



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BÖLGESEL DEPREMLERİN İNCELENMESİNDE
ZAMAN SERİSİ YÖNTEMİ**

Fatih GENÇ

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Programı

Danışman

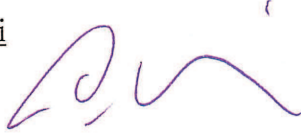
Prof.Dr. K. Gediz AKDENİZ

Haziran, 2012

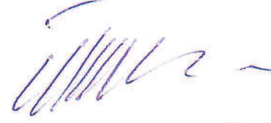
İSTANBUL

Bu çalışma 22/06/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

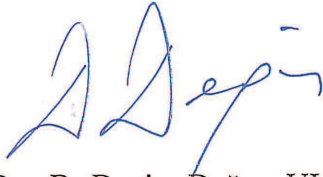
Tez Jürisi



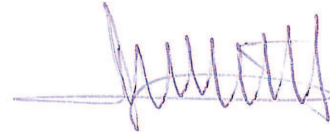
Danışman Adı: Prof.Dr.Gediz AKDENİZ
İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi



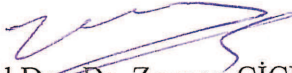
Juri: Prof.Dr.Nurten ÖNCAN
İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi



Juri: Doç.Dr.Deniz Değer ULUTAŞ
İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi



Juri: Prof.Dr.Hasan TATLIPINAR
Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi



Jüri: Yrd.Doc.Dr. Zeynep ÇİÇEK ÖNEM
İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi

ÖNSÖZ

Bu tezin yazılması sırasında destek, hoşgörü ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Prof.Dr.K.Gediz AKDENİZ'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını esirgemeyen Mahmut AKILLI arkadaşşıma teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Mayıs, 2012

Fatih GENÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	6
2.1. DİNAMİK SİSTEMLER	6
2.1.1. Otonom Dinamik Sistemler	6
2.1.2. Otonom Olmayan Dinamik Sistemler	6
2.1.3. Doğrusal Dinamik Sistemler	7
2.1.4. Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemler	7
2.2. FAZ UZAYI VE ÇEKERLER	7
2.3. LYAPUNOV ÜSTELLERİ.....	12
2.4. DEPREMLER	14
2.4.1. Depremlerin Oluş Nedenleri	14
2.4.2. Deprem Dalgaları	14
2.4.3. Türkiyede'ki Deprem Kuşakları.....	17
3. MALZEME VE YÖNTEM	19
3.1. KAOTİK ZAMAN SERİSİNİN ANALİZİ	19
3.2. FAZ UZAYININ YENİDEN KURULMASI	20

3.3. ZAMAN GECİKMESİNİN BELİRLENMESİ.....	21
3.4. YERLEŞTİRME BOYUTUNUN BELİRLENMESİ.....	22
3.5. ÇEKER BOYUTU HESAPLAMALARI	23
3.6. EN BÜYÜK LYAPUNOV ÜSTELİNİN HESAPLANMASI.....	24
4. BULGULAR	25
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	33
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	37

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	: Van depremi ve sonrasındaki üç ay içinde meydana gelen depremlerin yer ve büyüklükleri.....	4
Şekil 1.2	: Kütahya depremi ve sonrasındaki üç ay içinde meydana gelen depremlerin yer ve büyüklükleri.....	4
Şekil 2.1	: Sarkaç Salanımı İçin Zaman Grafiği ve Durum Uzayı	8
Şekil 2.2	: Yakınsayan çekerler	9
Şekil 2.3	: Lorenz'in iki sayısal hava tahmin çekerleri.....	11
Şekil 2.4	: Seçilen birbirine yakın iki ilk koşul ve evrimleri	13
Şekil 2.5	: Yer içinde hareket eden sismik dalgalar.....	15
Şekil 2.6	: Bir cisim dalgası olan P dalgasının ilerlemesi.....	15
Şekil 2.7	: Bir cisim dalgası olan S dalgasının ilerlemesi.....	16
Şekil 2.8	: Bir yüzey dalgası olan Love dalgasının ilerlemesi	16
Şekil 2.9	: Bir yüzey dalgası olan Rayleigh dalgasının ilerlemesi	16
Şekil 2.10	: Van ve Kütahya ilinin hangi dereceden deprem kuşağı içinde bulunduğu şekillerde gösterilmiştir.....	18
Şekil 2.11	: Van deprem kuşağı haritası	18
Şekil 2.12	: Kütahya deprem kuşağı haritası.....	19
Şekil 3.1	: Kaotik zaman serisinin analizine ait işlemler	20
Şekil 3.2	: $X(t)$ zaman serisini kullanarak faz uzayının yeniden kurulması.....	21
Şekil 3.3	: Lyapunov üstelinin hesaplanması	25
Şekil 4.1	: Kandilli kayıtlarına göre Van depremi ve sonrasındaki iki aylık süreçte meydana gelen deprem ve büyüklüklerini gösteren grafik.....	26
Şekil 4.2	: Simav depremi ve sonrasındaki iki aylık süreçte meydana gelen deprem ve büyüklüklerini gösteren grafik.....	26
Şekil 4.3	: $\tau = 3$; Karşılıklı bilgi fonksiyonu yöntemi ile Van deprem verisi için bulunan gecikme zamanı	27
Şekil 4.4	: $\tau = 4$; Karşılıklı bilgi fonksiyonu yöntemi ile Simav depremi verisi için bulunan gecikme zamanı	28
Şekil 4.5	: $m= 4$; En Yakın Yanlış Komşuluk yöntemi ile Van deprem büyüklük verisi için hesaplanan yerleştirme boyutu.....	28

Şekil 4.6	: $m=4$; En Yakın Yanlış Komşuluk yöntemi ile Simav deprem büyüklük verisi için hesaplanan yerleştirme boyutu.....	29
Şekil 4.7	: Van deprem büyüklük verisinden elde edilen çeker	29
Şekil 4.8	: Simav deprem büyüklük verisinden elde edilen çeker.....	30
Şekil 4.9	: Van deprem verisinden elde edilen çekerin boyutu	30
Şekil 4.10	: Simav deprem verisinden elde edilen çekerin boyutu.....	31
Şekil 4.11	: Van deprem verisinden elde edilen Lyapunov üstelleri	31
Şekil 4.12	: Simav deprem verisinden elde edilen Lyapunov üstelleri.....	32

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	: Çeşitli kaotik zaman serilerinin analizlerinde elde edilmiş sonuçlar.....	25
Tablo 4.1	: Van ve Simav deprem büyüklük verilerinden elde edilen zaman serilerinin analizi ile ulaşılan toplu sonuçları	32

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{a}(\tau)$: Otokorelasyon fonksiyonu
$C(\epsilon)$: Korelasyon integrali
D_ϵ	: Korelasyon boyutu
$I(\tau)$: Karşılıklı bilgi fonksiyonu
R_i	: Yanlış en yakın komşu seçiminde kullanılan eşik değeri
ΔX_0	: Uzaklık farkı
λ	: Lyapunov üsteli
m	: Yerleştirme boyutu
τ	: Gecikme Zamanı
$\epsilon(t)$: Duyarlılık fonksiyonu
N	: Eleman sayısı
$X(n)$: Zaman serisi

ÖZET

BÖLGESEL DEPREMLERİN İNCELENMESİNDE ZAMAN SERİSİ YÖNTEMİ

Bu çalışmada kaotik özellikler gösteren dinamik sistemlerden ve bu sistemlerin ürettiği verilerle oluşturulan zaman serilerinin analizi ile dinamik sistemlerin kaotiklik durumlarının tespitine değinilmiş, yöntem kısmında ise dinamik sistemin matematiksel niteliklerinden çok pratik tespitlere yer verilmiştir.

Bu amaçla uygulama alanı olarak Van ve Simav deprem büyüklük verileri seçilmiştir. Öncelikle incelenen sistemle ilgili eldeki tek bilginin, analiz edilecek zaman serisinin kendisi olduğu varsayılmış ve süreci ilerletecek tüm bilgi yine zaman serisinden elde edilmiştir. Oluşturulacak yeni faz uzayını temsil edecek gömme boyutunun bulunması amacıyla seriden elde edilen ortak bilgi fonksiyonları (mutual information) incelenmiş, yanlış yakın komşular metodu (false nearest neighbors) yaklaşımı ile gömme boyutu uygun gecikme değeri için yeniden inşa edilmiştir. Elde edilen yeni faz uzayında verinin çekeri çizilerek fraktal boyutları hesaplanmış ve en büyük Lyapunov üsteli elde edilerek sistemin kaotik olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Her iki depremin de kaotik ölçüleri Lyapunov üsselleriyle gösterilmiştir. Van depremi sürecinin Simav depremi sürecinden daha kaotik yapıda olduğu tespiti yapılmıştır.

SUMMARY

TIME SERIES METHOD IN THE INVESTIGATION OF REGIONAL EARTHQUAKES

Firstly, it was assumed that the only available information about the system was the time series being analyzed. Likewise, all the information used to move forward in the phase was obtained from the time series. In order to create the embedding space that would represent the phase space, mutual information obtained from the series was examined and the embedding was rebuilt for a delay time of appropriate length using the false nearest neighbors approach.

We tried to determine whether the system was chaotic by drawing a graph of the data from the new phase space: we studied the lag and obtained the largest Lyapunov exponential. Both earthquakes were displayed as positive Lyapunov exponentials (nonlinear, deterministic systems). We determined that the phase of the Van(Turkey) earthquake was more chaotic than that of the Simav(Turkey) earthquake. The experiment was repeated using Ripple Analysis to reduce the effect of noise in the earthquake magnitude data.

1. GİRİŞ

Bizi çevreleyen evren doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Biçim, bileşim ve fonksiyonda standart bir sınıflamanın mümkün olmadığı, olağan üstü bir çeşitliliğin olduğu bir evrende yaşıyoruz. En yakın kişisel dünyamızda bile istediğimiz her şeyi yapabildiğimiz sınırsız bir özgürlüğe sahip değilizdir. Çünkü doğal çevremize, bizimle ilgili olan sosyal ve resmi kurumlara ve hatta kullandığımız çok sayıdaki teknolojik alete bile karmaşık bağlarla bağlıyızdır. Bu bağlar arasında meydana gelebilecek küçük bir itme veya çekme bazen güzel bazen hoş olmayan durumlar meydana getirebilir. Diğer bir deyişle, etki ve tepkiler orantısız değildir. Önemsiz bir etki fark edilir derecede büyük sonuçlar doğurabilir. Bir futbol maçının sonucunu, erken atılan bir gol tahmin ötesi bir skora taşıyabilir. Etki ve tepki ya da sebep ve sonuçlar arasındaki bu orantısızlık "nonlineerlik" olarak adlandırılır.

Doğrusal Olmayan Bilim (Non-linear Science) bu çağın en iddialı disiplinler arası alanlarından biri olarak ivmeli bir şekilde gelişmektedir. Bu bilimin lokomotiflerinden biri kaos kuramıdır [1]. Bu kuram, dinamik sistemlerin düzensiz davranışlarını incelemek ve aynı zamanda sistemin kendi içindeki düzensizliklerinin nedenlerini ortaya koyabilmek için geliştirilmiştir. Kaos kuramı belirli bir zaman aralığında birbiriyle çelişkili görünen rastgelelik ve determinizm gibi iki nosyonu uzlaştırmaya ve dinamik sistemleri düzensizliklerini ihmal etmeden analiz etmeye çalışmaktır. Bu çabalar doğrusal olmayan bilim ile uğraşanlar tarafından "deterministik kaos" olarak adlandırılmaktadır.

Kaos kuramı yapısal olarak bir fizik teorisi ya da matematiksel bir tümevarım değil, fiziksel gerçeklik parçalarının bir bütün olarak eğilimini açıklamaya yarayan bir yöntemdir. Bir sigara dumanının havada yaptığı şekiller tamamen düzensiz ve bağımsız rastlantıların ürünü olarak görülebilir. Ancak bir teorik fizikçi dumanın bu dinamiğinin aslında ortamdaki birçok parametre ve etken ile belirlendiği görüşündedir.

Kaos ve nonlineer dinamiklerin sağladığı yeni teoriksel kavramlar basit sistemlerin aniden meydana getirdiği karmaşık davranışları anlamamıza yardım eder. Kaos teorisinin önemli özelliklerinden biriside kelebek etkisi olarak bilinen başlangıç

koşullarına hassas bağlılıktır. Bu teori, ayrıca, periyodik olmayan sistemlerin davranışı hakkında uzun vadede tahminlerin yapılamayacağını açıklar. Uzayda kütleyle sahip iki ayrı gezegenin izleyeceği yörüngeler matematiksel hesaplar vasıtasıyla kesin olarak belirlenebilmektedir. Ancak üç gezegen olması durumunda, üç cisim problemi (three-body problem), gezegenlerin izlediği yörüngeler öylesine karmaşık ve beklenmediktir ki, bu sistemi yöneten denklemler çok iyi bilinmesine rağmen sistemin gelecekte alacağı bir konumun tespiti neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Üç-cisim problemini çözen Jules Henri Poincare (1854—1912) Fransız bir matematikçidir. Kendisi iyi bilinen matematiksel sistemlerin, bilinmeyen ve tahmin edilemez fiziksel sonuçlarının var olabileceğini, üç cisim probleminde cisimlerin başlangıç durumlarında meydana gelen 1 dakikalık bir değişimin, sistemin geleceği üzerinde muazzam etkileri olduğunu keşfetmiştir.

1960'lı yıllara dek çeşitli bilim adamları tarafından sürdürülen çalışmaların başlangıç durumuna hassas bağlı sistemlerin doğası ile ilgili görünür bir çalışma ortaya koyamadığı gözlenir. Ancak literatürde deneysel sonuçlardan elde edilen beklenmedik sonuçlara yönelik olarak bu kapalı kutu, Edward Lorenz adında Amerikalı bir bilim adamı tarafından tekrar açılır. Bazı atmosferik süreçler, ne kadar basit yapıda olursa olsun tahmin süresini büyük oranlarda düşürür. Başlangıçta Lorenz bunun bir bilgisayar hatasından kaynaklandığını düşündü, belki de bu arayış beklediğinden çok daha büyük bir meyve vermiştir. Lorenz çok düşük boyuta (low-dimensional) sahip diferansiyel sistemlerin kararsız yörüngeler izleyebileceğine dikkat çekmiştir. Ondan sonra gelenler de bu tip yapıların, topoloji adı verilen ve matematiğin derin analiz gerektiren dallarından birinin uzantısı olabileceğini belirtmiştir (Smale Nale). Ayrıca bu tarz sistemleri tanımlayacak sözcük olan “kaos”, 1975 yılında aralarında Jim Yorke'nin de bulunduğu bilim adamları tarafından literatüre kazandırılmıştır.

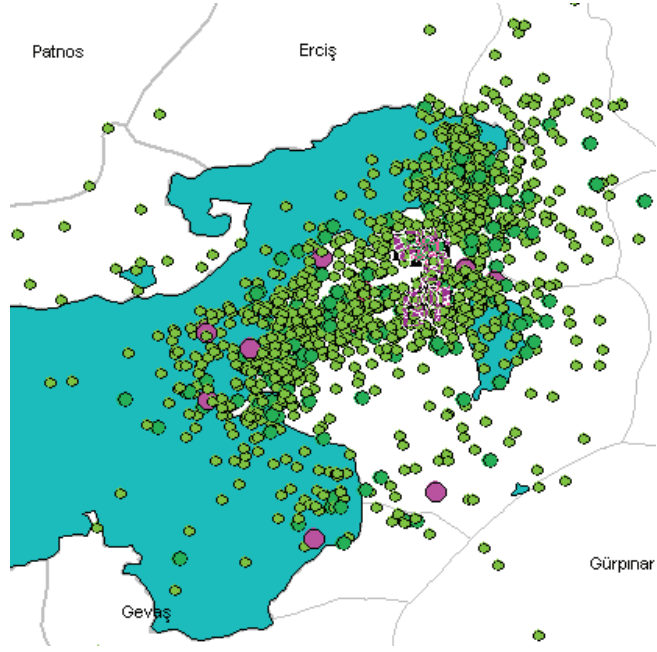
Her ne kadar fizik literatürüne çok geç girmişse de kaos, dinamik sistemlerin karmaşık davranışlarını betimlemek ve aynı zamanda sistemin kendi içindeki düzensizliklerini ortaya koymak için geliştirilmiş bir kavramdır. Oysa modern bilim basit sarkaç özelinde görüldüğü gibi periyodik hareket gibi düzenli hareketler üzerinde kurulmuş ve ilerlemesini benzer ideal sistemler topluluğuyla sürdürmüştür. Modern bilim ve sosyal

alanlardaki metaforları sistemin içindeki düzensizlikleri göz ardı ederek oluşturduğu paradigmlar ve yöntemlerle kendini geliştirmiştir.

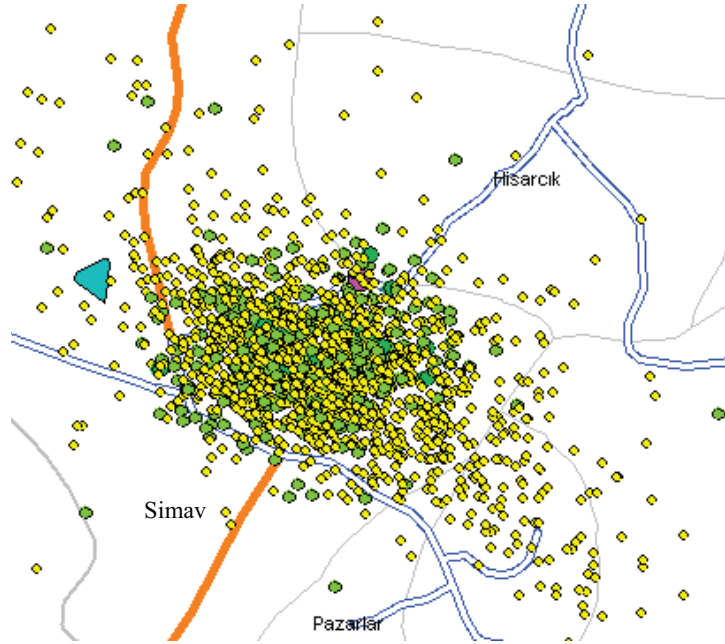
Kaos teorisinin amacı bu indirgemeci düşüncenin dışında dinamik sistemleri düzensizlikleriyle birlikte çözümlene yollarını aramaktır ve en önemlisi görünüşte birbiriyle çelişen rastgelelik ve determinizm gibi iki nosyonu bağdaştırmaya çalışmaktır.

Deneysel veya bilgisayarlarda tekrarlanabilen periyodik alt yapıya sahip mevcut dinamik sistemler için kaotik zaman serisi analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için ilk koşul incelenecek dinamik sistemler için zaman serilerini oluşturabilmektir. Bugün gelinen aşamada dinamik sistemlerin orijinal datalarından zaman serilerini oluşturmada elimizde büyük olanaklar vardır. Özellikle fizyolojik sistemlerde ayrıca, deprem dataları ve fizik deney dataları gibi tekrarlanması güç olan datalar bilgisayarlarda geliştirilen yeni simülasyon teknikleri ile zaman serisi yöntemi için gerekli olacak şekilde çoğaltılmaktadır. Geliştirilen yeni bilgisayar programlarıyla zaman serilerinin analizleri rahatlıkla yapılmaktadır. [2].

Bu tez çalışmasında, Türkiye Cumhuriyeti Van ili Erciş bölgesinde 23/10/2011 tarihinde saat 13:41 de Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi kayıtlarına göre [22]. Büyüklüğü 6.6 olan ana deprem ve sonrasında bu bölgede 22/12/2011 tarihine kadar iki aylık süreçte büyüklüğü 2 den fazla olan yaklaşık 3500 civarında artçı sarsıntının büyüklük verileri ile zaman serisi çıkarılmıştır. Merkez üssü Kütahya ili Simav bölgesinde olan 19/03/2011 tarihinde 23:15 de kandilli kayıtlarına göre büyüklüğü 5.9 olarak tespit edilen ve sonrasındaki iki ay boyunca büyüklüğü 2 den fazla olarak tespit edilen 1804 artçı sarsıntının büyüklük verileri kullanılarak zaman serileri çıkarılmıştır. Zaman serileri oluşturulurken depremlerin ana deprem ilk veri alınmak üzere kronolojik olarak oluş sırasına göre büyüklük verileri kaydedilmiştir. Depremler arasında eşit süre olması durumu mümkün olmayacağından eşit zaman aralıklı bir veri deprem gibi doğal bir olayda mümkün olmayacaktır bu yüzden olay bazlı bir zaman serisi bu çalışmada kullanılmıştır. Deprem büyüklük verileri ise ana depremin aynı bölgedeki farklı derinliklerde farklı noktadaki binlerce artçısı kabul edilen depremlerden oluşturulmuştur.



Şekil 1.1: Van depremi ve sonrasındaki iki ay içinde meydana gelen depremlerin yer ve büyüklükleri. [22]



Şekil 1.2: Kütahya Simav depremi ve sonrasındaki iki ay içinde meydana gelen depremlerin yer ve büyüklükleri.[22]

Bu zaman serileri kullanılarak karşılıklı bilgi fonksiyonu kullanılarak gecikme zamanı (τ) tespit edilecek sonrasında faz uzayının yeniden oluşturulması için gerekli olan yerleştirme boyutunun (m) bulunması için ise en yakın yanlış komşuluk yöntemi hesaplanacak. Bu veriler ışığında yeni faz uzayları çizilecek. Deprem süreçlerinin kaotikliğinin ölçüsü olan Lyapunov üsellersi (λ) hesaplanacak.

Bu tez çalışması aşağıdaki plan çerçevesinde düzenlenmiştir:

Genel kısımlar bölümünde; dinamik sistemlerin karakterize edilmesi ve zaman serilerinden determinizmin belirlenmesi konusu teorik olarak aktarılacak ve sistemin kaotikliğini belirlemede matematiksel bir ölçü olan Lyapunov Üstellersi hakkında bilgiler verilecektir. Depremler, oluş nedenleri, deprem dalgaları, deprem büyüklük hesaplamaları ve Türkiye'deki deprem kuşakları hakkında genel bilgiler verilecektir.

Malzeme ve Yöntemler bölümünde; zaman serisi analiz yöntemi anlatılacak. Bir dinamik sistemin tek değişkeni üzerinde elde edilen zaman serilerinin faz uzaylarını yeniden yapılandırma tekniği aktarılacaktır. Oluşturulacak faz uzayın yapılandırmasında kullanılacak olan yerleştirme boyutu (m) ile gecikme zamanı (τ) hakkında bilgi verilecektir. Yerleştirme boyutu değerini bulmak için kullanılan 'en yakın yanlış komşuluklar yöntemi' ile ' τ ' gecikme zamanı değerini bulmak için kullanılan 'otokorelasyon fonksiyonu' ve 'karşılıklı bilgi fonksiyonu' hakkında bilgi verilecektir. Bu parametrelere dayanarak çakeri çizilecek sistemlerin kaotik olup olmadığını belirlemede kullanılan ve kaotik sistemlerin en önemli özelliği olan 'başlangıç koşullarına hassas duyarlılık' ölçüsünü veren Lyapunov üstellerinin hesaplama yöntemleri anlatılacaktır.

Tez çalışmasının Bulgular bölümünde ise; Van Erciş ve Kütahya Simav bölgesinde üç aylık süreçteki kaydedilen deprem büyüklüklerinden elde edilmiş olan zaman serilerinin grafikleri çizilecektir. Daha sonra bu zaman serileri için yerleştirme boyutları (m) ile gecikme zamanları (τ) bulunacaktır. Bu parametreleri kullanarak sistemin çakeri çizilecektir. Sonrasında Lyapunov üstellersi hesaplanacaktır. Sistemin kaotikliğinden emin olmak için bir de çakerlerin fraktal boyut hesaplamaları yapılacaktır. Bütün bu grafik çizimleri ile hesaplamalar NDT "Nonlinear Dynamics Toolbox" ve VRA "Visual Recurrence Analysis" bilgisayar programı aracılığıyla yapılacaktır.

Tartışma ve Sonuç kısmında ise; tez çalışmasında ulaşılan sonuçların bir genel değerlendirmesi yapılacaktır. Özellikle Kaotikliğin bir ölçüsü olan Lyapunov üstellerin sayısal değerlerine bakarak depremler hakkında yorumlar yapılmaya çalışılacak ve benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. DİNAMİK SİSTEMLER

Dinamik sistemler, matematiksel olarak değişkenleri, daha önceden almış oldukları değerlere ve içinde buldukları zamana göre değer alan sistemlerdir. Dinamik sistemler farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Matematiksel gösterimi yapılmak istendiğinde dinamik sistemler kesikli ve sürekli olmak üzere iki sınıfa ayrılabilirler. Bu iki sınıfın yapısı ve geliştirilen çözüm teknikleri birbirinden farklıdır [19].

Diğer bir sınıflandırma, sistemin zamana bağımlı olup olmamasına göre yapılmaktadır. Otonom olan ve otonom olmayan sistemler bu sınıflandırmanın başlıklarıdır. Otonom dinamik sistemler kaos teorisinin incelediği sistemlerdir.

Kaos teorisi açısından en önemli sınıflandırma ise sistemleri, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler olarak ayırandır.

2.1.1. Otonom Dinamik Sistemler

Zamana bağlı olmayan sistemler otonom sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu tip sistemlerin belirli bir andaki durumu üzerinde zamanın hiçbir etkisi yoktur. Bu nedenle sistem durumu yalnızca sistemin daha önceki durumlarından etkilenir.

2.1.2. Otonom Olmayan Dinamik Sistemler

Otonom olmayan sistemlerde sistem durumu değişken ve parametrelerin yanında zamana da bağımlıdır. Bu tip sistemlerde zaman da bir değişken olarak diferansiyel

denklem içinde yer alır. Otonom sistemden farklı olarak zamana bağımlı olduğu için başlangıç zamanı keyfi olarak sıfır seçilemez.

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.

2.1.3. Doğrusal Dinamik Sistemler

Dinamik sistemin davranışı tanımlayan fark denklemi ya da diferansiyel denklemlerdeki fonksiyonlar doğrusal ise, dinamik sistem doğrusaldır. Doğrusallığı basit bir örnekle açıklamaktadır: Sistem bir etki verilerek uyarıldığında bir yanıt verecektir. Eğer sisteme uyarıcı olarak verilen bu etki iki katına çıkarıldığında sistem de yanıtını iki katına çıkarıyorsa, doğrusal dinamik bir sistemden söz edilmektedir.

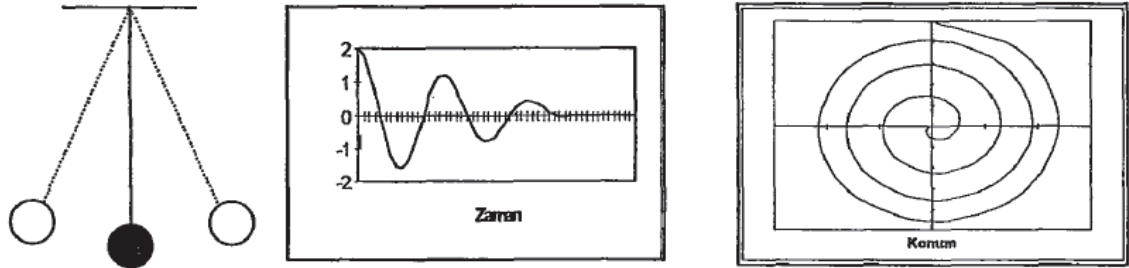
2.1.4. Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemler

Dinamik sistemin davranışını tanımlayan fark denklemi ya da diferansiyel denklemlerdeki fonksiyonlardan en az biri doğrusal değilse, sistem doğrusal olmayan dinamik sistem olarak adlandırılır. Sisteme verilen etki iki katına çıkarıldığında, sistem yanıtı iki katına çıkarmayıp daha küçük ya da daha büyük yanıt veriyorsa sistem doğrusal olmayan bir sistemdir.

2.2. FAZ UZAYI VE ÇEKERLER

Dinamik sistemlerin görsel olarak açıklanmasında kullanılan iki grafik yöntemi vermektedir. Bunlardan birincisi sisteme ilişkin değişkenlerin zaman içinde aldıkları değerlerin gösterildiği grafiklerdir. Bu tip grafikler zaman boyutunda sistemin davranış türleri, rejime ulaşım ulaşmadığı konusunda önemli bilgiler verirler. Fakat dinamik sistemleri anlamamızda en büyük araç durum uzayı dediğimiz grafik gösterim tarzıdır. Durum uzayına faz uzayı da denilmektedir. Durum uzayları matematiksel olarak yapılandırılmış kavramsal uzaylardır. Bu grafiğin her bir ekseni (boyutu) sisteme ilişkin

bir değişkene karşılık gelir. Bu nedenle durum uzayında her bir nokta sistemin tam bir tanımını verir. Grafikte sistemin izlediği gelişim yolu ortaya çıkar. Sistemin durum uzayında izlediği bu yola yörünge adı verilmektedir. Durum uzayı yöntemi oldukça kullanışlıdır. Çünkü dinamik sistemlerdeki yörüngelerin çözümleri hakkında açık bir bilgiye sahip olmasak da, bu yörüngelerin geometrik özellikleri üzerinde çalışmak olanaklıdır. Durum uzayı içindeki olası yörüngelerin gösterdikleri şekiller kullanılarak karakterize edilmesi, kaos teorisinin en önemli matematiksel araçlarından biridir. Dinamik sistemlerin davranışlarını görselleştirerek daha iyi bir anlayış sağlanması itibariyle, faz uzayı kavramı çok önemlidir. Bir dinamik sistemin faz uzayı, sistemin anlık durumunu tanımlamak için gerekli değişkenlerin her birinin, dik koordinat doğrultuları ile temsil edildiği bir matematiksel uzaydır. Durum uzayı olarak adlandırıldığı da olur. Tek boyutta devinen bir parçacığın durumunu, konumu ve hızı ile belirlenir. Dolayısıyla faz uzayı iki boyutlu bir düzlemdir. Öte yandan üç boyutta hareket eden bir parçacığın faz uzayı altı boyutlu bir hiper uzay olur.



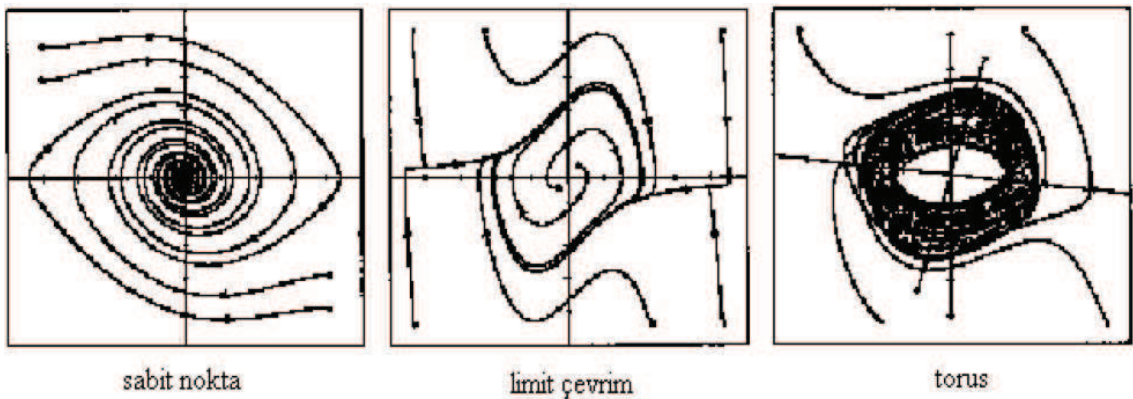
Şekil 2.1: Sarkaç Salanımı İçin Zaman Grafiği ve Durum Uzayı

Faz uzayı yapılandırmanın çeşitli yolları vardır. Örneğin hız yerine momentum kullanılabilir. Söz konusu sistem diyelim bir ekolojik modelse, faz uzayı koordinatları çeşitli türlerin nüfusu gibi değişkenler olabilir.

Dinamik sistemler, faz uzayında hacim değişimi olup olmamasına göre korunumlu ve korunumsuz olmak üzere ikiye ayrılır. Korunumsuz durumda zaman ilerlerken hacim daralmaktaysa yani sistem enerji kaybediyorsa, sistemin harcayıcı olduğu söylenir. Harcayıcı sistemlerde hacmin daraldığı nokta ya da noktalar kümesine "çeker" denir. Korunumlu dinamik sistemlerin çekeri yoktur. Çeker, sistemi çeken ve bırakmayan bir davranış biçimidir: dolayısıyla faz uzayındaki uzun dönemli davranışı tanımlar. Bir

dinamik sistemin zaman içinde ilerlerken vardığı son noktadır. Çeker havzasında bulunan başlangıç koşullarından doğan yörüngeler sonuçta çekere yaklaşır. Nesne ya da veri noktası bir kez çeker havzasına girdiğinde, güçlü bir kuvvet uygulanmadıkça terk etmez. Bir dinamik sistemin bir veya daha fazla çeker kümesi faz uzayında temsil edilebilir. Matematiksel anlamda ise bir çeker, bir denklemin çözümünün geçiş evresini takiben vardığı, faz uzayında bulunan bir noktalar kümesidir.

En basit çeker çeşidi sıfır boyutlu sabit bir noktadır. Örneğin Şekil 2.2'de sağ altta bulunan iki boyutlu faz uzayının orijini bir sabit nokta çekerdir. Zaman ilerledikçe, yörünge orijine doğru sarmallaşmaktadır. Yani sarkacın başlangıç koşulu ne olursa olsun, sonuçta sarkaç denge konumunda duruyor olacaktır. Bir diğer çeker çeşidi bir boyutlu limit çevrimdir. Şekil 2.2'de sol altta bir örneğinin görülebileceği bu çeker, sürekli salınma işaret eder. Sistem limit çevrimin dışında ya da içinde olan bir başlangıç koşulu ile başlatılırsa, yörünge zamanla içeri ya da dışarı sarmallaşarak eğriye oturur ve $t \rightarrow +\infty$ limitinde periyodik hareket yapar. Dolayısıyla, kapalı eğri çekerdir. Farklı periyotlardan oluşan yani periyodik davranış ise torus biçiminde bir çekere yol açar. Bu üç çeker çeşidinin "yakınsayan çeker" olarak adlandırıldığı olur. Şekil 2.2'teki çekerlerden birine sahip olan sistem, başlangıç koşullarına hassas bağlılık sergilemez. Dolayısıyla, başlangıçta birbirine yakın olan iki yörünge zaman ilerlerken iraksamayacaktır.



Şekil 2.2 : Yakınsayan çekerler.

Yukarıda söz edilen çekerler için çeker boyutu, faz uzayının toplamdaki boyutundan küçük bir tamsayıdır. Bunların yanı sıra boyutu kesirli sayı olan çekerler de bulunmaktadır. 1971 yılında F.Takens ve D.Ruelle tarafından bunlara "garip çeker" adı verilmiştir. Garip çekerlerin çoğu kaotik olmakla beraber, kaotik olmayan garip çekerler (başlangıç koşullarına hassas bağıllık yok, boyut kesirli) ve garip olmayan kaotik çekerler de (başlangıç koşullarına hassas bağıllık var, boyut tamsayı) vardır. Bir çekerden bahsederken kullanılan "garip" sözcüğü çekerin geometrisine, "kaotik" sözcüğü ise dinamiğine işaret eder. Mandelbrot'un adlandırmasıyla, boyutu kesirli sayı olan çekerlerin geometrisi "fraktal"dır.

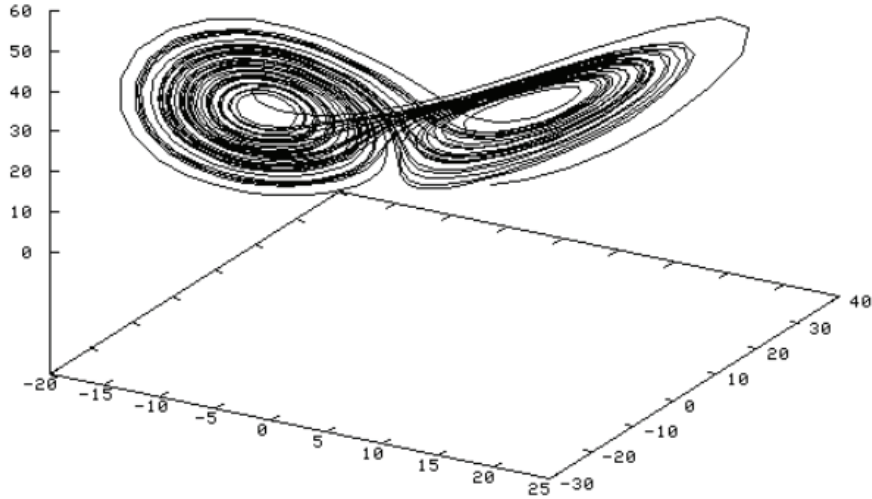
Fraktallar doğada birbirinden çok değişik (gibi görünen) yer ve durumlarda gözlenmektedir. Sıklıkla sergiledikleri en belirgin özellikler "kendine benzerlik"tir. Yani bir fraktalın herhangi bir parçası alınıp defalarca büyütülürse, çoğu zaman fraktalın kendisine çok benzer olduğu görülür örneğin bulutlar. Temelde, fraktallar iki farklı türde düşünülebilir: somut nesnelere ve soyut garip çekerler. İlk tür, bildiğimiz fiziksel uzayda var olan yapıları içerir.

Literatürde beliren ilk garip çeker, Lorenz'in 1962'de keşfedip 1963'te yayınladığı ve onun soyadıyla anılan Lorenz çekeridir (Şekil 2.3).

E.N. Lorenz bir meteoroloji uzmanı; aynı zamanda iyi bir matematikçidir. Lorenz hava tahmini çalışmalarında uğraşırken farklı bir yöntem dener: Hava durumunu sayılara dökererek kendi kurduğu bilgisayar programıyla gözlemeye başlar. O zamana kadar böyle bir yöntemin kullanılmasına başta kendi meslektaşları fazla sıcak bakmıyorlar. Çünkü o günlerde hala bilgisayara karşı bir güvensizlik duygusu hâkimdi. Onun için E.N. Lorenz'in hava durumunu sayısal bir modele dökmeye girişimini meseleyi yozlaştırmaktan başka bir sonuç doğurmayacağını düşünüyorlardı [8]. Oysa günümüzde gelinen aşama kaos teorisi data (sayı) ve bilgisayar gibi iki temel ayak üzerinde yürütülmektedir.

Olayın bilimsel hikayesi kaos üzerine yazılmış kitaplarda çok kez şöyle anlatılır [8]: "Lorenz hava durumu çalışmalarını yürütürken sadece bir değişken seçiyordu. Örneğin bunlarda hava akımını yönünü alıyordu. Lorenz bilgisayarda elde ettiği dizilerden birisini tekrar incelemeye alıyor. Bilgisayar programını tekrar başa alıp çalıştırmaktan ziyade orta yerlerden bir yerden başlatıyor. Lorenz aynı dökümü almaya hazırlanırken, farklı bir

dökümle karşılaşıyor. Bu dizi üstelik öncekiyle giderek farklılaşarak ortak benzerlik yönleri de kayboluyordu. Sonra Lorenz bu meselenin neyde kaynakladığının farkına varıyor. Bilgisayar hafızası ondalık kesir sayıları altı haneliye (.506127) göre ayarlanmıştı; oysa Lorenz son üç rakamını yuvarlatarak (.506) girmişti. Çünkü binde birlik bir farkın sonucu etkilemeyeceğini düşünüyordu. Böyle düşünmesi de son derece doğal idi. Çünkü bu düşünce modern bilimin temel paradigması idi. Şimdiye kadar geliştirilmiş bütün bilimsel çalışmalar bu paradigma üzerinden geliştirilmişti. Oysa şimdi karşılaştığı durum çok farklıydı. Modern bilimin temel paradigmasıyla çelişen bir durum söz konusudur. Modern bilim felsefesi bize; herhangi bir sistemin başlangıç koşulları hakkında yaklaşık olarak bir bilgi durumuna sahipsek, sistemin daha sonraki davranışını yaklaşık olarak mevcut yasalar çerçevesinde hesaplamak mümkün olduğunu söylemektedir. Lorenz'in bu çalışmasıyla artık bunun her yerde geçerli olmadığını öğreniyoruz. Hava durumunun "başlangıç koşullarına hassas bir bağlılığı" söz konusudur. Bu durum aynı zamanda bütün kaotik sistemlerden görünen temel bir özellik haline gelir. Lorenz kendi ifadesiyle şu sonuca varır: ...ben periyodik olmayan davranış özellikleri gösteren hiçbir fiziksel sistemde öngörü yapmanın mümkün olmadığını artık anlamış bulunuyorum.”



Şekil 2.3: Lorenz'in iki sayısal hava tahmin çekeri (1961) [9]

Lorenz çekerin fraktal boyutu 2.06 olarak ölçülmüş. Çekerin boyutu tam sayı olmaması yani kesirli çıkması bunu garip veya acayip çeker sınıfına sokar

Genellikle doğadaki doğrusal olmayan dinamik sistemlerin denklemlerini bilmeyiz. Bu durumda elimizde bir değişkene (sıcaklık, basınç, deprem büyüklüğü vs.) ait belirli gözlem aralıklarında kaydettiğimiz değerler olur. Bu zaman serisinin analizini yaparak sistemin kaotik olup olmadığını anlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Kaotik zaman serisi analiz yöntemiyle incelediğimiz dinamik sistemler hakkında bilgi edinebiliriz. Bu kaotik zaman serisi analiz yöntemiyle önce sistemin kaotik olup olmadığına bakılır. Burada temel ölçü olarak fraktal boyut hesaplamaları ile Lyapunov üstellerin sonuçlarına bakılarak karar verilir. Günümüzde yapılan bir çok çalışmada ölçü olarak en büyük Lyapunov üstellerine bakılması giderek ağırlık kazanmaktadır. Diğer ölçüler bunu destekler nitelikte kullanılmaktadır. Çünkü Lyapunov üstelleri kaotik sistemin temel özelliği olan “başlangıç koşullarına hassas bağlılığı” niceliksel ifadesi olması; diğer yandan da q-istatistiğe geçişte kullanılması Lyapunov üstellerini bu çalışmada önemini daha da artırmıştır.

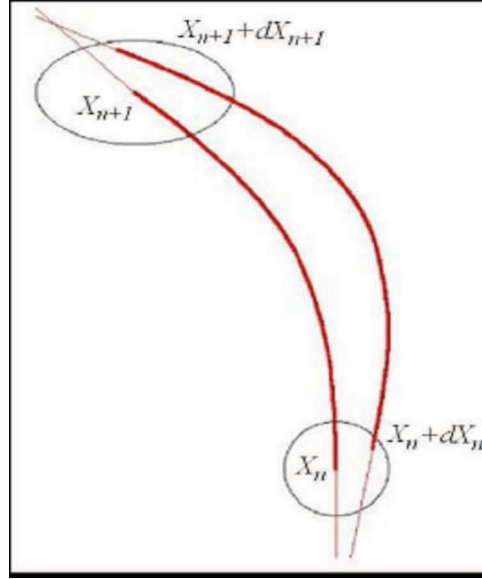
2.3. LYAPUNOV ÜSTELLERİ

Lyapunov üsseli, başlangıç değerlerine duyarlılığı ve tahmin edilemezliğin derecesini ölçmektedir. Bu nedenle Lyapunov üsselleri kaotik davranışın kanıtları olarak görülmektedir.

Lyapunov üstelleri, başlangıçta faz uzayında yan yana bulunan yörüngelerin ıraksama veya yakınsama hızını belirler. Genel olarak, m boyutlu bir faz uzayı m tane farklı Lyapunov üsteli ile tanımlanır. Her biri faz uzayının bir ana eksenindeki ıraksama-yakınsama ile ilgilidir. Bu üstellerden yalnızca bir tanesi bile sıfırdan büyük ise, sistem kaotik demektir. Kaotik bir sistemin herhangi iki yakın yörüngesi üstel olarak ıraksar. Zaman ilerlerken, sonuçta bütünüyle farklı faz uzayı bölgelerine giderler. Başlangıç koşullarındaki farklılıklara bu aşırı duyarlılık, kaosun başlıca işaretidir. Kaotik sistemleri öngörülemez yapan bu olgudur. Çok küçük bir farkın bile önemli olduğuna, geleceği bütünüyle değiştirebileceğine işaret eden bu olgu "kelebek etkisi" olarak da bilinir.

Faz uzayındaki yörüngeleri kararlı noktalardan oluşur, tüm noktalar tek yörünge üzerine düşer. Şayet Lyapunov üstellerinde birisi λ pozitif çıkarsa sistemiz kaotiktir; faz uzayındaki iki komşu eğri λ değerine bağlı oranında birbirinden ıraksar. [2,3 ve10]

Bu konuyu daha önce yapılmış lojistik harita üzerinde açarsak [1];



Şekil 2.4: Seçilen birbirine yakın iki ilk koşul ve evrimleri.

Başlangıçta birbirine ΔX_0 kadar yakın olan iki komşu nokta olsun. Bu noktaları sırasıyla X_0 ve $X_0 + \Delta X_0$ biçiminde temsil edilsin, bir tekrarlama sonra bu iki komşu nokta şekil 2.4'deki gibi ayrışır [1].

$$\Delta X_1 = f(X_0 + \Delta X_0) - f(X_0) \cong \Delta X_0 f'(X_0) \quad (2.1)$$

burada $f' = df/dX$ türevidir. X_0 noktasında uzaklaşmayı ifade eden Lyapunov üsteli λ tanımlanır. $e^\lambda = |\Delta X_1/\Delta X_0|$ veya

$$\lambda = \ln |\Delta X_1/\Delta X_0| \cong \ln |f'(X_0)| \quad (2.2)$$

biçiminde ifadelendirir. Yerel Lyapunov üsteli olarak isimlendirilen $|\Delta X_1/\Delta X_0|$ büyüklüğü $X-X_0$ 'daki gerilmeyi gösterir. Bu ifadenin mutlak değer içinde olması Lyapunov üstelinin pozitif olmasını temin eder [1].

Bir bütün olarak sistemin Lyapunov üsteli (2.3)'deki denklemin birçok tekrarlama sonraki ortalaması alınarak hesaplanır [1].

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \ln |f'(X_n)| \quad (2.3)$$

En büyük Lyapunov üstelinin hesaplanması, malzeme ve yöntemler bölümünde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.4. DEPREMLER

Deprem, yerküre içerisindeki volkanik aktiviteler veya yerkabuğunu oluşturan levhaların hareketi sonucu, levhaların eklemlendiği kırık düzlemlerinde biriken enerjinin aniden boşalması sonucunda meydana gelen yer değiştirme hareketinden kaynaklanan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yeryüzünü sarsması olayıdır [2].

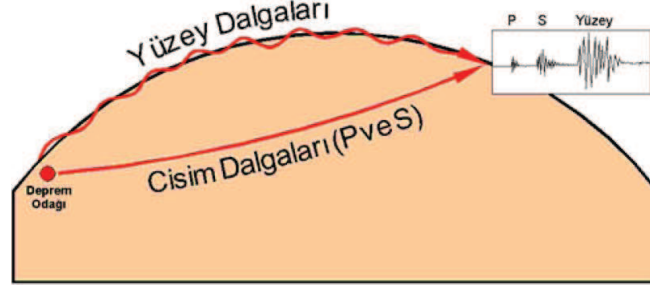
2.4.1. Depremlerin Oluş Nedenleri

Yerkabuğunu oluşturan levhaların hareketi sonucu olan depremler genellikle "Tektonik" depremler olarak nitelenir ve bu depremler çoğunlukla levha sınırlarında oluşurlar. Yeryüzünde olan depremlerin %90'ı bu gruba girer. Türkiye'de olan depremler de büyük çoğunlukla tektonik depremlerdir. İkinci tip depremler "Volkanik" depremlerdir. Bunlar volkanların püskürmesi sonucu oluşurlar. Yerin derinliklerinde ergimiş maddenin yeryüzüne çıkışı sırasındaki fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda oluşan gazların yapmış oldukları patlamalarla bu tür depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Bunlar da yanardağlarla ilgili olduklarından yereldirler. Japonya ve İtalya'da oluşan depremlerin bir kısmı bu gruba girmektedir. Türkiye'de aktif yanardağ olmadığı için bu tip depremler olmamaktadır.

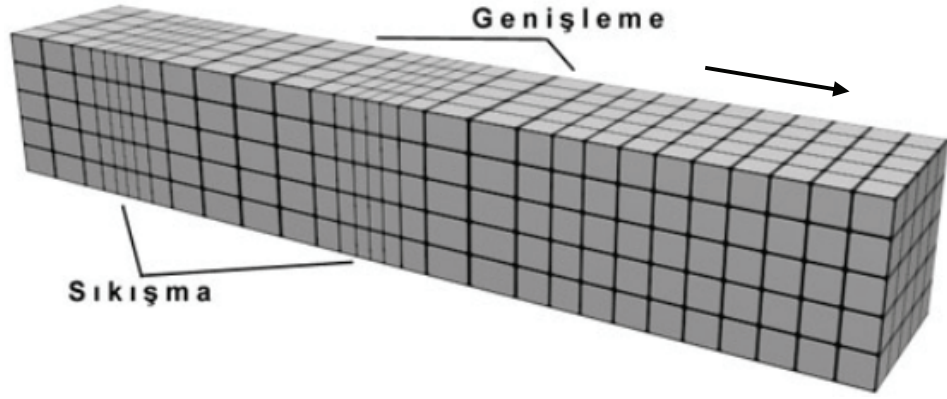
2.4.2. Deprem Dalgaları

Bir sismik dalga, en basit ifadeyle enerjinin yerin içinde bir noktadan diğer bir noktaya transfer olmasıdır. Deprem sırasında açığa çıkan enerji, ses veya su dalgalarına benzeyen ve sismik dalgalar adı verilen dalgalar ile yayılır. Bu dalgalardan Cisim Dalgaları, P dalgaları ve S dalgaları olarak ikiye ayrılır. P dalgaları, en hızlı yayılan bu yüzden deprem kayıt aletlerinde (sismograf) en önce görülen dalgalardır. P dalgaları boyuna dalgalardır. Daha yavaş yayılan S dalgaları, kayıt aletlerinde ikincil olarak

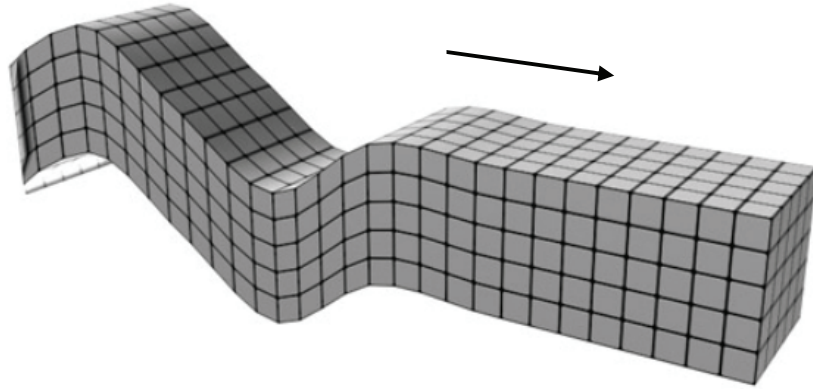
görülen enine dalgalarıdır. S dalgaları sıvı içinde yayılamazlar. Yüzey Dalgaları ise Cisim Dalgalarına göre daha yavaş yayılırlar ancak genlikleri daha büyüktür. Hızı daha fazla olan Love ve genliği daha büyük olan Rayleigh dalgaları olarak ikiye ayrılırlar. Yapılarda yıkıma yol açan dalgalar S dalgaları ile yüzey dalgalarıdır (Şekil 71).



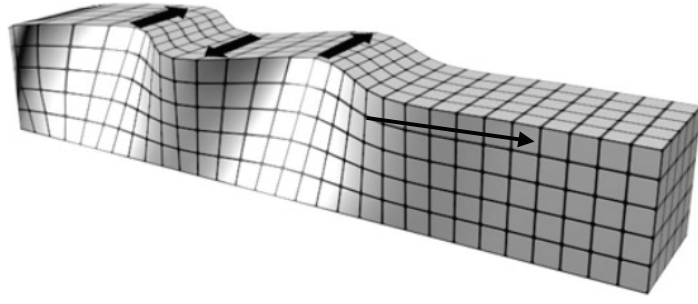
Şekil 2.5: Yer içinde hareket eden sismik dalgalar.[21]



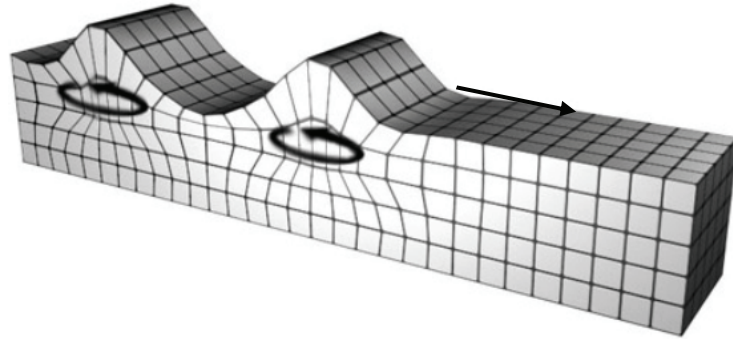
Şekil 2.6: Bir cisim dalgası olan P dalgasının ilerlemesi.[21]



Şekil 2.7: Bir cisim dalgası olan S dalgasının ilerlemesi.[21]



Şekil 2.8: Bir yüzey dalgası olan Love dalgasının ilerlemesi.[21]



Şekil 2.9: Bir yüzey dalgası olan Rayleigh dalgasının ilerlemesi.[21]

Depremlerin büyüklüğü (magnitude) ve şiddeti (İntensity) genellikle birbirine karıştırılan İki kavramdır. Büyüklük, deprem sırasında boşalan enerji İle İlişkili bir değerdir ve aletsel olarak ölçülür. Şiddet ise deprem bölgesindeki hasara göre belirlenen göreceli bir değerdir. Büyüklük, deprem kayıt aletlerinde kaydedilen dalga genliğinin logaritmasını İçeren bir bağıntı sonucunda, Charles Richter'in geliştirdiği ve Richter Ölçeği denilen bir cetvele göre hesaplanır. Logaritmik olduğu için büyüklükteki 1 birim artış, yer hareketlerinde 10 katlık fark yapmaktadır. Günümüzde birkaç değişik büyüklük hesabı yapılmaktadır.

ML - Lokal Büyüklük: Richter'in orijinal bağıntısına göre hesaplanır. Sığ, yakın ve küçük depremler için kullanılır.

Mb - Cisim Dalgası Büyüklüğü: P dalgalarının genliği baz alınarak hesaplanır.

Ms- Yüzey Dalgası Büyüklüğü: Yüzey dalgalarının genliği baz alınarak hesaplanır.

Md - Süre Büyüklüğü: Çok küçük ve yakın depremlerin süresi kullanılarak hesaplanır.

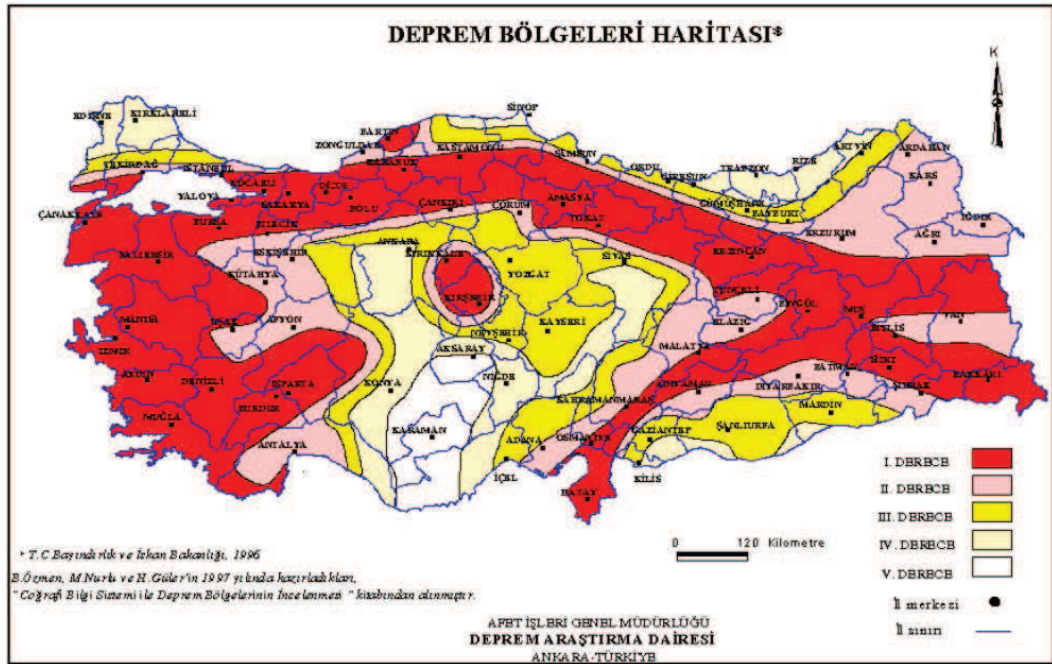
Mw - Moment Büyüklüğü: Açığa çıkan enerjinin sismik momenti baz alınarak hesaplanır.

Van depreminden sonra Türkiye ve Türkiye dışı merkezlerden alınan büyüklük değerlerinin farklı olmasının nedenlerinin başında bu hesaplama farklılıktan geliyor. Büyüklük belirtilirken hesaplama türü de belirtilirse karışıklık ortadan kalkacaktır.

2.4.3. Türkiyede'ki Deprem Kuşakları

20. yy'ın başlarından beri yapılan istatistiği çalışmalar Türkiye'de yaklaşık olarak her iki yılda bir yıkıcı deprem, her üç yılda bir de pek çok yıkıcı deprem olduğunu göstermektedir.

Bu dünyanın Türkiye'de kaçınılmaz bir doğal afet olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılması gereken en önemli önlem depremin özelliklerini çok iyi tanıyıp gerekli tedbirleri zamanında almaktır. Ülkemizde başlıca deprem kuşakları şekilde görülmektedir.



Şekil 2.10: Türkiye deprem kuşakları haritası.[21]

3. MALZEME VE YÖNTEM

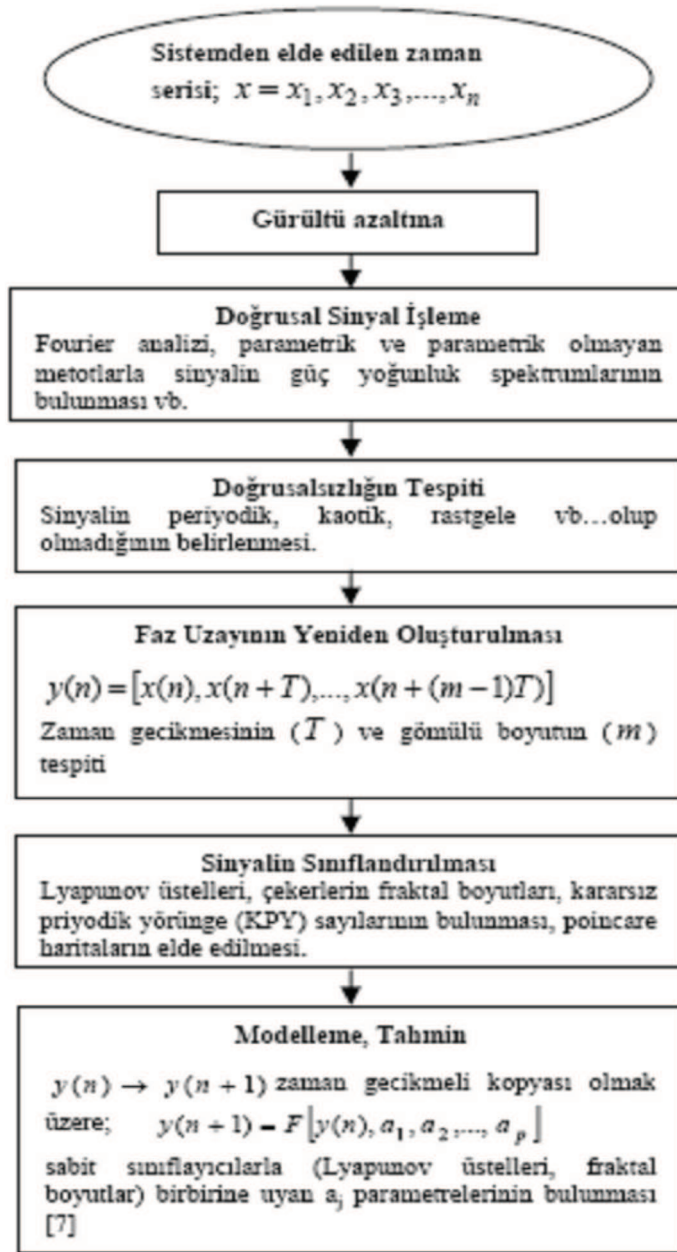
3.1. KAOTİK ZAMAN SERİSİNİN ANALİZİ

İncelemeye alınan bir dinamik sistemin zamanla değişime uğrayan herhangi bir büyüklüğünde ölçümler alınarak zaman serisi oluşturulur. Elde edilen zaman serisine gürültünün karışmaması gerekir. Gürültü çevresel şartlardan veya ölçüm cihazların kusurlu olmasından kaynaklanabilir. Datalara gürültü karışırsa doğru sonuçlar elde etmemizi engeller. Dinamik sistemlerden dataların çekme aşamasında buna büyük özen gösterilmesi gerekir [2,3,11].

Dinamik sistemlerde ölçüm cihazlarıyla çekilecek datalar düzenli olarak skaler veri olarak kayıt altına alınır. Sakaler ölçüm $x(t_0 + nr_s) = x(n)$ tarzında bir zaman serisi oluşturulur. Burada t_0 başlangıç zamanında ilk ölçüm alınır. İkinci ölçüm cihazda ayarlanan sabit bir zaman aralığından (r_s) sonra alınır. Bu tarzda bu seri devam ettirilerek ölçümler alınır. Mümkün oldukça çok data toplamamız gerekiyor. Bu tekniğin temel bir özelliği de çok data üzerinde çalışılmasıdır [2,3,12].

Oluşturulan zaman serisinin analizi yaptıktan sonra, bu dataların alındığı dinamik sistem için modelleme oluşturulmaya çalışılır. Ancak modelleme çalışması oldukça zor bir iştir. Bunun için ilk önce “başlangıç koşullarına hassas duyarlılığın” niceliksel ifadesi olan Lyapunov üstellerine bakılır. Eğer Lyapunov üstellerinde birisi sıfır çıkmışsa incelenen sistemin dinamikleri belirlemek için türevsel denklemler oluşturulabilir. Burada oluşturulacak türevsel denklemler sistemi daha iyi tanımamıza yardımcı olacaktır [2,3,12].

Kaotik zaman serisinin analiz yöntemi için takip edilecek yolları şekil 3.1’de şema biçiminde gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Kaotik zaman serisinin analizine ait işlemler [22]

3.2. FAZ UZAYININ YENİDEN KURULMASI

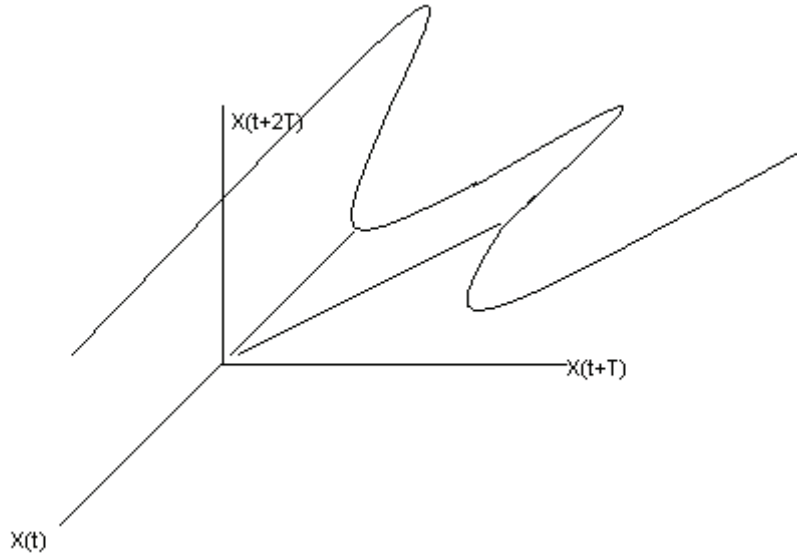
Dinamik bir sistemi incelerken değişkenlerden sadece birisi esas alarak analiz yapıldığı için; bu dataların nasıl bir davranış gösterdiğini görebilmek yada resmini çekebilmek için faz uzayını yenide yapılandırmamız gerekir. Yoksa tek başına oluşturulmuş bir zaman serisi bir şey ifade etmez. Bunun işlenmesi gerekir.

Faz uzayını yeniden şekillendirmek için kullanılacak formül [2];

$$X(t) = \{ x(t), x(t+\tau), \dots, x[t+(m-1)\tau] \} \quad (3.1)$$

Burada faz uzayını yeniden oluşturmak için zaman gecikmesini (τ) ve yerleştirme boyutunun (m) tespit edilmesi gerekiyor.

Şekil 3.2'deki yerleştirme boyutu ($m=3$) üç olan bir sistemin tek değişkeni için faz uzayının yeniden yapılandırılması temsili olarak görünüyor [2].



Şekil 3.2: X(t) zaman serisini kullanarak faz uzayının yeniden kurulması.

3.3. ZAMAN GECİKMESİNİN BELİRLENMESİ

Kaotik zaman serisinin analizine başlarken ilk yaptığımız işlem τ gecikme zamanını belirlemektir. Çünkü incelenen zaman serisini faz uzayında yeniden yapılandırmak için yerleştirme boyutuyla (m) birlikte bize gerekli olan ikinci kriterdir. Onun için τ gecikme zamanı doğru seçilmesi gerekiyor. Gecikme zamanını (τ) olduğundan büyük ya da küçük seçersek faz uzayını doğru yapılandıramayız. Gecikme zamanı bulmak için otokorelasyon fonksiyonunda ya da karşılıklı bilgi fonksiyonunda faydalanır.

Otokorelasyon fonksiyonu iki seri arasındaki lineer bağımlılığı ölçer. $X(t)$ gibi seçilen bir zaman serisine τ gecikme zamanı eklemesiyle bulunacak olan $X(t+\tau)$ serisi de lineer bağımlılığı bozmayacak tarzda bir değer alınması gerekiyor. Gecikme zamanı bulmada kullanılan teknik ise; otokorelasyon fonksiyon grafiğinde sıfırın ilk kestiği nokta gecikme zamanı (τ) olarak alınır [2,3,7,13]:

$$a(\tau) = \frac{1}{T+1} \sum_{t=0}^T x_t x_{t+\tau} \quad (3.2)$$

Otokorelasyon fonksiyonu sadece lineer bağımlılığı ölçer. Bunun için hem lineer hem de lineer olmayan bağımlılığı ölçen karşılıklı bilgi fonksiyonu geliştiriliyor. Karşılıklı bilgi fonksiyonunda ilk minimize olan nokta τ gecikme zamanı olarak kullanılır. Bu iki fonksiyon birbirini denetlemek içinde kullanılır [5,14].

Karşılıklı bilgi fonksiyonunda τ gecikme zamanı aşağıdaki ifadeyle bulunur [7]:

$$I(\tau) = \sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j P_{h,k}(\tau) \ln P_{h,k}(\tau) - 2 \sum_{h=1}^j P_h \ln P_h \quad (3.3)$$

P_h = h numaralı kapta bulunma olasılığı

P_k = k numaralı kapta bulunma olasılığı

P_{hk} = X_t nin h numaralı kapta ve $X_{t+\tau}$ nun k numaralı kapta bulunma ortak olasılığıdır.

3.4. YERLEŞTİRME BOYUTUNUN BELİRLENMESİ

Yerleştirme boyutu, zaman serisi için çizilecek çekeri doğru görebilmek için faz uzayının kaç boyutta oluşturması gerektiğini söyler. Analizini yaptığımız zaman serileri tek değişkenliğin verileridir. Burada bulacağımız yerleştirme boyutu (m) aynı zamanda analizini yaptığımız değişkeni etkileyen temel ana faktörlerin sayısının ne kadar olduğunu bize söylüyor. Örneğin yerleştirme boyutunu (m= 4) dört bulduk, bu incelediğimiz sistemin dört temel dinamik değişkenden oluştuğunu söyler. Diğer

yandan sistem için hesaplanacak Lyapunov üstellerin sayısını da yerleştirme boyut sayısı (m) belirler. Yani m boyutlu bir sistemin m tane Lyapunov üsteli olur.

Yerleştirme boyutunun bulunmasında “yanlış en yakın komşu yöntemi” kullanılır. Bunun için R_i hesaplanması yapılır [7,15].

$$R_i = \frac{|x_{t+mr} - x_{t+mr}|}{\|\vec{p}(i) - \vec{p}(t)\|} \quad (3.4)$$

Burada $\vec{p}(t)$ seçilen bir noktayı temsil ederken, $\vec{p}(i)$ 'de onun yakın komşusudur. Buradaki R_i bir eşik değerindedir. R_i den büyük olan her nokta yanlış komşuluk olarak alınır. Hesaplanan yanlış komşuluk noktalarının oranı sıfır ya da çok küçük bir değere ulaştığında yerleştirme boyutunu bulmuş oluruz [2,3,7,15].

3.5. ÇEKER BOYUTU HESAPLAMALARI

Fraktal boyut kavramı Mandelbrot [16] tarafından geliştirilmiş. Kaotik sistem çekerleri fraktal (kesirli) boyuta sahiptirler. Onun için fraktal boyut hesaplamaları sistemin kaotik olabileceğine ilişkin bir kriter olarak alınmaktadır.

Fraktal boyut hesaplamasında korelasyon boyutuna bakılır. Burada genellikle Grassberger – Procaccia algoritması kullanılır [17]. Korelasyon integrali [3];

$$C(\varepsilon) = \lim_{K \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{K^2} \sum_{i,j=1}^K H(\varepsilon - |z_i - z_j|) \right] \quad (3.5)$$

H = birim adım fonksiyonu (Heaviside fonksiyonu)

Z = ε yarıçapı içinde kalan noktaları sayar.

$C(\varepsilon) = \varepsilon$ içindeki noktaların ortalama kesiri

Korelasyon boyutu aşağıdaki ifadeyle hesaplanır:

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (3.6)$$

Burada $\ln C(\varepsilon) - \ln \varepsilon$ grafiğinde seçilecek doğru ölçekleme bölgesinin eğimi bize fraktal boyutunu verir. Bu ölçekleme bölgesi grafikte seçilirken lineer olmasına dikkat edilir.

3.6. EN BÜYÜK LYAPUNOV ÜSTELİNİN HESAPLANMASI

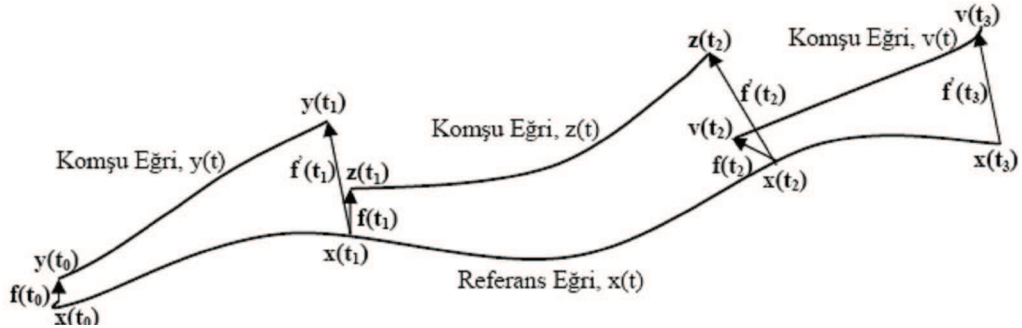
Lyapunov üstelleri hesaplanırken genellikle en büyük Lyapunov üsteline bakılır. En büyük Lyapunov üsteli sıfırdan büyük çıkıyorsa sistemiz kaotiktir. Sıfırın altında bir değer alıyorsa sistemiz kaotik değildir. En büyük Lyapunov üsteline bakarak sistemin kaotik derecesini görmüş oluruz. Bu derecelendirme sistemin başlangıç koşullarına olan duyarlılığın da bir ölçütü oluyor. Diğer yandan incelenen sistem için q-istatistiği yapıp yapılmayacağını yine en büyük Lyapunov üsteline bakılarak karar verilir.

En büyük Lyapunov üstellinin hesaplanmasında genellikle Wolf algoritması kullanılır [18]. Önce $X(t_0)$ gibi bir referans noktası seçilir. Sonra bu referans noktasına en yakın $Y(t_0)$ komşusu alınır. Bu iki nokta arasındaki öklit farkı bulunur [3]:

$$f(t_0) = \|x(t_0) - y(t_0)\|. \quad (3.7)$$

$f(t_1)$ farkı da aynı tarzda bulunur. Bu işlem şekil 3.3'deki gibi devam ettirilir. Bulunan bu öklit farklarının birbirlerine oranı $\{f(t_1)/f(t_0), f(t_2)/f(t_1), \dots\}$ gibi her bir nokta çifti arasındaki genişleme durumunu da ifade eder. Sonra bulunan bu genişlemenin logaritması alınır. Bu işlem N defa tekrarlandığından en büyük Lyapunov üsteli aşağıdaki formülle hesaplanır [3,18];

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{i=1}^N \log \frac{f'(t_i)}{f(t_{i-1})}. \quad (3.8)$$



Şekil 3.3: Lyapunov üstelinin hesaplanması [3].

Kaotik zaman serisi analiz yöntemiyle çeşitli dinamik sistemler için elde edilmiş sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir [3]:

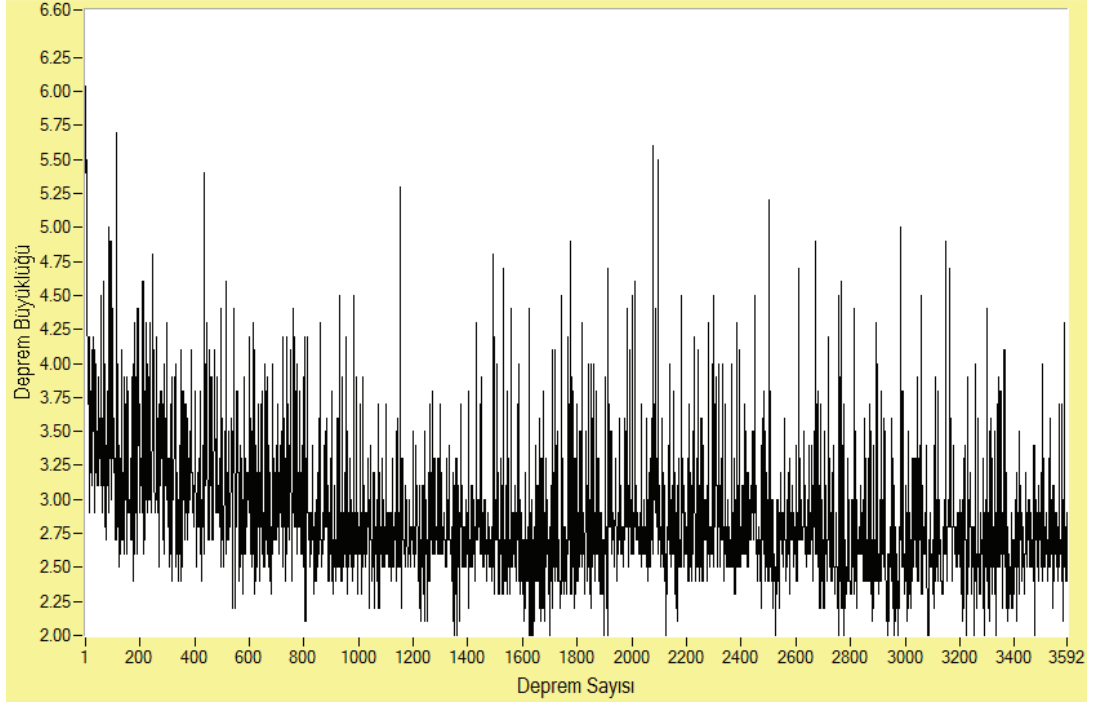
	Zaman gecikmesi (T)	Boyut (m)	Lyapunov Üstelleri ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)	Lyapunov Boyutu (D ₁)	İlinti Boyutu (D ₂)
Van Der Pol Osilatör $G=5, b=3, w=1.788$ [1 0 0]	1	3	0.30382, -8,9262e ⁻¹⁷ , -2.3666	2.1284	1.5146
Rössler Denklemleri $a=0.2, b=0.2, c=5.7$ [-9 0 0]	10	3	0.0732, 0, -5.4824	2.0133	1.7827
Lorenz Denklemleri $\sigma=16; b=4; r=45.92$ [1 1 1]	10	3	1.512, 0, -21.334	2.070	2.0054
Normal Sinüs Ritmi [*]	2	7	0.0424, -0.0032, -0.0260, -0.0630	3.0818	1.783
Ventriküler Fibrilasyon [*]	14	8	0.0250, 0.0109, 0.0035, -0.0020	6.5245	6.4031

Tablo 3.1: Çeşitli kaotik zaman serilerinin analizlerinde elde edilmiş sonuçlar [3]

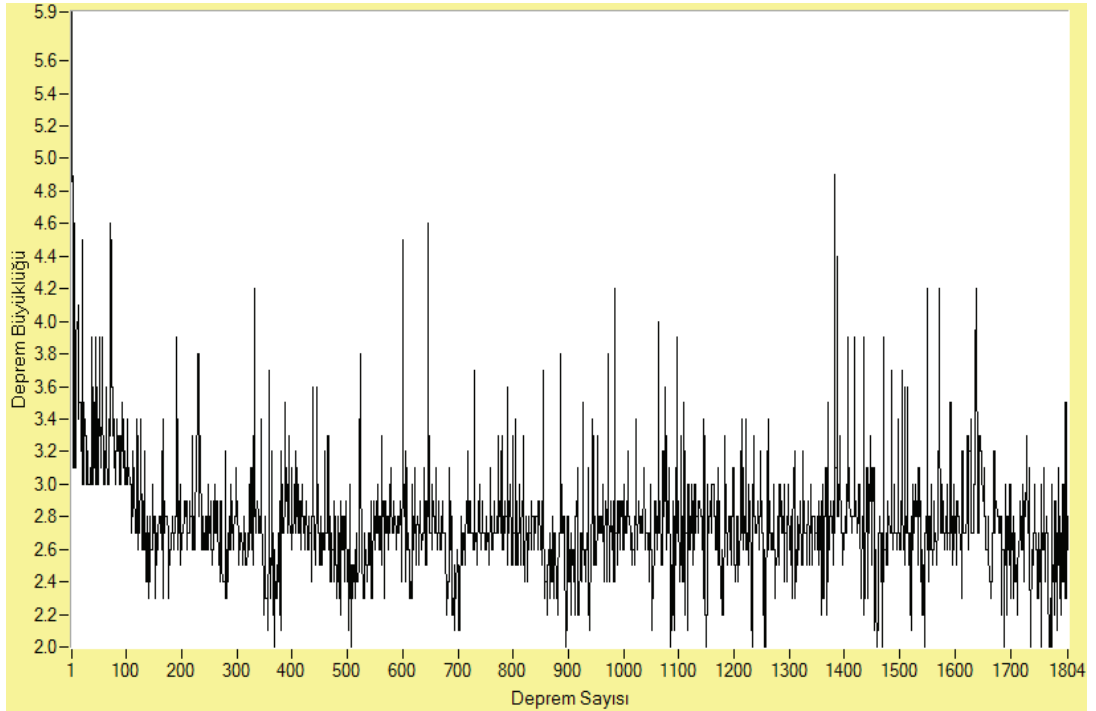
4. BULGULAR

Bu bölümde, 23/10/2011 tarihinde yerel saatle 13:41 de Van ili Erciş bölgesinde ve Kütahya ili Simav bölgesinde büyüklüğü kandilli kayıtlarına göre 6.6 olan deprem ve sonrasındaki iki ay içinde meydana gelen yaklaşık 3592 artçı depremin deprem büyüklükleriyle oluşturulmuş zaman serisinin analizini ve Merkez üssü Kütahya ili Simav bölgesinde olan 19/03/2011 tarihinde 23:15 de kandilli kayıtlarına göre büyüklüğü 5.9 olarak tespit edilen ve sonrasındaki iki ay boyunca büyüklüğü 2 den fazla olarak tespit edilen 1804 artçı sarsıntının büyüklük verileri kullanılarak oluşturulmuş zaman serilerinin analizlerini “Nonlinear Dynamics Toolbox (NDT)” ve “Visual Recurrence Analysis (VRA)” adlı bilgisayar programları yardımıyla yapacağız ve her iki depremin Lyapunov üstellerini hesaplayacağız.

Üç aylık süreçte Erciş ve Simav depremleri sonrasında kaydedilen deprem büyüklüklerinin oluş sırasına göre sıralı değişimleri veren dalga formundaki grafikler NDT bilgisayar programıyla çizilerek Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de görülmektedir.

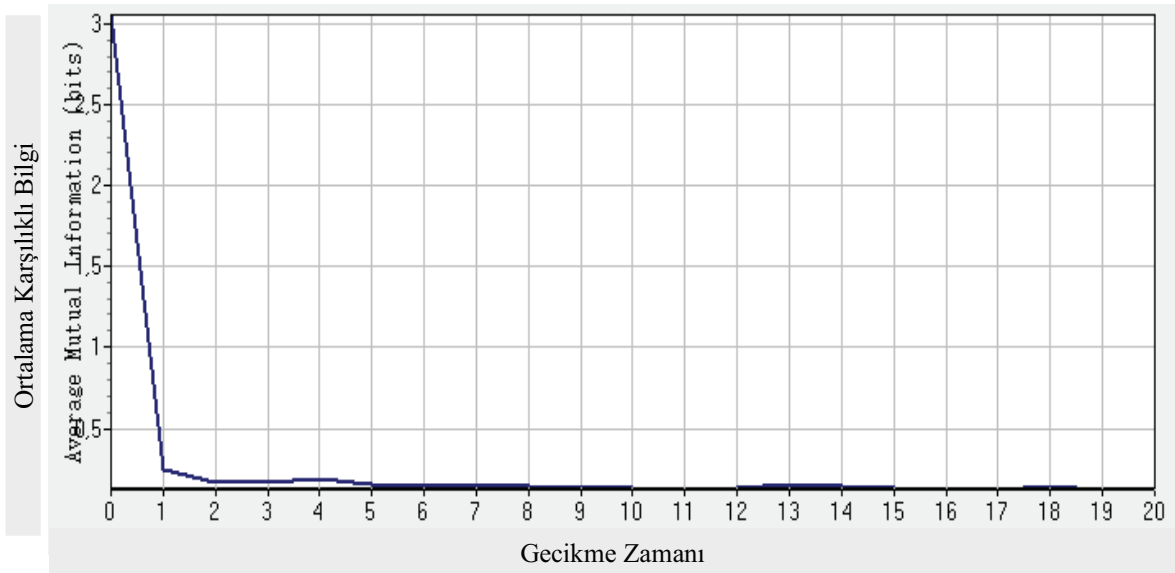


Şekil 4.1: Kandilli kayıtlarına göre Van depremi ve sonrasında iki aylık süreçte meydana gelen deprem ve büyüklüklerini gösteren grafik. (23-10-2011)

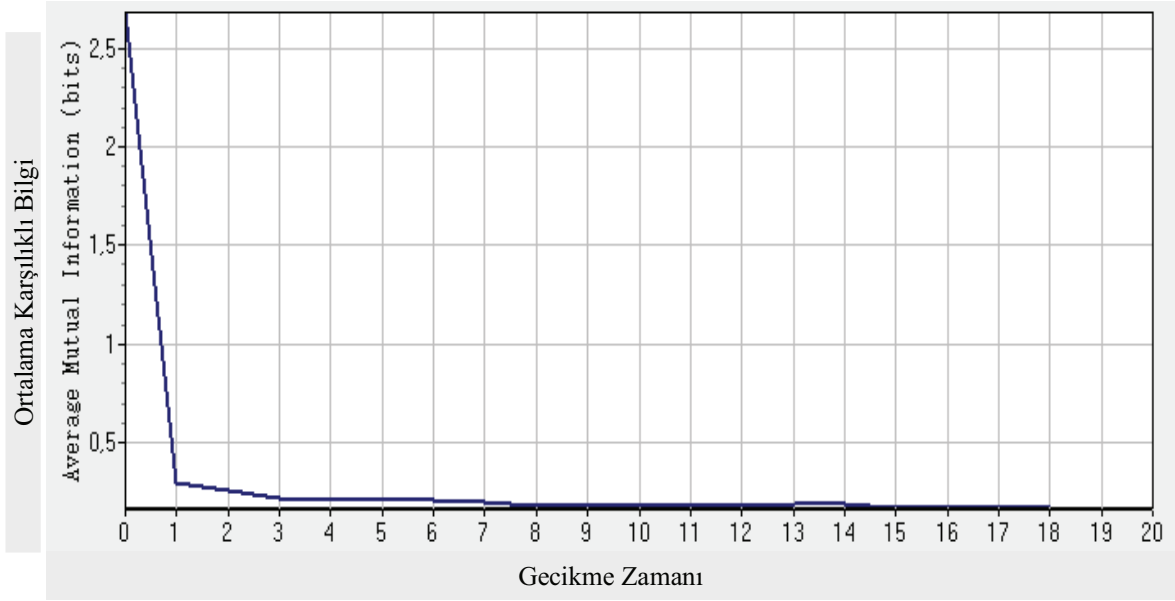


Şekil 4.2: Kandilli kayıtlarına göre Simav depremi ve sonrasında iki aylık süreçte meydana gelen deprem ve büyüklüklerini gösteren grafik. (19-05-2011)

Zamanla değeri değişen bir değişkenin kaotik analizi için ilk basamaklardan birisi genellikle sistemin davranışının faz uzayındaki görünümünün elde edilmesidir. Bir dizi karmaşık hesap gerektiren bu süreç, bilgisayarlar yardımıyla bugün kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bu grafikler dikkatle incelediğimizde periyodik bir salınım yapmadıkları ve salınım içerisinde kırınımların olduğu görülmektedir. Bu bize sistemin kaotik olabileceğinin ipuçlarını vermektedir. Kaotikliğı tespit etmek adına deprem büyüklükleriyle oluşturulmuş zaman serilerinin analizini yapabilmek için gerekli olan en önemli parametre “gömme boyutu” (embedding dimension: m) denen parametredir. Gömme boyutu, sistemin davranışlarını etkileyen bağımsız dinamik kaynakların sayısını tahmin eden bir hesaplama ve böylece incelenen sistemin davranışının en iyi biçimde görsel hale getirilebilmesi için kaç boyutlu bir faz uzayına ihtiyaç olduğu bu şekilde hesaplanır. Görsel tutarlılık açısından üç boyuttan daha büyük gömme boyutları pek tercih edilmese de bazı karmaşık kaotik sistemlerde çok daha büyük boyutlu faz uzaylarına ihtiyaç duyulabilmektedir. Gereken bir diğer parametre de “zaman gecikmesi” (time delay: τ) parametresidir. Bu hesaplama sonucunda, zaman serisinin hangi zaman aralıklarında geciktirilerek grafiğe dökülmesi gerektiği hesaplanır.

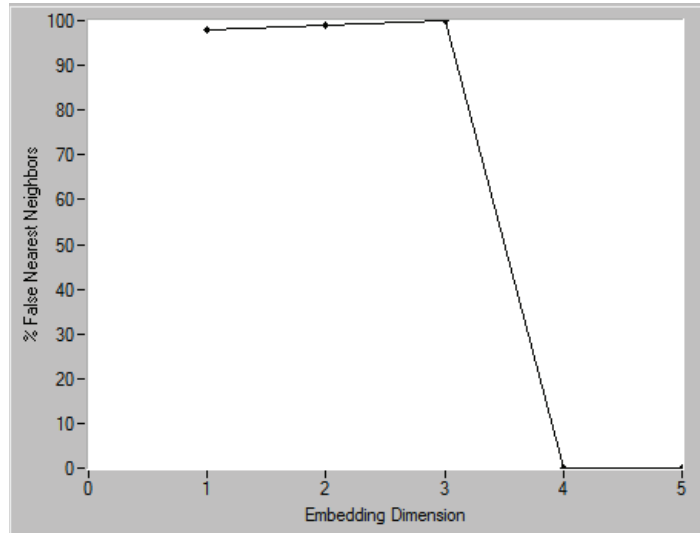


Şekil 4.3: $\tau = 3$; Karşılıklı bilgi fonksiyonu yöntemi ile Van deprem verisi için bulunan gecikme zamanı.



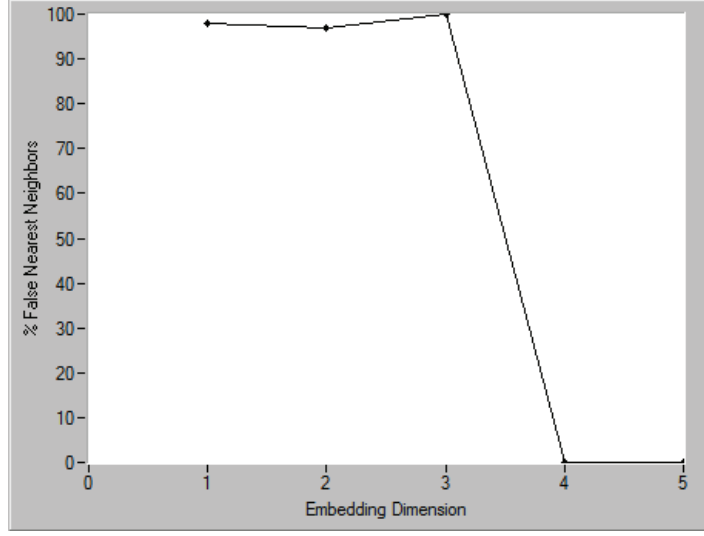
Şekil 4.4: $\tau = 4$; Karşılıklı bilgi fonksiyonu yöntemi ile Simav depremi verisi için bulunan gecikme zamanı.

Yerleştirme boyutu, en yakın yanlış komşuluk yöntemi kullanarak NDT programıyla hesaplanmıştır, grafiğin sıfıra çakıldığı nokta yerleştirme boyutu verir.



Şekil 4.5: $m=4$; En Yakın Yanlış Komşuluk yöntemi ile Van deprem büyüklük verisi için hesaplanan yerleştirme boyutu.

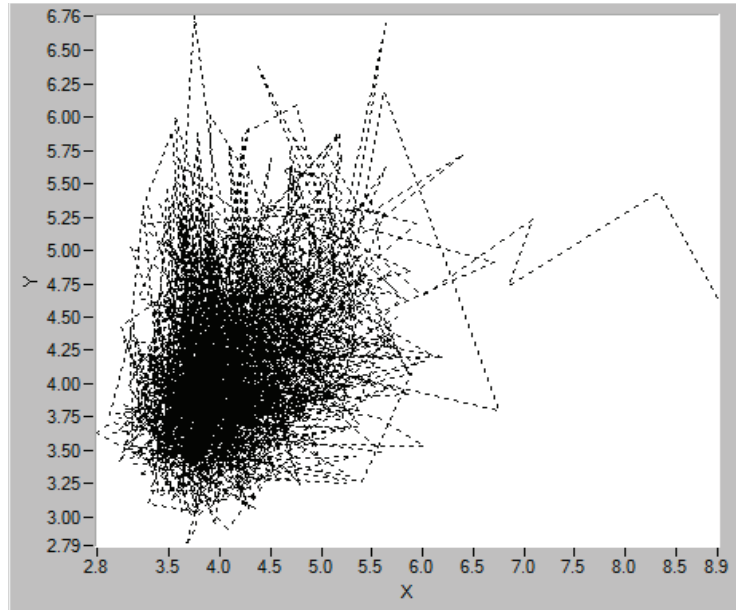
Simav depremi için aynı yöntemi kullanarak yerleştirme boyutu NDT programıyla Şekil 4.6 da hesaplanmıştır.



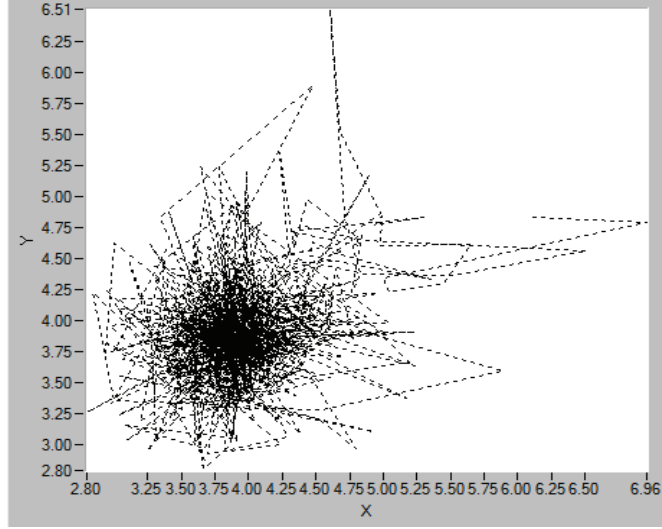
Şekil 4.6: $m=4$; En Yakın Yanlış Komşuluk yöntemi ile Simav deprem büyüklük verisi için hesaplanan yerleştirme boyutu

Van deprem büyüklükleriyle elde edilen zaman serisinin analizinde gecikme zamanı $\tau = 3$, yerleştirme boyutu $m = 4$ olarak bulundu. Bu değerler girilerek çizilen çeker şekil 4.7’de görülmektedir.

Simav deprem büyüklükleriyle elde edilen zaman serisinin analizinde gecikme zamanı $\tau = 4$, yerleştirme boyutu $m = 4$ olarak bulundu. Bu değerler girilerek çizilen çeker şekil 4.8’de görülmektedir.



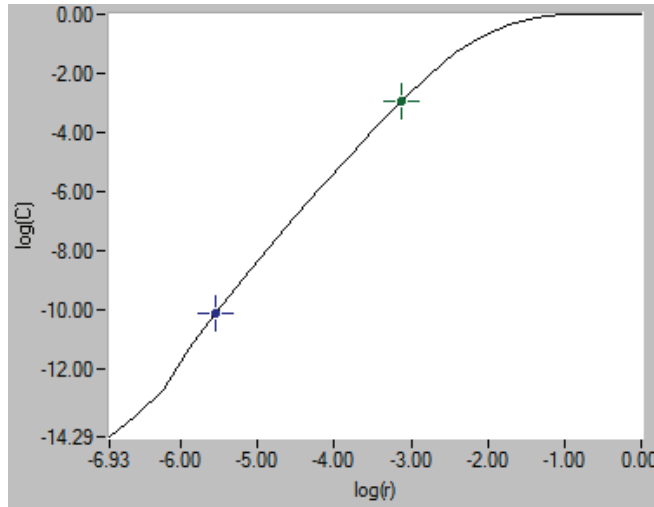
Şekil 4.7: Van deprem büyüklük verisinden elde edilen çeker.



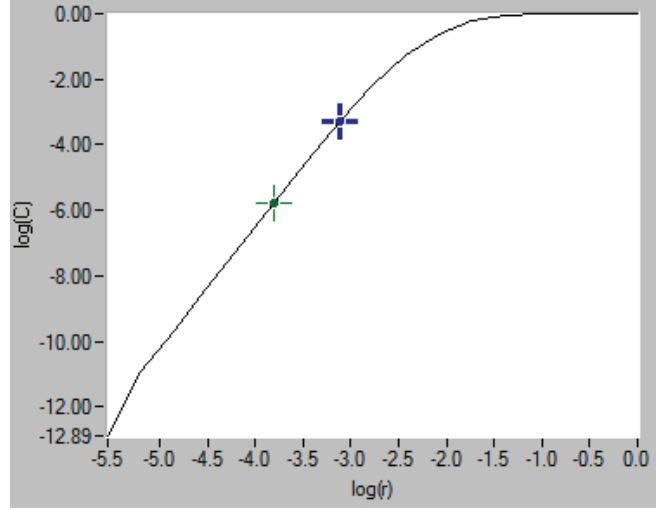
Şekil 4.8: Simav deprem büyüklük verisinden elde edilen çeker.

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi çekerler depremlerin kaotik olduğu kadar otonom olduğunu da gösteriyor. Sistemin kaotik olma durumundan emin olmamız için çekerlerin fraktal bir boyuta sahip olması ve Lyapunov üstellerinde en az bir tanesinin pozitif bir değerde olması gerekir.

Çekerlerin boyutları için $\log(C)$ - $\log(r)$ grafiğinde seçilen ölçekleme bölgesinin eğimi alınarak ilişim boyutları hesaplandı. Seçilen ölçekleme bölgesinin lineer olmasına dikkat edildi. Çekerlerin boyutlarının tam sayı olmaması, çekerlerin fraktal geometriye sahip olduğunu gösteriyor. Çekerlerin boyut hesaplamaları şekil 4.9 ve şekil 4.10'da verilmektedir.

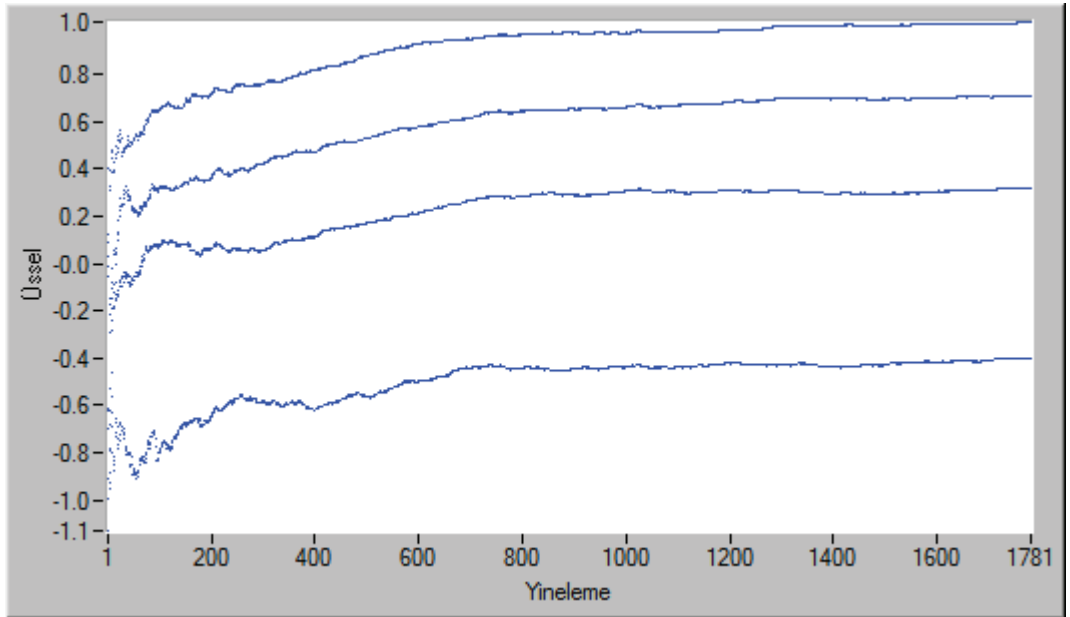


Şekil 4.9: Van deprem verisinden elde edilen çekerin boyutu: 0.256



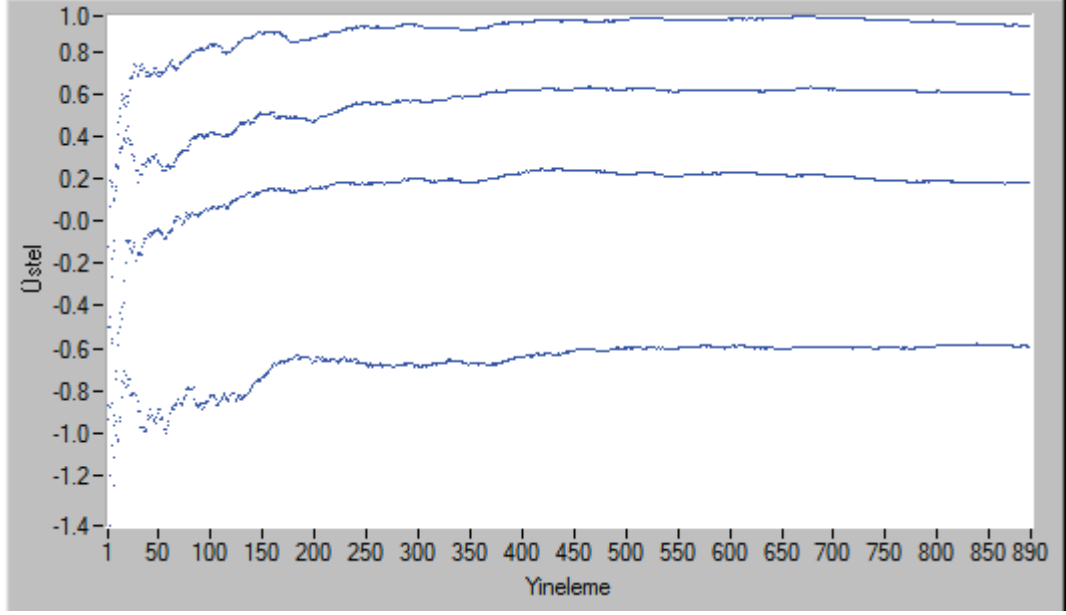
Şekil 4.10: Simav deprem verisinden elde edilen çekerin boyutu: 0.097

Sistemler sahip oldukları yerleşirme boyutları kadar Lyapunov üstellerine sahiptir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de hesaplanan Lyapunov üstelleri verilmektedir.



Şekil 4.11: Van deprem verisinden elde edilen Lyapunov üstelleri:

$$\lambda_1 = 1.020827 \quad \lambda_2 = 0.708169 \quad \lambda_3 = -0.320457 \quad \lambda_4 = -0.398677$$



Şekil 4.12: Simav deprem verisinden elde edilen Lyapunov üstelleri:

$$\lambda_1 = 0.924237 \quad \lambda_2 = 0.599482 \quad \lambda_3 = 0.179276 \quad \lambda_4 = -0.596369$$

Bulunan bu sonuçlardan Lyapunov üstellerinde en azında birisinin pozitif çıkması Depremlerin kaotik olduğunu gösteriyor. En büyük Lyapunov üsteli aynı zamanda kaotik sistemin en temel özelliği olan “başlangıç koşullarına hassas bağlılığın” niceliksel bir değerini ifade etmektedir.

Deprem büyüklük verileriyle oluşturulan zaman serilerinin analizinde kullanılan tüm parametreleri daha iyi değerlendirebilmek için bir tablo halinde verebiliriz. Tablo 4.1

Olay	Zaman Gecikmesi (τ)	Boyut (m)	Lyapunov Üstelleri ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)	Fraktal Boyut (D_c)
Van Depremi	3	4	1.020827 0.708169 0.320457 -0.398677	0.256
Simav Depremi	4	4	0.924237 0.599482 0.179276 -0.596369	0.097

Tablo 4.1: Van ve Simav deprem büyüklük verilerinden elde edilen zaman serilerin analizi ile ulaşılan toplu sonuçları

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Genel kısımlar bölümünde; Dinamik sistemlerin karakterize edilmesi ve zaman serilerinden determinizmin belirlenmesi konusu teorik olarak anlatıldı.

Malzeme ve Yöntemler bölümünde; Kaotik zaman serisi analiz yöntemi aktarıldı. Faz uzayını yeniden yapılandırmak için gerekli parametrelerden yerleştirme boyutu ile ' τ ' gecikme zamanı hakkında bilgi verildi. Yerleştirme boyutu değerini bulmak için kullanılan 'en yakın yanlış komşuluklar yöntemi' ile ' τ ' gecikme zamanı değerini bulmak için kullanılan 'otokorelasyon fonksiyonu' ve 'karşılıklı bilgi fonksiyonu' hakkında bilgi verildi. Bu parametrelere dayanarak çeker çizilecek sistemlerin kaotik olup olmadığını belirlemede kullanılan fraktal boyut (krolasyon boyutu) ile kaotik sistemlerin en önemli özelliği olan 'başlangıç koşullarına hassas duyarlılık' ölçüsünü veren Lyapunov üstellerinin hesaplama yöntemleri anlatıldı.

Tez Çalışmasının Bulgular bölümünde ise; Van ve Simav deprem büyüklükleri ile oluşturulmuş zaman serilerinin grafikleri çizildi. Daha sonra bu zaman serileri için yerleştirme boyutları (m) ile gecikme zamanları (τ) bulundu. Bu parametreleri kullanarak sistemin çeker çizildi. Arkasında çekerin fraktal boyutu ile Lyapunov üstelleri hesaplandı. Bütün bu grafik çizimleri ile hesaplamalar NDT "Nonlinear Dynamics Toolbox" bilgisayar programı aracılığıyla yapıldı.

Hesapladığımız Lyapunov üstellerine bakarak sistemin kaotik karakteri hakkında şunlar söylenebilir. Şekil 4.11'de gördüğümüz gibi Van depreminden elde edilen dört üsselden Tablo 4.1'de verilen en büyük Lyapunov üstelinin (λ_1) değerlerinin 1.020827 değerinde olması ve Simav'ın aynı (λ_1) verisinin 0,924237 olarak sifira daha yakın çıkması ve yine fraktal değer olarak da Simav'ın daha düşük değerinde olması yani Van depremine kıyasla Simav depreminin ilk koşullara zayıf duyarlı (zayıf kaotik) bir karakterde olması anlamına gelir.

Hatırlanacağı gibi Malzeme ve Yöntem Bölümünde sistemin başlangıç koşullarına hassas duyarlılığının bir ölçüsünü veren Lyapunov üstellerinden birisi sıfır veya sifira çok yakın ise dinamikleri belirlemek için türevsel denklemler düzenlenebileceğini görmüştük. Bu sonuçlar da bize Simav gibi daha az kaotik depremlerde benzer mekanik ve simülasyon modelleri için türevsel denklem sistemleri oluşturabileceğini

göstermektedir. Bu denklemler, sistemin sonlu bir zaman uzayındaki gösteriminden daha kesin olduğu bilinmektedir. Şayet bu gibi kestirimi çok zor olacak deprem gibi dinamik sistemlerin türevsel denklemleri oluşturulsa sistemim dinamiklerini de belirlemiş oluruz. Bu da yapılacak mekanik modellerle veya bilgisayarlarda yapılacak simülasyon modellerle pratikte deprem sonrasındaki aktivite en azından kestirilmiş olur.

Depremleri hazırlayan sürecin, yerkabuğunda yüzyıllarca süren sismik aktivite olduğu bilindiğine göre, Türkiye için sağlıklı kayıtların başladığı 1971 yılından sonra gerçekleşen depremlerin büyüklüklerinden oluşturulmuş zaman serilerinin bu süreci temsil etmesi bu bakımdan zordur. Dolayısıyla, daha başarılı kestirimlerin yapılabilmesi için uzun süreli, sağlıklı kayıtların yapılması gerekir.

Belirli bir bölgede gerçekleşen depremlerin büyüklüklerinden oluşan zaman serisi yerine, belirli bir fayın üzerinde gerçekleşen depremlere ait büyüklük değerleri ile oluşan zaman serisi daha yüksek seviyede bir nedensellik içerecektir. Bu da nedensellik bağlamında kestirimin değerini arttıracaktır. Ancak bunun için zaman serisinin uzun olması ve minimum anomali içermesi gerekmektedir. Bu da çok uzun süreli kaydedilmiş gürültü içermeyen sağlıklı kayıtlara bağlıdır.

Fay bazlı verilerle elde edilen Lyapunov üstellerine bakarak karşılaştırmalı olarak her deprem büyüklük verisi için değerlendirmeler yapılabilir. Örneğin sadece bir fayın ürettiği büyüklük değerleri kullanılarak zamansal evrimde sistemdeki Lyapunov üstellerindeki değişimine bakılabilir. Burada fayın zaman içindeki deprem üretme aktivitesi ve yeni bir depremi tetikleme üzerindeki olumlu-olumsuz etkileri belirlenebilir. Belki de büyük deprem üretmiş bir fayın uzun süreli zamansal evriminin çıkarılması ve oluşturulacak zaman serilerinin nonlinear analiziyle deprem kestirimine yeni bir bakış açısı kazandırılabilir. Deprem sistemlerde belli zaman aralıklarla alınan datalarda oluşturulmuş zaman serilerinin Lyapunov üstellerindeki değişimlerini gözlemleyerek daha sağlıklı kestirim yöntemlerin geliştirilmesine önayak olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] KOÇAK, K., (1996), Kaotik davranış kriteri olarak fraktal boyut değişimi ve dinamik sistemlere uygulanması, Tez (Doktora), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [2] YILMAZ, D. ve GÜLER,N.F, (2006), Kaotik Zaman Serisinin Analizi Üzerine Bir Araştırma, Gazi Üniversitesi Müh. Fak. Dergisi
- [3] TIRNAKLI, U., (2007), Kaos Geçiş Eşiğindeki Dinamik Sistemler, ITAP-IARS Ders Notları
- [4] ZEREN, T., ÖZBEK, M., EKERBİÇER, N. ve AKDENİZ, K.G., (2003), An Observation on the Rat Pneumocardiogram with Nonlinear Structure , Turkish Journal of Biochemistry, 28 (3),194.
- [5] AKILLI, M., 2009, —*Lyapunov Üstelleri ve Q-istatistikl*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi
- [6] YALÇIN, G.Ç. ve AKDENİZ K.G., (2007), Lyapunov Exponents and Chaotic CLDW Physiological System , International Congress Nonlinear Dynamical Analysis, June 2007, Saint Petersburg.
- [7] UZEL, S., (2008), Zaman Serisi Analizi Yöntemi üzerine Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] Bu konuda Türkçe bir kaynak için bakınız: GLEICK, J., (1995), Kaos, TÜBİTAK Yayınları, 15, Ankara.
- [9] AKDENİZ,G., (2007), 7 Hariç, Everest Yayınları, İstanbul
- [10] ECKMANN,J.P. ve RUELLE, D., “Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors”, Reviews of Modern Physics, Cilt 57, No 3, 617-656, 1985.
- [11] YAMAMOTO, Y., “Detection of Chaos and Fractals from Experimental Time Series”, Modern Techniques in Neuroscience Research, Editör: Windhorst, U, ve H. Johansson, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 669-687, 1999.
- [12] ABARBANEL, H.D.I., BROWN, R., SIDORWICH J.J. ve Tsimring L.S., “The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems”, Reviews of Modern Physics, Cilt 65, No 4, 1331-1392, 1993.
- [13] BUZUG, T., PFISTER,G., (1992), Optimal delay time and embedding dimension for delay-time coordinates by analysis of the global static and local dynamical behavior of strange attractors, Physical Review A, 45(10), 7073-7084.

- [14] FRASTER, A.M., SWINNEY, H.L.,(1986), Independent coordinates for strange attractors from mutual information, *Physical Review A*, 33(2), 1134-1140
- [15] KENNEL, M.B., BROWN, R. ve ABARBANEL H.D.I., (1992), "Determining Embedding Dimension for Phase-Space Reconstruction Using a Geometric Construction", *Physical Review A*, 45: 3403—3411.
- [16] MANDELBROT, B.B., (1982), *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman, New York.
- [17] GRASBERGER, P. ve PROCACCIA, I., (1983), "Characterization of Strange Attractors", *Phys. Rev. Lett.*, 50: 346.
- [18] 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.
- [19] HILBORN, R.C., 2003 (second edition), *Chaos and Nonlinear Dynamics*, Oxford University Press, New York, 650 p.
- [20] STEWART, L, (1989), *Does God Play Dice: The New Mathematics of Chaos*, Penguin Books.
- [21] http://www.sayisalgrafik.com.tr/deprem/tr_frames.htm [Ziyaret Tarihi:10.02.2012, Saat : 14:20]
- [22] <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/> [Ziyaret Tarihi: 10.02.2012, Saat: 16:30]

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğdu. 1994 yılında Kartal Samandıra Lisesinden ve 1998 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik lisans programından mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Fizik Alanında Yüksek Lisansa başladı. Askerlik ve evlilik sebebiyle eğitimine bir süre ara verdi.. En son yapılan eğitim affi kapsamında geri dönerek 2011 yılında tekrar tez aşamasında kaydını yaptırdı. 1999–2011 yılları arasındaki süreçte, çeşitli dersane ve özel okullarda çalıştı, halen Özel Asfa Fen liselerinde Fizik Öğretmeni Olarak Görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.