasiyeti artıracağı değerlendirildiğinden analizler bu örtüşme oranı ile gerçekleştirilmiştir.

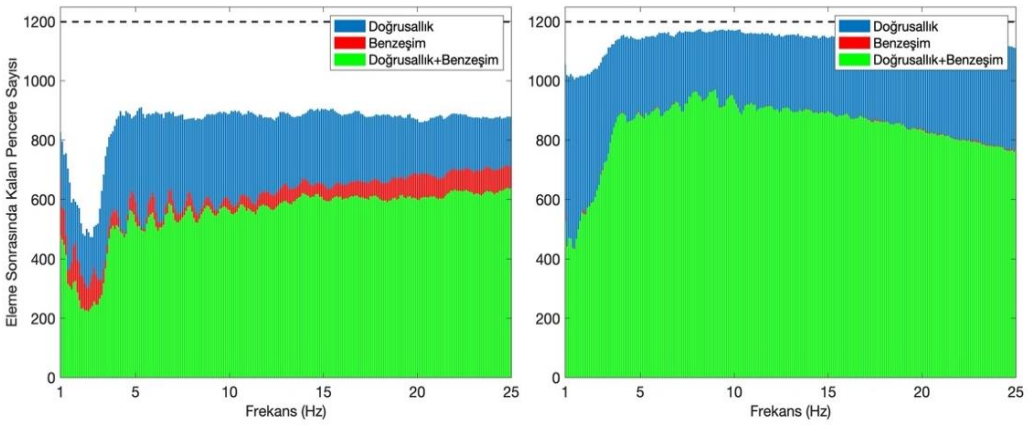
5.3.2.2 Pencere eleme testleri

Önceki bölümde kullanılan sentetik veri setleri üzerinden doğrusallık ve benzeşime göre pencere eleme testleri yapılmıştır. Analiz pencereleri % 50 örtüşmeli olacak şekilde seçilmiş olup, yalnızca doğrusallığa göre, yalnızca benzeşime göre ve aynı anda hem doğrusallığa hem de benzeşime göre pencere elemesi yapılması durumunda FHD panellerinde iyileşme gözlenip gözlenmediği araştırılmıştır. 0 değerinde bir

doğrusallık dairesel polarizasyona, 1 değerindeki bir doğrusallık ise doğrusal polarizasyona karşılık gelmektedir. Analiz için yalnızca doğrusal polarizasyona çok yakın eliptik polarizasyon gösteren ya da tamamen doğrusal polarizasyona sahip pencerelerin korunması istendiğinden, elemelerde doğrusallık eşik değeri 0.8 olarak kullanılmış, benzeşim eşik değeri ise kullanılan tüm pencerelerden hesaplanan ortalama benzeşim değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

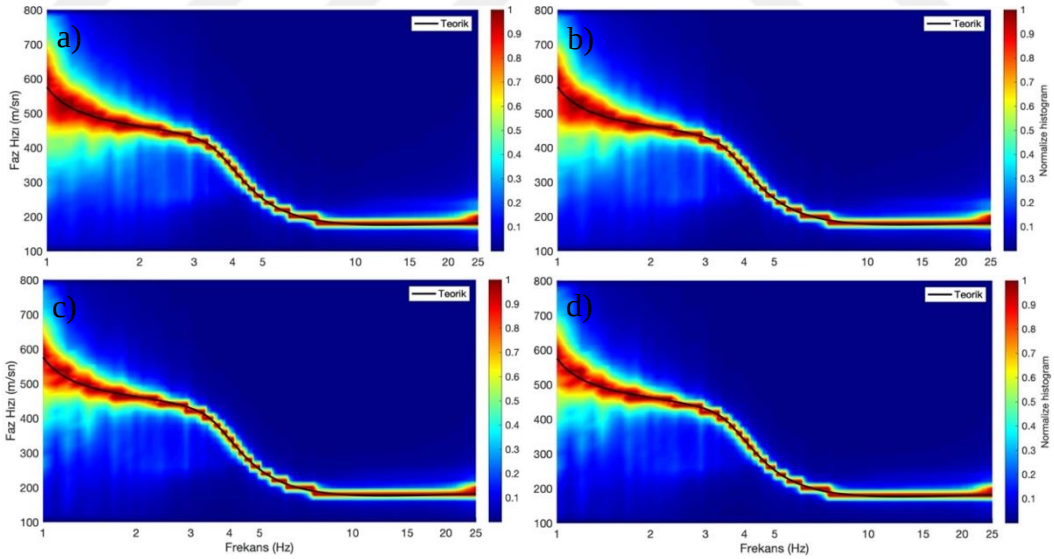
Her bir zaman penceresindeki ortalama benzeşim değerinin belirlenebilmesi için merkez alıcıya göre x ve y yönünde, 1m'de ($\Delta x=\Delta y=1$m) yer alan alıcıların dar bantlarda süzülmüş sinyalleri arasındaki benzeşim, yani uyumluluk hesaplanmış, her bir pencere için hesaplanan benzeşimin ortalaması elde edilmiş, eleme için benzeşim limit değeri ise tüm frekanslar ve tüm analiz pencereleri için hesaplanan genel benzeşim ortalamasına eşitlenmiştir. Buna göre; toplam 1200 ve 300 ASG kaynağı ile üretilen sentetikler için benzeşim limit değerleri sırasıyla 0.59 ve 0.82 olarak elde edilmiştir.

Sentetik veri seti %50 örtüşmeli pencere ile analiz edildiğinde elde edilen toplam pencere sayısı 1199 olmaktadır. Şekil 5.10'da %50 örtüşme ile elde edilen toplam analiz pencere sayısı ile yalnızca doğrusallığa, yalnızca benzeşime ve hem doğrusallık hem de benzeşime göre pencere elemesi yapılması durumunda FHD paneli hesaplamasında kullanılan analiz pencere sayıları karşılaştırılmaktadır. Buna göre; hem doğrusallık hem de benzeşime göre pencere elemesi yapılması sonrasında, 1200 kaynaklı sentetik için analizde kullanılabilir pencere sayısı 600'ün altına, 300 kaynaklı sentetik için ise genel anlamda 900'ün altına düşmektedir. Yüksek frekans bandında (> 4 Hz) elenen pencere sayıları değişen frekansla genel anlamda sabit kalırken, en yüksek düzeyde pencere elemesi düşük frekans bandında (< 4 Hz) olmaktadır. Ayrıca, pencere sayısı, benzeşime göre yapılan eleme sonucunda doğrusallığa göre yapılan elemeye nazaran daha çok azalmaktadır.

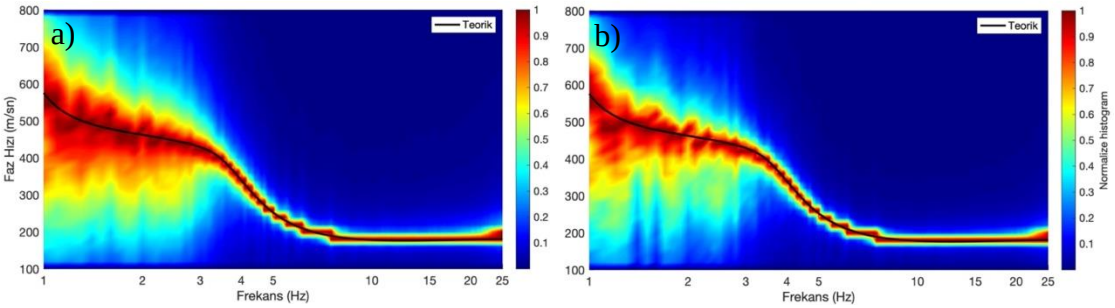


Şekil 5.10 : 1200 kaynaklı (solda) ve 300 kaynaklı (sağda) sentetik veri setlerinin analizi esnasında doğrusallık ve benzeşime göre gerçekleştirilen pencere eleme işlemleri sonrasında kalan pencere sayıları. %50 örtüşmeli toplam pencere sayısı (1199) şekillerde kesikli yatay çizgiler ile gösterilmektedir.

Şekil 5.11'de 300 kaynaklı ASG sentetiği için pencere elemesi yapılmadan, yalnızca doğrusallığa göre, yalnızca benzeşime göre ve hem doğrusallık hem de benzeşime göre pencere elemesi yapılması durumunda hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır. Şekil 5.12'de ise 600 kaynaklı ASG sentetiği için pencere elemesi yapılmadan ve eleme sonrası hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır.



Şekil 5.11 : 300 kaynaklı ASG sentetiği için a) pencere elemesi olmadan, b) yalnızca doğrusallığa, c) yalnızca benzeşime ve d) doğrusallık ve benzeşime göre pencere elemesi ile hesaplanan FHD panelleri. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

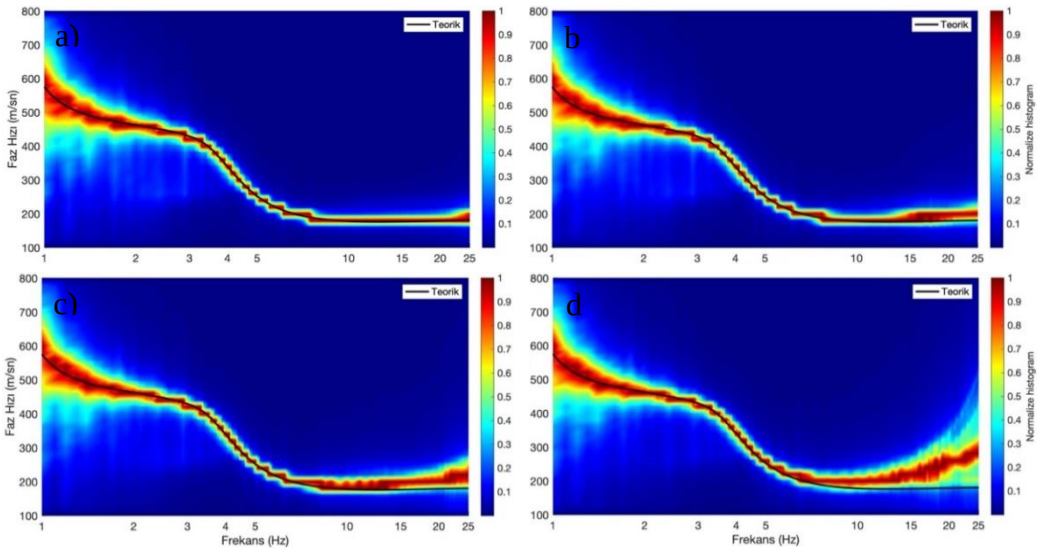


Şekil 5.12 : 600 kaynaklı ASG sentetiği için (a) pencere elemesi olmadan, (b) doğrusallık ve benzeşime göre pencere elemesi ile hesaplanan FHD panelleri. Elemede kullanılan ortalama benzeşim değeri 0.73'tür. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

Doğrusallık ve benzeşime göre yapılan eleme sonucunda, düşük frekans bandında (< 4 Hz) FHD panellerinin çözünürlüğünün arttığı belirlenmiştir (Şekil 5.11d ve Şekil 5.12b). Özellikle kaynak yoğunluğunun daha fazla olduğu 600 kaynaklı ASG sentetiğinden hesaplanan FHD panelinde, pencere eleme sonucunda düşük frekans bandındaki çözünürlük artışı ve iyileşme çok daha belirgindir. Bu nedenle, bu bölümden sonra tez kapsamında yapılan analizlerin tümünde bu pencere eleme prosedürü kullanılmıştır.

5.3.2.3 Alıcı aralığı testleri

Bu bölümde, 300 kaynaklı sentetik veri seti için, $\Delta x=\Delta y$=1m, 2m, 3m ve 5m alıcı aralıkları kullanılarak, AGG yöntemi le FHD panelleri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.13). Paneller incelendiğinde, alıcı aralığının artması ile yüksek frekans bandında faz hızlarının olduğundan yüksek kestirildiği görülmektedir. Bu durum, artan alıcı aralığı ile AGG yönteminin temelini oluşturan uzaysal türev hesabındaki hataların da artması ve FHD bilgisinin yüksek doğruluk ile elde edilememesidir. Kısa dalga boyları yani yüksek frekanslar için uzaysal türev üzerinden FHD bilgisinin düşük hata ile hesaplanabilmesi için alıcı aralığının mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Alıcı aralığının 1 m'den 5 m'ye yükseltilmesi ile FHD bilgisinin teorik eğri ile uyumlu olarak elde edildiği frekans limiti 20-25 Hz'den 5-6 Hz'e kadar düşmektedir (Şekil 5.13a ve d). Testin sonucu olarak, AGG uygulamasında, FHD ters çözümünde en sığ seviyedeki (ilk bir kaç metre ile bir kaç on metre derinlikteki) katmanların S-dalgası hız bilgisini sağlayan yüksek frekans faz hızlarının doğru hesaplanabilmesi için gradiyometrik dizilimdeki alıcı aralıklarının 1-2 m'nin üstünde seçilmemesi gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.13 : 300 kaynaklı sentetik veri seti için (a) 1m, (b) 2m, (c) 3m ve (d) 5m alıcı aralıkları ile hesaplanan FHD panelleri. Pencere boyu 3 sn olarak kullanılmıştır. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

Alıcı aralığının ölçüm yapılacak olan sahayla ilgili jeolojik bilgilere ve dolayısıyla gözlenmesi beklenen faz hızlarına dayalı olarak belirlenmesi faydalı olacaktır. Örneğin; Şekil 5.13'te paylaşılan örnekteki gibi yüksek frekans bandı (> 5 Hz) için oldukça düşük faz hızlarının (< 200 m/sn) beklendiği bir ölçüm sahasında, dalga boylarının da kısa olacağı göz önünde bulundurularak alıcı aralığının 1 m civarında seçilmesi doğru olacaktır.

SDG uygulamasında, uzaysal gradyanların yüksek doğrulukla hesaplanması için dizilimin sismik dalgaların uzaysal türevlerini etkin bir şekilde ölçebileceği teorik dalga boyu aralığı Langston (2007b) çalışmasında tanımlanmıştır. Çalışmaya göre, çok iyi kalibre edilmiş (genlik açısından %1'den daha iyi) alıcılardan oluşan bir gradiyometrik dizilimde kullanılması gereken alıcı aralığı (Δx), ilgilenilen en kısa (λ_{min}) ve en uzun dalga boylarına (λ_{max}) göre $0.123\ \lambda_{min} \geq \Delta x \geq 0.012\ \lambda_{max}$ şeklinde tanımlanmıştır. Poppeliers ve Evans (2015) ise yaptıkları çalışmada, tipik alıcı kalibrasyonuna ve belirsizliğine sahip bir dizilim için maksimum alıcı açıklığının 0.03λ kadar küçük olmasının, hızların %10'dan daha düşük belirsizlikle elde edilmesi açısından uygun olduğunu önermişlerdir.

Tez çalışmasında mühendislik ölçeğinde sığ zemin karakterizasyonu amaçlandığından, FHD bilgisinin belirli bir frekans bandında (~1-25 Hz) belirlenmesi amaçlanmaktadır. Örneğin, AGG için testlerde kullanılan sentetik veri setini ele alacak olursak, 1 Hz'deki teorik temel mod faz hızı 575 m/sn'dir ve buna göre λ_{max} = 575 m olmaktadır.

Langston (2007b) ve Poppeliers ve Evans (2015) çalışmalarında sunulan ilişkilerde, 575 m dalga boyu için sırasıyla 7m ve 17m minimum alıcı aralıklarının kullanılması önerilmektedir. Yöntemin sahada pratik şekilde uygulanmasının önemi de göz önünde bulundurularak, bu tez kapsamında sentetik AGG veri setinin üretilmesinde kullanılan gradiyometrik dizilimdeki en büyük alıcı aralığı 5 m'dir (Şekil 5.4). Bu alıcı aralığının, Langston (2007b)'de verilen ilişkiye uygun olduğu değerlendirilmektedir. Buna karşılık, Şekil 5.13'teki FHD sonuçları incelendiğinde, alıcı aralığını 1m'den 5'ye çıkarmanın düşük frekans bandında (< 2Hz) gözle görülür bir iyileşme ya da çözünürlük artışı sağlamadığı belirlenmiştir. Yine de, maksimum alıcı aralığını daha fazla arttırmanın tez kapsamında ilgilenilen en düşük frekanslarda (~1-2 Hz) hesaplanan FHD bilgisinde bir iyileşme sağlayıp sağlamayacağını görmek için Şekil 5.4'teki gradiyometrik dizilime Δx= 10,15 ve 20m alıcı aralıkları da dahil edilerek sentetik sismogramlar üretilmiş ve AGG ile FHD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu testin sonucunda, alıcı aralıklarının 5m'den 10,15 ve 20m'ye çıkarılmasının AGG ile hesaplanan FHD panelinde düşük frekans bandında (< 2 Hz) herhangi bir değişim ya da iyileşme ile sonuçlanmadığı görülmüştür. Ayrıca, üretilen sentetik veri seti için 1 Hz'in altındaki frekanslarda sinyal genlikleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, düşük frekans bileşenlerinin zayıf olması, FHD bilgisinin elde edilmesini mümkün kılmamaktadır. Bunun yanı sıra, Rayleigh dalgalarının penetrasyon derinliğinin genel anlamda dalga boyunun yarısı ya da üçte biri olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, λ_{max} = 575 m ile halihazırda 192 m - 287 m gibi bir derinlik aralığındaki faz hızları elde edilebilmektedir. Mühendislik ölçeğinde zemin karakterizasyonunun amaçlandığı bu çalışmada ilgilenilen en düşük frekans olan 1 Hz için elde edilen bu penetrasyon derinliğinin halihazırda yeterli olduğu değerlendirilmektedir. Buna karşılık, örneğin derin havza yapısının elde edilmesi amaçlı araştırmalarda, ilgilenilen en düşük frekans ve bu frekansa karşılık gelebilecek λ_{max}'a uygun şekilde, değişken alıcı aralığına sahip ve daha uzun maksimum alıcı açıklığı sağlayan gradiyometrik dizilimlerin tasarlanması önerilebilir.

5.3.2.4 Kaynak gücü dağılımı testleri

Rastgele ve eşit güçte ASG kaynaklarının kullanılması

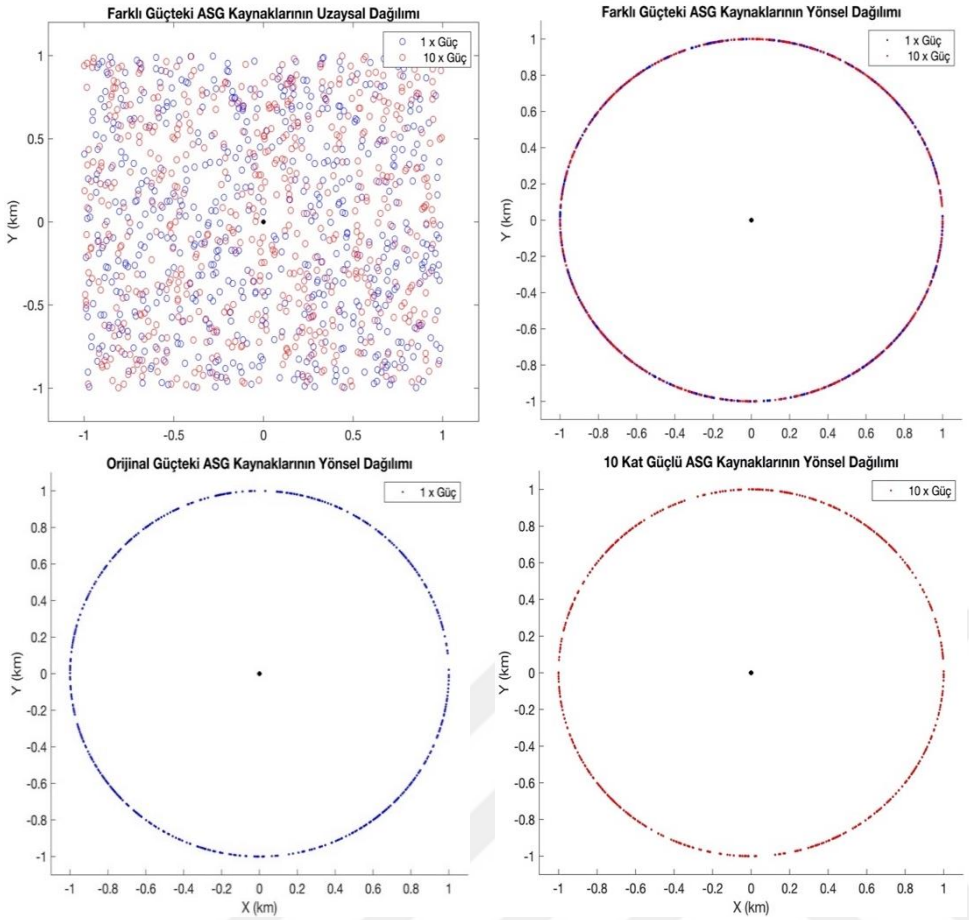
Önceki bölümlerde de kullanılan ASG sentetik veri setleri üzerinden kaynak gücü dağılımı testleri gerçekleştirilmiştir. Burada amaç ASG alanındaki bazı kaynakların

diğerlerine göre belirgin şekilde güçlü olması durumunda AGG'nin FHD belirlemedeki performansının nasıl etkileneceğini görmektir. Bunun için sentetiklerin oluşturulmasında kullanılan ASG kaynaklarından üretilen Green fonksiyon sinyalleri rastgele şekilde iki gruba ayrılarak final sentetik verinin elde edildiği yığma aşamasında bir grup sinyal 10 ile çarpılmış, diğer grubun genlikleri ise oldukları şekliyle korunmuştur.

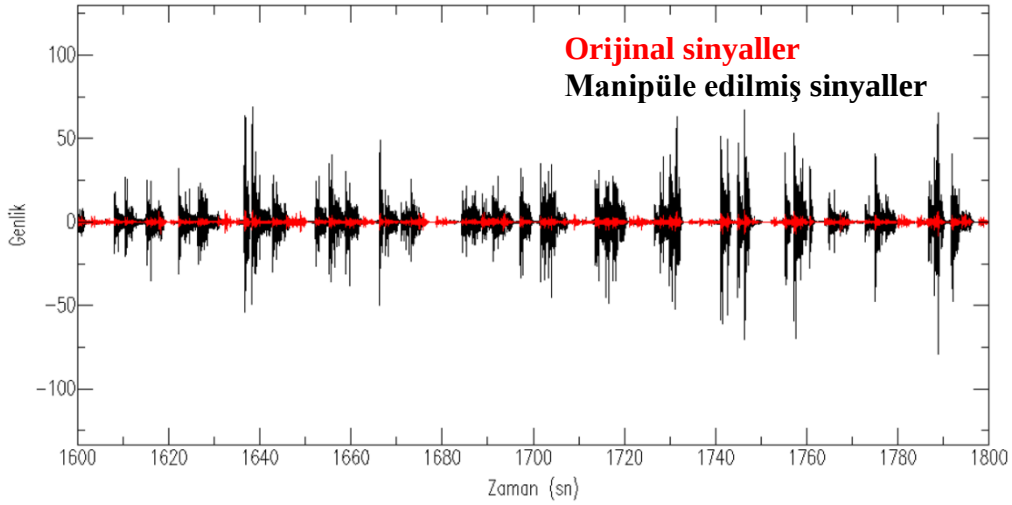
Örneğin; bu testte kullanılan 1200 kaynaklı sentetik için, tamamen farklı yön ve uzaklık özelliklerine sahip, rastgele seçilen 600 kaynağın ürettiği sinyaller orijinal genlikleri ile korunurken, geriye kaşan 600 kaynağın ürettiği sinyallerin genlikleri 10 kat artırılmıştır. Böylelikle, ASG alanındaki kaynakların güç dağılımı uzaysal anlamda gelişigüzel manipüle edilmiştir. Sonrasında ASG kaynak gücü tamamen orijinal halinde korunan (uzaysal olarak rastgele ve dengeli kaynak gücü) ve kaynak dağılımı manipüle edilen sentetik veri setlerinden AGG ile hesaplanan FHD panelleri karşılaştırılmıştır.

1200 kaynaklı sentetik veri setleri için ASG kaynak gücü orijinal haliyle, uzaysal olarak rastgele ve dengeli şekilde korunan ve kaynak dağılımı manipüle edilen ASG kaynak dağılımları Şekil 5.14'te verilmektedir.

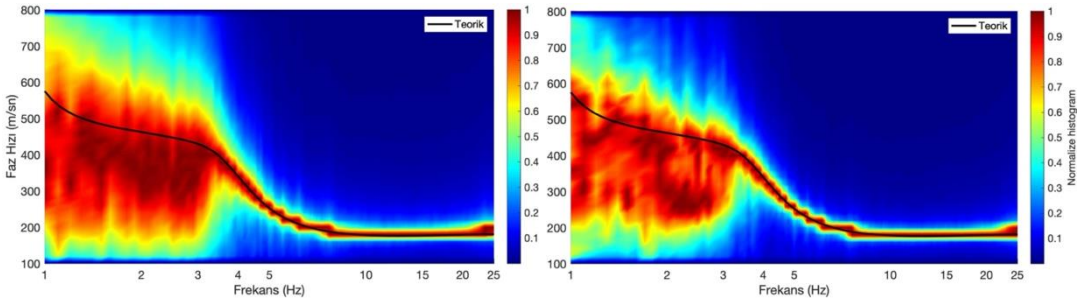
Orijinal genlikleri korunmuş ve genlikleri manipüle edilmiş veri setleri için 1 nolu alıcıdaki sinyallerin karşılaştırması ve bu veri setlerinden AGG ile hesaplanan FHD panelleri ise sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da paylaşılmaktadır. ASG kaynaklarının güç dağılımının bu şekilde manipüle edilmesi ve rastgele seçilen bir grup 600 kaynağın geriye kalan 600 kaynağa göre 10 kat daha güçlü (yüksek genlikli) sinyal üretmesinin AGG ile hesaplanan FHD bilgisi üzerinde olumlu ya da olumsuz belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.14 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için, kaynak güç dağılımı manipüle edilen ASG kaynak dağılımları. Mavi daireler genliği orijinal haliyle korunan, kırmızı daireler ise genliği 10 ile çarpılan ASG kaynaklarını gösterir. Orijinal kaynak dağılımı için bkz. Şekil 4.29(e) ve (f).



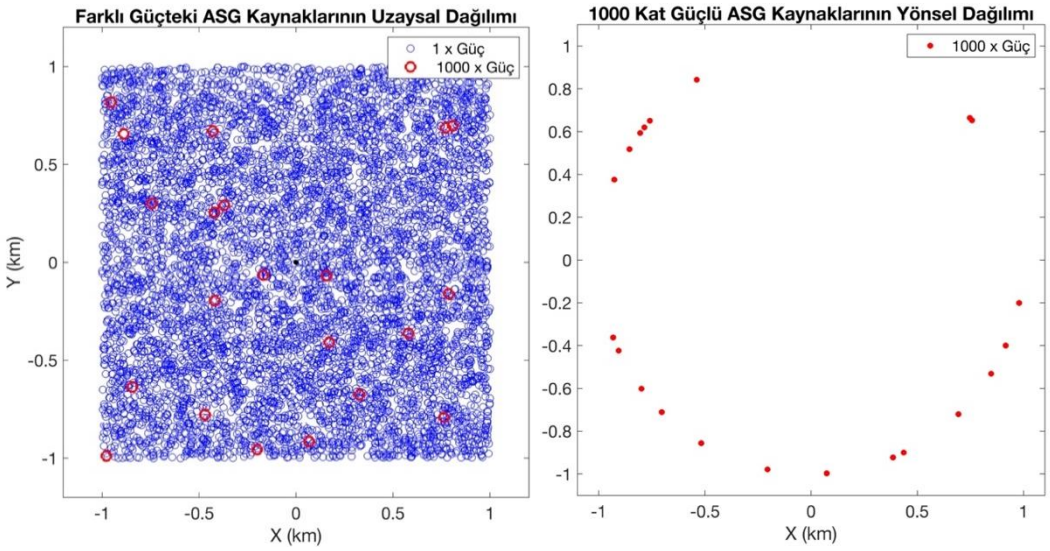
Şekil 5.15 : 1200 kaynaklı ASG sentetiği için 1 nolu alıcıya ait, kaynak güçleri manipüle edilen (siyah) ve orijinal haliyle korunan (kırmızı) 200 sn uzunluğundaki sinyaller.



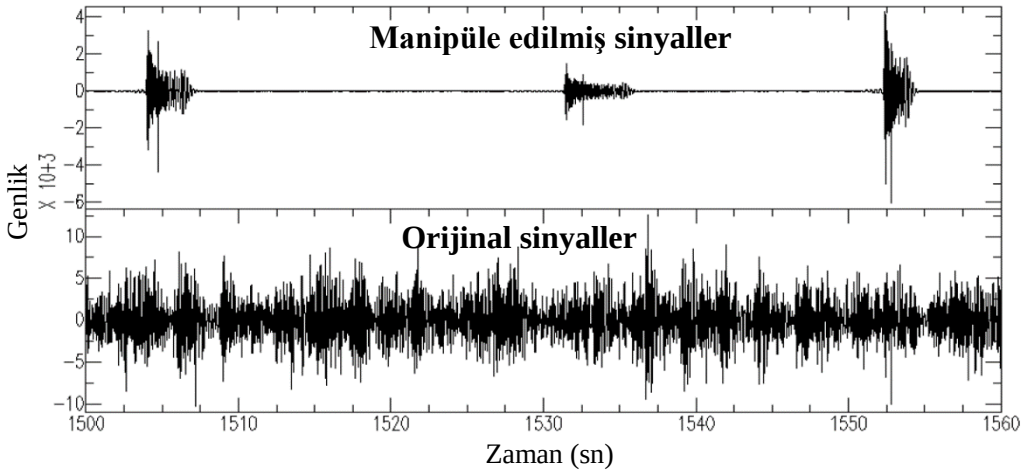
Şekil 5.16 : Kaynak gücü üretildiği şekilde korunan (rastgele dağılmış kaynak gücü) (solda) ve kaynak gücü dağılımı manipüle edilen (sağda) 1200 kaynaklı sentetik veri setleri için AGG ile hesaplanan FHD panelleri. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

Zamanda iyi ayrımlı, az sayıda güçlü ASG kaynaklarının kullanılması

Önceki bölümlerde kullanılan yer modeli ve alıcı geometrisi aynı şekilde korunarak, toplam 7200 ASG kaynağı ile üretilen sentetik veri setleri üzerinden kaynak gücü dağılım testleri gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, ASG alanındaki zamanda örtüşmeyen az sayıda kaynağın diğer kaynaklara oranla göre çok güçlü olması durumunda AGG'nin FHD belirlemedeki performansının nasıl etkileneceğini görmektir. Bunun için, sentetiklerin oluşturulmasında kullanılan farklı ASG kaynakları için üretilen ve zamanda birbirleriyle örtüşmeyen Green fonksiyon sinyallerinden 21 adedi yığma aşamasında 1000 ile çarpılmış, geriye kalan Green fonksiyon sinyallerinin (7179 adet) genlikleri ise oldukları şekliyle korunmuştur. Böylelikle, ASG alanındaki kaynakların güç dağılımı az sayıda kaynağın güçleri diğerlerine göre çok daha yüksek olacak şekilde değiştirilmiştir (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18). Sonrasında ASG kaynak gücü üretildiği şekilde korunan (rastgele dağılmış kaynak gücü) ve kaynak dağılımı manipüle edilen sentetik veri setlerinden AGG ile hesaplanan FHD panelleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.17 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için kaynak güç dağılımı manipüle edilen ASG kaynak dağılımları. Mavi renkli daireler daireler gücü olduğu gibi korunan, kırmızı renkli daireler ise gücü 1000 kat artırılan ASG kaynaklarını gösterir. Orijinal kaynak dağılımı için bkz. Şekil 4.29(g) ve (h).

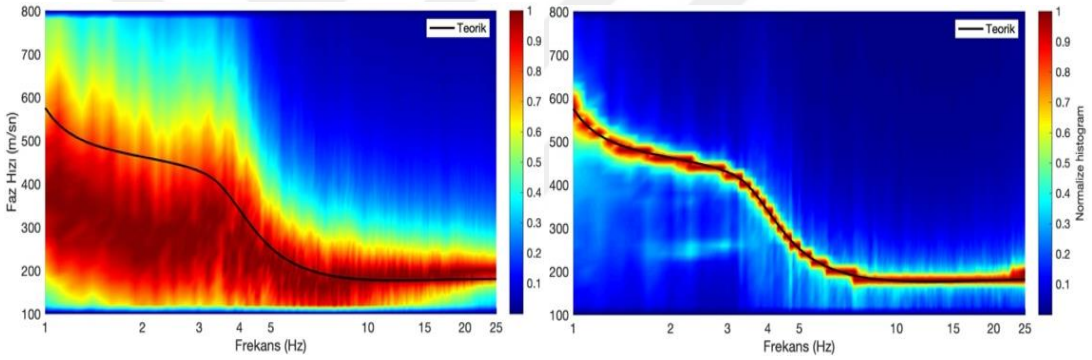


Şekil 5.18 : 7200 kaynaklı ASG sentetiği için 1 nolu alıcıya ait, kaynak güçleri manipüle edilen (üstte) ve orijinal haliyle korunan (altta) 60 sn uzunluğundaki sinyaller. Manipüle edilen sinyaller zamanda yeterli ayrımlılığa sahiptir ve genlikleri 1000 kat daha yüksektir. Orijinal sinyallerin görünebilir olması için her sinyal kendi genlik skalasında çizdirilmiştir.

ASG kaynaklarının güç dağılımının manipüle edilerek az sayıda (21) kaynağın diğerlerine göre 1000 kat daha güçlü (yüksek genlikli) sinyal üretmesinin AGG ile hesaplanan FHD panelini büyük oranda iyileştirdiği ve bu kaynak dağılımı koşulları altında faz hızlarının doğru şekilde elde edilebildiği görülmüştür. Yöntemin doğası gereği bunun beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir çünkü AGG yöntemi ASG dalga alanında birbirinden yeterince ayrımlanmış zaman pencerelerinde gelen güçlü kaynak sinyallerinin olması durumunda bu sinyallerin yönü ve hızını doğru saptayabilecek bir

yöntemdir. Buna karşılık, orijinal kaynak dağılımında olduğu gibi, tüm kaynakların birbirine yakın güç seviyesinde ve hem uzaysal hem de zamansal olarak çok yoğun dağılım gösterdiği tekdüze bir ASG alanı söz konusu olduğunda AGG analizi ile sinyallerin yön ve hızları doğru belirlenememektedir. Şekilden de görülebileceği gibi bu durumda, düşük frekans bandında (< 5 Hz) elde edilen faz hızları teorik eğri ile örtüşmemektedir (Şekil 5.19).

Bu testin sonucu olarak, ASG dalga alanında güçlü kaynakların olması durumunda, bu kaynakların uzaysal dağılımı ve sayısından bağımsız olarak, AGG analizi ile FHD bilgisinin oldukça başarılı bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir. Gerçek gradiyometrik dizilim ölçümleri açısından düşünüldüğünde, ilgili sahada otoyol, demiryolu, endüstriyel faaliyetler ve diğer kentsel faaliyetler gibi kaynakların bulunması ve bu kaynakların güçlü sinyaller üretmesi durumunda yöntemin doğru çalışacağı düşünülmektedir.



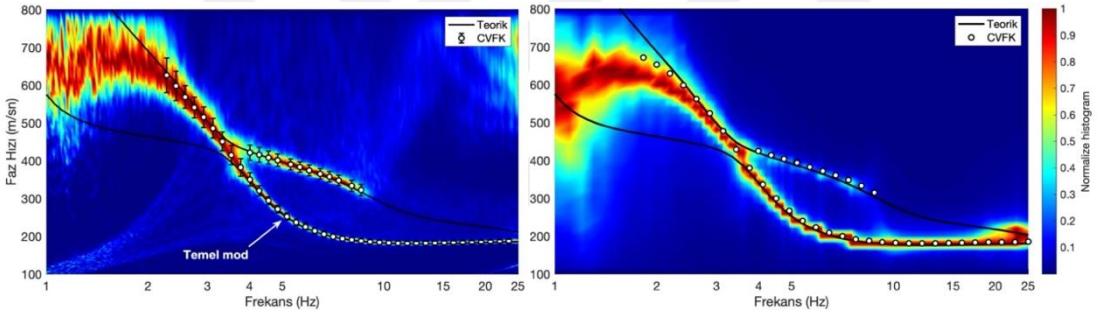
Şekil 5.19 : 7200 ASG kaynağı için kaynak gücü orijinal haliyle korunan (uzaysal olarak rastgele ve dengeli kaynak gücü) (solda) ve kaynak gücü dağılımı manipüle edilen (sağda) sentetik veri setlerinden AGG ile hesaplanan FHD panelleri. Detaylı açıklamalar için bkz. Şekil 5.7.

Bu sonuçlara dayanarak, AGG'nin FHD bilgisi elde etme başarısını artırmak için kullanılabilecek alternatif bir yöntemin, ilgilenilen frekans bandında sinyal üretebilen yapay bir kaynağın (örneğin, ağırlık düşürme) saha ölçümlerinde kullanılması olduğu değerlendirilmektedir.

5.3.2.5 İki modlu sentetik testi

ASG dalga alanında birden çok sayıda modun bulunması durumunda AGG yönteminin bu modların FHD bilgisini elde etme konusundaki performansının değerlendirilmesi için Bölüm 5.3.1'de verilen aynı parametreler ile 300 kaynaklı ve iki modlu ASG sentetiği üretilmiştir. Şekil 5.20'de bu sentetik veri setinin AGG yöntemi kullanılarak

analiz edilmesi ile elde edilen FHD paneli CVFK sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Paneller incelendiğinde, AGG yönteminin CVFK ile oldukça yakın FHD sonuçları verdiği gözlenmektedir. AGG yöntemi 3 Hz ve üzerindeki frekanslar için teorik temel mod faz hızlarını CVFK'den daha iyi kestirmektedir. Ayrıca, 4-8 Hz frekans bandındaki 1. yüksek mod faz hızları da histogramda yüksek sayılar ile temsil edilmemekle birlikte teorik faz hızı eğrisi ile uyum oldukça iyidir. Yaklaşık 3.5 Hz ve daha düşük frekanslarda, AGG yöntemi ile hesaplanan FHD branşı yine CVFK sonuçlarına benzer şekilde, teorik 1. yüksek mod faz hızlarını yaklaşık olarak takip etmektedir. Bununla birlikte, AGG ile bu frekans bandında hesaplanan faz hızları CVFK'den biraz daha düşük kestirilmekte ve iki yöntem ile hesaplanan faz hızları arasındaki farklar düşük frekansa doğru gidildikçe artmaktadır. Örneğin; teorik 1. yüksek mod faz hızı yaklaşık 670 m/sn olan 2 Hz frekansında, CVFK panelinden elde edilen faz hızı 640 m/sn iken, AGG panelinde ise bu değer 600 m/sn'dir.



Şekil 5.20 : İki modlu sentetik veri seti için CVFK (solda) AGG (sağda) yöntemleri kullanılarak hesaplanan FHD panelleri. Temel mod ve 1. yüksek mod için teorik faz hızları siyah eğriler ile, CVFK'den hesaplanan faz hızları siyah çerçeveli beyaz daireler ile gösterilmektedir.

5.3.3 AKG için veri-işlem aşamalarının ve yöntem sınırlarının belirlenmesi

5.3.3.1 Uzaysal türev alma yöntemi testi

AKG yönteminin temeli, sismik alıcılarda kaydedilen yer değiştirme sinyalinin kendisi (u) ile, uzaysal ve zamansal türevlerinin (u_x ve u_t) elde edilmesi ve faz hızlarının bu türevler üzerinden hesaplanması esasına dayanmaktadır. Yer değiştirme sinyalinin zamana bağlı türevinin doğru şekilde hesaplanabilmesi için verinin zaman örneklemesinin, ilgilenilen frekans bandıyla da ilişkili şekilde, yüksek seçilmesi yeterlidir. Bununla birlikte, uzaysal türevin yüksek doğrulukla hesaplanabilmesi için en düşük hatalara sahip uzaysal türev alma yönteminin uygulanması gerekmektedir.

AKG yöntemi ile FHD elde edilmesinde, en doğru sonuçları veren uzaysal türev alma yönteminin belirlenmesi için, yer değiştirme sinyalinin uzaysal türevi farklı sayısal türev hesaplama yöntemleriyle hesaplanmıştır. Bu amaçla, "İleri Fark (İF)", "Merkezi Fark (MF)" ve "Beş Nokta Kuralı (BN)" sayısal türev alma formülleri kullanılmıştır (Burden ve diğ., 2015).

Eşit aralıklı *x* noktalarında örneklenmiş olan $f(x)$ fonksiyonunun x_0 noktasındaki türevi olan $f'(x_0)$ değerini yaklaşık olarak elde etmek için bir çok matematiksel türev ifadesi geliştirilmiştir. $f(x)$ fonksiyonunun örnekleme aralığı Δx ve $\Delta x \neq 0$ olsun. Bu durumda $f(x)$ fonksiyonunun noktasındaki türevi $f'(x_0)$;

İF ile;

$$f'(x_0) \approx \frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0)}{\Delta x} \tag{5.51}$$

MF ile;

$$f'(x_0) \approx \frac{1}{2\Delta x}[f(x_0+\Delta x)-f(x_0-\Delta x)] \tag{5.52}$$

BN ile;

$$f'(x_0) \approx \frac{1}{12\Delta x}[f(x_0-2\Delta x)-8f(x_0-\Delta x)+8f(x_0+\Delta x)-f(x_0+2\Delta x)] \tag{5.53}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Bir düzlem dalganın uzaysal türevinin hesaplanmasında, uzaysal örnekleme aralığından kaynaklanan hata değeri Langston (2007a)'da sunulmuştur. *n* adet alıcıdan oluşan, Δx örnekleme aralığına sahip doğrusal alıcı dizilimi için yer değiştirmenin uzaysal türevinin MF ile hesaplanması durumunda, sayısal türevden kaynaklanacak olan hata teriminden yola çıkılarak çözülebilecek en küçük dalga boyu, λ elde edilmiştir.

MF'nin hata terimi Denklem 5.53'te en sağdaki terimdir (Langston, 2007a).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(t,x+\Delta x)-u(t,x-\Delta x)}{2\Delta x} - \frac{1}{6}\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\Delta x^2 \tag{5.53}$$

$u(t,x) = e^{i\omega(t-px)}$ gibi bir düzlem dalga için uzaysal örnekleme aralığından kaynaklanacak türev hatasının belirlenmesi için bu hatanın, Denklem 5.54'te tanımlandığı şekilde, δ gibi bir eşik değerden düşük olması gerekmektedir.

$$\left|\frac{-\frac{1}{6}\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\Delta x^2}{\frac{\partial u}{\partial x}}\right| = \frac{1}{6}\omega^2 p^2 \Delta x^2 \leq \delta \tag{5.54}$$

Denklem 5.55'te ise dalga boyu (λ), yatay dalga sayışı (*k*), yatay dalga yavaşlığı (*p*) ve açısal frekans (ω) arasındaki ilişki tanımlanmaktadır.

$$k = \omega p = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{5.55}$$

Dolayısıyla, Eşitlik 5.54'teki ilişkiye göre, $\delta = 0.1$ (%10 hata) için kullanılması gereken örnekleme aralığı Denklem 3.8 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta x \leq \lambda \frac{\sqrt{1.5\delta}}{\pi} = 0.123\lambda \tag{5.56}$$

Bu durumda, MF kullanılması durumunda türevin %10 hata ile hesaplanabilmesi için alıcı aralığının dalga boyunun %12'sine eşit ya da daha küçük olması gerektiği belirlenmektedir. Bununla birlikte, BN ile hesaplanacak bir uzaysal türev dördüncü dereceden doğruluğa sahip olacaktır ve BN ile türev hesaplama hatası Denklem 5.57'de en sağdaki terim ile ifade edilmektedir (Burden ve diğ., 2015).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{-u(t, x+2\Delta x) + 8u(t, x+\Delta x) - 8u(t, x-\Delta x) + u(t, x-2\Delta x)}{12\Delta x} - \frac{1}{30}\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\Delta x^4 \tag{5.57}$$

Dolayısıyla, uzaysal türev hesabındaki hatanın δ eşik değerinden düşük olması için 5.58 nolu denklem kullanılabilir.

$$\left|\frac{-\frac{1}{30}\frac{\partial^5 u}{\partial x^5}\Delta x^4}{\frac{\partial u}{\partial x}}\right| = \frac{1}{30}\omega^4 p^4 \Delta x^4 \leq \delta \tag{5.58}$$

$\delta = 0.1$ için kullanılması gereken alıcı aralığı ise Denklem 5.59 ile tanımlanır.

$$\Delta x \leq 0.210\ \lambda \text{ (BN)} \tag{5.59}$$

Uzaysal türevlerin hata terimlerine bağlı olarak, türevin en fazla %10 hata ile hesaplanabilmesi için, ilgilenilen en kısa dalga boyuna bağlı olarak İF, MF ve BN ile

kullanılması gereken sınır alıcı aralığı değerleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\Delta x \leq 0.032\ \lambda \text{ (İF)} \tag{5.60}$$

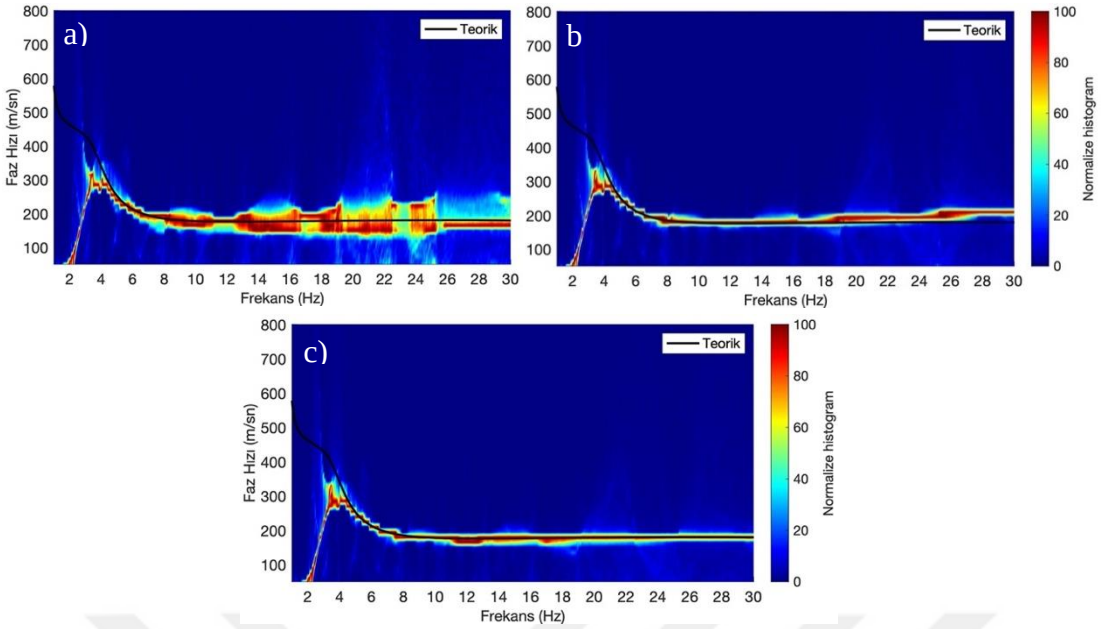
$$\Delta x \leq 0.123\ \lambda \text{ (MF)} \tag{5.61}$$

$$\Delta x \leq 0.210\ \lambda \text{ (BN)} \tag{5.62}$$

Buna göre; BN ile FHD analizinde ilgilenilen en kısa dalga boyunun yaklaşık 5'te 1'ine karşılık gelen bir alıcı aralığının kullanılması yeterli olmaktadır.

Buna karşılık, MF için en kısa dalga boyu/en küçük alıcı aralığı oranı 8'de 1'e, İF için ise 30'da 1'e çıkmaktadır. Dolayısıyla, BN'nin artan alıcı aralıklarına karşın, yüksek frekans bandındaki uzaysal türevin diğer uzaysal türev alma yöntemlerine kıyasla daha düşük hata ile hesaplanmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

SK04 hız modeli için tek modlu, Q etkisi eklenmemiş sentetik atış verisi üretilmiş ve AKG yöntemi ile, yukarıda açıklanan uzaysal türev alma formülasyonları kullanılarak FHD panelleri hesaplanmıştır (Şekil 5.21). Hesaplamalarda kullanılan alıcı aralığı Δx = 1m, kaynaktan olan ofset ise 30 m'dir. BN ile hesaplanan paneldeki temel mod faz hızı branşı geniş bir frekans bandında (4-30 Hz) teorik eğriyle uyumludur ve FHD paneli oldukça yüksek çözünürlüklüdür (Şekil 5.21c). FHD panellerinde ilgilenilen en düşük faz hızı 180 m/sn ve buna karşılık gelen en yüksek frekans 30 Hz için elde edilecek olan en kısa dalga boyu 6 m'dir. Denklem 5.62 ile değerlendirildiğinde, BN ile bu dalga boyu için kullanılması gereken alıcı aralığının en fazla 1.26 m olması gerektiği görülmektedir. Dolayısıyla, yapılan testte kullanılan alıcı aralığı olan 1 m bu limit değerden düşük kalmakta ve BN ile elde edilen FHD panelinde yüksek frekans bandında da faz hızları yüksek doğrulukla elde edilebilmektedir.



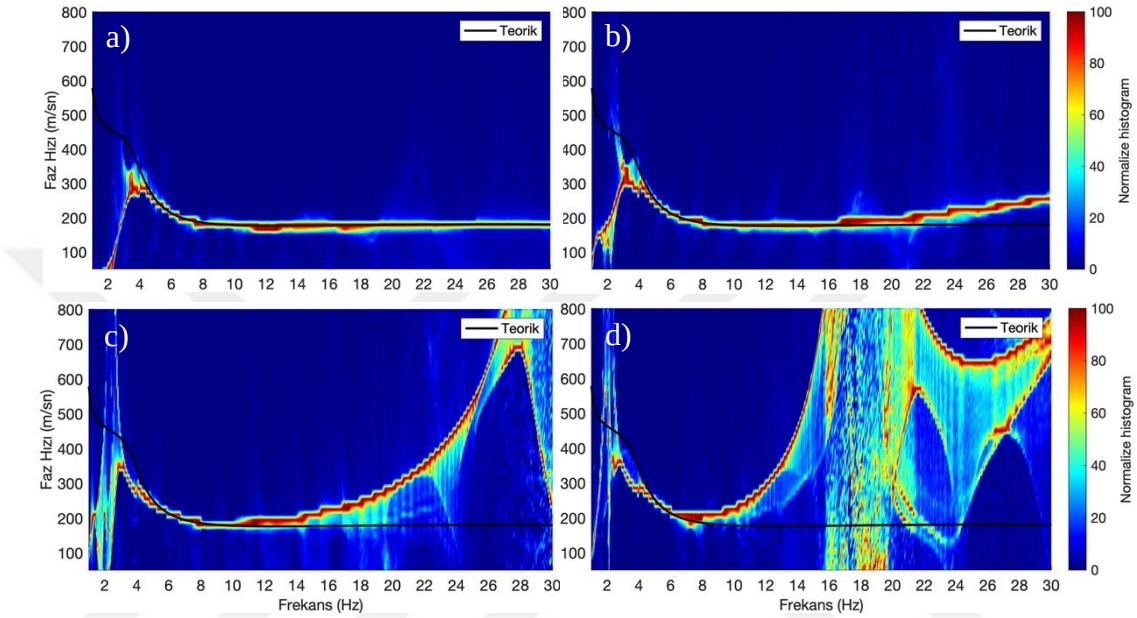
Şekil 5.21 : AKG yöntemi ile, hesaplanan tek modlu sentetik atış verisinden, 30 m ofsetindeki Δx=1m aralıklı alıcı grupları kullanılarak İF (a), MF (b) ve (c) BN ile hesaplanan FHD panelleri. Sentetik hesaplamalarında kullanılan modele Q eklenmemiştir. Teorik temel mod FHD branşı siyah eğri ile gösterilmektedir.

Buna karşılık, MF kullanılarak hesaplanan FHD panelindeki faz hızları ~18 Hz'den itibaren olduğundan yüksek kestirilmeye başlamakta ve frekans yükseldikçe teorik ve hesaplanan faz hızları arasındaki fark artmaktadır (Şekil 5.21b). FHD panelinde 18 Hz frekansındaki yaklaşık dalga boyunun 10 m olduğu görülmektedir. MF için verilen Denklem 5.61 üzerinden değerlendirme yapıldığında, 10 m ve daha kısa dalga boylarındaki faz hızlarının yüksek doğrulukla elde edilebilmesi için alıcı aralığının 1 m'nin altında olması gerektiği belirlenmektedir. İF için verilen Denklem 5.60 göz önünde bulundurulduğunda, bu yöntem ile uzaysal türev alınarak FHD bilgisinin elde edilmesi durumunda ilgilenilen en kısa dalga boyundaki faz hızlarının yeterli doğrulukta belirlenmesi için alıcı aralıklarını çok daha kısa seçilmesi gerektiği görülür. Bu nedenle 1m alıcı aralığı ile İF kullanılarak hesaplanan faz hızları çok daha düşük frekansta (< 10-12 Hz) teorik eğriden uzaklaşmaktadır ve faz hızı branşının çözünürlüğü de oldukça düşüktür (Şekil 5.21a).

Yapılan testin sonucunda, uzaysal türev alma yöntemlerinin içerisinde teorik eğriye en yakın, yüksek frekans bandında en düşük hataya sahip ve dolayısıyla en doğru sonucu veren yöntemin BN olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, tez kapsamında AKG yöntemi ile yapılan tüm FHD hesaplamalarında uzaysal türevler BN kullanılarak elde edilmiştir.

5.3.3.2 Alıcı aralığı testi

AKG yönteminin temelini oluşturan uzaysal türev hesaplamasının, özellikle yüksek frekans bandında, en düşük hata ile yapılabilmesi için gradiyometrik dizilimdeki alıcı aralığının mümkün olduğunca kısa olması gerekmektedir. AKG yönteminin faz hızı belirleme performansını nasıl etkilediğini görmek için farklı alıcı aralıkları (Δx=1m, 2m, 3m ve 5 m) kullanılarak FHD panelleri hesaplanmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 : AKG yöntemi ile tek modlu sentetik atış verisi için, 30 m ofsetinde (a) Δx=1m, (b) Δx=2m, (c) Δx=3m ve (d) Δx=4m aralıklı alıcı grupları kullanılarak hesaplanan FHD panelleri. Sentetik hesaplamalarında kullanılan hız modeline Q eklenmemiştir. Teorik temel mod FHD branşı siyah eğri ile gösterilmektedir.

Önceki bölümde de paylaşıldığı gibi, alıcı aralığının Δx=1m olarak kullanılması durumunda ilgilenilen frekans bandında faz hızları teorik eğri ile uyumlu şekilde elde edilebilmektedir (Şekil 5.22a). Alıcı aralığının Δx= 2m'ye çıkarılması ile, FHD branşı 16 Hz'den itibaren olduğundan yüksek kestirilmekte ve artan frekans ile hesaplanan ve teorik faz hızları arasındaki farklar yükselmektedir (Şekil 5.22b). Bunun sebebi, ilgili frekanstaki faz hızının ~176 m/sn ve karşılık gelen dalga boyunun ise 11 m olmasıdır. Dolayısıyla, 16 Hz'den daha yüksek frekanslarda FHD bilgisinin doğru şekilde hesaplanabilmesi için alıcı aralığının 2.3m'den daha kısa olması gerekmektedir.

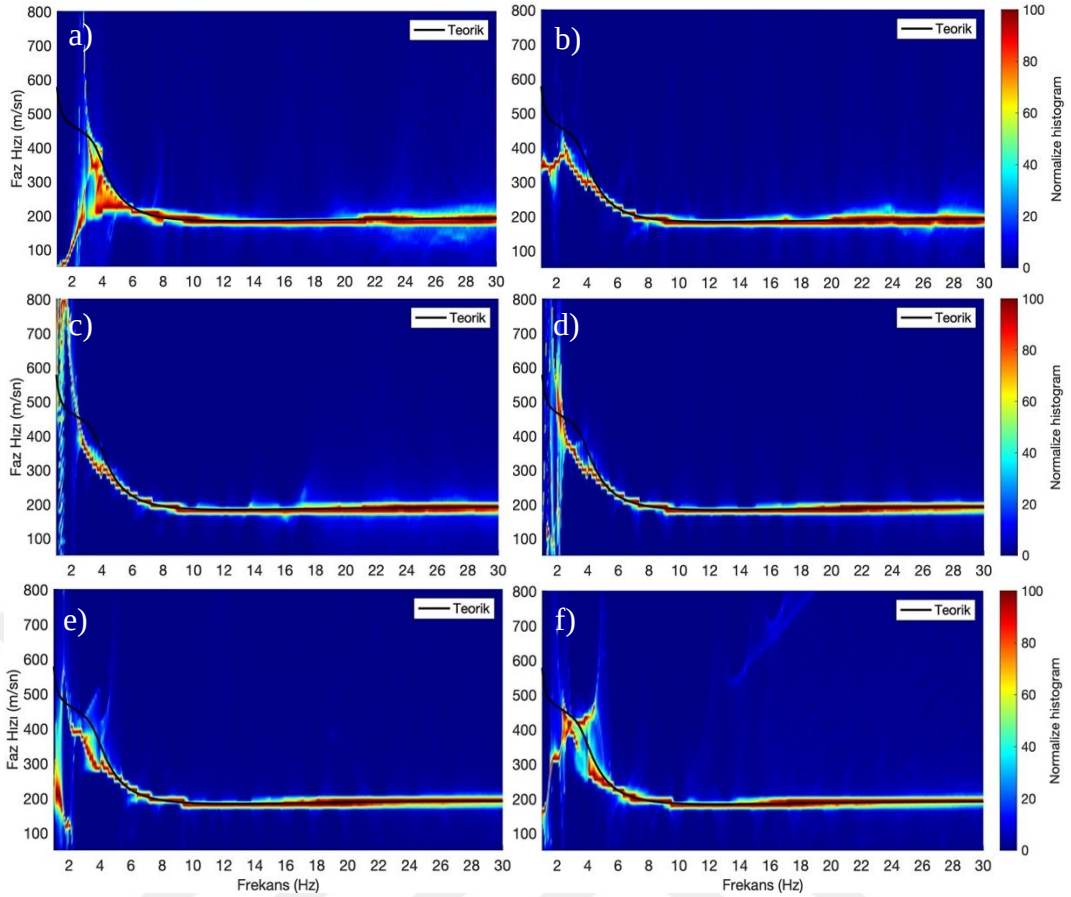
Alıcı aralığı Δx=3m olarak alındığında, yüksek frekans tarafında faz hızlarının doğru kestirilebildiği sınır frekans değeri 10 Hz'e kadar düşmektedir (Şekil 5.22c). 10 Hz frekansındaki faz hızı 178 m/sn ve buradan elde edilen dalga boyu ise ~18 m'dir. Bu

dalga boyuna göre; daha yüksek frekans bandındaki (> 10 Hz) faz hızlarının doğru belirlenebilmesi için alıcı aralığının 3.7 m ve altında seçilmesi gerekir. Dolayısıyla, FHD panelinde 3m alıcı aralığı için faz hızlarının doğru kestirilebildiği en yüksek frekans değeri ~10 Hz'dir. Δx=5m alıcı aralığı yüksek frekans bandında (> 5-6 Hz) FHD bilgisinin olduğundan yüksek kestirilmesine neden olmaktadır. Buna göre; 10 Hz'de %25 oranında, 13 Hz'de ise %100 oranının üstünde yüksek kestirmeler gözlenmektedir (Şekil 5.22d).

Özet olarak, Δx=1m alıcı aralığı ile, ilgilenilen tüm frekans bandı için doğru faz hızları belirlenirken, Δx=2m, 3m ve 5m alıcı aralıkları kullanılarak hesaplanan FHD panellerinde, faz hızlarının doğru elde edilebildiği sınır frekans değeri sırasıyla 16Hz, 10 Hz ve 6 Hz olmaktadır. Bu sonuç, 2m ve üstündeki alıcı aralıklarının yüksek frekans bandında uzaysal çözünürlüğü sağlamak için yeterince kısa olmaması ile ilgilidir. Sonuç olarak, Δx=1m alıcı aralığının ilgilenilen frekans bandı olan 4-30 Hz aralığında, FHD bilgisinin doğru hesaplanması için gerekli ve yeterli olduğuna karar verilmiştir. 4 Hz'den düşük frekans bandında AKG ile doğru FHD bilgisi elde edilememesinin nedeninin ise üretilen sentetik atış verisindeki genliklerin 4 Hz'den 2 Hz'e doğru 100 kata varan bir azalış göstermesi, dolayısıyla düşük frekans bandındaki (< 4 Hz) sinyal gücünün görece çok zayıf kalması olduğu değerlendirilmektedir (Şekil 5.6). İlerleyen bölümlerde sunulacak olan sonuçlardan da görülebileceği gibi, MASW ile hesaplanan FHD panellerinde de ilgili düşük frekans bandında teorik eğri ile uyumlu hızlar elde edilememektedir (Şekil 5.29) .

5.3.3.3 Ofset testi

AKG yöntemi ile FHD belirleme performansının nasıl etkileneceğini görmek için kaynak-alıcı grubu ofseti testleri gerçekleştirilmiştir. Ofset testlerinde, artan ofset ile sönümlenmenin de dahil edilebilmesi için Q etkisi eklenmiş sentetik atış verisi kullanılmıştır. Δx=1m alıcı aralığı ile farklı kaynak-alıcı grubu ofsetleri için hesaplanan FHD panelleri Şekil 5.23'te sunulmaktadır.



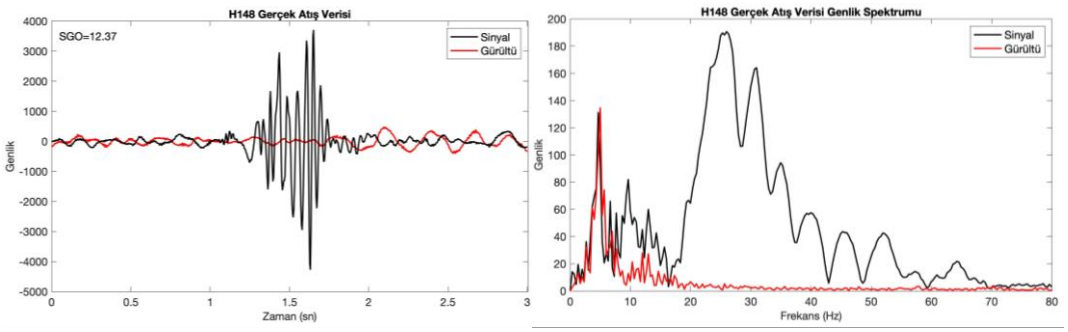
Şekil 5.23 : AKG yöntemi ile tek modlu sentetik atış verisi için, (a)10m, (b) 30m (c) 50m, (d) 70m, (e) 90m ve (f) 110m kaynak-alıcı grubu ofseti için hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m 'dir. Sentetik hesaplamalarında kullanılan modele Q eklenmiştir. Teorik temel mod FHD branşı siyah eğri ile gösterilmektedir.

Ofset testinde gözlenen önemli sonuçlardan biri kaynağa çok yakın ofsetlerde (10 m), özellikle düşük frekans bandında (< 10Hz) hesaplanan FHD panelinin çözünürlüğünün azalması ve 6 Hz'den düşük frekanslar için elde edilen faz hızlarının teorik eğriden uzaklaşmasıdır (Şekil 5.23a). Bu durum, kaynağa çok yakın alanda, uzun dalga boylarına sahip düşük frekanslı dalgaların, bir dalga boyu seyahat mesafelerinin olmaması, dolayısıyla uzun dalga boylarında düzenli bir dalga formasyonunun oluşmasının mümkün olmaması şeklinde yorumlanmaktadır. Bununla birlikte, 30 m ofsetine çıkıldığında, düşük frekanstaki çözünürlüğün yanı sıra teorik ve hesaplanan faz hızları da daha uyumlu hale gelmektedir (Şekil 5.23b). 50m-90m ofsetlerindeki panellerden 4-30 Hz frekans bandında elde edilen FHD bilgisi neredeyse bire bir aynıdır (Şekil 5.23 c,d ve e). Bununla birlikte, 110 m gibi oldukça uzun bir ofsette düşük frekans bandında (< 8 Hz) FHD panelinin çözünürlüğünün bir miktar düştüğü ve faz hızlarının özellikle 6 Hz'in altında teorik eğriden uzaklaşma eğiliminde olduğu görülmektedir (Şekil 5.23f). Elde edilen sonuçlara göre; AKG ile FHD analizinde, 30m

ile 70 m aralığındaki kaynak-alıcı grubu ofsetleri için geniş bir frekans bandında (4-30 Hz) faz hızlarının yüksek doğrulukla belirlenebildiği sonucuna varılmıştır.

5.3.3.4 SGO testleri

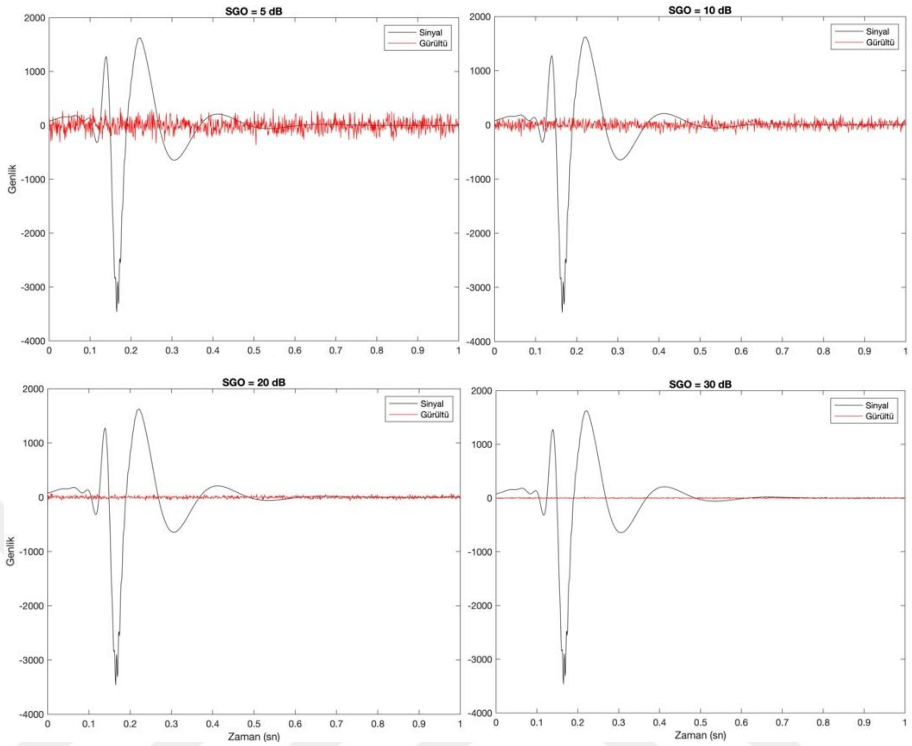
AKG yöntemi ile FHD bilgisinin doğru elde edilebilmesi için alıcı grubunu oluşturan alıcılar arasındaki uzaysal türevin en yüksek doğrulukla hesaplanması gerekir. Verideki SGO'nun düşmesinin ise uzaysal türev hesaplamasındaki hataları artırarak FHD analizini olumsuz etkilemesi beklenmektedir. Çalışmanın bu bölümünde üretilen tek modlu, Q etkisi eklenmiş sentetik veriye belirli oranda gürültü eklenerek elde edilen gürültülü atış verilerinin AKG ile analiz edilmesi ve FHD sonuçlarının MASW yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, öncelikle gerçek bir saha çalışmasında toplanan örnek atış verisinin SGO'su incelenmiştir. Bunun için, şehir ortamından görece uzak ve izole bir saha olan H148 noktasının verileri kullanılmıştır. Şekil 5.24'te H148 noktasında toplanan gerçek atış veri setinde, merkez atışından 30 m uzaklıktaki bir alıcıda kaydedilen sinyaller ve bu sinyallerin genlik spektrumu sunulmaktadır. Aktif atış sinyali olarak kaydın ilk 3 sn'lik, ortam gürültüsü olarak ise hemen ardından gelen, aktif sinyallerin yer almadığı 3 sn'lik bölümü kullanılmıştır. Elde edilen SGO ise yaklaşık 12 dB'dir.



Şekil 5.24 : H148 ölçüm noktasında merkez atışından 30 m uzaklıktaki bir alıcıda kaydedilen aktif atış sinyalleri (siyah) ve artalan sismik gürültüyü (kırmızı) içeren kayıtlar (solda) ve bu kayıtların genlik spektrumları (sağda).

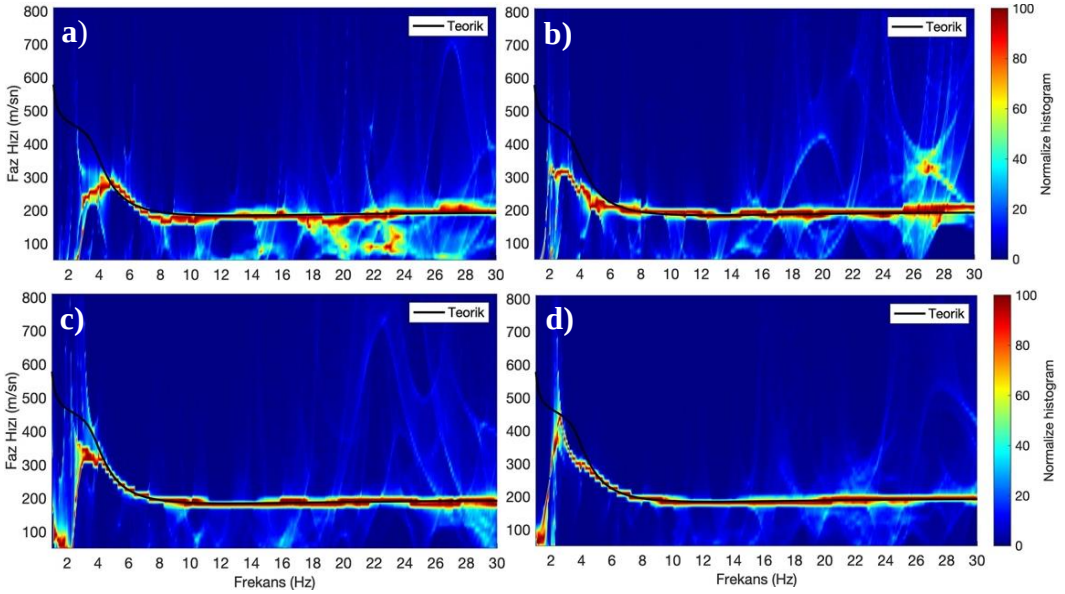
Şekil 5.25'te SGO=5, 10, 20 ve 30 dB beyaz gürültü eklenmiş sentetik atış veri setleri paylaşılmaktadır. Gerçek veri setinin 12 dB olarak elde edilen SGO'sundan yola çıkarak öncelikle sentetik veri setine bu değerin üstünde ve altında SGO düzeylerinde (SGO=5, 10, 20, 30 dB) Beyaz Gaussian gürültü eklenerek elde edilen FHD panelleri değerlendirilmiştir. Gürültü eklenirken, 30 m ofseti referans olarak alınmış ve gürültü sinyalinin gücü 30 m ofsetindeki sinyalin gücüne ve verilen SGO değerine göre ayarlanmıştır. Örneğin, SGO=10 dB ile gürültü eklenen atış verisinde 30 m ofsetinde bulunan alıcının SGO'su

10 dB'e karşılık gelmektedir. Buna karşılık, Q'nun da etkisiyle, sinyal genlikleri hat boyunca artan ofset ile azalış gösterdiğinden, SGO değeri de kademeli olarak düşmektedir.



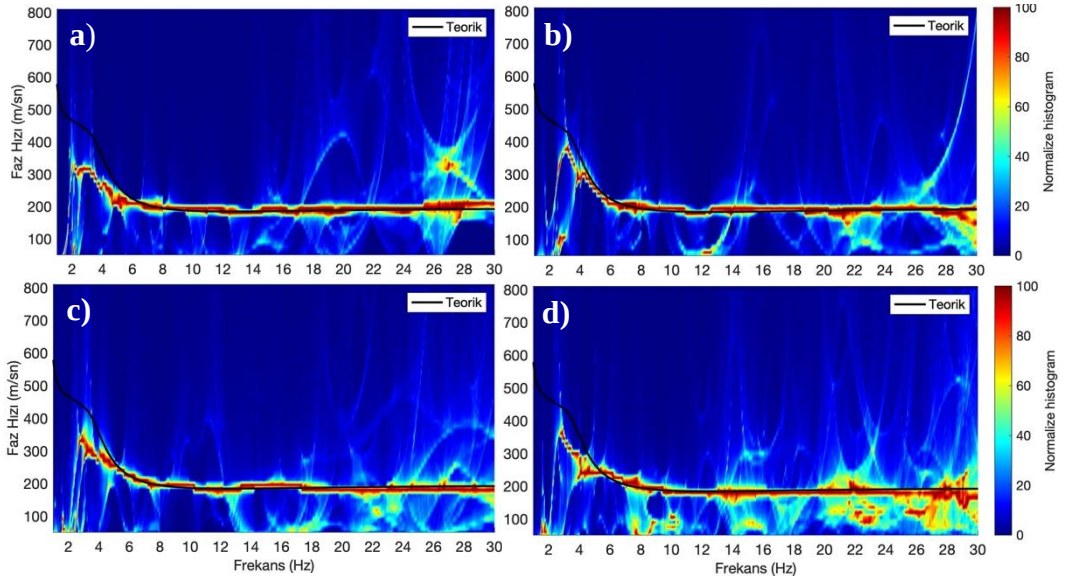
Şekil 5.25 : Sentetik atış verisine SG0= 5 dB (sol üst), SG0= 10 dB (sağ üst), SG0= 20 dB (sol alt) ve SG0= 30 dB (sağ alt) oranlarında eklenen beyaz gürültü ve gradiyometrik alıcı brubundaki ilk alıcının sismogramı. Ofset 30 m'dir.

SG0= 5dB, 10dB, 20dB ve 30dB oranlarında beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verilerinden AKG yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri Şekil 5.26'da sunulmaktadır. Buna göre; SGO= 20 dB ve üstündeki gürültü oranları için AKG ile FHD panellerinin geniş bir frekans bandında teorik eğri ile oldukça uyumlu elde edildiği, daha düşük SGO'larda (< 10dB) ise faz hızlarının teorik eğriden uzaklaştığı ve SGO düştükçe faz hızı hatalarının arttığı gözlenmektedir. Buradan, AKG ile FHD bilgisinin doğru şekilde elde edilmesinde atış verisinin SGO'sunun yüksek (≥ 20dB) olmasının çok önemli bir etken olduğu söylenebilir.



Şekil 5.26 : (a) SG0= 5dB, (b) SG0= 10dB, (c) SGO= 20dB ve (d) SGO= 30dB oranlarında beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verilerinden AKG yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m, ofset 30 m'dir. Teorik temel mod FHD branşı siyah eğri ile gösterilmektedir.

Sentetik atış verisinde Q etkisi bulunduğundan ve artan ofset ile sinyal genlikleri düştüğünden, ofsetin FHD belirlemedeki etkisini incelemek amacıyla 30, 50, 80 ve 110 m ofsetlerinde, SG0= 10 dB Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sentetik atış verileri AKG ile analiz edilmiştir (Şekil 5.27).



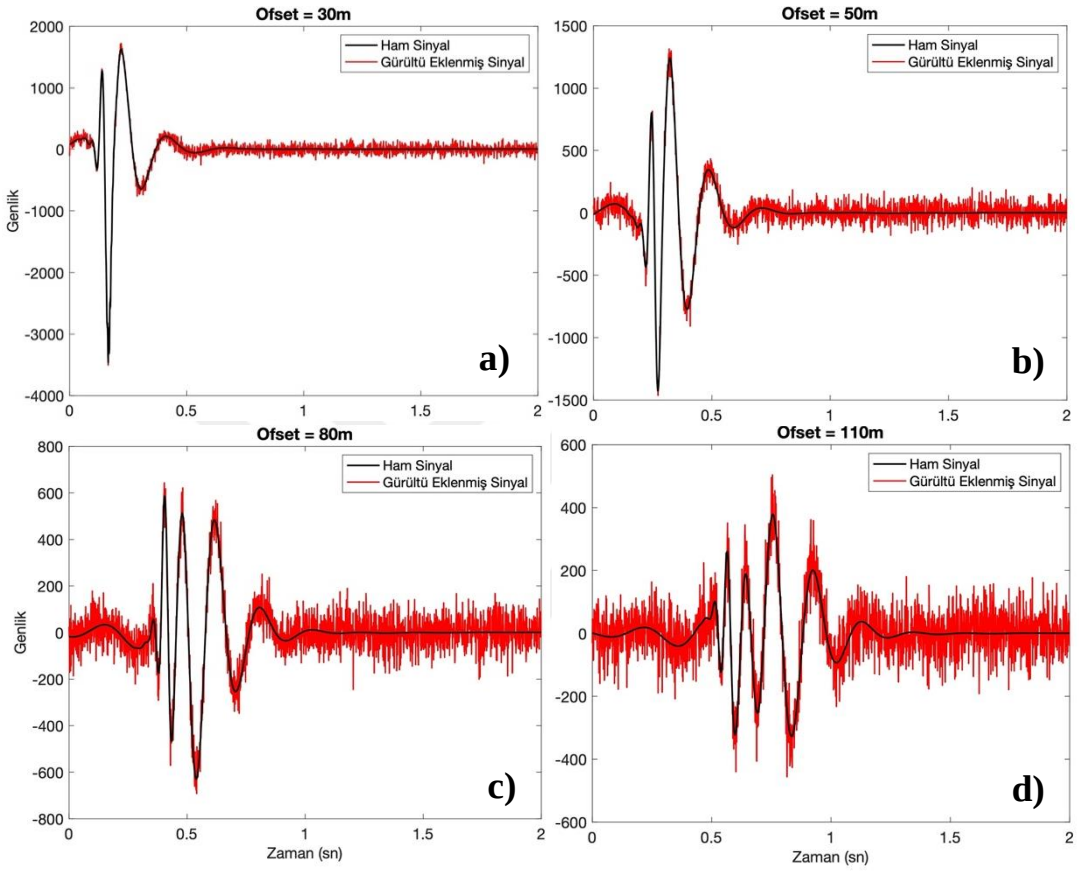
Şekil 5.27 : SG0= 10dB beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verisinin (a) 30m, (b) 50m, (c) 80m ve (d) 110m ofsetlerinde AKG yöntemi ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m'dir. Teorik temel mod FHD branşı siyah eğri ile gösterilmektedir.

Şekil 5.27 incelendiğinde, 10 dB düzeyinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sentetik atış verisi için ofset arttıkça FHD panellerindeki temel mod branşı çözünürlüğünün düştüğü ve histogramdaki saçılmaların arttığı görülmektedir. Bu durum, artan kaynak-alıcı ofseti sonucunda sönümlenmenin daha fazla olmasının etkisiyle atış verisindeki sinyal gücünün azalması ve SGO'nun düşmesi ile ilgilidir. FHD panellerinde ofsetin artması ve SGO'nun buna bağlı olarak düşmesi sonucunda gözlenen bozucu etkiler daha çok yüksek frekans bandında (> 15-20 Hz) etkili olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek frekanslı sinyallerin ofsete bağlı sönümlenmeden daha çok etkilenmesidir. Sonuç olarak, bu bölümde kullanılan gerçek atış verilerinden de belirlediğimiz yaklaşık 10 dB düzeyindeki bir SGO için artan ofsetlerde (özellikle > 80 m) AKG yöntemi ile doğru FHD bilgisi elde etmek ve paneldeki saçılmalar nedeniyle mod branşını doğru şekilde belirlemek zorlaşmaktadır. Nüfusun ve antropojenik kaynaklı gürültülerin yoğun olduğu şehir ortamında yapılacak ölçümlerde SGO'nun daha da düşük olabileceği de göz önünde bulundurulduğunda, AKG yöntemi ile yapılan FHD analizlerinde kaynak-alıcı grubu ofsetinin çok uzun seçilmemesi gerektiği düşünülmektedir. Bu bağlamda, ofsetin genel anlamda 50 m ve daha kısa seçilmesinin ve değişen ofsetler için farklı yönlerden, çok sayıda atışın yapılmasının faydalı olacağı değerlendirmesi yapılmaktadır.

Bu bölümde ayrıca, AKG ve MASW yöntemlerininin değişen SGO'lar için FHD belirleme performanslarını karşılaştırabilmek için farklı SGO düzeylerinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sentetik atış verileri MASW ile analiz edilerek FHD panelleri oluşturulmuştur. Sönümlenmenin etkisiyle, hat boyunca SGO'nun artan ofset ile azalışını göstermek için ham sentetik atış sismogramları ve 10 dB düzeyinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sismogramlar Şekil 5.28'de 30, 50, 80 ve 110 m ofsetleri için verilmektedir. Sönümlenmenin etkisiyle sinyal gücünün artan ofset ile azaldığı ve buna bağlı olarak SGO'nun hızlı şekilde düştüğü, sismogramlarda net bir şekilde gözlenmektedir. 30 m ofsetinde 10 dB olan SGO, 50m ve 80m ofsetlerinde sırasıyla 5.9 dB ve 1.4 dB düzeylerine inmektedir.

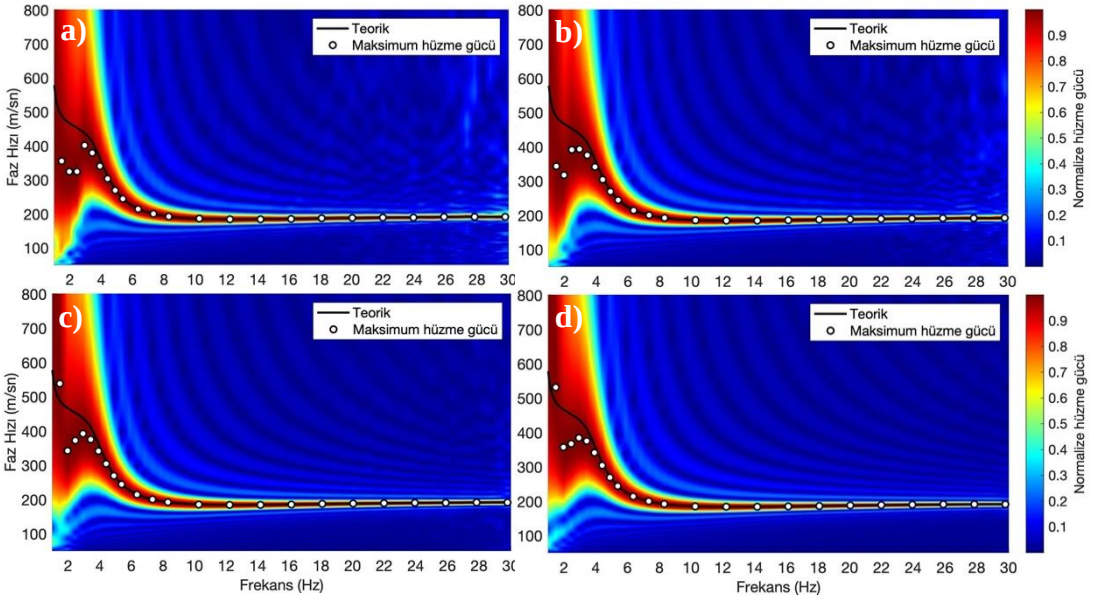
Şekil 5.29'da SGO= 5 dB, 10 dB, 20 dB ve 30 dB düzeylerinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sentetik atış verilerinden MASW yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır. Buna göre; SGO'nun azalmasının FHD panelleri üzerindeki etkisi, sinyal genliklerinin nispeten düşük olduğu < 4 Hz frekans bandında (Şekil 5.6) daha belirgin olmakla birlikte, genel bir çözünürlük düşüşüdür. Bunun yanı sıra, AKG

yöntemi ile hesaplanan FHD panellerine benzer şekilde, düşük frekans bandında (< 4Hz) teorik temel mod FHD eğrisi ile uyumlu faz hızları elde edilememektedir. Ancak, sinyallerin genlik spektrumunun güçlü olduğu > 4 Hz frekans bandı (Şekil 5.6) için SGO değişiminin FHD bilgisinin doğru kestirilmesi açısından herhangi bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.28 : (a) 30m, (b) 50m, (c) 80m ve (d) 110 m ofsetlerindeki ham sentetik atış sismogramları (siyah) ve SGO= 10 dB düzeyinde Beyaz Gaussian gürültü eklenmiş sismogramlar (kırmızı).

Bu karşılaştırmalı sonuçlara dayalı olarak, AKG yöntemi ile hesaplanan FHD bilgisinin değişen SGO düzeylerinden MASW yöntemine oranla çok daha fazla etkilendiği söylenebilir. Bunun en önemli sebeplerinden biri, AKG yönteminde FHD bilgisinin MASW atış topluluğuna oranla çok daha az sayıda ve birbirine çok yakın yerleştirilmiş alıcı grupları üzerinden belirlenmesi ve yöntemin SGO'nun düşmesinden yüksek derecede olumsuz etkilenen uzaysal gradyan temelli olarak çalışmasıdır.

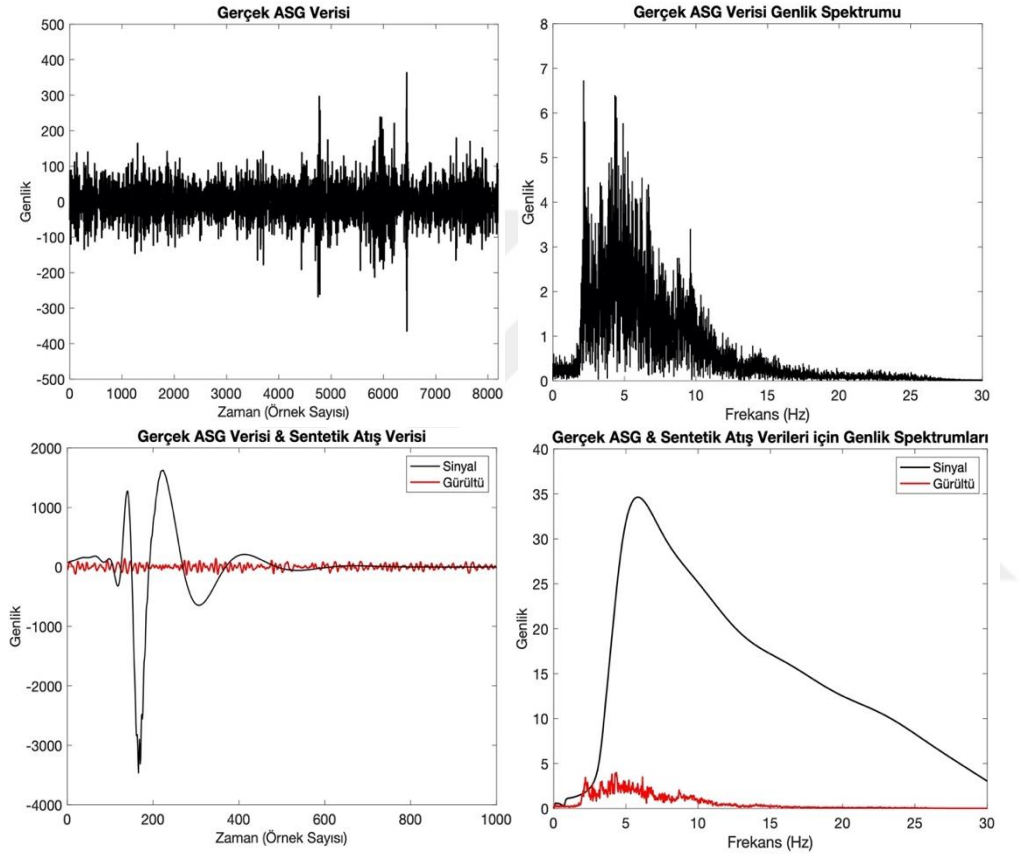


Şekil 5.29 : (a) SG0= 5dB, (b) SG0= 10dB, (c) SGO= 20dB ve (d) SGO= 30dB oranlarında beyaz gürültü eklenmiş tek modlu sentetik atış verilerinden MASW yöntemi ile hesaplanan FHD panelleri.

MASW yönteminde atış verisini oluşturan alıcı sayısı arttıkça hesaplanan FHD panelinin çözünürlüğü ve elde edilen faz hızlarının hata oranı azalmaktadır (Park ve diğ., 1998). Bu testte MASW yöntemi ile FHD belirlemek için 1m aralıklı ve toplamda 120 m açıklığa sahip tüm alıcı hattı kullanılmaktadır. AKG yönteminde ise yalnızca 5'li alıcı grupları üzerinden hesaplama yapılmaktadır. Dolayısıyla, MASW yönteminin FHD performansı çoklu alıcı ile veri-işlemin avantajı ile desteklenmektedir. Bunun yanı sıra, daha önce de belirtildiği gibi, AKG yöntemi ile FHD bilgisinin elde edilmesi, alıcı grupları arasındaki uzaysal türevlerin hesaplanması ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle, AKG yönteminin FHD belirleme performansı azalan SGO'dan yüksek oranda olumsuz etkilenmektedir.

Testin sonraki aşamasında, aynı sentetik veriye H148 ölçüm noktasına ait gerçek ASG verisinden bir bölüm, gürültü olarak eklenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu aşamada amaç veriye beyaz gürültü yerine gerçekçi bir ASG verisinin gürültü olarak eklenmesi durumunda AKG ile FHD analizinin nasıl etkilendiğinin görülmesidir. Gürültünün genliği, sentetik veri setine göre farklı SGO değerlerine karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. SGO=12 dB için H148 ölçüm noktasına ait gerçek ASG kaydı (sentetik veri ile aynı örnek sayısına sahip) ve bu kayda ait genlik spektrumu Şekil 5.30'da sunulmaktadır. Gürültü verisi olarak H148 ölçüm noktasına ait gerçek ASG kaydının kullanılmasının sebebi, bu sahanın şehirleşmeden uzak olması, sismik dalga

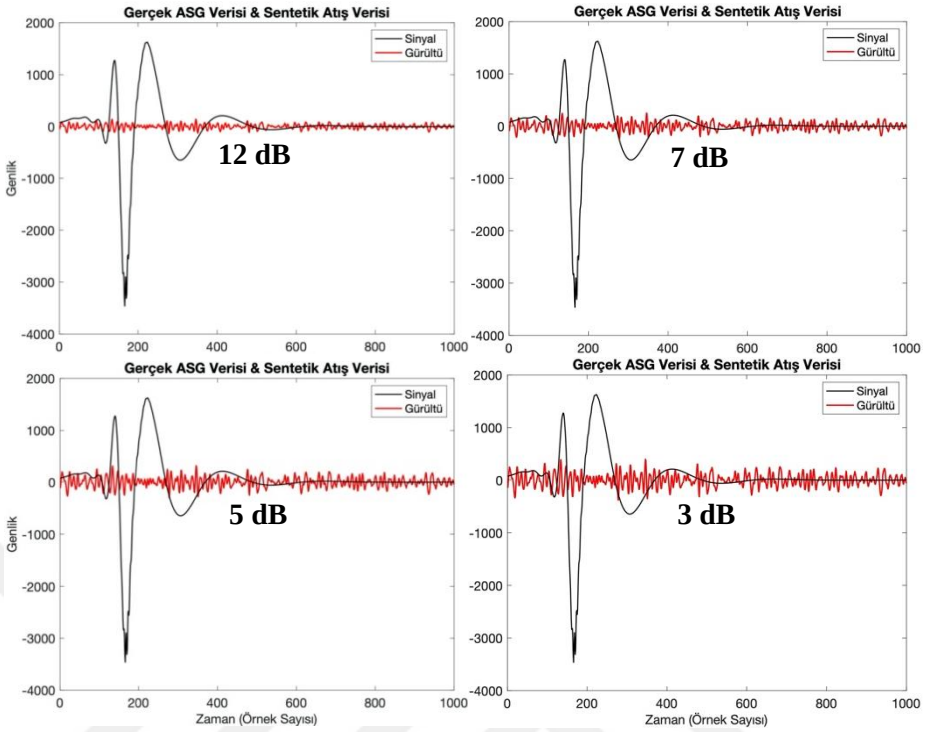
alanının endüstriyel kaynaklı sinyaller içermemesi ve dolayısıyla doğal kaynaklı ASG alanını doğru şekilde yansıtacağının değerlendirilmesidir. SGO= 12, 7, 5 ve 3 dB için sentetik atış ve ASG gürültü sismogramları ile gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden AKG ile elde edilen FHD panelleri Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de verilmektedir. Şekil 5.33'te ise SGO= 3 dB için gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden 30m, 80m ve 110m ofsetlerinde AKG ile hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır.



Şekil 5.30 : 30 m ofset ve SGO=12 dB için; gerçek ASG verisi (sol üstte), bu verinin genlik spektrumu (sağ üstte), sentetik atış verisi ve gerçek ASG verilerinin sismogramları (sol altta) ve genlik spektrumları (sağ altta). Şekillerde sentetik atış verisi sinyal, ASG verisi gürültü olarak isimlendirilmiştir.

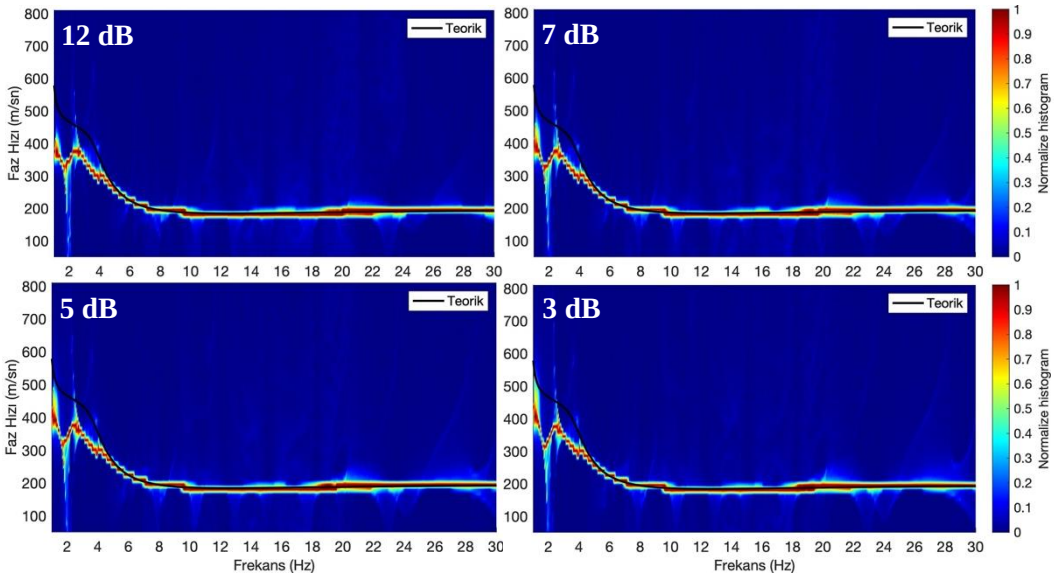
30 m ofsetinde, SGO=12 dB için sinyal ve gürültü genlikleri incelendiğinde; sinyal (sentetik atış verisi) genliklerinin 5-6 Hz civarında maksimum değerini aldığı, 5 Hz'in altında ise hızla düşerek ~3 Hz'de gürültünün (gerçek ASG verisi) ortalama genlik seviyelerine indiği görülmektedir. Yüksek frekans bandındaki (>5 Hz) sinyal genlikleri kademeli şekilde azalmakta ve Q etkisine karşın ilgilenilen frekans bandı boyunca belirli bir seviyenin üstünde kalmaktadır. Gürültü genliklerinin en yüksek

olduğu frekans bandı ~2-10 Hz'dir ve yüksek frekanslara doğru genlik değerleri düşerek 15 Hz'den daha yüksek frekanslar için çok düşük seviyede seyretmektedir.



Şekil 5.31 : 30 m ofsetinde SGO=12, 5, 7 ve 3 dB için gerçek ASG (gürültü) ve sentetik atış verileri (sinyal). Sentetik atış verisi sinyal, ASG verisi gürültü olarak isimlendirilmiştir. SGO değerleri panellerin üzerinde verilmektedir.

Gerçek ASG verisi gürültü olarak eklenerek oluşturulan sentetik atış verisinde, azalan SGO'nun AKG yöntemi ile hesaplanan FHD panellerinde önemli bir bozucu etkiye ya da değişime neden olmadığı görülmektedir (Şekil 5.32). Bu sonuçlar, sentetik atış verisine Beyaz Gaussian gürültünün eklenmesi durumunda elde edilen FHD sonuçlarından oldukça farklıdır çünkü veriye eklenen Beyaz Gaussian gürültünün benzer SGO'larda FHD panelleri üzerinde belirgin bozucu etkiler yarattığı belirlenmiştir (Şekil 5.26). Bunun sebebinin, sentetik atış verisi ile gürültü olarak eklenen gerçek ASG verisinin spektral içeriklerindeki frekans bandı farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sentetik atış verisinin yüksek frekans bandındaki (> 5 Hz) genlik spektrumu oldukça güçlüdür. Beyaz Gaussian gürültü ile atış verisine tüm frekanslarda dengeli ve sabit bir genlik içeriğine sahip gürültü eklenmiş olmaktadır. Buna karşılık, gerçek ASG verisinin spektrumu yaklaşık 2-15 Hz frekans bandında sınırlı kalmakta, hatta 10 Hz'in üstündeki frekanslarda belirgin şekilde zayıflamaktadır (Şekil 5.30).

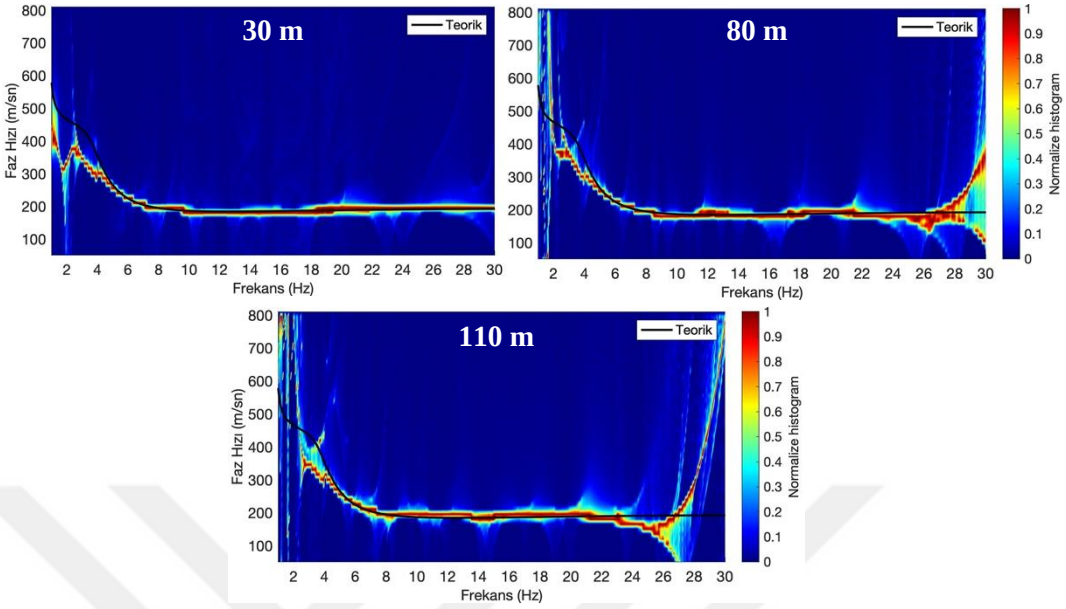


Şekil 5.32 : 30 m ofsetinde SGO=12, 5, 7 ve 3 dB için gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden AKG ile hesaplanan FHD panelleri. Siyah eğri teorik temel mod faz hızı eğrisini gösterir. SGO değerleri panellerin üzerinde verilmektedir.

Sentetik atış verisinde Q etkisi bulunduğundan, hat boyunca kaynak-alıcı ofseti arttıkça sinyal genlikleri azalmaktadır (Şekil 5.5). Bu nedenle, 30 m ofsetinde SGO= 3 dB düzeyinde eklenen gürültünün sinyal üzerindeki bozucu etkisi artan ofset ile birlikte artış göstermektedir. Dolayısıyla, 30 m ofsetinde 3 dB düzeyinde olan SGO, 80 ve 110 m ofsetlerinde çok daha düşük değerler almaktadır. Beyaz Gaussian gürültünün eklendiği testtekine benzer şekilde, atış topluluğu boyunca gerçekçi bir SGO oluşturabilmek için bu yol izlenmiştir.

Testler esnasında, artan kaynak-alıcı grubu ofsetinin gürültülü verilerden hesaplanan FHD panelleri üzerindeki etkisinin nasıl olacağı da araştırılmıştır. Şekil 5.33'te 30, 80 ve 110 m ofsetlerinde SGO= 3 dB için hesaplanan FHD panelleri sunulmaktadır. Buna göre; 30 m gibi yakın bir kaynak-alıcı grubu ofseti için elde edilen sonuçlardan farklı olarak 80m ve 110 m ofsetlerinde, veriye eklenen gürültünün FHD panellerinde önemli bozulmalar yarattığı görülmektedir. Bu ofsetler için hesaplanan FHD panellerinde, tüm frekans bandında çözünürlük düşüşü, ~10-20 Hz frekans bandında faz hızlarının teorik temel mod eğrisinden yüksek kestirildiği bölgeler ön plana çıkmaktadır. Özellikle 110 m ofseti için faz hızlarının yüksek kestirilmesi ~8-22 Hz frekans bandı için kesintisiz şekilde geçerlidir. 22 Hz'in üstünde ise çözünürlük daha da düşmekte, panelleri oluşturan histogramlarda saçılmalar oluşmakta ve faz hızları doğru kestirilememektedir. Artan ofset ile FHD panelleri üzerindeki bozulmaların özellikle yüksek frekans bandında belirgin şekilde gözlenmesi, sönümlenmenin doğası gereği,

yüksek frekanslardaki sinyal genliklerinin artan yayınım mesafesi ile daha hızlı düşmesinden kaynaklanmaktadır.



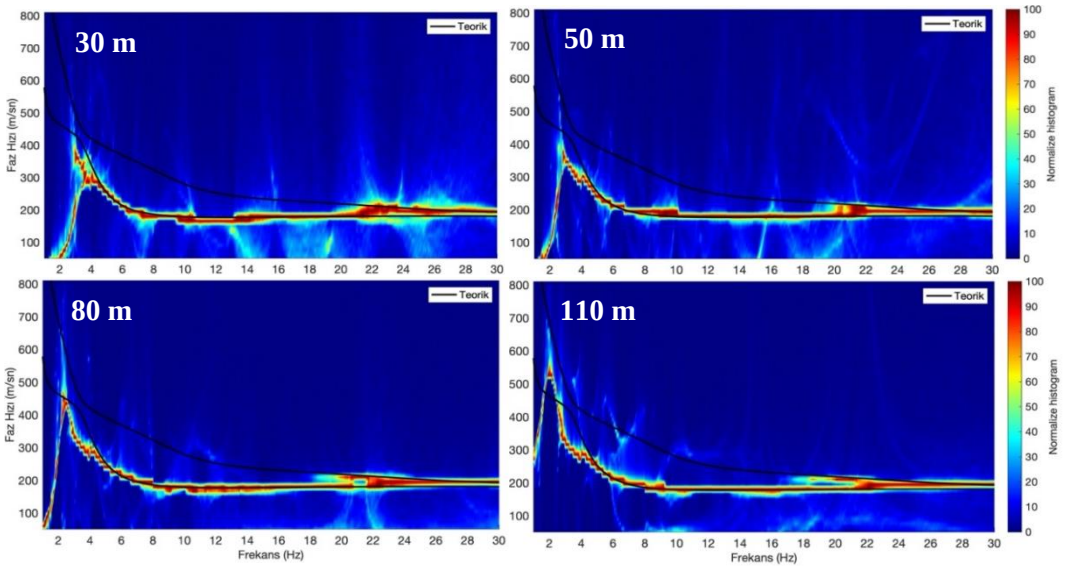
Şekil 5.33 : 30, 80 ve 110 m ofsetlerinde SGO= 3 dB için gerçek ASG eklenmiş sentetik atış verilerinden AKG ile hesaplanan FHD panelleri. Siyah eğri teorik temel mod faz hızı eğrisini gösterir. Ofsetler panellerin üzerinde verilmektedir.

Sonuç olarak, gerçek saha ölçümlerinde karşılaşılabileceği gibi, Q etkisi içeren bir zemin ortamı için, gerçek ASG verisinin sentetik atış verisi üzerine gürültü olarak eklenmesinin, yakın kaynak-alıcı grubu ofsetleri için hesaplanan FHD panelleri üzerinde oldukça düşük SGO'larda dahi önemli bir bozucu etki yaratmadığı belirlenmiştir. Buna karşılık, daha uzak ofsetlerde (80 m ve üzeri) gürültünün FHD paneli üzerindeki bozucu etkilerinin arttığı ve özellikle S-dalgası hız modellemesi esnasında sığ tabakaların hızlarının sağlıklı şekilde elde edilebilmesi için gerekli bilgiyi taşıyan yüksek frekans FHD bilgisinin doğru elde edilememesine neden olduğu sonucuna varılmıştır.

5.3.3.5 İki modlu sentetik testi

AKG yöntemi ile birden çok modlu dalga alanı için FHD elde etme performansını belirlemek ve MASW yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmak için öncelikle SK04 hız modeli için iki modlu sentetik veri seti üretilmiştir. AKG yöntemi zaman ortamı temelli çalıştığından, yöntemin mod ayırım gücü Rayleigh dalgası modlarının zaman ortamında yeterince ayrımlı olmasına bağlıdır. Sentetik verilerin üretilmesinde kullanılan yer modelinde temel ve 1. yüksek modun faz hızları özellikle

yüksek frekans bandında birbirine çok yakındır. Dolayısıyla, sentetik atış sismogramlarında iki farklı moda ait sinyallerin zaman ortamındaki ayrımlılıkları düşük olduğundan, AKG ile analiz edilmeleri sonucunda FHD branşlarının da ayrılamayabileceği değerlendirilmektedir (Langston, 2007c). AKG ile Rayleigh dalgası modlarının FHD bilgisinin ayrımlı ve doğru bir şekilde elde edilebilmesi için farklı modlara ait sinyallerin hat boyunca zaman ortamında birbirlerinden ayrımlanabilecek mesafeye kadar seyahat etmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, kaynak-alıcı ofsetinin AKG yöntemi ile elde edilen FHD panellerindeki mod ayrımlılığı üzerindeki etkisini incelemek için farklı kaynak-alıcı ofsetlerindeki beşli alıcı gruplarına ait sismogramlar analiz edilmiştir (Şekil 5.34). Buna göre; AKG yöntemi, kısa kaynak-alıcı ofsetlerinde (30 ve 50 m) temel ve 1. yüksek mod faz hızı branşlarını ayırmada başarılı olamamaktadır. 30 ve 50 m ofsetleri için hesaplanan FHD panelinde, yüksek frekans bandında ~20 Hz'e kadar teorik temel mod faz hızları kestirilirken, 20-25 Hz frekans bandında temel ve 1. yüksek mod faz hızlarını ortalayan, 25 Hz'in üstünde ise 1. yüksek mod branşını takip eden değerler elde edilmektedir. 80m ofseti için hesaplanan FHD panelinde iki moda ait branşlar ~18-22 Hz bandında ayrımlanmaya başlamakla birlikte 25 Hz'in üstünde, yakın ofsetlerdekine benzer şekilde yalnızca 1. yüksek mod branşına ait faz hızları gözlenebilmektedir. 110 m gibi oldukça uzun bir kaynak-alıcı ofseti için hesaplanan panelde mod branşları ~17-22 Hz bandında daha iyi bir şekilde ayrımlanmaktadır.

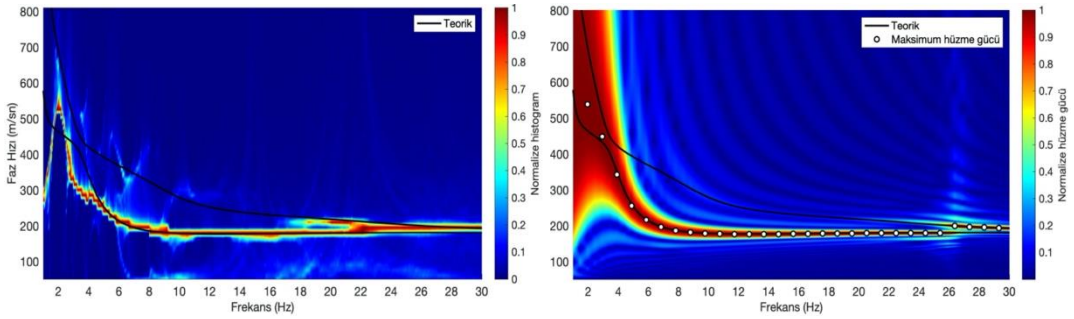


Şekil 5.34 : SK04 hız modeli için üretilen iki modlu sentetik atış verisinden, AKG yöntemi ile 30m (sol üst), 50m (sağ üst), 80m (sol alt) ve 110m (sağ alt) kaynak-alıcı ofsetlerinde hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m'dir ve ofset bilgileri paneller üzerinde paylaşılmıştır.

4-15 Hz frekans bandında 1. yüksek mod FHD bilgisinin gözlenememesinin en önemli sebebi ise kullanılan hız modeli nedeniyle, 1. yüksek moda ait enerji integralinin bu frekans bandında temel mod enerji integraline göre 50-100 kat düşük olmasıdır (Şekil 4.55). Benzer şekilde, SK04 hız modeli kullanılarak oluşturulan ASG sentetiğinden 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panellerinde de, 1. yüksek mod branşı ~3-20 Hz frekans bandında ya hiç gözlenememekte ya da çok düşük enerjiler ile teorik eğriden sapmış şekilde elde edilmektedir (Şekil 4.49).

Sonuçlar doğrultusunda, AKG yöntemi uygulamasında kaynak-alıcı ofsetinin artırılmasının farklı modlara ait FHD branşlarının kısa ofsetlere oranla daha iyi ayrımlanmasına katkı sağladığı ancak sığ zemin hız yapısı araştırmalarında kullanılagelen konvansiyonel kaynak türlerinin (balyoz, vb.) üretebileceği limitli sismik enerji ve bununla ilintili ulaşılabilecek maksimum kaynak-alıcı ofsetleri (100-150 m) göz önünde bulundurulduğunda, yöntemin, çoklu modların birbirine çok yakın faz hızları ile oluştuğu sismik dalga alanındaki FHD bilgisini elde etme konusunda kullanışlı olmayabileceği değerlendirilmektedir.

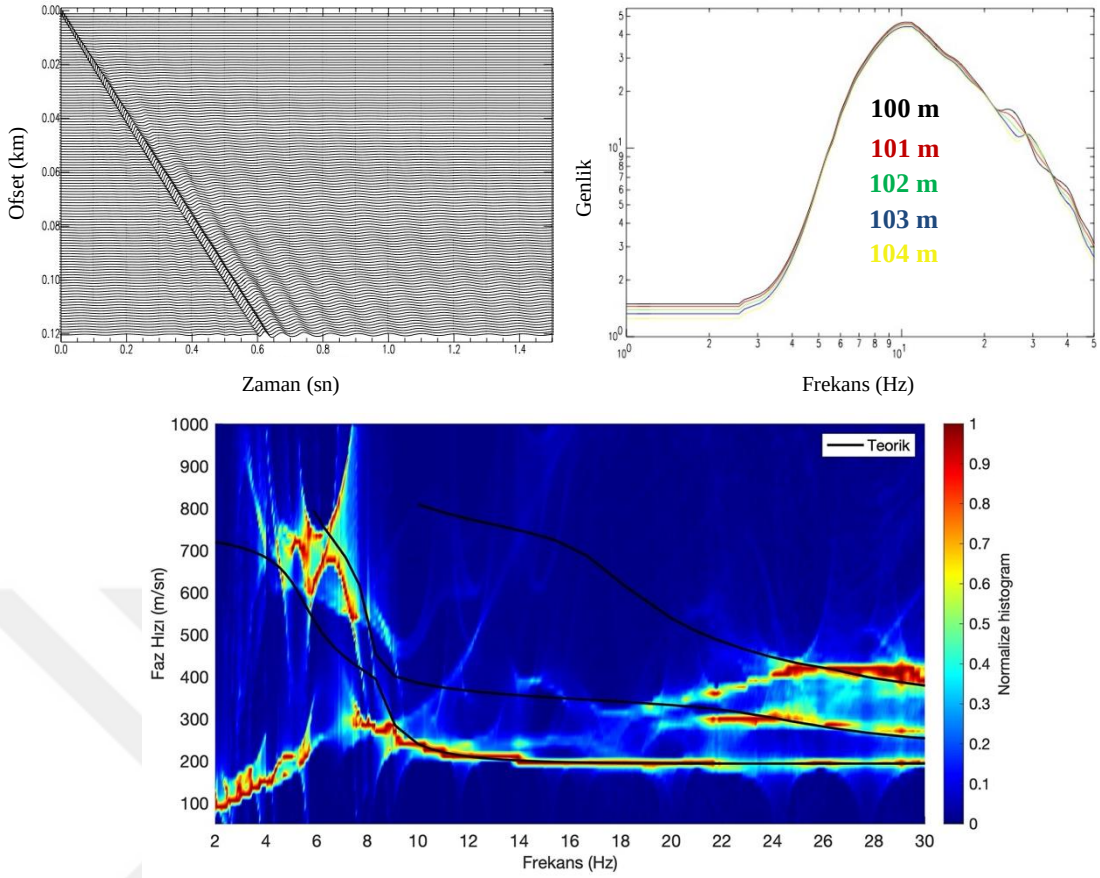
110 m kaynak-alıcı ofseti için hesaplanan AKG paneli Şekil 5.35'te aynı veri seti için tüm atış topluluğunun MASW yöntemi ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD paneli ile birlikte verilmektedir. MASW ile hesaplanan FHD panelinde temel ve 1. yüksek moda ait branşların 4 Hz ve daha yüksek frekanslar için ayrımlı olduğu görülmektedir. Özellikle AKG yöntemi ile iki modun tam olarak ayrımlanamadığı yüksek frekans bandında (> 20 Hz), MASW yöntemi kullanılarak, teorik FHD eğrileri ile uyumlu faz hızları elde edilebilmektedir. Buna karşılık, özellikle temel ve 1. yüksek mod faz hızlarının birbirine çok yaklaştığı 4 Hz ve altındaki frekanslarda MASW yöntemi ile kestirilen faz hızları iki moda ait FHD branşlarının arasında kalmaktadır. Düşük frekans bandında (< 4 Hz) temel ve 1. yüksek modlara ait FHD bilgisinin doğru kestirilememesinin en önemli sebeplerinden birinin de, daha önce de değinildiği gibi, üretilen sentetik atış verisindeki sinyal genliklerinin bu frekans bandında belirgin şekilde azalış göstermesi olduğu (Şekil 5.6) değerlendirilmektedir.



Şekil 5.35 : İki modlu sentetik atış verisinden AKG (solda) ve MASW (sağda) yöntemleri ile hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m, AKG'de kullanılan kaynak-alıcı ofseti 110m'dir. MASW panelinden işaretlenen FHD branşları beyaz daireler ile gösterilmektedir.

AKG yönteminin çok modlu atış verilerindeki FHD performansının farklı bir hız modeli ile de değerlendirilebilmesi için, Çizelge 4.1'de sunulan iki tabakalı, basit hız modeli için de 3 modlu, Q etkisi içeren sentetik atış verisi oluşturulmuştur. Oluşturulan sentetik atış topluluğu, AKG analizinde kullanılan 100-104m ofset aralığındaki alıcı grubuna ait sinyallerin genlik spektrumları ve hesaplanan FHD panelleri Şekil 5.36'da verilmektedir. Sentetik atış verisindeki alıcı aralığı Δx=1m, toplam alıcı açıklığı 120 m, zaman örneklemesi ise 1msn'dir. AKG analizinde uzak ofsetlerdeki alıcı grubunun kullanılmasının sebebi, kaynak-alıcı mesafesini arttırarak Rayleigh dalgası modlarının zamanda ayrımlılığının artmasının sağlanmasıdır.

Elde edilen FHD paneli incelendiğinde, temel mod FHD bilgisinin ~9-30 Hz frekans bandında teorik eğri ile oldukça uyumlu şekilde hesaplanabildiği görülmektedir. Daha düşük frekans bandında (< 9 Hz) sağlıklı FHD bilgisinin elde edilememesinin en önemli sebebinin ise üretilen atış verisinin genlik spektrumunun 10 Hz'de hızlı bir düşüş göstermesi ve genlik değerlerinin 3 Hz frekansına kadar çok hızlı bir şekilde azalması olduğu değerlendirilmektedir (Şekil 5.36). Ayrıca, 8-9 Hz frekansı civarında, temel ve 1. yüksek modların faz hızları birbirine çok yaklaştığı, 5-8 Hz frekans bandında ise teorik temel ve 1. yüksek mod FHD eğrilerinin arasında kalan bölgede düşük çözünürlüklü de olsa, bu modların faz hızlarını ortalayan bir FHD görüntüsünün elde edildiği görülmektedir. 1. yüksek mod için FHD branşı ~21-30 Hz bandında kesintisiz şekilde gözlenebilmekte, teorik faz hızı eğrisi ile tamamen uyumlu FHD bilgisi ise ~24-27 Hz frekans bandında elde edilebilmektedir. 2. yüksek mod FHD branşı, ~24-30 Hz frekans bandında tanımlıdır ve 1.yüksek moda benzer şekilde, teorik faz hızı eğrisini takip eden FHD bilgisi ~24-27 Hz frekans bandı için hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.36 : İki tabakalı, basit hız modeli için oluşturulan 3 modlu sentetik atış verisi (sol üstte), AKG analizinde kullanılan alıcı grubuna ait sismogramların genlik spektrumları (sağ üstte) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD paneli (altta). Temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod için teorik FHD branşları siyah eğrilerle gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre; iki tabakalı basit yer modeli için üretilen sentetik atış verilerinden AKG analizi ile temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod FHD bilgisinin, mod branşlarının bir arada belirgin şekilde gözlendiği ~24-30 Hz frekans bandında ayrımlı şekilde elde edilebildiği sonucuna varılmıştır. Bunun en önemli sebebi, SK04 hız modelinden farklı olarak iki tabakalı basit yer modelinde farklı modlara ait faz hızlarının bu frekans bandında birbirinden yeterince uzak olmasıdır.

Aynı yer modeli için önceki bölümlerde daha uzun alıcı açıklıkları (400m) kullanılarak yapılan MASW analizinde, tüm modlar için FHD bilgisinin daha düşük frekans bantlarına kadar elde edilebildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.57). Bunun birinci nedeni, 400 m'lik alıcı açıklığının, veride görece daha düşük frekanslı Rayleigh dalgası paketlerinin oluşmasını sağlamasıdır. Ayrıca, yüksek mod branşlarının panelde daha görünür hale gelebilmesi için normalize hüzme gücü skalası 1'den 0.5'e düşürülmüştür. Çünkü, bu hız modeli için 1. ve 2. yüksek modların Rayleigh enerji integralleri, 9 Hz'den yüksek frekanslarda temel moda kıyasla oldukça düşüktür. Buna

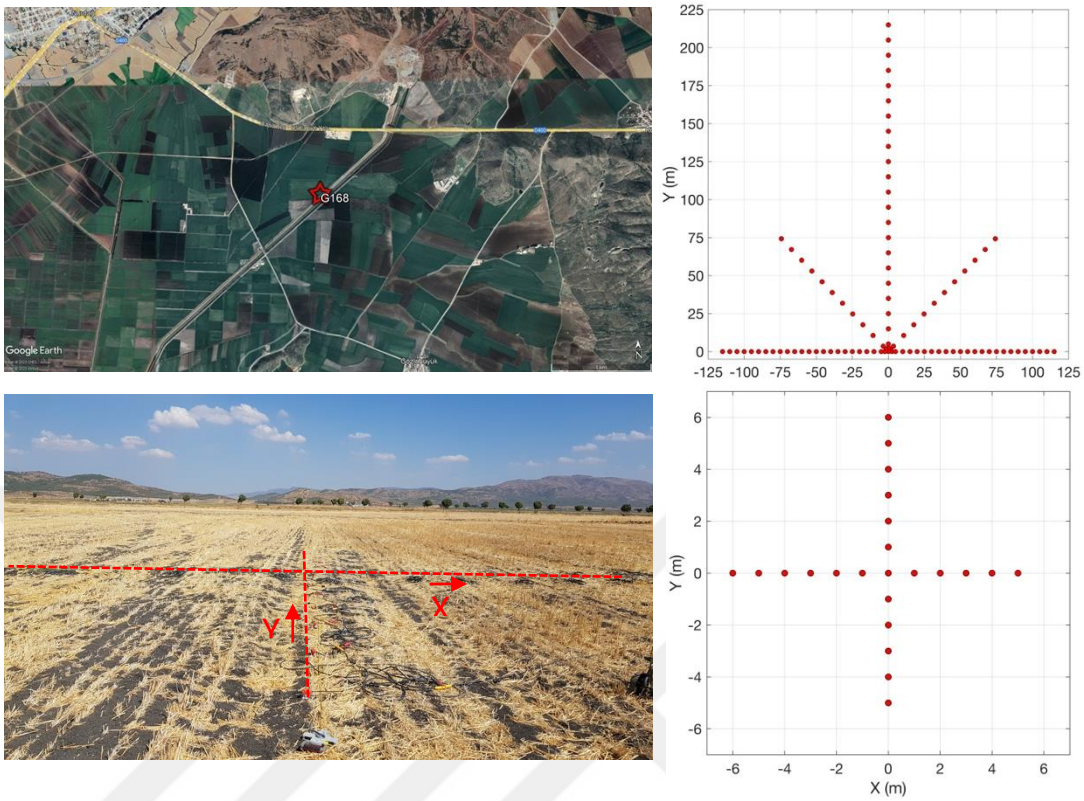
karşılık, AKG analizi ile temel modun yanı sıra yüksek modlara ait faz hızlarının da belirli bir frekans bandında ayrımlı şekilde elde edilebilmiş olması, yöntemin ortamda çoklu mod FHD performasnı açısından olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, çalışılan sahadaki zemin hız yapısının, AKG yöntemi ile FHD analizinde farklı modlara ait faz hızlarının doğru ve ayrımlı şekilde elde edilmesinde büyük etkisinin olacağı da açıktır. Bu bağlamda, ilerleyen dönemde yapılacak çalışmalarda, farklı mod davranışlarını örnekleyen zemin hız modelleri ile FHD analizi örneklerinin çoğaltılması önerilmektedir.

5.4 Gerçek Veri Setleri ve Elde Edilen Sonuçlar

Gerçek veri seti olarak, TÜBİTAK MAM – YBAG tarafından 2020 yılında başlatılarak halihazırda yürütülmekte olan ve Gaziantep Büyükşehir Belediyesi tarafından desteklenen, Gaziantep İli Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi (Proje no: 5207A01) (Karaaslan ve diğ., 2023) kapsamında gradiyometrik amaçlı toplanan test verileri ve aynı ölçüm noktasında kaydedilen aktif ve pasif kaynaklı sismik dizilim veri setleri kullanılmıştır. Verileri kullanılan G168 kodlu ölçüm noktası Nurdağı ilçe merkezinin hemen güneyinde düzlük, basen alan içerisindedir. Noktanın konumu, 2B konvansiyonel sismik dizilim ve gradiyometrik dizilim geometrileri ve gradiyometrik dizilimin sahadaki yerleşimi Şekil 5.37'de verilmektedir.

Gradiyometrik dizilim, 1m alıcı aralıklı ve toplam 11 m açıklıklı 24 kanaldan oluşmaktadır. Konvansiyonel sismik dizilim geometrisi ise 0°, 45°, 90°, 135° ve 180° azimutlarında yönlendirilmiş alıcı hatlarından oluşmaktadır. Dizilim toplam 96 alıcı içermekte ve merkezinde de bir alıcı bulunmaktadır. Tüm hatların ilk ve ikinci alıcıları 2.5m ve 5 m'ye yerleştirilmiştir. 0° ve 180° hatlarındaki alıcı aralığı üçüncü alıcılardan itibaren hat sonuna kadar 5m iken, 45°, 90° ve 135° hatlarında ise 10m'dir. Ölçümlerde alıcı olarak Mark Products 4.5 Hz düşey bileşen jeofonlar ve Geode kayıt sistemleri kullanılmaktadır. Aktif kaynaklı kayıtlar 10 kilogramlık bir balyoz ile yapılan vuruşlar ile oluşturulmuştur. SDG ölçümlerindeki zaman örneklemeleri pasif ve aktif kaynaklı veri setleri için sırasıyla 1 msn ve 0.5 msn'dir. Konvansiyonel sismik dizilim ölçümlerinde, pasif kaynaklı veri seti için 8 msn, aktif kaynaklı veri seti için 0.5 msn zaman örneklemeleri kullanılmıştır. Konvansiyonel sismik dizilim yöntemleri için toplanan ASG kaydının toplam uzunluğu 1 saat 4 dakikadır.

Gradiyometrik yöntemler ile analiz için toplanan kayıtların uzunlukları ile ilgili bilgiler ilerleyen bölümlerde paylaşılmaktadır.



Şekil 5.37 : G168 kodlu sahanın konumu (sol üstte), konvansiyonel sismik dizilim ölçümlerinde kullanılan 2B dizilim geometrisi (sağ üstte), gradiyometrik verilerin toplanması için kullanılan 2B dizilim geometrisinin sahadaki yerleşimi (sol altta) ve gradiyometrik dizilim geometrisi (sağ altta).

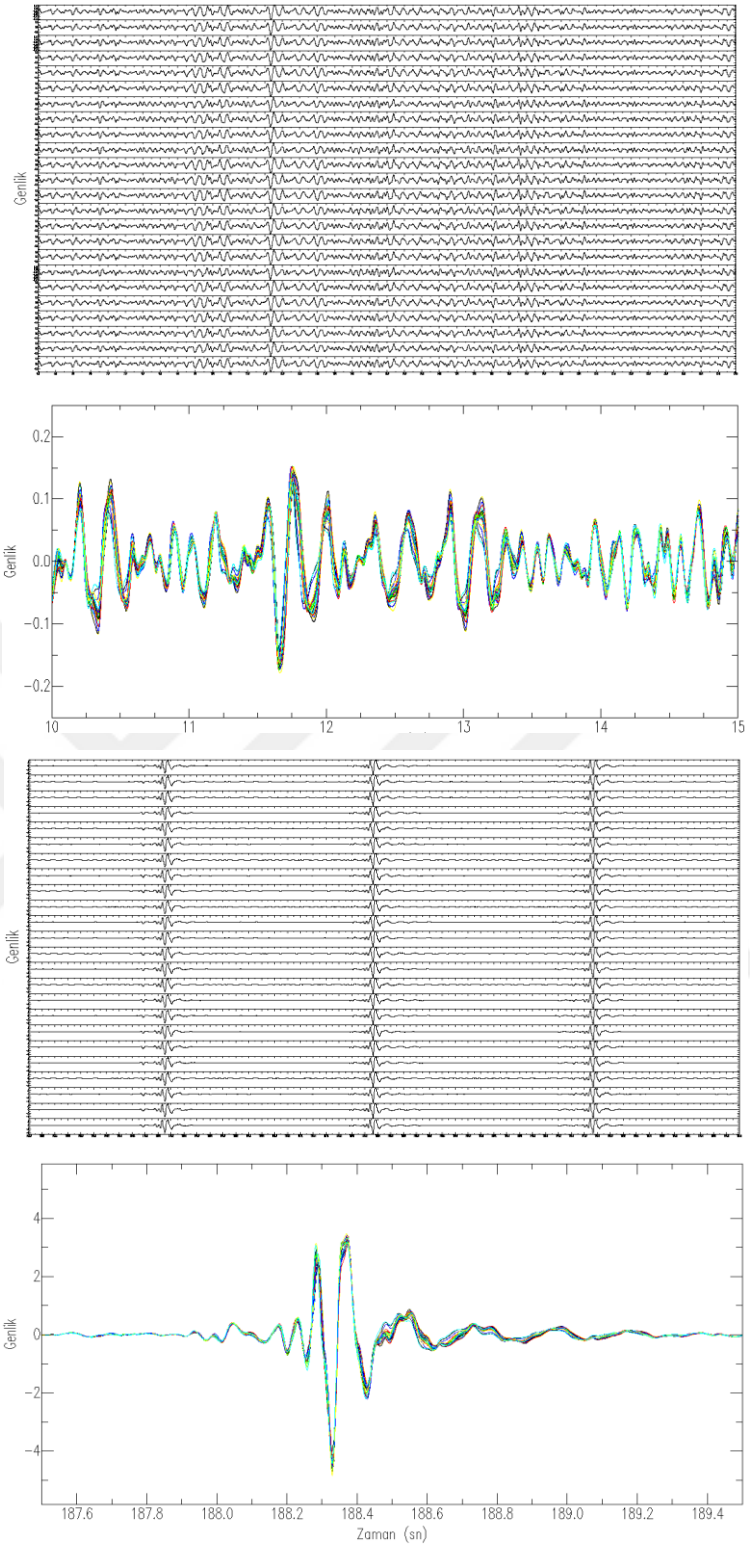
SDG yöntemleri, alıcılar arası uzaysal türevler üzerinden çalıştığından, FHD analizinde hataları en aza indirgemek için ölçümlerde alet tepkileri birbiri ile uyumlu jeofonların kullanılması çok önemlidir. Bu nedenle, ölçümlere başlamadan önce bir Huddle test çalışması yapılmıştır. Huddle test için tüm alıcılar birbirine çok yakın şekilde konuşlandırılarak eş zamanlı ASG ve atış kayıtları toplanmıştır. Huddle test için zemine yerleştirilen jeofonların sahadaki dizilimleri Şekil 5.38'de paylaşılmaktadır.

Huddle test kapsamında toplanan ASG ve atış kayıtları sahada anlık olarak kontrol edilmiş ve sorunlu görülen jeofonlar kayıtlar başlatılmadan önce elenmiştir. Huddle testin sonunda, tepkileri yani algıladıkları sinyallerin genlik ve fazları birbiriyle büyük oranda uyumlu olan 24 jeofonlu bir alıcı seti ölçüm için seçilmiştir.

Huddle test esnasında seçilen alıcı seti ile toplanan ASG ve atış kayıtlarına ait örnek kayıtlar Şekil 5.39'da verilmektedir. Şekilde ASG kayıtları 0.5-20 Hz, atış kayıtları ise 1-40 Hz frekans bantlarında süzülerek gösterilmiştir.

Şekil 5.38 : Jeofon setinin Huddle test için sahadaki yerleşimi.

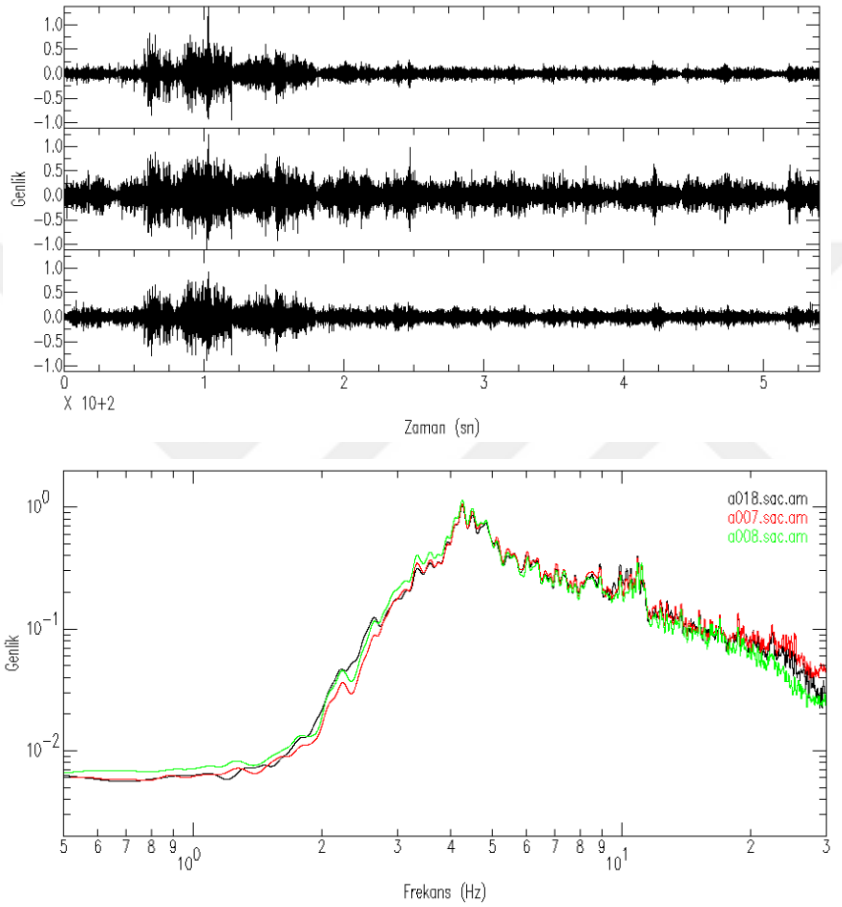
Huddle test esnasında kaydedilen ASG ve atış kayıtlarında, alıcı setinde bulunan tüm jeofonlardaki sinyallerin genlik ve faz uyumunun iyi düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.39). Buna karşın, hem Huddle test hem de SDG ölçümleri esnasında zeminin oldukça çatlaklı ve boşluklu bir yapısı olmasından kaynaklanan kuplaj sorunları yaşanmıştır. Bu kuplaj sorunu, jeofonların tam olarak istenilen lokasyonlara yerleştirilmesi ve jeofonların zemine sıkı şekilde oturmasına engel teşkil etmiştir.



Şekil 5.39 : Yukarıdan aşağıya sırasıyla, Huddle test esnasında toplanan ASG kayıtlarından alınan 25 sn'lik sismogramlar, tüm alıcılara ait kayıtlardan seçilen, üst üste çizdirilmiş 5 sn'lik sismogramlar, peş peşe üç atışın gözlenebildiği 20 sn'lik atış kaydı ve tüm alıcılar için üst üste çizdirilmiş 2sn uzunluğundaki atış kaydı sismogramları.

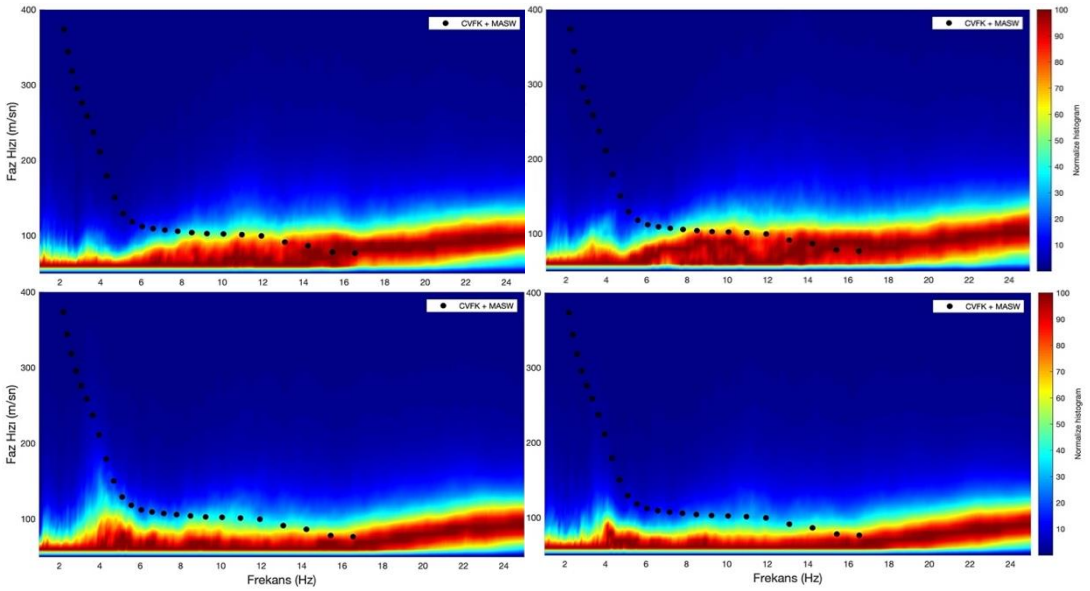
5.4.1 ASG alanının kaynak olarak kullanılması

Testlerin ilk aşamasında, AGG analizi için gradiyometrik alıcı dizilimi ile kaydedilen ASG alanı kullanılmıştır. AGG analizinde kullanılan merkez alıcı ve merkezden x ve y yönlerinde 1 m uzaklıktaki alıcılara ait örnek kayıtlar ve bu kayıtların genlik spektrumları Şekil 5.40'ta verilmektedir. ASG kayıtlarının uzunluğu toplam 540 sn'dir.



Şekil 5.40 : AGG analizinde kullanılan üçlü alıcı grubundaki 540 sn'lik örnek ASG kayıtları (üstte), bu kayıtlardan hesaplanan genlik spektrumları (altta).

ASG alanı, merkez alıcı ile merkezden x ve y yönünde 1m uzaklıktaki alıcılardan oluşan dört farklı alıcı üçlüsü (Şekil 5.37) kullanılarak AGG yöntemi ile analiz edilmiştir. Sonuç FHD panelleri Şekil 5.41'de sunulmaktadır.



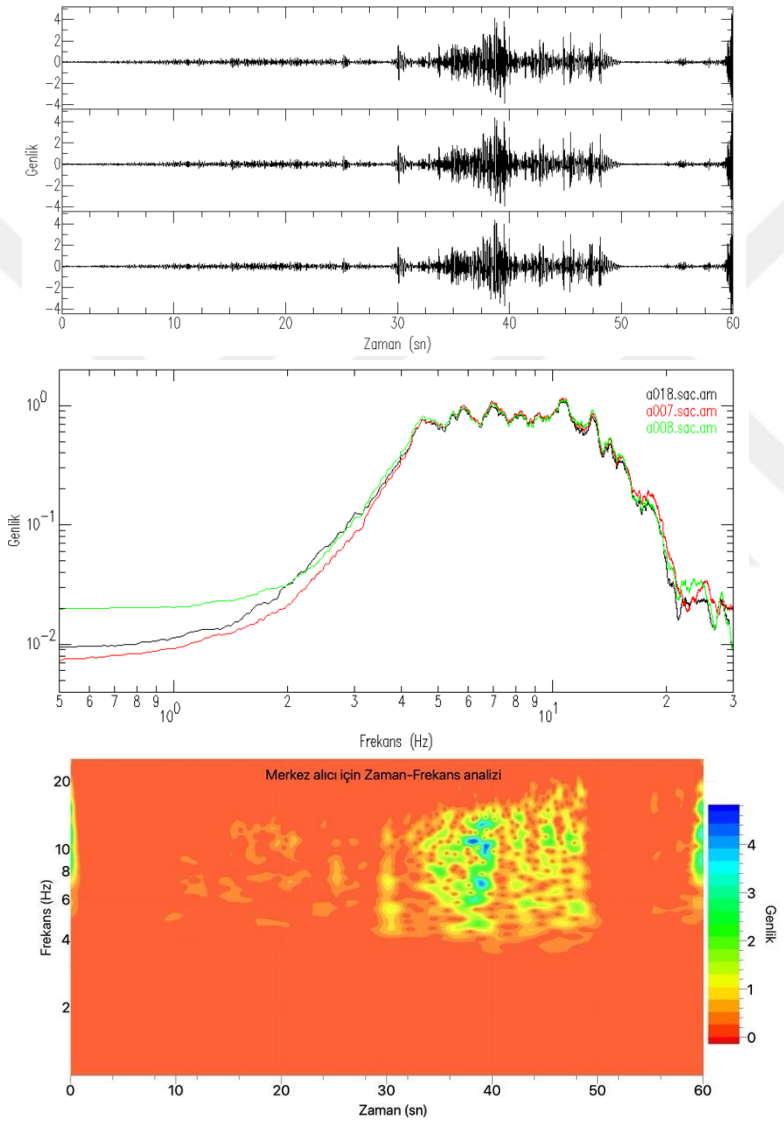
Şekil 5.41 : AGG yöntemi ile dört farklı alıcı üçlüsündenden hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m, kullanılan pencere boyu 1 sn'dir. CVFK ve MASW kullanılarak işaretlenen birleştirilmiş temel mod FHD eğrisi panel üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir.

G168 sahasında toplanan ASG verisinin AGG ile analiz edilmesi sonucunda, konvansiyonel yöntem (CVFK+MASW) sonuçları ile uyumlu, doğru bir FHD bilgisi elde edilememektedir. Analizde farklı alıcı üçlülerinin kullanılması da sonuçları değiştirmemektedir. Dolayısıyla, FHD bilgisinin doğru elde edilememesinin uzaysal türevlerin hesaplandığı alıcı grubundaki bir ya da bir kaç alıcının kuplajı ya da metrajındaki problemlerden kaynaklı olamayacağı açıktır. Toplanan veri bir test verisidir ve sahadaki ölçüm süreleri kısıtlı olduğundan, toplam kayıt süresi (540 sn) de kısa tutulmak zorunda kalınmıştır. AGG ile elde edilen başarısız FHD sonuçlarının bir sebebinin bu olabileceği değerlendirilmektedir. Bir diğer sebep ise ASG dalga alanını oluşturan farklı kaynaklardan dizilime ulaşan sinyallerin zamanda örtüşmesi olabilir. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak, ilerleyen bölümlerde sunulan testler ve karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

5.4.2 Saha Aracının Kaynak Olarak Kullanılması

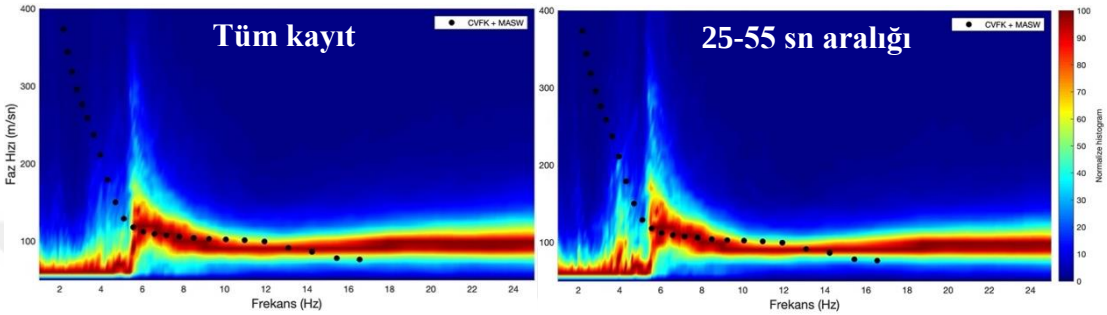
Bu testte, boş ağırlığı yaklaşık 2050 kg olan bir 4x4 Ford Ranger pick-up, dizilimden 120 m mesafede çalıştırılarak çok düşük hızda (ortalama ~1.5-2 m/sn) dizilimin 20 m yakınına kadar sürülmüştür. Kaydın toplam uzunluğu 60 sn, zaman örneklemesi ise 1 msn'dir. Bu testteki amaç ASG alanındaki sinyallerin gradiyometrik dizilime belirli bir yönden ve baskın şekilde ulaşması durumunda AGG yöntemi ile FHD panelinin

başarılı şekilde elde edilip edilemeyeceğini görmektir. Merkezdeki ve merkezden x ve y yönlerinde 1 m uzaklıktaki alıcılara ait kayıtlar, kayıtların genlik spektrumu ve merkez alıcıdaki zaman-frekans analizinden hesaplanan panel Şekil 5.42'de verilmektedir. Buna göre; kayıtların genlik spektrumlarında ~ 4-15 Hz frekans bandı neredeyse aynı genlik seviyesindedir. Ayrıca, bu frekans bandındaki yüksek genlikli sinyallerin zamansal olarak kaydın 25-55 sn aralığında yer aldığı görülmektedir.



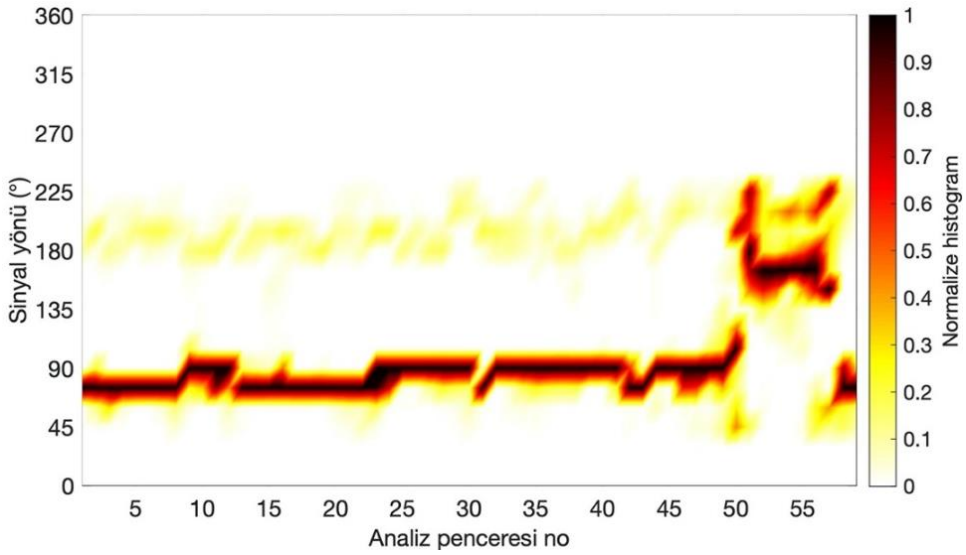
Şekil 5.42 : AGG analizinde kullanılan alıcılardaki 60 sn'lik kayıtlar (üstte), bu kayıtlardan hesaplanan genlik spektrumları (ortada) ve merkez alıcı için yapılan zaman-frekans analizinden elde edilen panel (altta). Zaman-frekans analizi GEOPSY yazılımının TFA aracı ile yapılmıştır.

Bu testte öncelikle 60 sn'lik tüm kayıt, sonrasında ise araç tarafından üretilen sinyallerin güçlü olduğu 25-55 sn zaman aralığı AGG ile analiz edilmiştir (Şekil 5.43). Sonuçlara göre; FHD bilgisi ~ 6-14 Hz aralığında CVFK ve MASW yöntem sonuçlarından işaretlenen birleştirilmiş temel mod FHD eğrisi ile iyi bir uyum içindedir. AGG analizinin sinyallerin güçlü olduğu zaman aralığına daraltılmasının ise FHD panelinde düşük frekanstaki (< 10 Hz) standart sapmaların bir miktar düşmesi dışında önemli bir iyileşme sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 5.43 : AGG analizinde, saha aracının ürettiği gürültü kaydının tümünün (solda) ve 25-55 sn aralığında seçilen bölümünün (sağda) kullanılması ile hesaplanan FHD panelleri. Alıcı aralığı Δx=1m, kullanılan pencere boyu 1 sn'dir. CVFK ve MASW yöntemlerinden elde edilen FHD eğrisi siyah daireler ile gösterilmektedir.

Kaynak olarak kullanılan pick-up, dizilime 90° yönünden yaklaşılarak sürülmüştür. Gerçek kaynak yönü (90°) ile AGG yöntemi kullanılarak elde edilen kaynak yönlerinin kıyaslanabilmesi için, 1sn uzunluklu farklı analiz zaman pencerelerinden, tüm frekanslar için elde edilen sinyal yönleri histogramlanarak çizdirilmiştir (Şekil 5.44). Histogramda analiz pencereleri boyunca en sık gözlenen yönün 90° olduğu, 1 ve 50 nolu analiz zaman pencereleri arasında elde edilen yönlerin tamamen 90° ± 10° aralığında yer aldığı görülmektedir. 50 ve 58 nolu zaman pencerelerinden elde edilen farklı yön bilgisinin, ortamda farklı bir yönden yayınan bozucu kaynak etkisi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Ölçüm sahası, oldukça işlek bir karayolu olan Gaziantep-Osmaniye otoyoluna yaklaşık 850 m mesafededir ve otoyoldan iç bölgelere uzanan bağlantı yolunun kenarında, yoldan 115 m içeride bulunmaktadır (Şekil 5.37). Ölçüm esnasında bağlantı yolundan çok sayıda araç geçişi olmuştur. Bu nedenle, kullanılan pick-up yönünden farklı kaynak yönlerinin bu yoldaki araç geçişleri tarafından üretilen sinyaller ile ilgili olduğu değerlendirilmektedir.



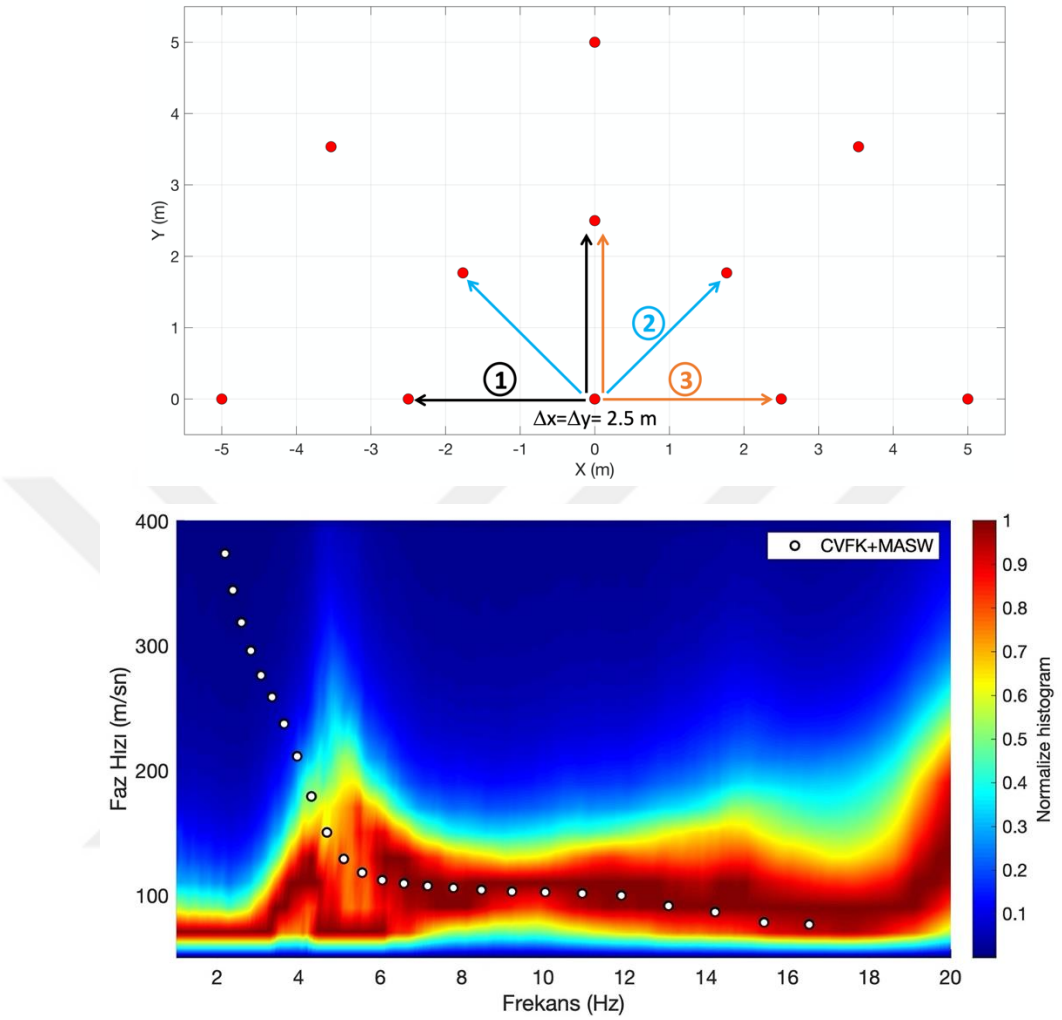
Şekil 5.44 : Saha aracının kaynak olarak kullanılması durumunda AGG yöntemi ile elde edilen sinyal yönlerinin (kaynak azimutlarının) histogramı. Saha aracı dizilime 90° yönünden sürülmüştür.

Testten elde edilen sonuçlara göre; analiz edilen dalga alanında güçlü bir kaynak tarafından üretilen sinyallerin bulunması durumunda, AGG yöntemi ile konvansiyonel CVFK ve MASW yöntem sonuçları ile uyumlu bir FHD bilgisi elde edilebilmekte ancak elde edilen FHD bilgisi, beklendiği şekilde kaynağın üretebileceği frekans bandı ile sınırlı kalmaktadır. Bu sonuç, AGG yönteminin gerçek saha uygulamalarındaki pratik kullanımı açısından önemli bir veri sağlamaktadır. Buradan sonuçla söylenebilir ki, düşük frekans bandında da (< 5 Hz) güçlü sinyal üretebilecek uygun bir kaynağın (örn. ağırlık düşürme) (Foti ve diğ., 2018; Aas ve Sinha, 2023) kullanılması durumunda AGG yöntemi, kaynağın ürettiği frekans bandında doğru FHD bilgisinin elde edilebilmesi konusunda potansiyel vadetmektedir. AGG yönteminin, saha uygulamalarında çok az sayıda ve birbirine çok kısa mesafelerde konuşlandırılmış alıcı grupları ile çok kısa sürelerde kayıt toplanarak uygulanabileceği de göz önünde bulundurulduğunda, pratik bir alternatif oluşturduğu söylenebilir.

5.4.3 Konvansiyonel 2B sismik dizilim ile toplanan ASG verisi için FHD sonuçlarının karşılaştırılması

AGG yönteminin FHD belirleme performansını konvansiyonel 2B sismik dizilim (CVFK ve 2D PSI-MASW) yöntemleri ile karşılaştırabilmek için, G168 sahasında 2B dizilim geometrisi ile toplanan ASG verisi kullanılmıştır. Bu veri setinin uzunluğu, AGG testleri için toplanan verilere göre çok daha fazladır (1 saat 4 dakika) ve gradiyometrik amaçlı toplanmadığından AGG yöntemi için kullanılabilir en küçük

alıcı aralığı 2.5 m'dir. Dizilim geometrisine göre; AGG yöntemi için kullanılabilecek üçlü alıcı grubu sayısı toplam 3 olmaktadır (Şekil 5.45).



Şekil 5.45 : Üstte, 2B konvansiyonel dizilimin merkezinde, 5 m yarıçap içindeki alıcı geometrisi verilmektedir. AGG yönteminde kullanılabilecek alıcı üçlüleri farklı renklerde oklarla işaretlenmiştir. Altta, gradiyometrik alıcı üçlülerinden birindeki ASG kayıtlarının AGG ile analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD paneli sunulmaktadır. Kullanılan pencere boyu 1 sn'dir. Beyaz daireler CVFK ve MASW kullanılarak işaretlenen temel mod FHD eğrisini gösterir.

Şekil 5.45'te gradiyometrik üçlü alıcı gruplarından birinin ASG kayıtlarının AGG ile değerlendirilmesi sonucunda hesaplanan FHD paneli sunulmaktadır. Buna göre; aynı sahada gradiyometrik amaçlı toplanan ASG kaydının analiz edilmesi sonucunda elde edilen FHD panelinden farklı olarak, sınırlı bir frekans bandında (~ 5-15 Hz) da olsa temel mod FHD bilgisi CVFK ve MASW'den işaretlenen eğri ile uyumlu görünmektedir. AGG ile hesaplanan FHD panelinde faz hızlarının diğer yöntemlerle uyumlu elde edilebildiği frekans bandı yüksek frekans ucunda analizde kullanılan alıcı gurubundaki

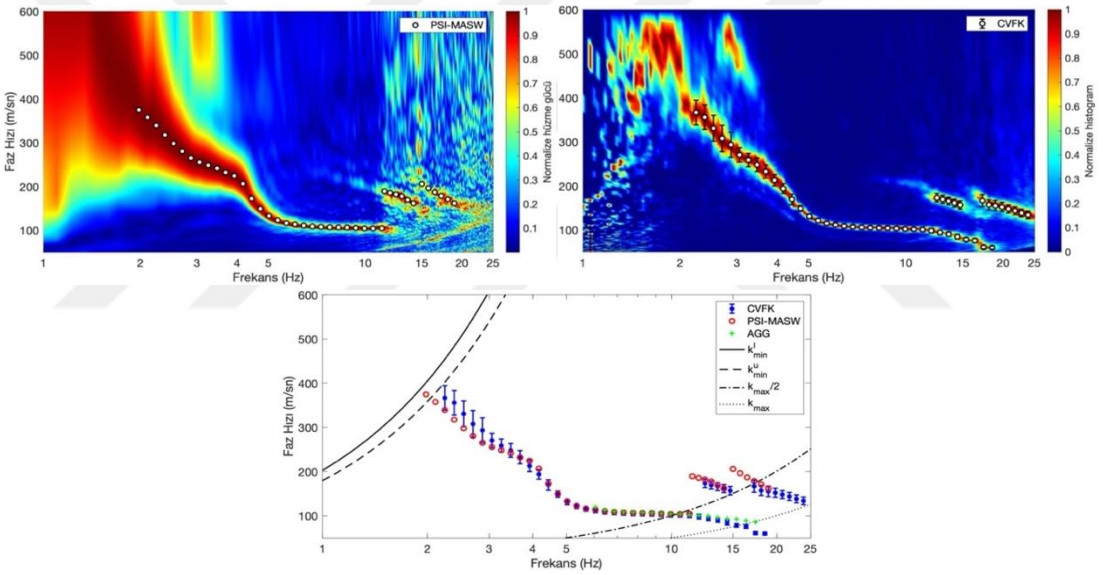
alıcı aralığı ile sınırlanmaktadır. Bu sınırın üstünde (~ > 18 Hz) uzaysal türevlerdeki hataların artmasından kaynaklı olarak faz hızları olduğundan yüksek kestirilmektedir.

Şunu da belirtmek gerekir ki, AGG analizi ile yalnızca 2 nolu gradiyometrik alıcı grubu kullanılarak konvansiyonel yöntemler ile bu kadar uyumlu sonuçlar elde edilebilmiştir. Diğer alıcı gruplarından elde edilen sonuçlar ise bu kadar başarılı değildir. Bunun sebebinin, saha zeminindeki olumsuz koşullar nedeniyle oluşan zemin-alıcı kuplajı sorunları yada alıcıların tam olarak istenilen lokasyona yerleştirilememesi gibi problemler olabileceği değerlendirilmektedir. AGG yönteminde FHD bilgisi gradiyometrik alıcı grupları arasındaki uzaysal türevler üzerinden hesaplandığından, bu türden problemler uzaysal türevlerdeki hataları yüksek oranda arttırma potansiyeline sahiptir.

2B konvansiyonel dizilim ile toplanan ASG verisinin, 2D PSI-MASW ve CVFK kullanılarak analiz edilmesi sonucunda hesaplanan FHD panelleri ve bu panellerden işaretlenen faz hızı eğrilerinin birbirleri ve AGG'den işaretlenen faz hızları ile karşılaştırması Şekil 5.46'da verilmektedir. Buna göre; 2D PSI-MASW ve CVFK'in ~3-12 Hz frekans bandında oldukça uyumlu temel mod faz hızları verdikleri görülmektedir. Yaklaşık 3 Hz ve altındaki temel mod faz hızları CVFK yöntemi ile 2D PSI-MASW yöntemine oranla daha yüksek kestirilmekte ancak yöntemler arasındaki faz hızı farkları genel anlamda CVFK'den hesaplanan standart sapmaların içinde kalmaktadır. Ayrıca, 2D PSI-MASW yöntemi ile temel mod faz hızı branşının 2 Hz'in altına kadar elde edilebildiği görülmektedir. FHD panellerinin yüksek frekans bölümünde, temel mod faz hızı branşı, 2D PSI-MASW yöntemi ile 12 Hz'e kadar elde edilebilirken CVFK yöntemi ile ~20 Hz'e kadar takip edilebilmektedir.

FHD panellerinde her iki yöntem ile 1. ve 2. yüksek modlar için faz hızı branşları gözlenebilmektedir. Bununla birlikte, 2D PSI-MASW yöntemi ile nispeten daha düşük frekans bandında, CVFK yöntemi ile ise aksine daha yüksek frekans bandında faz hızı bilgisi elde edilmektedir. 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panelinde, 1. ve 2. yüksek mod faz hızı branşları ~ 11.5-15 Hz ve ~ 12.5-15 Hz bandında tanımlıdır. Bununla beraber, CVFK ile hesaplanan FHD panelindeki 1. ve 2. yüksek mod faz hızı branşları ~ 15-19 Hz ve 17-24 Hz bandında elde edilmektedir (Şekil 5.46). Buna göre, hem temel hem de yüksek modlar için FHD bilgisinin geniş bir frekans bandında elde edilmesi açısından iki yöntemin birbirini tamamlayıcı rol oynadığı söylenebilir.

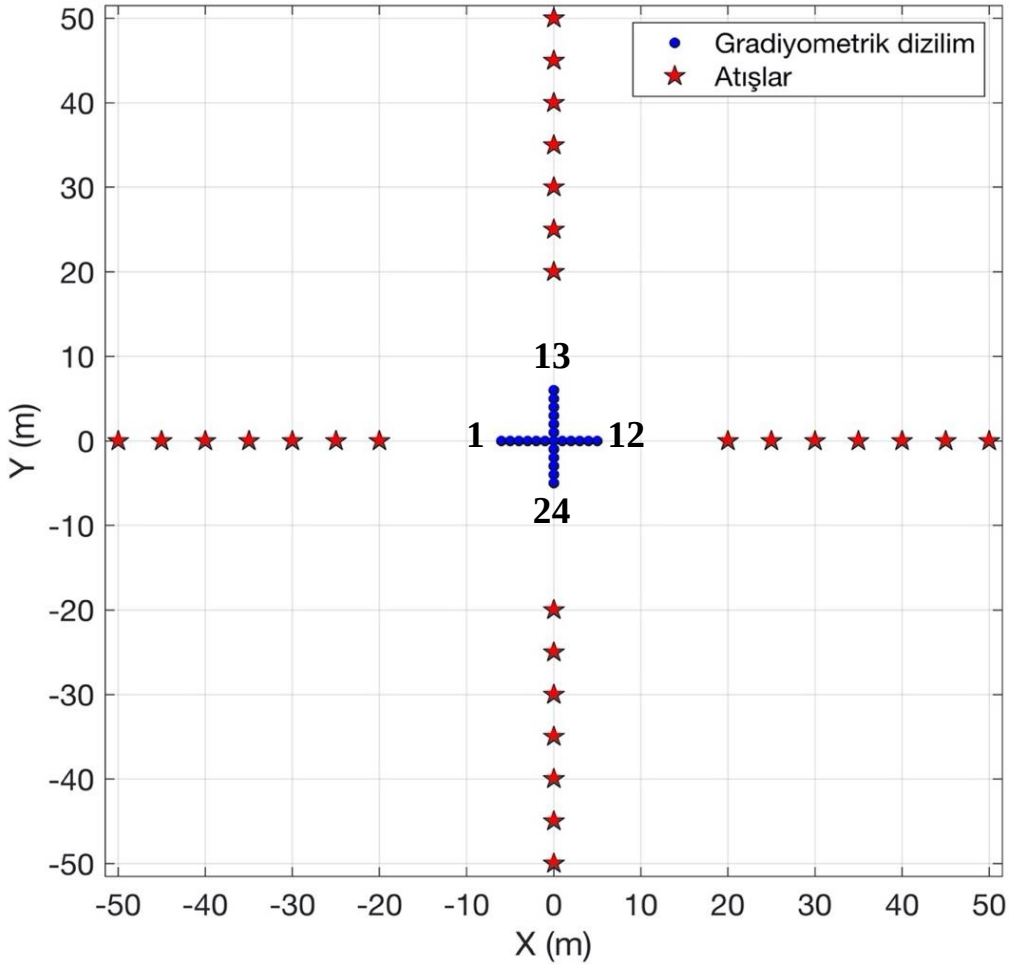
AGG yöntemi ile elde edilen temel mod faz hızı branşı ~ 6-15 Hz bandında diğer iki yöntem ile oldukça uyumlu faz hızları vermekle birlikte, yüksek frekans tarafında ~15 Hz'den itibaren faz hızları diğer yöntemlere göre yüksek kestirilmektedir (Şekil 5.46). Bunun sebebi, yüksek frekans bandında uzaysal türevden kaynaklı hataların artmasıdır. Bu sahadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AGG yönteminin 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerine kıyasla çok daha kısıtlı bir FHD bilgisi sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte, AGG yöntemi için ASG kayıtlarının yalnızca birbirine çok yakın şekilde yerleştirilmiş 3 alıcılı bir gradiyometrik dizilim ile toplanabilir olması yöntemin sahada çok daha pratik ve hızlı şekilde uygulanabilmesini sağlamaktadır. AGG yöntemi bu yönüyle, diğer iki yönteme göre oldukça avantajlıdır ve özellikle zemine ait Vs30'un ve buna bağlı zemin sınıfının belirlenmesinin amaçlandığı sığ çalışmalarda alternatif bir yöntem olma potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 5.46 : G148 ölçüm sahası için konvansiyonel 2B dizilim kayıtlarından hesaplanan (a) 2D PSI-MASW paneli, (b) CVFK paneli, (c) 2D PSI-MASW ve CVFK ile elde edilen temel ve yüksek mod FHD eğrilerinin ve AGG panelinden işaretlenen temel mod FHD eğrisinin karşılaştırılması. Temel, 1. yüksek ve 2. yüksek Rayleigh dalgası modları için işaretlenen dispersiyon eğrileri, (a) ve (b)'de beyaz dairelerle gösterilmektedir. CVFK için hesaplanan standart sapmalar, (b)'de beyaz hata çubukları ile işaretlenmiştir. 2D PSI-MASW panelindeki (a) renk skalası normalize edilmiş hüzme gücünü, CVFK panelindeki (b) renk skalası ise normalize edilmiş sayımı (count) gösterir. (c)'de hata çubukları içeren mavi yıldızlar, kırmızı daireler ve yeşil artılar sırasıyla CVFK, 2D PSI-MASW ve AGG yöntemleriyle elde edilen FHD eğrilerini gösterir. Kullanılan 2B dizilim için çözünürlük ve örtüşme limitleri, lejantta sunulan tanımlarıyla siyah eğriler olarak sunulmaktadır.

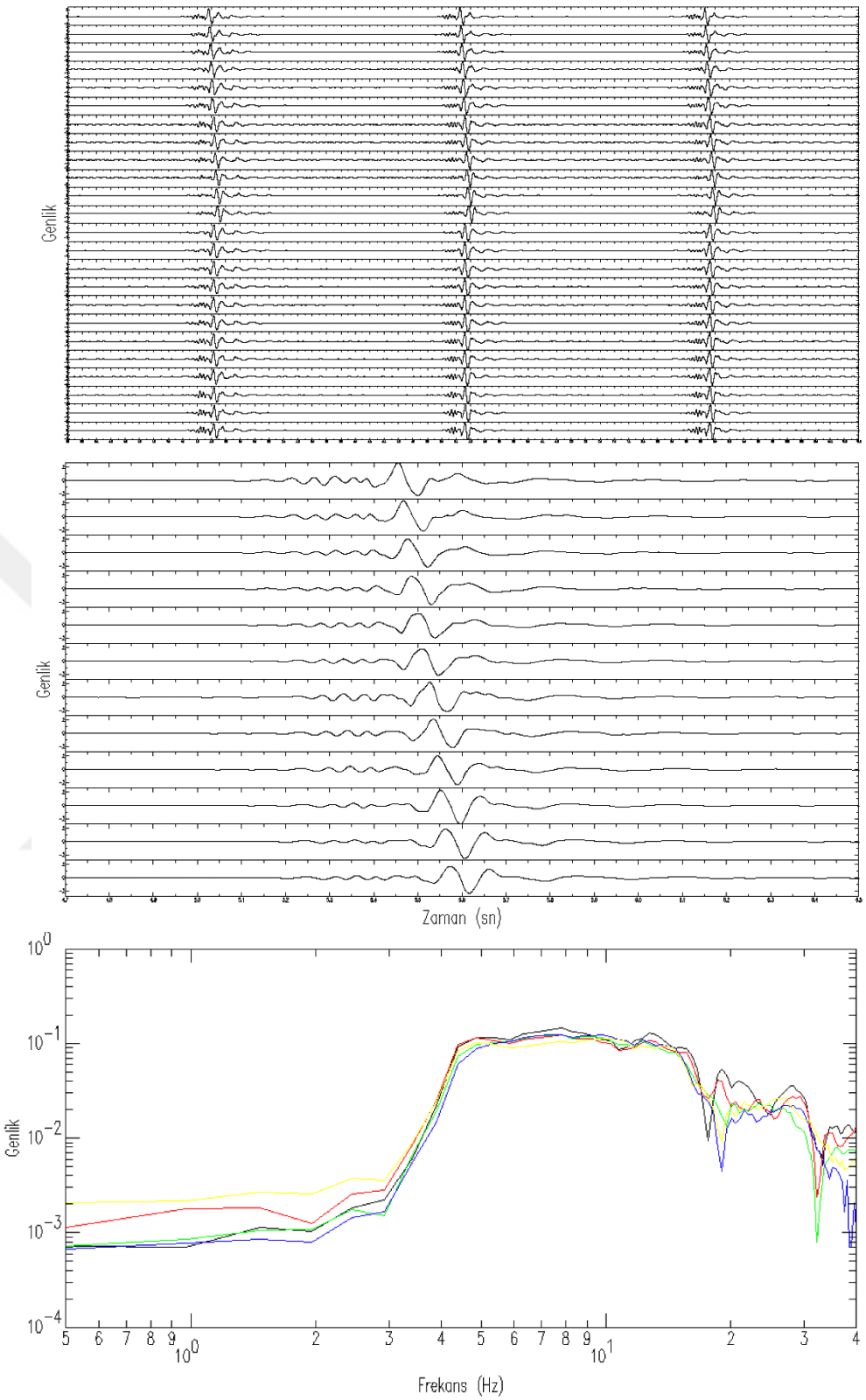
5.4.4 Atış verilerinin AKG yöntemi ile değerlendirilmesi

Gradiyometrik test ölçümleri esnasında alıcı hatlarının doğrultusunda, 20-50 m mesafe aralığında 5 m aralıklı balyoz vuruşları yapılmıştır. Gradiyometrik dizilimin ve yapılan atışların sahadaki konumlarını temsil eden şema Şekil 5.47'de paylaşılmaktadır.



Şekil 5.47 : Gradiyometrik dizilim ve yapılan atışların sahadaki konumunu gösteren şema. Kanal numaraları alıcı dizilimi üzerinde, hat başlarında gösterilmektedir.

Her bir atış kaydında 3 balyoz vuruşu bulunmaktadır. 50 m ofsetli iki atışta ise test amaçlı olarak, balyozdan daha güçlü bir sismik kaynak olan küçük çaplı bir patlayıcı kullanılmıştır. Toplanan atış kayıtlarının uzunluğu 15 sn, zaman örneklemesi ise 0.5 msn'dir. Şekil 5.48'de tüm alıcılar tarafından kaydedilen 104 nolu örnek atış kaydı görülmektedir.

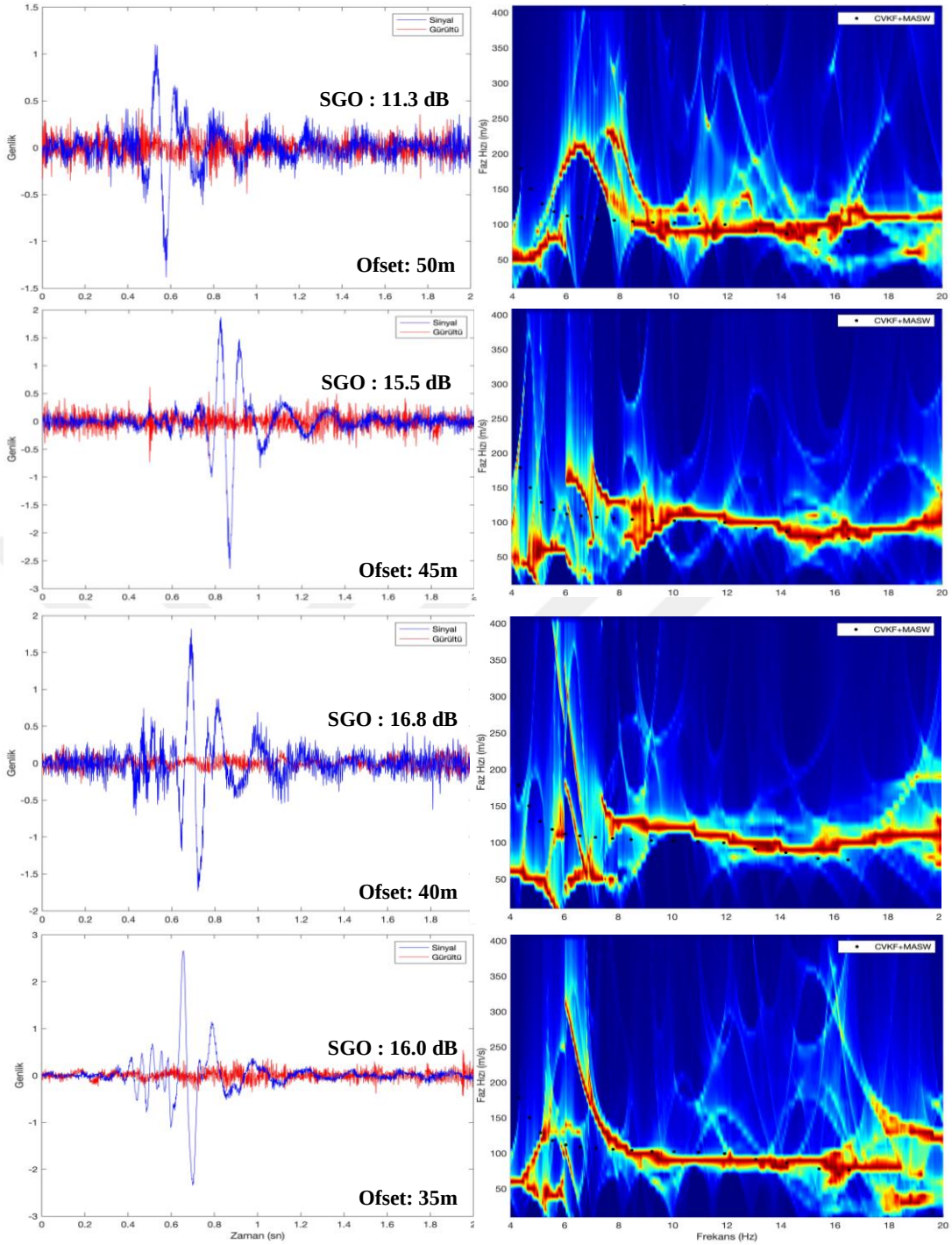


Şekil 5.48 : 35 m ofsetinde yapılan 104 nolu atışın, gradiyometrik dizilimi oluşturan alıcılardaki atış kayıtları (üstte), 1-12 nolu alıcılar tarafından kaydedilen (ortada) aktif atış kayıtları ve ortadaki atışın 2 sn'lik kaydının genlik spektrumu (altta). Sismogramlar 1-40 Hz bandında süzülmüştür.

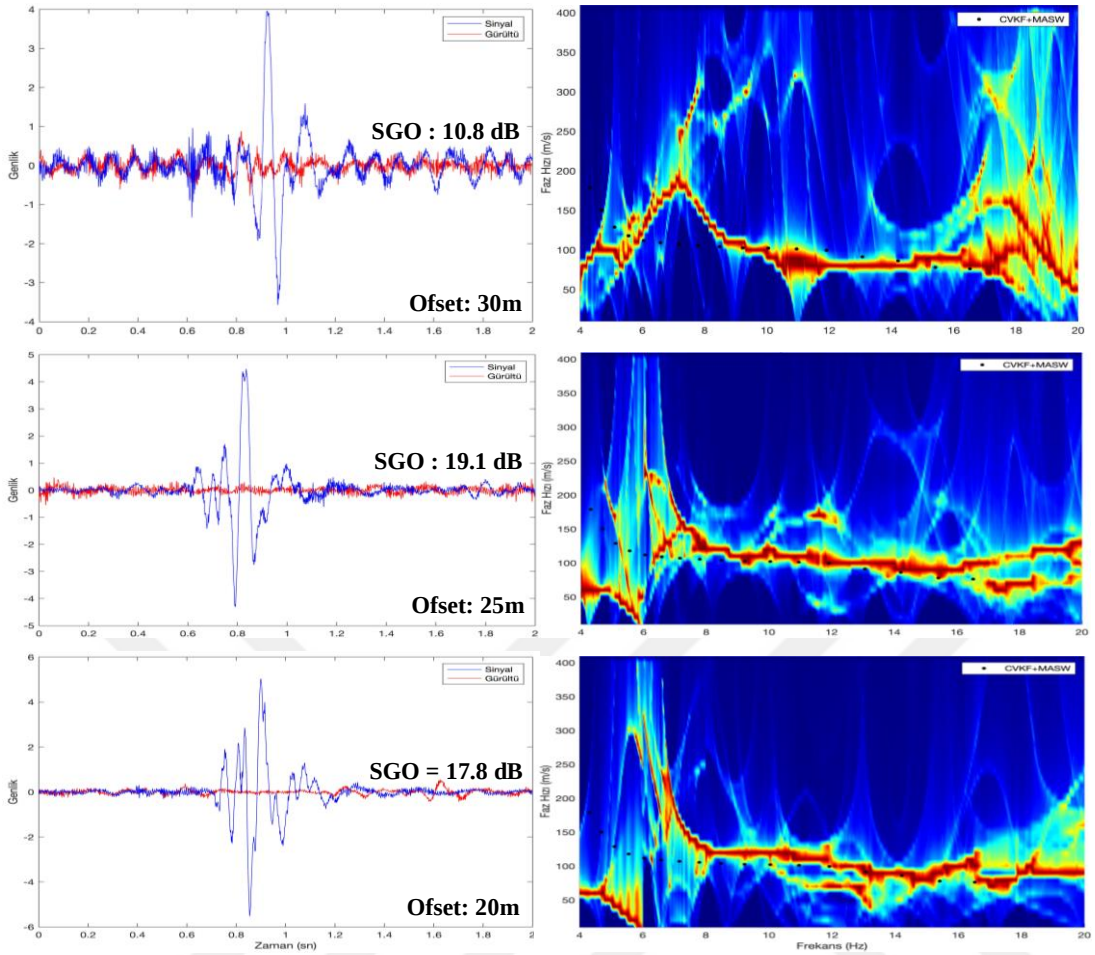
Bu bölümde öncelikle 1 nolu alıcı yönünden yapılan atışlar SGO ve AKG ile yapılan FHD analizi sonuçlarının başarısı açısından örnek olarak değerlendirilmektedir. AKG testleri için 1 nolu alıcı yönünden toplam 7 atış yapılmıştır. Uzaysal türev hesaplamasında BN kullanıldığından, AKG analizleri 1m aralıklı 5'li alıcı grupları ile gerçekleştirilmiştir. Alıcı grubu olarak hat üzerinde atışa en yakın mesafede bulunanlar kullanılmıştır. Her bir atış için, aktif sinyalin yer aldığı zaman pencereleri ve ASG'nin bulunduğu gürültü pencereleri belirlenerek SGO hesaplanmıştır. Her bir atış için SGO hesaplanırken, AKG analizinde kullanılan alıcı grubundaki tüm alıcılar için SGO elde edilmiş olup, sonuç SGO değeri tüm alıcılar için hesaplanan SGO değerlerinin ortalamasından belirlenmiştir.

Aşağıda, bu testte AKG yöntemi ile elde edilen FHD sonuçları paylaşılmaktadır (Şekil 5.49). Sonuçlar incelendiğinde, farklı atışlar için SGO'nun 10.8 ile 19.1 dB arasında değiştiği görülmektedir. FHD panellerindeki faz hızları genel anlamda 8-16 Hz bandında CVFK ve MASW kullanılarak elde edilen birleştirilmiş eğriye yakın ve uyumludur.

Atış verilerindeki SGO değeri baskın olarak ASG koşulları ile belirlenmektedir. Dolayısıyla, ASG koşullarının zamanla çok değişkenlik göstermediği bir sahada, SGO'nun artan kaynak-alıcı grubu ofseti ile azalan bir trend göstermesi beklenir. Ancak bu testte, değişken ofsetlerdeki alıcı gruplarına ait atış kayıtlarından hesaplanan SGO'lar ile ofset arasında doğrusal bir ilişki gözlenmemektedir. Örneğin; 30 m gibi kısa bir kaynak-alıcı grubu ofsetinde SGO=10.8 dB gibi diğer atışlara oranla düşük bir değer elde edilirken, en uzak kaynak-alıcı grubu ofseti olan 50 m'de dahi SGO daha yüksektir (11.3 dB). Bununla beraber, sonuçlara dayanarak, AKG ile hesaplanan FHD panellerinde tanımlı temel mod branşının CVFK ve MASW yöntemlerinden elde edilen FHD eğrisi ile uyumunun yalnızca SGO'ya bağlı olmadığı değerlendirmesi de yapılabilir. Genel anlamda uzun (45 - 50m) ofsetlerde FHD analiz sonuçları diğerlerine göre daha başarısızdır. Bu değerlendirme, 45 ve 50 m ofsetlerinden hesaplanan FHD panellerindeki çözünürlüğün düşük olması, CVFK ve MASW uygulanarak işaretlenen FHD eğrisi ile uyumun düşüklüğü ve panelde net şekilde görülen saçılmalar üzerinden yapılmaktadır (Şekil 5.49).



Şekil 5.49 : 1 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 50m, 45m, 40m, 35 m, 30m, 25m ve 20m ofsetindeki vuruşların 1 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.



Şekil 5.49 (devamı): 1 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 50m, 45m, 40m, 35 m, 30m, 25m ve 20m ofsetindeki vuruşların 1 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.

En kısa kaynak-alıcı grubu ofseti için hesaplanan FHD panelinde de benzer çözünürlük düşüşü ve saçılmalar oluşmaktadır. Bu ofsette, Rayleigh dalgası paketinin oluşması için yeterli mesafenin bulunmadığı değerlendirmesi yapılabilir. Dolayısıyla, özellikle düşük frekans bandında (< 8 Hz), ofsetin analiz edilen sinyallerin dalga boyuna göre kısa kalması nedeniyle yakın alan etkilerinin görülmesi olasıdır. En iyi FHD sonuçları, 35 m ofsetinde elde edilmiş olup, genel anlamda 25-40 m ofset aralığı için görece daha başarılı FHD panellerinin hesaplandığı görülmektedir.

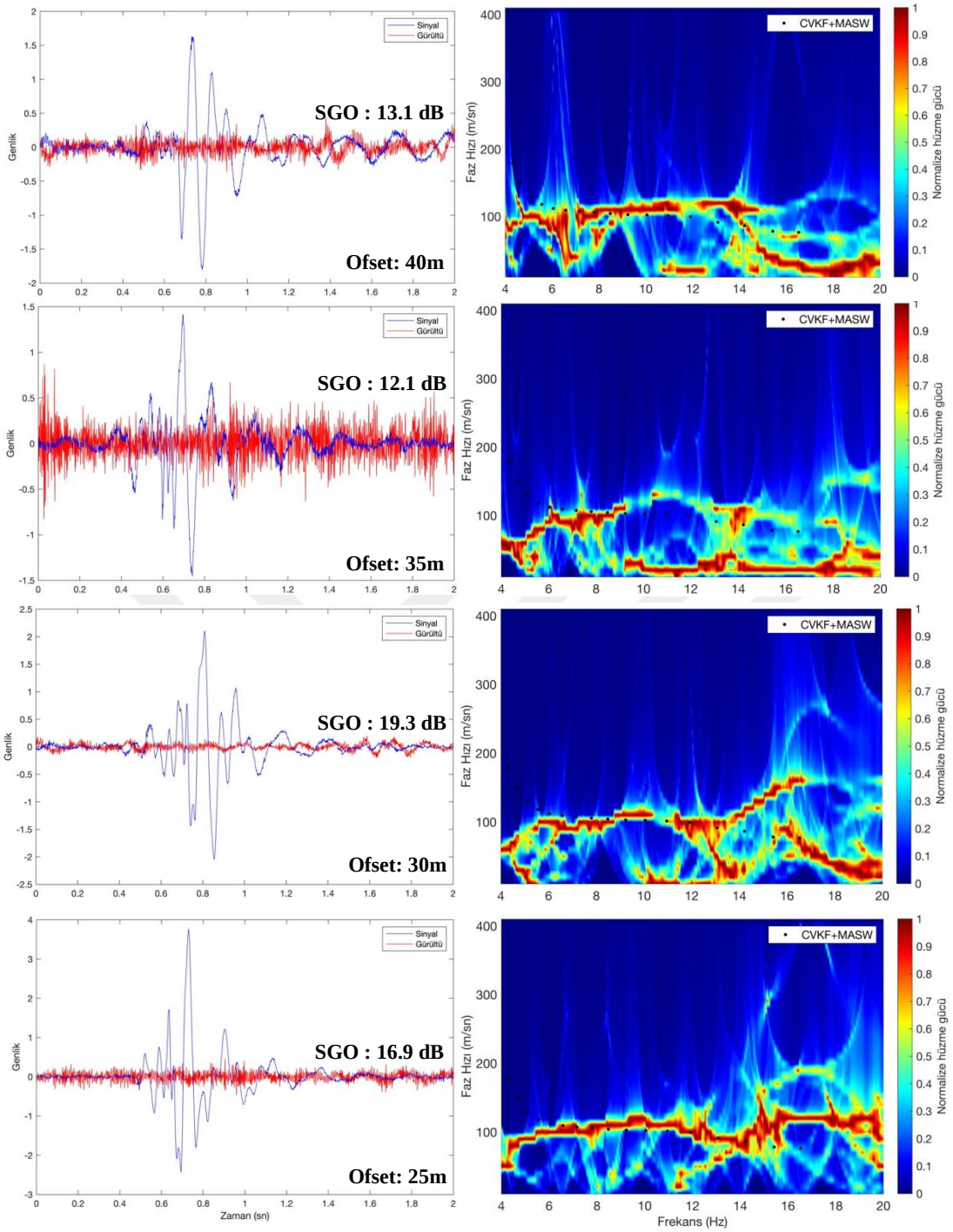
Ofsetten bağımsız olarak, elde edilen tüm FHD panellerinde, yaklaşık 16 Hz frekansı ve bunun üstünde faz hızları yüksek kestirilmektedir. Bu frekansta, temel mod faz hızı branşının gösterdiği değer 90 m/sn civarındadır ve buradan ilgili dalga boyu 5.6 m olarak belirlenebilir. Uzaysal türev hesaplamasında BN yöntemi kullanılmakta ve bu

yöntem ile uzaysal türev hatalarının belirli bir seviyenin altında (en fazla %10) tutulabilmesi için alıcı aralığının dalga boyunun yaklaşık 5'te 1'i ($\Delta x < 0.21\ \lambda$) olması gerekmektedir. Buradan hesaplama yapılarak limit alıcı aralığı 1.18 m olarak belirlenir. Sahada kullanılan alıcı aralığı (1 m) limit alıcı aralığına çok yakındır. Dolayısıyla, 16 Hz'den daha yüksek frekanslar (kısa dalga boyları) için faz hızlarının yüksek kestirilmesi beklenen bir sonuçtur.

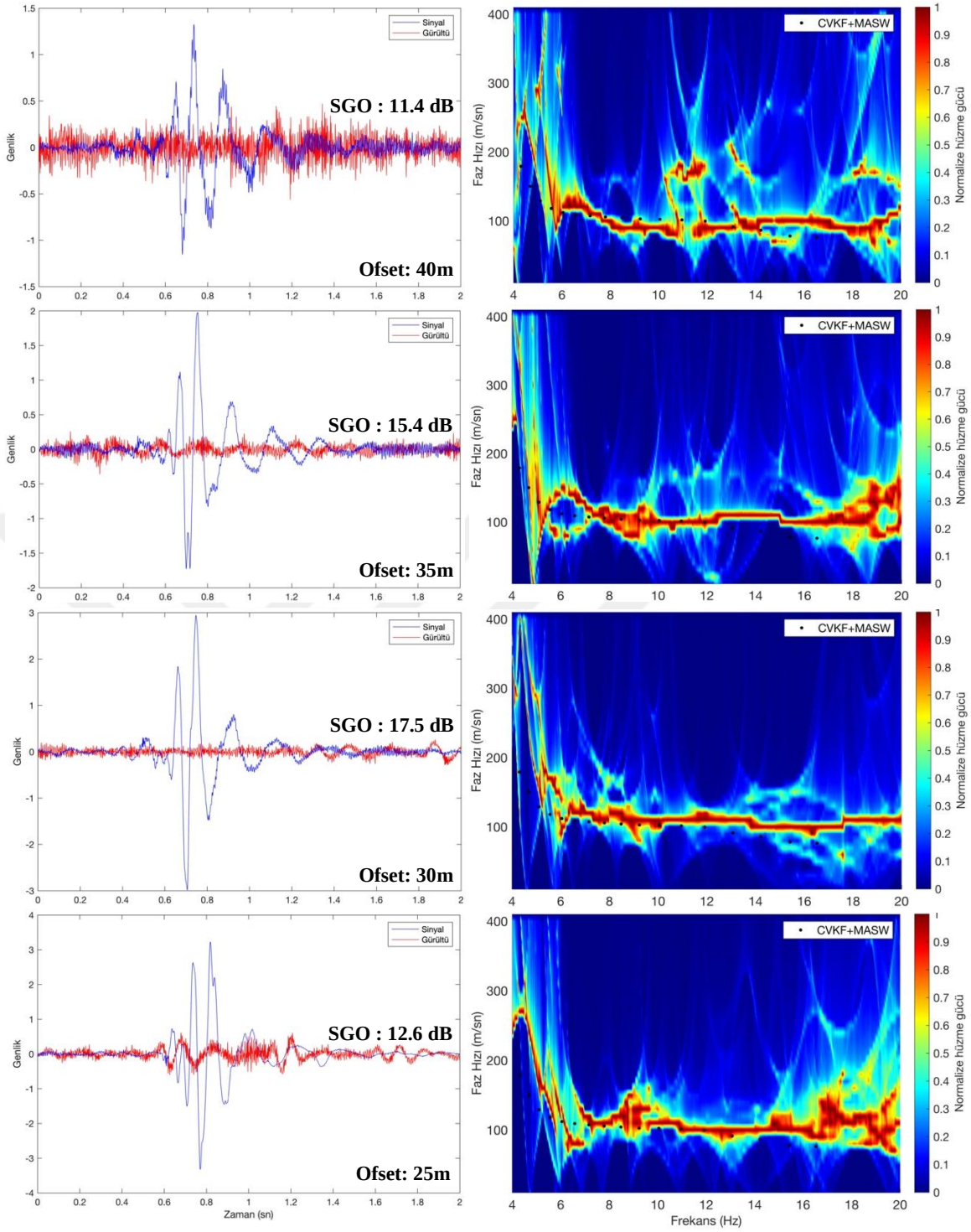
Sahada kaydedilen diğer gradiyometrik atış toplulukları dizilimin uç noktalarına karşılık gelen 12, 13 ve 24 nolu kanallar yönünde yine 20-50 ofsetleri ile toplanmıştır. 1 nolu kanal atışlarından elde edilen FHD sonuçlarından hareketle aşağıda her bir uç alıcı yönünde, 25-40 m ofsetlerine sahip atışların FHD panelleri paylaşılmaktadır (Şekil 5.50 - Şekil 5.52). Şekil 5.53'te ise 1 ve 13 nolu alıcılar yönünde 50 m ofsetinde patlayıcı kaynakla gerçekleştirilen atışlardan hesaplanan FHD panelleri yer almaktadır.

Şekillerden görülebileceği gibi, 12 ve 24 nolu alıcılar yönünde özellikle 25-40 m ofsetlerinde gerçekleştirilen atışlardaki SGO genel anlamda düşüktür (< 13.5dB) ve bu yönlerden yapılan atışlardan hesaplanan FHD panellerindeki çözünürlük de düşüktür (Şekil 5.50 ve Şekil 5.52). Bunun sebebinin, gradiyometrik dizilimin ilgili atışlarda kullanılan bölümleri için zemin şartlarının daha olumsuz (daha fazla çatlaklı ve boşluklu) olması ve dolayısıyla alıcı-zemin kuplajı kaynaklı SGO ve metraj problemlerinin artması olduğu değerlendirilmektedir. SGO'nun belirli atışlar için daha düşük olması sahanın konumundan ve hava şartlarından kaynaklı da olabilir. Saha orta işlekliktе bir bağlantı yolunun kenarında, yola 110 m mesafede yer almaktadır. Ayrıca, ölçüm esnasında rüzgarın şiddetlendiği zaman aralıkları olmuştur. Tüm bu olumsuz etkenler nedeniyle atışların SGO'su genel anlamda düşük ve değişkendir. Sonuç olarak, bu atışlardan hesaplanan FHD panellerindeki faz hızı branşı saçılmaları oldukça yüksek seviyededir (Şekil 5.50 ve Şekil 5.52).

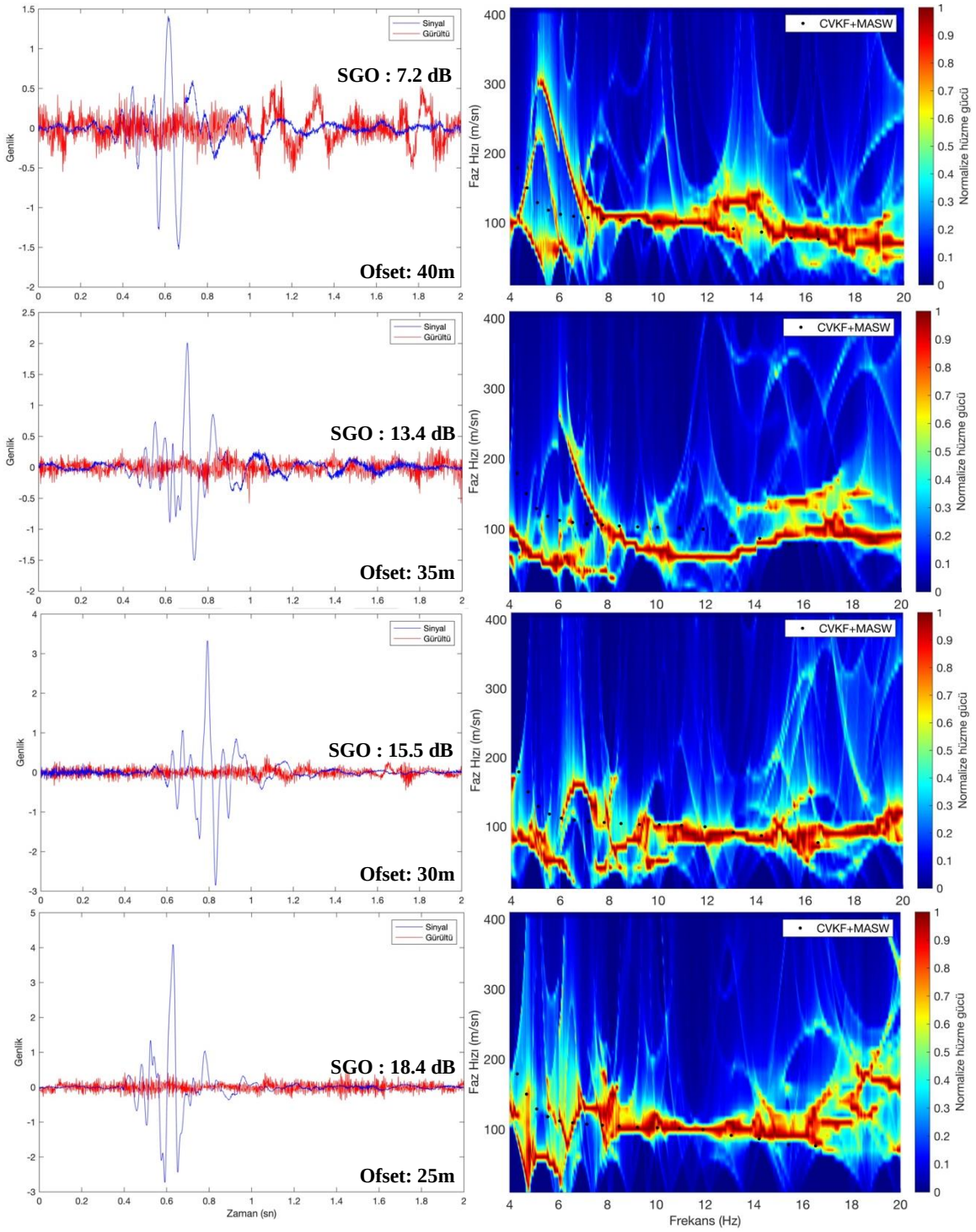
13 nolu alıcı yönündeki atışlardan elde edilen FHD panellerindeki çözünürlük göreceli olarak daha yüksek ve gözlenen FHD branşındaki saçılmalar daha azdır (Şekil 5.51). 25-35m ofsetlerindeki atışlardan, ~8-12 Hz frekans bandında, CVFK ve MASW ile uyumlu FHD bilgisi elde edilebilmektedir. Özellikle, SGO'nun düşük olduğu 25m ve 40m ofsetlerindeki atışlardan hesaplanan FHD panellerindeki çözünürlüğün de daha düşük olması göze çarpmaktadır (Şekil 5.51).



Şekil 5.50 : 12 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 12 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.



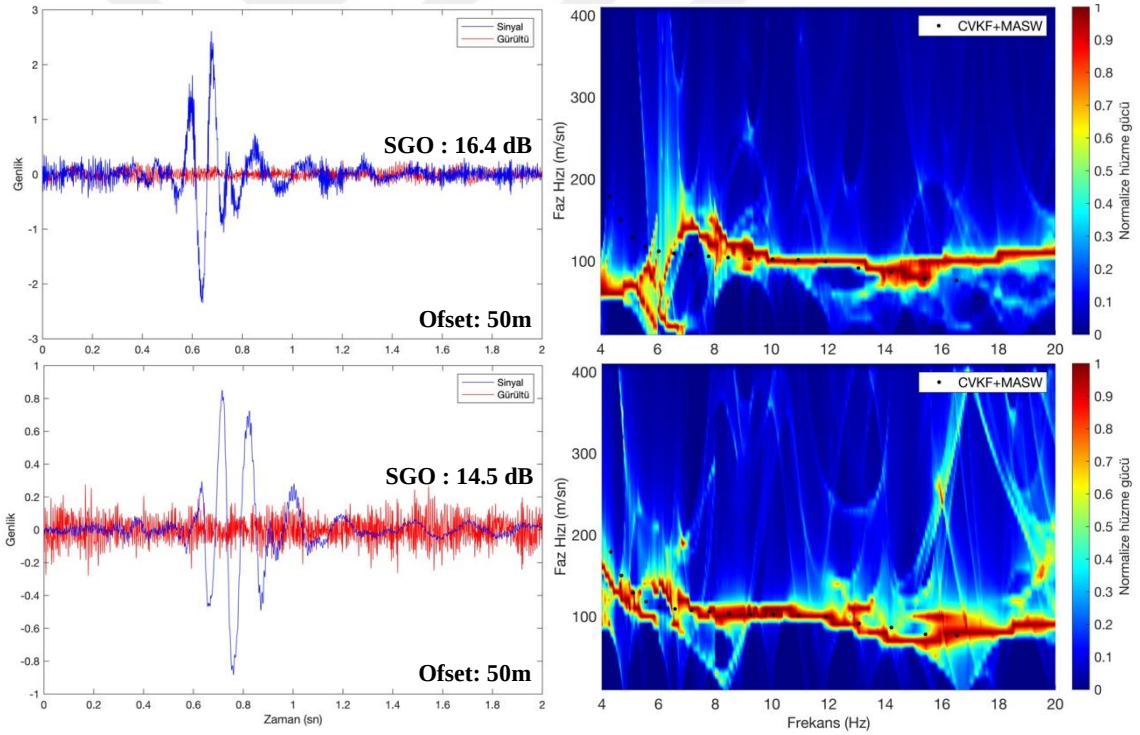
Şekil 5.51 : 13 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 13 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.



Şekil 5.52 : 24 nolu alıcı tarafında yukarıdan aşağıya sırasıyla 40m, 35m, 30m ve 25m ofsetindeki vuruşların 24 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve artalan gürültü sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.

1 ve 13 nolu alıcılar yönünde 50 m ofsetinden patlayıcı kaynak ile gerçekleştirilen atışlardan hesaplanan FHD panellerinde, uzun ofsete rağmen SGO 14 dB'nin üstündedir ve FHD panellerindeki çözünürlük balyoz atışlarının büyük bölümüne göre çok daha iyi düzeydedir (Şekil 5.53). Bu atışlar için temel mod FHD bilgisi ~ 8-15 Hz bandında CVFK ve MASW ile uyumlu şekilde elde edilmektedir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, öncelikle, balyozla yapılan atışlarda ofsetin 30-35 m'nin üstüne çıkmasının genel anlamda SGO'yu düşürdüğü ve yüksek çözünürlüklü ve doğru FHD bilgisi taşıyan panellerin elde edilmesini zorlaştırdığı söylenebilir. Bu sonuç, sentetik atış verilerinden elde edilen sonuçlarla da uyumludur (Şekil 5.27 ve Şekil 5.33). Balyoz vuruşundan daha güçlü sinyaller üreten bir kaynak olan patlayıcının kullanılması, 50 m'ye kadar arttırılan ofsete rağmen, göreceli olarak daha yüksek çözünürlüklü ve daha geniş frekans bandında (~ 8-15 Hz) CVFK ve MASW ile uyumlu FHD bilgisi sağlamaktadır.

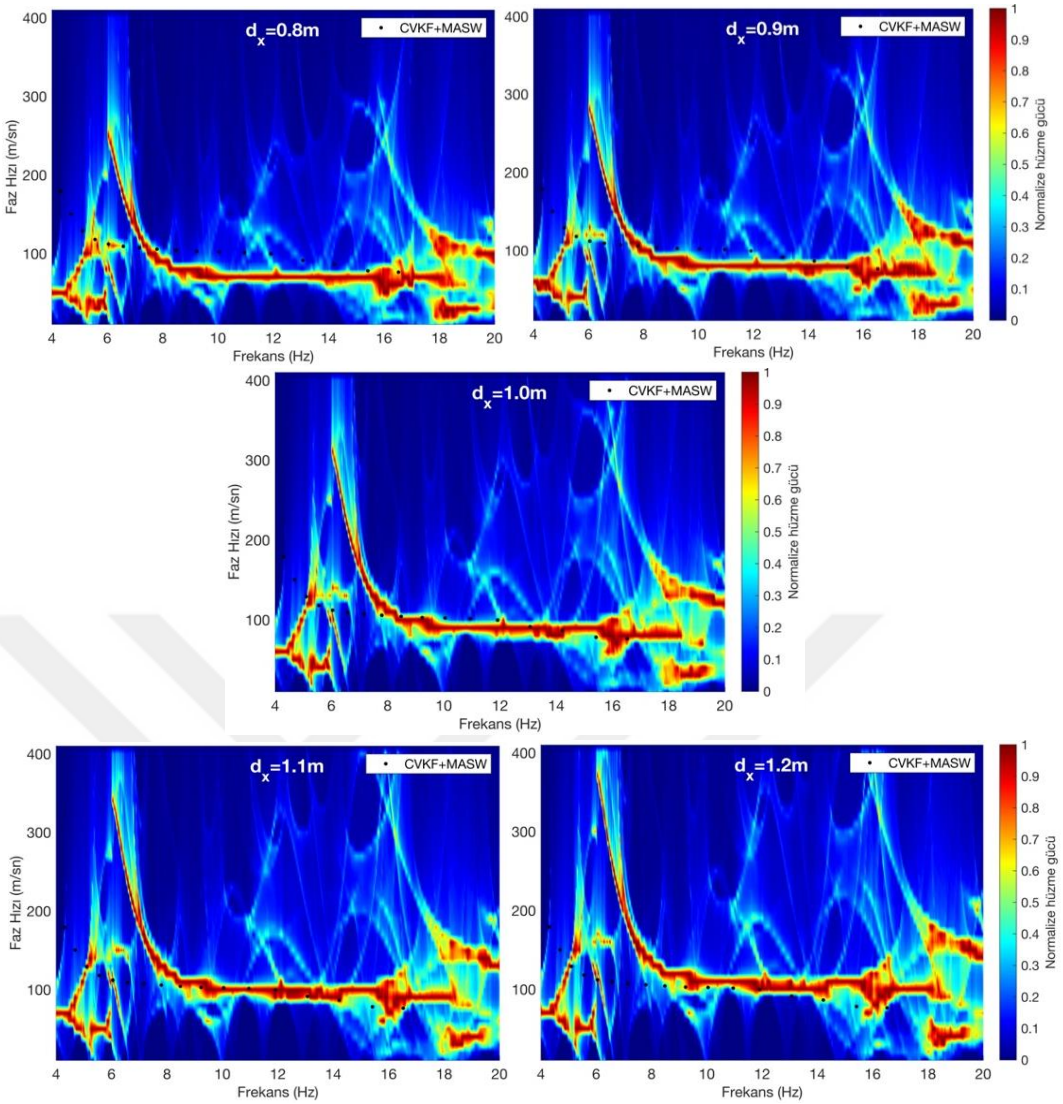


Şekil 5.53 : 1 nolu (üstte) ve 13 nolu (altta) alıcılar tarafında 50m ofsetindeki patlatmaların sırasıyla 1 ve 13 nolu alıcı tarafından kaydedilen atış ve ASG sinyalleri (solda) ve AKG analizi ile hesaplanan FHD panelleri (sağda). CVFK ve MASW yöntemleri kullanılarak aynı noktada elde edilen FHD eğrisi paneller üzerinde siyah daireler ile gösterilmektedir. Ofset ve SGO bilgileri soldaki panellerin üstünde verilmektedir.

Sonuç olarak, olumsuz zemin ve saha koşulları ve zemin-alıcı kuplajı problemlerinin, çoğu atıştan hesaplanan FHD panellerinde gözlenen saçılmaların ve FHD bilgisinin doğru elde edilememesinin başlıca sebebi olduğu değerlendirilmektedir. Bazı atışlarda gürültü penceresinin çok yüksek genlikli olduğu, bu nedenle SGO'nun düştüğü de önemli gözlemler arasındadır. Bu durum, muhtemelen sahada gürültüye neden olan etkenlerden kaynaklıdır. Kayıtlarda, rüzgarın kuvvetli şekilde estiği ve dizilim merkezine 115 m mesafedeki bağlantı yolundan araç geçişlerinin olduğu zaman aralıkları mevcuttur. Yüksek gürültülü kayıtların bu zaman aralıklarına karşılık geldiği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, olumsuz zemin koşullarının etkisiyle kuplajda yaşanan sorunlar nedeniyle gradiyometrik dizilimdeki alıcı aralıklarının tam istenildiği şekilde ayarlanamaması söz konusu olmuştur. Bundan dolayı FHD panellerinde gözlenen faz hızlarında + ya da – yönde kaymalar gerçekleştiği değerlendirilmektedir. Saha uygulaması esnasında, alıcı aralıklarının istenmeyen şekilde, olması gereken lokasyondan bir miktar (±10 cm ve ±20 cm) sapmış şekilde yerleştirilmesi sonucunda, elde edilen FHD branşındaki kaymaları göstermek için bir test gerçekleştirilmiştir.

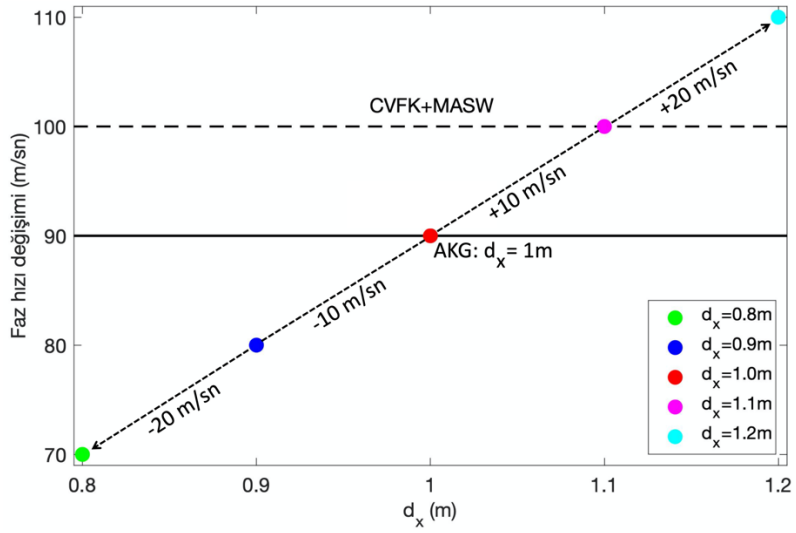
Test için, 1 nolu alıcı yönünde 35 m ofsetinden gerçekleştirilen atış verisi kullanılmıştır. Değerlendirme için bu atışın seçilmesinin sebebi, FHD panelindeki çözünürlüğün göreceli olarak yüksek olması ve faz hızı branşının geniş bir frekans bandında CVFK ve MASW ile uyumlu şekilde elde edilebilmesidir (Şekil 5.49). Amaca yönelik olarak, alıcı aralıkları sırasıyla Δx= 0.8m, 0.9m, 1.1m ve 1.2 m şeklinde manipüle edilerek/saptırılarak FHD panelleri hesaplanmıştır (Şekil 5.54). Şekil 5.55'te ise, alıcı aralığının saptırılması sonucunda faz hızlarında oluşan kaymalar bir grafik ile gösterilmiştir.

Değerlendirme için, FHD panellerinde temel mod branşının sabit bir hızla takip edilebildiği 10-14 Hz frekans bandı kullanılmıştır. Saha ölçümlerinde uygulanan Δx= 1m alıcı aralığı için bu frekans bandında hesaplanan faz hızı 90 m'sn'dir. Δx= 0.8 ve 0.9 m şeklinde saptırılan alıcı aralıkları için bu frekans bandındaki faz hızları sırasıyla 70 ve 80 m/sn olarak, daha düşük elde edilmektedir. Buna karşıt olarak, Δx= 1.1 ve 1.2 m şeklinde saptırılan alıcı aralıkları için aynı frekans bandındaki faz hızları 100 ve 110 m/sn olarak belirlenmektedir (Şekil 5.54 ve Şekil 5.55).



Şekil 5.54 : AKG yöntemi kullanılarak, 1 nolu kanal yönünde, 35 m ofsetinde gerçekleştirilen atışın orijinal alıcı aralığı Δx=1m korunarak ve alıcı aralıklarının küçük miktarda (±10 cm ve ±20 cm) saptırılması ile hesaplanan FHD panelleri. Hesaplamada kullanılan alıcı aralıkları paneller üzerinde verilmektedir.

Ayrıca, alıcı aralığı Δx= 1.1m için hesaplanan FHD panelindeki temel mod branşının CVFK ve MASW kullanılarak elde edilen faz hızı eğrisi (10-14 Hz bandındaki faz hızları 100 m/sn) ile, esasen sahada uygulanması hedeflenen Δx= 1 m için hesaplanan paneldeki branştan daha uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 5.54). Bu sonuca göre; kuplaj problemleri nedeniyle, sahada gerçekleşen alıcı aralığının Δx= 1.1 m civarında olduğu değerlendirmesi yapılabilir. Bununla birlikte, AKG ile FHD analizinde 5 alıcılı bir gradiyometrik alıcı grubu kullanıldığı da hatırlatılmalıdır. Dolayısıyla, sahada gerçekleşen alıcılar arası mesafelerin + ya da – yönde birbirinden farklı olması da muhtemeldir.

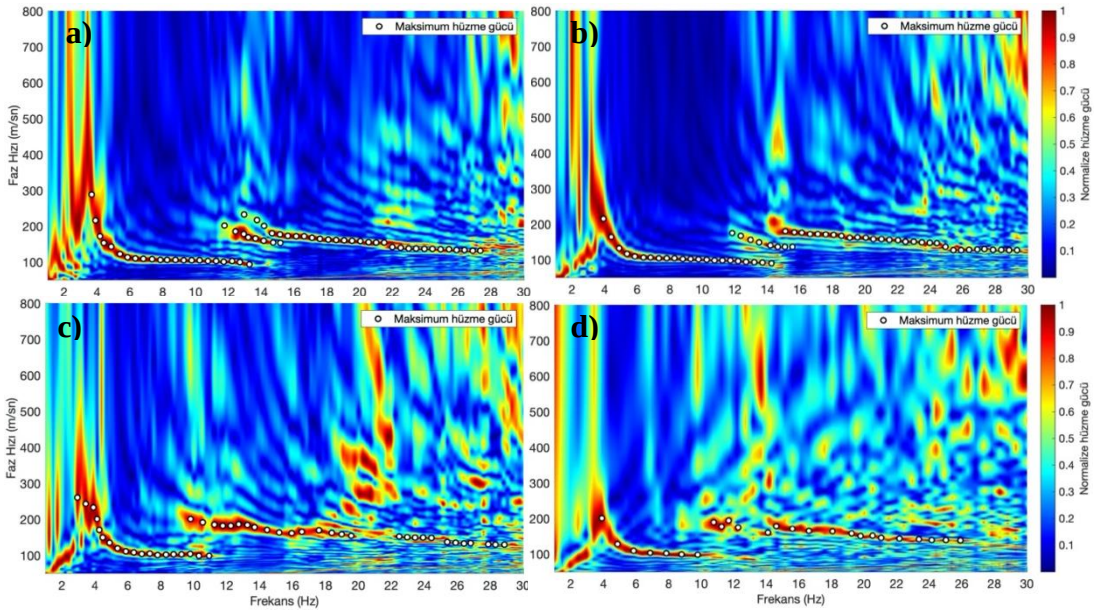


Şekil 5.55 : 1 nolu alıcı tarafından 35 m ofsetinde yapılan atış için 5'li alıcı grubundaki tüm alıcı aralıklarının sahada uygulanması hedeflenen Δx=1 m'den ± 10 cm ve ± 20 cm kadar saptırılması sonucunda FHD panelinde oluşan faz hızı kaymalarını gösterir grafik. CVFK+MASW ve AKG yöntemleri ile Δx=1 m için hesaplanan faz hızları grafikte referans olarak verilmektedir.

Yapılan test göstermiştir ki, alıcı aralığı Δx'in ± 10 cm ve ± 20 cm gibi çok küçük miktarlarda dahi saptırılması, hesaplanan FHD panellerindeki faz hızlarının ± 10 m/sn ve ± 20 m/sn kadar topyekün kaymasına neden olmaktadır. Faz hızlarındaki bu kaymalar sırasıyla, % 11 ve % 22 oranlarına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, AKG yöntemi ile FHD analizinde faz hızlarının en az hata (< %10) ile elde edilebilmesi için alıcı aralığı sapmalarının da % 10'un altında kalması gerekmektedir. Eğer saha koşulları nedeniyle bu sağlanamıyorsa, gradiyometrik dizilimin yerleştirilmesinin ardından her bir alıcı aralığının çok yüksek hassasiyet ile tekrar ölçülerek saha loguna işlenmesi ve hesaplamaların gerçekleşen bu gerçek alıcı aralıkları üzerinden yapılması önerilmektedir. Kısıtlı imkanlar nedeniyle test çalışmasında bu işlemi yapmak münkün olmamıştır. Bunun yanı sıra, sahada yerinde tespit edilemeyen kuplaj ya da buna bağlı metraj sorunlarını telafi etmek için eşleştirilmiş süzgeç (matched filtering) yöntemi üzerinden çalışan bir düzeltme şeması kullanılabilir (Maurer ve diğ., 2012; Sollberger ve diğ., 2015). Eşleştirilmiş süzgecin uygulandığı bir düzeltme şeması ile, atış verilerinde zemine iyi bağlanmamış ya da doğru lokasyona yerleştirilememiş alıcılardan kaynaklanan sinyalleri belirleme ve belirli bir oranda düzeltmenin mümkün olacağı değerlendirilmektedir. Bu noktada, uzaysal türev hesaplamasında kullanılan alıcı grubu için tüm alıcı aralıklarının yukarıda paylaşılan testteki gibi sistematik bir şekilde sapmış olmayabileceği ve her bir alıcı aralığının saha koşullarına bağlı olarak düzensiz şekilde

sapma gösterebileceği de hatılatılmalıdır. Tüm bu nedenlerle, AKG yöntemi ile FHD analizinde, gerçekleşen alıcı konumlarından kaynaklanan hataları en aza ingirmek için saha ölçümlerine başlamadan önce alıcı konumlarının/aralıklarının yerinde hassas (cm mertebesinde) ölçümler ile belirlenmesi ya da veri-işleme aşamasında eşleştirilmiş süzgeçleme gibi iyileştirici prosedürler uygulanması önerilmektedir.

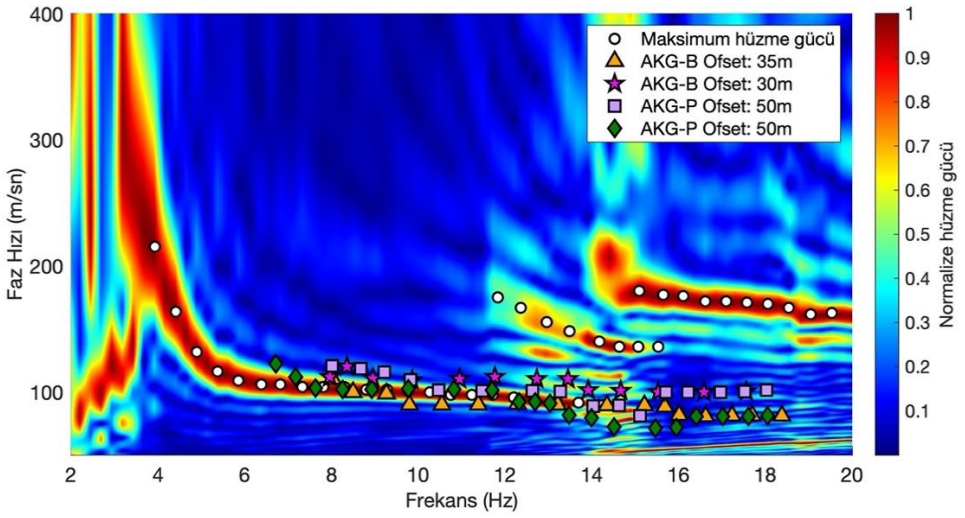
2B konvansiyonel sismik dizilim geometrisi (Şekil 5.37) ile kayıt esnasında, MASW analizine yönelik aktif kaynaklı veri toplamak için toplam 3 noktada atış yapılmıştır. 1 nolu MASW atışı, alıcı geometrisinin merkezinde (0 m, 0 m) küçük çaplı patlayıcı ile gerçekleştirilmiştir. 2 ve 3 nolu atışlar ise alıcı aralığı 5m olan hattın uçlarında, balyoz vuruşu şeklinde yapılmıştır. Atış kayıtları için kullanılan örnekleme aralığı 5 msn'dir. 1 nolu atışta sismik sinyaller, merkezden hattın her iki ucuna doğru yayındığından, bu atıştan iki farklı atış grubu elde edilmektedir. Dolayısıyla, MASW ile değerlendirilen toplam atış topluluğu sayısı 4 olmaktadır. Her atış için, analizde kullanılan toplam açıklık 115 m'dir ve yakın alan etkilerinden kaçınmak ve Rayleigh dalga paketinin sağlıklı bir şekilde oluşmasını sağlayacak yaklaşık minimum kaynak-alıcı mesafesini korumak için kaynak-alıcı ofseti 20 m ve üstünde olan alıcılar analize dahil edilmiştir. MASW analizinden elde edilen FHD panelleri Şekil 5.56'da sunulmaktadır.



Şekil 5.56 : G168 sahasında (a), (b) merkez atışından, (c) 2 nolu atıştan ve (d) 3 nolu atıştan MASW ile hesaplanan FHD panelleri. İşaretlenen maksimum hüzme gücü değerleri paneller üzerinde beyaz daireler ile gösterilmektedir.

MASW ile hesaplanan FHD panelleri incelendiğinde, patlayıcı ile gerçekleştirilen merkez atışından geniş bir frekans bandında, yüksek çözünürlüklü FHD bilgisinin elde edilebildiği görülmektedir. Bu panellerde, temel mod ile 1. ve 2. yüksek mod branşları iyi ayrımlı şekilde elde edilebilmiştir. Balyoz vuruşu ile gerçekleştirilen 2 ve 3 nolu atışlardan hesaplanan FHD panellerindeki mod ayrımlılığı daha düşüktür ve modlar daha dar frekans bantları için tanımlıdır (Şekil 5.56). Bunun sebebi, küçük çaplı patlayıcı kullanılarak oluşturulan atış topluluğunun daha yüksek SGO'ya sahip olmasıdır.

Şekil 5.57'de konvansiyonel sismik dizilimin merkezinden patlayıcı ile yapılan atışın MASW yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda elde edilen FHD paneli, seçilen dört farklı atış için AKG yöntemi ile hesaplanan paneller üzerinden işaretlenen temel mod faz hızları ile birlikte verilmektedir. AKG ile farklı atışlardan elde edilen faz hızı eğrileri, MASW'den hesaplanan temel mod faz hızı branşının etrafında, maksimum ± 20 m/sn fark ile salınmaktadır. AKG ile hesaplanan temel mod faz hızlarının genel anlamda 8-15 Hz frekans bandında MASW'den elde edilen faz hızları ile iyi bir uyum içinde olduğu söylenebilir. MASW yönteminden farklı şekilde, AKG yöntemi ile yüksek modlara ait faz hızları belirlenememiştir. Buna karşılık, temel mod faz hızları, AKG yöntemi ile daha yüksek frekans değerlerine (~ 18 Hz) kadar elde edilebilmektedir.



Şekil 5.57 : Konvansiyonel sismik dizilimin merkezinden gerçekleştirilen atış için MASW yöntemi ile hesaplanan FHD paneli. Panel üzerinde, AKG yöntemi kullanılarak dört atış için hesaplanan FHD panellerinden işaretlenen temel mod faz hızı eğrileri farklı semboller ile verilmektedir. İşaretlenen maksimum hüzme gücü değerleri paneller üzerinde beyaz daireler ile gösterilmektedir. Lejantta, AKG-B balyoz ile, AKG-P ise patlayıcı ile yapılan atışları temsil etmektedir.

G168 sahasında gerçekleştirilen aktif kaynaklı atışların değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AKG yönteminin çoklu modlara ait faz hızlarının belirlenmesi konusunda MASW'ye göre dezavantajlı olduğu ancak temel mod faz hızı branşının görece daha yüksek frekanslarda elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Bununla beraber, AKG yöntemi için atış verilerinin birbirine çok yakın (bir kaç metre aralıklı) şekilde yerleştirilmiş 5 alıcılı bir gradiyometrik dizilim ile toplanabildiği göz önünde bulundurulmalıdır. MASW ile Vs30'un doğru belirlenebilmesi için ise, zemin hız yapısına da bağlı olarak, çok daha uzun maksimum alıcı açıklığına (en az 100 m) sahip, çok alıcılı (en az 24 kanallı) bir alıcı dizilimi kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, AKG yönteminin sahadaki pratik ve hızlı uygulaması ile MASW yöntemine göre önemli bir avantaj sağlayacağı açıktır. Bu yöntem, AGG'ye benzer şekilde, özellikle zeminin Vs30 değerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak zemin sınıfının karakterize edilmesinin amaçlandığı sığ zemin çalışmalarında, uygulaması oldukça pratik bir alternatif yöntem olma potansiyeli taşımaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, sığ zemin koşullarının belirlenmesine yönelik mühendislik sismolojisi çalışmalarında günümüze kadar yaygın olarak kullanılmamış ancak Rayleigh dalgası FHD bilgisinin elde edilmesi açısından potansiyel taşıdığı değerlendirilen yenilikçi bir veri toplama ve işleme şeması olan 2D PSI-MASW yöntemi geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, gradiyometrik çalışma prensipleri sayesinde, konvansiyonel dizilim yöntemlerine göre çok daha az sayıda alıcı ile uygulanabilen ancak literatürdeki uygulamaları oldukça kısıtlı olan AGG ve AKG yöntemleri ile Rayleigh dalgası FHD bilgisinin elde edilmesi üzerinde çalışılmıştır. Sahada toplanan gerçek ASG ve atış verileri ile üretilen farklı özellikteki sentetik veriler üzerinde uygulanan bu yenilikçi yöntemlerin FHD performansları konvansiyonel pasif (CVFK) ve aktif (MASW) dizilim yöntemlerinin sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin FHD performanslarının ve sınırlarının farklı sismik dizilim geometrileri, değişken zemin hız yapısı ve ASG dalga alanı (kaynak dağılımı, mod VE Q içeriği, vb.) koşullarına bağlı olarak karşılaştırılabilmesi için, gerçek saha verilerinin seçimi ve sentetik veri üretimi birbirinden farklı koşulları yansıtacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tezin ilk bölümünde, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin aynı alıcı dizilim konfigürasyonları ile FHD belirleme performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve iki yöntem ile hesaplanan FHD panelleri çözünürlük, doğruluk ve mod elde etme performansları açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; 2D PSI-MASW yöntemi ile, geniş bir frekans bandında, CVFK yöntemine eşdeğer bir temel mod Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde edilebildiği ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, T131 sahasındaki 2B alıcı dizilimine benzer antisimetriye sahip konfigürasyonlar (Şekil 3.2) kullanıldığında, 2D PSI-MASW yönteminin CVFK yönteminden daha iyi mod çözünürlüğü ve ayrımı sunabildiği görülmüştür (Şekil 4.12).

2D PSI-MASW yöntemi uygulamasında veri-işlem aşamaları ve parametrelerinin iyileştirilmesi için bir çok farklı test gerçekleştirilmiştir:

- Zaman ortamı yığma tekniğinin belirlenmesi için gerçekleştirilen testler sonucunda, geleneksel doğrusal yığma yerine, ASG dalga alanındaki faz uyumlu sinyalleri güçlendirilerek daha yüksek SGO'ya sahip SAT'ler ile çözünürlüğü daha yüksek ve buna bağlı olarak daha güvenilir FHD bilgisi sağlayan tf-PWS'nin kullanılması tercih edilmiştir (Şekil 3.8).
- PW-CCF'lerin frekans-ortamı benzeşim prosedürü ile hesaplanması aşamasında etkili bir spektral beyazlatma yapabilmek ve yüksek bir SGO oranı ile dengeli ve yüksek hüzme güçleri elde edebilmek amacıyla zaman penceresi uzunluğu testi yapılmıştır. Kısa ($\leq$ 20 sn) zaman pencerelerinin kullanılmasının FHD panelinde gözlenen yüksek mod branşlarının hüzme gücünü ve mod ayrımlılığını göreceli olarak arttırdığı ve iyi dengelenmiş bir spektrum elde edilmesini sağladığı görülmüştür (Şekil 3.10).
- PW-CCF'lerin uzaysal olarak yığılarak, FHD analizinde uzaysal yığılmış SAT'lerin kullanılması testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, gerçek saha verilerinde görüldüğü gibi zotropik olmayan ASG kaynak dağılımına sahip bir dalga alanı için, uzaysal yığmaya giren alıcı çiftlerine ait PW-CCF'lerdeki sinyallerin bozucu girişime uğradığı ve bu durumun FHD sonuçlarını olumsuz etkilediği değerlendirmesi yapılmıştır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).

Gerçek saha verileri ve üretilen sentetik ASG veri setlerinden 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri kullanılarak hesaplanan Rayleigh dalgası FHD panelleri, yöntemlerin çalışma prensipleri, kullanılan sismik dizilimlerin limitleri, Rayleigh enerji integrali, vb. dikkate alınarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Sentetik ASG veri setleri, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin FHD belirleme performanslarının değişken ASG kaynak yoğunluğu ve yönsel dağılımı, 2B dizilim geometrisi, toplam veri boyu ve mod içeriği koşullarına bağlı olarak karşılaştırılması ve yöntemlerin sınırlarının araştırılması amaçlanarak üretilmiştir.

Sahada toplanan gerçek ASG veri setlerinden elde edilen sonuçlara göre;

- 2B sismik dizilimdeki tüm alıcı çiftleri ile kullanılarak oluşturulan 1B sanal dizilimden hesaplanan simetrik bileşen SAT'ler MASW ile analiz edildiğinde, hem temel hem de yüksek modlar için iyi tanımlı FHD görüntüleri elde edilebilmiştir (Şekil 4.6, Şekil 4.12, Şekil 4.16 ve Şekil 4.22). Buna karşılık, tüm

alıcı çiftleri yerine yalnızca dizilimi oluşturan 1B alıcı hatlarından oluşturulan SAT'lerin MASW ile analiz edilmesi durumunda, izotropik olmayan ASG kaynak dağılımı nedeniyle çok daha düşük çözünürlüklü ve yetersiz mod ayrımına sahip FHD görüntüleri oluşturulabilmiştir (Şekil 4.5, Şekil 4.11, Şekil 4.15 ve Şekil 4.21). Ayrıca, SAT'lerin nedensel ve nedensel olmayan kısımlarının karşılaştırılması sonucunda, ortaya çıkan Rayleigh dalgalarının enerji ve süreklilik açısından önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir.

- Özellikle izotropik olmayan ASG kaynak dağılımı koşullarında, 2B dizilimi oluşturan farklı alıcı hatlarından elde edilen edilen FHD bilgisinin hem frekans bandı hem de mod ayrımlılığı açısından yüksek kaliteli FHD panellerinin üretilmesinde birbirini tamamlayıcı rol oynadığı gösterilmiştir. PSİ prosedürü sayesinde, 2B dizilimdeki hat içi ve hatlar arası alıcı çiftleri çok çeşitli yön ve mesafelerin örneklenmesine ve ASG kaynaklarının izotropik olmayan dağılımından kaynaklanabilecek sorunların üstesinden gelinmesine veya bastırılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle, 2D PSI-MASW prosedürünün daha güvenilir ve eksiksiz Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde etmek için tek bir alıcı hattı kullanılmasından çok daha avantajlı olduğu ortadadır.

- 2D PSI-MASW yöntemi, tüm sahalarda geniş bir frekans aralığında CVFK yöntemiyle benzer FHD sonuçları vermektedir. Buna karşılık, T131 sahasındaki gibi antisimetrik bir 2B dizilim konfigürasyonu için, 2D PSI-MASW yönteminde oluşturulan 1B sanal dizilim, CVFK yöntemiyle kıyaslandığında daha yüksek mod çözünürlüğü ve ayrımlılığı sağlamaktadır (Şekil 4.12 ve Şekil 4.51). Bu sonuç, temel modun yanı sıra yüksek mod faz hızlarının da zemine ait sığ V_s profillerinin belirlenmesinde kullanılmasının daha yüksek doğruluklu sonuçlar sağladığı bilindiğinden oldukça önemlidir. T131 sahası için mod ayırma kapasitesi ile ilgili sunulan örnek analiz, 2D PSI-MASW yönteminde kullanılan 1B sanal dizilimin DTF 'sinin düşük genlikli yan salınımlara sahip küçük bir k_{min}^{v} değerine sahip olduğunu (Şekil 4.25) böylece yüksek mod ayrımlılığını CVFK yönteminden daha başarılı bir şekilde sağladığını açıkça göstermiştir (Şekil 4.12). Öte yandan, H148 ve T051 sahalarında kullanılan orijinal 2B dizilimler için hesaplanan DTF' lerin dalga sayısı çözünürlük limitleri hemen hemen tüm yönlerde aynıdır ve 1B sanal

dizilime ait DTF' lerin çözünürlük limitleri, orijinal 2B dizilimlerinkine çok benzerdir (Şekil 4.25). Dolayısıyla, H148 ve T051 sahaları için 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri ile elde edilen FHD bilgisinde, kullanılan dizilimlerin DTF performanslarından kaynaklı önemli bir farklılık gözlenmemiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.16).

- T051 sahasında kullanılan yelpaze şekilli 2B dizilim geometrisi, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemleri için tez çalışmasındaki en kaliteli FHD sonuçlarını vermiştir. Saha ölçümlerinde kullanılan yelpaze şeklindeki alıcı geometrisinin (Şekil 3.2) çok daha yoğun bir uzaysal örnekleme sağlaması, dolayısıyla diğer sahalarda kullanılan artı şekilli dizilim geometrilerine göre daha iyi bir alıcılar arası vektör dağılımı sunması sayesinde, elde edilen FHD panelindeki faz hızları en düşük belirsizliklere sahiptir (Şekil 4.16). Elde edilen bu sonuç, ASG dalga alanının çoğunlukla izotropik olmayan doğası da göz önünde bulundurulduğunda, kullanılan 2B sismik dizilimin yeterli yönsel örneklemeye sahip olmasının, güvenilir ve eksiksiz bir FHD eğrisi elde edilmesindeki önemini açıkça ortaya koymuştur.
- Dört farklı ölçüm sahasından elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 2D PSI-MASW yönteminin geniş bir frekans aralığında (2–23 Hz) CVFK yöntemiyle karşılaştırılabilir FHD sonuçları verdiği görülmüştür. İki yöntemle elde edilen temel mod faz hızları, genel olarak dizilimdeki en büyük alıcı açıklığı tarafından belirlenen teorik çözünürlük sınırlarına (k_{min}) yakın ya da daha düşük frekanslarda en fazla %14 farklılık göstermektedir (Şekil 4.6, Şekil 4.12, Şekil 4.16 ve Şekil 4.22). Düşük frekans bandında gözlenen bu faz hızı farklarının sebeplerinden birinin kullanılan sismik dizilimlerin çözünürlük kapasitelerinin kısıtlılığı olduğu değerlendirilmektedir.

2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin FHD performanslarının karşılıklı olarak değerlendirilmesi için üretilen sentetik ASG veri setleri ile de testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlara göre;

- ASG kaynak yoğunluğunun değişmesinin yöntemlerin faz hızı performansları üzerinde kritik bir etkisinin olmadığı, buna karşılık CVFK ile elde edilen faz hızlarının dizilimin uzaysal çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekans bandında (< 2-3 Hz) artan kaynak yoğunluğunun sonucu olarak teorik eğriden

uzaklaşma eğiliminde olduğu ve hesaplanan standart sapmaların da benzer şekilde bir miktar yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.32-Şekil 4.36). 2D PSI-MASW yöntemi için ise tüm kaynak yoğunlukları için uzaysal çözünürlük limitleri dışında kalan düşük frekans bandında (< 3 Hz) faz hızlarının teorik eğriden yüksek kestirildiği belirlenmektedir. Buna karşılık, DTF'e bağlı olarak hesaplanan uzaysal çözünürlük limit eğrileri arasında kalan bölgede ve limitler dışındaki düşük frekans bandında, her iki yöntemin teoriden beklendiği gibi FHD bilgisini bir miktar yüksek kestirdiği sonucu elde edilmiştir.

- Kullanılan veri boyunun kısalması (3600 sn'den 300 sn'ye) her iki yöntem ile belirlenen faz hızlarının düşük frekans bandında (< 3 Hz) teorik eğriden uzaklaşmasına ve özellikle 2D PSI-MASW yöntemi için FHD'nin daha yüksek kestirilmesine neden olmaktadır. Yüksek frekans bandı (> 3 Hz) için ise veri boyunun değiştirilmesi FHD sonuçları üzerinde etkili olmamaktadır. Bunun yanı sıra, veri boyunun 1800 sn ya da 3600 sn olarak kullanılmasının, düşük frekans bandında (< 3 Hz) işaretlenen FHD eğrilerinde göz ardı edilebilecek kadar küçük değişiklikler yarattığı görülmüştür (Şekil 4.38, Şekil 4.39). Sonuçlar doğrultusunda, ASG dalga alanındaki kaynakların çoğu zaman izotropik dağılım göstermeyeceği de göz önünde bulundurularak, düşük frekans bandında FHD bilgisini en düşük hata ile elde edebilmek için veri boyunun en az 1800 sn ve daha uzun olması önerilmektedir.

- Dizilim geometrisi ve ASG kaynaklarının yönsel dağılımı testlerinde artı (Şekil 4.40) ve yelpaze şekilli (Şekil 4.27) dizilim geometrileri kullanılmıştır. İzotropik dağılımlı kaynaklar ile üretilen ASG sentetikleri üzerinden artı dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde ~ 5 Hz ve altındaki frekanslardaki faz hızları teorik eğriden oldukça yüksek kestirilmekte ve frekansın düşmesi ile teorik FHD eğrisi ile işaretlenen eğri arasındaki fark artmaktadır. Yelpaze dizilim ile elde edilen 2D PSI-MASW panelinde ise FHD eğrisi ~3 Hz frekansına kadar teorik eğri ile oldukça uyumludur. CVFK ile hesaplanan FHD panelleri incelendiğinde, yelpaze dizilim kullanılmasının düşük frekanstaki (< 5 Hz) çözünürlüğü bir miktar arttırdığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, her iki yöntem ile işaretlenen FHD eğrileri yüksek frekans bandında (> 5 Hz) birbirleriyle ve teorik eğriyle iyi şekilde örtüşmektedir (Şekil 4.42). Yelpaze dizilimin, özellikle düşük frekans bandında daha doğru

FHD bilgisi vermesinin nedeni, kullanılan dizilim geometrisinin daha yeterli bir alıcı açıklığı, daha zengin bir uzaysal örnekleme ve dolayısıyla daha az kısıtlayıcı dizilim çözünürlük limitleri sağlamasıdır.

- ASG dalga alanının yönlü ve kullanılan 2B dizilimdeki alıcı hatları ile örtüşmeyen doğrultulardaki kaynaklardan oluşması durumunda (Şekil 4.43), çok sayıda alıcı koluna, dolayısıyla yönsel olarak çok daha çeşitli bir örneklemeye sahip olan yelpaze dizilim 2D PSI-MASW yöntemi uygulamasında artı dizilime göre çok daha doğru FHD bilgisi sağlamaktadır (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47). Buna karşılık, yönsel örneklemesi oldukça yetersiz olan artı dizilim için ASG kaynaklarının yönleri ile alıcı hatları arasındaki azimutal fark açıldıkça faz hızları olduğundan daha yüksek kestirilmektedir. ASG sinyallerinin yalnızca kısıtlı ve alıcı hat doğrultuları ile uyumlu olmayan bir azimut aralığındaki kaynaklardan yayınması, 2D PSI-MASW yönteminin ihtiyaç duyduğu izotropik ASG dalga alanı gerekliliğini ihlal etmektedir. CVFK yöntemi ise ASG dalga alanında baskın olan tekil düzlem dalgalarının yön ve hızlarını belirlemeye yönelik çalıştığından, yöntemin FHD performansının ASG kaynaklarının yönlü olmasından etkilenmediği görülmüştür.

ASG dalga alanında birden çok mod bulunması durumunda yöntemlerin FHD performanlarının nasıl etkilendiği, üç farklı zemin hız modeli için üretilen sentetik veri setleri üzerinden yapılan testler ile eğerlendirilmiştir.

- Testlerde kullanılan tüm ASG sentetiklerinden üretilen FHD sonuçlarında düşük frekanslardaki temel mod faz hızlarının olduğundan yüksek kestirildiği, bu durumun 2D PSI-MASW için daha belirgin olduğu görülmüştür. Ayrıca, 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerinin farklı modların faz hızlarını belirleme performanslarının kullanılan hız modeline bağlı olarak değişiklik gösterebildiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçların nedenlerini daha detaylı iredeleyebilmek için aynı hız modelleri için sentetik atış topluluğu verileri oluşturularak değerlendirilmiş, FHD sonuçları farklı modlar için hesaplanan Rayleigh enerji integralleri ve dizilim limitleri de göz önünde bulundurularak yorumlanmıştır.
- Öncelikle, test edilen tüm hız modelleri için, sentetik atış topluluklarından hesaplanan FHD panellerinin (Şekil 4.55-Şekil 4.57), aynı hız modelleri için üretilen ASG sentetikleri üzerinden 2D PSI-MASW ile hesaplanan paneller

(Şekil 4.49, Şekil 4.51 ve Şekil 4.54) ile neredeyse bire bir örtüştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, ASG sentetiklerinin sağlıklı bir şekilde üretilebildiği değerlendirmesi yapılmaktadır.

- SK04 hız modeli kullanılarak, farklı kaynak yoğunlukları için oluşturulan ASG sentetiğinden 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panellerinde, 1. yüksek mod branşı ~3-20 Hz frekans bandında ya hiç gözlenememekte ya da çok düşük enerjiler ile teorik eğriden sapmış şekilde elde edilmektedir (Şekil 4.49). Bunun en önemli sebebi, kullanılan hız modeli nedeniyle 1. yüksek moda ait enerji integralinin bu frekans bandında temel mod enerji integraline göre 50-100 kat düşük olmasıdır.
- T131 hız modeli için temel moda ait FHD bilgisinin yelpaze dizilim ile daha düşük frekanslara kadar elde edilebildiği görülmüştür (Şekil 4.51). Buna göre; yelpaze dizilimin daha yüksek bir maksimum alıcı açıklığına ve uzaysal anlamda çok daha iyi bir örneklemeye sahip olmasının düşük frekans bandında beklenen şekilde avantaj sağladığı söylenebilir. 6 Hz'in üstünde 1. ve 2. yüksek mod FHD branşları CVFK yöntemi ile birbirinden ayrılamamakta, ~8-12.5 Hz frekans bandında iki moda ait faz hızları arasında değerler elde edilmektedir. ~12.5 Hz'in üstünde ise CVFK yöntemi ile yalnızca 2. yüksek moda ait faz hızları kestirilmektedir. Yüksek modlara ait branşlar, 2D PSI-MASW yöntemi ile başarılı şekilde ayrımlanmakta ve teorik FHD eğrisi ile çok uyumlu faz hızları göstermektedir (Şekil 4.51a, b, e). Bu bağlamda, T131 sentetik ASG verisi için, 2D PSI-MASW yönteminin dizilim geometrisinden bağımsız olarak, 1. ve 2. yüksek mod branşlarını ayırma konusunda CVFK yöntemine göre önemli bir avantaj sağladığı söylenebilir. Elde edilen bu sonuç, T131 sahasında toplanan gerçek veri setlerininin değerlendirilmesi ile üretilen sonuçlar ile tamamen örtüşmekte ve kullanılan 2B dizilimlerin ve bunlar üzerinden oluşturulan sanal dizilimin DTF'leri üzerinden de açıklanabilmektedir (Şekil 4.25c, d ve Şekil 4.52). 2D PSI-MASW yönteminde kullanılan 1B sanal dizilimden hesaplanan DTF'den elde edilen dizilim alt limiti (k_{min}^{v}), CVFK yönteminde kullanılan orijinal 2B diziliminkine göre daha küçüktür ve DTF'in yan salınım genlikleri de ço kdaha düşük seviyededir. Bu nedenle, 2D PSI-MASW ile hesaplanan FHD panelindeki yüksek mod branşı çözünürlüğünün ya da

başka bir deyişle ayrımlılığının CVFK'den elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir.

- İki tabakalı basit yer modeli için elde edilen çok modlu FHD sonuçlarında, temel ve 1. yüksek mod faz hızlarının birbirine çok yakın olduğu 7-8 Hz bandında, bu iki moda ait FHD branşları 2D PSI-MASW ile ayrımlanabilirken, CVFK ile mod ayrımlılığı sağlanamamaktadır. Ayrıca, 2D PSI-MASW ile 2. yüksek mod bilgisinin daha geniş bir frekans bandında (17-25 Hz) elde edilebildiği görülmektedir (Şekil 4.54).
- Çok modlu testlerdeki FHD sonuçları yorumlanırken Rayleigh enerji integrallerinin, modların bağıl enerji dağılımını, buna bağlı olarak da FHD panellerindeki mod görünürlüklerini etkilediği de göz önünde bulundurulmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, SK04 yer modelinden üretilen sentetik veri için, özellikle düşük frekans bandındaki temel mod Rayleigh enerjisinin 1. yüksek moda göre bir miktar düşük kalması (Şekil 4.55), bu frekanslarda temel mod yerine 1. yüksek mod faz hızlarının kestirilmesine neden olmaktadır (Şekil 4.49). Buna karşılık, örneğin T131 yer modelinden hesaplanan temel mod Rayleigh enerji integrali, çok geniş bir frekans bandında (2.5-25 Hz), azalan frekansla birlikte kademeli bir azalım göstermekte ve düşük frekansta yüksek mod enerjilerinin altında kalmamaktadır (Şekil 4.56). Bu nedenle, düşük frekans bandında (< 3 Hz) teorik temel mod faz hızlarını veren FHD panelleri elde edilebilmektedir (Şekil 4.51). İki tabakalı basit hız modeli için elde edilen FHD sonuçlarında 1. yüksek mod enerji integrali ~ 5-8 Hz frekans bandında temel modun üstünde kalmaktadır. Bunun sonucu olarak hesaplanan FHD panellerinde temel mod faz hızı branşı kesintiye uğramakta ve bu frekans aralığı için 1. yüksek mod branşının bir parçası elde edilmektedir. Bunun yanı sıra, ~17 Hz'de 2. yüksek mod enerji integrali yükseliş göstererek 1. yüksek mod ile aynı seviyeye yaklaşmakta, dolayısıyla hesaplanan FHD panellerinde, 1. yüksek mod branşı 17-25 Hz bandında kesintiye uğrayarak, bu aralıkta 2. yüksek mod faz hızları en güçlü şekilde gözlenmektedir(Şekil 4.54, Şekil 4.57).
- Çok modlu testlerde kullanılan tüm hız modelleri için üretilen FHD panellerinde (Şekil 4.49, Şekil 4.51, Şekil 4.54), düşük frekans bandındaki (~ < 4 Hz) faz hızları genel anlamda yüksek kestirilmektedir. Bunun nedeninin ise, kullanılan dizilimin uzaysal çözünürlük limitlerinin (k^u_{min} ve k^l_{min}) sınırlaması

olduğu yorumlanmaktadır. Testlerde kullanılan tüm hız modelleri için üretilen ASG sentetikleri üzerinden hesaplanan FHD panelleri incelendiğinde, temel mod faz hızlarının uzaysal çözünürlük limitleri ile sınırlanan düşük frekanslardan itibaren yüksek kestirilmeye başlandığı ve düşen frekansla birlikte teorik ve hesaplanan faz hızları arasındaki farkın açıldığı görülmektedir (Şekil 4.49, Şekil 4.51, Şekil 4.54). Bu nedenle, hem CVFK hem de 2D PSI-MASW'den hesaplanan FHD panellerindeki faz hızları, k_{min}^{u} ve k_{min}^{l} arasında kalan bölgede ve daha düşük frekans bandında, olduğundan yüksek kestirilmektedir.

Özetle, 2D PSI-MASW yönteminde; tüm olası alıcı çiftlerinden elde edilen SAT'leri 1B sanal bir alıcı topluluğu üzerine izdüşürmek ve simetrik bileşenleri MASW yöntemiyle analiz etmek ASG dalga alanının çok çeşitli mesafeleri ve yönleri içeren yüksek bir uzaysal örnekleme ile örneklenmesini sağlamaktatır. Bunun sonucu olarak doğru ve eksiksiz FHD sonuçları üretilmektedir. Bu bağlamda, 1B tekil alıcı hatlarından elde edilen FHD bilgileri birbirini tamamlayıcı olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, PSİ tabanlı çalışan 2D PSI-MASW'de ASG kaynaklarının izotropik olmayan dağılımından kaynaklanan yanıltıcı etkileri en aza indirmek ve güvenilir/eksiksiz FHD görüntülemesi yapabilmek için iyi bir uzaysal kapsama sağlayan 2B dizilim geometrilerinin kullanılması önerilmektedir. Sahada pratik anlamda kullanılabilecek sınırlı alıcı sayısı da göz önünde bulundurulduğunda, ideal uzaysal örneklemenin sağlanması için, alıcı hatları arasında en fazla 30° azimutal boşluk bulunan yelpaze şekilli dizilim geometrisinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Şekil 4.27). 2D PSI-MASW yöntemi uygulamasında, önerilen bu geometrinin kullanılması ile, ASG dalga alanı yönlü kaynaklardan oluşsa dahi, FHD bilgisinin çok düşük (%1) hatalar ile elde edilebilmesi mümkün olmaktadır (Şekil 4.46 ve Şekil 4.47).

2-D PSI-MASW yönteminin uygulanması, yerel ölçekli sismolojik çalışmalarda güvenilir Rayleigh dalgası FHD bilgisi elde etmek için oldukça etkili bir alternatif sunmakla birlikte, CVFK yöntemi ile kıyaslandığında aşağıda sıralanan avantajlara da sahiptir:

- 2D PSI-MASW yönteminde, CVFK analizinde gözlenmesi mümkün olmayan, aynı aktif atış verisine benzer bir SAT oluşturulması mümkün olmaktadır. Yöntemin en önemli avantajlarından biri de SAT'lerdeki Rayleigh dalga treninin direkt olarak gözlemlenebilmesidir.

- 2D PSI-MASW için uygulanması için MATLAB platformunda yazılan kodlar, CVFK analizine göre çok daha hızlı FHD sonucu vermektedir. Bu avantaj, elde edilen FHD panellerinin saha ölçümleri esnasında hızlıca incelenebilmesini, buna bağlı olarak ilgili ölçüm noktası için yeterli kayıt uzunluğu gibi önemli parametrelerin kayıt esnasında, yerinde belirlenebilmesini sağlamaktadır.
- Ayrıca, 2D PSI-MASW yöntemi uygulamasında genlik bilgisinin de korunması durumunda, özellikle düşük sismik hızlı, gevşek sediman zeminlerde saha yanıtının belirlenmesi çalışmalarının da yürütülmesi münkün olmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde, literatürdeki uygulamaları sınırlı olan AGG ve AKG yöntemlerinin sığ zemin hız yapısına yönelik Rayleigh dalgası FHD bilgisinin belirlenmesi için kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yöntemlerin FHD belirleme performanslarını etkileyen veri-işlem adımları ve parametreler ile ilgili testler gerçekleştirilmiş, yöntemlerin uygulama sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. AGG ve AKG yöntemlerinin FHD belirleme performansları, değişken ASG kaynak yoğunluğu ve dağılımı, pencere boyu, alıcı aralığı, uzaysal türev alma yöntemi, SGO, mod içeriği gibi koşullara bağlı olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar, konvansiyonel yöntemler olan CVFK ve MASW'den elde edilen FHD sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Testler için öncelikle, çok kısa alıcı aralıklarına (Δx=1m) sahip gradiyometrik dizilim geometrileri kullanılarak SK04 hız modeli için sentetik ASG ve atış verileri üretilmiştir.

- AGG yönteminde, ASG verisi kısa zaman pencerelerine bölünerek analiz edilmekte ve yöntem ile doğru FHD bilgisinin elde edilebilmesi için analiz penceresi içerisinde tek bir kaynaktan yayınan güçlü sinyallerin bulunması gerekmektedir. Analiz penceresinde çok sayıda kaynaktan yayınan sinyallerin üst üste binmesi durumunda, yöntem bu sinyallerin yönünü ve hızını doğru kestirememektedir. Sentetiklerin üretilmesinde kullanılan kaynak sayısı arttıkça farklı kaynaklardan üretilen sinyallerin zamanda örtüşmeleri de artmakta ve dolayısıyla girişime uğramaları söz konusu olmaktadır (Şekil 4.28). Dolayısıyla, ASG kaynaklarının çok yoğun olduğu 7200 kaynaklı sentetikte farklı kaynaklardan yayınan sinyallerin yapıcı, yıkıcı ya da karmaşık girişime uğrama ihtimali daha yüksektir. Bunun sonucu olarak, bu kaynak yoğunluğu için AGG ile hesaplanan düşük çözünürlüklü FHD panelinde faz hızlarının

doğru elde edilemediği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, ASG sentetiğinin oluşturulmasında kullanılan kaynak sayısı azaldıkça AGG ile hesaplanan panellerdeki FHD bilgisinin doğruluğu artmakta, en az sayıda kaynaktan (300 kaynak) oluşturulan sentetik veri seti için teorik eğri ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 5.7).

- AGG uygulamasında en iyi FHD sonuçlarını veren analiz penceresi boyunun belirlenmesi ile ilgili testler yapılarak uygun pencere boyu belirlenmiştir. Bunun için her bir kaynak yoğunluğu için farklı uzunluktaki pencere boyları ile AGG analizi yapılmış ve FHD panelleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. Analiz pencere boyunun kısalması ile, pencere içinde yalnızca tek bir ASG kaynağı tarafından üretilen sinyal varışlarının bulunması koşulunun sağlanması ihtimali yükselmekte, buna bağlı olarak FHD bilgisi daha yüksek doğrulukla elde edilmekte, özellikle yüksek frekans bandında (> 3-5 Hz) teorik eğri ile daha uyumlu faz hızları belirlenmektedir. Özellikle 1 ve 3 sn pencere boyları kullanılarak hesaplanan FHD panellerinde elde edilen faz hızı branşları teorik eğri ile oldukça uyumludur (Şekil 5.9).
- AGG analizine adapte edilen örtüşmeli pencere kullanımının, belirli bir zaman dilimindeki veri segmentlerinin birbirini kısmen örtmesine olanak tanıdığı için, özellikle değişken karaktere sahip ASG alanı ile başa çıkmak adına etkili bir yöntem olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, doğrusallık ve benzeşime dayalı olarak gerçekleştirilen analiz penceresi eleme sonucunda, özellikle kaynak yoğunluğunun daha fazla olduğu ASG sentetikleri için düşük frekans bandında (< 4 Hz) FHD panellerinin çözünürlüğünün arttığı belirlenmiş (Şekil 5.11 ve Şekil 5.12) ve bu eleme adımları veri-işlem akışına dahil edilmiştir.
- AGG analizinde alıcı aralığının artması ile yüksek frekans bandında faz hızları olduğundan yüksek kestirilmektedir (Şekil 5.13). Bu durum, artan alıcı aralığı ile AGG yönteminin temelini oluşturan uzaysal türev hesabındaki hataların artmasından kaynaklanmakta ve sonuç olarak yüksek frekans bandındaki FHD bilgisi yüksek doğruluk ile elde edilememektedir. Kısa dalga boyları yani yüksek frekanslar için uzaysal türev üzerinden FHD bilgisinin düşük hata ile hesaplanabilmesi için alıcı aralığının mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Testin sonucu olarak, AGG yöntemi uygulamasında, FHD ters

çözümünde en sığ seviyedeki (ilk bir kaç metre ile bir kaç on metre derinlikteki) katmanların S-dalgası hız bilgisini sağlayan yüksek frekans faz hızlarının doğru hesaplanabilmesi için gradiyometrik dizilimdeki en küçük alıcı aralıklarının 1-2 m olarak seçilmesi gerektiği belirlenmiştir. Özellikle; yüksek frekans bandında çok düşük faz hızlarının (< 200 m/sn) beklendiği bir ölçüm sahasında, dalga boylarının da kısa olacağı göz önünde bulundurularak en küçük alıcı aralığının 1 m'nin üstünde seçilmemesi doğru olacaktır. Buna karşılık, örneğin derin havza yapısının elde edilmesi amaçlı araştırmalarda, ilgilenilen en düşük frekans ve bu frekansa karşılık gelebilecek en uzun dalga boyu (λ_{max})'a uygun şekilde, değişken alıcı aralığına sahip ve daha uzun maksimum alıcı açıklığı (≥ 10m) sağlayan gradiyometrik dizilimlerin tasarlanması önerilebilir.

- Yapılan testler sonucunda ASG dalga alanındaki kaynak gücü dağılımının AGG yönteminin FHD performansı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür (Şekil 5.16 ve Şekil 5.19). Kaynakların uzaysal olarak rastgele dağıldığı durumda, kaynaklardan bazılarının güçlerinin manipüle edilerek diğerlerine göre artırılmasının elde edilen FHD paneli üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır (Şekil 5.16). Buna karşılık, az sayıda kaynağın sinyalleri diğerlerine göre çok daha güçlü olacak ve zamanda örtüşmeyecek şekilde manipüle edildiğinde, çok yoğun kaynak dağılımına sahip bir ASG dalga alanı için dahi başarılı FHD sonuçları elde edilebilmektedir (Şekil 5.19). Bu testin sonucu olarak, ASG dalga alanında zamanda birbirinden ayrımlı sinyaller üreten güçlü kaynakların olması durumunda, bu kaynakların uzaysal dağılımı ve sayısından bağımsız olarak, AGG yöntemi ile FHD bilgisinin yüksek çözünürlüklü ve doğru bir şekilde elde edilebildiği belirlenmiştir. Gerçek gradiyometrik dizilim ölçümleri açısından düşünüldüğünde, ilgili sahada yeterince güçlü sinyaller üreten otoyol, demiryolu, endüstriyel faaliyetler ve diğer kentsel faaliyetler gibi kaynakların bulunması durumunda başarılı sonuçlar elde edilebileceği öngörülmektedir. Bu açıdan, Vs30 amaçlı sığ zemin çalışmalarında ilgilenilen frekans bandında (~4-20 Hz) sinyal üretebilen, ağırlık düşürme gibi güçlü ve duraylı bir yapay kaynağın kullanılması da değerlendirilebilir.
- ASG dalga alanında birden çok sayıda modun bulunması durumunda AGG yönteminin bu modların FHD bilgisini elde etme konusundaki performansının

değerlendirilmesi için üretilen iki modlu ASG sentetiği analiz edilmiş ve elde edilen FHD paneli CVFK sonuçları ile karşılaştırmıştır (Şekil 5.20). Sonuç olarak, AGG yönteminin CVFK ile oldukça benzer FHD bilgisi sağladığı ve yüksek frekans bandında (> 3 Hz) teorik temel mod faz hızlarını CVFK'den daha iyi kestirdiği görülmektedir. Ayrıca, 1. yüksek mod faz hızları panelde yüksek enerji ile temsil edilmemekle birlikte teorik faz hızı eğrisi ile oldukça uyumlu elde edilmektedir.

- SDG yöntemlerii alıcılar arası uzaysal türevlerin hesaplanması ile çalıştığından, AKG uygulamasında kullanılan sayısal türev hesaplama yöntemi, FHD bilgisinin doğru ve güvenilir olarak elde edilmesi açısından çok önemlidir. Sayısal türev hesaplama yöntemi, gradiyometrik dizilimde kullanılması gereken alıcı aralıklarını belirlemektedir. Sentetik atış verileri üzerinde yapılan testler doğrultusunda, BN türev alma yönteminin en doğru ve yüksek frekans bandında en düşük hatalara sahip FHD bilgisini sağladığı görülmüştür. Kullanılan alıcı aralığı Δx=1m için oldukça geniş bir frekans bandında (~4-30 Hz) teorik FHD eğrisi ile uyumlu sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 5.21). Buna karşılık, Δx=2m, 3m ve 5m alıcı aralıkları kullanılarak hesaplanan FHD panellerinde, faz hızlarının doğru elde edilebildiği sınır frekans değeri sırasıyla 16Hz, 10 Hz ve 6 Hz olmaktadır (Şekil 5.22). Bu sonuç, 2m ve üstündeki alıcı aralıklarının yüksek frekans bandında uzaysal çözünürlüğü sağlamak için yeterince kısa olmaması ile ilgilidir. Buna göre, Δx=1m alıcı aralığının ilgilenilen frekans bandı olan 4-30 Hz aralığında, FHD bilgisinin doğru hesaplanması için gerekli ve yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.
- Kaynak-alıcı grubu ofsetinin değişmesi ile AKG yönteminin FHD belirleme performansının nasıl etkileneceğini görmek için gerçekleştirilen testlerde, gerçek saha koşullarına uygun bir veri seti ile değerlendirme yapabilmek açısından Q etkisi eklenmiş sentetik atış verileri kullanılmıştır. Testin sonucu olarak, kaynağa çok yakın ofsetlerde (10 m), özellikle düşük frekans bandında (< 10Hz) hesaplanan FHD panelinin çözünürlüğünün azaldığı ve elde edilen faz hızlarının teorik eğriden uzaklaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, 110 m gibi oldukça uzak bir ofsette düşük frekans bandında (< 8 Hz) FHD panelinin çözünürlüğünün düştüğü ve faz hızlarının özellikle 6 Hz'in altında teorik eğriden uzaklaşma eğiliminde olduğu görülmektedir Buna karşılık; AKG ile FHD

analizinde, 30m ile 70 m aralığındaki kaynak-alıcı grubu ofsetleri için faz hızları geniş bir frekans bandında (4-30 Hz) yüksek doğrulukla belirlene-bilmektedir (Şekil 5.23).

- AKG yöntemi ile FHD bilgisinin doğru elde edilebilmesi için alıcılar arasındaki uzaysal türevin en yüksek doğrulukla hesaplanması gerekmektedir. Dolayısıyla, SGO'nun düşmesinin, uzaysal türev hesaplamasındaki hataları artırarak FHD analizini olumsuz etkileyeceği değerlendirilmektedir. SGO'nun yöntemin FHD belirleme performansı üzerindeki etkisini incelemek için tek modlu, Q etkisi eklenmiş sentetik atış verilerine belirli oranlarda Beyaz Gaussian Gürültü ve gerçek ASG saha verisi eklenmiş, elde edilen gürültülü atış verileri AKG ile analiz edilerek FHD sonuçları MASW yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmıştır (Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.29, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33). Buna göre; SGO= 20 dB ve üstündeki gürültü oranları için AKG ile FHD panellerinin geniş bir frekans bandında teorik eğri ile oldukça uyumlu elde edildiği, daha düşük SGO'larda (< 10dB) ise faz hızlarının teorik eğriden uzaklaştığı ve SGO'nun azalması ile faz hızı hatalarının arttığı gözlenmektedir. Yapılan testler, AKG ile FHD bilgisinin doğru elde edilmesinde atış verisinin SGO'sunun yüksek (≥ 20dB) olmasının çok önemli bir etken olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ofset arttıkça FHD panellerindeki temel mod branşı çözünürlüğü düşmekte ve histogramdaki saçılmalar artmaktadır. Bu durum, artan kaynak-alıcı ofseti sonucunda soğrulmanın daha fazla olmasının etkisiyle atış verisindeki sinyal gücünün azalması ve SGO'nun düşmesi ile ilgilidir. FHD panellerinde ofsetin artması ve SGO'nun buna bağlı olarak düşmesi sonucunda gözlenen bozucu etkiler, beklenen şekilde daha çok yüksek frekans bandında (> 15-20 Hz) etkili olmaktadır. Buna bağlı olarak, yaklaşık 10 dB düzeyindeki bir SGO için artan ofsetlerde (özellikle > 80 m) AKG yöntemi ile doğru FHD bilgisi elde etmek ve paneldeki saçılmalar nedeniyle mod branşını doğru şekilde ve düşük hata ile belirlemek zorlaşmaktadır. Nüfusun ve antropojenik kaynaklı gürültülerin yoğun olduğu şehir ortamında yapılacak ölçümlerde SGO'nun düşük olabileceği de göz önünde bulundurulduğunda, AKG yöntemi ile yapılan FHD analizlerinde kaynak-alıcı grubu ofsetinin çok uzun seçilmemesi gerektiği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, ofsetin genel anlamda 50 m ve altında

tutulmasının ya da değişen ofsetler için farklı yönlerden, çok sayıda atışın yapılmasının faydalı olacağı önerilmektedir.

- Testler sonucunda ayrıca, AKG yöntemi ile hesaplanan FHD bilgisinin değişen SGO düzeylerinden MASW yöntemine oranla çok daha fazla etkilendiği söylenebilir. Bunun en önemli iki sebebi, AKG yönteminin uzaysal gradyan temelli olarak çalışması ve FHD bilgisinin MASW atış topluluğuna oranla çok az sayıda ve birbirine çok yakın yerleştirilmiş alıcı grupları üzerinden belirlenmesidir. MASW yönteminin FHD performansı çoklu alıcılar ile gerçekleştirilen veri-işlemin avantajını yansıtmaktadır. AKG yönteminde ise yalnızca 5'li alıcı grupları üzerinden hesaplama yapılmaktadır.
- Gerçek saha ölçümlerinde karşılaşılabileceği gibi, Q etkisi olan bir zemin ortamı için, gerçek ASG verisinin sentetik atış verisi üzerine gürültü olarak eklenmesinin, yakın kaynak-alıcı grubu ofsetleri için hesaplanan FHD panelleri üzerinde oldukça düşük SGO'larda dahi önemli bir bozucu etki yaratmadığı görülmüştür. Buna karşılık, daha uzak ofsetlerde (> 80 m) gürültünün FHD paneli üzerindeki bozucu etkilerinin arttığı ve özellikle S-dalgası hız modellemesi esnasında sığ tabakaların hızlarının sağlıklı şekilde elde edilebilmesi için gerekli bilgiyi taşıyan yüksek frekans FHD bilgisinin doğru elde edilememesine neden olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.27 ve Şekil 5.33).
- Ortamda birden çok Rayleigh dalgası modunun yayınması durumunda AKG yönteminin FHD belirleme performansının araştırılması ve MASW yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması testi gerçekleştirilmiştir. SK04 hız modeli için elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AKG yöntemi uygulamasında kaynak-alıcı ofsetinin artırılmasının farklı modlara ait FHD branşlarının kısa ofsetlere oranla daha iyi ayrımlanmasına katkı sağladığı (Şekil 5.34) ancak sığ zemin hız yapısı araştırmalarında kullanılagelen konvansiyonel kaynak türlerinin (balyoz, vb.) üretebileceği limitli sismik enerji ve bununla ilintili ulaşılabilecek maksimum kaynak-alıcı ofsetleri (100-150 m) göz önünde bulundurulduğunda, yöntemin, çoklu modların yer aldığı sismik dalga alanındaki FHD bilgisini elde etme konusunda kullanışlı olmayabileceği değerlendirilmektedir. Buna karşılık, MASW ile hesaplanan FHD panelinde temel ve 1. yüksek moda ait faz hızı branşları 4 Hz ve daha

yüksek frekanslar için ayrımlıdır. Özellikle AKG yöntemi ile iki modun tam olarak ayrımlanamadığı yüksek frekans bandında (> 20 Hz), MASW yöntemi kullanılarak, teorik eğriler ile uyumlu faz hızları elde edilebilmektedir. İki tabakalı basit hız modeli için AKG analizi ile elde edilen sonuçlara göre; temel, 1. yüksek ve 2. yüksek mod FHD bilgisinin, mod branşlarının bir arada belirgin şekilde gözlendiği ~24-30 Hz frekans bandında ayrımlı şekilde elde edilebildiği sonucuna varılmıştır (Şekil 5.36). Bunun en önemli sebebi, SK04 hız modelinden farklı olarak iki tabakalı basit yer modelinde farklı modlara ait faz hızlarının bu frekans bandında birbirinden yeterince uzak olmasıdır.

- İki tabakalı basit hız modeli için AKG analizi ile temel modun yanı sıra yüksek modlara ait faz hızlarının da belirli bir frekans bandında ayrımlı şekilde elde edilebilmiş olması, yöntem ile çoklu modların FHD bilgisinin elde edilmesi açısından olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, çalışılan sahadaki zemin hız yapısı, AKG yöntemi ile farklı modlara ait faz hızlarının doğru ve ayrımlı şekilde elde edilmesinde büyük etkiye sahiptir. Bu nedenle, ilerleyen dönemde yapılacak çalışmalarda, farklı mod davranışlarını örnekleyen zemin hız modelleri ile FHD analizi örneklerinin çeşitlendirilmesinin önemi vurgulanmaktadır.

Sahada toplanan gerçek ASG ve atış verilerinin AGG ve AKG yöntemleri ile analiz edilerek FHD bilgisinin elde edilmesi ve sonuçların konvansiyonel yöntem sonuçları ile karşılaştırılması için Gaziantep ilinin Nurdağı ilçe sınırları içerisinde kalan bir ölçüm noktasında kaydedilen gradiyometrik ve geneksel dizilim verileri kullanılmıştır (Şekil 5.37).

- AGG yöntemi ile analiz için öncelikle kaydedilen ASG alanı kaynak olarak kullanılmış ancak bu veri seti ile konvansiyonel yöntem (CVFK ve MASW) sonuçları ile uyumlu FHD bilgisi elde edilememiştir (Şekil 5.41). Sahadaki ölçüm süreleri kısıtlı olduğundan, toplam kayıt süresi oldukça kısa (540 sn) tutulmuştur. AGG ile elde edilen başarısız FHD sonuçlarının bir sebebinin bu kısıtlı kayıt süresi olabileceği ancak bu sonucun, ASG dalga alanını oluşturan farklı kaynaklardan dizilime ulaşan sinyallerin zamanda örtüşmesi nedeniyle de oluşabileceği değerlendirilmektedir.

- Testin sonraki aşamasında, ASG alanındaki sinyallerin gradiyometrik dizilime belirli bir yönden ve baskın şekilde ulaşması durumunda AGG yöntemi ile FHD bilgisinin başarılı şekilde elde edilip edilemeyeceğini görmek amacıyla, dizilime doğru belirli bir yönden ve sabit hızla sürülen saha aracı kaynak olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; analiz edilen dalga alanında güçlü bir kaynak tarafından üretilen sinyallerin baskın olması durumunda, AGG yöntemi ile konvansiyonel CVFK ve MASW yöntem sonuçları ile uyumlu bir FHD bilgisi elde edilebilmekte ancak elde edilen FHD bilgisi, beklendiği şekilde kaynağın üretebildiği frekans bandı ile sınırlı kalmaktadır (Şekil 5.43). Bu sonuç, AGG yönteminin gerçek saha uygulamalarındaki pratik kullanımı açısından önemli bir veri sağlamaktadır. Buradan sonuçla söylenebilir ki, düşük frekans bandında (< 5 Hz) güçlü sinyal üretebilen uygun bir kaynağın (ağırlık düşürme, vb.) kullanılması durumunda AGG yöntemi, kaynağın üret-tiği frekans bandında doğru FHD bilgisinin elde edilebilmesi konusunda potansiyel vadetmektedir.
- Konvansiyonel 2B dizilim geometrisi ile toplanan ASG verilerinin AGG ile analiz edilerek, sonuçların CVFK ve MASW'den elde edilen FHD sonuçları karşılaştırılması ile, temel mod FHD bilgisinin sınırlı bir frekans bandında (~ 5-15 Hz) da olsa CVFK ve MASW'den işaretlenen eğri ile uyumlu olduğu görülmüştür. AGG ile hesaplanan FHD panelinde faz hızlarının diğer yöntem-lerle uyumlu elde edilebildiği frekans bandı analizde kullanılan alıcı aralığı ile sınırlanmakta, yüksek frekans bandında (> 15 Hz) uzaysal türevlerdeki hata-ların artmasından kaynaklı olarak faz hızları yüksek kestirilmektedir (Şekil 5.45 ve Şekil 5.46). Bu bağlamda şunu da belirtmek gerekir ki, AGG analizi ile konvansiyonel dizilimden elde edilen tek bir gradiyometrik alıcı grubu kullanılarak bu uyumlu FHD sonuçları elde edilebilmiştir. Bunun sebebinin, saha zeminindeki olumsuz koşullar nedeniyle oluşan zemin-alıcı kuplajı ya da alıcıların tam olarak istenilen lokasyona yerleştirilememesi gibi problemler olabileceği değerlendirilmektedir. Saha çalışmasından elde edilen sonuçlar doğrultusunda, AGG yönteminin 2D PSI-MASW ve CVFK yöntemlerine kıyasla çok daha kısıtlı bir FHD bilgisi sağladığı söylenebilir. Bununla birlikte, AGG yöntemi için ASG kayıtlarının yalnızca birbirine çok yakın şekilde yer-leştirilmiş 3 alıcılı bir gradiyometrik dizilim ile toplanabilir olması yöntemin

sahada çok daha pratik ve hızlı şekilde uygulanabilmesini sağlamaktadır. AGG yöntemi bu yönüyle, diğer iki yönteme göre oldukça avantajlıdır ve özellikle zemine ait Vs30'un ve buna bağlı zemin sınıfının belirlenmesinin amaçlandığı sığ çalışmalarda alternatif bir yöntem olma potansiyeli taşımaktadır.

- Sahada toplanan gerçek atış verileri AKG ile analiz edilerek elde edilen FHD bilgisi MASW'den hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. AKG ile en başarılı FHD sonuçlarının elde edildiği 1 nolu atış verisi grubunda SGO'nun 10.8 dB ile 19.1 dB arasında değiştiği ve hesaplanan FHD panellerinde, faz hızı değerlerinin genel anlamda 8-16 Hz bandında CVFK ve MASW kullanılarak elde edilen birleştirilmiş eğriye yakın ve uyumlu olduğu gözlenmiştir. Genel anlamda 25-40 m ofset aralığı için görece daha başarılı FHD panellerinin hesaplandığı, kullanılan Δx= 1m'lik alıcı aralığının uzaysal türev hesabındaki kısıtlaması nedeniyle 16 Hz ve üstündeki frekanslar için faz hızlarının yüksek kestirildiği belirlenmiştir (Şekil 5.49).
- Gradiyometrik ölçümlerin gerçekleştirildiği sahadaki zemin koşullarının olumsuz (çatlaklı ve boşluklu) olması ve dolayısıyla alıcı-zemin kuplajı kaynaklı SGO ve metraj problemlerinin bulunması nedeniyle atışların çoğunda yüksek çözünürlüklü FHD panelleri ve doğru faz hızları belirlenememiştir. Bunun yanı sıra, SGO'nun belirli atışlar için daha düşük olmasının sahanın orta işleklikteki bir yola yakın konumundan ve rüzgarın zaman zaman şiddetli estiği hava şartlarından kaynaklı olabileceği değerlendirmesi de yapılmaktadır. Sonuç olarak, balyoz ile yapılan atışların bir çoğundan hesaplanan FHD panellerindeki faz hızı branşı saçılmaları oldukça yüksek seviyededir (Şekil 5.50 ve Şekil 5.52). Bununla birlikte, patlayıcı kaynak ile gerçekleştirilen atışlardan hesaplanan FHD panellerindeki çözünürlüğün balyoz atışlarının büyük bölümüne göre çok daha iyi düzeyde olduğu (Şekil 5.53) ve bu atışlar için temel mod FHD bilgisinin ~ 8-15 Hz bandında CVFK ve MASW ile uyumlu şekilde elde edildiği görülmüştür.
- Küçük çaplı patlayıcının kaynak olarak kullanıldığı, konvansiyonel 1B dizilim ile toplanan atış verilerinin MASW yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda, ~ 4 -30 Hz frekans bandında yüksek çözünürlüklü ve temel, 1. ve 2. yüksek mod branşlarının gözlenebildiği FHD panelleri elde edilmektedir (Şekil 5.56). AKG ile başarılı FHD sonuçları veren atışlardan seçilen faz hızı eğrileri ise,

MASW'den hesaplanan temel mod faz hızı branşının etrafında, maksimum ± 20 m/sn fark ile salınmaktadır. MASW yönteminden farklı şekilde AKG yöntemi ile yüksek modlara ait faz hızları belirlenememektedir. Buna karşılık, temel mod faz hızlarının, AKG yöntemi ile daha yüksek frekans değerlerine (~ 18 Hz) kadar elde edilebildiği görülmüştür.

- Uygun olmayan zemin koşulları ve insan hatası kaynaklı olarak, gradiyometrik dizilimdeki alıcı aralıklarının olması gerekenden ± 10 cm ve ± 20 cm gibi çok küçük miktarlarda saptırılması durumunda hesaplanan FHD panellerindeki faz hızlarının ± 10 m/sn ve ± 20 m/sn kadar topyekün kaymasına, bu kaymaların faz hızlarında % 11 ve % 22 oranlarında yüksek ya da düşük kestirilmesine neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.54 ve Şekil 5.55). Dolayısıyla, AKG yöntemi ile FHD analizinde faz hızlarının en az hata (< %10) ile elde edilebilmesi için alıcı aralığı sapmalarının da % 10'un altında kalması gerekmektedir. Eğer saha koşulları nedeniyle bu sağlanamıyorsa, gradiyometrik dizilimin yerleştirilmesinin ardından her bir alıcı aralığının çok yüksek hassasiyet ile tekrar ölçülerek saha loguna işlenmesi ve hesaplamaların gerçekleşen bu alıcı aralıkları üzerinden yapılması önerilmektedir. Bunun yanı sıra, sahada yerinde tespit edilemeyen kuplaj ya da buna bağlı metraj sorunlarını telafi etmek için eşleştirilmiş süzgeç (matched filtering) yöntemi üzerinden çalışan bir düzeltme şemasının da kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Özetle, üretilen sentetik ve toplanan gerçek saha verilerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda gradiyometrik yöntemlerin FHD belirleme performanslarının SGO'yu düşüren gürültü kaynaklarından ve sahada gerçekleşebilecek kuplaj ve metraj sorunlarından çok daha olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, gradiyometrik yöntemlerin, Zemin hız yapısına da bağlı olarak, yüksek modlara ait faz hızlarının belirlenmesi konusunda konvansiyonel dizilim yöntemleri olan CVFK ve MASW'ye ve 2D PSI-MASW'ye göre dezavantajlı olabildiği gözlenmiştir. Bunun en önemli sebebi, AGG ve AKG yöntemlerinin çalışma prensipleri gereği, zaman ortamında hesaplanan uzaysal türevler üzerinden FHD hesaplanması ve farklı modlara ait faz hızlarının birbirine çok yakın olduğu frekanslarda, mod sinyallerin zamanda örtüşmesi ile, bu modlara ait faz hızlarını ayırma konusunda başarısız olmasıdır. Diğer taraftan, konvansiyonel dizilim yöntemleri ve 2D PSI-MASW'nin FHD performansları, uzun alıcı

açıklığına sahip (> 100 m) çoklu (en az 24 kanallı) alıcı dizilimleri kullanılarak yapılan analiz ile desteklenmektedir.

SDG uygulamalarında, FHD analizine yönelik veriler birbirine çok yakın (en fazla 1-2 m alıcı aralıklı olarak) şekilde yerleştirilmiş, çok az sayıda alıcıya sahip (3 ya da 5 alıcılı) bir gradiyometrik dizilim konfigürasyonu ile toplanabilmektedir. SDG yöntemlerinin sahada bu şekilde pratik ve hızlı uygulanabilmeleri, çok alıcı gerektiren sismik dizilim yöntemlerine karşı sağladıkları en önemli avantajdır. Bu avantajın özellikle yerleşimin ve şehirleşmenin yoğun olduğu ya da farklı sebeplerle geniş açılımlı alıcı dizilimlerinin yerleştirilmesinin mümkün olmadığı sahalar için çok daha kritik olduğu değerlendirilmektedir. Bu yönleriyle, AGG ve AKG yöntemleri, doğaları gereği zorlayıcı kısıtlamalardan muzdarip olmalarına karşın, özellikle zemine ait Vs30 değerinin belirlenmesi ve buna bağlı zemin sınıfının elde edilmesinin amaçlandığı sığ zemin çalışmalarında, uygulaması oldukça pratik ve ekonomik alternatif yöntemler olma potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Aas, A., & Sinha, S. K. (2023). A novel weight-drop seismic energy source for sub-surface characterization, *Journal of Applied Geophysics*, 208, 104887.

Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 35, 415–457.

Aki, K. & Richards, P. G. (1980). *Quantitative Seismology*. San Francisco: W.H. Free-man & Co.

Almendros, J., Ibáñez, J. M., Alguacil, G. & Del Pezzo, E. (1999). Array analysis using circular wave-front geometry: an application to locate the nearby seismo-volcanic source, *Geophysical Journal International*, 136, 159–170. doi:10.1046/j.1365-246X.1999.00699.x.

Asten, M. & Henstridge, J. D. (1984). Array estimators and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins, *Geophysics*, 49, 1828–1837. doi:10.1190/1.1441596.

Baillard, C., Crawford, W. C., Ballu, V., Hibert, C., Mangeney, A. (2014). An Automatic Kurtosis-Based P- and S-Phase Picker Designed for Local Seismic Networks, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 104(1), 394–409. doi:10.1785/0120120347.

Barker, L. M., & Langston, C. A. (2016). Small-scale array experiments in seismic-wave gradiometry, *Seismological Research Letters*, 87(5), 1091-1103.

Beaty K. S., Schmitt, D. R. & Sacchi, M. (2002). Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure, *Geophysical Journal International*, 151(2), 622–631. doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01809.x.

Behm, M., Leahy, G. M. & Snieder, R. (2014). Retrieval of local surface wave velocities from traffic noise – an example from the La Barge basin (Wyoming). *Geophyical. Prospecting*, 62(2), 223–243. doi:10.1111/1365-2478.12080.

Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N., M. & Yang, Y. (2007). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophysical Journal International*, 169, 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.

Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H. & Yang, Y. (2009). A 3D shear velocity model of the crust and uppermost mantle beneath the United States from ambient seismic noise, *Geophysical Journal International*, 177(3), 1177–1196. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04125.x.

Bettig, B., Bard, P. Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C. & Hatzfeld, D. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42(3/4), 281–304.

Bodin, P., Gomberg, J., Singh, S. K. & Santoyo, M. (1997). Dynamic deformations of shallow sediments in the Valley of Mexico, Part I: Three-dimensional strains and rotations recorded on a seismic array, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 87(3), 528-539.

Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. & Bard, P.-Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: a literature review, *Earth Science Reviews*, 79, 205–227. doi:10.1016/j.earscirev.2006.07.004.

Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., ... Verdugo, R. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements, *Geophysical Journal International*, 176(3), 925-937.

Bozdağ, E. & Kocaoğlu, A. H. (2005). Estimation of site amplifications from shear-wave velocity profiles in Yeşilyurt and Avcılar, İstanbul, by frequency-wavenumber analysis of microtremors, *Journal of Seismology*, 9, 87–98. doi:10.1007/s10950-005-5271-8.

Burden, R. L., Faires, J. D. & Burden, A. M. (2015). *Numerical Analysis*. Cengage Learning.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10s, *Earthquake Spectra*, 24, 139–171. doi:10.1193/1.2857546.

Campillo, M. & Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science*, 299, 547–549. doi:10.1126/science.1078551.

Cao, F., H., Liang, C., T., Zhou, L. & Zhu, J. S. (2020). Seismic azimuthal anisotropy for the southeastern Tibetan Plateau extracted by wave gradiometry analysis, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5), e2019JB018395. doi: 10.1029/2019JB018395.

Chávez-García, F. J. & Yokoi, T. (2015). High lateral resolution exploration using surface waves from noise records, *Exploration Geophysics*, 47(2), 123–132. doi:10.1071/EG15020.

Cheng, F., Xia, J., Xu, Y., Xu, Z. & Pan, Y. (2015). A new passive seismic method based on seismic interferometry and multichannel analysis of surface waves, *Journal of Applied Geophys*ics, 117, 126–135. doi:10.1016/j.jappgeo.2015.04.005.

Cheng, F., Xia, J., Luo, Y., Xu, Z., Wang, L., Shen, C., ... Hu, Y. (2016). Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations, *Geophysics*, 81(5), EN57-EN66.

Cheng, F., Xia, J., Xu, Z., Hu, Y. & Mi, B. (2018). Frequency–wavenumber (fk)-based data selection in high-frequency passive surface wave survey, *Survey Geophysics*, 39(4), 661–682. doi: 10.1007/s10712-018-9473-3.

de Ridder, S. A. L. & Biondi, B. L. (2015). Near-surface Scholte wave velocities at Ekofisk from short noise recordings by seismic noise gradiometry, *Geophysical Research Letters*, 42(17), 7031-7038.

de Ridder, S. A. L. & Curtis, A. (2017). Seismic gradiometry using ambient seismic noise in an anisotropic Earth, *Geophysical Journal International*, 209(2), 1168-1179.

Di Giulio, G., Cornou, C., Ohrnberger, M., Wathelet, M. & Rovelli, A. (2006). Deriving wavefield characteristics and shear-velocity profiles from two-dimensional small-aperture arrays analysis of ambient vibrations in a small-size Alluvial Basin, Colfiorito, Italy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5), 1915–1933, doi:10.1785/0120060119.

Di Giulio, G., Ercoli, M., Vassallo, M. & Porreca, M. (2020). Investigation of the Norcia basin (Central Italy) through ambient vibration measurements and geological surveys, *Engineering Geol*ogy, 267, 105501. doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105501.

Dziewonski, A., Bloch, S., & Landisman, M. (1969). A technique for analysis of transient seismic signals, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 59, 427444.

Edme, P. & Yuan, S. (2016). Local dispersion curve estimation from seismic ambient noise using spatial gradients, *Interpretation*, 4(3), SJ17–SJ27. doi: 10.1190/INT-2016-0003.1

Field, E. H. & the SCEC Phase III Working Group (2000). Accounting for site effects in probabilistic seismic hazard analyses of southern California: overview of the SCEC phase III report, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 90(6B), 1–31. doi:10.1785/0120000512.

Foti, S. (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves* (Doktora tezi), Politecnico di Torino, İtalya.

Foti, S. (2005). *Surface wave testing for geotechnical characterization. In Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks* (pp. 47-71). Viyana: Springer Viyana.

Foti, S., Parolai, S., Albarello, D. & Picozzi, M. (2011). Application of surface-wave methods for seismic site characterization, *Surveys in geophysics*, 32, 777-825.

Foti, S., Hollender, F., Garofalo, F., Albarello, D., Asten, M., Bard, P. Y. & Socco, V. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 16(6), 2367–2420. doi:10.1007/s10518-017-0206-7.

Gibbons S.J., Ringdal F. & Kvaerna T. (2008). Detection and characterization of seismic phases using continuous spectral estimation on incoherent and partially coherent arrays, *Geophysical Journal International*, 172(1), 405–421. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03650.x.

Gouedard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., De Verdière, Y. C., Larose, E., ... Weaver, R. L. (2008). Cross-correlation of random fields: Mathematical approach and applications, *Geophysical Prospecting*, 56(3), 375-393.

Guerin, G., Rivet, D., Deschamps, A., Larroque, C., Mordret, A., Dessa, J.-X. & Martin, X. (2020). High resolution ambient noise tomography of the Southwestern Alps and the Ligurian margin, *Geophysical Journal International*, 220, 806–820. doi:10.1093/gji/ggz477.

Halliday, D. F., Curtis, A. & Kragh, E. (2008). Seismic surface waves in a suburban environment-active and passive interferometric methods, *Leading Edge*, 27, 210–218. doi:10.1190/1.2840369.

Harba, P., Pilecki, Z. & Krawiec, K. (2019). Comparison of MASW and seismic interferometry with use of ambient noise for estimation of S-wave velocity field in landslide subsurface, *Acta Geophysica*, 67, 1875–1883. doi:10.1007/s11600-019-00344-9.

Harkrider, D. G. (1964). Surface waves in multilayered elastic media I. Rayleigh and Love waves from buried sources in a multilayered elastic half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 54(2), 627-679.

Harkrider, D. G. (1970). Surface waves in multilayered elastic media. Part II. Higher mode spectra and spectral ratios from point sources in plane layered earth models, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 60(6), 1937-1987.

Herrmann, R. B. (2013). Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research, *Seismological Research Letters*, 84(6), 1081-1088.

Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, *Journal of Physics of the Earth*, **33**, 59–96.

Huang, Y.-C., Yao, H., Huang, B. -S., van der Hilst, R. D., Wen, K. -L., Huang, W.-G. & Chen, C. -H. (2010). Phase velocity variation at periods of 0.5–3 seconds in the Taipei Basin of Taiwan from correlation of ambient seismic noise, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 100(5A), 2250–2263. doi:10.1785/0120090319.

Jerez-G, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F. J., Luzón, F., & Perton, M. (2016). A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption, *Computers & Geosciences*, 97, 67-78.

Kanlı, A. İ., Tildy, P., Prónay, Z., Pınar, A. & Hermann, L. (2006). VS30 mapping and soil classification for seismic site effect evaluation in Dinar region, SW Turkey, *Geophysical Journal International*, 165(1), 223–235, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02882.x.

Karaaslan, A., Kocaoğlu, A., Özalaybey, S. (2021). Local-scale phase velocity estimation using ambient seismic noise: comparison between passive seismic interferometry and conventional frequency–wavenumber methods, *Geophysical Journal International*, 225(3), 2075–2096. doi:10.1093/gji/ggab080.

Karaaslan, A., Zor, E., Özalaybey, S., Tarancıoğlu, A., Ergin, M., Ökeler, A., Cankurtaranlar, A., Tapırdamaz, M. C., Açıkgöz, C., Sevim, F., Erkan, B. (2023). Gaziantep ili Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi Sonuç Raporu (Proje No: 5207A01), Kocaeli, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi.

Kästle, E. D., El-Sharkawy, A., Boschi, L., Meier, T., Rosenberg, C., Bellahsen, N. & Weidle, C. (2018). Surface wave tomography of the Alps using ambient-noise and earthquake phase velocity measurements, *Journal of Geophysical Research*, 123, 1770–1792. doi:10.1002/2017JB014698.

Kennett, B. L. N., Stipčević, J. & Gorbatov, A. (2015). Spiral-arm seismic arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), 2109–2116. doi:10.1785/0120140354.

Kind, F., Fäh, D. & Giardini, D. (2005). Array measurements of S-wave velocities from ambient vibrations, *Geophysical Journal International*, 160, 114–126. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02331.x.

Kocaoğlu, A. H. & Fırtana, K. (2011). Estimation of shear wave velocity profiles by the inversion of spatial autocorrelation coefficients, *Journal of Seismology*, 15, 613-624.

Lacoss, R. T., Kelly, E. J. & Toksöz, M. N. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays, *Geophysics*, 34, 1. doi: 10.1190/1.1439995.

Langston, C. A. & Hammer, J. K. (2001). The vertical component P-wave receiver function, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 91, 1805–1819.

Langston, C. A., Bodin, P., Powell, C., Withers, M., Horton, S., & Mooney, W. (2006). Explosion source strong ground motions in the Mississippi embayment, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 96(3), 1038-1054.

Langston, C. A. (2007a). Spatial gradient analysis for linear seismic arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 97, 265–280.

Langston, C. A. (2007b). Wave gradiometry in two dimensions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 401–416.

Langston, C. A. (2007c). Wave gradiometry in the time domain, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 926–933.

Langston, C. A. & Liang, C. (2008). Gradiometry for polarized seismic waves, *Journal of Geophysical Research,* 113, B08305. doi:10.1029/2007JB005486.

Langston C. A. & Ayele, M., M. (2016). Vertical seismic wave gradiometry: application at the san Andreas fault observatory at depth, *Geophysics*, 81(3), D233–D243. doi: 10.1190/GEO2015-0404.1.

Lee, C. T. & Tsai, B. R. (2008). Mapping Vs30 in Taiwan, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sci*ences, 19, 671–682. doi: 10.3319/TAO.2008.19.6.671(PT).

Le Feuvre, M., Joubert, A., Leparoux, D. & Cote, P. (2015). Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike, *Journal of Applied Geophys*ics, 114, 36–51. doi:10.1016/j.jappgeo.2014.12.014.

Li, J., & Rosenblad, B. (2011). Experimental study of near-field effects in multichannel array-based surface wave velocity measurements, *Near Surface Geophysics*, 9(4), 357-366.

Liang, C. & Langston, C. A. (2009). Wave gradiometry for USArray: Rayleigh waves, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B2).

Liang, C. (2013). Wave Gradiometry Applied to Near Surface, *Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference*, (pp. 160-163). China: July 17-19. doi:10.1190/nsgapc2013-038.

Liang, C., Cao, F., Liu, Z., & Chang, Y. (2023). A review of the wave gradiometry method for seismic imaging, *Earthquake Science*, 36(3), 254-281.

Lin, F. -C., Moschetti, M. P. & Ritzwoller, M. H. (2008). Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps, *Geophysical Journal International*, 173(1), 281–298. doi:10.1029/2007GC001655.

Lin, F. -C., Li, D., Clayton, R. W. & Hollis, D. (2013). High-resolution 3D shallow crustal structure in Long Beach, California: Application of ambient noise tomography on a dense seismic array, *Geophysics*, 78(4), Q45–Q56. doi:10.1190/geo2012-0453.1.

Liu, Y. & Holt, W. E. (2015). Wave gradiometry and its link with Helmholtz equation solutions applied to USArray in the eastern US, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8), 5717-5746.

Longuet-Higgins, M. S. (1950). A theory on the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, 243, 1–35. doi:10.1098/rsta.1950.0012.

Lontsi, A. M., Ohrnberger, M. & Krüger, F. (2016). Shear wave velocity profile estimation by integrated analysis of active and passive seismic data from small aperture arrays, *Journal of Applied Geophysics*, 130, 37–52. doi:10.1016/j.jappgeo.2016.03.034.

Louie, J. L. (2001). Faster, Better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 91, 347–364. doi:10.1785/0120000098.

Louie, J. N., Pancha, A. & Kissane, B. (2022). Guidelines and pitfalls of refraction microtremor surveys, *Journal of Seismology*, 26(4), 567-582.

Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Liu, Q. & Xu, S. (2007). Joint inversion of high-frequency surface waves with fundamental and higher modes, *Journal of Applied Geophysics*, 62, 375–384. doi:10.1016/j.jappgeo.2007.02.004.

Lu, Y., Stehly, L., Paul, A. & AlpArray Working Group (2018). High-resolution surface wave tomography of the European crust and uppermost mantle from ambient seismic noise, *Geophysical Journal International*, 214(2), 1136–1150. doi:10.1093/gji/ggy188.

Malagnini, L., Rovelli, A., Hough, S. E. & Seeber, L. (1993). Site amplification estimates in the Garigliano valley, central Italy, based on dense array measurements of ambient noise, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 83(6), 1744-1755. doi:10.1016/0148-9062(94)90512-6.

Maurer H., Greenhalgh S. A., Manukyan E., Marelli S., Green A. G. (2012). Receiver-coupling effects in seismic waveform inversions, *Geophysics*, 77(1), R57-R63.

Medeiros, W. E., Schimmel, M. & do Nascimento, A. F. (2015). How much averaging is necessary to cancel out cross-terms in noise correlation studies?, *Geophysical Journal International*, 203, 1096-1100. doi:10.1093/gji/ggv336.

Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P. Y., Castellaro, S., Cornou, C., ... Yong, A. (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method, *Journal of Seismology*, 26(4), 653-685.

Mordret, A., Landès, M., Shapiro, N. M., Singh, S. C., Roux, P., & Barkved, O. I. (2013). Near-surface study at the Valhall oil field from ambient noise surface wave tomography, *Geophysical Journal International*, 193(3), 1627-1643.

Moschetti, M. P., Ritzwoller, M. H. & Shapiro, N. M. (2007). Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps, *Geochemistry, Geophysiscs, Geosystems*, 8, Q08010. doi:10.1029/2007GC001655.

Movaghari, R. & Doloei, G. J. (2019). 3-D crustal structure of the Iran plateau using phase velocity ambient noise tomography, *Geophysical Journal International*, 220(3), 1555–1568. doi:10.1093/gji/ggz537.

Nishida, K., Montagner, J. P. & Kawakatsu, H. (2009). Global surface wave tomography using seismic hum, *Science*, 326(5949), 112-112. doi:10.1126/science.1176389.

Nishida, K. (2017). Ambient seismic wave field, Proceedings of the Japan Academy. Series B, 93(7), 423-448.

O'Connell, D. R. H. & Turner, J. P. (2011). Interferometric Multichannel Analysis of Surface Waves (IMASW), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2122–2141, doi:10.1785/0120100230.

Ohrnberger, M., Schissele, E., Cornou, C., Wathelet, M., Savvaidis, A., Scherbaum, F., Jongmans, D. & Kind, F. (2004). Microtremor array measurements for site effect investigations: comparison of analysis methods for field data crosschecked by simulated wavefields, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, (paper no. 940) Vancouver, Canada, August 1-6.

Ohrnberger, M. (2008). Basic array processing concepts (conventional and high-resolution frequency wavenumber, f-k) lecture notes, Sesarray Course on *Using Ambient Vibration Array Techniques for Site Characterization and Seismic Microzonation*, İstanbul, Türkiye, May 26-June 1.

Okada, H. (2003). The microseismic survey method: society of exploration geophysicists of Japan, *SEG Geophysical Monograph Series*, 12, doi:10.1190/1.9781560801740.

Palomeras, I., Villaseñor, A., Thurner, S., Levander, A., Gallart, J. & Harnafi, M. (2017). Lithospheric structure of Iberia and Morocco using finite-frequency Rayleigh wave tomography from earthquakes and seismic ambient noise, *Geochemistry, Geophysics, Geosyst*ems, 18, 1824–1840, doi:10.1002/2016GC006657.

Pan, Y., Xia, J., Xu, Y., Xu, Z., Cheng, F., Xu, H. & Gao, L. (2016). Delineating Shallow S-Wave Velocity Structure Using Multiple Ambient-Noise Surface-Wave Methods: An Example from Western Junggar, China, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 106(2), 327–336, doi:10.1785/0120150014.

Park, C. B., Xia, J. & Miller, R. D. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record, *In SEG technical program expanded abstracts 1998* (pp. 1377-1380), Society of Exploration Geophysicists. doi: 10.1190/1.1820161.

Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW), *Geophysics*, 64, 800–808. doi:10.1190/1.2431832.

Park, C. B., Miller, R. D., Ryden, N., Xia, J. & Ivanov, J. (2005). Combined Use of Active and Passive Surface Waves, *Journal of Environmental Engineering and Geophysiscs*, 10(3), 323–334. doi:10.2113/JEEG10.3.323.

Park, C. B., Miller, R.D., Xia, J. & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)–active and passive methods, *Leading Edge*, 26(1), 60–64. doi:10.1190/1.2431832.

Park, C. (2013). MASW for geotechnical site investigation, *Leading Edge*, 32(6), 656–662. doi:10.1190/tle32060656.1.

Parolai, S., Richwalski, S. M., Milkereit, C. & Fäh, D. (2006). S-wave velocity profiles for earthquake engineering purposes for the Cologne Area (Germany), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 65–94. doi:10.1007/s10518-005-5758-2.

Peruzzetto, M., Kazantsev, A., Luu, K., Métaxian, J.-P., Huguet, F. & Chauris, H. (2018). Broad-band ambient noise characterization by joint use of cross-correlation and MUSIC algorithm, *Geophysical Journal International*, 215(2), 760–779. doi:10.1093/gji/ggy311.

Picozzi, M., Strollo, A., Paraloi, S., Durukal, E., Özel, O., Karabulut, S., Zschau, J. & Erdik. M. (2009). Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 469–482. doi:10.1016/j.soildyn.2008.05.007.

Picozzi, M., Parolai, S. & Bindi, D. (2010). Deblurring of frequency-wavenumber images from small-scale seismic arrays, *Geophysical Journal International*, 181, 357–368. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04471.x.

Prieto, G. A., Lawrence, J. F. & Beroza, G. C. (2009). Anelastic Earth structure from the coherence of the ambient seismic field, *Journal of Geophysical Research*, 114, B07303. doi:10.1029/2008JB006067.

Prieto, G. A., Denolle, M., Lawrence, J. F. & Beroza, G. C. (2011). On the amplitude information carried by ambient seismic field, *Comptes Rendus Geoscience*, 343, 600–614. doi:10.1016/j.crte.2011.03.006.

Poppeliers, C. (2010). Seismic wave gradiometry using the wavelet transform: Application to the analysis of complex surface waves recorded at the Glendora Array, Sullivan, Indiana, USA, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 100(3), 1211-1224.

Poppeliers, C. & Punoševac, P. (2013). Three-dimensional wave gradiometry for polarized seismic waves, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 103(4), 2161-2172.

Poppeliers, C. & Evans, E. V. (2015). The effects of measurement uncertainties in seismic-wave gradiometry, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 105(6), 3143-3155.

Rahimi, S., Wood, C. M., & Himel, A. K. (2022). Practical guidelines for near-field mitigation on array-based active surface wave testing, *Geophysical Journal International*, 229(3), 1531-1549.

Ritzwoller, M. H., Lin, F. C. & Shen W. (2011). Ambient noise tomography with a large seismic array, *Comptes Rendus Geoscience*, 13. doi:10.1016/j.crte.2011.03.007.

Rix, G. J., Lai, C. G. & Spang, A. W. (2000). In Situ Measurement of Damping Ratio Using Surface Waves, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5), 472–480.

Rost, S. & Thomas, C. (2002). Array seismology: Methods and applications, *Reviews of Geophysics*, 40(3), 2-1-2-27.

Roux, P., Moreau, L., Lecointre, A., Hillers, G., Campillo, M., Ben-Zion, Y., ... Vernon, F. (2016). A methodological approach towards high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array, *Geophysical Journal International*, 206(2), 980-992.

Roy, N., & Jakka, R. S. (2017). Near-field effects on site characterization using MASW technique, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, 289-303.

Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A. & Fehler, M. C. (2005a). Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 32, L03310. doi:10.1029/2004GL021862.

Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A. & Fehler, M. C. (2005b). Surface wave tomography from microseisms in Southern California, *Geophysical Research Letters*, 32, L14311. doi:10.1029/2005GL023155.

Satoh, T., Kawase, H. & Matsushima, S. (2001). Estimation of S-wave velocity structures in and around the Sendai basin, Japan, using array records of microtremors, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 91(2), 206–218. doi:10.1785/0119990148.

Schimmel, M. & Paulssen, H. (1997). Noise reduction and detection of weak, coherent signals through phase-weighted stacks, *Geophysical Journal International*, 190, 497–505, doi:10.1111/j.1365-246X.1997.tb05664.x.

Schimmel, M. & Gallart, J. (2007). Frequency-dependent phase coherence for noise suppression in seismic array data, *Journal of Geophysical Research*, 112, B04303. doi:10.1029/2006JB004680.

Schimmel, M., Stutzman, E. & Gallart, J. (2011). Using instantaneous phase coherence for signal extraction from ambient noise data at a local to a global scale, *Geophysical Journal International*, 184, 494–506. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04861.x.

Scherbaum, F., Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Di Giuglio, G., Guillier, B., Jongmans, D., ... Wathelet, M. (2005). Report on FK/SPAC capabilities and limitations, Derivation of dispersion curves (Vol. 19). Tech. Rep.

Shapiro, N. M. & Campillo, M. (2004). Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, 31, L07614. doi:10.1029/2004GL019491.

Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, 307(5715), 1615–1618. doi:10.1126/science.1108339.

Snieder, R. (2004). Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *Physical Review E*, 69, 046610. doi:10.1103/PhysRevE.69.046610.

Snieder, R. & Wapenaar., K. (2010). Imaging with ambient noise, *Physics Today*, 63(9), 44–49. doi:10.1063/1.3490500.

Sollberger D., Schmelzbach C., Robertsson J. O. A., Maurer H. & Greenhalgh S. A. (2015). Geophone Coupling Corrections for Land-seismic Point Receiver Acquisition, *77th EAGE Conference & Exhibition 2015*, Spain, IFEMA, June 1-4.

Sollberger, D., Schmelzbach, C., Manukyan, E., Greenhalgh, S. A., Van Renterghem, C., & Robertsson, J. O. (2019). Accounting for receiver perturbations in seismic wavefield gradiometry, *Geophysical Journal International*, 218(3), 1748-1760.

Stehly, L., Fry, B., Campillo, M., Shapiro, N. M., Guilbert, J., Boschi, L. & Giardini, D. (2009). Tomography of the Alpine region from observations of seismic ambient noise, *Geophysical Journal International*, 178(1), 338–350. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04132.x.

Stephenson, W. J., Louie, J. N., Pullammanappallil, S., Williams, R. A. & Odum, J. K. (2005). Blind Shear-Wave Velocity Comparison of ReMi and MASW Results with Boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: Implications for Earthquake Ground-Motion Assessment, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 95(6), 2506–2516. doi:10.1785/0120040240.

Stockwell, R.G., Mansinha, L. & Lowe, R.P. (1996). Localization of the complex spectrum: the S-transform, IEEE Transactions on Signal Processing, 44(4), pp. 998-1001.

Stockwell, R. G. (2007). A basis for efficient representation of the S-transform, *Digital Signal Processing*, 17(1), 371-393.

Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., & Roesset, J. M. (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method. In Geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical Committee, Oxford, 15-25. (pp. 15-25).

Taylor, G., Rost, S., Houseman, G. A. & Hillers, G. (2019). Near-surface structure of the North Anatolian Fault zone from Rayleigh and Love wave tomography using ambient seismic noise, *Solid Earth*, 10, 363–378. doi:10.5194/se-10-363-2019.

Tremblay, S. P. & Karray, M. (2019). Practical considerations for array-based surface-wave testing methods with respect to near-field effects and shear-wave velocity profiles, *Journal of Applied Geophysics*, 171, 103871.

Tsai, V.C. & Moschetti, M. P. (2010). An explicit relationship between time-domain noise correlation and spatial autocorrelation (SPAC) results, *Geophysical Journal International*, 182, 454–460. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04633.x.

Thelen, W. A., Clark, M., Lopez, C. T., Loughner, C., Park, H., Scott, J. B., Smith, S. B., Greschke, B. & Louie, J. N. (2006). A Transect of 200 Shallow Shear-Velocity Profiles across the Los Angeles Basin, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 1055–1067. doi:10.1785/0120040093.

Vassallo, M., De Matteis, R., Bobbio, A., Di Giulio, G., Adinolfi, G. M., Cantore, L. (2019). Seismic noise cross-correlation in the urban area of Benevento city (Southern Italy), *Geophysical Journal International*, 217, 1524–1542. doi:10.1093/gji/ggz101.

Vidale, J. E. (1986). Complex polarization analysis of particle motion, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 76, 1393–1405.

Wang, Y., Allam, A. & Lin, F. C. (2019). Imaging the Fault Damage Zone of the San Jacinto Fault Near Anza With Ambient Noise Tomography Using a Dense Nodal Array, *Geophysical Research letters*, 46, 12,938–12,948. doi:10.1029/2019GL084835.

Wapenaar, K. (2004). Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation, *Physical Review Letters*, 93, 254301. doi:10.1103/PhysRevLett.93.254301.

Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X. & Verdel, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1 – Basic principles and applications, *Geophysics*, 75, 75A195–75A209. doi:10.1190/1.3457445.

Wathelet, M., Jongmans, D. & Ohrnberger, M. (2004). Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics*, 2, 211–221. doi:10.3997/1873-0604.2004018.

Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M. & Bonnefoy-Claudet, S. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion, *Journal of Seismology*, 12, 1–19 doi:10.1007/s10950-007-9067-x.

Wathelet, M., Bard, P.-Y., Chatelain, J. -L., Cornou, C., Di Giulio, G., Fäh, D., Guillier, B., Haleimikail, S., Michel, C. & Ohrnberger, M. (2010). Geopsy on-line documentation, http://www.geopsy.org/wiki bağlantısından erişilebilir (son erişim tarihi: 3 Ekim 2019).

Wills, J. C., Petersen, M., Bryant, W. A., Reichle, M., Saucedo, G. J., Tan, S., Taylor, G. & Treiman, J. (2000). A Site Condition Map for California Based on Geology and ShearWaveVelocity, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 90(6B), 187–208. doi:10.1785/0120000503.

Xia, J., Miller, R. D. & Park, C. B. (2000). Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes, *SEG Technical Program expanded abstracts 2000* (pp. 1295–1298), Society of Exploration Geophysicists. doi:10.1190/1.1815633.

Xia, J., Cheng, F., Xu, Z., Shen, C., & Liu, R. (2017). Advantages of multi-channel analysis of passive surface waves (MAPS), *In International Conference on Engineering Geophysics*, Al Ain, United Arab Emirates, 9-12 October 2017 (pp. 94-97). Society of Exploration Geophysicists.

Xu, H., Luo, Y., Chen, C. & Xu, Y. (2016). 3D shallow structures in the Baogutu area, Karamay, determined by eikonal tomography of short-period ambient noise surface waves, *Journal of Applied Geophysics*, 129, 101–110. doi:10.1016/j.jappgeo.2016.03.037.

Xu, Z., Mikesell, T. D., Xia, J. & Cheng, F. (2017). A comprehensive comparison between the refraction microtremor and seismic interferometry method for phase velocity estimation, *Geophysics*, 82, 1–43. doi:10.1190/geo2016-0654.1.

Yamanaka, H. & Ishida, H. (1996). Application of genetic algorithms to an inversion of surface-wave dispersion data, *Bulletin of the Seismological Society of America* , 86(2), 436–444.

Yang, Y., Ritzwoller, M. H., Levshin, A. L. & Shapiro, N. M. (2007). Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe, *Geophysical Journal International*, 168, 259–274. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03203.x.

Yang, Y., Zheng, Y., Chen, J., Zhou, S., Celyan, S., Sandvol, E., Tilmann, F., Priestley, K., Hearn, T. M., Ni, J. F., Brown, L. D. & Ritzwoller, M. H. (2010). Rayleigh wave phase velocity maps of Tibet and the surrounding regions from ambient seismic noise tomography, *Geochemistry, Geophysiscs, Geosystems*, 11(8), Q08010. doi:10.1029/2010GC003119.

Yang, Y., Hu, S., Yao, H., Fang, L. & Wu, J. (2020). Crustal shear wave velocity and radial anisotropy in the Xiaojiang fault zone system (SE Tibet) revealed by ambient noise interferometry, *Tectonophysics*, 792, 228594. doi:10.1016/j.tecto.2020.228594.

Yao, H., Van Der Hilst, R. D. & de Hoop, M. V. (2006). Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two station analysis – I. Phase velocity maps, *Geophysical Journal International*, 166, 732–744. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.

Yao, H., Beghein, C. & van der Hilst, R. D. (2008). Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis – II. Crustal and upper-mantle structure, *Geophysical Journal International*, 173, 205–219. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03696.x.

Yoon, S. & Rix, G. (2009). Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135, 399–406.

Zhang, Y., Li, Y. E., Zhang, H. & Ku, T. (2019). Near-surface site investigation by seismic interferometry using urban traffic noise in Singapore, *Geophysics*, 84(2), B169-B180. doi:10.1190/geo2017-0798.1.

Zhou, C., Xi, C., Pang, J. & Liu, Y. (2018). Ambient noise data selection based on the asymmetry of cross-correlation functions for near surface applications, *Journal of Applied Geophysics*, 159, 803-813. doi:10.1016/j.jappgeo.2018.09.033.

Zhu, H. (2020). A Brief Overview of the S - transforms, Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University.

Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Tapırdamaz, M. C., Çetin, S., Tarancıoğlu, A. ve Erkan, B. (2010). Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active-passive array surface wave and single-station microtremor methods, *Geophysical Journal International*, 182(3), 1603–1618. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04710.x.

Zor, E., Özalaybey, S., Karaaslan, A., Ergin, M., Tarancıoğlu, A., Tapırdamaz, M.C., Özalaybey, S. Ç., Erkan, B. (2013). Bursa İli için Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi (Proje No: 5117701), Kocaeli, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Aylin KARAASLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2007, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeofizik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümündeki lisans öğreniminden fakülte birincisi olarak mezun oldu.
- 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği bölümünden yüksek lisans derecesini aldı.
- 2007 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde Araştırmacı olarak çalışmaya başladı. Halen aynı kurumda Başuzman Araştırmacı olarak çalışmaktadır.

YÖNETTİĞİ ARAŞTIRMA PROJELERİ

- Gaziantep İli Sismik Tehlike Değerlendirme (GANTED) Projesi **- Proje Yöneticisi (Ekim 2020-Halen)**

YER ALDIĞI ARAŞTIRMA PROJELERİ

- Pakistan Meteoroloji Bölümünün Deprem Araştırma Alt Yapısının İyileştirilmesi Projesi **– Başuzman Araştırmacı (2019-2023)**
- Büyük Deprem Sonrası Acil Gözlem Araştırmaları (DEPAR-II) Projesi **– Başuzman Araştırmacı (2020-Halen)**
- Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi **– Uzman Araştırmacı (2016-2020)**
- Balıkesir İli için Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme (BAZEM) Projesi **– Uzman Araştırmacı - Hakim Periyotlar ve Büyütme Etkisi iş paketi sorumlusu (2015-2018)**
- Beylikdüzü ve Büyükçekmece İlçelerindeki Muhtelif Heyelan Sahalarının Araştırılması, İncelenmesi ve İzlenmesi Projesi **– Uzman Araştırmacı - Mikrotremör H/V çalışmaları iş paketi sorumlusu (2013-2016)**

- Test Sistemi Sahalarının Yeraltı Yapısının Jeofizik Yöntemlerle Görüntülenmesi Projesi – **Uzman Araştırmacı- Mikrotremör H/V çalışmaları iş paketi sorumlusu (2014-2015)**
- Bursa İli için Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi - **Araştırmacı (2011-2013)**
- İstanbul Kara Alanındaki Olası Diri Fayların Araştırılması ve Öncelikli Heyelanlı Alanlarda Çok Disiplinli Araştırmalar Yapmak Suretiyle Heyelan Tespit ve İzleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi – **Araştırmacı (2010-2012)**
- Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik "ancak tektonik rejimleri farklı" Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması (TÜRDEP) Projesi - **Araştırmacı (2008-2010)**
- Marmara Bölgesinin Deprem Aktivitesinin Çok Disiplinli Yöntemlerle İzlenmesi ve İstanbul Kıyı Şeridi/Kıta Sahanlığı Zeminine Olası Etkilerinin Araştırılması Projesi – **Araştırmacı (2008-2009)**
- Marmara Denizinde Depremsellik Gözlem Alt Yapı Kapasitesinin Güncellenmesi Projesi – **Araştırmacı (2009-2010)**
- Deprem Sonrası Acil Gözlem Araştırmaları (DEPAR) Projesi – **Araştırmacı (2008)**
- Kocaeli İli için Zemin Sınıflaması ve Sismik Tehlike Değerlendirme Projesi – **Araştırmacı (2007-2008)**

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karaaslan A.,** Kocaoğlu A., Özalaybey, S. 2023. Obtaining local-scale Rayleigh wave phase velocity information by using active and passive seismic wave gradiometry methods. *2nd International Graduate Research Symposium – Istanbul Technical University*, May 16-18 2023, İstanbul, Turkey.
- **Karaaslan, A.,** Kocaoğlu, A., Özalaybey, S. 2021. Local-scale phase velocity estimation using ambient seismic noise: comparison between passive seismic interferometry and conventional frequency–wavenumber methods, *Geophysical Journal International*, 225(3), 2075-2096.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Zor., E., **Karaaslan, A.** (**2023**). Zemin ve Sismik Tehlike Çalışmaları, Gaziantep Deprem Çalıştayı, 1-2 Aralık 2023, Gaziantep, Türkiye.
- Ergin, M., Zor, E., Tarancıoğlu, A., Ökeler, A., Tapırdamaz, M.C, **Karaaslan, A.**, Yörük, A. (**2022**). 30 Ekim 2020 Sisam Depremi Sonrası Artçı Deprem Gözlemleri, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 25. Çalıştayı*, 1-2 Aralık 2022, İstanbul, Türkiye.
- **E**rgin, M., Tarancıoğlu, A., Ökeler, A., Zor, E., Tapırdamaz, M. C., Açıkgöz, **C., Karaaslan, A.**, Yörük, A. (**2020**). 30 Ekim 2020 İzmir-Sisam Depremi Sonrası Artçı Deprem Gözlemleri, *ATAG 2020 Özel Toplantısı*, 23-24 Aralık 2020.
- **Karaaslan, A. (2019**). Rayleigh Dalgası Faz Hızı Dispersiyon Eğrilerinin Artalan Sismik Gürültü İnterferometrisi ve Aktif/Pasif Sismik Gradiyometri Yöntemleri Kullanılarak Elde Edilmesi, *Lisansüstü Öğrenci Çalıştayı*, İstanbul Teknik Üniversitesi, 26 Kasım 2019, İstanbul, Türkiye.

- **Karaaslan, A.**, Kocaoğlu, A., Özalaybey, S. (**2013**). Sismik Dalga Gradyometri Yöntemi ile Yüzey Dalgalarının Dispersiyon Analizi, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25-27 Eylül 2013, Hatay, Türkiye.
- Özalaybey, S., Zor, E., **Karaaslan, A.**, Tapırdamaz, M.C., Tarancıoğlu, A., Özalaybey, S.Ç., Ergin, M., Erkan, B. (**2013**). Mikrotremör YDSO Yöntemi ile Basen Yapılarının Araştırılması, *2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25-27 Eylül 2013, Hatay, Türkiye.
- Tan, O., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Pabuçcu, Z., Leptokaropoulos, K., İnan, S., Ergintav, S., Yörük, A., Tapırdamaz, M.C., Açıkgöz, C., Sevim, F., **Karaaslan, A.** (**2012**). Seismicity and seismotectonic properties of the central east Aegean Sea & western Turkey: a complex deformation zone, *International Earth Science Colloquium on the Aegean Region*, IESCA-2012, October 1-5 2012, İzmir, Turkey.
- Tan, O., Ergintav, S., İnan, S., Pabuçcu, Z., Yörük, A., Tapırdamaz, M.C., Sevim, F., Açıkgöz, C., Tarancıoğlu, A., **Karaaslan, A.** (**2012**). Yüksek Çözünürlüklü Deprem Lokasyonları ile Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi Altındaki Davranışı, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 16. Çalıştayı*, 18-19 Ekim 2012, İstanbul, Türkiye.
- **Karaaslan, A.**, Özalaybey, S., Zor, E. (**2011**). S-Dalga Hızının Mühendislik Sismolojisi Ölçeğinde Elde Edilmesi İçin Aktif ve Pasif Kaynaklı Yüzey Dalgası Analizleri, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11-14 Ekim 2011, Ankara, Türkiye.
- Tan, O., Pabuçcu, Z., Ergintav, S., İnan, S., Yörük, A., Tapırdamaz, M.C., **Karaaslan, A.**, Açıkgöz, C., Sevim, F. (**2011**). Karaburun Yarımadası Deprem Aktivitesi ve KB-GD Sol-Yanal Doğrultu Atımlı Deformasyonun Kanıtları, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 15. Çalıştayı*, 19-22 Ekim 2011, Adana, Türkiye.
- Zor, E., Özalaybey, S., **Karaaslan, A.**, Tapırdamaz, M. C., Özalaybey S. Ç., Tarancıoğlu, A., Erkan, B. (**2010**). Shear wave velocity structure of the İzmit Bay area (Turkey) estimated from active–passive array surface wave and single-station microtremor methods, *Geophysical Journal International*, 182, 1603-1618.
- Tan, O., Tapırdamaz, M.C., Pabuçcu, Z., Yörük, A., Açıkgöz, C., Sevim, F., **Karaaslan, A.**, Cankurtaranlar, A., Aksoy, E., İmamoğlu, Ş., Kavak, O., Nurlu, M., Ergintav, S., İnan, S. (**2010**). 8 Mart 2010 Kovancılar (Elazığ) Depremi (ML=5.9) Mikro-Deprem Gözlemleri, *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, 5-9 Nisan 2010, Ankara, Türkiye.
- **Karaaslan, A.**, Tan, O. Pabuçcu, Z., Yörük, A. (**2010**). Aydın ve Manisa Çevresinde Tek İstasyon Mikrotremor (H/V) Analizleri, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 14. Çalıştayı*, 3-6 Kasım 2010, Adıyaman, Türkiye.
- Özalaybey, S., Zor, E., **Karaaslan, A.**, Tapırdamaz, M.C., Özalaybey, S.Ç., Tarancıoğlu, A., Erkan, B., Alparslan, E. (**2009**). Investigation of Site Effects in the İzmit Bay Area, *Turkish-Japanese Earthquake Workshop*, 23-24 Kasım 2009, Gebze, Turkey.
- Tapırdamaz, M.C., Tan, O., Ergintav, S., Yörük, A., Pabuçcu, Z., İnan, S., İravul, Y., Tüzel, B., **Karaaslan, A.**, Sevim, F., Açıkgöz, C., Tarancıoğlu, A., Tan, E., Göknil, C., Kılıç, T., Zünbül, S., Karakısa, S., Kaplan, M. (**2009**). Denizli Baseni Deprem Aktivitesinin Bölge Tektoniği ile İlişkisinin Araştırılması, *Aktif Tektonik Araştırma Grubu 13. Çalıştayı*, 8-11 Ekim 2009, Çanakkale, Türkiye.

- Çoban, K.H., Çakın, O., **Karaaslan, A.**, Cevher, M., Sancılı, M., Zor, E., Özalaybey, S., Gider, D. (**2009**). İzmit Baseninin Çökel Kalınlığının Mikrotremör Yöntemiyle Hesaplanması, *Uluslararası Deprem Sempozyumu*, 17-19 Ağustos 2009, Kocaeli, Türkiye.
- Çubuk, Y., **Karaaslan, A.,** Barış, Ş. (**2007**). İzmit'te Bir Mikrotremör Uygulaması, *Uluslararası Deprem Sempozyumu*, 22-24 Ekim 2007, Kocaeli, Türkiye.