



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DOKTORA TEZİ**

**DALGACIK SKALOGRAM, SKALOGRAM ÖLÇEK  
ENDEKSİ VE GÜÇ SPEKTRUMU YÖNTEMLERİ İLE  
BÖLGESEL DEPREMLERİN ANALİZİ**

**Nazmi YILMAZ**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ**

**Aralık, 2016**

**İSTANBUL**

Bu çalışma 15.12.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi:**



Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ(Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



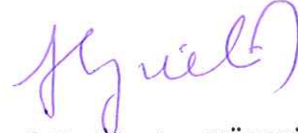
Prof. Dr. Haşim MUTUŞ  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Hasan TATLIPINAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen Fakültesi



Prof. Dr. Handan GÜRBÜZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans ve Doktora öğrenimim sırasında ve yürüttüğüm tez çalışmalarım boyunca birikim ve tecübelerinden faydalandığım, gösterdiği her türlü destek ve katkılarından dolayı çok değerli hocam Prof.Dr.K.Gediz AKDENİZ'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını benden esirgemeyen arkadaşım Dr. Mahmut AKILLI'ya ve tezin her aşamasında bilgisinden yararlandığım Yard. Doç Dr. G. Çiğdem YALÇIN'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Yine çeşitli konularda bana destek veren Yılmaz AĞBULUT arkadaşşıma da teşekkür ederim.

Aralık 2016

Nazmi YILMAZ

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
TABLO LİSTESİ .....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xiii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR .....</b>	<b>6</b>
2.1 DİNAMİK SİSTEMLER.....	6
2.2 DİNAMİK SİSTEMLERİN OTONOM ÖZELLİKLERİ .....	7
2.3 SİSMİK DALGALAR, DEPREM PARAMETRELERİ VE ARTÇI DEPREMLER.....	8
2.4 TÜRKİYE'DE DEPREM KUŞAKLARI.....	10
2.5 SİSMİK DALGA ANALİZ ÖRNEKLERİ.....	12
2.5.1 Fourier Analizi.....	12
2.5.1.1 Kısa Süreli Fourier Analizi.....	13
2.5.1.2 Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü.....	16
2.5.1.3 Ayrık Fourier Dönüşümü.....	17
2.5.1.4 Hızlı Fourier Dönüşümü.....	17
2.5.2 Dalgacık Dönüşümü.....	17
2.5.2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü.....	19
2.5.2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü.....	23
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>26</b>
3.1 DALGACIK SKALOGRAM.....	26
3.2 SKALOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ.....	27
3.3 SKAOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ YÖNTEMİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK SİSTEMLERDEUYGULANMASI.....	30
3.3.1 Lojistik Harita.....	31

3.3.2 Henon Haritası.....	32
3.3.3 Bonhoeffer-van der Pol Osilatörü.....	33
3.3.4 Duffing Osilatörü.....	35
3.4 GÜÇ SPEKTRUMU.....	38
3.5 YERLEŞTİRME TEOREMİ (LYAPUNOV ÜSTELLERİ).....	40
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>42</b>
4.1 BÖLGESEL DEPREMLERİN SKALOGRAM, GÜÇ SPEKTRUMU VE LYAPUNOV ÜSTELLERİ İLE ANALİZİ.....	42
4.1.1 23 Ekim 2011 Van-Tabanlı (M=6.6) Depremi (Büyük Van Depremi).....	42
4.1.2 23 Ekim 2011 Van-Edremit (M=4.6) Depremi.....	45
4.1.3 09 Kasım 2011 Ban-Edremit (M=5.6) Depremi (Bayram Oteli Depremi).....	47
4.1.4 09 Kasım 2011 Ban-Edremit (M=4.5) Depremi.....	50
4.2 23 EKİM 2011-12 ARALIK 2011 VAN BÖLGESİ DEPREMLERİ (14 DEPREM) SKALOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ İLE ANALİZİ.....	52
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>64</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>68</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Deprem Odak Noktası ve Merkez Üssü.....	9
Şekil 2.2: Türkiye deprem kuşakları haritası.....	11
Şekil 2.3: Van deprem kuşağı haritası.....	11
Şekil 2.4: Kısa Süreli Fourier Dönüşümü.....	14
Şekil 2.5: Fourier dönüşüm yüzeyinde zaman penceresi kullanılarak örnekleme.....	15
Şekil 2.6: Fourier dönüşüm yüzeyinde frekans penceresi kullanılarak örnekleme.....	15
Şekil 2.7: Meksika şapkası dalgacığı.....	20
Şekil 2.8: Meyer dalgacığı.....	21
Şekil 2.9: Morlet dalgacığı.....	21
Şekil 2.10: Gauss dalgacığı.....	21
Şekil 2.11: Haar dalgacığı.....	22
Şekil 2.12: Daubechies dalgacıkları.....	22
Şekil 2.13: Dalgacık fonksiyonun sinyal üzerinde kaydırılma işlemi. (a) Başlangıç hali (b) Sağa kaydırılmış hali.....	23
Şekil 2.14: Ölçeğin değiştirilmesi.....	23
Şekil 2.15: Mallat algoritması ile ayrık dalgacık dönüşümü uygulanması.....	24
Şekil 3.1: BvP denkleme ait bir skalogram grafiğı.....	26
Şekil 3.2: 2004 Sumatra depremine ait seismogram ve bu sismograma ait skalogram grafiğı.....	27
Şekil 3.3: Sol: Periyodik yakınsayan bir fonksiyon için dörtlü Daubechies Dalgacık fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş normalize iç skalogram değerleri. Sağ: Ölçek endeksi değerleri; $s_1$ ölçek değeri büyütüldüğünde ölçek endeksi değerleri 0 olmaktadır.....	29

<b>Şekil 3.4:</b> BvP osilatörü için $s_{\min}$ (siyah) ve $s_{\max}$ (gri) değerleri.....	30
<b>Şekil 3.5:</b> Lojistik Harita ve Henon Haritası için bifürkasyon diyagramı, en büyük Lyapunov üsteli ve skalogram ölçek endeksi, $i_{scale}$ , değerlerinin (sırasıyla yukarıdan aşağıya) karşılaştırması. ....	33
<b>Şekil 3.6:</b> BvP osilatörü için bifürkasyon diyagramı, en büyük Lyapunov üsteli ve skalogram ölçek endeksi $i_{scale}$ , (sırasıyla yukarıdan aşağıya) karşılaştırılması. ....	35
<b>Şekil 3.7:</b> $\gamma = 0.825$ için Duffing Osilatörü Faz diyagramı. Bu genlik değerinde Duffing Osilatörü kritik kaotik durumda bulunmaktadır. ....	36
<b>Şekil 3.8:</b> $\gamma = 0.826$ için Duffing Oscillatörü Faz diyagramı. Bu kritik genlik değerinde Duffing Osilatörü büyük ölçekte periyodik duruma geçer. ....	36
<b>Şekil 3.9:</b> $0.8 \leq \gamma(amp) \leq 0.829$ aralığı için Duffing Osilatörü skalogram ölçek endeksi değerleri. $\gamma \geq 0.826$ için sistem periyodik duruma geçiyor, $\gamma < 0.825$ için sistem kaotik durumda kalıyor.....	37
<b>Şekil 3.10:</b> El Centro Sismik Dalgası Güç Spektrumu Grafiği. ....	40
<b>Şekil 3.11:</b> En Büyük Lyapunov Üstelinin hesaplanma şematiği.....	41
<b>Şekil 4.1:</b> Van-Tabanlı (M:6.6) sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 10:40 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği. ....	42
<b>Şekil 4.2:</b> Şenkaya istasyonunda kaydedilmiş sismik veriye ait güç spektrumu grafiği. ....	43
<b>Şekil 4.3:</b> Van-Tabanlı (M:6.6) sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 10:40 Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km) ve bu depreme ait skalogram grafiği.....	43
<b>Şekil 4.4:</b> Yedisu istasyonunda kaydedilmiş sismik veriye ait güç spektrumu grafiği. ....	44
<b>Şekil 4.5:</b> Van-Edremit (M:4.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği. ....	45
<b>Şekil 4.6:</b> Van-Edremit depremi (M:4.6) sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). ....	45
<b>Şekil 4.7:</b> Van-Edremit (M:4.6) depremi sismik dalga formu ve skalogram grafiği. Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,4K, Boylam: 40,5D, Yükseklik: 1.56 km).....	46



<b>Şekil 4.8:</b> Van-Edremit depremi (M:4.6) sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). .....	46
<b>Şekil 4.9:</b> Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği. ....	47
<b>Şekil 4.10:</b> Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). ....	48
<b>Şekil 4.11:</b> Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.....	48
<b>Şekil 4.12:</b> Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). .....	49
<b>Şekil 4.13:</b> Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.....	50
<b>Şekil 4.14:</b> Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). ....	50
<b>Şekil 4.15:</b> Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.....	51
<b>Şekil 4.16:</b> Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). ....	51
<b>Şekil 4.17:</b> Yedisu istasyonu kuzey-güney ve doğu batı ve dik bileşenlerde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği. ....	53
<b>Şekil 4.18:</b> Şenkaya istasyonu doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.....	54
<b>Şekil 4.19:</b> Ağrı istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği. ....	55
<b>Şekil 4.20:</b> Ilıcalar-Bingöl istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram grafiği.....	56
<b>Şekil 4.21:</b> Çukurca-Hakkari istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.....	57

**Şekil 4.22:** Silvan-Diyarbakır istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği. ....58

**Şekil 4.23:** Sivrice-Elazığ istasyonu kuzey-güney ve doğu-batı bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği. ....59



## TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**

- Tablo 4.1:** 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki bölgesel dört deprem için Şenkaya ve Yedisu istasyonlarından alınan verilere ait skalogram etkin ölçek parametre aralığı, güç spektrumu etkin frekans aralığı ve en büyük Lyapunov üsteli değerleri.....52
- Tablo 4.2:** 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki bölgesel 13 deprem için 7 farklı istasyondan alınan verilere ait skalogram ölçek endeksi değerleri. ....60

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$i_{scale}$	: Skalogram Ölçek Endeksi
$\psi_{j,k}(t)$	: Dalgacık fonksiyonu
$Wf(u, s)$	: Dalgacık dönüşümü
$S(s)$	: Skalogram fonksiyonu
$s$	: Ölçek değeri
$h(k)$	: Alçak geçiren filtre katsayısı
$g(k)$	: Yüksek geçiren filtre katsayısı
$cA$	: Alçak frekans bilgisi
$cD$	: Yüksek frekans bilgisi
$g(t)$	: Pencere Fonksiyonu
$\beta$	: Normalizasyon Faktörü
$\alpha$	: Pencere Genişliği
$M$	: Deprem büyüklük değeri

<b>Kisaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>MLE</b>	: En Büyük Lyapunov Üsteli
<b>CWT</b>	: Sürekli Dalgacık Dönüşümü
<b>BvP</b>	: Bonhoeffer-van der Pol Osilatörü
<b>STFT</b>	: Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
<b>DTFT</b>	: Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü
<b>DFT</b>	: Ayrık Fourier Dönüşümü
<b>FFT</b>	: Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>CWT</b>	: Sürekli Dalgacık Dönüşümü
<b>DWT</b>	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### DALGACIK SKALOGRAM, SKALOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ VE GÜÇ SPEKTRUMU YÖNTEMLERİ İLE BÖLGESEL DEPREMLERİN ANALİZİ

**Nazmi YILMAZ**

**İstanbul Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman : Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ**

Bir dinamik sistem başlangıç koşullarına hassas duyarlılık gösteriyorsa, a-periyodik ise ve periyodik bir yörüngeye sahip değil ya da periyodik bir yörüngeye yaklaşım göstermiyorsa sistemin kaotik olduğu kabul edilir. En büyük Lyapunov üstelleri başlangıç koşullarına hassas duyarlılık kriterini karşılar. Diğer iki kriterin karşılanmasına yönelik olarak, sinyalin a-periyodikliğinin incelenmesi için Fourier dönüşümü yapılabilir. Fakat, durağan olmayan kaotik sinyallerde dalgacık dönüşümü daha uygun bir yöntemdir. Özellikle bir sinyalin dalgacık ayrıştırmasının belirlenmesinin kaotik sistemlerin incelenmesinde kullanışlı bir yöntem olduğu görülmüştür. Bir sinyalin en etkin ölçekteki dalgacık skalogram değeri ile takip eden en az etkin ölçekteki dalgacık skalogram değerinin oranını temsil eden bir parametre skalogram ölçek endeksi olarak ifade edilir ve sinyal a-periyodik iken yalnızca pozitif bir değer alır. Bu parametre, bir sinyalin sayısal olarak a-periyodiklik derecesinin ölçümünü gerçekleştirmede kullanılabilir.

Bu çalışmada, Benitez et Al. (2010) tarafından geliştirilen ve klasik dinamik sistemler olan Henon haritası, Lojistik harita ve Bonhoeffer Van der Pol osilatörüne uygulanarak en büyük Lyapunov üsteli değerleri ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenen skalogram ölçek endeksi yöntemini ilk defa gerçek verilerde test etme amacıyla, özgün kaotik özellikler gösteren bir fiziksel dinamik sistem olan 23 Ekim 2011 tarihli Van-Tabanlı

depremi ve sonrasındaki 40 gün içerisinde meydana gelmiş 13 bölgesel depremin dalga formları ile oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin yapısında zamana bağlı değişimlerin, a-periyodikliğin, kaotikliğin belirlenmesinde, dolayısıyla düzensiz sistemleri anlamada güncel ve yeni uygulama alanları incelenmiştir.

Sonuç olarak, skalogram ölçek endeksi yöntemi farklı fiziksel dinamik sistemlerden elde edilen gerçek verilere uygulanarak, yöntemin bu sistemlerde a-periyodiklik ve kaotiklik derecesini belirlemede kullanılabilirliği gösterilmiştir. Tezde elde edilen bu sonuca göre, skalogram ölçek endeksi yönteminin Duffing osilatörü ile birlikte Sismik dalgalar ya da EEG sinyalleri gibi kaotik sinyallerde zayıf periyodik sinyaller tespit etmede de bir yöntem olarak uygulanabileceği anlaşılmıştır.

Aralık 2016, 83 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** En büyük Lyapunov stelleri, Skalogram lek endeksi, Lojistik harita, Henon haritası, Bonhoeffer-van der Pol osilatörü.

## **SUMMARY**

### **Ph.D. THESIS**

#### **ANALYSIS OF REGIONAL EARTHQUAKES WITH WAVELET SCALOGRAM, SCALOGRAM SCALE INDEX AND POWER SPECTRUM METHODS**

**Nazmi YILMAZ**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Physics**

**Supervisor : Prof. Dr. K. Gediz AKDENİZ**

Chaotic dynamical systems have sensitive dependence on the initial conditions, are non-periodic or they do not converge to a periodic orbit. Sensitivity to initial conditions can be determined by the Maximum Lyapunov Exponents. Non-periodicity can be studied by Fourier transform. But, for non-stationary chaotic signals, wavelets are more applicable. Especially, when analysing chaotic dynamical systems the wavelet transform is a very useful method. A new technique based on Continuous Wavelet Transform of a signal can be used in detecting chaos transitions in a dynamical system and complement Maximum Lyapunov Exponents. The ratio of the scale where the scalogram value is maximum to the scale where the scalogram value is minimum after the initial maximum can be calculated. The result determines the scalogram scale index. When the signal is non-periodic this parameter only has positive value and can be used as a measure of non-periodicity of a signal.

Scalogram scale index method was introduced by Benitez et al. (2010) and applied to the classical dynamical systems of Bonhoeffer-van der Pol oscillator, Henon Map, and Logistic Map. The method gave consistent results with Maximum Lyapunov Exponents in showing chaos transitions in those dynamical systems. In this work, scalogram scale index method was tested in real data for the first time. Time series were constructed from the data of 23/10/2011 Van-Tabanlı Earthquake which is known to show unique chaotic characteristics and 13 more regional earthquakes which took place the following 40 days

of the main shock. Time dependent changes in the nonlinear dynamical systems, determination of the degree of a-periodicity and chaotic behaviour were analyzed to understand nonlinear dynamical systems.

This work has shown that scalogram scale index method can be a useful tool to measure a-periodicity, hence the degree of chaos in real data taken from different physical dynamical systems. It is understood from the result in this thesis that scalogram scale index method can be used with Duffing oscillator in detecting weak periodic signals in chaotic systems such as EEG signals or seismic waves.

December 2016, 83 pages.

**Keywords:** Maximum Lyapunov exponents, Scalogram scale index, Lojistic map, Henon map, Bonhoeffer-van der Pol Oscillator.





## 1. GİRİŞ

Doğa düzensiz alt sistemlerden oluşan bir yapıdır. Bu alt sistemlerin düzensizliğini anlamak ve çözmek için farklı indirgemeci yöntemler geliştirilmiştir. Tarih boyunca, insanın düşünüş biçiminin mitolojik, dinsel, felsefi ve bilimsel alanda evrimleşerek ilerlediği görülmektedir [1,2,3,4]. Bilimsel düşüncenin indirgemeci özelliği sayesinde insanoğlu büyük bir ilerleme sağlamış ve düzenli yapılardan hareketle karmaşıklığı ihmal eden yaklaşım yöntemiyle birçok problemin çözümü sağlamıştır. Günümüzde maddeyi oluşturmakta olan atom altı temel parçacıklar hakkında bilgi sahibiyiz. Bu ilerlemeye rağmen henüz doğanın karmaşık dinamik yapısını çözenin çok uzağındayız. Bilimdeki indirgemeci yaklaşım, problemlerin çözümünde ilerleme sağlamasına rağmen insanoğlunun sahip olduğu doğaya bütünsel çerçevede bakabilme yeteneğini büyük ölçüde yitirmiştir. İndirgemeci düşüncenin alanlara ayırma ve anladıktan sonra onları bir araya getirme yöntemi zaman içinde insanoğlunun ayrıntılarda boğulmasına yol açmıştır. Modern bilim doğadaki düzensiz görünümde olan ve içinde düzen, yani periyodik hareketler barındıran Newton'cu yöntemlerle kurulmuştur ve ilerlemesini bu model topluluklarıyla sürdürmüştür. 1600'lü yıllarda sadece birkaç bilim dalı olmasına rağmen günümüzde bu sayı alt bilim dallarının oluşması ile birlikte binlere ulaşmıştır. Bilim artık tek tek küçük parçalarla uğraşır hale gelmiş, bilim dallarının birbirleri arasındaki kopuk ta buna eklenince problemler daha karmaşık hale gelmiştir.

Bugün bilim dünyasında bu doğrusal-indirgemeci düşünme tarzının tüm sorulara cevap veremediği görülmektedir. Bu aşamada bilim artık başka yöntemlerle veya farklı düşünme tarzlarıyla gelişmesini ilerletmek durumundadır. Yeni bir paradigma veya yeni bilimin önemli bir temeli olarak ifade edilen kaos teorisi bu amaçla geliştirilmiştir [5]. İçinde yaşadığımız Doğa, çok karmaşık a-periyodik yapıları dinamik sistemler topluluğundan meydana gelmiştir. Kaos teorisinin geliştirilme amacı, bu düzensiz sistemlerin karmaşık davranışlarını tanımlamak ve anlamaya çalışmaktır..

Doğrusal olmayan, kaotik özellikler gösteren dinamik sistemlerin incelenmesi, yine doğrusal olmayan yöntemlerle mümkün kılınmaktadır. Bunun için zaman serisi analiz

yöntemi [6,7] gibi dinamik sistemlerin kaotik özelliklerini tespit etmek ve aynı zamanda sistemlerin kendi içindeki mevcut olabilecek düzensiz yapılarını ortaya çıkarmak için indirgemecilik dışında yeni yöntemler geliştirilmiştir. Dinamik sistemlerin yapısında zaman bağlı değişmelerin ve kaotikliğin belirlenmesinde kullanılan zaman serisi analiz yöntemlerinden faydalanarak, özellikle düzensiz sistemleri anlamada yeni uygulama alanları oluşturulabilmiştir [8,9,10,11]. Ayrıca düzensiz dinamik bir sistem olarak kabul edebileceğimiz ve kaotik özellik gösteren deprem ve artçıların [12,13] zamana bağlı büyüklük verilerinin değerlendirilmesi, alternatif bir yöntem olarak zaman serisi analizi ile yapılabilir [14,15,16].

Kaotik dinamik sistemlerle ilgili çalışmalarda, sistemin periyodik yörünge sayısını bir ya da daha fazla parametre değeri için temsil eden çatallaşma (bifürkasyon) diyagramlarının kullanması yaygındır. Bu diyagramlar bize dinamik sistemlerin teorisinde, sistemin kaotik duruma geçiş yaptığı parametre değerinin belirlenmesinde yardımcı olur. [17]

Kaosun evrensel bir tanımı olmakla birlikte, bir sistem aşağıdaki üç duruma sahip ise kaotik olarak sınıflandırılır. Başlangıç koşullarına hassas duyarlılık gösteriyorsa, a-periyodik ise ve periyodik bir yörüngeye sahip değil ya da periyodik bir yörüngeye yaklaşım göstermiyorsa sistemin kaotik olduğu kabul edilir [11].

Genellikle bifürkasyon diyagramındaki kaos geçişleri sayısal olarak en büyük Lyapunov üsteli değeri ile (MLE) tespit edilmektedir. Basitçe ele alırsak, MLE başlangıçta yakınsayan yörüngelerin zamanla birbirlerinden uzaklaşma derecesini karakterize eder. MLE pozitif bir değer alıyor ise sistemin kaotik olduğu kabul edilir. Yani, MLE tekniği yukarıda belirtilen kriterlerden ilki olan başlangıç koşullarına hassas duyarlılık kriterini karşılar.

Diğer iki kriterin karşılanmasına yönelik olarak, sinyalin a-periyodikliğinin incelenmesi için Fourier dönüşümü yapılabilir. Fakat, durağan olmayan kaotik sinyallerde dalgacık dönüşümü daha uygun bir yöntemdir [18]. Bununla birlikte kısa süreli dalgacıklar, kısa süreli sinyallerde a-periyodikliğin analizi için kullanışlı bir yöntemdir.

Dalgacık teorisi görüntü işleme, zaman serisi analizi [19,20] DNA dizilimi, astronomi, iklim bilimleri [16,21,22] gibi fiziksel problemlerde ve mühendislik problemlerinde uygulanmakta olan, yeni bir matematiksel araştırma alanıdır.

Özellikle bir sinyalin dalgacık ayrıştırmasının belirlenmesinin kaotik sistemlerin incelenmesinde kullanışlı bir yöntem olduğu görülmüştür. Dalgacık dönüşümü yöntemi, Duffing osilatöründe kaotik sinyal içerisinde periyodikliğe geçişin gösterilmesinde başarılı olarak kullanılmıştır [23,24,25] Bir sinyalin en etkin ölçekteki dalgacık skalogram değeri ile en az etkin ölçekteki dalgacık skalogram değerinin oranını belirleyerek bir parametre elde ederiz. Bu parametre skalogram ölçek endeksi olarak ifade edilir ve sinyal a-periyodik iken yalnızca pozitif bir değer alır. Bu parametre, bir sinyalin sayısal olarak a-periyodiklik derecesinin ölçümünü gerçekleştirmede kullanılabilir [26,27].

Bu tezin amacı; doğrusal olmayan dinamik sistemlerin yapısında zamana bağlı değişimlerin, a-periyodikliğin, dolayısıyla kaotikliğin belirlenmesi için zaman serisi analiz yöntemleri [9,10,25] kullanmak ve özellikle düzensiz sistemleri anlamada güncel ve yeni uygulama alanları incelemek, ayrıca skalogram ölçek endeksini ilk defa gerçek verilerde test edebilmek için bir fiziksel dinamik sistem olarak kabul edebileceğimiz deprem ve artçıların analizini, özgün kaotik özellikler gösteren bir fiziksel dinamik sistem olan ve Türkiye bilim dünyası gündeminde uzunca tartışılan, aşağıda bilgileri verilen Van-Tabanlı depremi ve sonrasındaki 40 gün içerisinde meydana gelmiş 13 bölgesel depremin dalga formları ile oluşturulan zaman serilerini kullanarak objektif olarak gerçekleştirilmektir.

Bu amaç doğrultusunda tezimizde; Van ili Erciş bölgesinde 23/10/2011 tarihinde saat 13:41'de Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi verilerine dayanarak, büyüklüğü Richter ölçeği ile 6.6 olan Van-Tabanlı depremine ve sonrasında yerel bölgede meydana gelen 3 depreme ait olan, Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km) ve Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km) istasyonlarında kaydedilen sismik verilerin [28] zaman serileri oluşturulacak ve Dalgacık Skalogram, Güç Spektrumu ve en büyük Lyapunov üsteli hesaplama metotları ile fiziksel analizleri yapılacaktır. Ayrıca, Van-Tabanlı (M:6.6) depremi ve bu depremi takip eden 40 gün içerisinde yerel bölgede meydana gelen 13 deprem için yedi farklı istasyonda kaydedilen sismik verilerin zaman serileri oluşturulacak ve skalogram ölçek endeksi değerleri hesaplanarak kapsamlı bir skalogram ölçek endeksi karşılaştırması yapılacaktır.

İncelenen dalga formlarının zamana bağılı etkin frekans aralıkları, a-periyodiklik dereceleri ve dolayısıyla kaotiklik derecelerindeki değişimler zaman serisi yöntemi ile belirlenmeye çalışılacaktır. Kullanılan bu metotların bir depremin bağımsız ya da artçı olduğunu tayin etmede belirleyiciliği araştırılacaktır.

Bu tez çalışmasının plan ve çerçevesi aşağıda belirtilmiştir.

Tezin genel bilgiler kısmında dinamik sistemler, depremler, artçı depremler, deprem dalgaları ve deprem parametreleri, sismik dalgaların analiz yöntemlerinden Fourier dönüşümü ile dalgacık dönüşümü hakkında genel bilgiler verilecektir. Ayrıca tezimizde Van-Tabanlı depremi ve sonrasındaki 13 bölgesel depremin dalga formları ile oluşturulan zaman serilerini kullandığımızdan, Türkiye'deki deprem kuşakları hakkında kısa bilgiler verilecektir.

Tezin malzeme ve metotlar bölümünde dalgacık skalogram, skalogram ölçek endeksi, güç spektrumu ve yerleştirme boyutu yöntemleri ile ilgili bilgiler verilecektir, Bonhoeffer-van der Pol osilatörü [29], Lojistik harita, Henon haritası [25] ve Duffing osilatörü [30] kullanılarak skalogram ölçek endeksinin sürekli ve ayrık zamanlı diferansiyel denklemlerde, bifürkasyon diyagramı ve en büyük Lyapunov üsteli hesaplama yöntemleri ile karşılaştırması yapılarak, uygulanabilirliği gösterilecektir.

Bulgular bölümünde ise; 23/10/2011 Van-Tabanlı depremine ve sonrasında yerel bölgede meydana gelen 23/10/2011 Van-Edremit (M:4.6), 09/11/2011 Van-Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Van-Edremit (M:4.5) depremlerine ait olan, Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km) ve Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km) istasyonlarında kaydedilen sismik verilerin [28] skalogram grafikleri ve güç spektrumu grafikleri oluşturulacak ve en büyük Lyapunov üsteli değerleri hesaplanacaktır. Bu sonuçların ayrı ayrı değerlendirilmeleri yapılacak, sonuçlar arasındaki ortak fiziksel özellikler incelenecek ve farklılıklara dikkat çekilecektir. Ayrıca, Van-Tabanlı (M:6.6) depremi ve bu depremi takip eden 40 gün içerisinde yerel bölgede meydana gelen 13 deprem; 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit

(M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) için Yedisu, Şenkaya, Ağrı, Ilıcalar-Bingöl, Çukurca-Hakkari, Silvan-Diyarbakır, Sivrice-Elazığ istasyonlarında kaydedilen sismik verilen zaman serileri oluşturulacak ve skalogram ölçek endeksi değerleri hesaplanarak kapsamlı bir skalogram ölçek endeksi karşılaştırması yapılacaktır.

Tartışma ve sonuç bölümünde skalogram ölçek endeksi yönteminin gerçek bir veride uygulanması ile ilgili değerlendirmeler yapılacaktır. Ayrıca dalgacık skalogram, skalogram ölçek endeksi ve güç spektrumu yöntemleri kullanılarak, sismik verilerin a-periyodikliği ve kaotiklik derecesi hakkında ve buna dayanarak depremlerin dinamik yapıları arasında, 23 Ekim 2011 Van depremi özelinde, ana depremi takip eden artçı depremler ve özgün depremler arasındaki ilişkiler konusunda değerlendirmeler yapılacaktır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1 DİNAMİK SİSTEMLER

Bir dinamik sistem, bir faz uzayında belirli bir kurala bağlı olarak değişim gösteren bir noktayı tanımlayan matematiksel bir kavramdır. Zamana bağlı olarak değişim gösteren her şey bir dinamik sistem olarak kabul edilir. Basit bir sarkacın salınım hareketi gibi periyodik bir hareket, karmaşık biyolojik organizmaların davranışları, gezegen hareketleri, meteorolojik değişimler, insan beynindeki aktiviteler de birer dinamik sistem örneğidir.

Herhangi bir zaman diliminde bir dinamik sistem uygun bir faz uzayında bir nokta ile temsil edilen gerçek sayılarla (vektör) temsil edilen bir sistemdir. Sistemin yapısında oluşan küçük değişimler, bu sayılarda değişimlere karşılık gelir. Doğrusal bir dinamik sistemin evrim kuralı gelecek herhangi bir durumun mevcut durumu takip edeceğini açıklayan belirli bir kuraldır. Bu kural deterministtir, yani bir doğrusal dinamik sistemin mevcut durumunu, verilen bir zaman dilimi evriminde tek bir gelecek durum takip eder. Geçmişte yapılan çalışmalar, yalnızca lineer (doğrusal) dinamik sistemler üzerine yoğunlaşmakla birlikte, son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak, lineer olmayan dinamik sistemler incelenmeye başlanmıştır.

Dinamik sistemler topluluğu olan doğada, bu dinamik sistemlerden elde edilebilen verilerle sistemin zaman içinde geçirdiği evrim gözlemlenebilir. Ancak doğadaki dinamik sistemler çoğunlukla karmaşık salınım yapan sistemlerdir. Bazı basit determinist dinamik sistemlerin dahi rastgele yani önceden kestirilemez davranışlar ortaya koyduğu bilinmektedir. Faz uzayı, bir dinamik sistemin değişkenlerinin zaman içerisindeki evrimine karşılık gelen olası tüm durumların temsil edildiği bir uzaydır. Bir sistemin faz uzayında zamansal evrimini temsil etmek yaygın bir çözümlenmedir. Bir faz uzayı,  $n$ -boyutlu yerleştirme vektörlerini içerir. Faz uzayındaki bu her bir yerleştirme vektörü dinamik sistemin herhangi bir andaki kendisini temsil eder. Zaman değişimine bağlı olan bu durumlar dizesinin faz uzayında oluşturduğu eğri, yörünge olarak tanımlanır. Yani, bir

sistemin faz uzayında çizdiği yörüngeler, o sistemin davranışları hakkında bilgi edinmemizi sağlar.

Bir dinamik sistemin davranışını tanımlayan fark denklemi ya da diferansiyel denklemlerdeki fonksiyonlar doğrusal ise, dinamik sistem doğrusaldır. Doğrusallığı basit bir örnekle açıklamak mümkündür: Sistem bir dış etki ile uyarıldığında bir yanıt verecektir. Eğer sisteme uyarıcı olarak verilen bu etki iki kat artırıldığında, sistem de yanıtını iki katına artırıyorsa, doğrusal dinamik bir sistemden bahsedilmektedir.

Bir dinamik sistemin davranışını tanımlayan fark denklemi ya da diferansiyel denklemlerdeki fonksiyonlardan en az biri doğrusal değil ise, sistem doğrusal olmayan dinamik sistem olarak tanımlanır. Sisteme verilen dış etki iki kat artırıldığında, sistem yanıtını iki katına artırmayıp daha küçük ya da daha büyük yanıt veriyorsa sistemin doğrusal olmayan bir sistem olduğu anlaşılmaktadır.

## **2.2 DİNAMİK SİSTEMLERİN OTONOM ÖZELLİKLERİ**

Zamana bağlı olmayan sistemler otonom sistemler olarak adlandırılmaktadırlar. Bu tipte olan sistemlerin belirli bir andaki durumu üzerinde zamanın hiçbir etkisi yoktur. Bu sebeple sistemin bir andaki durumu, yalnızca sistemin daha önceki durumlarından etkilenmektedir.

Otonom olmayan dinamik sistemlerde sistemin durumu, değişken ve parametrelerin yanında zamana da bağımlıdır. Bu tipte olan sistemlerde zaman da bir değişken olarak diferansiyel denklem içerisine katılır. Otonom sistemlerden ayrı olarak, zamana bağımlılık nedeni ile başlangıç zamanı keyfî biçimde sıfır olarak belirlenemez. Denklemin çözümü  $t_0$  zamanında  $x_0$  dan geçen  $y(x_0, t_0)$  yörüngesidir. Zaman periyotlu otonom olmayan sistemler yardımcı ek değişken kullanılarak otonom sisteme dönüştürülebilirler. Otonom olmayan sistemlerde yörüngeler değişik zamanlarda aynı noktalardan geçebilirler.

### **2.3 SİSMİK DALGALAR, DEPREM PARAMETRELERİ VE ARTÇI DEPREMLER**

Yerküre içerisindeki volkanik aktiviteler veya yerkabuğunu oluşturan levhaların hareketi sonucu, levhaların eklemlendiği kırık düzlemlerinde biriken enerji bir anda boşalabilir. Bu enerji boşalması neticesinde oluşan titreşim dalgalarının ilerledikleri tabakaları ve yer yüzeyini sarsarak yayılması deprem olarak nitelendirilir.

Depremler oluşum şekillerine göre iki türe ayrılırlar. Tektonik depremler yerkabuğunu meydana getiren levhaların hareket etmesi sonucunda, genellikle levhaların sınır bölgelerinde oluşurlar. Yerkabuğunda oluşan depremlerin %90'ı tektonik deprem türüne dahil olmaktadır. Türkiye'de oluşan depremlerin büyük bir kısmı tektonik de tektonik deprem grubuna dahildir. Diğer bir deprem türü, volkanik depremler olarak adlandırılır. Bu depremler volkanik aktiviteler sonucunda meydana gelirler. Yerkabuğunun derinliklerinde bulunan lavların yüzeye çıkması esnasında kimyasal ve fiziksel etkileşimler nedeniyle oluşan gazlar patlamalara yol açar. Bu tür depremler, bu patlamalar ile oluşan titreşim dalgalarının yayıldıkları ortamları ve yer yüzeyini sarsması sonucu meydana gelir. Bu deprem türlerinin etkileri yanardağ bölgesi ile sınırlıdır.

Bir depremi takip eden zaman dilimi içerisinde, bu deprem nedeni ile kırılmış fay üzerinde meydana gelen ve depremin yerel bölgesinde oluşan, şiddeti bu depremden daha küçük, oluşma frekansı zamana bağlı bir şekilde azalarak devam eden çok sayıda deprem oluşur. Bu depremler artçı (after-shock) olarak adlandırılırlar [31].

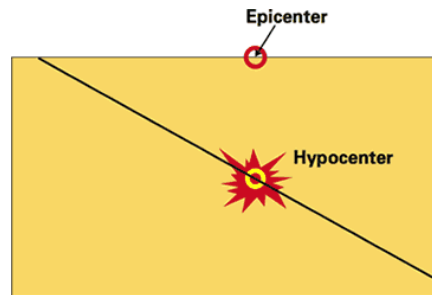
Sismik dalga, enerjinin yerkabuğu içerisinde bir noktadan diğer bir noktaya transfer olmasıdır. Deprem olduğu sırada açığa çıkan enerji, sismik dalgalar olarak yayılım gösterir. Sismik dalgalar su veya ses dalgalarına benzer fiziksel özelliklere sahiptirler. Sismik dalgalar, cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olarak ikiye ayrılır. P dalgaları ve S dalgaları şeklinde iki tip cisim dalgası vardır. Deprem kaydetme cihazlarında (sismograf) ilk olarak yayılma hızı daha büyük olan P dalgaları tespit edilirler. Yayılma hızı daha düşük olan S dalgaları deprem kayıt cihazlarında P dalgalarının devamında tespit edilen enine dalga tipleridir. Bu tip dalgalar sıvı içerisinde yayılım göstermezler. Yüzey dalgaları, cisim dalgaları ile karşılaştırıldığında yayılma hızı daha düşüktür fakat daha büyük genlik değerlerine sahiptirler ve iki dalga tipine ayrılırlar. Love dalgaları olarak



adlandırılan dalgaların hızları daha büyüktür. Rayleigh dalgaları olarak adlandırılan dalgaların genlik değerleri daha büyüktür. Yüzeysel dalgaları ve S dalgaları yer yüzeyinde ve yapılaşmada en büyük hasara yol açan neden olan dalgalardır.

Bir depremin büyüklük değeri, deprem sırasında oluşan enerjiye bağlıdır ve deprem kayıt cihazlarından elde edilen verilerle ölçümlenir. Bir depremin şiddeti ise, depremin fay hattına yakın bölgelerde yarattığı yıkım ile ölçümlenen bir göreceli değerdir. Charles Richter, deprem kayıt cihazlarında ölçülen sismik dalgaların genlik değerlerinin logaritmik hesabı ile bir çizelge oluşturmuştur. Bu çizelge Richter ölçeği olarak depremlerin büyüklüklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Güncel olarak depremlerin büyüklüğünün tespit edilmesi için farklı büyüklük hesaplamaları uygulanmaktadır. Richter'in orijinal bağıntısı kullanılarak Yerel büyüklük ( $M_L$ ) bulunur. Bu büyüklük değeri, deprem kayıt cihazına yakın mesafede oluşan derinliği düşük ve sismik dalga genliği küçük depremler için kullanılır. Yüzeysel dalgalarının genliği kullanılarak bulunan büyüklük değeri Yüzeysel Dalgası Büyüklüğü ( $M_S$ ) olarak tanımlanır. P dalgalarının genliği hesaba katılarak bulunan büyüklük değeri Cisim Dalgası büyüklüğüdür ( $M_B$ ). Deprem nedeniyle açığa çıkan enerjinin sismik momentine bağlı olarak bulunan büyük Moment Büyüklüğü ( $M_W$ ) olarak tanımlanır. Çok küçük ve yakın depremlerin süresi baz alınarak hesaplanan büyüklüğe Süre Büyüklüğü ( $M_D$ ) denir. Depremin orijin zamanı, elastik dalgaların yayılmasının başladığı zamandır.

Odak noktası (Hypocenter) depremi oluşturan kırılmanın başladığı noktadır. Depremin merkez üssü (Epicenter) bu odak noktasına dik olarak yüzeyde bulunan noktadır.



**Şekil 2.1:** Deprem Odak Noktası ve Merkez Üssü [32].

Depremin odak derinliği, odak noktasının derinliğinin yer yüzeyine dik uzaklığı, yani odak noktası ile merkez üssü arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Tektonik depremler odak derinliklerinin büyüklüğüne göre sınıflandırılabilirler. Odak noktası merkez üssü mesafesi 0-60 km aralığında olan depremler sığ depremler olarak belirlenir. Odak noktası merkez üssü mesafesi 70-300 km olan depremler ise orta derinlikte depremlerdir. Bu mesafenin 300 km ve daha fazla olduğu depremler ise derin depremler olarak tanımlanırlar.

Türkiye'de genellikle derinlikleri 0-60 km arasında olan sığ depremler meydana gelmektedir. Bu depremler hissedildikleri bölge itibariyle küçük bir alanı kapsar. Fakat bu küçük alanda büyük yıkım meydana getirebilirler. Odak noktası merkez üssü mesafesi 70 km'den daha fazla olan depremler özellikle levhaların üst üste bindiği coğrafî hatlarda meydana gelirler. Bu depremlerin sebep olduğu yıkım azdır fakat bu yıkım daha geniş bölgelerde hissedilir.

Bir depremin odak noktasına en yakın olan yer üzerindeki alan depremin dış merkezi olarak adlandırılır. Depremlerin en çok hasara yol açtığı alan dış merkezdir. Depremin şiddetiyle orantılı olarak depremin dış merkez alanının büyüklüğü değişmektedir. Büyük bir depremin dış merkezi yüzlerce kilometrelik boyutlarda bir alana yayılabilir.

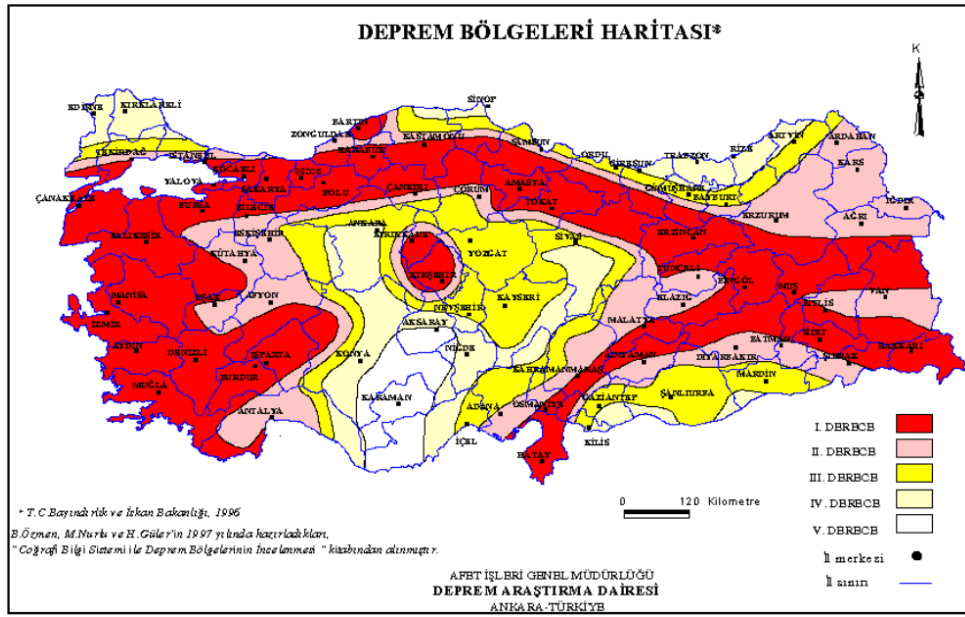
Bir deprem neticesinde aynı şiddetle sarsılan noktaları birbirine bağlayan noktalar eş şiddet eğrisi olarak adlandırılır. Eş şiddet eğrilerinin birleştirilmesi ile depremin eş şiddet haritası oluşturulur. Genel olarak kabul edilen uygulamaya göre, iki eş şiddet eğrisi içerisindeki alan, depremden aynı oranda etkilenmektedir. Bu sebeple bir depremin şiddet değeri, iki eş şiddet eğrisi arasındaki alan içerisinde eş şiddet eğrisini kesmeyecek şekilde belirlenir [18].

## **2.4 TÜRKİYE'DE DEPREM KUŞAKLARI**

Tezimizin amacı için kullanılan datalar, 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki 40 gün içerisinde meydana gelen 13 yerel depremi kapsadığından, tezimizde Türkiye'deki deprem kuşakları hakkında bilgi vermenin faydalı olacağını düşünüyüz.

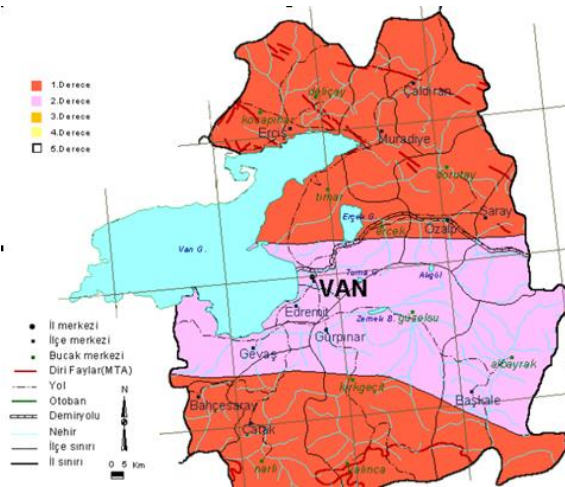
Bilindiği gibi 1900'lü yılların başlarından itibaren yapılan istatistik çalışmaları Türkiye'de iki yıllık aralıklarla hasara yol açan depremlerin meydana gelmesi ve üç yıllık

aralıklarla büyük hasara yol açan depremlerin meydana gelmesi eğilimini işaret etmektedir [29]. Bu çalışmalar, Türkiye'nin bir deprem bölgesi olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu noktada depremlerin karakteristik özellikleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olunması ve alınması gereken tedbirlerin zamanında alınması büyük önem taşımaktadır. Aşağıdaki şekilde Türkiye'de bulunan ana deprem kuşakları gösterilmektedir:



Şekil 2.2: Türkiye deprem kuşakları haritası [28].

23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki 40 gün içerisinde meydana gelen 13 yerel depremi içeren Van ilinin deprem kuşağı haritası aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:



Şekil 2.3: Van deprem kuşağı haritası [28].

## 2.5 SİSMİK DALGA ANALİZ ÖRNEKLERİ

Sismik dalgaların oluşturdukları zaman serileri doğrusal olmayan zaman serileridir. Doğrusal olmayan zaman serisi analizi, elde edilen verinin doğrusal analiz yöntemleri ile çözümlendiği durumlarda tatmin edici sonuçlar elde edilmediği, ya da verinin davranışı itibariyle doğrusal olmadığının öngörüldüğü durumlarda uygulanır. Doğrusal metotlar sistemin-veri topluluğunun düzenli davranışlarını belirler. Burada, sistemin içsel davranışlarının lineer paradigma tarafından yönlendirildiği, küçük parametre değişimlerinin ya da küçük dış etkilerin, küçük değişmelere karşılık geldiği kabul edilir. Doğrusal denklemler periyodik salınıma sahip artan ya da azalan çözümler şeklinde sonuç verirken, sistemin davranışlarında beklenmeyen sonuçların ortaya çıkması, dışarıdan rastgele bir etki-veri girişi olarak kabul edilir [33].

Kaos teorisi, bize sistemin çözümlerindeki düzensizliğin sadece dışarıdan bir rastgele müdahale olmadığını göstermiştir. Doğrusal olmayan, kaotik sistemler otonom olarak, zamandan bağımsız veri girişleri ile, yalnızca deterministik denklemler ile düzensiz sonuçlar verebilir. Sismik dalga formları kaotik davranışlar gösterir. Birçok frekans bileşenlerine sahip a-periyodik yapıları sismik dalgalar doğrusal olmayan zaman serisi oluşturur ve sismik dalgaların analizi aşağıdaki belli başlı zaman serisi analiz yöntemleri kullanılarak yapılabilir:

- 1) Fourier Analizi
  - a) Kısa Süreli Fourier Dönüşümü,
  - b) Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü
  - c) Ayrık Fourier Dönüşümü
  - d) Hızlı Fourier Dönüşümü
- 2) Dalgacık Dönüşümü
  - a) Sürekli Dalgacık Dönüşümü
  - b) Ayrık Dalgacık Dönüşümü

### 2.5.1 Fourier Analizi

Joseph Fourier (1768-1830) bir metal çubuk levhadaki ısı denkleminin çözümünde Fourier serisini kullanmıştır. Burada Fourier, sürekli periyodik bir sinyalin, sinüs ve kosinüs fonksiyonların toplam bileşenlerinden meydana geldiğini göstermiştir. Bunun

matematiksel olarak kompleks üstel fonksiyonların toplamı olarak yazılabileceğini kanıtlamıştır. Fourier serilerindeki sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının ortogonal ilişkilerinden yararlanılan bu yöntem sinyal işlemede teknik bir yöntem olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Fourier zaman-frekans dönüşümleri aşağıdaki formüllerle gösterilir [34,35].

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (2.1)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{j\omega t} dt \quad (2.2)$$

Fourier analizi, sinyal özelliklerinin zamana göre değişmediği durağan sinyal uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanabilir. Fakat, sinyalin özelliklerinin zamanla değiştiği durağan olmayan sinyallerde başarılı bir şekilde uygulanamamıştır. Çünkü Fourier dönüşümü esas olarak bir sinyali zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştürürken, sinyalin zaman bilgisi kaybolmaktadır. Bundan ötürü sinyal içerisindeki özel bir olayın sinyalin hangi bölgesinde gerçekleştiğine dair bilgi elde etmek mümkün olmamaktadır.

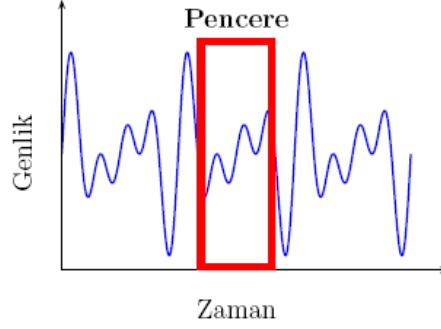
### **2.5.1.1 Kısa Süreli Fourier Dönüşümü**

Fourier analizi, sinyallerin frekanslarının zamansal evrimi konusunda başarısız kalınca; Gabor (1946), sinyalin küçük bir parçasını zaman tanım aralığında alacak bir pencereleme yöntemiyle sinyallerin analiz edilebileceğini göstermiştir. Durağan olmayan sinyallerde, zamana bağlı olarak frekans öğeleri değişmektedir. Fourier dönüşümünün genlik spektrumu, bir sinyalde mevcut farklı frekansların varlığını gösterir fakat bu frekansların zamana bağlı gösterimini içermez. Eğer kısa aralıkta bir zaman penceresinde sinyalin durağan olduğu düşünülürse, burada sinyalin Fourier dönüşümü bize bu aralıktaki frekans öğelerini verir. Bu kısa aralıklı zaman penceresini uygun biçimde kaydırarak sinyalin frekans zaman öğeleri 2 boyutlu olarak belirlenebilir. Bu 2 boyutlu gösterim kısa süreli Fourier dönüşümü (STFT) olarak adlandırılır [36].

Kısa süreli Fourier dönüşümünde, sinyalin zaman bölgesindeki  $f(t)$  fonksiyonunu bir  $g(t)$  pencere fonksiyonu ile çarparak sinyali birbirine bitişik kesitlere bölünerek analiz yapılır.

$$g(t) = \beta e^{-\alpha t^2} \quad (2.3)$$

Burada  $\beta$ : normalizasyon faktörü,  $\alpha$ : pencere genişliğidir.



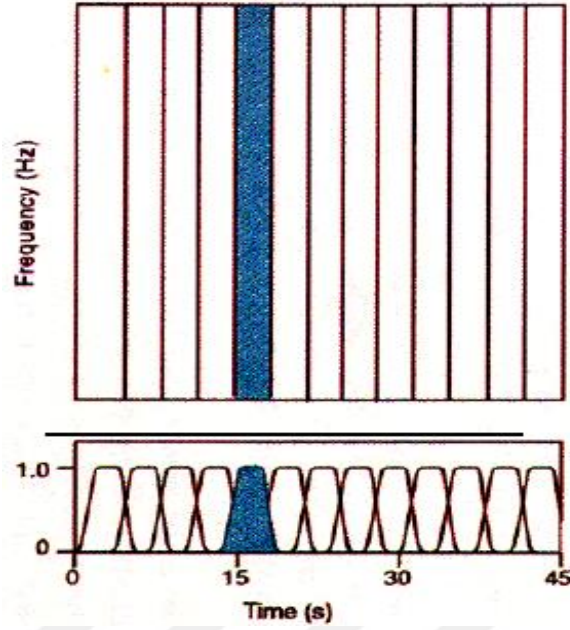
**Şekil 2.4:** Kısa Süreli Fourier Dönüşümü.

Matematiksel olarak zaman ilerlemesi  $\tau$  ve frekans  $\omega$  için “STFT”:

$$STFT_{(\tau, \omega)} = \int f(t)g(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (2.4)$$

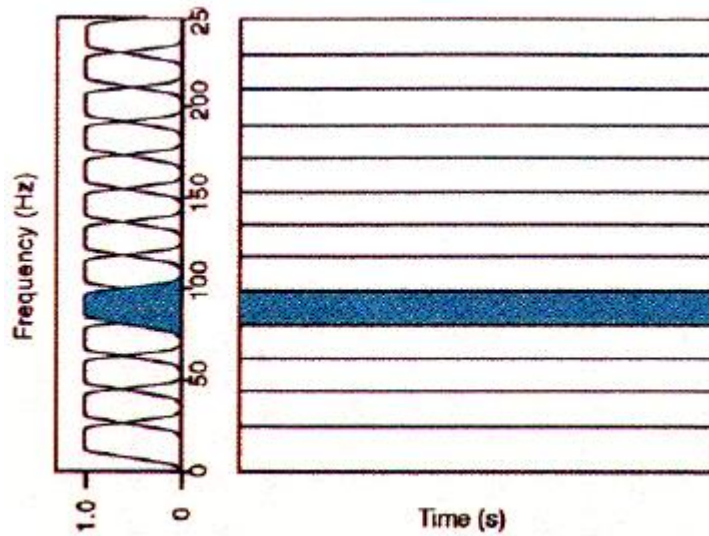
olarak gösterilir.

Burada  $f(t)$  sinyalin tam boyutu,  $g(t)$  pencereleme fonksiyonu ve  $e^{-j\omega t}$  Fourier kernel olarak ifade edilir. Sinyal  $f(t)$  ve  $g(t)$  pencere fonksiyonu ile çarpımı ile elde edilen pencerelenmiş sinyalin Fourier dönüşümü hesaplanır. Bu süreç,  $g(t - \tau)$  fonksiyonunda  $\tau$  anlık zaman kaydırılarak tekrarlanır.



**Şekil 2.5:** Fourier dönüşüm yüzeyinde zaman penceresi kullanılarak örnekleme [36].

STFT zaman boyutunda pençeleme yerine frekans boyutunda pencereleme seçilerek te uygulanabilir. Zaman ekseninde ilerleyen pencereler ile örneklem yapmak yerine frekans eksenini belirli aralıklı bant-geçirgen filtreler ile örneklemlenir. Bu filtrelerin ortalama frekanslarının merkezi frekans ekseninde eşit bir dağılıma sahip olmalıdır.



**Şekil 2.6:** Fourier dönüşüm yüzeyinde frekans penceresi kullanılarak örnekleme [36].

Şekil 2.6'da Fourier dönüşümü yüzeyinde bulunan her bir horizontal dikdörtgen, orijinal sinyalin bant-geçirgen filtrelenmiş versiyonunu temsil eder ve bant geçirgen filtrelerin frekans tepkileri gösterilmiştir. STFT'de analiz penceresi önemli rol oynamaktadır. Eğer bu fonksiyon uzun zaman aralığına ise, dar bant aralığına sahip bant-geçirgen filtreye frekans bölgesinde: Bu frekans ekseninin detaylı örneklemlenmesi anlamına gelir. Sonuçta elde edilen 2 boyutlu STFT grafiği frekansı ayırt edilemeyen sinyal bölgelerinde çözünürlüğün artmasını sağlayacaktır. Fakat, uzun süreli zaman aralığı nedeni ile zaman bölgesindeki küçük değişimler ortalama alma nedeni ile gözlemlenemeyecektir. Kısa süreli zaman aralığına sahip bir pencereleme fonksiyonu için bunun aksi geçerlidir. Bu fonksiyon zaman bölgesindeki ani değişimleri gösterebilir fakat, frekans bölgesindeki ani değişimleri tespit edemez. STFT için bir pencereleme fonksiyonu uygulandığında, zaman-frekans çözünürlüğü bütün zaman-frekans bölgesi için sabitlenmiş demektir. Yakın zamanda geliştirilmiş olan dalgacık dönüşümü, dalgacık paketi ayrıştırması ve eşleşme takip algoritması gibi yeni yöntemler değişen genişlikte pencereleme kullanır ve STFT yönteminin maruz kaldığı çözünürlük limitasyonlarına sahip değildir [36].

### 2.5.1.2 Ayırık Zamanlı Fourier Dönüşümü

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü (DTFT) ayırık zamanlı ve periyodik olmayan bir fonksiyonu ele aldığımızda bu fonksiyonun trigonometrik dalgaların toplamı şeklinde verilip verilemeyeceğini belirlemede kullanılır.

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümünün ifadesi aşağıdaki şekilde verilir:

$$X[\Omega] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-jn\Omega} \quad (2.5)$$

Ters ayırık zamanlı Fourier dönüşümünün ifadesi aşağıdaki şekilde verilir:

$$X[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X[\Omega] e^{jn\Omega} d\Omega \quad (2.6)$$

Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü bütün dijital sinyal analizi yöntemlerinin temelini oluşturur. Sürekli bir fonksiyonun ayırık örneklerini kullanarak, fonksiyonun Fourier dönüşümünün a-periyodik bir benzerini yaratabiliriz. Asıl Fourier dönüşümü ve onun tersi olan orijinal sürekli fonksiyonu tekrar elde edebiliriz ve koşullar uygun olduğunda orijinal fonksiyonu bozulmadan geri elde edebilmek mümkündür [37].



### 2.5.1.3 Ayrık Fourier Dönüşümü

Sürekli Fourier Dönüşümü (DFT) ayrık zamanlı bir sistem için yazılarak, ayrık Fourier dönüşümü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-2kj\pi n/N} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2.7)$$

Bir sinyalin ters ayrık dalgacık dönüşümü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{2kj\pi n/N} \quad n = 0, 2, \dots, N-1 \quad (2.8)$$

Ayrık Fourier dönüşümü incelenen sinyaldeki periyotları ve genlikleri ortaya çıkardığı için çok kullanışlıdır. Gerçek sayı dizisinin Fourier dönüşümü aynı uzunlukta kompleks sayı dizisine eşit olur. Ayrık Fourier dönüşümü zaman bölgesindeki ayrık sinyali frekans bölgesinde ayrık frekans spektrumuna dönüştürür. Ayrık Fourier dönüşümünde sinyal sonlu olmalıdır [38].

### 2.5.1.4 Hızlı Fourier Dönüşümü

Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) farklı bir yöntem değil, ayrık Fourier dönüşümünün simetri özellikleri ve faz faktörünü hesaba katarak hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağlayan, işlem sayısını azaltan bir biçimdir. Ayrık Fourier dönüşümünde  $N^2$  çarpana ihtiyaç var iken hızlı Fourier dönüşümünde  $N \log_2(N)$  sayıda çarpan yeterlidir. Hızlı Fourier dönüşümü  $N$  çarpanda ayrık Fourier dönüşümünü  $N/2$  çarpanda iki ayrık Fourier dönüşümü toplamı şeklinde yazarak aşağıdaki şekilde gösterilir [38]:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-2kj\pi n/N} &= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n} e^{-2kj\pi(2n)/N} + \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n+1} e^{-2kj\pi(2n)/N} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_n^{even} e^{-2kj\pi n/(N/2)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

### 2.5.2 Dalgacık Dönüşümü

Fourier dönüşümü bir sinyalin frekans bilgisini analiz etmede kullanışlı bir yöntemdir. Fakat bir sinyalin bütün zaman ekseninde Fourier dönüşümü almak istersek belirli bir frekans değerinin hangi zaman diliminde etkin olduğunu belirleyemeyiz. Kısa süreli

Fourier dönüşümü ile hareketli pencere kullanarak zaman ve frekans bilgisini elde etmek mümkündür. Fakat pencerenin genişliği frekans çözünürlüğünü kısıtlar. Dalgacık dönüşümü bu probleme bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Dalgacık dönüşümü sınırlı süreli küçük dalgacıklara dayalı bir yöntemdir. Öteleme versiyonu dalgacıklar sinyalde istenen bölgeyi analiz etmeyi, ölçek versiyon dalgacıklar sinyali farklı ölçeklerde analiz etmeyi sağlar [10,11,39]. Dalgacık dönüşümü, Kısa Süreli Fourier Dönüşümü gibi pencereleme tekniğine dayalıdır. Ancak aralarında temel farklılık vardır. Kısa Süreli Fourier Dönüşümündeki pencereleme boyutu sabit iken, dalgacık dönüşümünde pencereleme değişken boyutludur. Bu değişken boyutlu pencereleme tekniğiyle sinyalin aynı anda uzun zaman diliminde alçak frekans bilgisine ve kısa zaman diliminde yüksek frekans bilgisine ulaşılır. Özellikle dinamik sinyallerin zaman-ölçek bölgesinde yerel olarak daha iyi analiz edilmesi sağlanır. Dalgacık dönüşümü ile dinamik sistemlerin zaman serilerindeki süreksizlik, ani sıçramalar gibi ani frekans değişimlerini gözlemleyebiliyoruz. Dalgacık dönüşümlerin bu özelliklerinden dolayı sismik dalgalar ve EEG sinyalleri gibi doğrusal olmayan dinamik sistemlerin analizinde artık günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalgacık dönüşümü yöntemi, sürekli dalgacık dönüşümü ve ayrık dalgacık dönüşümü olarak ikiye ayrılır [30].

Dalgacık dönüşümü, matematiksel bir işlemdir, veri sinyaline bir dalgacık şekli uygulayarak, sinyalden yeniden bir sinyal üretme tekniğini kullanır. Yani veri sinyalini ana dalgacık fonksiyonu ile ötelenme ve yayılması ile baz fonksiyonlarını oluşturularak analiz edilir. Dolayısıyla dalgacık fonksiyonu ölçekleyerek ve öteleyerek sinyali farklı frekans bileşenlerine ayırır ve her bileşenin kendi ölçeğine uygun çözünürlükle ölçülmesini sağlar. Bu teknik, Fourier analizinde sinyalin farklı frekanslardaki sinüs ve kosinüs bileşenlerine ayırması ile benzerdir. Dalgacık dönüşümünde, ana dalgacılığın ötelenmesinde zaman bilgisi, ana dalgacılığın ölçeklenmesinde frekans bilgisi elde edilir. Ana dalgacılığın ötelenme ve ölçeklenir durumu sinyali bileşenlerine ayrılır, buradan sinyalin içindeki bilgiler ile dalgacık arasındaki ilişki ölçek katsayıları olarak belirlenir. Bu ölçek katsayıları zaman boyutunu ifade ettiği gibi gösterilen eğride esasında frekans bilgisini de içerir. Netice olarak, dalgacık dönüşümü sinyali hem frekans bölgesinde hem de zaman bölgesinde inceleyebilmektedir. Dalgacık dönüşümü bu özelliğinden dolayı Fourier analizine göre büyük bir avantaj sağlar [30].

Dalgacık dönüşümü ile ilgili çalışmaların tarihçesine kısaca değinirsek; dalgacık ile ilgili ilk çalışma Haar dalgacığı üzerine yapılmıştır. Bu çalışma matematikçi Alfrd Haar tarafından 1909'da gerçekleştirilmiştir. Bu tarihte dalgacık konsepti henüz ortaya çıkmamıştır. Dalgacık konsepti ilk kez 1981 yılında jeofizikçi Jean Morlet tarafından önerilmiştir. Sonrasında Morlet ve fizikçi Alex Grossman 1984 yılında dalgacık terimini literatüre kazandırmıştır. 1985 yılına kadar Haar dalgacığı bilinen tek ortogonal dalgacık olmuştur. Birçok araştırmacı, bu dalgacık dışında başka bir ortogonal dalgacık bulunamayacağını düşünmüştür. Fakat 1985'te matematikçi Yves Meyer Meyer dalgacığı isimli ikinci bir ortogonal dalgacığı oluşturmuştur. Konu ile ilgilenen araştırmacı sayısı giderek artmış ve 1987 yılında dalgacık ile ilgili ilk uluslararası konferans Fransa'da yapılmıştır. 1988 yılında Stephane Mallat ve Meyer çokluçözünürlük konseptini geliştirmiştir. Aynı yıl Ingrid Daubechies kompakt destekli ortogonal dalgacık oluşturma için sistematik bir metod ortaya atmıştır. 1989 yılında Mallat hızlı dalgacık dönüşümü yöntemini geliştirmiştir. Bu hızlı algoritma sayesinde dalgacık dönüşümü kuantum fiziğı, sinyal ve gürültü işleme, ses ayırma, jeolojide deprem tahminlerinde, görüntü ve veri sıkıştırma gibi birçok uygulama alanı bulmuştur [10].

### 2.5.2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık teorisi ölçekleme fonksiyonu ve dalgacık fonksiyonu olarak bilinen iki özel fonksiyonun varlığı ile temellendirilir. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT),  $\psi_{u,s}(t)$  olarak tanımlanmış bir pencere dalgacık fonksiyonun ölçeklenmiş ve ötelenmiş şekliyle  $f(t)$  sinyaline çarpım tarzında uygulanarak geliştirilen bir sinyal işleme yöntemidir. Dalgacık fonksiyonun ölçek değiştirme işleminde sinyalin frekans değerini bulmakta, öteleme işleminde ise sinyalin farklı bölgesini incelemede kullanılır [40,41].

Bir dalgacık fonksiyonu  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  uzayında, ortalama 0 değere sahip,  $(\int_{\mathbb{R}} \psi = 0)$ ,  $\|\psi\| = 1$  ve  $t=0$  komşuluğunda merkezlenen bir fonksiyondur. [11]. Bir dalgacık fonksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\psi_{j,k}(t) := \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right) \quad (2.10)$$

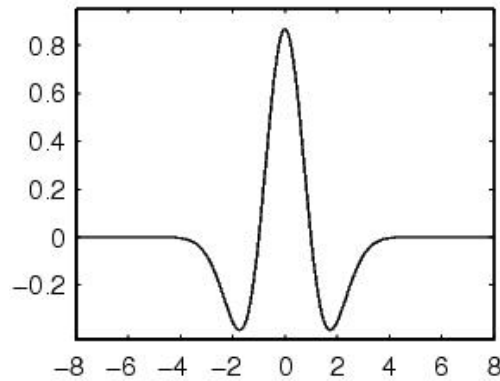
Burada  $j, k \in Z$  'dir. Dalgacıkları dyadik dalgacıklar  $\{\psi_{j,k}\}_{j,k \in Z}$  ailesi,  $L^2(R)$  uzayının bir ortogonal temelini oluşturur.  $\psi$  dalgacık fonksiyonunu pozitif bir sayı  $s$  ile ölçekler isek, ve  $u \in R$  sayısı ile öteler isek,  $\psi_{u,s}$  zaman-frekans atomlar ailesini aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

$$\psi_{u,s}(t) := \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right), \quad , u \in R \quad s > 0, \quad (2.11)$$

$f \in L^2(R)$  olduğunda,  $f$  fonksiyonunun  $u$  öteleme zamanında ve  $s$  ölçeğinde sürekli dalgacık dönüşümü (CWT):

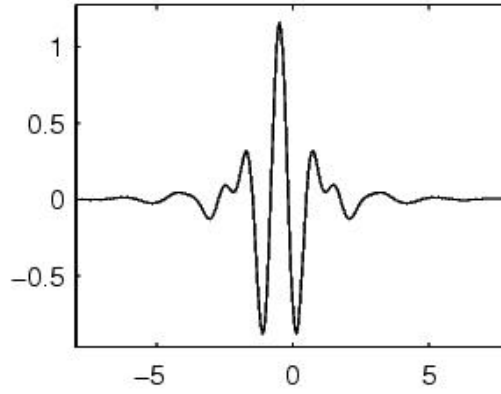
$$Wf(u, s) := \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{u,s}^*(t) dt \quad (2.12)$$

olarak tanımlanır ve  $f$  fonksiyonunun ölçek  $s$  ve zaman bölgesi  $t$ 'ye karşılık gelen frekans bilgilerini gösterir [8]. Dalgacık dönüşümünde, analiz edilecek veri sinyallerin karakteristik özelliklerini daha iyi çözümleyecek biçimde uygun bir ana dalgacık şeklini seçilmesi mümkündür. Meksika şapkası, Daubechies, Haar, Symlet, Meyer ve Coiflet bu dalgacık tiplerin en bilinenlerdendir [42]. En çok kullanılan bazı ana dalgacık çeşitleri ve formülleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



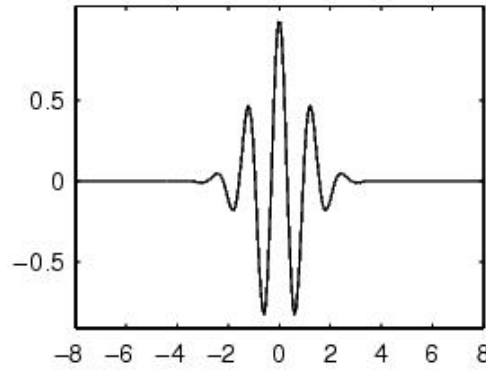
Şekil 2.7: Meksika şapkası dalgacığı [34].

$$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}}\right) (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.13)$$



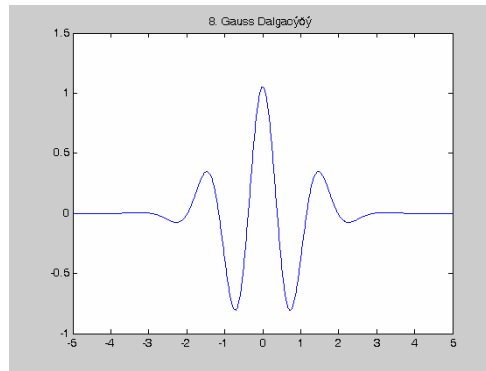
Şekil 2.8: Meyer dalgacı [34].

$$\bar{\psi}(\omega) = (2\pi)^{\frac{-1}{2}} e^{\frac{i\omega}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1\right)\right) \quad (2.14)$$



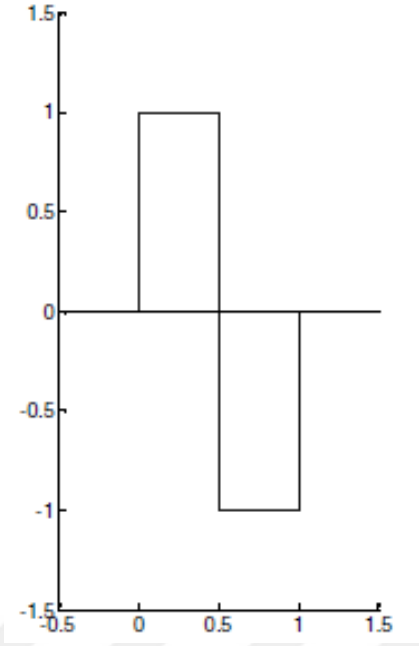
Şekil 2.9: Morlet dalgacı [34].

$$\psi(x) = C e^{\frac{-x^2}{2}} \cos(5x) \quad (2.15)$$



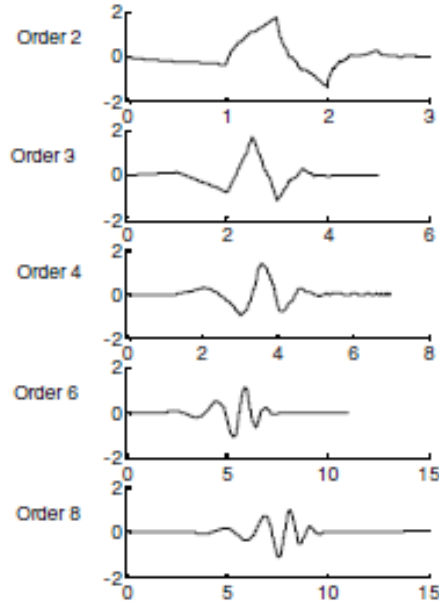
Şekil 2.10: Gauss dalgacı [34].

$$\psi(x) = C_p e^{-x^2} \quad (2.16)$$



Şekil 2.11: Haar dalgacı [27].

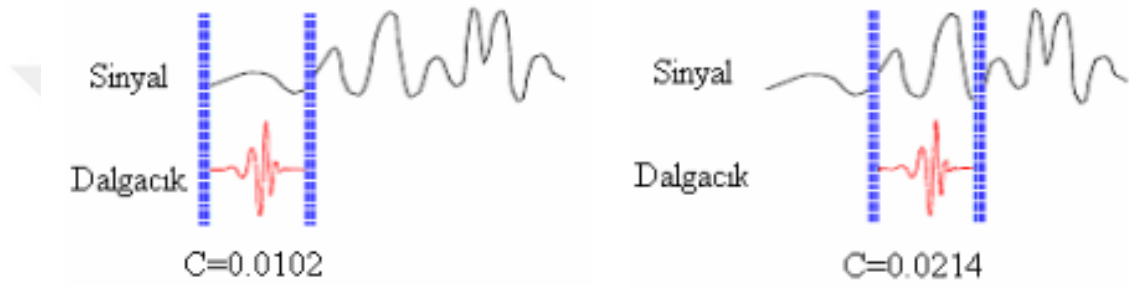
$$\begin{aligned}
 \psi(x) &= 1 & 0 \leq x < 1/2 \\
 \psi(x) &= -1 & 1/2 \leq x < 1 \\
 \psi(x) &= 0 & x \notin [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$



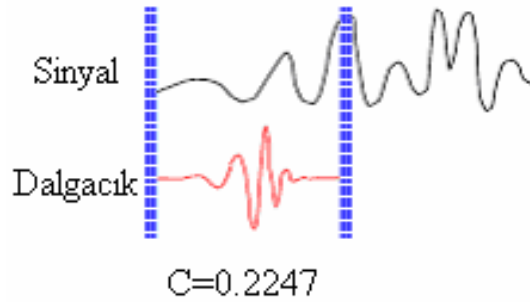
Şekil 2.12: Daubechies dalgacıları [27].

$$\begin{aligned}
 C_i &= g_0 S_{2i} + g_1 S_{2i+1} + g_2 S_{2i+2} + g_3 S_{2i+3} \\
 C[i] &= g_0 s[2i] + g_1 s[2i + 1] + g_2 s[2i + 2] + g_3 s[2i + 3]
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Sürekli dalgacık dönüşümü uygulanmasında, önce sinyalin karakteristik özelliklerine göre ana dalgacık fonksiyonu seçilir. Sinyalin ilk kısmı dalgacık fonksiyonuyla olan benzerliği bir  $C$  katsayısı ile bulunur.  $C$  katsayısının değeri ne kadar artar ise sinyal ile ana dalgacık fonksiyonu o oranda benzerlik gösterir. Dalgacık fonksiyonu zaman ekseninde kaydırılarak sinyalin diğer kısımlardaki farklı ölçeklerdeki katsayıları bulunur ve sinyalin ölçek-zaman eğrisi elde edilir. Fakat, sürekli dalgacık dönüşümüyle tüm ölçekte dalgacık katsayılarının hesabı gerek duyulandan fazla veri üretilmesine yol açmaktadır [19,34,41,43].



Şekil 2.13: Dalgacık fonksiyonunun sinyal üzerinde kaydırılma işlemi [43]. (a) Başlangıç hali (b) Sağa kaydırılmış hali



Şekil 2.14: Ölçeğin değiştirilmesi [43].

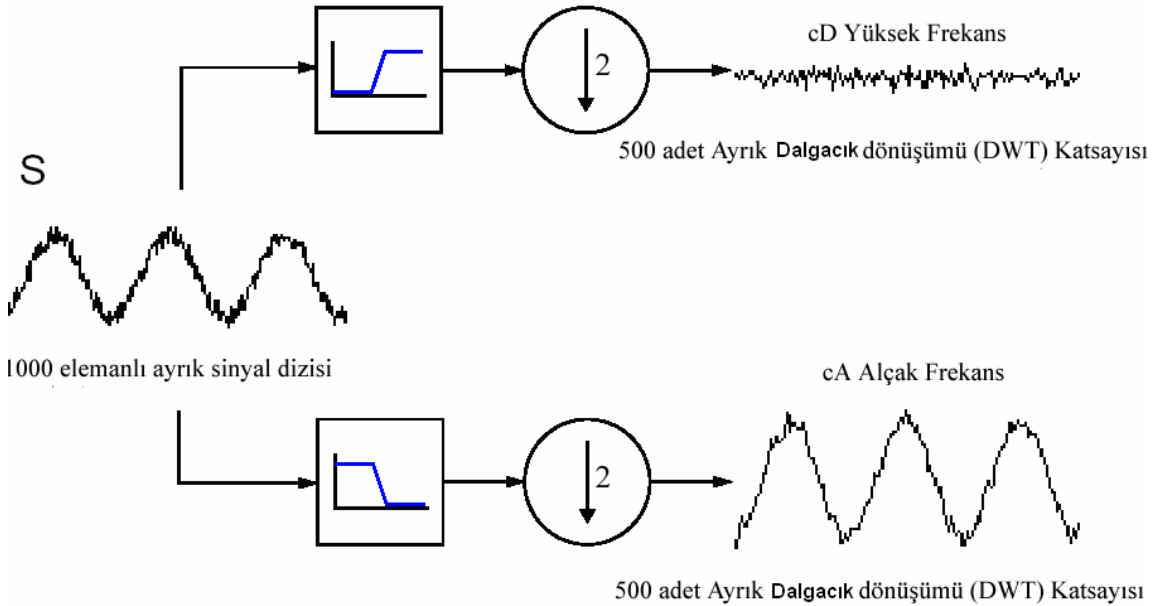
### 2.5.2.2 Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Sürekli Dalgacık Dönüşümü her ölçek aralığı için dalgacık katsayılarının hesaplanmasına dayalıdır. Bu hem analiz işleminin uzanmasına hem de gereksiz birçok bilginin sinyal içerisine yığılmasına yol açar. 1988 yılında Mallat bu sorunun üstesinden gelmek için, sinyalleri filtreleyerek sadece belirli ölçek aralıklarında analizini gerçekleştirmiştir. Bu

analiz biçimi ‘Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT)’ olarak adlandırılır. Matematiksel kuram ve analiz işlemi sürekli dalgacık dönüşümündeki ile aynıdır [16,34,40,44].

Bir sinyalin frekans bilgileri alçak ve yüksek bileşenlerine ayrıştırılabilir. Alçak frekans sinyalin esasını temsil ederken, yüksek frekans ise sinyalin ayrıntısını temsil eder. Örnek olarak, insan sesindeki yüksek frekansı ortadan kaldırdığımızda sadece sesin tonu farklılığa uğramaktadır, fakat alçak frekans bileşeni ortadan kaldırırsa ortaya çıkan ses anlaşılabilir şekilde değişmeye uğramış olur [18,40].

Ayrık Dalgacık Dönüşümü, iki kanal alt bant kodlamasını yapan filtreleme algoritmasını kullanarak, sinyali alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrıştırır. Buradaki alçak frekans bileşenine yaklaşımlar olarak adlandırılır. Bu yaklaşımlar büyük ölçeklidir ve A ile ifade edilir. Yüksek frekans bileşenine ise de detaylar olarak adlandırılır, detaylar D ile ifade edilir ve küçük ölçeğe sahiptir. Bir sinyale Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulamak, sinyali eşit sayıda alt frekans bileşenlerine (cA-cD) ayırmış olmak anlamına gelir. Yani, her Ayrık Dalgacık Dönüşümünün Mallat algoritması kullanarak, sinyalin eleman sayısını yarıya indirgeyerek ayrık sinyallerin (cA-cD) eleman sayısını bulabiliriz [18,40].



Şekil 2.15: Mallat algoritması ile ayrık dalgacık dönüşümü uygulanması [35].



Ayrık Dalgacık Dönüşümünde, yüksek geçiren filtrelerde ‘dalgacık fonksiyonu  $\psi(t)$ ’ kullanırken, alçak geçiren filtrelerde ise ‘ölçekleme fonksiyonu  $V(t)$ ’ kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlara ait denklemler aşağıdaki şekildedir:

$$V(t) = 2 \sum_{k=0}^N h(k)V(2t - k) \rightarrow \text{Ölçekleme fonksiyonu} \quad (2.19)$$

$$\psi(t) = 2 \sum_{k=0}^N g(k)V(2t - k) \rightarrow \text{Dalgacık fonksiyonu} \quad (2.20)$$

$h(k)$ : alçak geçiren filtre katsayısı;

$g(t)$ : yüksek geçiren filtre katsayısı.

$$g(k) = (-1)^k h(N - k) \rightarrow g(k) \text{ ve } h(k) \text{ arasındaki ilişkiyi ifade eder.} \quad (2.21)$$

Buradaki  $N$  toplam katsayı adedidir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

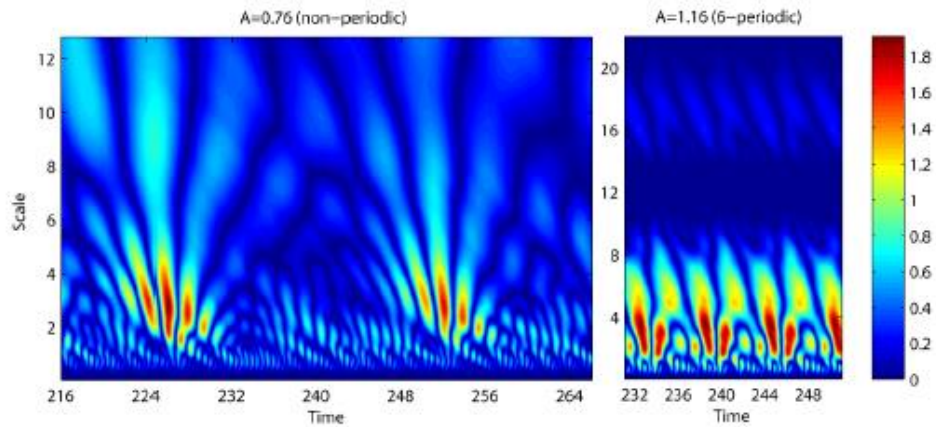
Bu bölümde, bölgesel depremlerden elde edilmiş olan sismik verilerin analizinde kullanacağımız dalgacık skalogram, skalogram ölçek endeksi ve güç spektrumu yöntemleri ve karşılaştırma için kullanacağımız yerleştirme teoremi yöntemi hakkında bilgiler verilecektir.

#### 3.1 DALGACIK SKALOGRAM

Bir  $f$  sinyalinin skalogramı  $S$ , aşağıdaki şekilde tanımlanır [8]:

$$S(s) := \|Wf(u, s)\| = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} |Wf(u, s)|^2 du \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

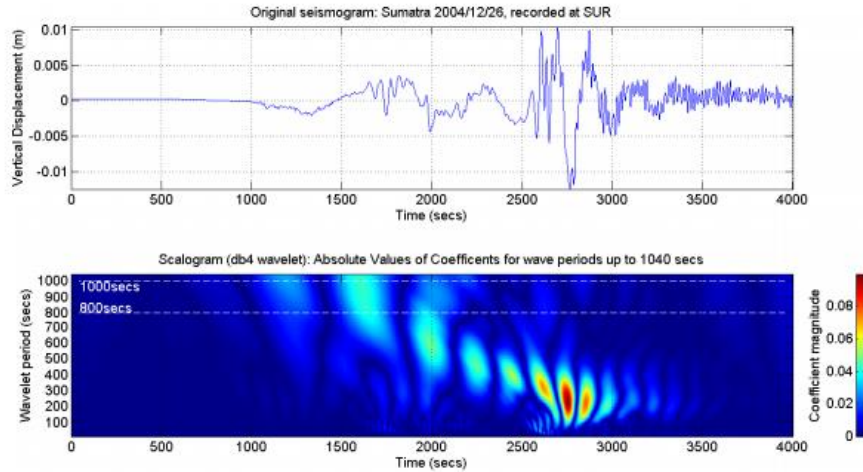
Burada  $S(s)$ ,  $f$  sinyalinin  $s$  ölçeğinde elde edilen sürekli dalgacık dönüşümünün enerjisidir. Açık olarak, tüm  $s$  ölçekleri için skalogram,  $S(s) \geq 0$  değerlerine sahiptir. Ve eğer bir  $s$  ölçeğinde  $S(s) > 0$  ise,  $f$  sinyalinin bu ölçekte bileşenleri (frekans detayları) var deriz [8]. Skalogram bir sinyalin analiz edilmesinde kullanışlı bir yöntemdir. Çünkü sinyallerin en etkin ölçeklerinin (frekanslarının) tespit edilmesini sağlar. Yani sinyalin total enerjisine en çok katkı sağlayan ölçeklerin belirlenmesini sağlar.



Şekil 3.1: BvP denkleme ait bir skalogram grafiği [8].

BvP denkleminin Daubechies dalgacık (sırasıyla birbirini takip eden sekiz dalgacık ve dört dalgacık) fonksiyonu kullanılarak  $A=0.76$  (sol) ve  $A=1.16$  (sağ) parametreleri için elde edilmiş zaman-frekans ayrışması. Bu 2 boyutlu gösterimde her bir nokta sürekli dalgacık dönüşümünün dalgacık katsayılarının çarpımına karşılık gelir. Burada  $A=1.16$  için sürekli dalgacık dönüşümünün dalgacık katsayıları ölçek değeri 12 iken tüm zaman dilimleri için 0 olur.

Üç boyutlu Skalogram grafiğinde x eksenı zamanı, y eksenı frekans bilgisi içeren scalogram ölçeğini, z eksenı dalga katsayısı enerjisini gösterir. Z eksenı genellikle parlaklık olarak ya da renk değişimi olarak temsil edilir. Skalogram, bir zaman serisinde farklı periyodik öğeler tespit etmede kullanılır. Bu yöntemle, ana dalgacık olarak adlandırılan hareketli bir dalgacık penceresi kullanılarak, sinyalin yerel spektral bilgisi analiz edilir. Aşağıda sismik bir veriye ait skalogram grafiği gösterilmiştir:



**Şekil 3.2:** 2004 Sumatra depremine ait seismogram ve bu sismograma ait skalogram grafiği [45].

### 3.2 SKALOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ

Bu bölümde yeni bir parametre skalogram ölçek endeksinden bahsedeceğiz. Bu parametre, sinyalin ne derece a-periyodik olduğunu belirlememizi sağlar. Skalogram değerinin maksimum olduğu ölçek ile, takip eden minimum değerin oranı bize ölçek indeksini verir. Bu değer, sinyal periyodik olmadığında pozitifdir ve bir sinyalin kaotiklik derecesini belirlemede kullanılabilir.

Ölçek endeksi, sismik dalgalarda a-periyodikliğin belirlenmesini sağlayan ve MLE'ye kaos geçişlerinin belirlenmesinde destek ve alternatif olabilecek bir yöntemdir. Bu yöntem, bir sinyalin sürekli dalgacık dönüşümüne (CWT) bağlı bir yöntemdir [8].

Matematiksel olarak ifade etmek istersek [8]; eğer  $f : R \rightarrow C$  fonksiyonu,  $L^2(|0, T|)$  uzayında tanımlanmış, T periyotlu periyodik bir fonksiyon, ve  $\psi$  kompakt destekli bir dalgacık fonksiyonu ise,  $Wf(u, s)$ , f fonksiyonunun dalgacık dönüşümü,  $u \in R$  zaman öteleme ve  $s \in R^+$  ölçek değeri için belirlenmiştir. Burada bir sinyal, f, tüm ölçeklerde bir frekans değerine sahip ise, yani herhangi bir ölçekte f fonksiyonunun skalogram değeri sifıra gitmiyor ise, bu sinyal a-periyodiktir.

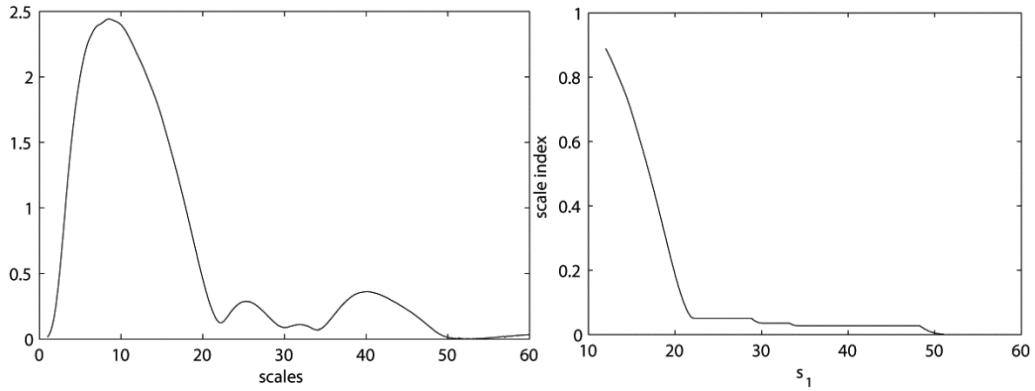
Periyodik ve a-periyodik sinyallerin nasıl ayrıştırılabileceğine yönelik aşağıdaki teorem sunulabilir [8].  $f : R \rightarrow C$  olan  $L^2(|0, T|)$  uzayında T periyotlu bir periyodik fonksiyonu ve  $\psi$  kompakt destekli bir dalgacık fonksiyonu düşündüğümüzde, f fonksiyonunun dalgacık dönüşümü fonksiyonu tüm  $u \in R$  zaman öteleme değerleri için  $Wf(u, 2T) = 0$  'dır. Gerekçe olarak;  $f := I = [a, b] \rightarrow C$  T periyotlu,  $L^2(|a, a + T|)$  uzayında bir periyodik fonksiyon düşünelim. Eğer  $\psi$  kompakt destekli bir dalgacık fonksiyonu ise, f fonksiyonu iç skalogram değeri her bir 2T ölçek değerinde 0'a gider. Bu sonuçlar periyodik ve a-periyodik sinyallerin tespit edilmesinde faydalı bir dayanak oluşturur. Çünkü, her ölçekte bir değere sahip olan sinyal a-periyodik olmalıdır.

Nümerik olarak bir sinyalin periyodik olup olmadığını tespit edebilmek için bu sinyalin skalogram değerlerini göreceli geniş bir zaman diliminde analiz etmek gerekir. Ek olarak, T periyotlu bir periyodik sinyalin her bir  $2kT$  ölçeğinde ( $k \in N$  için) skalogram değeri 0'a gideceğinden, temel ölçek  $s_0$  'dan büyük olan ölçekleri analiz etmek yeterli olacaktır. Böylece, bir sinyal herhangi bir büyük ölçekte bir detaya sahip ise bu sinyalin a-periyodik olduğunu belirtir. Pratikte skalogram analizi belirli ölçek aralığında  $[s_0, s_1]$  yapılabilir. Skalogramın bu aralıkta maksimum değerine ulaştığı, yani f sinyalinin en etkin temsil edildiği ölçek  $s_{\max}$  olacaktır. Eğer  $S(s)$  skalogram değeri,  $S(s_{\max})$  ile karşılaştırıldığında  $s > s_{\max}$  ölçek değerleri için  $[s_0, s_1]$  ölçek aralığında, daha küçük değer almaz ise sinyal "nümerik olarak a-periyodik" kabul edilir.

Bu değerlendirmeler ışığında, bir  $f$  sinyalinin  $[s_0, s_1]$  ölçek aralığında “ölçek endeksi” değerini aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz [8]:

$$i_{scale} = \frac{S(s_{min})}{S(s_{max})} \quad (3.2)$$

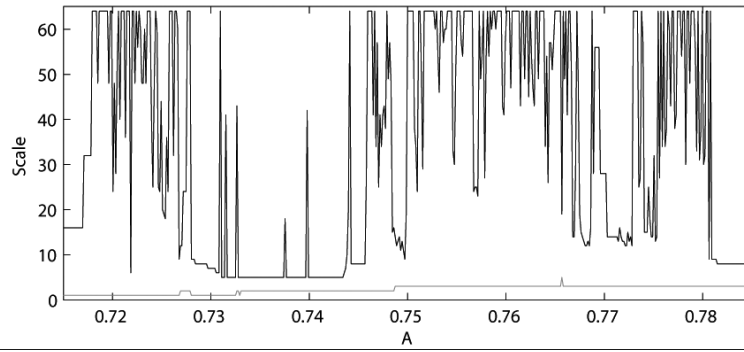
Burada,  $s_{max}$  ölçeği,  $s \in [s_0, s_1]$  için  $S(s) \leq S(s_{max})$  koşulunu karşılayan en küçük ölçektir. Ve  $s_{min}$  ölçeği,  $s \in [s_{max}, s_1]$  için  $S(s_{min}) \leq S(s)$  koşulunu karşılayan en küçük ölçektir. Kompakt destekli sinyaller için sadece normalize iç skalogram değeri değerlendirmeye alınır. Bu tanımdan yola çıkarak, ölçek endeksi  $i_{scale}$  değeri  $0 \leq i_{scale} \leq 1$  aralığında değerler alabilir. Ve bir sinyalin a-periyodiklik derecesinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bir sinyal a-periyodik ise, bu sinyalin ölçek endeksi değeri sıfır olacak ya da nümerik olarak sıfıra yakınsayacaktır. Eğer bir sinyalin ölçek endeksi değeri 1’e yakınsar ise bu sinyal yüksek derecede a-periyodiktir. Ölçek aralığı  $[s_0, s_1]$  seçimi, skalogram analizinde önemli bir noktadır. Bir sinyalin a-periyodik karakteri, sinyalin büyük ölçeklerdeki davranışlarından belirlenebildiği için  $s_0$  değerinin çok küçük seçilmesi gereksizdir. Genel olarak  $s_1$  değerini,  $s_{max} = s_0 + \varepsilon$  şeklinde,  $\varepsilon$  pozitif ve sıfıra yakın bir değer olacak şekilde seçebiliriz [8].



**Şekil 3.3:** Sol: Periyodik yakınsayan bir fonksiyon için dörtlü Daubechies Dalgacık fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş normalize iç skalogram değerleri [8] Sağ: Ölçek endeksi değerleri;  $s_1$  ölçek değeri büyütüldüğünde ölçek endeksi değerleri 0 olmaktadır.

Bir başka deyişle,  $s_1$  ölçeği sinyaldeki periyodik karakteristiği tespit edebilmek için yeterince büyük seçilmelidir. Örnek olarak, eğer periyodikliğe yakınsayan bir  $f$

fonksiyonu ( $f \in R$ ) ele alırsak,  $t \in R$  zaman aralığında her bir  $\varepsilon > 0$  değeri için bir periyodikliğe yakınsayan  $T(\varepsilon)$  değeri ( $|f(t+T) - f(t)| < \varepsilon$ ) karşılık gelecektir [8]. Yani,  $\varepsilon$  değeri nümerik olarak 0'a yakın seçilir ise fonksiyonu, nümerik olarak T-periyodik olduğunu belirtecek şekilde yeterince büyük bir T periyot değerine sahiptir ve  $s_1$  ölçeği  $2T$  değerinden büyük olduğu durumlarda ölçek endeksi 0'a yakınsar. Bu durumda, periyodikliğe yakınsayan fonksiyon-sinyallerde  $s_1$  ölçek değerini artırdığımızda ölçek endeksi değeri Şekil 3.3'te görüldüğü gibi 0 olur. Fakat  $s_1$  ölçeği artırıldığında hesaplama zorluğu da artar. Büyük  $s_1$  ölçek değerleri için uzun süreli zaman aralıklarındaki sinyaller analiz edilmelidir ki normalize iç skalogram değerlerinde hesaplama tutarlılığı gerçekleşsin.  $s_{\min}$  ve  $s_{\max}$  ölçekleri Şekil 3.4'te görüldüğü gibi skalogram değerinin izlediği değeri gösterir. Örnek olarak, a-periyodik sinyaller için  $s_{\min}$  ölçeği, periyodikliği en az ölçek olarak değerlendirilir. Eğer  $s_{\min} \approx s_1$  ise, skalogram değeri büyük ölçeklerde azalır ve  $s_1$  değerinin a-periyodik sinyal ve büyük periyot değerlerine sahip periyodik sinyal arasındaki ayrışmanın tespit edilebilmesi için artırılması gerekir.



Şekil 3.4: BvP osilatörü için  $s_{\min}$  (siyah) ve  $s_{\max}$  (gri) değerleri [8].

### 3.3 SKALOGRAM ÖLÇEK ENDEKSİ YÖNTEMİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK SİSTEMLERDE UYGULANMASI

Bu bölümde, skalogram ölçek endeksi bilinen dört klasik doğrusal olmayan dinamik sistemde, Lojistik harita, Henon haritası, Bonhoeffer-van der Pol osilatörü ve Duffing osilatöründe, a-periyodik yörüngeleri tespit etme ve incelemede kullanılmaktadır. Bu

dinamik sistemlerden Bonhoeffer-van der Pol osilatörü bir sürekli dinamik sistemdir. Lojistik harita, Henon haritası ve Duffing ayırık zamanlı dinamik sistemlerdir.

Bu dinamik sistemlerin ölçek endeksinin geçerliliğini test etmede seçilmesinin nedeni, matematiksel olarak oldukça farklı, ayrı araştırma alanlarında ortaya çıkmış ve büyük ölçüde bilinir olmalarıdır. İlk üç dinamik sistem için kaotik ve kaotik olmayan bölgeleri içeren bifürkasyon diyagramları kullanılmaktadır. Ölçek endeksi değerleri, bifürkasyon diyagramı ve MLE ile karşılaştırılmaktadır. bifürkasyon değerlerinin kaotik bölgeleri, pozitif MLE değerleri ve pozitif ölçek endeksi değerleri arasında örtüşme olduğu görülmektedir [8].

Duffing osilatöründe ölçek endeksinin geçerliliğini test etme yöntemi olarak, Duffing denkleminin Runge-Kutta yöntemi ile çözümünde elde edilen sistemin kaotik durumdan periyodik duruma geçiş noktası [46] ile karşılaştırması yapılmaktadır. Ölçek endeksi, geçerliliğini gösterecek şekilde, sistemin kritik kaotik durumdan periyodik duruma geçiş noktasında ani olarak 0'a yakınsamıştır.

### 3.3.1 Lojistik Harita

Lojistik harita kaos teorisinin klasik örneklerinden biridir. Bu denklem birçok doğal sistemin modellenmesi için kullanılabilir. Lojistik harita, çoklu kompleks bir dinamiğe sahip basit bir doğrusal olmayan dinamik sistem olarak biyolog Robert May tarafından popülasyon dinamiğine dayalı ortaya atılmıştır [47]. Lojistik harita aşağıdaki gibi yazılır:

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n) \quad (3.3)$$

Bu oldukça yaygın kullanılan ayırık zamanlı dinamik sistem popülasyon dinamiği teorisine dayalıdır. Bu sistem, bazı gerçek  $a$  parametresi değerleri için, yörüngeleri kaotik davranış gösteren basit polinom harita örneğidir. May ve birçok başka araştırmacının gösterdiği gibi,  $a$  parametresindeki değişimler haritanın davranışında oldukça büyük değişkenlikler meydana getirmektedir.

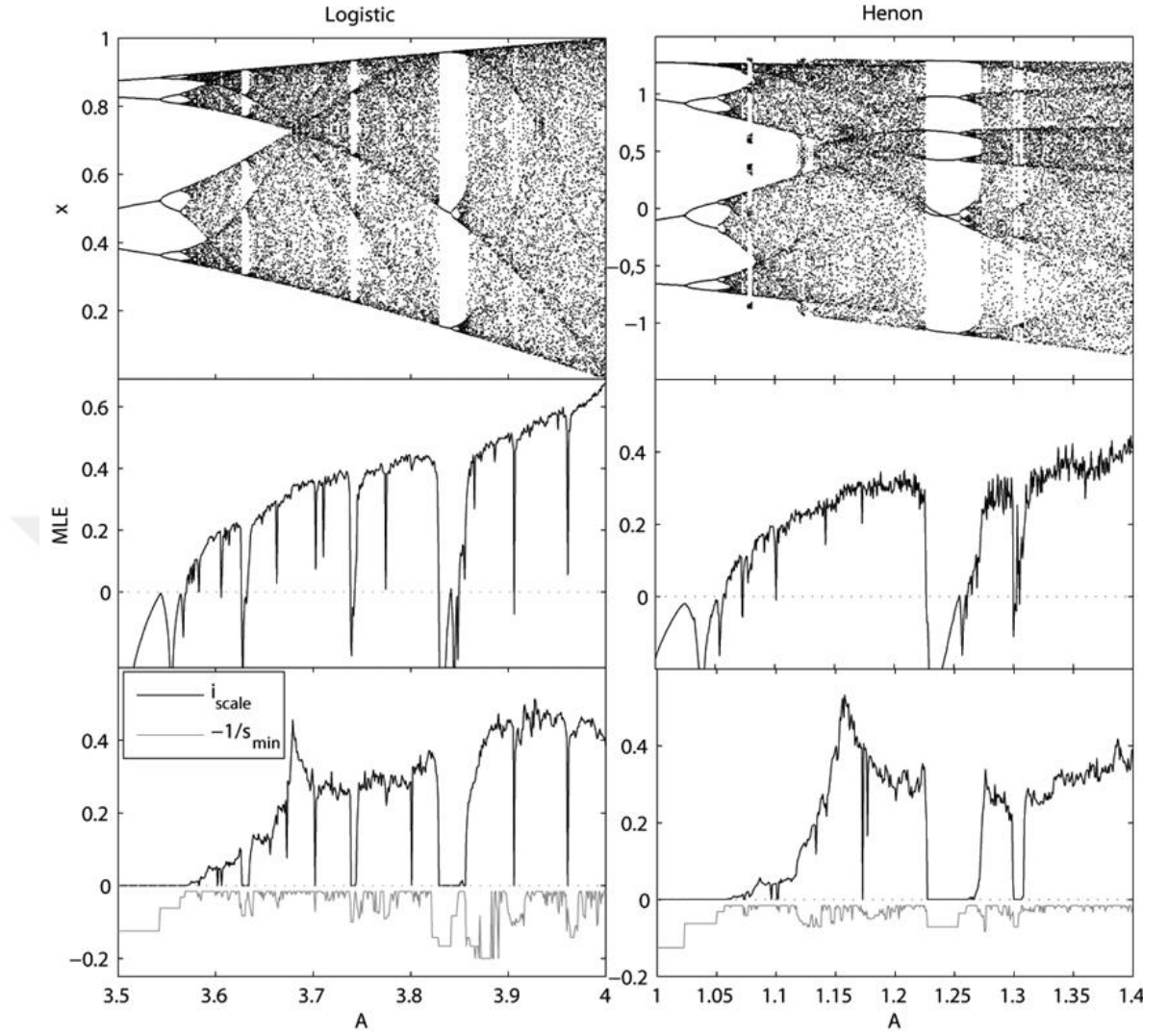
### 3.3.2 Henon Haritası

Michael Henon 1976 yılında iki boyutlu bir haritanın kaotik olabileceğini göstermiştir [48]. Henon haritası iki boyutlu bir düzlemde  $(x_n, y_n)$  noktalarını aşağıdaki doğrusal olmayan fonksiyonları kullanarak farklı bir noktaya taşır.

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= y_n + 1 - ax_n^2 \\ y_{n+1} &= bx_n \end{aligned} \quad (3.4)$$

Lojistik haritadaki gibi Henon haritasında da kaotik özellikler gösteren ve göstermeyen bölgeler vardır. Sistemin iki parametresi olan  $a$  ve  $b$ 'nin bazı değerleri için sistem kaotik yapıya sahiptir.  $A=1.4$  ve  $b=0.3$  değerleri için, acayip çekici oluşur.  $B$  parametresini  $0.3$  olarak sabit tutarak,  $a$  parametresi değiştirildiğinde sistem kaotik ya da düzenli olabilir. Aşağıdaki Şekil 3.5, Lojistik ve Henon haritaları için bifürkasyon diyagramı, MLE ve ölçek endeksi arasında karşılaştırmalar gösterilmiştir. Burada MLE ve ölçek endeksi değerlerinin büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca, dikkat çekici bir diğer sonuç ölçek endeksi değerlerinin maksimum değer aldığı durumlar, her iki haritada da bifürkasyon diyagramlarında dallanmalarda çakışma olduğu durumlara denk gelmektedir.





**Şekil 3.5:** Lojistik Harita ve Henon Haritası için bifürkasyon diyagramı, en büyük Lyapunov üsteli ve skalogram ölçek endeksi,  $i_{scale}$ , değerlerinin (sırasıyla yukarıdan aşağıya) karşılaştırması [8].

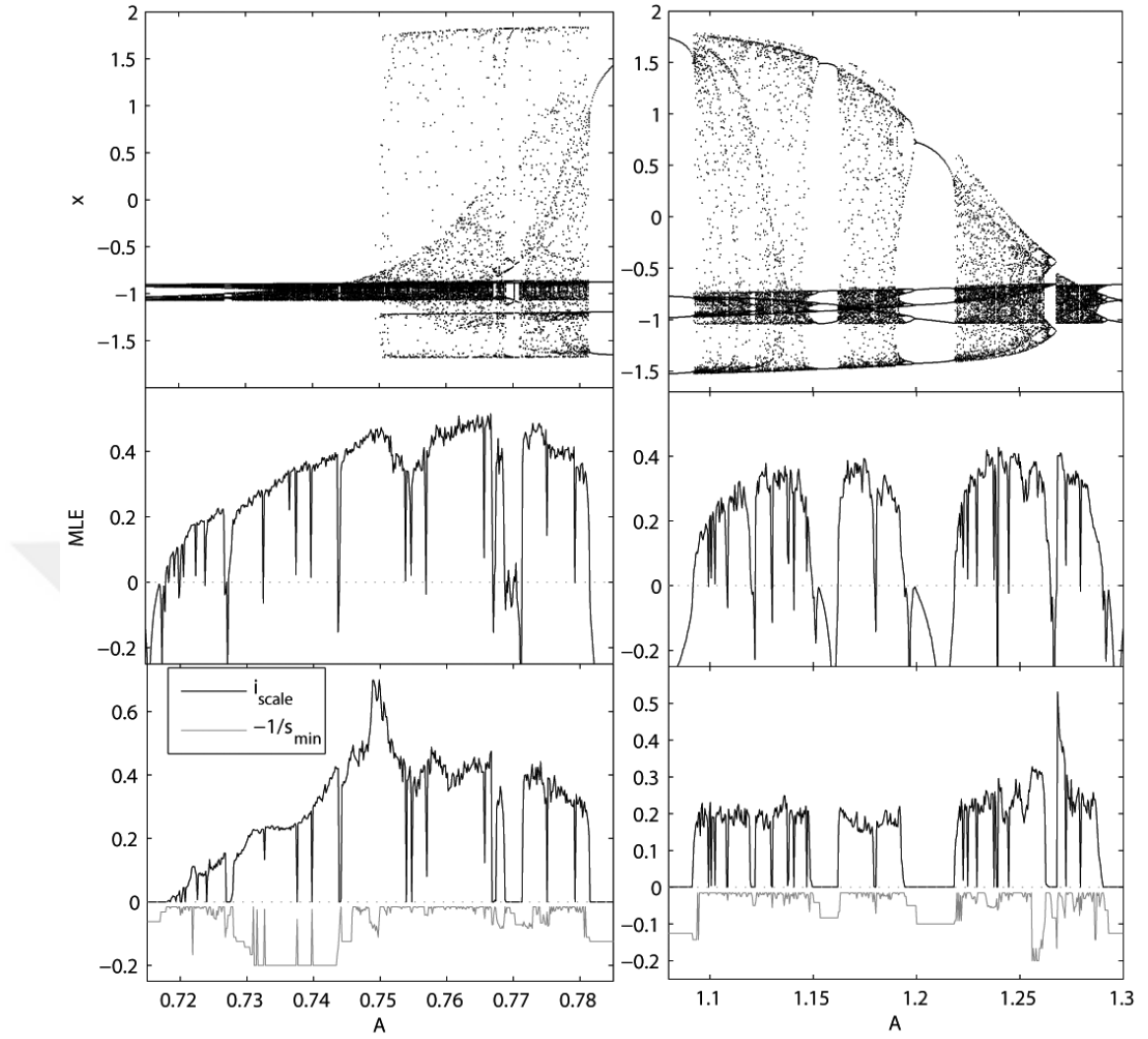
### 3.3.3 Bonhoeffer-van der Pol Osilatörü

Bonhoeffer-van der Pol Osilatörü otonom olmayan düzlemsel bir sistemdir. Aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - \frac{x^3}{3} - y + I(t) \\ y' &= c(x + a - by) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Burada  $a, b, c$  gerçek parametrelerdir ve  $I(t)$  sisteme dışarıdan uygulanan kuvveti ifade eder. Periyodik bir kuvvet  $I(t) = A \cos(2\pi t)$  düşünelim ve parametreleri özel olarak;  $A=0.7$ ,  $b=0.8$ ,  $c=1.1$  olarak seçelim. Bu değerler kaos ve fraktallar ile ilgili yapılmış bir çalışmada [20] fiziksel ve biyolojik önemleri sebebiyle [50] bu şekilde seçilmiştir. BvP sisteminin klasik analizi Poincare haritasına dayanır ve sistemin akışı ile tanımlanır [19]. Poincare haritasındaki periyodik sabit noktaların ilk koordinatlarını  $A$  parametresine (dış kuvvetin büyüklüğü) göre çizdiğimizde bifürkasyon diyagramı elde edilir [48]. Bu tip bir diyagram, sistemde kaotik ve kaotik olmayan bölgeleri gösterir. Geometrik olarak ele alırsak, kaos geçişleri Poincare haritasında sınır sabit noktalarının değişmeyen çoklu katmanları arasındaki harmonik yörüngeler ile ilgilidir [19]. Bu ilişki başka bir çalışmada detaylı olarak gösterilmiştir [22]. Aşağıdaki Şekil 3.7’de BvP sisteminin analizini içerir. Parametre aralıkları  $0.7 \leq A \leq 0.8$  ve  $1 \leq A \leq 1.3$  şeklinde ikiye ayrılmıştır. Bu aralıklar kaotik yörüngelerin bulunduğu aralıklardır. Burada MLE ve ölçek endeksi değerlerinin büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. MLE’nin negatif olduğu  $A$  parametresi değerleri, aynı zamanda ölçek endeksinin 0’a yakın bulunduğu değerlerdir.

Yine dikkate değer önemli bir sonuç, sistemin çekerindeki ani bir genişleme ile ölçek endeksi değerinde göreceli bir maksimum oluşmasının örtüşmesidir ( $A \approx 0.748$ ) [22,48]. Yine çekerdeki ani küçülme de başka bir ölçek endeksi göreceli maksimum oluşması ile örtüşmüştür ( $A \approx 1.27$ ).



**Şekil 3.6:** BvP osilatörü için bifürkasyon diyagramı, en büyük Lyapunov üsteli ve skalogram ölçek endeksi,  $i_{scale}$ , (sırasıyla yukarıdan aşağıya) karşılaştırılması [8].

### 3.3.4 Duffing Osilatörü

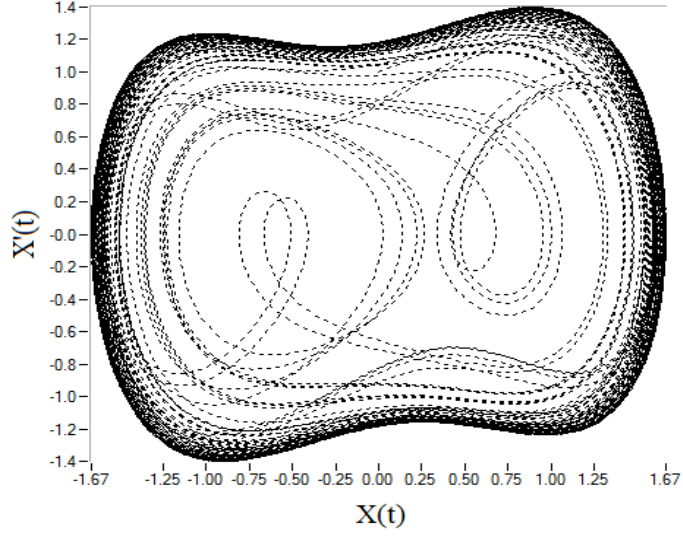
Duffing denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir [50]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \delta \frac{dx}{dt} - x + x^3 = \gamma \cos(t) \quad (3.6)$$

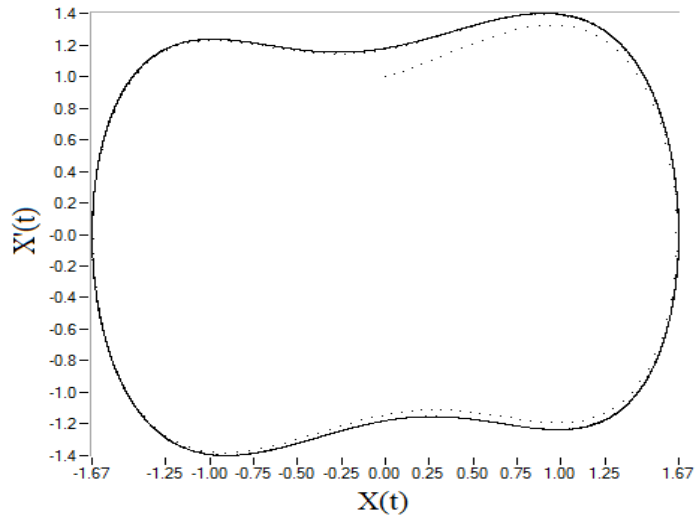
Burada,  $\delta$  yavaşlama oranı,  $\gamma \cos(t)$  etki eden periyodik kuvvet ve  $-x + x^3$  doğrusal olmayan dengeleyici kuvvettir.  $\delta$  sabit tutulduğunda,  $\gamma$  değeri değiştirildiğinde Duffing Osilatör sistemi küçük periyodik hareketten kaotik harekete ve sonra büyük periyodik harekete evrilir.  $\gamma = \gamma_c$  değeri kaotik durumdan büyük periyodik duruma geçişin gerçekleştiği değerdir. Bifürkasyon değeri ( $\gamma_c$ ) Duffing osilatör sisteminin durumunu

belirler [46]. 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi ile Duffing denklemi çözülerek  $\delta = 0.5$ , adım sayısı  $h=0.1$  olarak alındığında bifurcation değeri  $\gamma_c = 0.826$  için Duffing Osilatör sistemi büyük ölçekte periyodik duruma geçer.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 0.5 \frac{dx}{dt} - x + x^3 = \gamma \cos(t) \quad (3.7)$$

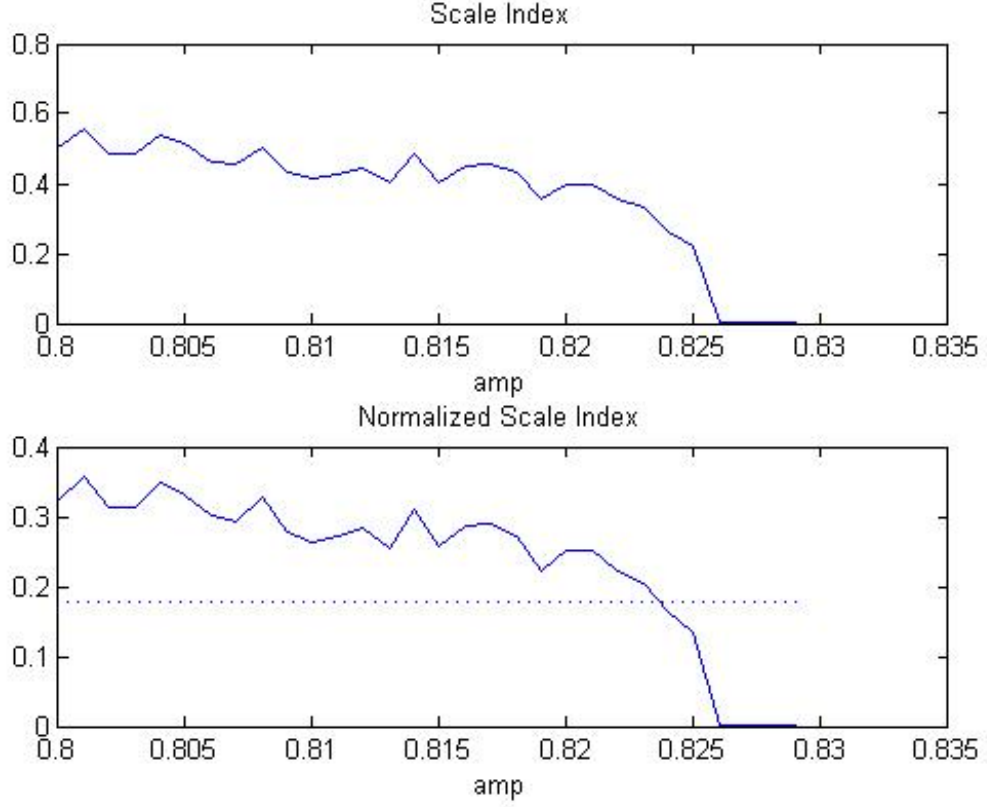


**Şekil 3.7:**  $\gamma = 0.825$  için Duffing Osilatörü Faz diyagramı. Bu genlik değerinde Duffing Osilatörü kritik kaotik durumda bulunmaktadır.



**Şekil 3.8:**  $\gamma = 0.826$  için Duffing Oscillatörü Faz diyagramı. Bu kritik genlik değerinde Duffing Osilatörü büyük ölçekte periyodik duruma geçer.

Duffing osilatörünün periyodik duruma geçişi, skalogram ölçek endeksi kullanılarak aşağıda başarıyla gösterilmiştir.



**Şekil 3.9:**  $0.8 \leq \gamma_{(amp)} \leq 0.829$  aralığı için Duffing Osilatörü skalogram ölçek endeksi değerleri.  $\gamma \geq 0.826$  için sistem periyodik duruma geçiyor,  $\gamma < 0.825$  için sistem kaotik durumda kalıyor.

Duffing Osilatörü ile gürültülü kaotik sinyallerde zayıf periyodik sinyallerin tespit edilmesi mümkündür [30,49].

Duffing denkleminin referans frekansı  $w_0$  olarak tanımlandığında ve  $t = w_0\tau$  alındığında Duffing denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{1}{w_0^2} \frac{d^2x}{d\tau^2} + \frac{\delta}{w_0} \frac{dx}{d\tau} - x + x^3 = \gamma \cos(w_0\tau) + \text{input}$$

Bu denklemde genlik, bifurkasyon değerinde sabit tutularak, belirli bir frekans aralığında input sinyalin skalogram ölçek endeksi parametreleri hesaplanarak, Duffing osilatörü ile birlikte gürültülü kaotik sinyallerde zayıf periyodik sinyal tespitinde kullanılabilir. Böylece sistemin kaotik durumdan periyodik duruma geçişi, sistemin her bir

durumundaki faz uzayı diyagramına bakılmaksızın, skalogram ölçek endeksi parametreleri ile pratik olarak tespit edilebilir.

### 3.4 GÜÇ SPEKTRUMU

Kaotik sinyaller geniş spektruma sahiptir. Bu sinyalleri analiz etmede sinyalin gücünün hangi frekanslara dağıldığını incelemek bize sinyali üreten dinamik sistemin özellikleri hakkında sistemin çekerinden elde edemediğimiz bilgileri verebilir. Verilen bir sinyal için güç spektrumu, belirli bir frekans aralığına denk gelen sinyal gücünü (birim zamandaki enerji miktarı) verir. Güç spektrumu yaygın olarak sonlu Fourier dönüşümü kullanılarak oluşturulur. Maksimum entropi metodu gibi farklı metotlar kullanılarak ta bir sinyalin güç spektrumu elde edilebilir [9].

Kaotik dalgalar geniş spektruma sahiptir. Bu dalgaları analiz etmede gücün hangi frekanslara dağıldığını incelemek bize dalgaları üreten dinamik sistemin özellikleri hakkında bilgiler verir. Güç spektrumu, Fourier spektrumu değerlerinin karelerini verir ve sinyalin dalga karakteristiği hakkında daha belirleyicidir. Fakat durağan olmayan dalgalarda (sismik dalgalar, EEG vb.) Güç Spektrumu yetersizdir.

Matematiksel olarak; bir fonksiyonun  $x_m$  örnek değerlerinin kareler ortalaması “ortalama güç” olarak adlandırılır.

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \quad (3.8)$$

Fourier katsayılarını aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-i(2\pi kmN)} \quad k = 0,1,2,\dots,N-1 \quad (3.9)$$

Ortalama gücü bu Fourier katsayıları ile gösterdiğimizde aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz.

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |C_k|^2 \quad (3.10)$$

N-k'cı ve k'cı Fourier katsayıları birbirlerinin eşleniğidirler.

$$C_{N-1} = C_k^* \quad k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (3.11)$$

Bu ifadeye göre ortalama güç aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} |C_k|^2 + |C_{N/2}|^2 \quad (3.12)$$

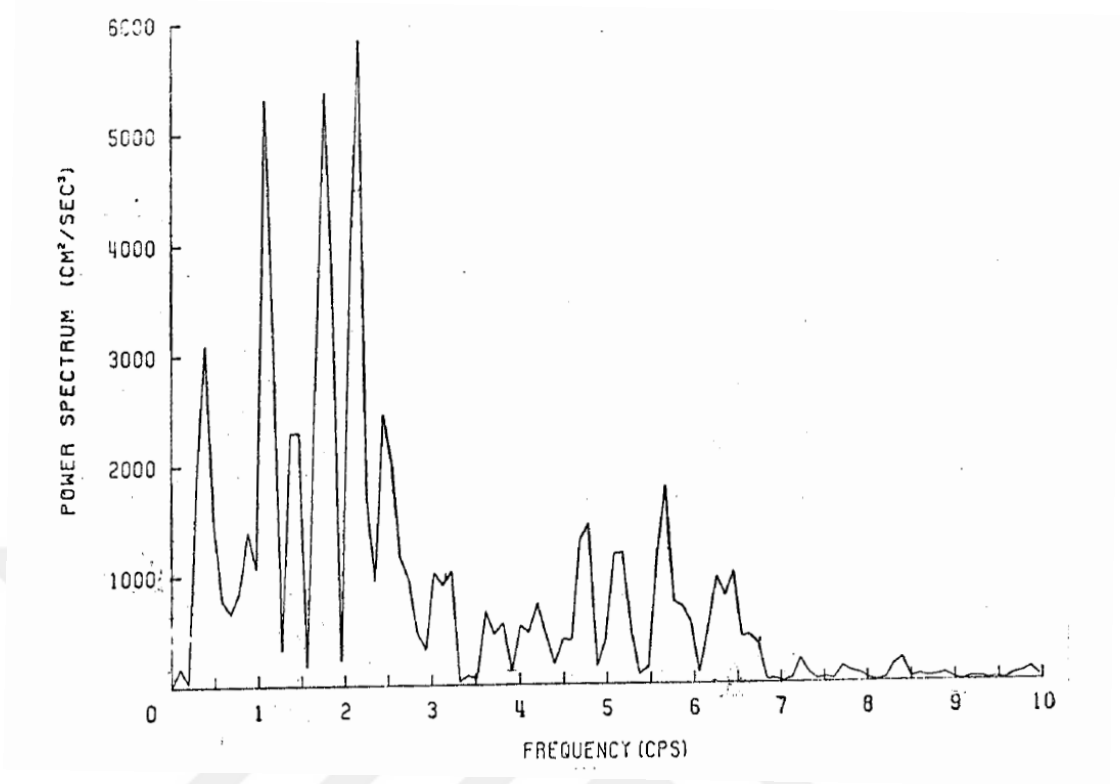
Bu ifadenin her iki tarafının  $T=N\Delta t$  ile çarpıldığı

$$\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \Delta t = T |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} (T |C_k|^2) + T |C_{N/2}|^2 \quad (3.13)$$

ve sağdaki terimin aşağıdaki parametrelere göre çizildiği grafiğe güç spektrumu denir [9].

$$\left. \begin{array}{l} k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \\ f_k = k\Delta f \\ \omega_k = 2\pi k\Delta f \end{array} \right\} \text{Burada;} \quad \Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \text{ (cps)} \quad (3.14)$$

Frekans ortamındaki frekans aralığıdır. Sonlu sayıda veriye karşılık gelen güç spektrumu aslında  $\Delta f$  aralıklı frekans değerlerine göre çizgisel spektrumdur. Güç spektrumunun birimi  $x_m$  ivme ise  $cm^2/sn^3$ 'tür. Veri hız veya yerdeğiştirme olur ise, birim sırası ile  $cm^2/sn$  ve  $cm^2sn$  olur. Bunların hepsi de birim zamanda yapılan iş (watt) tanımından farklıdır. Dolayısıyla deprem dalgası halinde güç spektrumu denildiğinde, güç ifade eden fiziksel bir büyüklük olduğu için değil, analogi nedeni ile güç kelimesinin kullanıldığı anlaşılmalıdır [9].



Şekil 3.10: El Centro Sismik Dalgası Güç Spektrumu Grafiği [9].

### 3.5 YERLEŞTİRME TEOREMİ (LYAPUNOV ÜSTELLERİ)

Bu bölüme kadar değinilen sinyal analiz yöntemleri temelde frekans ve genlik bilgisini esas alır. Analiz neticesinde bulunacak frekans ve genlik değerlerine göre sinyal hakkında bilgi elde ederiz. Yerleştirme Teoremi temelde bu değinilen sinyal analiz yöntemlerinden farklı bir yöntemdir. Yerleştirme Teoreminde, bir kriter olarak geliştirilen En Büyük Lyapunov Üsteli hesaplanarak bir dinamik sistemin kaotik olup olmadığı tespit edilmektedir. Kaotik sistemlerin temel bir özelliği olan “başlangıç koşullara hassas duyarlılığın” niceliksel ifadesi olan En büyük Lyapunov Üsteli sinyallerin analiz edilmesinde (periyodik yada a-periyodik özelliğini tespit etmede) temel bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bir dinamik sistemde elde edilmiş zaman serisinin Yerleştirme Teoremi ile yeniden çizilmiş faz uzayındaki yörüngeleri farklı artış oranlarıyla birbirlerinden uzaklaşırlar. Lyapunov üstelleri, bu faz uzayındaki iki komşu yörüngenin birbirinden ortalama uzaklaşma-yakınlaşma hızını gösterir [50].

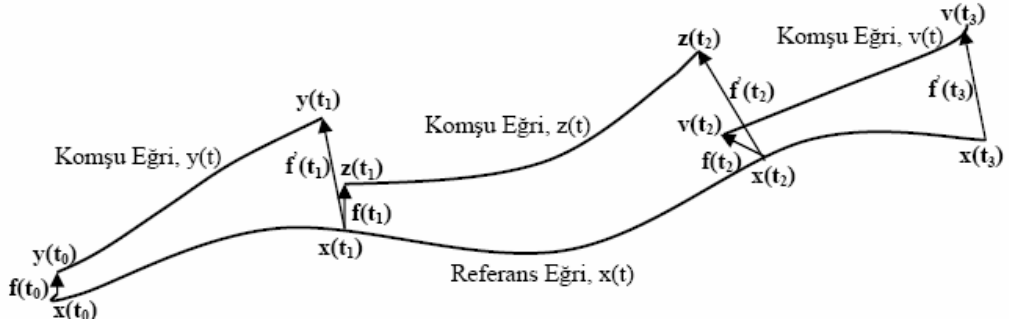


Matematiksel olarak En Büyük Lyapunov Üstelinin hesaplanmasında genellikle Wolf Algoritması uygulanır. İlk olarak,  $X(t_0)$  gibi bir referans noktası belirlenir. İkinci olarak, bu referans noktasına en yakın  $Y(t_0)$  komşusu alınır. Bu noktalar arası öklit farkı belirlir:

$$f(t_0) = \|X(t_0) - Y(t_0)\| \quad (3.15)$$

Aynı şekilde  $f(t_1)$  bulunur ve bu işlem tekrarlanır. Sonra, bulunan bu öklit farkları birbirlerine oranlanır  $\{ f(t_1)/f(t_0), f(t_2)/f(t_1), \dots \}$  ve nokta çiftlerinin her biri arasındaki genişleme durumu bulunur. Daha sonra, bulunan bu genişlemenin logaritması alınır. Bu işlem  $N$  kere tekrar ettirildiğinden en büyük Lyapunov Üsteli aşağıdaki formülle bulunur;

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log \frac{f(t_i)}{f(t_{i-1})} \quad (3.16)$$



Şekil 3.11: En Büyük Lyapunov Üstelinin hesaplanma şematığı [51].

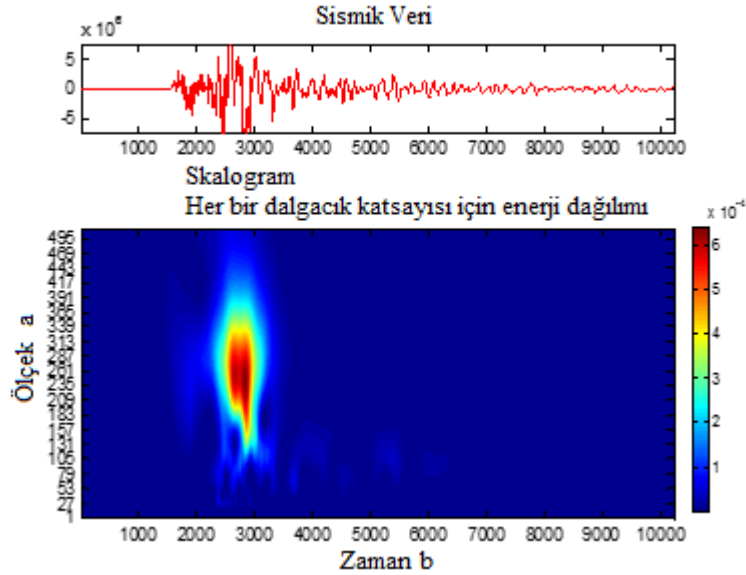
Farklı sinyal analiz yöntemlerinde frekans değerlerine bakarak karşılaştırmalı olarak sinyal hakkında değerlendirmeler yapılması ile paralel olarak; aynı tipte sismik dalgalar için hesaplanan Lyapunov değerlerine bakarak karşılaştırmalı olarak depremler hakkında bilgi elde etmek mümkün oluyor. Bir başka örnek olarak epileptik bir hastadan elde edilen EEG sinyalleri analiz edilirken hesaplanan en büyük Lyapunov değerleri, beyinde oluşan patolojik durumlar hakkında değerlendirme yapılmasına olanak sağlar ve epileptik hastaları kendi aralarında bir sınıflandırmaya tabi tutmak mümkün olur [52,53,54,55].

## 4. BULGULAR

### 4.1 BÖLGESEL DEPREMLERİN SKALOGRAM, GÜÇ SPEKTRUMU VE LYAPUNOV ÜSTELİ İLE ANALİZİ

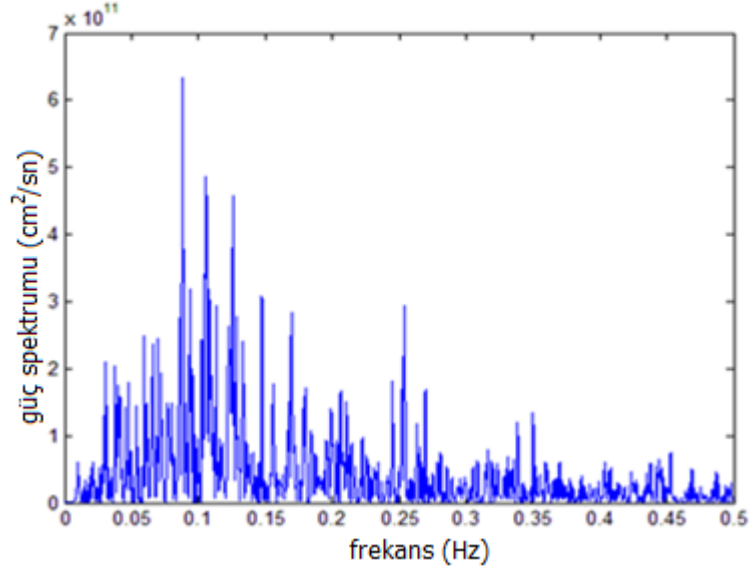
23/10/2011 Van-Tabanlı (M:6.6) depremine ve sonrasında yerel bölgede meydana gelen 23/10/2011 Van-Edremit (4.6), 09/11/2011 Van-Edremit (5.6), 09/11/2011 Van-Edremit (4.5) depremlerine ait olan, Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km) ve Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km) geniş bant ölçümü alan istasyonlarında kaydedilen sismik verilerinin skalogram grafikleri ve güç spektrumu grafikleri oluşturuldu ve en büyük Lyapunov üsteli değerleri hesaplandı. Bu sonuçların ayrı ayrı değerlendirilmeleri yapılarak, sonuçlar arasındaki ortak fiziksel özellikler incelendi ve farklılıklara dikkat çekildi.

#### 4.1.1 23 Ekim 2011 Van-Tabanlı (M=6.6) Depremi (Büyük Van Depremi)



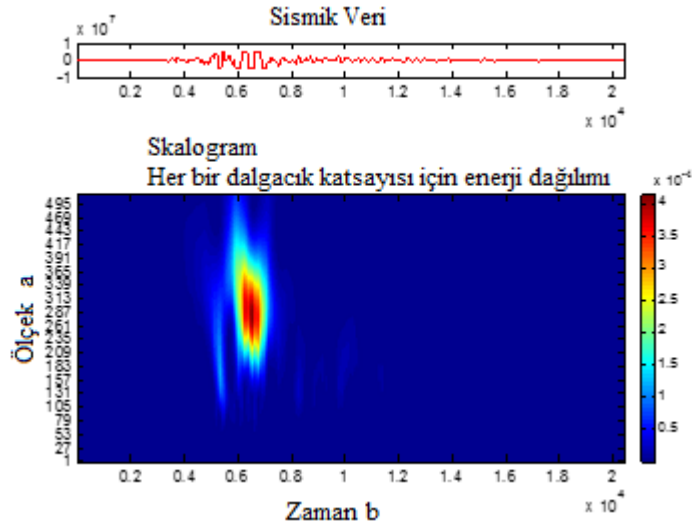
**Şekil 4.1:** Van-Tabanlı (M:6.6) sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 10:40 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.

Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $4 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 157- 339 aralığında olduğu görüldü.



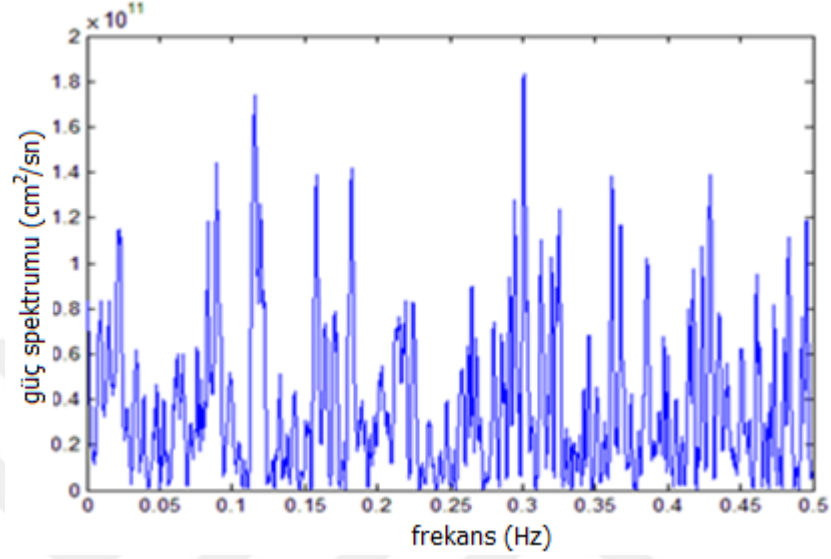
Şekil 4.2: Şenkaya istasyonunda kaydedilmiş sismik veriye ait güç spektrumu grafiği.

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.04 Hz-0.35Hz aralığında olduğu görüldü. En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.004168 olarak hesaplandı.



Şekil 4.3: Van-Tabanlı (M:6.6) sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 10:40 Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km) ve bu depreme ait skalogram grafiği.

Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $2.5 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 209- 365 aralığında olduğu görüldü.

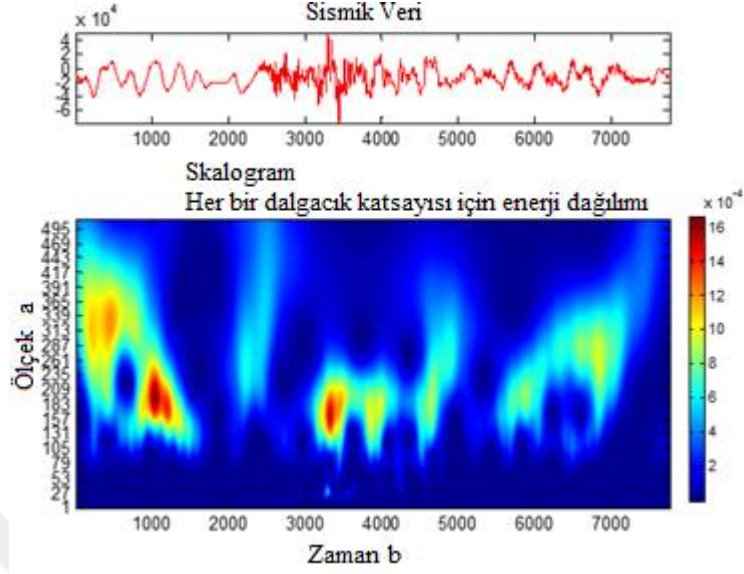


**Şekil 4.4:** Yedisu istasyonunda kaydedilmiş sismik veriye ait güç spektrumu grafiği.

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.02Hz-0.5Hz aralığında olduğu görüldü.

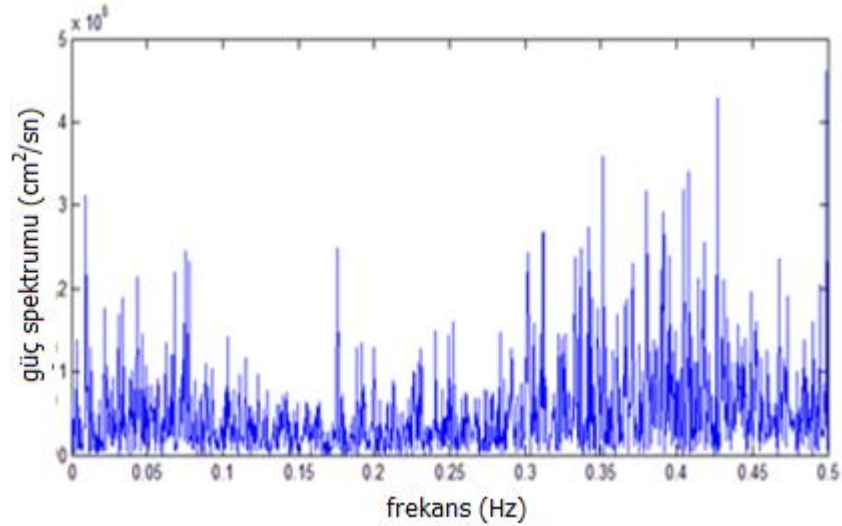
En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.006987 olarak hesaplandı.

#### 4.1.2 23 Ekim 2011 Van-Edremit (M=4.6) Depremi



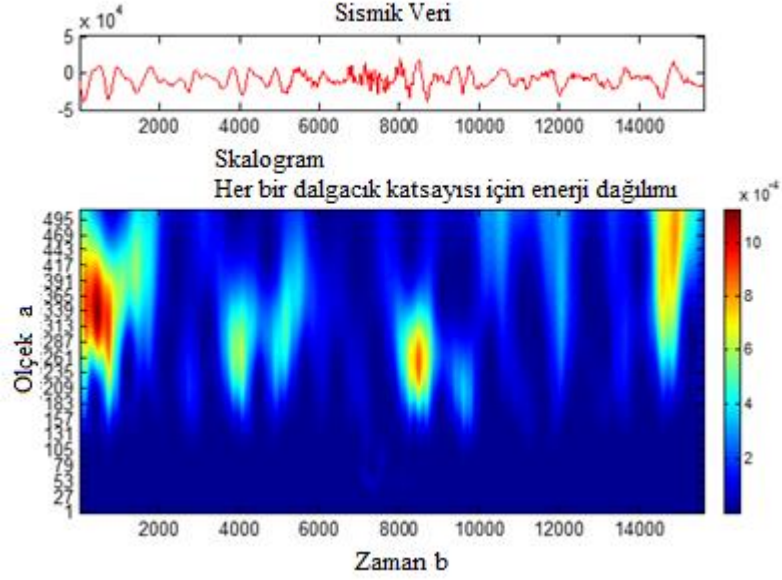
**Şekil 4.5:** Van-Edremit (M:4.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.

Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $10 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 131-365 aralığında olduğu görüldü.



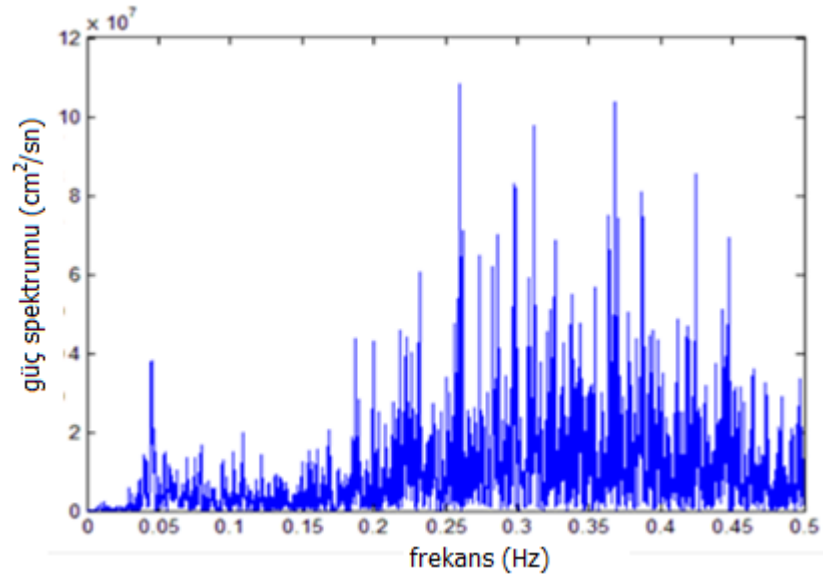
**Şekil 4.6:** Van-Edremit depremi (M:4.6) sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.01Hz-0.45Hz aralığında olduğu görüldü. En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.001788 olarak hesaplandı.



**Şekil 4.7:** Van-Edremit (M:4.6) depremi sismik dalga formu ve skalogram grafiği. Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10 İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,4K, Boylam: 40,5D, Yükseklik: 1.56 km).

Skalogram grafiğinde dalgacık katsayılarına denk gelen enerji dağılımını  $7 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametrelerinin 183 - 443 aralığında olduğu görüldü.

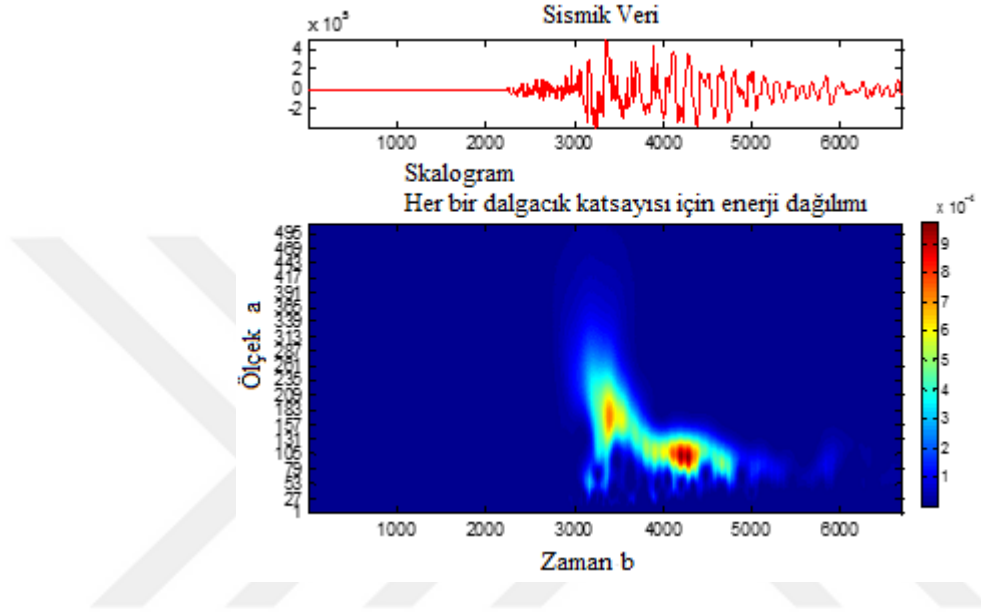


**Şekil 4.8:** Van-Edremit depremi (M:4.6) sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 23/10/2011 tarihi 11:10. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait baskın frekans değerlerinin 0.02Hz-0.45Hz aralığında olduğu görüldü.

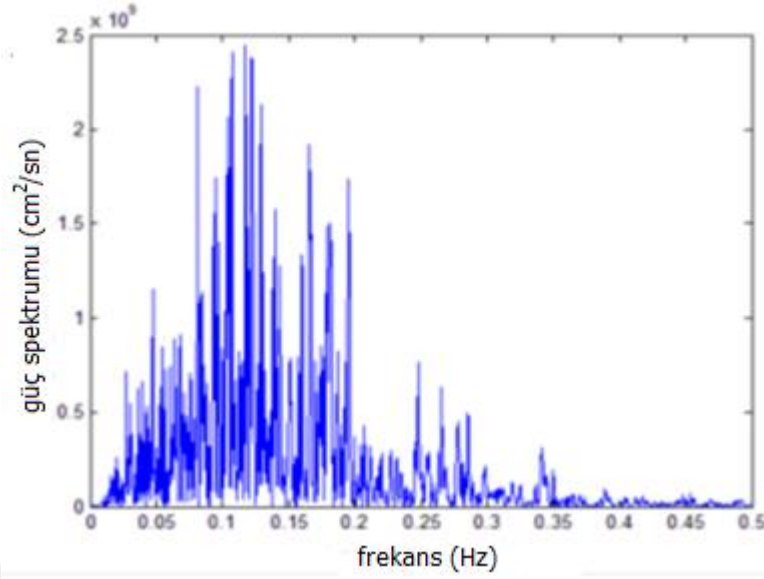
En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.000829 olarak hesaplandı.

#### 4.1.3 09 Kasım 2011 Van-Edremit (M=5.6) Depremi (Bayram Oteli Depremi)



**Şekil 4.9:** Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.

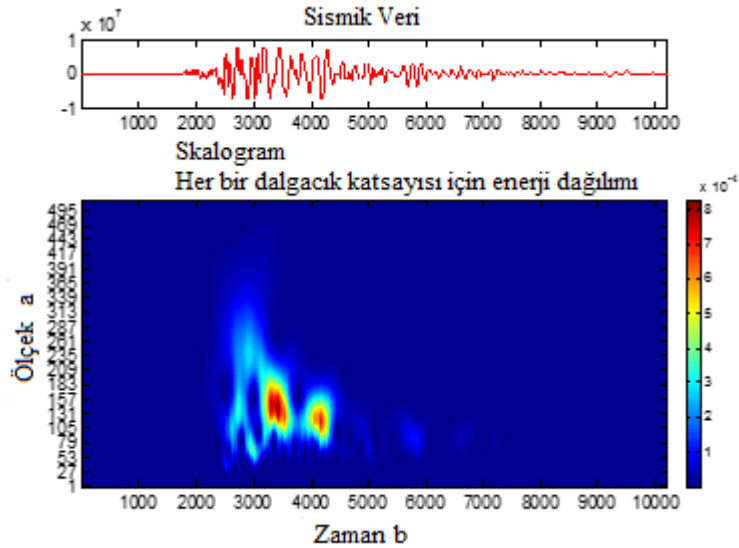
Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $6 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 79 - 209 aralığında olduğu görüldü.



**Şekil 4.10:** Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.02Hz-0.35Hz aralığında olduğu görüldü.

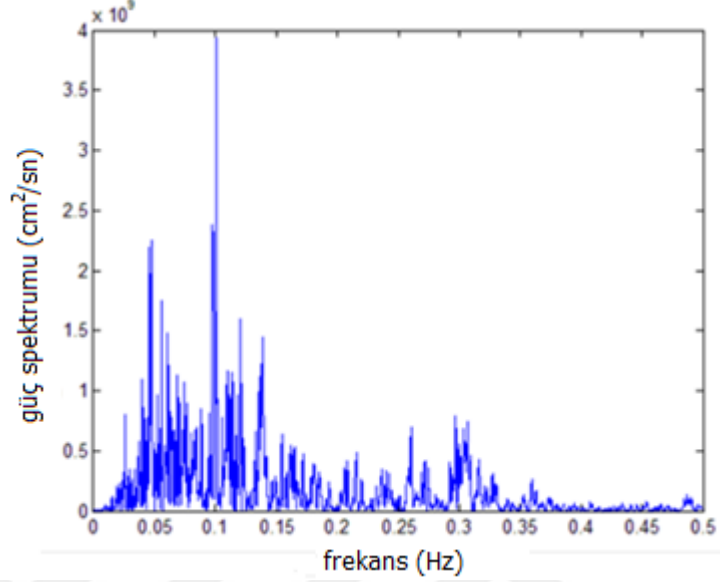
En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.019775 olarak hesaplandı.



**Şekil 4.11:** Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.



Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $5 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 79 - 183 aralığında olduğu görüldü.

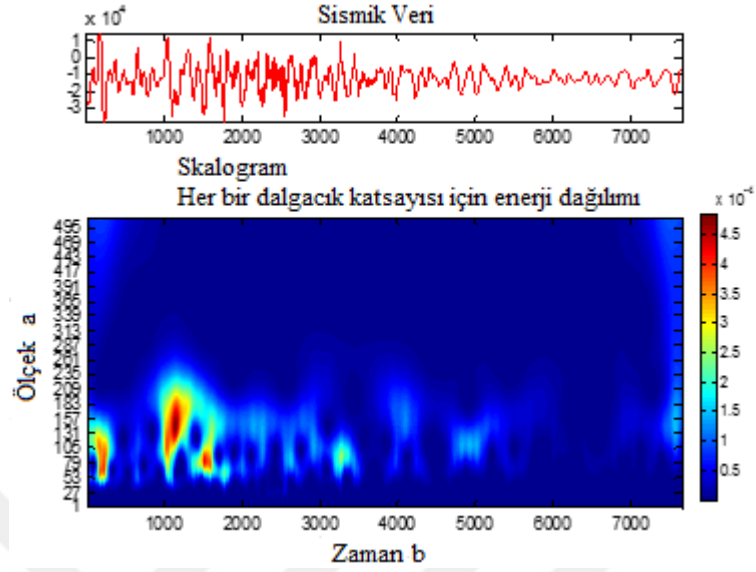


**Şekil 4.12:** Van-Edremit (M:5.6) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:23. İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.02Hz-0.15Hz aralığında olduğu görüldü.

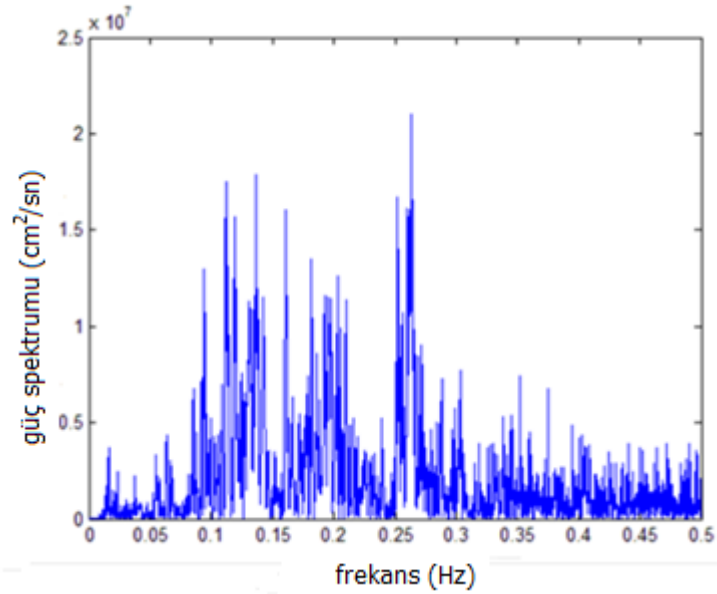
En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.018109 olarak hesaplandı.

#### 4.1.4 09 Kasım 2011 Van-Edremit (M=4.5) Depremi



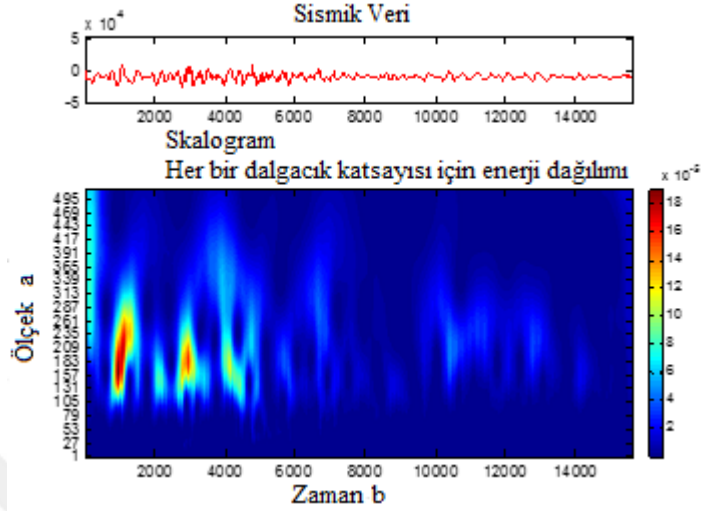
**Şekil 4.13:** Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.

Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $3 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 53 - 209 aralığında olduğu görüldü.



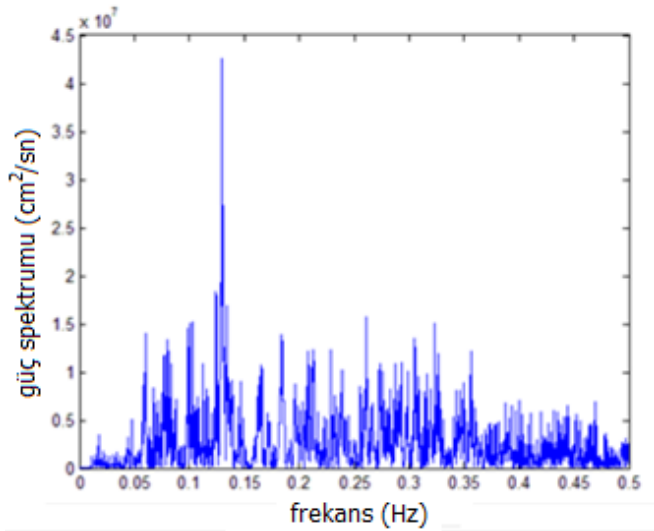
**Şekil 4.14:** Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Şenkaya (Enlem: 40,562K, Boylam: 42,351D, Yükseklik: 1.92 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait baskın frekans değerlerinin 0.1Hz-0.25Hz aralığında olduğu görüldü. En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.000222 olarak hesaplandı.



**Şekil 4.15:** Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formu, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km). Bu dalga formuna ait skalogram grafiği.

Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı  $11 \times 10^{-4}$  değerinden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin 105 - 261 aralığında olduğu görüldü.



**Şekil 4.16:** Van-Edremit (M:4.5) depremi sismik dalga formuna ait güç spektrumu grafiği, Tarih: 09/11/2011 tarihi 19:30, İstasyon: Yedisu (Enlem: 39,438K, Boylam: 40,544D, Yükseklik: 1.56 km).

Güç spektrumu grafiğinde sismik veriye ait etkin frekans değerlerinin 0.05Hz-0.35Hz aralığında olduğu görüldü.

En büyük Lyapunov üsteli değeri 0.000015 olarak hesaplandı.

**Tablo 4.1:** 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki bölgesel dört deprem için Şenkaya ve Yedisu istasyonlarından alınan verilere ait skalogram etkin ölçek parametre aralığı, güç spektrumu etkin frekans aralığı ve en büyük Lyapunov üsteli değerleri.

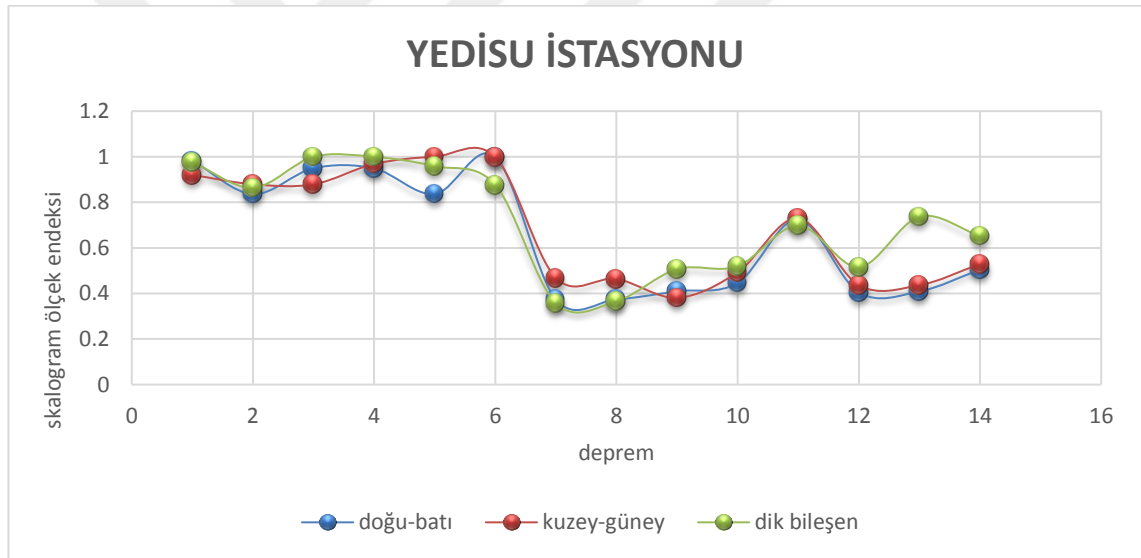
	Şenkaya İstasyonu			Yedisu İstasyonu		
	Skalogram etkin ölçek parametre aralığı	Güç spektrumu etkin frekans aralığı	En büyük Lyapunov üsteli	Skalogram etkin ölçek parametre aralığı	Güç spektrumu etkin frekans aralığı	En büyük Lyapunov üsteli
Van-Tabanlı, 23/10/2011 (M:6.6)	157-339	0.04-0.35 Hz	0.004168	209-365	0.02-0.5 Hz	0.006987
Van-Edremit, 23/10/2011 (M:4.6)	131-365	0.01-0.45 Hz	0.001788	183-443	0.02-0.45 Hz	0.000829
Van-Edremit, 09/11/2011 (M:5.6)	79-209	0.02-0.35 Hz	0.019775	79-183	0.02-0.15 Hz	0.018109
Van-Edremit, 09/11/2011 (M:4.5)	53-209	0.01-0.25 Hz	0.000222	105-261	0.05-0.35 Hz	0.000015

#### 4.2. 23 EKİM 2011 – 12 ARALIK 2011 VAN BÖLGESİ VAN BÖLGESİ DEPREMLERİ (14 DEPREM) SKALOGRAF ÖLÇEK ENDEKSİ ANALİZİ

Van-Tabanlı (M:6.6) depremi ve bu depremi takip eden 40 gün içerisinde yerel bölgede meydana gelen 13 deprem; 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) için Yedisu, Şenkaya ve 5 farklı istasyonda kaydedilen sismik verilen zaman serileri oluşturuldu ve skalogram ölçek endeksi değerleri haar dalgacığı ile ve ölçek aralığı 1-512 için hesaplanarak, kapsamlı bir skalogram ölçek endeksi karşılaştırması yapıldı. Bu hesaplamalar Matlab programı ile yapıldı. Bu yöntemler kullanarak, sismik verilerin

kaotiklik derecesi hakkında ve buna dayanarak depremlerin dinamik yapıları arasındaki ilişkiler hakkında değerlendirmeler yapıldı.

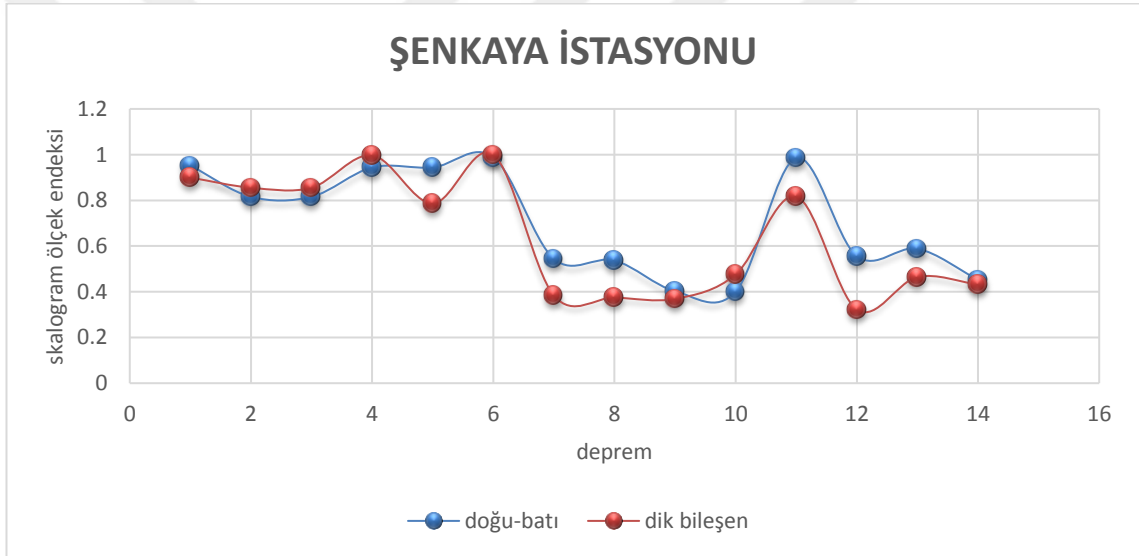
Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasındaki 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Yedisu geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri 0.8-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri 0.3-0.7 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.17:** Yedisu istasyonu kuzey-güney ve doğu batı ve dik bileşenlerde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasında 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Şenkaya geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri 0.8-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri, 11. Deprem olarak temsil edilen Van-Edremit 09 Kasım 2011 M=3.6 depremi dışında 0.3-0.6 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

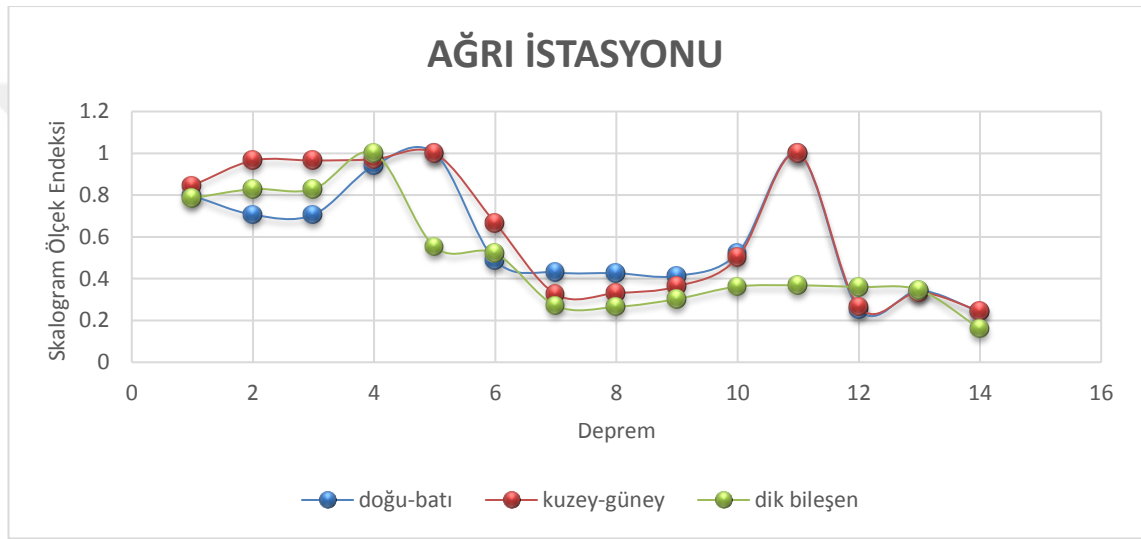


**Şekil 4.18:** Şenkaya istasyonu doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasında 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Ağrı

geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri 0.52-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri, 11. Deprem olarak temsil edilen Van-Edremit 09 Kasım 2011 M=3.6 depremi dışında 0.16-0.50 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

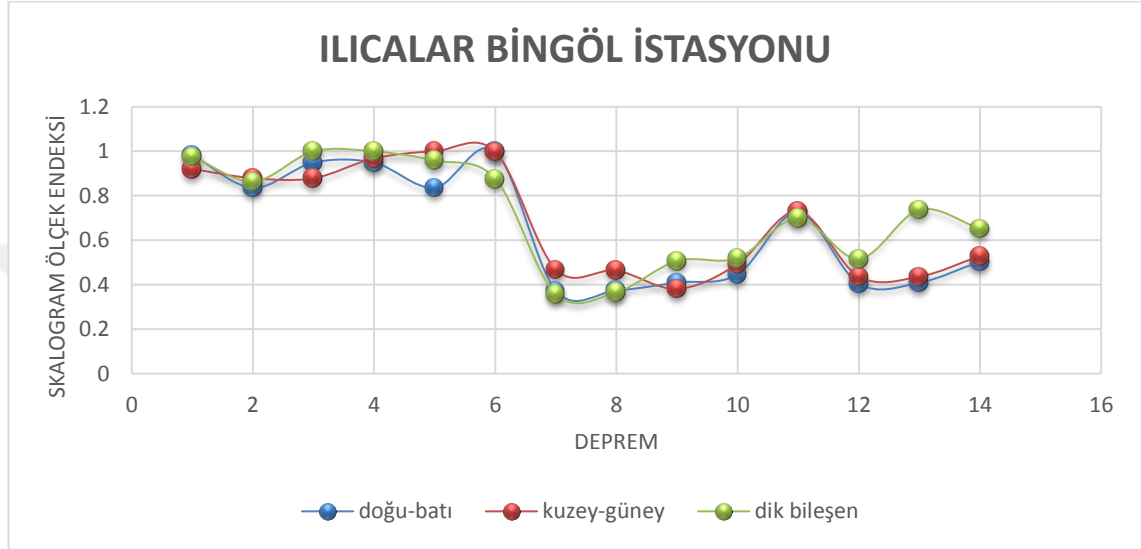


**Şekil 4.19:** Ağrı istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasındaki 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Ilıcalar-Bingöl geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23

Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri 0.79-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri 0.29-0.64 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.



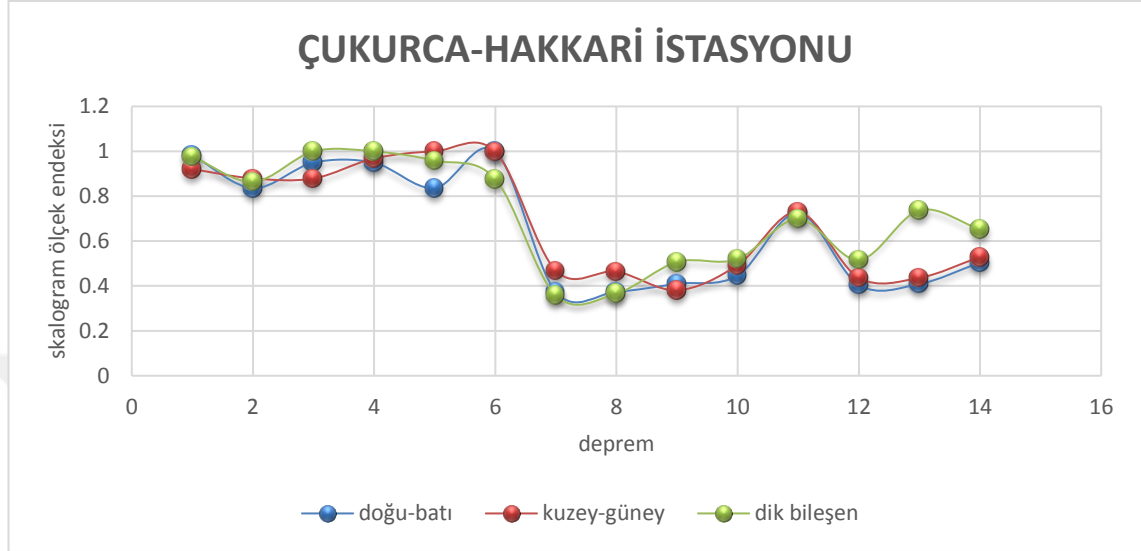
**Şekil 4.20:** İlicalar-Bingöl istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasındaki 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Çukurca-Hakkari geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri, 6. Deprem olarak temsil edilen Van-Tabanlı 23 Ekim 2011 M=3.7 depremi dışında 0.57-0.90 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine



sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri 0.17-0.50 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

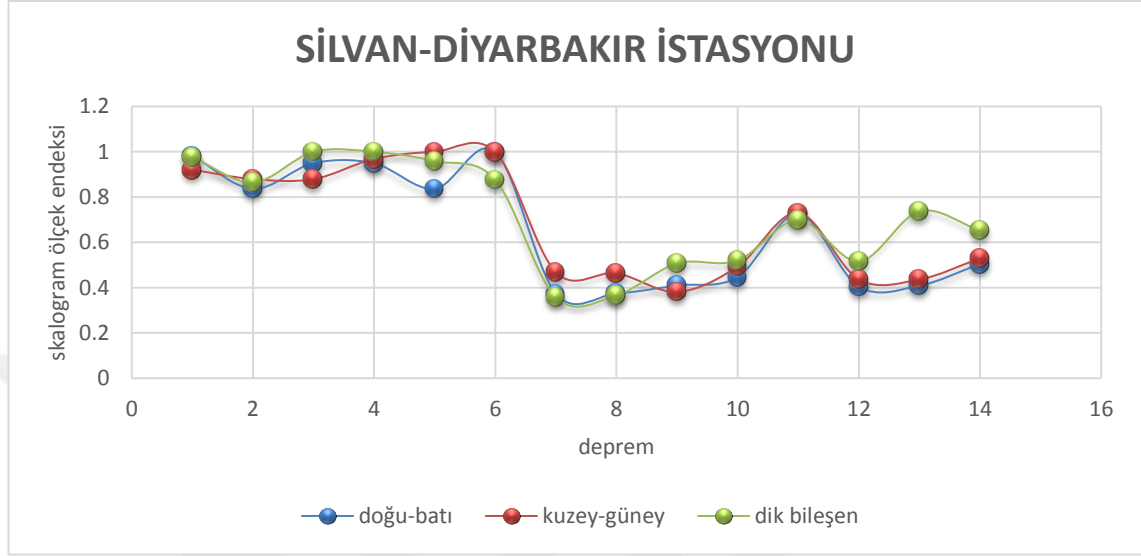


**Şekil 4.21:** Çukurca-Hakkari istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasındaki 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Silvan-Diyarbakır geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri, 6. Deprem olarak temsil edilen Van-Tabanlı 23 Ekim 2011 M=3.7 depremi dışında 0.57-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahip iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram değerleri 11. Deprem olarak temsil edilen

Van-Edremit 09 Kasım 2011 M=3.6 depremi ve 13. Deprem olarak temsil edilen Sağlamtaş 11 Kasım 2011 M=4.0 depremi dışında 0.37-0.55 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

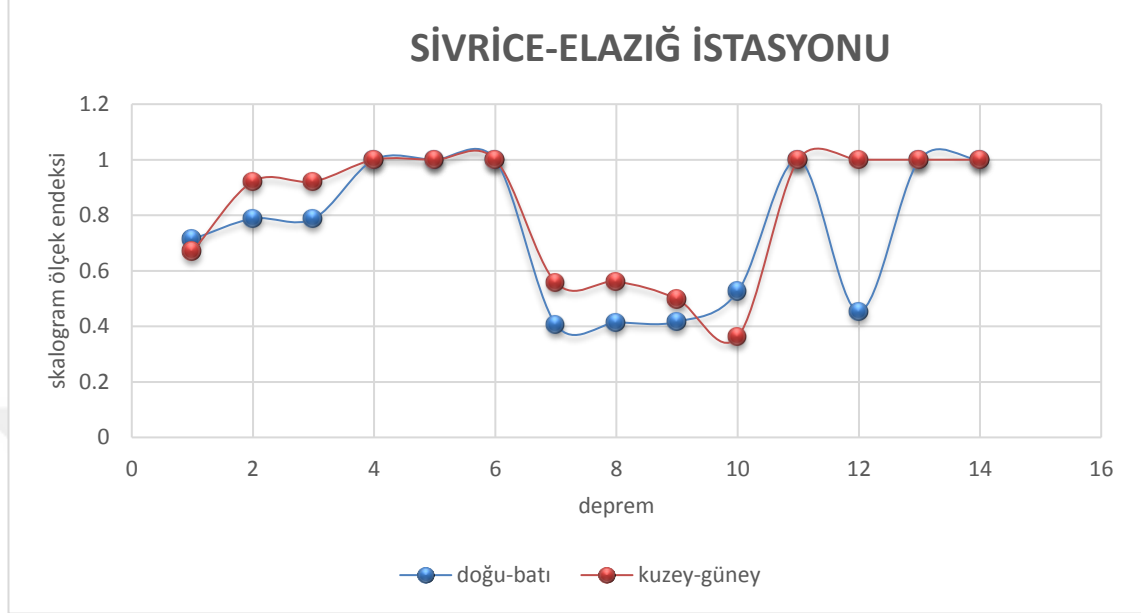


**Şekil 4.22:** Silvan-Diyarbakır istasyonu kuzey-güney, doğu-batı ve dik bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölçek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

Aşağıda, 23/10/2011 Van-Tabanlı, M=6.6 depremine ve sonrasındaki 40 günlük süreçte meydana gelen 13 deprem sismik verilerine ait ölçek endeksi grafiği görülmektedir. Sivrice-Elazığ geniş bant ölçüm istasyonunda kaydedilmiş olan bu sismik verilerin Skalogram Ölçek Endeksi parametrelerinin grafikten anlaşılacağı gibi Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6 depremi ve takip eden artçı depremlere ait skalogram ölçek endeksi değerleri 0.66-1 bandında güçlü a-periyodikliğe, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine sahi iken, 7. deprem olarak temsil edilen Van-Edremit, 09 Kasım 2011 M=5.6 depremi ve takip eden 3 artçı depreme ait skalogram değerleri 0.36-0.55 bandında göreceli daha zayıf a-periyodiklik, daha zayıf kaotiklik derecesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Son 4

depreme ait veriler yine ilk deprem grubu gibi güçlü a-periyodikliğe işaret eden sonuçlar vermiştir.



**Şekil 4.23:** Sivrice-Elazığ istasyonu kuzey-güney ve doğu-batı bileşenlerinde kaydedilen sismik verilere ait skalogram ölççek endeksi grafiği.

Van-Tabanlı, 23 Ekim 2011 M=6.6, 23/10/2011 Edremit (M:4.6), 23/10/2011 Kuşluk (M:4.6), 23/10/2011 Durukkaş (M:3.6), 23/10/2011 Tabanlı (M:3.), 28/10/2011 Kuşçu (M:3.7) 28/10/2011 Van Gölü (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:5.6), 09/11/2011 Edremit (M:4.5), 09/11/2011 Edremit (M:3.7), 09/11/2011 Edremit (M:3.6), 24/11/2011 Van Gölü (M:4.5), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:3.6), 25/11/2011 Sağlamtaş (M:4.0), 30/11/2011 Van (M:3.8), 02/12/2011 Tabanlı (M:3.8) deprem dalga formlarından oluşturulan zaman serileri kullanılmıştır.

**Tablo 4.2:** 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki bölgesel 13 deprem için 7 farklı istasyondan alınan verilere ait skalogram ölçek endeksi değerleri.

DEPREM	Van-Tabanlı_23/10/2011,M=6.6	Van-Edremit_23/10/2011,M=4.6	Van-Kuşluk_23/10/2011,M=4.6	Van-Durukkaş_23/10/2011,M=3.6	Van Gölü_23/10/2011,M=3.5	Van Gölü_28/10/2011,M=3.7	Van-Edremit_09/11/2011,M=5.6	Van-Edremit_09/11/2011,M=5.6	Van-Edremit_09/11/2011,M=4.5	Van-Edremit_09/11/2011,M=3.7	Van-Edremit_09/11/2011,M=3.6	Van-Sağlamtaş_25/11/2011,M=3.6	Van-Sağlamtaş_25/11/2011,M=4.0	Van-Tabanlı_02/12/2011,M=3.9
İSTASYON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
agrb.bhe	0.7972	0.7062	0.7062	0.9412	1	0.4872	0.4297	0.4263	0.4131	0.522	1	0.2534	0.3423	0.2412
agrb.bhn	0.8453	0.9651	0.9651	0.9713	1	0.6657	0.3255	0.3312	0.3631	0.5011	1	0.266	0.3344	0.2454
argb.bhz	0.7856	0.8284	0.8284	1	0.552	0.521	0.2702	0.2651	0.3028	0.3624	0.3678	0.3598	0.3454	0.1602
bngb.bhe	0.8411	0.7942	0.7942	0.9796	0.9217	0.9601	0.444	0.4376	0.3786	0.3871	0.5116	0.4697	0.6449	0.4482
bngb.bhn	0.8733	0.7915	0.7915	0.8275	0.9851	0.9764	0.6186	0.5653	0.3843	0.4518	0.6471	0.3627	0.4442	0.3293
bngb.bhz	0.8351	0.8501	0.8501	0.9074	0.8857	0.9864	0.3771	0.3695	0.2962	0.2941	0.3257	0.3346	0.3902	0.3761
cukt.bhe	0.8783	0.7495	0.7495	0.8974	0.5793	0.289	0.4411	0.4326	0.4964	0.4206	0.2412	0.2943	0.3241	0.1653
cukt.bhn	0.7318	0.6419	0.6419	0.7659	0.7615	0.7615	0.4865	0.4757	0.4049	0.5043	0.2401	0.2281	0.219	0.1772
cukt.bhz	0.6617	0.7221	0.7221	0.9087	0.701	0.5962	0.3886	0.3881	0.3457	0.3949	0.3949	0.4347	0.3897	0.2583
svan.bhe	0.7232	0.7922	0.7922	0.9546	0.9997	0.6114	0.5131	0.5023	0.3953	0.4232	0.7527	0.4121	0.8203	0.4602
svan.bhn	0.6719	0.7132	0.7132	1	1	0.8956	0.553	0.5464	0.45	0.4607	0.5079	0.4205	0.4828	0.3618
svan.bhz	0.6991	0.71	0.71	1	0.7673	0.9458	0.3824	0.4047	0.3851	0.4872	0.4169	0.5077	0.4652	0.3718
svrc.bhe	0.7137	0.7878	0.7878	1	1	1	0.4062	0.4133	0.4163	0.5252	1	0.4535	1	1
svrc.bhn	0.6696	0.9217	0.9217	1	1	1	0.5573	0.5607	0.4984	0.3617	1	1	1	1
yedi.bhe	0.9823	0.8362	0.9494	0.9487	0.8362	1	0.3733	0.3742	0.4095	0.4464	0.725	0.4046	0.4091	0.5041
yedi.bhn	0.9203	0.879	0.879	0.9683	1	0.998	0.4681	0.4635	0.3811	0.493	0.7301	0.4364	0.4364	0.5291
yedi.bhz	0.9762	0.8642	0.9996	0.9995	0.9585	0.8761	0.3572	0.3666	0.5069	0.5198	0.6985	0.5157	0.7368	0.6525
senk.bhe	0.9523	0.8156	0.8156	0.9439	0.9439	0.9889	0.5439	0.5369	0.4026	0.4008	0.9856	0.5558	0.588	0.4526
senk.bhz	0.8996	0.8553	0.8553	0.9969	0.7862	1	0.3832	0.3746	0.369	0.476	0.8171	0.3219	0.4644	0.432

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, R. ve V. Bolas'ın 2010 yılında formüle ettiği skalogram ölçek endeksi metodu detaylı olarak işlenmiştir. Skalogram ölçek endeksinin sürekli dinamik sistemlerde geçerliliği Bonhoffer-van der Pol osilatörü kullanılarak Şekil 3.7'de gösterilmiş, burada ölçek endeksi değerlerinin bifürkasyon diyagramı ve en büyük Lyapunov üsteli ile uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ölçek endeksinin ayrık zamanlı dinamik sistemlerde geçerliliği Lojistik harita ve Henon haritası kullanılarak Şekil 3.6'da gösterilmiş, burada da ölçek endeksi değerlerinin bifürkasyon diyagramı ve en büyük Lyapunov üsteli ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yine ayrık zamanlı bir düzensiz dinamik sistem olan Duffing osilatöründe kritik kaotik durumdan periyodik duruma geçişte, skalogram ölçek endeksi ve Duffing osilatörünün faz uzayı uyumlu sonuç verecek şekilde başarılı bir şekilde Şekil 3.8'de gösterilmiş, skalogram ölçek endeksinin Duffing osilatörü ile birlikte gürültülü kaotik sinyallerde zayıf periyodik sinyal tespitinde kullanılabilmesi, böylece sistemin kaotik durumdan periyodik duruma geçişinin, sistemin her bir durumundaki faz uzayı diyagramına bakılmaksızın, skalogram ölçek endeksi parametreleri ile pratik olarak tespit edilebileceği görülmüştür. Bu çalışmada, dinamik sistemlerde kaotik davranışların belirlenmesinde kullanılacak yeni bir yöntem olarak skalogram ölçek endeksi ilk defa bir gerçek veride, özgün kaotik özellikler gösteren ve Türkiye bilim dünyası gündeminde uzunca tartışılan 23 Ekim 2011 Van depremi ve sonrasındaki 40 gün içerisinde meydana gelen 13 yerel deprem için kullanılmıştır. Bayram oteli depreminin büyük Van depreminin bir artçısı olmadığı [28], bağımsız bir deprem olduğu skalogram ölçek endeksi değerleri kullanılarak gözlemlenmiştir. Skalogram ölçek endeksinin Lyapunov üstelleri ile karşılaştırmalı olarak gerçek verilerden oluşturulan zaman serilerinin a-periyodikliğinin, dolayısıyla kaotiklik derecelerinin tespitinde kullanılabilmesi belirlenmiştir. Bu sonuçlar da bize skalogram ölçek endeksi yönteminin, genel olarak bir depremin artçı ya da bağımsız olmasını belirlemede kullanılabilmesine işaret etmektedir.

Tezimizde kullandığımız diğer bir yöntem olan Skalogram grafiklerinde, skalogram ölçek endeksi değerleri ile paralel sonuçlar elde edilmiştir. Güç spektrumu grafikleri de deprem dalgalarının frekans aralığı içerisinde sonuçlar vermiştir. Hesapladığımız Lyapunov üsteli değerleri incelenen verilerin zayıf kaotik olduğunu belirtmiştir.

Elde ettiğimiz bulgular ışığında incelenen istasyonlardan alınan deprem verilerinin, Tablo 4.2’de görüleceği gibi birbiri ile uyumlu ölçek endeksi değerleri verdiği belirlendi. Ve deprem büyüklük verileri ile ölçek endeksi değerleri arasında bir uyum olmadığı görüldü.

Ayrıca Tablo 4.2’de görüleceği gibi 23/10/2010, 10:41:21 Van-Tabanlı (M:6.6) depremi dalga formlarına ait zaman serilerinden hesaplanan skalogram ölçek endeksi değerlerinin 0.67-0.98 aralığında yüksek a-periyodiklik gösterdiği, dolayısıyla güçlü kaotiklik derecesine işaret ettiği saptandı.

Yine Tablo 4.2’te görüleceği gibi, 09/11/2011, 19:23:33 Van-Edremit (M:5.6) depremi dalga formlarına ait zaman serilerinden hesaplanan skalogram ölçek endeksi değerlerinin 0.27-0.62 aralığında göreceli düşük a-periyodiklik gösterdiği, dolayısıyla göreceli olarak zayıf kaotiklik derecesine işaret ettiği saptandı.

Ayrıca, Van-Tabanlı (M:6.6) depremi ve bu depremi takip eden 40 gün içerisinde yerel bölgede meydana gelen 13 deprem için yedi farklı istasyonda kaydedilen sismik verilen zaman serilerinden skalogram ölçek endeksi değerleri hesaplanarak oluşturulan grafikler, Şekil 4.13-4.26, ve Tablo 4.2’den anlaşılacağı gibi 09/11/2011 Van-Edremit (M:5.6) depremi (Bayram Oteli Depremi) ve 23/10/2011 Van-Tabanlı (M:6.6) depreminin (Büyük Van Depremi) skalogram ölçek endeksi değerleri arasındaki fark ayrıntılı bir şekilde görülmüştür.

Elde edilen skalogram ölçek endeksi değerleri, 09/11/2011 Van-Edremit (M:5.6) depremi (Bayram Oteli Depremi) ve 23/10/2011 Van-Tabanlı (M:6.6) depreminin (Büyük Van Depremi) farklı dinamik sistemler olduğunun ve Bayram Oteli depreminin büyük Van depreminin bir artçısı olmadığını bir göstergesi olarak kullanılmış oldu.

Skalogram grafiklerinin zamana bağlı frekans bilgilerinden yararlanarak, ve 23/10/2011 Van-Tabanlı (M:6.6) depremi ve 09/11/2011 Van-Edremit (M:5.6) depreminin (Bayram Oteli Depremi) sismik dalga formu verileri arasında ayırt edilebilirlik tezimizde incelendi. Şekil 4.1-4.15 ve Tablo 4.1’de görüldüğü gibi skalogram grafiklerinin Yedisu ve Şenkaya istasyonlarında kaydedilmiş aynı depreme ait sismik dalga formlarının zaman serisinden elde edilen skalogram grafikleri birbirlerine benzerlik gösterdi. Yine şekil IV.19’dan anlaşıldığı gibi her iki istasyon için de skalogram grafikleri Bayram oteli depreminin büyük Van depreminden farklı bir dinamik sistem olduğunu gösterecek

şekilde ayrıştığı tespit edildi. Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı referans değerden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin Büyük Van depremi için Şekil 4.1 ve Şekil 4.3'ta görüldüğü gibi 157-365 aralığında olduğu saptandı. Skalogram grafiğinde her bir dalgacık katsayısına denk gelen enerji dağılımı referans değerden büyük olan ölçek parametresi değerlerinin Bayram Oteli depremi için Şekil 4.9 ve Şekil 4.11'den anlaşıldığı gibi 79 - 206 aralığında olduğu tespit edildi.

Güç spektrumu grafiklerinde etkin frekans bilgilerinden faydalanarak, sismik dalga formu verilerinin Tablo 4.1'den anlaşıldığı gibi beklenen aralıkta (0.01 Hz-0.45 Hz) olduğunu gösterebileceği belirlendi.

Tablo 4.1'de görüleceği gibi bir dinamik sistemin kaotikliğini belirleyen en büyük Lyapunov üsteli değerleri sıfıra yakın değerlerde hesaplanarak, zayıf kaotikliğe işaret etti. Farklı depremlere ait ya da istasyonlara ait en büyük Lyapunov üsteli değerleri arasında bir korelasyon tespit edilmedi.

Bu tez çalışmasında özet olarak, skalogram ölçek endeksi yöntemi farklı fiziksel dinamik sistemlerden elde edilen gerçek verilere uygulanarak, yöntemin bu sistemler için kullanılabilirliğini göstermiştir. Tezde elde edilen bu sonuca göre, skalogram ölçek endeksi yönteminin Duffing osilatörü ile birlikte Sismik dalgalar ya da EEG sinyalleri gibi kaotik sinyallerde zayıf periyodik sinyaller tespit etmede de bir yöntem olarak uygulanabileceği anlaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1]. Campbel, J.J., 1962, *İlkel Mitoloji (Primitive Mythology)*, İmge Kitapevi, Ankara.
- [2]. Campbel, J.J., 1964, *Batı Mitolojisi (Occidental Mythology)*, İmge Kitapevi, Ankara.
- [3]. Thilly, F., 1964, *Felsefe Tarihi (A History of Philosophy)*, HoltRinehart and Winston Inc. Third edition.
- [4]. Kuhn, T.S., 1962, *Bilimsel Devrimlerin Yapısı (The Structure of Scientific Revolutions)*, Alan Yayıncılık, İstanbul.
- [5]. Gleick J., 1987, *Kaos*, TÜBİTAK Yayınları, Ankara.
- [6]. Yılmaz, D. ve Güler, N.F, 2006, Kaotik Zaman Serisinin Analizi Üzerine Bir Araştırma, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21(4), 759-779.
- [7]. Wolf, A., Swift, J.B., Swinney, H.L. ve Vastano, J.A., 1985, Determining Lyapunov Exponents from a Time Series, *Physica D*, 16, 285-317.
- [8]. Benitez, R., Bolos V.J., Ramires, M.E., 2010, Wavelet Based Tool for Studying Non Periodicity, *Comput Math Appl*, 60, 634-641.
- [9]. Ohasaki, Y., 1991, *Deprem Dalgasının Spektral Analizine Giriş*, (Türkçeye çeviren Muzaffer İpek), TMMOB İnşaat Müh. Odası yayını, 92, 132-135.
- [10]. Liu, C.L., 2010, *A tutorial of the Wavelet Transform*, <http://disp.ee.ntu.edu>, Ziyaret Tarihi: 20.03.2016].
- [11]. Mallat, S.G., 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11,674-693.
- [12]. Strogatz, S.G., 1994, *Nonlinear Dynamics and Chaos: with applications to physics, biology, chemistry and engineering*, Addison-Wesley, Singapore.
- [13]. Oppus, C.M., 1994, *Evidence of Chaotic Vibrations in Seismic Waves*, Tez (Yüksek Lisans), Attaneo de Manila University.
- [14]. McColskey, J., Bean, C.J., Jacob, A.W.B., 2012, Evidence for chaotic behaviour in seismic wave scattering, *Geophysical Research Letters*, 18(10), 1901-1904.
- [15]. Quan B., Fisheng, Z., Yumei, K., Jinyuen, B., 2008, Power Spectral Density Estimation of Seismic Wave Based on Wavelet Transform, *Chinese Control and Decision Conference*, IEEE 10.1109/CCDC.2008.4598201.
- [16]. Donald B. Percival, Andrew T. Walden, 2000, *Wavelet Methods for Time Series Analysis*, Cambridge University Press, ISBN: 9780521640688.



- [17]. Cohen J.K., Chen, T., 1993, *Fundamentals of Discrete Wavelet Transform in Seismic Data Processing*, [www.cwp.mines.edu/wavelets/](http://www.cwp.mines.edu/wavelets/) [Ziyaret Tarihi: 02.10.2015]
- [18]. Çolak, Ö.H., 2006, *Dalgacık Dönüşümü Kullanarak Sismik Sinyallerin Analizi*, Tez(Doktora), Sakarya Üniversitesi
- [19]. Guckenheimer, J., Homes, P., 1983, *Nonlinear Oscillations, Dynamical systems and Bifurcations of Vector fields*. Applied Mathematical Sciences, 42. Springer-Verlag, New York.
- [20]. Chandre, C., Wiggins, S., 2003, Time–frequency analysis of chaotic systems, T. Uzer, *Physica D*, 181, 171.
- [21]. Tony, F., Shen, C., Shen, J., *Image Processing and Analysis - Variational, PDE, Wavelet, and Stochastic Methods*, Society of Applied Mathematics, ISBN: 10987654321.
- [22]. Arneodo, A., Audit, B., Musy, J.F., Roux, S.G., 1998, Thermodynamics of fractal signals based on wavelet analysis: application to fully developed turbulence data and DNA sequences, *Physica A* 254 24-45
- [23]. Poligiannakis, J., Preka-Papadema, P., Moussas, X., 2003, Mon. Not. R. Astron. Soc. 343, 725-734
- [24]. Panigrahi, P.K., Manimaran, P., Lakshmi, A., Yadav, R.R., 2006, Correlations and periodicities in Himalayan tree ring widths and temperature anomalies through wavelets, *Cornell University Library*, ArXiv:abs/nlin/0604002.
- [25]. Permann, D., Hamilton, I., 1992, Wavelet analysis of time series for the Duffing oscillator: The detection of order within chaos, *Phys. Rev. Lett.* 69, 2607
- [26]. Lakestani, M., Razzaghi, M., Dehgham, M., 2006, Numerical solution of the controlled Duffing oscillator by semi-orthogonal spline wavelets, *Phys. Scripta.* 74, 362
- [27]. Zhou, Z., Adeli, H., 2003, Time-Frequency Signal Analysis of Earthquake records Using Mexican Hat Wavelets, *Computer-Aided Infrastructure and Engineering*, 18(5), 379-389
- [28]. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi, *Deprem Sayısal Verileri*, <http://www.koeri.boun.edu.tr/> [Ziyaret tarihi: 3 Eylül 2012]
- [29]. Benitez, R., Bolos, V. J., 2007, Invariant manifolds of the Bonhoeffer-van der Pol Oscillator, *Chaos, Solitons and Fractals*, 40(5), 2170-2180
- [30]. Akıllı, M., 2013, *EEG Zaman Serilerinde Zayıf Sinyaller*, Tes (Doktora), İstanbul Üniversitesi.

- [31]. Jhoi, B., Takada, T., Itoi, T., 2013, *Probabilistic Hazard Analysis Based on 2011 Tohoku Earthquake*, Data Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures, ISBN: 978-1-138-00086-5, 4123–4128.
- [32]. USGS, Earthquake Hazards Program, *Earthquakes*, <https://earthquake.usgs.gov> [Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2016]
- [33]. Kantz, H., Schreiber, T., 2003, *Nonlinear Time Series Analysis*, Cambridge University Press, ISBN: 0521 551447
- [34]. Demir Ö., 2008, *EEG Dalgalarının Wavelet (Dalgacık) Dönüşümü ile Değerlendirilmesi*, Tez (Yüksek Lisans), Dumlupınar Üniversitesi.
- [35]. Sezer, E., 2008, *Eilepsi Teşhis için EEG Sinyal Analizi*, Tez, (Yüksek Lisans), Selçuk Üniversitesi.
- [36]. Chakraborty, A., Okaya, D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet based methods, *Geophysics*, 60(6).
- [37]. MIT Opencourseware, *Supplemental resources*, <https://ocw.mit.edu/resources/res-6-007f>. [Ziyaret Tarihi: 06 Mayıs 2016].
- [38]. Huang, W., *Fast fourier Transform and its Matlab Implementation*, University of Texas at Dallas, <https://www.utdallas.edu/>, [Ziyaret Tarihi: 01 Mayıs 2016].
- [39]. Daubechies, I., 1998, *Orthonormal bases of compactly supported wavelets*, Communications on Pure Applied Mathematics, 41(7), 909-996.
- [40]. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.M., Copyright1996-1997 “Wavelet toolbox users guide”, by the MathWorks, Inc. <http://profesores.elo.utfsm.cl/>, [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2016].
- [41]. Dowala, U. F., Anant, S. K., 1997, Wavelet Transform Methods for PhaseIdentification in Three Component Seismograms, *Bulletin of SeismologicalSociety of America*, 87(6),1598-1612
- [42]. Polikar, R., 1999, *The engineer’s ultimate guide to wavelet analysis the wavelet tutorial*, <http://engineering.rowan.edu/~polikar/wavelets/wtpart3.html> [Ziyaret Tarihi: 17 Mayıs 2016].
- [43]. Fidan H. 2006, *Dalgacık Dönüşüm Tekniği İle Motor Arıza Tespiti*, Tez (Yüksek Lisans), Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [44]. Lee, J.J., Lee, S.M., Kim, I.Y., Min, H.K., ve Hong, H.S., 1999, Comparison between short time fourier and wavelet transform for feature extraction of heart sound, *IEEE TEnCON*, 102,18-55.
- [45]. Lockwood, O. G., Kanamori, H., 2007, *Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning*, Geochemistry Geophysics Geosystems ISSN: 1525-2027

- [46]. Scott, A.C., 1977, Neurophysics, Wiley, New York
- [47]. May, R. M., 1976, Simple mathematical models with very complicated dynamics, *Nature* 261, 459
- [48]. Henon, M. 1976, A two-dimensional mapping with a strange attractor, *Commun. Math. Phys.* 50, 69
- [49]. Wang, G., Chen, D., Lin, J., and Chen, X., 1999, The application of chaoticoscillators to weak signal detection, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 46, 440–444
- [50]. Akıllı, M., 2009, *Lyapunov Üstelleri ve Q-istatistik*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi
- [51]. Yılmaz, D. ve Güler, N.F, 2006, Kaotik Zaman Serisinin Analizi Üzerine Bir Araştırma, *Gazi Üniversitesi Müh. Fak. Dergisi*, 21(4), 759-779
- [52]. Kutlu, N. Zeren, T. Yılmaz, H. Akıllı, M. Yalçın G. C., Yılmaz, A. Akdeniz K. G., 2009, Sağlık Epileptik Hastaların EEG Sinyallerinin Doğrusalsızlık Analizlerinin Lateralizasyon ile İlişkisi, *VIII. Ulusal Sinirbilimleri Kongresi*, Bolu.
- [53]. Akıllı, M., Yılmaz, A., Yalçın, G.Ç., Akdeniz, K.G., Kutlu, N., Zeren, T., Yılmaz, H., 24 – 27 Eylül 2009, Epileptik Hastalarda EEG sinyallerinin Kaotik Karakterleri, *Türk Fizik Derneği 26. Uluslararası Fizik Kongresi*, Bodrum
- [54]. Yılmaz, N., 2010, *EEG Sinyallerinde Lyapunov Üstelleri*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi
- [55]. Güler, N.F., Übeyli, E.D. ve Güler, İ., 2005, Recurrent Neural Networks Employing Lyapunov Exponents for EEG Signals Classification”, *Expert System with Applications*, Cilt 29, 506-514

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Nazmi Yılmaz
Doğum Yeri	Düzce
Doğum Tarihi	18.09.1979
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05386308248
E-Posta Adresi	nazmiyilmaz@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik Bölümü
Mezuniyet Yılı	01.04.2000

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	28.12.2010

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	15.12.2016

Makale ve Bildiriler
Yılmaz, N., Serpengüzel, A., 17-21 August 2014, Solar-powered model Vehicle competitions, <i>SPIE Optical Engineering + Applications</i> , San Diego, California United States, 9188-27

Yılmaz, N., Akıllı, M., Akdeniz, K. G., 24-27 August 2015, Scale index method in seismic waves, *9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union – BPU9*, İstanbul

Yılmaz, N., Akıllı, M., Akdeniz, K. G., 28 August-1 September 2015 Determining chaotic behaviour of seismic waves using scale index method, *15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM On Disordered Systems: Theory and Its Applications*, Karaburun, İzmir.

Yılmaz, N., Akıllı, M., Akdeniz, K. G., 25-27 May 2016, The role of scale index method in determining weak periodic signals, *16th INTERNATIONAL SYMPOSIUM On Disordered Systems: Theory and Its Applications*, İstanbul

