



EGE ÜNİVERSİTESİ



DOKTORA TEZİ

DOĞAL VE YAPAY ZAMAN SERİLERİNDE
KARMAŞIKLIK VE ZAMAN SERİSİ
ANALİZİ

İbrahim ÖZKEN

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur TIRNAKLI

Fizik Anabilim Dalı
Sunuş Tarihi : 12.01.2018

Bornova - İZMİR

2018

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

DOĞAL VE YAPAY ZAMAN SERİLERİNDE
KARMAŞIKLIK VE ZAMAN SERİSİ
ANALİZİ

İbrahim ÖZKEN

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur TIRNAKLI

Fizik Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 12.01.2018

Bornova - İZMİR

2018

İbrahim ÖZKEN tarafından doktora tezi olarak sunulan "*Doğal ve Yapay Zaman Serilerinde Karmaşıklık ve Zaman Serisi Analizi*" başlıklı bu çalışma Ege Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12 Ocak 2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

İmza

Jüri Başkanı	: Doç. Dr. Gül Gulpınar	
Raportör Üye	: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Gökçe	
Üye	: Prof. Dr. Uğur Tırnaklı	
Üye	: Doç. Dr. Haydar Ucu	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Şirin	

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Doğal ve Yapay Zaman Serilerinde Karmaşıklık ve Zaman Serisi Analizi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12.01.2018

İbrahim ÖZKEN

ÖZET

DOĞAL ve YAPAY ZAMAN SERİLERİNDE KARMAŞIKLIK
VE ZAMAN SERİSİ ANALİZİ

ÖZKEN, İbrahim

Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur TIRNAKLI

Ocak 2018 , 55 sayfa

Bu tezde, eşit zaman aralığında örneklemeye sahip olmayan karmaşık yapıdaki doğal sistemlerin analizlerini gerçekleştirebilmek adına iki yöntem literatüre kazandırılmıştır. Bu yöntemler kullanılarak yapılan yineleme grafiği analizleri ile paleoiklim verilerinin analizleri gerçekleştirilerek geçmişte meydana gelen sıra dışı iklim olayları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tezin ilk kısmında ortaya atılan metrik uzaklık yaklaşımı ile Çin’de yer alan Dayu Mağarası’ndan elde edilen oksijen izotop oranlarının yineleme grafiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda literatürde var olan sıra dışı iklim olayları istatistiksel olarak doğrulanmış ve yeni sıra dışı olayların varlığı ortaya atılmıştır.

Tezin ikinci kısmında yer alan Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi yöntemi, eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerini, eşit zaman aralıklı hale getirmektedir. Bu yöntem kullanılarak Endonezya’da bulunan Secret Mağarası’ndan elde edilen oksijen izotop oranlarının yineleme grafiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda literatürde bulunan olaylar istatistiksel olarak tespit edilmiş ve yeni olaylar öngörülmüştür. Diğer bir çalışmada ise aynı analizler Avustralya’da yer alan KNI-51 ve Çin’de yer alan Dongge mağaraları için tekrarlanmıştır. Bu iki bölge için literatürde yer alan olaylar %90 oranında tespit edilmiştir. Ayrıca Kuzey yarım küreden elde edilen ve solar aktivite ile ilgili olan karbon izotop oranları ile söz konusu iki bölgenin determinizm niceliği sonuçlarının arasında yapılan çapraz korelasyon hesabı sonucunda, iki bölgenin muson rejimlerinin anti faza sahip olduğu ve güneşin pozisyonunun buna sebep olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler : Doğal zaman serisi analizi, yineleme grafiği analiz yöntemi, rejim geçişleri ve sıra dışı olaylar.

ABSTRACT

COMPLEXITY AND TIME SERIES ANALYSES OF NATURAL AND SYNTHETIC TIME SERIES

ÖZKEN, İbrahim

PhD in Physics

Supervisor : Prof. Dr. Uğur TIRNAKLI

January 2018, 55 pages

In this thesis, two methods have been proposed to literature for analysing natural complex systems which have non equally sampled time series and recurrence plot analyses of paleoclimate records have been done to detect extreme climate events at past by using these methods.

By using metric distance approach which is explained in the first part of the thesis, recurrence plot analyses of oxygen isotope rate time series which are obtained from Secret Cave at China have been done. Results of the analyses show that the known events in the literature are statistically detected and some new events are suggested.

Transformation Cost Time Series method which is explained at the second part of the thesis, transform a non-equally sampled time series to equally sampled time series by using the interval dynamics of system. By using this method, recurrence plot analyses of the oxygen isotope rate time series obtained from Secret Cave in Indonesia have been done. The recurrence plot analyses resulted in the statistically detection of events existed in the literature and new events were predicted statistically. At another study, same analyses has been applied to two time series for same case obtained from KNI-51 Cave in Australia and Dongge Cave in China. The %90 of events in the literature have been reproduced by using this method. Therefore, we analysed the carbon isotope rate data related with solar activity in the Northern Hemisphere using determinism in time series, then we compared this result with the results obtained from KNI- 51 and Dongge caves. The correlation of these events revealed that there is an anti-phase monsoon regime between two regions and this situation is related with position of Sun

Keywords : Natural time Series Analyses, Recurrence Plot, Regime Transitions, Extreme Events.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince değerli bilgi ve görüşlerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Uğur Tırnaklı'ya, doktoramın ilk üç senesinde danışmanlığımı yapan Doç. Dr. Barış Bağcı'ya, tez izleme ve savunma jürilerinde bulunan değerli öğretim üyelerine, 2214/A kapsamında bir yıl boyunca Potsdam Institute for Climate Impact Research'de araştırma yapmam için maddi destek veren TÜBİTAK'a, Almanya'da bulunduğum süre boyunca değerli görüş ve fikirlerini esirgemeyen Prof. Dr. Jurgen Kurths ve Dr. Norbert Marwan'a ve 2015FEN028 nolu projemize destek veren Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Dekanlığı'na teşekkür ederim.

Doktora tezim ve Almanya'da bulunduğum süre boyunca hem bilimsel hem de manavi desteğiyle yanımda olan arkadaşım Dr. Deniz Eroğlu'na, çalışma hayatımda desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ahmet Çelikoğlu'na ve çalışma arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca hem maddi hem de manavi desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen babam Bilal Özken ve annem Mühibe Özken'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca doktora tezim sırasında anlayış ve desteğiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Betül Gürsoy Özken'e sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
1 GİRİŞ	1
2 DOĞRUSAL OLMAYAN HAREKET VE YİNELEME GRAFİĞİ ANALİZ YÖNTEMİ	5
2.1 Doğrusal Olmayan Hareket	5
2.2 Yineleme Grafiği Analiz Yöntemi	7
2.2.1 Faz uzayındaki yörüngeler ve yineleme	8
2.2.2 Yineleme grafiği sayısal nicelikleri	9
3 METRİK UZAKLIK	13
3.1 Tanım	14
3.2 Büyüklüğe Sahip Veriler için Metrik Uzaklık	17
3.2.1 Uygulama	20
4 DÖNÜŞÜM MALİYET ZAMAN SERİSİ YÖNTEMİ	33
4.1 Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi Yöntemi	33
4.1.1 Uygulama	34
5 SONUÇ VE TARTIŞMA	47
KAYNAKLAR DİZİNİ	50
ÖZGEÇMİŞ	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1 Farklı yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri; (a) Periyodik, (b) Kaotik ve (c) Stokastik yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri	9
3.1 S_a veri grubunun S_b veri grubuna dönüştürülmesinin gösterimi. S_a S_b ye $S_1, S_2, \dots, S_7(S_b)$ olmak üzere toplam yedi adımda dönüştürülmüştür. Minimum maliyet ile dönüşüm yapılabilmesi için spikelar kaydırılmış, silinmiş ve eklenmiştir.	15
3.2 Logistik map için yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği sonuçları: (a) Logistik map için λ Lyapunov Üsteli, (b) Ham ve rastgele veri silinmiş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları, (c) Ham ve gürültü eklenerek rastgele veri silinmiş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim geçişlerini göstermektedir.	22
3.3 Rössler salınıcısından elde edilen veriler. (a) Sürekli zaman serisinden y bileşeninden alınan maksimum noktalar ($\tilde{y}$); (b) Maksimum noktalar ile elde edilen zaman serisi; (c) Çarpıklık seviyesi $s = 0.3$; (d) $s = 2.0$ ile zaman bakımından gama dağılımına uydurulan zaman serisi; (e) farklı çarpıklık seviyeleri için zaman serilerinin karşılaştırılması	25
3.4 Rössler salınıcısı için yineleme grafiği analizi: (a) λ Lyapunov üsteli, (b) ham zaman serisi ve $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 çarpıklık değerleri ile zaman bakımından gama dağılımına uydurulmuş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim geçişlerini göstermektedir.	26
3.5 Dayu Mağarası'nın Coğrafik Konumu	28
3.6 (a) Dayu Mağarası'ndan kaydedilmiş $\delta^{18}O$ izotop oranları; (b) $\delta^{18}O$ izotop oranlarından hesaplanan determinizm niceliği sonuçları. Gölge bölge güven aralığını, dikey kesikli çizgiler bilinen kuraklık rejimini göstermektedir.	29

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil	Sayfa
4.1 Logistik map için determinizm niceliği sonuçları: (a) Logistik map için Lyapunov üsteli; (b) Çeşitli oranlarla veri silinmiş zaman serilerinden elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları; (c) Hem çeşit oranda veri silinmiş hem de belirli seviyelerde gürültü eklenmiş serilerden elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim değişikliği olan parametre değerlerini göstermektedir.	36
4.2 r parametre değeri 3.5 (periyodik durum, siyah çizgi) ve 4.0 (kaotik durum, kırmızı çizgi) için gürültü seviyesi $\gamma = \%10$ ile gürültü eklenmiş durumların determinizm niceliği karşılaştırması.	37
4.3 Rössler salıncısı için determinizm niceliği sonuçları; (a) Rössler salıncısı için Lyapunov üsteli, (b) Dönüşüm maliyet zaman serisi için hesaplanan determinizm niceliği sonuçları	38
4.4 (a) Secret Mağarası'ndan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopları verileri, (b) Determinizm niceliği sonuçları	41
4.5 KNI-51 ve Dongge Mağaralarının Coğrafik Konumları	42
4.6 KNI-51 ve Dongge mağaralarından elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen ve Kuzey yarım küreden elde edilen $\Delta^{14}C$ karbon izotop oranlarının zaman serileri. KNI-51 ve Dongge mağaraları için dönüşüm maliyet zaman serileri	43
4.7 (a) (kırmızı) KNI-51 ve (b) (yeşil) Dongge Mağarası'nın dönüşüm maliyet serisi için determinizm niceliği sonuçları. Grafiklerin üstlerinde yer alan mavi ve sarı bantlar önceki çalışmalarda ve bu çalışmada yağışın çok ve az olduğu durumları ifade etmektedir. (Siyah) $\Delta^{14}C$ 'ün determinizm niceliği sonuçlarını vermektedir. $\Delta^{14}C$ zaman serisinin determinizm niceliği sonuçları ile KNI-51 ve Dongge Mağarası zaman serilerinin determinizm niceliği sonuçları arasındaki çapraz korelasyon sırasıyla $r = -0.32$ ve $r = 0.29$ dur.	44

1. GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan itibaren çevresinde gerçekleşen olayları anlamaya çalışmıştır. Bu amaç uğruna, yüzlerce belki de binlerce yıl boyunca ilgili sistem hakkında gözlemler yapmışlar ve sonuçlarla ilişkilendirmeye çalışmıştır. Örneğin yerleşik hayata geçmeden önce, avlanma ihtiyaçlarını karşılayabilmek için hayvanların göç ettikleri bölgeleri gözlemleyerek tespit etmişlerdir. Göç yollarını gözlemlerle tespit eden insanoğlu, bu sefer ne zaman sorusuna yanıt bulabilmek için göç zamanlarını hava olayları veya bitki örtülerinin değişimleri ile ilişkilendirerek gözlemlerine devam etmişlerdir. Bu tarz sayısız örnekle, insanoğlunun gerek hayati ihtiyaçlardan gerek ilgisinden dolayı çevreyi tanımaya ve anlamaya yöneldiğini söyleyebiliriz. Yıllar boyunca süre gelen bu anlama ve tanıma isteği insanoğlu için bir alışkanlık haline gelmiştir. Bu istek yıllar geçtikçe farklı sistemleri anlamak için insanoğlunu teşvik etmiştir. Fizik biliminin doğuşu da bu doğrultuda olmuştur.

Bir fizikçinin nihai hedefi çevresindeki sistemlerin yapısını anlayarak gelecekte nasıl bir davranış sergileyeceğini öngörmektir. Bunun için de yukarıda bahsedildiği gibi gözlem yapmak en önemli unsurdur. Newton'nun hareket denklemlerini yazarken hiç gözlem yapmamış olması mümkün müdür? Ya da Archimedes suyun kaldırma kuvvetini bulurken bir anda mı aklına geldi? Bu soruların cevabı açık bir şekilde hayırdır. Tabi ki tüm bilim insanları gibi onlar da belirli gözlemler yaparak hedeflerine ulaşmışlardır. İnsanoğlunun yapısını anlamak istediği sistemler yıllar geçtikçe farklılık gösterse de değişmeyen tek gerçek gözlem yapması gerektiğidir.

Özellikle kaos teorisinin ortaya çıkışı ile birlikte hava olayları, sismik hareketler, beyin hareketleri gibi karmaşık yapıya sahip birçok doğal sistem, insanoğlunun yeni ilgi alanı olmuştur. Bu tarz sistemlerin hareketlerini henüz Newton hareket denklemleri gibi denklemlerle ifade edememekteyiz. Bu alanda yapılan tüm çalışmaların nihai amacı bu doğrultudadır. Bunun için izlenen yol ise sistemin geçmişte yapmış olduğu hareketleri incelemekten yani gözlem yapmaktan geçmektedir. Karmaşık yapıya sahip olan sistemler hakkında yapılan gözlemler, ilgili sistemin zaman serisidir. Zaman serisi, sistem hakkındaki tüm bilgiyi içinde barındırmasına rağmen bu saklı olan bilgiyi ortaya çıkartmak kolay değildir. Bunun için zaman serisi analizleri yapılarak sistemin dinamiği anlaşılmasına çalışılır. Bu amaç uğruna özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte birçok doğrusal olmayan analiz yöntemi ortaya atılmıştır. Bu

analiz yöntemlerinin çoğu, sistemin yörüngelerinin faz uzayında yapmış oldukları hareketleri incelemek üzerine kuruludur (Packard et al., 1980).

Lyapunov üsteli sistemin yörüngelerinin birbirlerinden ayrılma hızını veren bir niceliktir ve sistemin dinamik yapısı hakkında en doğru bilgiyi vermektedir. Yörüngelerin birbirlerinden ani bir şekilde uzaklaşması, sistemin kaotik bir yapıya, aksi durumda ise sistemin periyodik yapıya sahip olduğu söylenmektedir. Ayrıca Lyapunov üstelinin sıfıra vurduğu değerler zaman serisi analizleri ile uğraşanlar için kritik bir öneme sahiptir. Bu değerler sistemde rejim geçişlerinin olduğunu göstermektedir (Hilborn C. R., 2000). Doğal zaman serisi analizlerinde sistemin rejim geçişlerinin tespiti, sistemde meydana gelen sıra dışı olaylara karşılık geldiğinden dolayı çok önemlidir. Fakat doğal sistemlerin Lyapunov üstelini hesaplamak mümkün değildir. Çünkü Lyapunov üstelini hesaplamak için sistemi ifade eden bir denkleme ihtiyaç duyulmaktadır.

Yineleme grafiği analiz yöntemi son on yılda oldukça fazla ilgi çeken zaman serisi analiz yöntemidir. Eckmann tarafından dinamik bir sistemin faz uzayındaki yinelemelerini görselleştirmek için ortaya atılmıştır (Eckmann et al., 1987). Bu yöntem yeteri kadar uzun olmayan zaman serilerinin analizi için çok elverişlidir (Marwan et al., 2007). Ayrıca yineleme grafiğinde meydana gelen köşegen yapıları dikkate alarak hesaplanan yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği, rejim geçişlerini tespit edebilmemiz için Lyapunov üsteli kadar elverişlidir (Trulla et al., 1996); (Marwan et al., 2007). Yineleme grafiği analiz yönteminde de sistemin yörüngelerinin faz uzayında yaptıkları hareketler incelenir. Bunun için yörüngeler arasındaki uzaklığın hesaplanması gerekmektedir. Literatürde uzaklık hesabı için kullanılan en yaygın yöntem Öklidyen uzaklıktır. Öklidyen uzaklığın hesaplanabilmesi için yörüngeleri oluşturan verilerin eşit zaman aralıklı olması gerekmektedir. Fakat karmaşık yapıya sahip; sismik hareketler, iklim olayları, beyin aktiviteleri gibi doğal sistemler yapılarından dolayı eşit zaman aralıklı değildirler. Bu tarz sistemlerin analizlerini gerçekleştirebilmek için literatürde yaygın olarak kullanılan yöntem interpolasyon yöntemidir. Bu yöntemle zaman serisindeki boşluklar, zaman serisinin dağılımından faydalanılarak doldurulur ve analizler gerçekleştirilir. Her ne kadar sistemin dağılımından faydalanılsa da, sisteme dışarıdan müdahale olduğu için zaman serisini bozmakta ve bilgi kaybına sebep olmaktadır (Rehfeld et al., 2011).

Bu tezde ilk olarak, zaman serisi analizlerinde karşılaşılan uzaklık problemi ele alınmıştır. Eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerinin yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek adına, Victor ve Purpura tarafından ortaya atılan ve Suzuki vd. tarafından geliştirilen metrik uzaklık in-

celenmiştir. Metrik uzaklık hesabı için gerekli olan parametrelerin seçimi için motivasyon sağlanmış ve dinamiği iyi bilinen yapay sistemlerin (Logistik map ve Rössler salıncısı) yineleme grafiği analizleri metrik uzaklık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapay sistemlerin Lyapunov üsteli ile tespit edilen rejim geçişleri, determinizm niceliği sonuçları ile karşılaştırılmış ve metrik uzaklığın çalışırılığı test edilmiştir. Doğal zaman serisi uygulaması için Çin’de yer alan Dayu Mağarası’ndan elde edilen paleoiklim verileri seçilmiş ve yineleme grafiği analizleri metrik uzaklık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonucu, literatürde var olan sıra dışı iklim olayları ile karşılaştırılmıştır.

Tezin diğer kısmında ise; Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi yöntemi ortaya atılmıştır. Bu yöntem, eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerini tamamen sistemin iç dinamiğinden faydalanılarak eşit zaman aralıklı hale getirmektedir (Ozken et al., 2015). Yöntemin çalışırılığı yapay sistemlerde test edildikten sonra eşit zaman aralığına sahip olmayan paleoiklim verileri üzerinde uygulanmıştır. Secret, KNI-51 ve Dongge mağaralarından elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranları yineleme grafiği analizleri sonucunda, literatürde yer alan sıra dışı iklim olayları tespit edilmiştir.



2. DOĞRUSAL OLMAYAN HAREKET VE YİNELEME GRAFİĞİ ANALİZ YÖNTEMİ

2.1 Doğrusal Olmayan Hareket

Zamanla birlikte değişime sahip olan sistemler dinamik sistemler olarak bilinirler ve bu tarz sistemler matematikte, geometrik bir uzaydaki bir noktanın zamana bağlılığını tanımlayan bir fonksiyon olarak gösterilirler. Dinamik sistemlerin, diferansiyel denklemler ve tekrarlama haritaları (iterated map) olmak üzere iki temel yapısı vardır. Diferansiyel denklemler sistemin zaman ile evrimini sürekli zamanda açıklarken, tekrarlama haritalarının zamanı kesikli yapıdadır. Özellikle klasik fizikte, sistemlerin zamanla değişimini göstermek için diferansiyel denklemler kullanılır. Bu sistemlerde başlangıç koşulları bilindiği takdirde, sistemin zamanla evrimini hesaplayabiliriz. Sistemin evrimini gösteren bu diferansiyel denklemler sayesinde sistemin doğrusal veya doğrusal olmadığını söyleyebiliriz. Bu olgu kaos çalışanlar için oldukça önemlidir. Çünkü herhangi bir sistemin kaotik bir yapıya sahip olması için doğrusal olmayan bir harekete sahip olması gerekmektedir (Hilborn C. R., 2000).

Doğrusal olmayan sistemleri daha iyi anlayabilmemiz için hem doğrusal olan hem de doğrusal olmayan farklı iki sistemi inceleyelim. Doğrusal bir sistem olan Newton'un ikinci yasasını ele alalım. Bu yasa bizlere m kütleli bir parçacığın, x eksen yönünde etki eden bir F_x kuvvetinin etkisiyle birlikte hareketini tanımlar.

$$F_x(x, t) = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1)$$

Şimdi ideal bir yaya uygulanan bir kuvvet ile elde edilen denkleme bakalım. İdeal yaya uygulanan kuvvet için verilen denklem;

$$F_x(x) = -kx \quad (2.2)$$

olarak verilmektedir. Burada k yay sabitidir. Denklem 2.1 ve 2.2'den faydalanarak, parçacığın konumunun zamanla değişimini;

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad (2.3)$$

denklemiyle ifade edebiliriz. Bu denklem x ve x 'in ikinci türevi (ivme) için doğrusaldır. Diğer bir değişle x teki herhangi bir değişiklik sistemin ivmesinde doğrusal bir etki yapmaktadır.

Doğrusal olmayan bir sisteme örnek vermek için x 'e olan bağıllığı daha karmaşık olan bir F_x kuvveti tanımlayalım. $F_x = bx^2$ olarak alalım ve Denklem 2.1'de yerine koyalım. Bu durumda;

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{b}{m}x^2 \quad (2.4)$$

olur. Bu denklemde ivme x 'in karesiyle değiştiği için doğrusal olmayan bir sistemi ifade etmektedir. Yani x konumundaki değişiklik sistemin ivmesine aynı oranda etki göstermemektedir. Sonuç olarak doğrusal olmayan sistemler, zamanla gelişim denklemleri doğrusal olmayan sistemlerdir.

Bu tarz doğrusal olmayan denklemlerde gerçekleşen ani ve çarpıcı değişiklikler, sistemin davranışını karmaşık hale getirebilirler. Bu karmaşık davranış kaos olarak adlandırılır ve sistemin periyodik davranış göstermediği ve rastgele davranışa benzemediği takdirde, sistemin kaotik olduğu söylenir. Kaos, aslında karmaşık yapıya sahip hareketleri tanımlamak için kullanılan bir kelimedir. Karmaşık yapıya sahip olan sistemlerde, başlangıç koşullarında yapılan çok küçük bir değişiklik bile hem sistemin yapısında hem de niceliğinin değerinde ani ve çarpıcı değişikliğe sebep olmaktadır. Bu tarz bir etkinin gerçekleşmesi için sistemin doğrusal olmaması gerekmektedir (Hilborn C. R., 2000).

Kaos teorisinin gelişimi, 1950'lerde yüksek hıza sahip bilgisayarların geliştirilmesiyle birlikte hız kazanmıştır. Bu gelişim daha önceden mümkün olmayan deneylerin yapılmasına ve bunun sonucu olarak doğrusal olmayan sistemler hakkında tahminlerde bulunmamıza olanak sağlamıştır. 1960'ların başlarında meteoroloji uzmanı olan Edward Lorentz'in yapmış olduğu matematiksel bir modelde kaos bilinçli bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Lorentz, deterministik periyodik olmayan dalgalanmaları gözlemlemesinin yanı sıra başlangıç koşullarına hassas bağıllığını keşfetmiştir. 1970'lerin ortalarında ise zoolog Robert May tarafından karmaşık bir yapıya sahip olan fakat basit bir ekolojik model olan Logistik map ortaya atılmıştır ve bu model kaos teorisi için önemli bir kilometre taşıdır. Bu basit modelde nüfus yoğunlunun artış hızı belirli bir parametreye bağlı olarak nasıl değişeceğini görebilmekteyiz.

Karmaşık yapıya sahip olan bir sistemin yapısını anlayabilmemiz için en doğru nicelik Lyapunov üstelidir. Lyapunov üsteli sistemin yörüngelerinin faz

uzayında birbirlerinden ayrılma hızını veren bir niceliktir ve

$$\delta(t=0) = \delta_0 = \|f(x_o + \epsilon)\|, \quad (2.5)$$

denklemleri aracılığı ile hesaplanır. Burada δ_0 , ($t=0$) başlangıç durumunda yörüngeler arasındaki uzaklık, ϵ ise çok küçük mesafedir. Eğer $t \rightarrow \infty$ limitinde yörüngeler birbirlerinden ani bir şekilde uzaklaşırsa sistemin kaotik yapıya sahip olduğu söylenir ve denklem üstel

$$\|\delta_t\| \sim e^{\lambda t} \|\delta_0\|, \quad (2.6)$$

halini alır. Burada λ Lyapunov üstelidir. Lyapunov üsteli $\lambda < 0$ ise sistemin periyodik yapıda, $\lambda > 0$ ise kaotik yapıda olduğu bilinmektedir. Lyapunov üstelinin sıfıra vurduğu noktalar ise zaman serisi analizlerinde çok fazla önem teşkil etmektedir. Bu noktalar sistemdeki rejim geçişlerine ve doğal sistemlerde sıra dışı olaylara karşılık gelmektedir. Lyapunov üsteli sistem hakkında en doğru bilgiyi vermesine rağmen çok fazla veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu doğal zaman serisi analizlerinde karşılaşılan en önemli zorluklardan bir tanesidir. Bu sorun bilim insanlarını yeni analiz yöntemleri bulmaya itmiştir. Yineleme grafiği analiz yöntemi bu yöntemlerden bir tanesidir ve fazla veriye gerek duymadan sistemdeki yinelemeleri göstermektedir. Bu yinelemelerden faydalanarak hesaplanan determinizm sayısal niceliği ise Lyapunov üsteli ile ilgili olup sistemdeki rejim geçişlerini tespit edebilmek için çok uygundur (Marwan et al., 2007).

2.2 Yineleme Grafiği Analiz Yöntemi

Yineleme grafiği (Recurrence Plot) ilk olarak 1987 yılında Eckmann tarafından dinamik bir sistemin faz uzayındaki yörüngelerinin yinelemelerini görselleştirmek için ortaya atılmış ve yirmi birinci yüzyılda bilim insanları tarafından yaygın bir şekilde çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda geliştirilen yineleme grafiği sayısal nicelikleri sayesinde doğrusal olmayan sistemlerin bir çok karakteristik özelliği anlaşılmıştır (Eckmann et al., 1987); (Marwan et al., 2007).

2.2.1 Faz uzayındaki yörüngeler ve yineleme

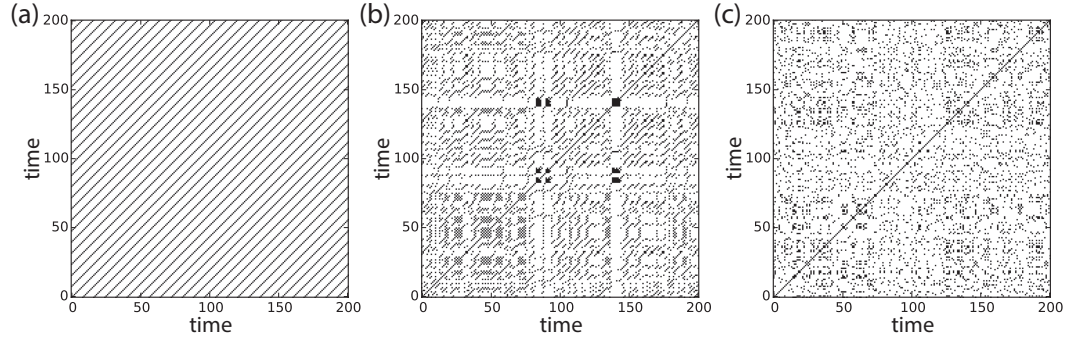
Yineleme grafiğinin temelinde yineleme matrisini oluşturmak vardır. Bu matrisi oluşturmak için ilgili sistemin yörüngelerinin faz uzayındaki hareketi incelenir. Herhangi bir sistemin faz uzayındaki yörüngelerini $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$ olarak ifade edelim. Böylece sistemin zamanla gelişimi bu vektörlerin serisiyle tanımlanabilir. Yineleme matrisinin temelinde, sistemin faz uzayındaki yörüngelerinin i . ve j . durumlarının karşılaştırılması yatmaktadır. Yineleme grafiği, dinamik bir sistemin faz uzayındaki yinelemelerini göstermek için çok elverişlidir ve temeli aşağıdaki matrise dayanır(Eckmann et al., 1987).

$$R_{i,j}(\epsilon) = \Theta(\epsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|) \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (2.7)$$

Burada N yörüngenin sayısını, $\Theta(\cdot)$ Heaviside fonksiyonu, $\|\cdot\|$ normu, ϵ ise belirli bir eşik değerini temsil etmektedir. Yörüngelerin i . ve j . durumları ϵ kadar küçük bir farkla faz uzayında aynı bölgeye düşerse, Heaviside fonksiyonun özelliği (eğer $x < 0$, $\Theta(x) = 0$, $x \geq 0$, $\Theta(x) = 1$) gereğince $R_{i,j} \equiv 1$, düşmezse $R_{i,j} \equiv 0$ olarak hesaplanır. Elde edilen yineleme matrisini grafiğe dökebilmek için $R_{i,j} = 1$ olduğu durumlarda siyah nokta, $R_{i,j} = 0$ olduğu durumlarda ise beyaz nokta konulmaktadır. Oluşturulan yineleme grafiğinde tanımdan dolayı $R_{i,i} \equiv 1 \mid_{i=1}^N$ olduğundan dolayı yineleme grafiğinde her zaman siyah ana köşegen meydana gelmektedir.

Farklı üç sistem için yineleme grafikleri Şekil 2.1’de verilmiştir. Periyodik hareket uzun ve kesilmeyen köşegen yapılara sahiptir ve bu köşegenler arasındaki dikey uzaklık salınımların periyotları ile ilgilidir. Bazı parametre değerleri için kaotik bir yapı gösteren Rössler sisteminde yine köşegen yapılar ortaya çıkmaktadır, fakat bu köşegen yapılar periyodik yapıdakine kıyasla daha kısa ve düzensizdir. Üçüncü olarak verilen yineleme grafiği ise stokastik bir sisteme aittir. Bu grafikte ise siyah noktaların tüm grafiği kapladığı ve rastgelelikten kaynaklı olarak herhangi bir köşegen yapı meydana getirmediği görülmektedir.

Yineleme matrisini oluştururken dikkat edilmesi gereken unsurlardan bir tanesi eşik uzaklık değerinin seçilmesidir. Genellikle literatürde ϵ yeteri kadar küçük uzaklığı simgelemektedir fakat yineleme grafiğini oluştururken eşik değerini çok küçük seçmek, yineleme grafiğinde herhangi bir yineleme noktası oluşmamasına sebep olabilir. Aksi durumda yani ϵ değeri gereğinden büyük seçilirse bu durumda yineleme grafiğinin hepsi siyah noktalardan oluşacaktır. Bahsedilen iki durumda da ilgilenilen sistemin dinamiği hakkında herhangi bir bilgi alamayız(Marwan et al., 2007).



Şekil 2.1: Farklı yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri; (a) Periyodik, (b) Kaotik ve (c) Stokastik yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri

Eşik değrinin ϵ seçilmesi için literatürde önerilen bir kaç yöntem mevcuttur. Bunlardan bir tanesi faz uzayındaki yörüngelerin en büyük çapının belirli bir yüzdesi alınarak seçilmesidir. Bu seçim için verilen sınır koşulu ise ortalama veya en büyük çap değerinin %10'undan fazla olmamasıdır (Koebe and Mayer-Kress, 1992); (Zbilut et al., 1992); (Mindlin and Gilmore, 1992). İkinci bir seçim kuralında ise; içinde gürültü bulunduran gerçek sistem verileri için, sistemin σ standart sapması kullanılmaktadır. Bu tarz sistemlerde eşik değerini standart hale getirmek için standart sapma kullanılır (Thiel et al., 2002). Üçüncü seçim kuralı ise oluşturulan yineleme grafiğindeki yineleme noktalarının yoğunluğunun kullanılmasıdır. Bu seçim kuralında, yineleme noktalarının belirli bir yüzdede olması için farklı ϵ değerleri kullanılarak yineleme grafiği elde edilir (Schinkel et al., 2008).

2.2.2 Yineleme grafiği sayısal nicelikleri

Bu bölümde oluşturulan yineleme grafiğindeki köşegen ve dikey (veya yatay) yapılarından faydalanılarak yineleme grafiği sayısal niceliklerinin hesaplanması anlatılacaktır. Yineleme grafiğinde oluşan bu yapılar sistemin dinamiği hakkında bilgi vermektedir. Yineleme grafiği sayısal nicelikleri üzerine yapılan çalışmalarda, dallanma noktalarını ve kaotik-periyodik (periyodik-koatik) geçişlerinin tespit edilebildiği gösterilmektedir (Trulla et al., 1996); (Webber and Zbilut, 1994); (Zbilut et al., 1992); (Marwan et al., 2002).

2.2.2.1 Yineleme yoğunluğu

Yineleme yoğunluğu, yineleme grafiğinde meydana gelen tüm noktaların yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Bu niceliği hesaplayabilmek için oluşturulan yineleme grafiğindeki noktaların, mümkün olan tüm yinelemelerin toplamına

bölünmesiyle elde edilir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi yineleme grafiği simetrik bir yapıya sahip olan kare matristir. İncelenen sistemin yörüngelerinin sayısı N ise bu durumda, matristeki toplam eleman sayısı $N \times N$ olur ve yineleme yoğunluğu

$$RR(\epsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\epsilon), \quad (2.8)$$

şeklinde verilir

2.2.2.2 Determinizm niceliği

Yineleme grafiğinde farklı yapıdaki sistemler için köşegen yapılarının nasıl değiştiğini Şekil 2.1’de görmekteyiz. Yineleme grafiğinde oluşan bu köşegen yapılardan faydalananarak sistemlerin karmaşıklık ölçümleri yapılabilmektedir. Bu köşegen yapıların uzunluklarının $P(\epsilon, l)$ dağılımı, dinamik bir sistemin yörüngelerinin birbirlerinden ayrılmasının bir ölçütüdür ve dolayısıyla Lyapunov üsteli ile ilgilidir (Trulla et al., 1996); (Marwan et al., 2007).

Köşegen yapılardan faydalananarak yineleme grafiği sayısal niceliklerini hesaplayabilmek için ilk olarak yineleme grafiğinde oluşan köşegen yapıların uzunluklarına göre dağılımı bulunmalıdır. Bu dağılım;

$$P(\epsilon, l) = \sum_{i,j}^{N-l} (1 - R_{i-1,j-1}(\epsilon))(1 - R_{i+l,j+l}(\epsilon)) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}(\epsilon), \quad (2.9)$$

denklemini kullanarak bulunur.

Köşegen yapılar kullanılarak hesaplanan ve yaygın kullanıma sahip yineleme grafiği sayısal niceliklerinden bir tanesi determinizm niceliğidir. Determinizm niceliği, çeşitli uzunluklarda oluşan köşegen yapıları meydana getiren yineleme noktalarının tüm yineleme noktalarına oranıdır. Bu niceliği hesaplarırken belirli bir l_{min} uzunluğu eşik değeri olarak seçilir ve bu eşik değerinden daha uzun köşegen yapılar dikkate alınır. Literatürde bu eşik değerinin birden fazla olması gerektiği verilmektedir ve genellikle iki olarak alınır.

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N P(\epsilon, l)}{\sum_{l=1}^N P(\epsilon, l)}. \quad (2.10)$$

Burada $l_{min} = 1$ olarak seçilirse, bu durumda köşegen yapıları oluşturan tüm noktalar hesaba katılmış olur ve determinizm niceliğini değeri bir olur. Sonuç olarak determinizm niceliği 0 ile 1 arasında değişir ve bire yaklaştıkça

sistemin tahmin edilebilirliği artarken, sıfıra yaklaştığı durumda ise sistemin tahmin edilebilirliğinin azaldığı söylenir. Determinizm niceliği sistemdeki rejim geçişlerini tespit edebilmek için oldukça elverişlidir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Trulla et al., 1996);(Marwan et al., 2007).





3. METRİK UZAKLIK

Karmaşık yapıya sahip doğal sistemlerin zaman serisi analizlerinde kullanılan yineleme grafiği (Marwan et al., 2007), maksimum Lyapunov üsteli (Rosenstein et al., 1993), korelasyon boyutu (Grassberger and Procaccia, 1983) gibi analiz yöntemlerinin çoğunun temelinde, faz uzayındaki yörüngelerinin birbirleriyle olan ilişkisini ortaya çıkartmak yatmaktadır. Bu ilişkiyi ortaya çıkartmanın en yaygın yöntemi yörüngelerin arasındaki uzaklığı hesaplamaktır. Öklidyen uzaklık, uzaklık hesabı için en doğru tanım olmasına rağmen sadece düzenli zaman serileri üzerinde uygulanabilir. Yapısından veya örnekleme tekniklerinden dolayı karmaşık yapıya sahip olan doğal sistemlerin zaman serileri, hem eşit zaman aralıklı örneklemeye sahip değildir hem de örnek toplama tekniklerinden kaynaklı belirli bir gürültü seviyesine sahiptirler. Öklidyen uzaklık kullanabilmek için bu tarz zaman serileri interpolasyon yöntemi kullanılarak düzenli hale getirilir. Fakat bu yöntem zaten belirli bir gürültü seviyesine sahip olan zaman serisine, dışarıdan müdahale edildiği için ek bir gürültüye sebebiyet vermektedir (Rehfeld et al., 2011). Metrik uzaklık tanımı eşit örnekleme zaman aralığına ihtiyaç duymaksızın, iki veri grubu arasındaki uzaklık hesabını yapabilmek için ortaya atılmıştır. Sistemin tamamen iç dinamiğinden faydalanılarak yapılan bu uzaklık tanımının temelinde farklı iki veri grubundan birini bir diğerine birim adımlarla dönüştürmek yatmaktadır.

Bu bölümde eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerinin yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek için gerekli olan uzaklık hesabı, metrik uzaklık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için metrik uzaklık tanımı incelenmiş ve metrik uzaklık hesabı için gerekli olan parametreler için seçim kuralları ortaya atılmıştır. Yineleme grafiği analizleri için, literatürde defalarca çalışılmış ve dinamiği iyi bir şekilde bilinen kesikli yapıya sahip olan Logistik map ve sürekli yapıya sahip Rössler salıncısı tercih edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği her iki sistem için hesaplanmış ve her iki sistemin Lyapunov üsteli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların her iki sistem için de tutarlı olduğu görüldükten sonra doğal zaman serisi analizi için kullanılmıştır.

Doğal zaman serisi analizi için, Çin’de yer alan Dayu Mağarası’ndan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopu oranları seçilmiştir. Doğu Asya Yaz Muson rejiminin etkisi altında kalan bölge için yapılan analizlerin sonuçları, mağarada yer alan yazıtlardaki kuraklık dönemleri ile karşılaştırılmış ve determinizm niceli-

ğinin düşük değerler almış olduğu dönemlere karşılık geldiği tespit edilmiştir.

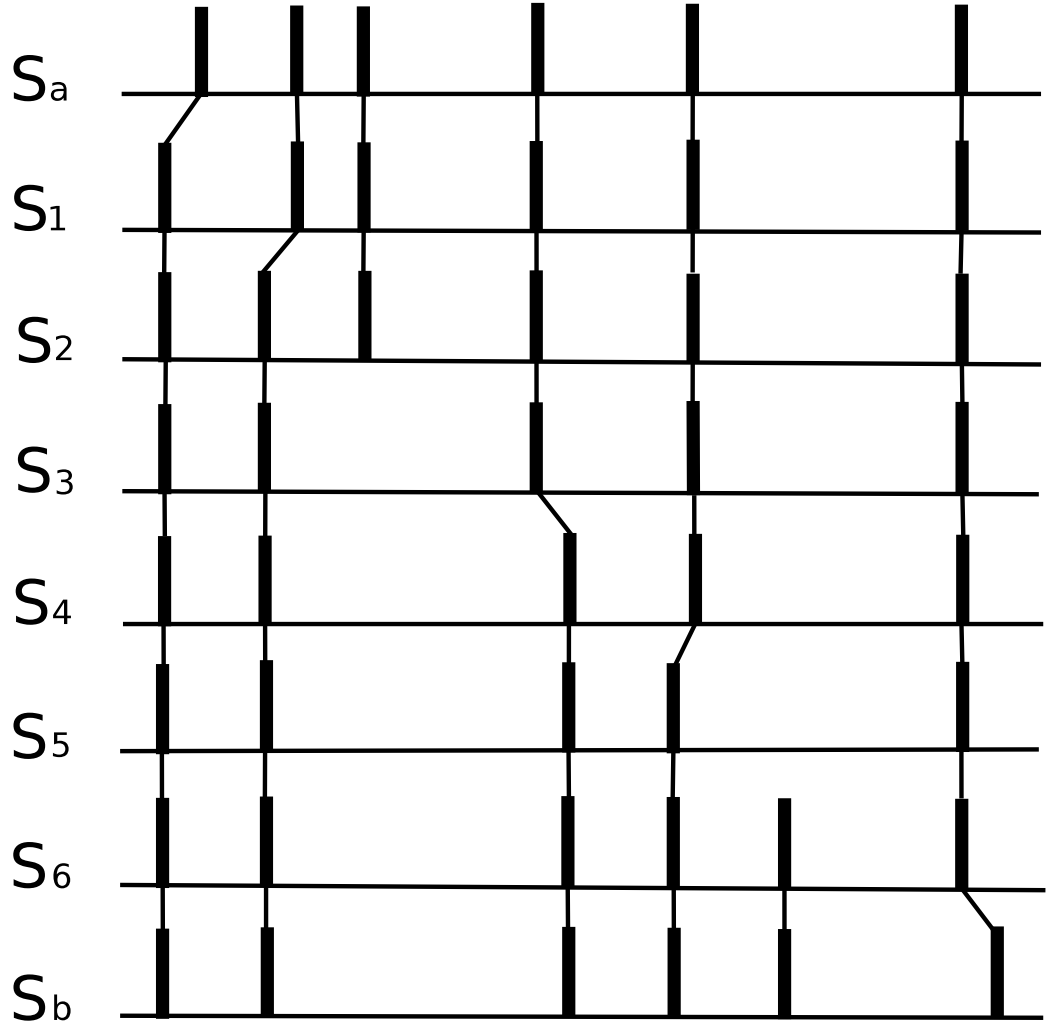
3.1 Tanım

Her hangi bir sistemin zamanla nasıl evrileceğini anlayabilmek için hareket denklemleri kullanılmaktadır. Fakat karmaşık yapıya sahip olan sistemler için herhangi bir denklem ortaya koymak oldukça güçtür. Bu tarz sistemlerin gelecekte nasıl davranacağını kestirebilmek için öncelikle geçmişte sergilemiş olduğu davranışı iyi bir şekilde tespit edebilmek çok önemlidir. Bunun için sistemin yörüngelerinin faz uzayında yapmış oldukları hareketlerin birbirleri ile olan ilişkisi incelenir. Bir çok analiz yönteminde, bu ilişkiyi anlayabilmek için yörüngelerin birbirleriyle olan uzaklıklarının hesaplanmaktadır (Ozken et al., 2015). Yörüngeler arasındaki uzaklığın değişiminin incelenmesi, sistemin genel yapısı hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlayan Lyapunov üsteli ve korelasyon boyutu gibi nicelikleri hesaplayabilmek için gereklidir (Grassberger and Procaccia, 1983) (Rosenstein et al., 1993). Bu tarz hesapları yaparken genellikle kullanılan uzaklık tanımı öklidyen uzaklıktır. Fakat öklidyen uzaklık kullanabilmek için zaman serisini oluşturan verilerin eşit sayıda ve eşit zaman aralıkları ile örneklenmiş olması gerekmektedir (Eroglu et al., 2016). Doğada yer alan bir çok sistem, yapısından (deprem, yağış, beyin aktiviteleri vs.) veya örnek toplama tekniklerinden (paleoiklim) dolayı eşit zaman aralıklı verilere sahip değildirler. Eşit zaman aralığına sahip olmayan bu tarz sistemlerde, yörüngeler arasındaki uzaklık ölçümünü yapmak öklidyen uzaklık ile mümkün değildir.

Zaman serisi analizlerinde baş gösteren bu sorun, aynı kaynaktan çıkan farklı beyin aktivite verilerinin birbirleriyle olan ilişkisini incelemek isteyen Victor ve Purpura'yı yeni bir uzaklık tanımı yapmaya zorunlu kılmıştır. Metrik uzaklık olarak adlandırdıkları bu yeni uzaklık için temel mantık, farklı iki veri örneğinden birini bir diğerine birim işlemler kullanarak ve minimum maliyet ile dönüştürmektir. Dönüşüm sırasında kullanılan birim işlemler; kaydırma, ekleme ve silme işlemleridir. Söz konusu işlemlerin her birinin ayrı ayrı maliyetleri vardır ve dönüşüm sırasında kullanılan tüm işlemlerin maliyetlerinin toplamı, iki veri grubu arasındaki metrik uzaklığı vermektedir. Victor ve Purpura, yapmış oldukları çalışmada ekleme p_e ve silme p_s işlemlerinin maliyetlerini 1 olarak almışlardır. Kaydırma p_k işleminin maliyeti için ise;

$$p_k = \lambda_0 |t_a - t_b|, \quad (3.1)$$

denklemini önermişlerdir. Burada yer alan λ_0 parametresi zamanla ilgili para-



Şekil 3.1: S_a veri grubunun S_b veri grubuna dönüştürülmesinin gösterimi. S_a S_b ye $S_1, S_2, \dots, S_7(S_b)$ olmak üzere toplam yedi adımda dönüştürülmüştür. Minimum maliyet ile dönüşüm yapılabilmesi için spikelar kaydırılmış, silinmiş ve eklenmiştir.

metre olup birimi s^{-1} dir. t_a ve t_b ise sırasıyla S_a ve S_b veri grubunda yer alan ve kaydırma işlemine tabi olacak olan verilerin zamanlarını ifade etmektedir (Victor and Purpura, 1997).

Metrik uzaklık hesabı için gerekli olan dönüşümün nasıl gerçekleştiğini daha iyi anlayabilmek için Şekil 3.1'i inceleyelim. Şekilde görüldüğü gibi S_a veri grubu S_b veri grubuna ekleme, silme ve kaydırma birim işlemleri kullanılarak dönüştürülmüştür ve kullanılan tüm birim işlemlerin toplam maliyeti, S_a ve S_b veri grupları arasındaki metrik uzaklığı vermektedir. Bu dönüşüm için yedi adım kullanılmıştır ve her bir adım S alt indisi olarak gösterilmektedir. 1., 2., 4., 5. ve 7. adımlarda S_a veri grubundaki spikelar, S_b veri grubunda yer alan spikelere kaydırma işlemi ile dönüştürülürken, 3. adımda silme ve 6. adımda ise ekleme işlemi kullanılarak spikelar birbirlerine dönüştürülmüştür

(Ozken et al., 2015).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dönüşüm için kaydırma, ekleme ve silme işlemlerinin her biri kullanılmıştır. Burada kritik olgu, hangi işlemi ne zaman kullanmamız gerektiğini doğru bir şekilde tespit edebilmektir. Bunun için metrik uzaklığın tanımını hatırlamamız gerekmektedir. Metrik uzaklık tanımında, dönüşümün minimum maliyet ile gerçekleştirilmesi gerektiği söylenmektedir. Bu kuralı daha iyi anlayabilmek için iki veri grubu düşünelim ve bu veri grupları sadece birer elemana sahip olsunlar. Bu iki veriyi birbirine dönüştürebilmek için iki seçeneğimiz mevcuttur. İlk seçenek olarak kaydırma işlemini uygulayabiliriz ve Denklem 3.1’i kullanarak kaydırma maliyetini hesaplayabiliriz. İkinci seçenek ise dönüşümü, dönüşüme uğrayacak veri grubundaki veriyi silip diğer veri grubundaki verinin yerine ekleyerek yapabiliriz. Her iki seçenek için dönüşüm maliyetini yani metrik uzaklığı hesaplarsak, ikinci durumda silme ve ekleme işleminin maliyetlerinin toplamı, silme ve ekleme işlemlerinin her birinin maliyeti 1 olduğundan dolayı 2 olarak bulunmaktadır. Minimum maliyet ile dönüşümün gerçekleşmesi için kaydırma işleminin maliyetine odaklanmamız gerekmektedir. Yapılan kaydırma işleminin maliyeti silme ve eklemenin toplam maliyeti olan 2’den fazla ise kaydırma işlemi yerine silme ve ekleme işlemleri tercih edilir. Eğer kaydırma işleminin maliyeti, 2’den az ise silme ve ekleme işlemleri yerine kaydırma işlemi tercih edilir. Sonuç olarak minimum maliyet koşulunu sağlayabilmek için dönüşüm sırasında kullanılacak olan kaydırma işlemlerinin maliyetlerini odaklanmamız gerekmektedir. Denklem 3.1’i tekrardan incelersek denklemde yer alan λ_0 parametresinin seçiminin dönüşüm için kritik önem taşıdığı ortaya çıkmaktadır. λ_0 parametresinin alacağı değerle doğru orantılı bir şekilde kaydırma işleminin maliyeti değişmektedir. Bu durumda λ_0 parametresinin seçimi için limit koşulları incelenirse;

- $\lambda_0 \rightarrow 0 \implies \lambda_0 |t_a - t_b| \rightarrow 0$
- $\lambda_0 \rightarrow \infty \implies \lambda_0 |t_a - t_b| \rightarrow \infty$

durumları meydana gelir. $\lambda_0 \rightarrow 0$ limitinde kaydırma işleminin maliyeti sıfıra yaklaşmakta ve bu durumda iki veri grubundan birini bir diğerine dönüştürürken kaydırma işlemi hiç bir zaman ekleme ve silme işlemlerinin toplam maliyeti olan 2 den fazla olamayacağı için dönüşüm sadece kaydırma işlemlerinden meydana gelecektir. Tam tersi durumda ise $\lambda_0 \rightarrow \infty$ kaydırma işleminin maliyeti her zaman 2’den fazla olur. Bu durumda ise dönüşümde kaydırma işlemi hiç kullanılmaz ve dönüşüm ekleme ve silme işlemlerinden meydana gelir. Bu limit durumları incelendiğinde λ_0 parametresinin seçiminin önemi ortaya

çıkmaktadır. Victor ve Purpura, bu dönüşümün doğru olarak gerçekleştirilebilmesi ve metrik uzaklığın doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, dönüşüm sırasında kullanılan tüm birim adımların çoğunluğunun (yaklaşık olarak %75'i) kaydırma işlemlerinden oluşması gerektiğini ve parametre seçiminin de bu doğrultuda yapılması gerektiğini ortaya koymuşlardır (Victor and Purpura, 1997).

Metrik uzaklığın hesaplanabilmesi için gerekli olan dönüşümün minimum maliyet ile gerçekleştirilebilmesi için gereken koşulları incelendikten sonra, metrik uzaklığın genel bir uzaklık tanımı olabilmesi için gerekli olan koşulları inceleyelim. Genel uzunluk koşulları;

- $D(S_a, S_b) \geq$ (pozitif)
- $D(S_a, S_b) = D(S_b, S_a)$ (simetrik)
- $D(S_a, S_c) \leq D(S_a, S_b) + D(S_b, S_c)$ (Üçgen Eşitsizliği)

olarak bilinmektedir. İlk koşulda uzaklığın pozitif olması gerektiği verilmektedir. Metrik uzaklık için kullanılan birim işlemlerden ekleme ve silmenin maliyetleri 1 yani pozitiftir. Kaydırma işleminin maliyet tanımında yer alan mutlak değer ile kaydırma işleminin maliyeti de pozitif olmaktadır. Sonuç olarak iki veri grubu arasındaki metrik uzaklık her zaman pozitif olarak bulunmaktadır. İkinci koşulda ise uzaklığın simetrik olması gerektiği verilmektedir. Ekleme ve silme işlemlerinin maliyetinin aynı olması ve kaydırma işleminin maliyetinde kullanılan mutlak değer ile metrik uzaklık simetri koşulunu da sağlamaktadır. Üçüncü koşulda, uzaklığın üçgen eşitsizliğini sağlaması gerektiğini söylemektedir. Metrik uzaklık tanımında yer alan minimum maliyet ile dönüşüm kuralı ise bu koşulu sağlamak için verilmiştir. Sonuç olarak Victor ve Purpura'nın yapmış oldukları metrik uzaklık tanımı, genel uzaklık koşullarını sağlamaktadır (Victor and Purpura, 1997)).

3.2 Büyüklüğe Sahip Veriler için Metrik Uzaklık

Victor ve Purpura metrik uzaklık tanımını ortaya attıktan sonra bu konuyla ilgili bir çok çalışma yapılmıştır (Hirata and Aihara, 2012)(Hirata and Aihara, 2009)(Diez et al., 2012). Bu çalışmalardan bir tanesi Suzuki vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada spike trenleri için yapılmış olan metrik uzaklık tanımı, Japon Yeni ve Dolar paritesi verilerine uygulanmıştır. Victor ve Purpura'nın çalışması spikelar yani sadece olayın var olup olmaması üzerine kuruluyken Suzuki vd. büyüklüğe (boyut) sahip olan parite

değerleri için toplam dönüşüm maliyetini yani metrik uzaklığı hesaplayabilmek için aşağıdaki denklemi önermişlerdir(Suzuki et al., 2010).

$$p(c) = \sum_{(\alpha, \beta) \in C} \{ \lambda_0 |t_a(\alpha) - t_b(\beta)| + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \lambda_k |L_{a,k}(\alpha) - L_{b,k}(\beta)| \} + |I| + |J| - 2|C|. \quad (3.2)$$

Burada I ve J sırasıyla S_a ve S_b veri gruplarındaki veriler dizini, C ise kaydırma işleminin uygulanacağı veri sayısını temsil etmektedir. α , S_a veri grubundaki α . olay β ise S_b veri grubundaki β . olaydır. λ_0 parametrelili ilk terim verilerin zaman bakımından kaydırma maliyetini vermektedir. λ_k ile başlayan ikinci terim ise aynı verilerin büyüklüğünün değiştirilmesiyle ilgilidir. Toplam işaretiindeki m ise verilerde birden fazla boyut (büyüklük) olduğu takdirde hesaba katılmasını sağlamaktadır. Denkleminde yer alan $L_{a,k}$ ve $L_{b,k}$ ise sırasıyla S_a grubundaki α . olayın ve S_b grubundaki β . olayın büyüklüğüdür. Denklemin son terimi ise dönüşüm için kullanılan ekleme ve silme işlemlerinin toplam maliyetini hesaba katmaktadır.

Suzuki vd. tarafından yapılan bu çalışmada, metrik uzaklık tanımında büyüklüğe sahip veriler için kaydırma maliyetine verilerin büyüklüğü ile ilgili olan λ_k parametresi ile başlayan bir ek terim eklenmiştir. Diğer iki birim işlem olan silme ve ekleme işlemleri için ise maliyeti Victor ve Purpura'nın maliyeti olan 1 almıştır(Suzuki et al., 2010).

Metrik uzaklığı doğru bir şekilde hesaplayabilmek için en önemli unsur parametre seçimlerinin doğru yapılmasıdır. Suzuki vd. de Victor ve Purpura'nın yapmış olduğu yaklaşım ile parametre seçimini gerçekleştirmiştir. Bu konu üzerine yapılan bir çok çalışma mevcuttur fakat parametre seçimi için tam olarak bir motivasyon sağlanamamıştır (Hirata and Aihara, 2012)(Hirata and Aihara, 2009)(Diez et al., 2012).

Parametre seçimlerine motivasyon sağlayabilmek adına Victor ve Purpura'nın metrik uzaklık tanımını inceleyelim. Bu tanımında yer alan λ_0 parametresi için biriminin s^{-1} yani frekans olduğu söylenmektedir. Kaydırma işleminin boyutuna bakıldığı takdirde $\lambda_0 |t_a - t_b|$ çarpımından dolayı birimsiz olduğu görülmektedir. Bu durumda Suzuki vd. tarafından ortaya konulan kaydırma işleminin de boyutsuz olması gerekmektedir. Denklem 3.2'de yer alan λ_0 ve λ_k parametreleri ile başlayan kısımlar, dönüşüm sırasında kullanılacak olan kaydırma işlemlerinin toplam maliyetini hesaplamaktadır. Kaydırma iş-

leminin boyutsuz olabilmesi için λ_k parametresinin biriminin, ilgili verilerin büyüklüğünün tersi olması gerekmektedir. Yani incelenen verilerin büyüklüğünü L ile simgelersek, bu durumda λ_k parametresinin birimi L^{-1} olmalıdır. Victor ve Purpura'nın ekleme ve silme işlemleri için maliyeti 1 olarak aldıkları düşünülürse, toplam dönüşüm maliyetinin de boyutsuz olduğu görülmektedir. Bu bilgiler ışığında, söz konusu iki parametrenin seçimi için;

$$\lambda_0 = \frac{M}{\text{toplam Zaman}} \quad (3.3a)$$

$$\lambda_k = \frac{M-1}{\sum_i^{M-1} |L_{i+1} - L_i|}, \quad (3.3b)$$

denklemleri önerilmiştir. Burada M , ilgili zaman serisindeki toplam veri sayısını, L ise verilerin büyüklüğünü simgelemektedir. Böylece λ_0 parametresini verilerin gerçekleşme frekansı, λ_k parametresini ise verilerin büyüklüklerinin farkının ortalamasının tersi olarak alınmıştır. Bu yaklaşım ile kaydırma işleminin maliyeti birimsiz hale getirilmiştir (Ozken et al., 2015).

Kaydırma işleminin maliyetini hesaplamak için gerekli olan parametrelere motivasyon katıldıktan sonra, metrik uzaklık tanımındaki başka bir eksiklik olduğu kanısına varılmıştır. Tekrardan Victor ve Purpura'nın tanımında, ekleme ve silme işlemleri için maliyetin 1 olduğunu söylenmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi söz konusu çalışmada spikeler mevcuttur. Yani sadece olayın var olup olmadığı olgusu mevcuttur. Bu durumda ilgili verinin herhangi bir büyüklüğü yoktur. Bu koşul altında ekleme ve silme işlemlerinin maliyetinin hep 1 olması kabul edilebilir. Fakat metrik uzaklığı, Suzuki vd. nin tanımındaki gibi büyüklüğe sahip olan veriler için kullanırsak, ekleme ve silme maliyetinin hep 1 olmasının iyi bir yaklaşım olmadığı kanısına varılmıştır. Bu doğrultuda ekleme ve silme işlemlerinin maliyetlerinin ilgili sistemin dinamiğine göre değişkenlik göstermesi gerektiği düşünülmüş ve toplam maliyette bu olguyu hesaba katmak için Denklem 3.2'deki ekleme ve silme maliyetlerinin önüne λ_S parametresi eklenmiştir. Böylece toplam maliyet yani metrik uzaklık denklemi;

$$p(c) = \sum_{(\alpha, \beta) \in C} \{ \lambda_0 |t_a(\alpha) - t_b(\beta)| + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \lambda_k |L_{a,k}(\alpha) - L_{b,k}(\beta)| \} + \lambda_S (|I| + |J| - 2|C|), \quad (3.4)$$

şeklini almıştır. Bu eklenen parametre ile farklı sistemler için farklı ekleme ve

silme maliyetleri, metrik uzaklık hesabına katılmıştır(Ozken et al., 2015).

λ_S parametresinin seçimi için Merkezi Limit Teoreminden faydalanılmıştır. Bu teoreme göre, doğada bulunan herhangi bir sistemde gerçekleşen olayların sayısı yeteri kadar fazla olursa $n \rightarrow \infty$, olayların dağılımı normal dağılıma uyar. Bu bilgi ışığında, tüm pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımının, normal dağılıma gitmesi gerekmektedir. En uygun ekleme ve silme maliyetini yani λ_S parametre değerini bulmak için izlenen yol şu şekildedir; ilk olarak zaman serisi eşit büyüklüğe sahip pencerelere bölünür ve tüm pencerelerin birbirleri arasındaki metrik uzaklıklar $\lambda_S \in [0, 4]$ aralığında $\Delta\lambda_S = 0.01$ duyarlılık ile hesaplanır. λ_S parametresinin tüm değerleri için hesaplanan pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımı çizdirilir ve bu dağılımlardan normal dağılıma en yakın dağılımı meydana getiren λ_S parametresi sistemin ekleme ve silme maliyeti olarak alınır(Ozken et al., 2015).

3.2.1 Uygulama

Metrik uzaklık tanımındaki parametrelere motivasyon katıldıktan sonra hem parametre seçim kurallarının hem de metrik uzaklığın çalışırılığını görebilmek adına iyi bilinen yapay sistemler üzerinde test edilmiştir. Bunun için dinamiği iyi bilinen iki sistem üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu sistemlerden biri kesikli yapıya sahip olan Logistik map, diğeri ise sürekli bir yapıya sahip olan Rössler salıcısıdır. Söz konusu sistemler için, metrik uzaklık kullanılarak yapılan yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği hesaplanarak her iki sistemin Lyapunov üstelleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yapılan analizler yineleme matrisi oluşturmak için kullanılan Denklem 2.7’de yer alan uzaklık için metrik uzaklığın kullanılabileceğini gösterilmiştir.

Metrik uzaklığın çalışırılığı, iyi bilinen sistemlerde test edildikten sonra gerçek zaman serisi analizlerinde kullanılmıştır. Bu analiz için paloeiklim verileri tercih edilmiştir. Çin’de bulunan Dayu Mağarası’ndaki sarkıklardan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotoplarının oranları için yapılan analizler sonucunda, literatürde bulunan fakat istatistiksel olarak ispatlanamayan kuraklık dönemleri istatistiksel olarak tespit edilmiştir.

3.2.1.1 Logistik map

Logistik map, Robert May tarafından sinek popülasyondaki değişimi tanımlamak için ortaya koyulan basit bir matematiksel denklemdir. Sinek popü-

lasyonundaki değişim;

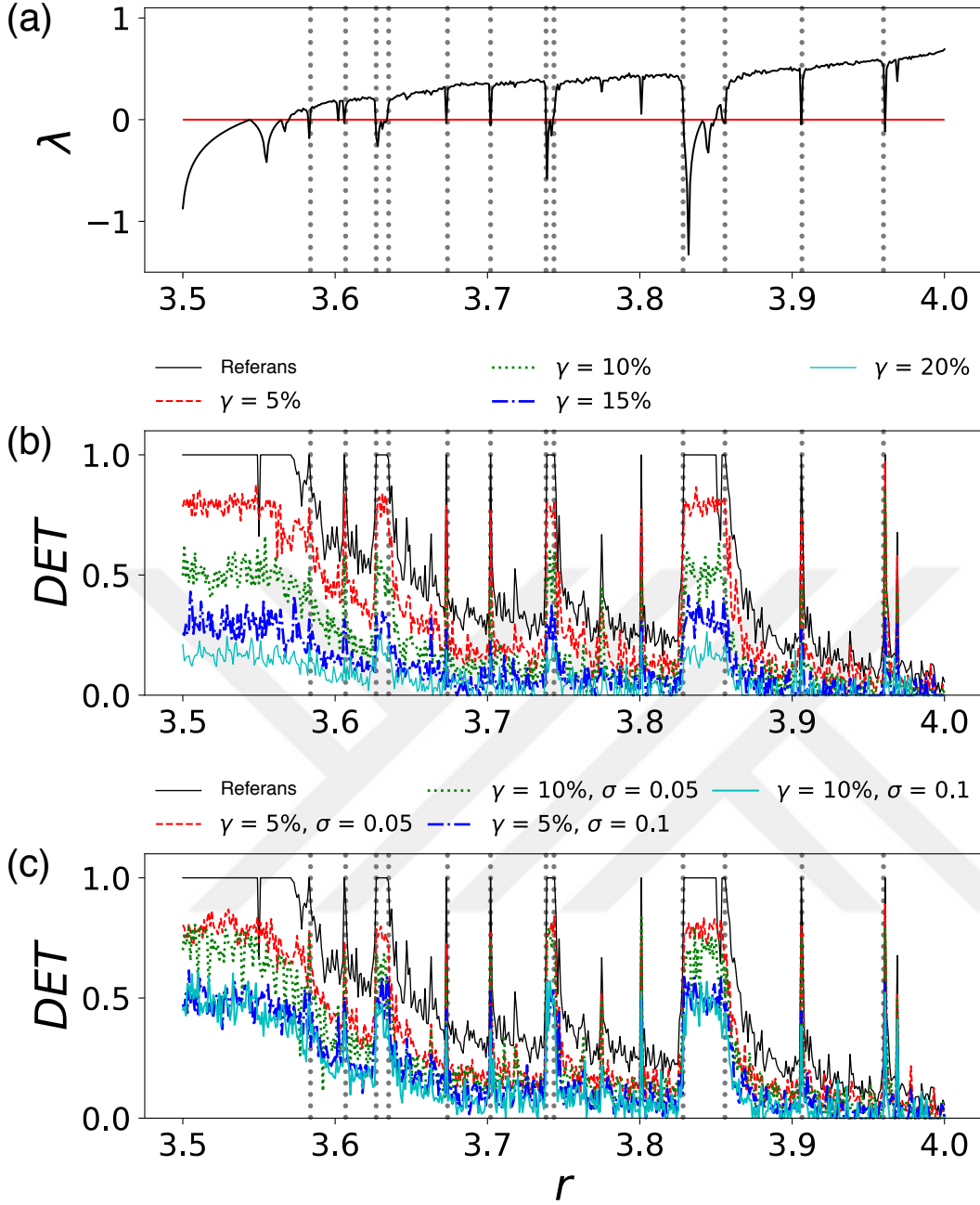
$$x_{i+1} = rx_i(1 - x_i), \quad (3.5)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada $r \in [0, 4]$ aralığında değişkenlik gösterebilen kontrol parametresidir ve çevre koşullarındaki tüm bilgiyi içinde barındırmaktadır (Hilborn C. R., 2000). Logistik map analizi için $r \in [3.5, 4]$ aralığı tercih edilmiştir. Bunun sebebi bu aralıkta Logistik mapin zengin bir dinamiğe sahip olmasıdır. Analiz için $r \in [3.5, 4]$ aralığında ve $(\Delta r = 0.01)$ duyarlılıkla her bir r değeri için 3000 veri üretilmiştir ve ilk 2000 veri, sistemdeki geçici hareketliliği dikkate almamak için çıkartılmıştır. Sonuç olarak her bir r değeri için 1000 veri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.5 kullanılarak elde edilen Logistik map zaman serisi, eşit zaman aralıklı ve kesikli bir yapıya sahiptir. Bu durumda metrik uzaklık kullanmaya gerek duyulmamaktadır. Metrik uzaklığın doğru bir uzaklık tanımı olup olmadığını anlayabilmek adına zaman serimizin örnekleme zamanları farklılık göstermelidir. Bu tarz bir zaman serisi elde edebilmek adına tüm r parametre değerleri için üretilmiş 1000 veriden bazıları rastgele silinmiştir. Zaman serimizdeki düzensizliği arttırabilmek adına zaman serisinden sırasıyla $50(\gamma = \%5)$, $100(\gamma = \%10)$, $150(\gamma = \%15)$ ve $200(\gamma = \%20)$ veri silinmiştir.

Yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek için ilk olarak yineleme matrisi oluşturulmalıdır. Denklem 2.7'ye bakıldığı takdirde, yineleme matrisi oluşturmak için yörüngelerin arasındaki uzaklığın bulunması gerekmektedir. Burada metrik uzaklık kullanılarak her bir zaman serisi için yineleme matrisi oluşturulmuştur. Bunun için her bir zaman serisi 6 birim zamanlık pencerelere bölünmüştür. 1000 verilik bir zaman serisini ele alırsak, bu durumda 166 adet pencereye sahip olunmuştur. Hiç veri silinmemiş zaman serisi için her bir pencerede 6 adet nokta varken, giderek artan silinme oranlarıyla birlikte her bir pencereye düşen nokta sayıları farklılık göstermektedir.

Her bir pencerenin diğer pencerelerle arasındaki metrik uzaklığı hesaplayabilmek için ilk olarak Denklem 3.3a ve 3.3b'den faydalanarak λ_0 ve λ_k parametreleri, her bir düzensiz ve orijinal zaman serisi (hiç veri silinmemiş) için ayrı ayrı hesaplanmıştır. λ_S parametresini seçimi için $\lambda_S \in [0, 4]$ aralığında $\Delta\lambda_S = 0.01$ duyarlılığında taranarak, her bir λ_S parametre değeri için tüm pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımlarından normal dağılıma en yakın olan λ_S parametre değeri 1 olarak bulunmuştur.

Metrik uzaklık tanımında yer alan üç parametre tespit edildikten sonra her bir r değeri için yineleme matrisi oluşturulmuştur. Bu hesap dört düzensiz



Şekil 3.2: Logistik map için yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği sonuçları: (a) Logistik map için λ Lyapunov Üsteli, (b) Ham ve rastgele veri silinmiş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları, (c) Ham ve gürültü eklenerek rastgele veri silinmiş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim geçişlerini göstermektedir.

ve bir de orijinal zaman serisi için ayrı ayrı yapılmıştır. Yineleme matrisini oluşturmak için en önemli unsurlardan biri eşik değerinin ϵ seçilmesidir. Eşik değeri seçiminde her bir r parametresi için hesaplanan tüm pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımının standart sapması σ kullanılmıştır. Metrik uzaklığı D ile simgelersek, bu durumda eşik değeri $\epsilon = 2\sigma_D$ olarak alınmıştır. Her bir zaman serisi için oluşturulan yineleme matrisinden sonra yineleme

grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği, Denklem 2.10'dan faydalanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanmış olan determinizm niceliği sonuçları Şekil 3.2(b)'de verilmektedir.

Şekil 3.2(a)'da Logistik map için λ Lyapunov üsteli sonuçları verilmektedir. Lyapunov üsteli sistemin faz uzayındaki yörüngelerinin birbirinden uzaklaşma hızını veren bir nicelik ve sistemin yapısı hakkında en doğru bilgiyi vermektedir. $\lambda > 0$ olduğu durumda sistem kaotik bir yapıya, $\lambda < 0$ olduğu durumda ise sistem periyodik bir yapıya sahip olmaktadır. Lyapunov üstelinin sıfıra vurduğu r parametre değerleri kaotiklikten-periyodikliğe veya periyodiklikten-kaotikliğe geçişlerin olduğu parametre değerleridir. Determinizm niceliğinin de sistemdeki rejim değişikliklerini tespit edebilmemiz için çok elverişli olduğu göz önüne alınırsa (Marwan et al., 2007), Lyapunov üstelinin sıfıra vurmuş olduğu her r parametre değerini Şekil 3.2(b)'de de tespit etmemiz gerekmektedir.

Şekil 3.2(b)'de 5 farklı sonuç bulunmaktadır ve Lyapunov üstelinin sıfıra vurduğu her r parametre değeri dikey gri kesikli çizgi ile belirtilmiştir. Orijinal logistik map zaman serisi ($\gamma = \%0$) için determinizm niceliği sonuçları siyah düz çizgiyle verilmektedir. Sonuçlar açık bir şekilde göstermektedir ki rejim geçişlerinin hepsi tespit edilebilmiştir. $\gamma = \%5, \%10, \%15$ ve $\%20$ oranla veri silinmiş zaman serileri için hesaplanan determinizm niceliklerinin sonuçları sırasıyla yeşil, açık mavi, kırmızı ve mavi çizgilerle verilmiştir. Şekil 3.2(b) incelendiğinde, determinizm niceliğinin artan silinme oranlarıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Determinizm niceliğinin sistemin tahmin edilebilirliğinin bir ölçütü olduğu bilindiğine göre bu sonuç oldukça olağandır. Zaman serisinden veri silindiği için sistemle ilgili daha az bilgi sahibi olunmakta ve bu da sistemin tahmin edilebilirliğini ters bir şekilde etkilemektedir. Fakat $\%20$ oranında veri silinmiş olmasına rağmen sistemdeki rejim geçişlerini hepsi tespit edilebilmiştir.

İlk analizlerden sonra öklidyen uzaklık yerine metrik uzaklık kullanılarak doğru sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Bir sonraki analizde ise özellikle gerçek zaman serisi analizlerinde karşılaşılan zorluklardan bir tanesi olan ve sistemin dinamiği hakkında doğru bilgi sahibi olmamızı güçleştiren zaman serisinin gürültüye sahip olması zorluğu ele alınmıştır. Bunun için hem $\gamma = \%5$ hem de $\gamma = \%10$ veri silinmiş Logistik map zaman serilerine $\sigma = 0.05$ ve $\sigma = 0.1$ gürültü seviyesinde Gaussiyen beyaz gürültü eklenmiştir. Elde edilen eksik ve gürültülü zaman serileri için determinizm niceliği hesaplanmıştır. Bu hesap için ilk olarak metrik uzaklık tanımında yer alan λ_0 ve λ_k değerleri Denklem 3.3a ve 3.3b yardımıyla elde edilmiştir. λ_5 parametresi ise 1 olarak tespit edilmiştir.

Bir sonraki adımda yineleme matrisini oluşturmak için gerekli olan eşik değeri $\epsilon = 2\sigma_D$ olarak alınarak oluşturulan yineleme matrisinden determinizm niceliği hesaplanmıştır. Bu analizin sonuçları Şekil 3.2(c)'de verilmektedir. Siyah düz çizgi ile verilen sonuçlar orijinal Logistik map serisi için elde edilen determinizm niceliği sonuçlarıdır. Silinme oranı ve gürültü seviyesi $\gamma = \%10, \sigma = 0.05$; $\gamma = \%10, \sigma = 0.1$; $\gamma = \%5, \sigma = 0.05$ ve $\gamma = \%5, \sigma = 0.1$ olan zaman serilerinin determinizm niceliği sonuçları sırasıyla yeşil, çiyen, kırmızı ve mavi renklerle verilmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki zaman serisinde hem veri kaybı hem de gürültü olmasına rağmen rejim geçişleri metrik uzaklık kullanılarak yapılan analizler ile tespit edilebilmiştir.

3.2.1.2 Rössler salıncısı

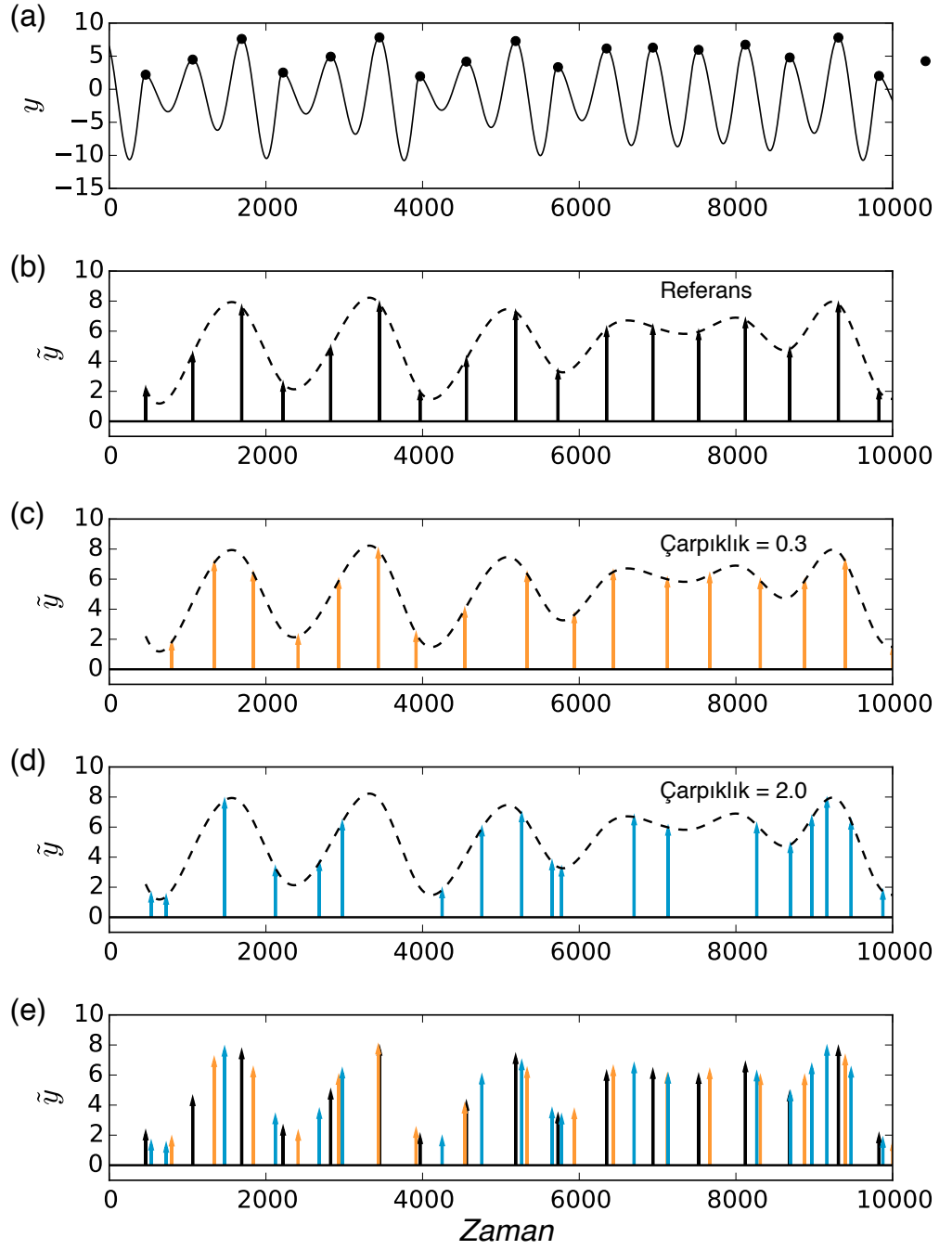
Metrik uzaklığın kesikli bir yapıya sahip Logistik map analizlerinde çalışırılığı test edildikten sonra sürekli bir yapıya sahip Rössler salıncısı üzerinde test edilmiştir. Üç boyuta sahip olan bu sistem;

$$\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) = (-y - z, x + ay, b + z(x - c)), \quad (3.6)$$

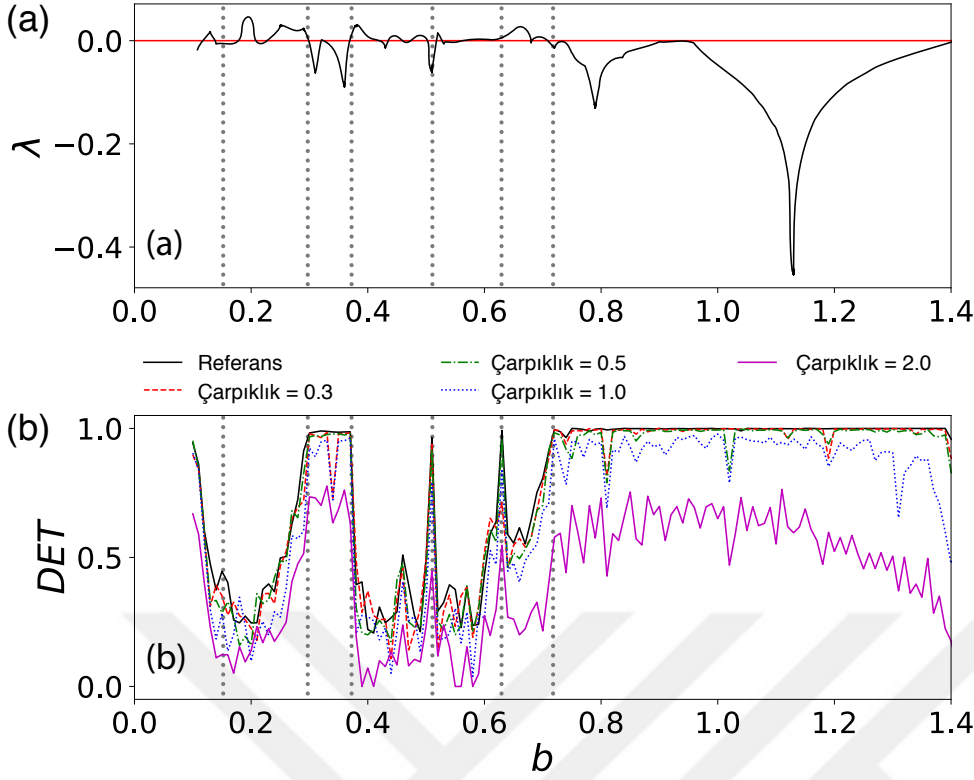
diferansiyel denklemleriyle ifade edilmektedir. Denklem 3.6'da görüldüğü üzere Rössler salıncısı a, b ve c olmak üzere üç farklı parametreye sahiptir. Analizlerimiz için Logistik map analizlerinde olduğu gibi Rössler salıncısının en zengin dinamiğe sahip olduğu parametre değerleri seçilmiştir. Sabit $a = 0.2$ ve $c = 5.7$ parametre değerleri ile değişken $b \in [0, 1.4]$ değerleri kullanılmıştır. $\Delta b = 0.01$ duyarlılıkla b parametresi değiştirilmiş ve her bir b parametre değeri için 4. dereceden Runge-Kutta kullanarak $\Delta t = 0.01$ örnekleme zamanı ile Denklem 3.6 integre edilmiştir.

Sürekli bir yapıya sahip Rössler salıncısından, eşit örnekleme zamanlarına sahip olmayan zaman serisi elde edebilmek adına sürekli zaman serisinin y bileşeninden 5000 adet yerel maksimum ($\tilde{y}$) noktası alınmıştır. Böylece doğal bir biçimde eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serisi elde edilmiştir. Bu işlemin nasıl yapıldığının daha anlaşılabilir olması için Şekil 3.3(a)'da bir örnek verilmiştir.

Rössler salıncısının yineleme grafiği analizine, bir sonraki bölümde yer alan paleoiklim verilerinde karşılaşılan zorluklardan biri yansıtılmıştır. Paleoiklim verileri genellikle zaman bakımından gama dağılımına uymaktadır (Rehfeld et al., 2011)(Rehfeld and Kurths, 2014). Analizlere bu olguyu yansıtabilmek için elde edilen 5000 yerel maksimum nokta ($\tilde{y}$) belirli çarpıklık oranları ile



Şekil 3.3: Rössler salıncısından elde edilen veriler. (a) Sürekli zaman serisinden y bileşeninden alınan maksimum noktalar ($\tilde{y}$); (b) Maksimum noktalar ile elde edilen zaman serisi; (c) Çarpıklık seviyesi $s = 0.3$; (d) $s = 2.0$ ile zaman bakımından gama dağılımına uydurulan zaman serisi; (e) farklı çarpıklık seviyeleri için zaman serilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.4: Rössler salıncısı için yineleme grafiği analizi: (a) λ Lyapunov üsteli, (b) ham zaman serisi ve $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 çarpıklık değerleri ile zaman bakımından gama dağılımına uydurulmuş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim geçişlerini göstermektedir.

interpole edilerek zaman bakımından gama dağılımına uydurulmuştur. Gama dağılımı;

$$p(k, s) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}, \quad (3.7)$$

olarak verilmektedir. Çarpıklık seviyesi $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 değerleri kullanılarak zaman bakımından gama dağılımına uydurulan yeni zaman serileri üretilmiştir. Şekil 3.3(c) ve (d)'de $s = 0.3$ ve 2.0 çarpıklık değerleri için elde edilmiş zaman serilerini küçük bir kısmı verilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı üzere artan çarpıklık değerleri ile birlikte zaman serisindeki bozukluk artmaktadır.

Orijinal ve belirli çarpıklık seviyesi kullanılarak zaman bakımından gama dağılımına uydurulan 4 zaman serisi için determinizm niceliği sonuçları Şekil 3.4(b)'de verilmektedir. Bu analizi yapabilmek adına zaman serisi ilk olarak Logistik mapte olduğu gibi eşit uzunluktaki pencerele bölünmüştür. Pencere boyutu, ortalama 6 verinin gerçekleşmesi için gerekli olan süre olarak alınmıştır. Bu işlemden sonra 833 pencereye sahip olunmuştur. Her bir pencere arasındaki metrik uzaklık hesaplanarak 833×833 lik yineleme matrisi oluşturu-

rulmuştur. Bunun için ilk olarak λ_0 ve λ_k parametre değerleri, her bir zaman serisi için ayrı ayrı Denklem 3.3a ve 3.3b kullanılarak hesaplanmıştır. λ_S parametre değeri ise 1 olarak tespit edilmiştir.

Yineleme matrisini oluşturabilmek için gerekli olan eşik değeri $\epsilon = 2\sigma_D$ olarak alınmıştır. Buradaki D pencereler arasındaki metrik uzaklığı simgelemektedir. Her bir zaman serisi için oluşturulan yineleme matrislerinden Denklem 2.8 kullanılarak determinizm niceliği hesaplanmıştır. İlgili analizlerin sonuçları Şekil 3.4(b)'de verilmektedir. Şekil 3.4(a)'da Rössler salıncısı için Lyapunov üsteli sonuçları verilmektedir. Daha önceden de bahsedildiği üzere Lyapunov üstelinin sıfıra vurduğu b parametre değerleri sistemdeki rejim geçişlerinin olduğu parametre değerleridir. Şekil 3.3(b)'de yer alan siyah, kırmızı, yeşil, mavi ve pembe çizgi ile gösterilen determinizm niceliği sonuçları sırasıyla orijinal ve $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 çarpıklık değerleri ile zaman bakımından gama dağılımına uydurulan zaman serileri içindir. Sonuçlara bakıldığında artan çarpıklık değerleri ile birlikte determinizm niceliği değerlerinin düşüş gösterdiği yani zaman serisindeki bozukluk arttıkça sistemin tahmin edilebilirliğinin azaldığı görülmektedir. Fakat artan çarpıklık oranlarına rağmen sistemdeki rejim geçişleri tespit edilmiştir.

3.2.1.3 Paleoiklim uygulaması

Doğal zaman serisi analizlerinde, rejim geçişlerinin tespit edilebilmesi çok önemli bir olgudur. Çünkü bu tarz sistemlerde gerçekleşen sıra dışı olaylar, sistemde ani rejim değişikliğine sebep olmaktadır. Önceki uygulamalarda, metrik uzaklık kullanılarak gerçekleştirilen yineleme grafiği analizleri sonucunda yapay sistemlerdeki rejim geçişleri tespit edilebilmişti. Doğal zaman serisi uygulaması için Çin'de yer alan Dayu Mağarası'ndan (Şekil 3.5) elde edilen paleoiklim verileri seçilmiştir. Paleoiklim verileri, mağaralarda yıllar boyunca sızıntı yapıp biriken yağmur sularından meydana gelen sarkıklardan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranlarıdır. $\delta^{18}O$ zaman serisi bölgedeki güçlü ve zayıf muson rejimleriye ilgili olduğundan dolayı rejim geçişlerini yakalayabilmek için oldukça elverişlidir (Tan et al., 2015); (Breitenbach et al., 2013); (Baker et al., 2015).

Dayu Mağarası'nın bulunmuş olduğu bölge, Doğu Asya Yaz Muson (DAYZ) rejiminin etkisi altında kalmaktadır ve Qinling Dağları'nın güney yamacında yer aldığından dolayı Haziran ve Kasım ayları arasında DAYZ dönemi boyunca yoğun yağış almaktadır. Bu yüzden yaz muson rejim değişikliğini tespit edebilmek için çok elverişli bir bölgedir. Bölgede gerçekleşmiş olan sıra dışı iklim olaylarını tespit edebilmek toplum üzerindeki etkisini araştırmak için çok

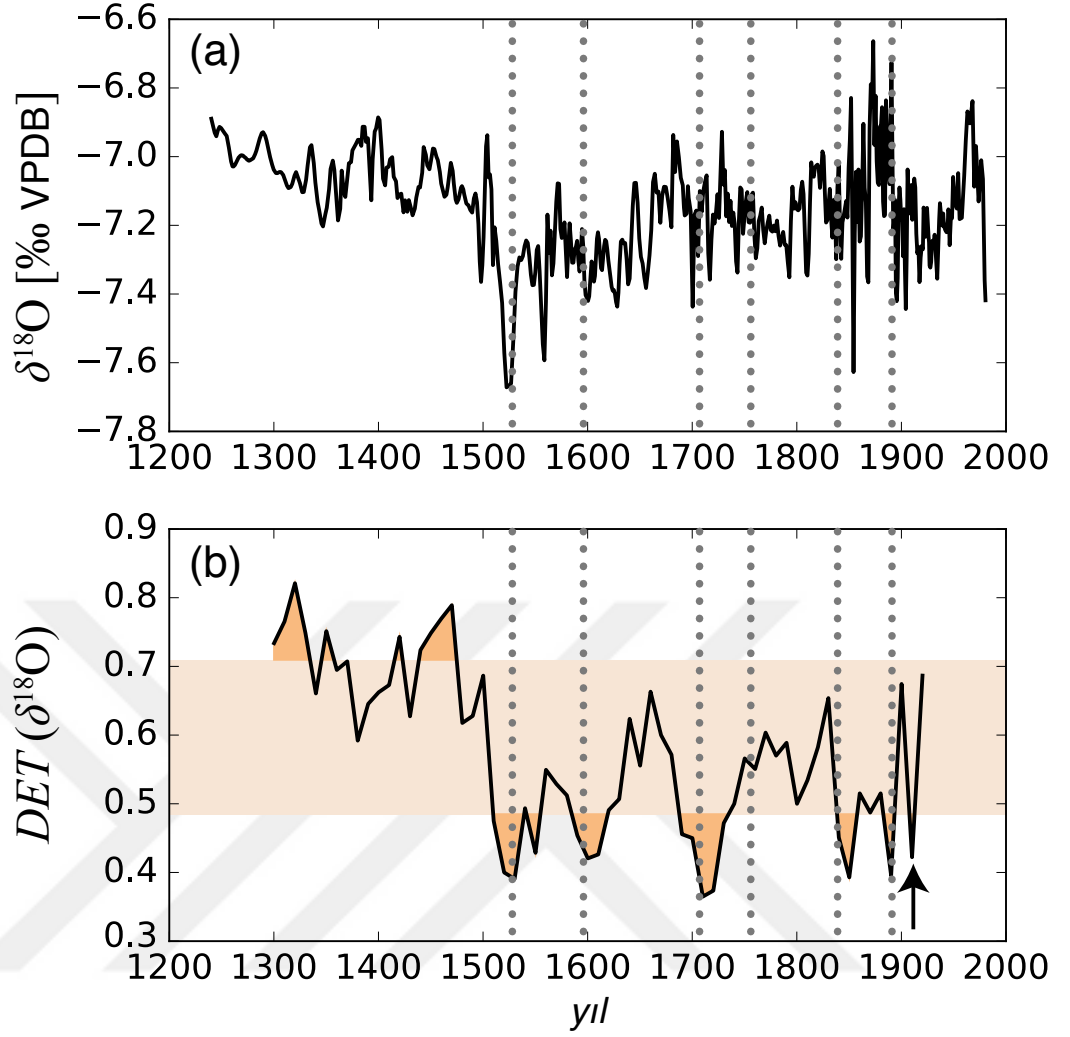


Şekil 3.5: Dayu Mağarası'nın Coğrafik Konumu

önemli bir olgudur.

Söz konusu zaman serisinde yaklaşık olarak 550 veri bulunmaktadır ve bu veriler 700 (1250-1950) yıllık bir zaman diliminde gerçekleşmiştir. Analiz için bu bölgenin seçilmesinin sebebi geçmiş yıllarda bölgede gerçekleşen kuraklık dönemleri için kanıtlar olmasıdır. Dayu Mağarası'nda yer alan yazıtlarda bölge halkının kuraklık zamanlarında mağaraya gidip yağmur duası yaptıkları anlaşılmaktadır (Tan et al., 2015). Söz konusu mağarada 1528, 1596, 1707, 1756, 1839, 1891 ve 1894 yıllarında bölgede kuraklığın hakim olduğuna dair kanıtlar olmasından dolayı aynı mağaradan elde edilmiş $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranlarının analizinde de bu yıllarda rejim geçişlerinin tespit edilmesi gerekmektedir.

Yapay zaman serisi analizlerinde sistemin rejim geçişleri kontrol parametrelerinin değerleriyle ilişkilendirilirken, doğal zaman serilerinde bu şekilde bir kontrol parametresi olmadığından rejim geçişlerini tespit edebilmek için izlenen yol pencere kaydırma yöntemidir (Marwan et al., 2013). Dinamik bir sistemin farklı zamanlarda farklı yapıya sahip olmasından faydalanılarak yapılan bu teknikte, ilk olarak zaman serisi büyük pencerelere bölünür. Eğer veri sayısı yeteri kadar fazla ise her bir büyük pencere küçük pencerelere bölünerek, her bir büyük pencere için determinizm niceliği hesaplanır. Hesaplanan determinizm niceliği, pencerelerin zamanlarına göre grafiğe döküldüğünde sistemin yıllara göre dinamiğinin nasıl değiştiği tespit edilmiş olur. Eğer zaman serisinin



Şekil 3.6: (a) Dayu Mağarası'ndan kaydedilmiş $\delta^{18}O$ izotop oranları; (b) $\delta^{18}O$ izotop oranlarından hesaplanan determinizm niceliği sonuçları. Gölge bölge güven aralığını, dikey kesikli çizgiler bilinen kuraklık rejimini göstermektedir.

deki veriler az ise, büyük pencereler kaydırılarak pencere sayısı arttırılmış olur. Böylece sistemin dinamiği daha fazla veri sayısı ile incelenmiş olur.

Paleoiklim zaman serisindeki rejim geçişlerini tespit edebilmek adına, zaman serisinin başından yaklaşık olarak 120 yıllık büyüklüğünde pencere alınmıştır. Yukarıda belirtildiği gibi 550 veriye sahip zaman serisindeki veri sayısı pencere kaydırma yöntemiyle arttırılmıştır. Bunun için zaman serisinin başından alınan pencere 10 yıl kaydırılarak pencere sayısı arttırılmıştır. Her bir 120 yıllık pencere için yineleme matrisi oluşturabilmek adına her bir pencere 4 yıllık küçük pencerelere bölünmüştür. Bu küçük pencereler arasındaki metrik uzaklık, Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Metrik uzaklık hesabında yer alan parametreler daha önceki analizlerde olduğu gibi Denklem 3.3a ve 3.3b kullanılarak hesaplanmıştır. Söz konusu zaman serisi için λ_S parametre değeri 1.02 olarak bulunmuştur. Metrik uzaklık için gereken parametreler tes-

pit edildikten sonra yineleme matrisi oluşturabilmek için eşik değeri $\epsilon = 2\sigma_D$ olarak alınmıştır.

Doğal zaman serisi analizlerinde rejim geçişlerini tespit edebilmek, yapay zaman serilerine göre daha zordur. Çünkü yapay zaman serilerinde sistemin zamanla nasıl evrildiğini veren denklemler olduğu için sistemin rejim geçişlerinin hangi parametre değerleri için olduğu bilinmektedir. Fakat doğal zaman serilerinde herhangi bir denklem olmadığından dolayı sistemdeki geçişleri tespit edebilmek için güven aralığı vermek gerekmektedir. Bu güven aralığının dışında kalan determinizm değerlerinin bulunduğu zamanlarda sistemde rejim değişikliği olduğu söylenir. Bu rejim değişiklikleri sıra dışı olayları yansıtmaktadır. Analizlerimize güven aralığı verebilmek adına bootstrapping yöntemi kullanılmıştır (Schinkel et al., 2008). Bu yöntemde yineleme grafiğini oluşturan köşegen yapılar dikkate alınır. Yineleme grafiğindeki tüm köşegen yapılar uzunluklarına göre olasılıkları alınır ve rastgele köşegen seçimi yapılarak 1000 defa analiz tekrarlanır. Elde edilen 1000 yineleme grafiğinden 1000 adet determinizm niceliği hesaplanarak kümülatif dağılımı çizdirilir. Elde edilen dağılımın başından ve sonundan %5 e tekabül eden determinizm niceliği değerleri alınarak %90 güven aralığı tespit edilir.

Şekil 3.6'da Dayu Mağarası'ndan elde edilen veriler için determinizm niceliği sonuçları verilmektedir. Şekil 3.6(a)'da $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranları verilmektedir. Dikey gri çizgiler Dayu Mağarası'nda yer alan yazıtlardaki kuraklık rejiminin baskın olduğu yıllardır. Şekil 3.6(b)'de ise determinizm niceliği sonuçları verilmektedir. Şekildeki gölgeli bölge bootstrapping yöntemiyle elde edilen güven aralığını vermektedir. Bölgenin dışında kalan determinizm niceliği eğrisinin olduğu yıllarda bölgede sıra dışı olayların olduğu düşünülmektedir.

Sonuçlara bakıldığı takdirde 11 tane sıra dışı olay bulunmuştur. Güven aralığının altında kalan determinizm niceliği değerleri, bölge halkının kanıt olarak bıraktığı yazıtlarda yer alan kuraklık rejimlerine karşılık gelmektedir. Bu kuraklık olaylarından bir tanesi (1756 yılı) hariç hepsi düşük determinizm niceliği değerleri ile analiz sonuçlarına yansımıştır. Bunun dışında bölgede 1908 yılında gerçekleşmiş olan kuraklık rejiminin etkin olduğu tespit edilmiştir. Bu olay hakkında, yazıtlarda her hangi bir bilgi olmamasına rağmen söz konusu kuraklık dönemi bölgede gerçekleşen önemli kuraklık dönemine karşılık gelmektedir (Tan et al., 2008).

Determinizm niceliği sonuçlarına bakıldığı takdirde yaklaşık olarak 1500 yıllarında yüksek determinizm niceliği değerlerinin ani bir şekilde düşük değerlere indiği görülmektedir. Bu dönem, 1900 yıllarına kadar devam eden Küçük

Buz Çağı ile ilgilidir ve aşırı soğuk kış dönemini işaret etmektedir. Küçük buz çağı sırasında, Sibirya'nın yükseklerinden gelen soğuk ve kuru hava kuzeyden Çin'e girerek etkilemiştir (Matthews and Briffa, 2005). 1500 yılından önce 4 sıra dışı olayın bölgede gerçekleştiği görülmektedir. Bu olaylar yüksek determinizm niceliğine sahip olduğundan dolayı, bölgede gerçekleşen güçlü muson etkisine karşılık geldiği düşünülmüştür. Fakat literatüre bakıldığı takdirde bu olaylardan iki tanesi (1320 ve 1420) güçlü muson etkisi ile ilişkili iken, 1350 ve 1470 yıllarında gerçekleşen olaylar zayıf muson etkisini karşılık gelmektedir (Zheng et al., 2006). Söz konusu iki olay, düşük ve yüksek determinizm niceliği değerlerinin sırasıyla zayıf ve güçlü muson rejimine karşılık geldiğini söylemek için belirsizlik yaratmıştır.





4. DÖNÜŞÜM MALİYET ZAMAN SERİSİ YÖNTEMİ

Bu bölümde eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerini eşit zaman aralıklı hale getirebilmek için Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi (TACTS) ortaya atılmıştır. Bu yöntem kullanılarak düzgün olmayan yapay ve doğal zaman serileri düzenli hale getirilmiş ve yineleme grafiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yöntemin temelinde metrik uzaklık vardır. Yöntem ilk olarak yapay sistemler üzerinde denendikten sonra doğal zaman serisi analizlerinde kullanılmıştır.

4.1 Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi Yöntemi

Kaos teorisinin ortaya çıkışı ile birlikte karmaşık yapıya sahip sistemlerin analizlerine oldukça fazla ilgi gösterilmiştir. Bu analizler için doğrusal ve doğrusal olmayan bir çok analiz yöntemi, özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimiyle birlikte literatürde yer almıştır. Dinamiği hakkında henüz tam olarak bilgi sahibi olmadığımız karmaşık yapıya sahip sistemlerin, dinamiğini anlayabilmek için bu analiz yöntemlerinden faydalanılır. Her ne kadar birçok analiz yöntemi mevcut olsa da, bu analiz yöntemlerinin çoğu için gerekli koşullardan biri, zaman serisinin örnekleme zamanlarının eşit olmasıdır (Eroglu et al., 2016). Eğer ilgili sistemin zaman serisi eşit zaman aralıklı değil ise bu yöntemlerden faydalanılamaz. Söz konusu sorunu aşabilmek için literatürde yaygın olarak kullanılan yöntem interpolasyon yöntemidir. Bu yöntemde zaman serisinin dağılımından faydalanılarak, zaman serisindeki boşluklar dışarıdan noktalar konularak zaman serisi eşit zaman aralıklı hale getirilir. Her ne kadar zaman serisinin dağılımından faydalanılsa da sisteme dışarıdan müdahale edildiği için interpolasyon yöntemi sistemin dinamiği hakkında bilgi kaybına sebep olmaktadır (Rehfeld et al., 2011).

Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemi, sistemin tamamen iç dinamiğinden faydalanılarak eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerini, eşit zaman aralıklı hale dönüştüren bir yöntemdir. Bu yönteminin temelinde Victor ve Purpura'nın ortaya koymuş olduğu metrik uzaklık yatmaktadır. Bir önceki bölümde metrik uzaklığın nasıl ortaya atıldığı ve büyüklüğe sahip veriler için Suzuki vd. tarafından nasıl geliştirildiğinden detaylı bir şekilde bahsedil-

miştir. Bu bölümde ise eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerinin, interpolasyon kullanmadan nasıl eşit zaman aralıklı hale getirildiğinden bahsedilecektir.

Dönüşüm maliyet zaman serisi yönteminin ortaya atılmasının sebebi paleoikim verilerinin analizi sırasında karşılaşılan iki zorluktur. Bunlardan biri yukarıda belirtildiği gibi zaman serisinin örneklemeleri eşit zaman aralığına sahip olmaması diğeri ise örneklerin belirli bir eğilime sahip olmasıdır. Paleoikim verileri mağaralarda binlerce yıl boyunca oluşan sarkıklardan belirli bir işlem sonucunda elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopu oranlarıdır. Elde edilen bu veriler binlerce yıl boyunca birbirlerini etkilemekte ve bir eğilime sahip olmaktadır. Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemi bu istenmeyen katkıyı da azaltmaktadır (Ozken et al., 2015).

Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemini uygulamak için elimizde N tane veriye sahip bir zaman serisi düşünelim ve bu zaman serisi $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ ile temsil edilsin. Ayrıca zaman serisi zaman bakımından düzensiz olsun ($t_{i+1} - t_i \neq a$). Burada a sabit bir sayıdır. Daha önceden bahsedildiği gibi, söz konusu zaman serisinin analizini gerçekleştirebilmek için eşit zaman aralıklı hale getirmemiz gerekmektedir. Bunun için zaman serisi eşit uzunluktaki pencerelere bölünür ve her bir ardışık pencere arasındaki metrik uzaklık Denklem 3.4'ten faydalanılarak hesaplanır. Eğer her bir pencere W_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) ile temsil edilirse, $p(W_1, W_2), p(W_2, W_3), p(W_3, W_4), \dots, p(W_{n-1}, W_n)$ ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklık hesaplanır. Ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklık yeni zaman serimizin büyüklükleri, her bir ardışık pencerenin zaman bakımından ortalaması ise yeni zaman serimizin zamanları olmaktadır. Böylece eşit zaman aralığına sahip dönüşüm maliyet zaman serisi elde edilir.

4.1.1 Uygulama

Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemiyle ilgili genel bilgiler verildikten sonra, yöntemin çalışırılığını test edebilmek için bir önceki bölümde de olduğu gibi Logistik map ve Rössler salıncısı tercih edilmiştir. Söz konusu sistemler için bilinen rejim geçişleri, dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemi ile yeniden yapılandırılan zaman serileri üzerinde yineleme grafiği analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda rejim geçişleri tespit edilmiştir. Yöntemin çalışırılığı anlaşıldıktan sonra doğal zaman serisi analizleri yapılmıştır.

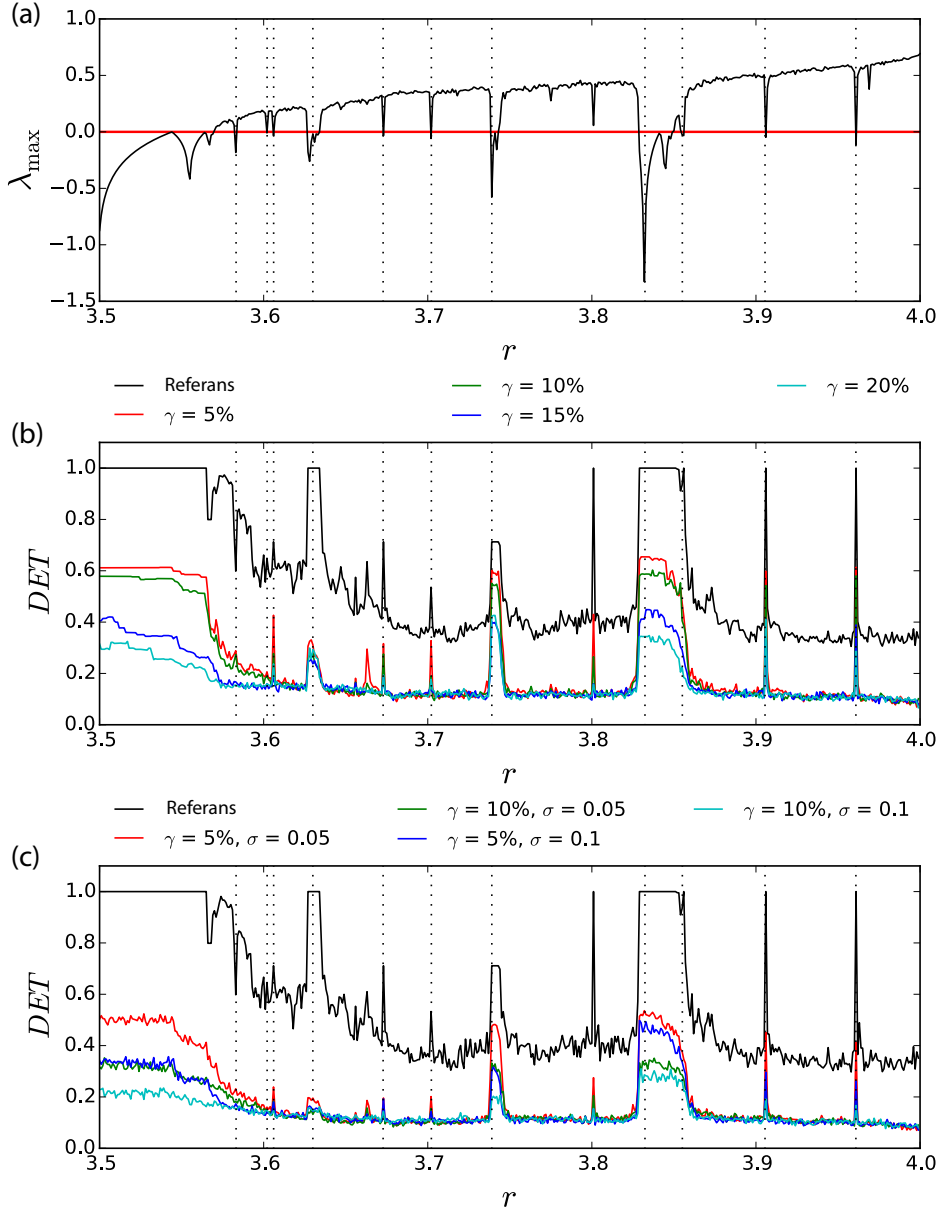
4.1.1.1 Logistik Map

Logistik map analizleri için daha önce metrik uzaklık kullanılarak yapılan analizlerdeki r parametre aralığı olan $r \in [3.5, 4]$ tercih edilmiştir. Denklem 3.5'ten faydalanarak her bir parametre değeri için 3000 iterasyon yapılmış ve bu verilerden ilk 1000 tanesi sistemin dengeye gelmesi için silinmiştir. Sonuç olarak her bir parametre değeri için 2000 veri üzerinden analizler yapılmıştır.

Eşit zaman aralığına sahip Logistik map zaman serilerinden rastgele 100 ($\gamma = \%5$), 200 ($\gamma = \%10$), 300 ($\gamma = \%15$), 400 ($\gamma = \%20$) nokta silinerek eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serileri üretilmiştir. Eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerini elde edildikten sonra, dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemiyle eşit zaman aralıklı hale getirilmiştir. Bunun için her bir zaman serisini 4 birim zaman büyüklüğe sahip pencerelere bölünmüş ve her bir ardışık pencere arasındaki metrik uzaklık hesaplanmıştır. Metrik uzaklık hesabı yapabilmek için gerekli olan λ_0 ve λ_k parametreleri, Denklem 3.3a ve 3.3b kullanılarak hesaplanmıştır. λ_S parametresi için ise $\lambda_S \in [0, 4]$ aralığında 0.01 duyarlılıkla değiştirilerek uygun olan λ_S değeri hesaplar için alınmıştır. Farklı γ silinme oranları için bulunan λ_S değerleri sırasıyla 1.07 ($\gamma = \%5$), 1.04 ($\gamma = \%10$), 0.95 ($\gamma = \%15$), 0.93 ($\gamma = \%20$) tür. Bu değerlerin ortalamasına bakılırsa $\lambda_S \approx 1$ olmaktadır.

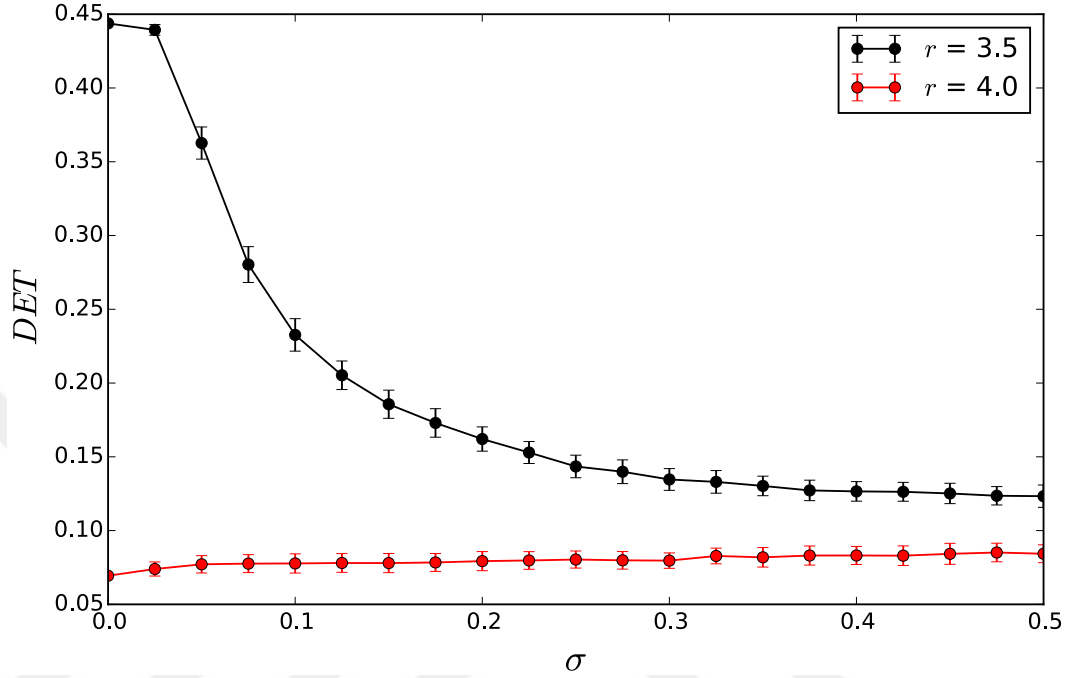
Zaman serileri, dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemiyle eşit zaman aralıklı hale getirildikten sonra, yineleme matrisini oluşturmak için eşik değeri, $\epsilon = 0.08$ olarak alınmış ve her bir parametre değeri için determinizm niceliği hesaplanmıştır. Şekil 4.1(a)'da Logistik Map için Lyapunov üsteli sonuçları verilmektedir. Logistik map analizlerinin sonuçları Şekil 4.1(b)'de verilmektedir. Şekilde siyah çizgi ile verilen determinizm niceliği sonuçları orijinal logistik map zaman serisi içindir. Kırmızı, yeşil, mavi ve cam göbeği renkleriyle verilen sonuçlar ise sırasıyla $\gamma = \%5, \%10, \%15$ ve $\%20$ oranlarında veri silinmiş zaman serileri için determinizm niceliği sonuçlarıdır. Şekil 4.1(b) incelendiği takdirde artan silinme oranlarına rağmen rejim geçişlerinin tespit edilebildiği görülmektedir. Her ne kadar artan silinme oranlarıyla birlikte determinizm niceliği değerleri düşüş gösterse de, rejim geçişlerinin olduğu parametre değerlerinde atmalar açık bir şekilde görülebilmektedir.

Logistik map için yapılmış olan ikinci analiz için daha önceki logistik map analizinde de olduğu gibi belirli bir gürültü seviyesi ile Gaussiyen beyaz gürültü eklenmiştir. Silinme oranları $\%5$ ve $\%10$ olan zaman serilerine $\sigma = 0.05$ ve $\sigma = 0.1$ oranlarında gürültü eklenmiştir. Bu dört ve orijinal zaman serisi için yapılan analizlerin sonucu Şekil 4.1(c)'de verilmektedir. Siyah renkle verilen sonuçlar



Şekil 4.1: Logistik map için determinizm niceliği sonuçları: (a) Logistik map için Lyapunov üsteli; (b) Çeşitli oranlarla veri silinmiş zaman serilerinden elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları; (c) Hem çeşit oranda veri silinmiş hem de belirli seviyelerde gürültü eklenmiş serilerden elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileri için determinizm niceliği sonuçları. Dikey gri kesikli çizgiler rejim değişikliği olan parametre değerlerini göstermektedir.

orijinal zaman serisi içindir. Çeşitli silinme oranları ve gürültü seviyesine sahip zaman serileri için yapılan analizler sonucunda sistemdeki rejim geçişleri tespit edilmiştir.

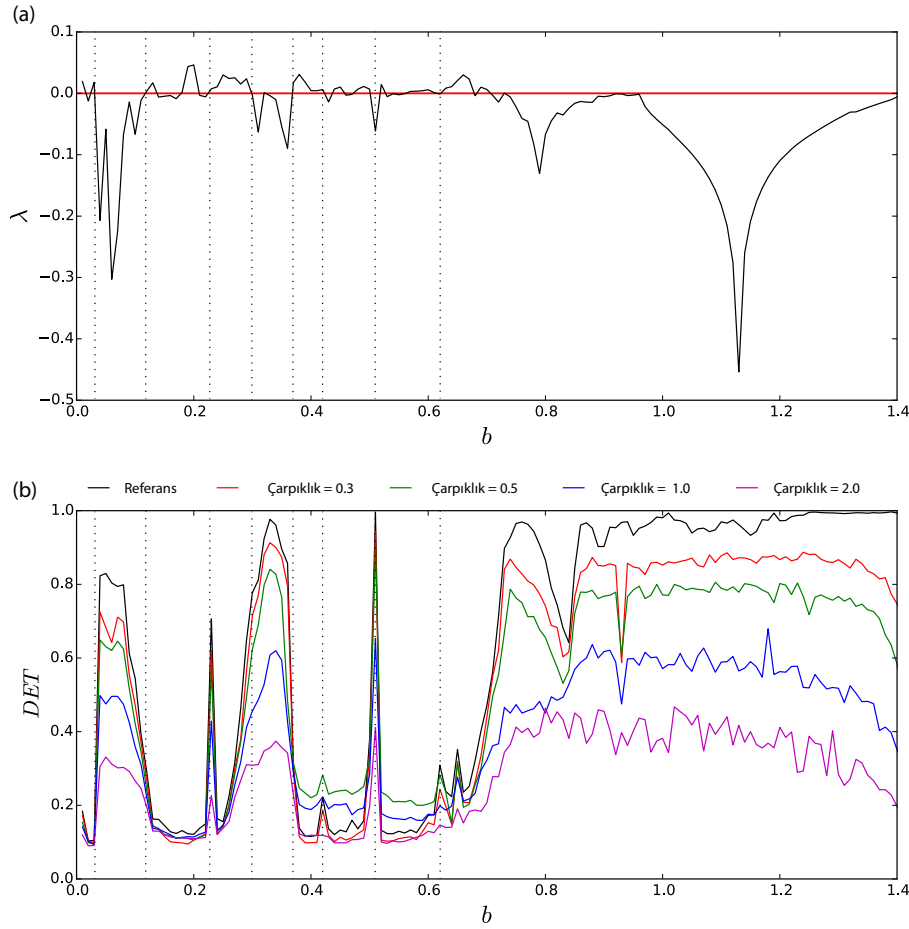


Şekil 4.2: r parametre değeri 3.5 (periyodik durum, siyah çizgi) ve 4.0 (kaotik durum, kırmızı çizgi) için gürültü seviyesi $\gamma = \%10$ ile gürültü eklenmiş durumların determinizm niceliği karşılaştırması.

Geliştirilmiş olan dönüşüm maliyet zaman serisinin, belirli bir gürültü seviyesine sahip olan zaman serilerinde bile rejim geçişlerini tespit edebildiği görüldükten sonra Logistic map için $r = 3.5$ (periyodik) ve $r = 4.0$ (kaotik) durumlarında artan gürültü seviyelerine karşılık elde edilen determinizm niceliği sonuçları incelenmiştir. Gürültü seviyesi $\sigma \in [0, 0.5]$ aralığında $\Delta\sigma = 0.01$ duyarlılıkla değiştirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde tüm gürültü seviyeleri için 100 adet $\gamma = \%10$ silinme oranına sahip olan zaman serisi üretilmiş ve determinizm nicelikleri hesaplanarak ortalamaları alınmıştır. Şekil 4.2'de kırmızı ve siyah renklerle ifade edilen sonuçlar sırasıyla $r = 4.0$ ve $r = 3.5$ parametre değerleri içindir. Noktalarda bulunan hata payları, analizlerin 100 zaman serisi üzerinden yapılmasından dolayı determinizm niceliğinin standart sapmalarını vermektedir. Artan gürültü seviyelerinde bile iki uç durumun (periyodik ve kaotik) açık bir şekilde birbirlerinden ayırt edilebildiği görülmektedir.

4.1.1.2 Rössler salıncısı

Rössler salıncısının analizlerinde, bir önceki bölümdeki Rössler uygulaması için tercih edilen parametre değerleri kullanılarak veriler üretilmiştir. Eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serisi elde edebilmek adına yine y bileşeninden 5000 adet maksimum nokta ($\tilde{y}$) alınmıştır. Elde edilen ($\tilde{y}$) zaman serisi, sırasıyla $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 çarpıklık değerleri kullanılarak zaman bakımından gama dağılımına uydurulmuştur. Böylece paleoklim verilerinin genellikle



Şekil 4.3: Rössler salıncısı için determinizm niceliği sonuçları; (a) Rössler salıncısı için Lyapunov üsteli, (b) Dönüşüm maliyet zaman serisi için hesaplanan determinizm niceliği sonuçları

zaman bakımından gama dağılımına uyması olgusu analizlere yansıtılmıştır. Elde edilen zaman serilerinden dönüşüm maliyet zaman serisi elde edebilmek adına zaman serileri 3500 birim zamanlık eşit büyüklükteki pencerelere bölünmüştür. Her bir ardışık pencere arasındaki metrik uzaklıklar Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Metrik uzaklık hesabı için gerekli olan paramet-

reler, Denklem 3.3a ve 3.3b kullanılarak elde edildikten sonra λ_S parametresi $\lambda_S \in [0, 4]$ aralığında $\Delta\lambda_S = 0.01$ duyarlılıkla taranarak en uygun parametre değeri tespit edilmiştir.

Farklı çarpıklık dereceleri ile bozulan zaman serilerinden elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileri için yineleme matrisini oluşturabilmek adına eşik değerini $\epsilon = 0.05$ olarak alınmış ve farklı çarpıklık değerlerine sahip zaman serileri için determinizm niceliği hesaplanmıştır. Bu analizlerle ilgili sonuçlar Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3(a)'da Rössler salıncısının rejim geçişlerini görebilmek için Lyapunov üsteli sonuçları verilmektedir. Şekil 4.3(b)'de ise farklı çarpıklık değerlerine sahip Rössler salıncısı zaman serilerinin dönüşüm maliyet zaman serileri için hesaplanan determinizm nicelikleri yer almaktadır. Siyah çizgi ile gösterilen sonuçlar orjinal zaman serisi için determinizm niceliği sonuçlarını göstermektedir. Çarpıklık değerleri $s = 0.3, 0.5, 1.0$ ve 2.0 ile bozulmuş zaman serilerinin determinizm niceliği sonuçları ise sırasıyla kırmızı, yeşil, mavi ve pembe renkler ile verilmiştir. Yapılmış olan analizler sonucunda beklenildiği gibi artan çarpıklık değerleri ile determinizm niceliği değerleri düşüş eğilimine girmiştir. Bunun sebebi zaman serisindeki bozukluğun artmasıdır. Her ne kadar zaman serisindeki bozukluk artmış olsa da Rössler salıncısı için rejim geçişleri tespit edilmiştir. Bu sonuç sürekli yapıya sahip sistemler için de dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemini kullanabileceğimiz anlamına gelmektedir.

4.1.1.3 Paleoiklim uygulamaları

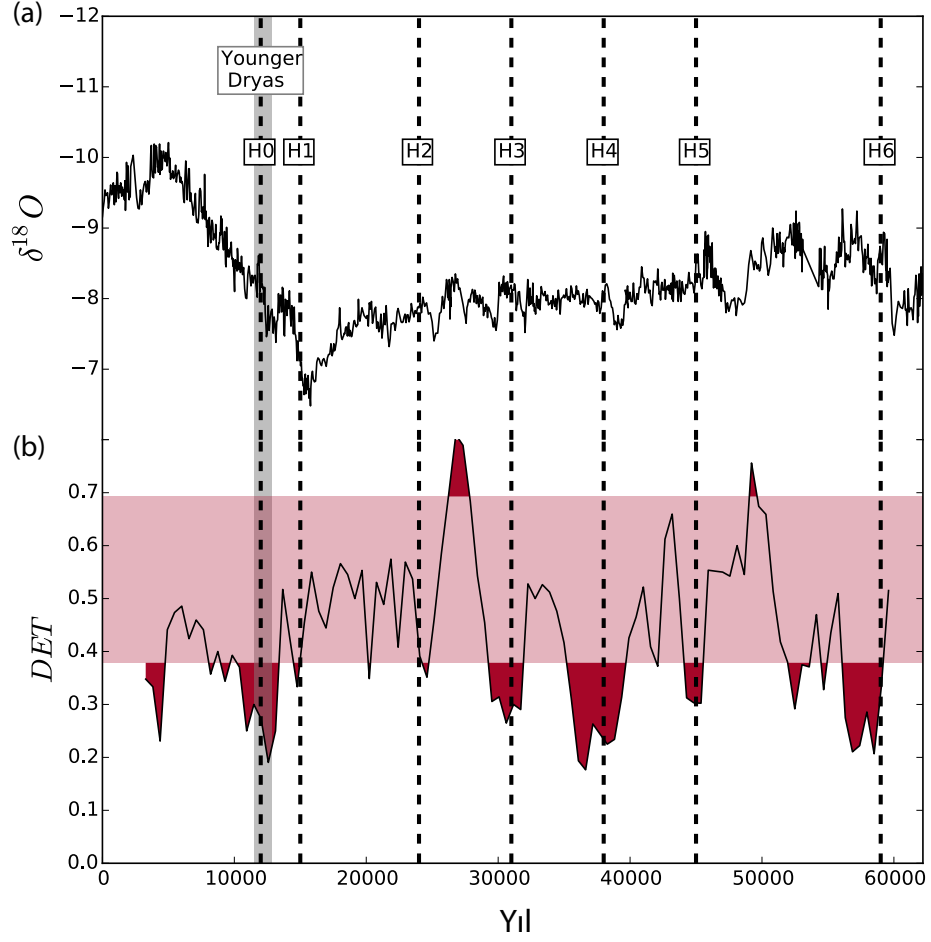
Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemini doğal zaman verilerinde uygulamak için Endonezya'nın Borneo şehrinde Gunung Mulu'da yer alan Secret Mağarasından ($4^\circ K, 115^\circ D$) alınan sarkıklardan kaydedilmiş $\delta^{18}O$ izotop oranları seçilmiştir (Carolin et al., 2013). Bu kayıtlar yaklaşık olarak 100000 yıllık olmasına rağmen son 62000 yıllık veri kullanılmıştır. Bunun sebebi 62000 yıldan önceki verilerin çok fazla eksik ve oldukça düzensiz olmasıdır. Bu veriler Avusturalya-Endonezya muson yağmurlarını anlayabilmemiz için iyi bir araçtır. Söz konusu zaman serisi yaklaşık olarak 1200 veriden meydana gelmektedir. Zaman serisinin zaman bakımından dağılımına bakıldığında, sistemin gama dağılımına uyduğu ve çarpıklık derecesinin ise 4.9 olduğu tespit edilmiştir. Zaman serisini yeniden yapılandırmak için pencere boyutu 210 yıl olarak alınmış ve dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemiyle yeni zaman serisi meydana getirilmiştir. Bu dönüşüm sırasında sisteme ait ekleme ve silme maliyeti $\lambda_S = 1.07$ olarak hesaplanmıştır.

Yapay sistemlerde olduğu gibi doğal zaman serilerinde rejim geçişlerini tespit edebilmek için her hangi bir kontrol parametresi olmadığından dolayı rejim geçişlerini tespit edebilmek adına zaman serisi eşit uzunluktaki kayan pencerelere bölünerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem hem rejim geçişlerinin zamanını bulmakta hem de veri sayısı az olan zaman serilerindeki veri sayısını arttırmak için çok elverişlidir. Analiz için pencere büyüklüğü, dönüşüm maliyet zaman serisinde ortalama 30 veriyi kapsayacak şekilde ayarlanmış ve veri sayısını arttırmak adına pencereler %10 oranında kaydırılarak veri sayısı arttırılmıştır. Dönüşüm maliyet zaman serisinde 30 veri paleoiklim zaman serisinde yaklaşık olarak 100 ile 140 veriye, pencere boyutu ise yaklaşık olarak 6200 yıla tekabül etmektedir.

Her bir pencerenin yineleme matrisini oluşturmak için eşik değeri, dönüşüm maliyet zaman serimizin standart sapmasının %20'i olarak alınmıştır. Sistemdeki rejim geçişlerini görebilmek için bootstrapping yöntemi kullanılarak %90 güven aralığı elde edilmiştir. Bu güven aralığının dışında kalan determinizm niceliği eğrisinin bulunmuş olduğu yıllarda, sistem normal davranışının dışına çıkmıştır. Bu geçişler doğal sistemlerde meydana gelen sıra dışı olaylara karşılık gelmektedir.

Şekil 4.4(a)'da $\delta^{18}O$ izotoplarının zaman serisi, Şekil 4.4(b)'de ise dönüşüm maliyet zaman serisinin determinizm niceliği sonuçları verilmektedir. Bu grafikte görülen H1 den H6 ya kadar olan kesikli çizgiler Henrich olaylarını temsil etmektedir. Henrich olayları sırasında buzulların erimesi sonucunda Atlantik okyanusuna bol miktarda su katkı yapmıştır (Pausata et al., 2011). Bu olay okyanusların soğuması sebep olmuştur ve bunun sonucunda okyanuslar üzerinden gelen soğuk hava akımı Muson rejimi dinamiğinde etki yapmıştır. Bu olaylar, analizlerimizde düşük determinizm niceliği değerleri ile tespit edilmiştir. Kuzey yarım küredeki soğuk hava periyodu olarak geçen Younger Dryas dönemi, Kuzey Amerika buz tabakasının çökmesine sebep olmuş olabilir ve analizler sonucunda bu olay da tespit edilmiştir. Ayrıca bu olayların dışında yapmış olduğumuz analiz sonucunda H2-H3 ve H5-H6 arasında literatürde geçmeyen olaylar bulunmuştur.

Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemi kullanılarak yapılan bir başka analiz, Avustralya'nın kuzey batı sınırında yer alan KNI-51(15.30° G, 128.61° D) ile Çin'in güneyinde yer alan Dongge (25.28° K, 108.08° D) mağaralarından (4.5) elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranları için yapılmıştır(Denniston et al., 2013) (Hu et al., 2008) (Wang et al., 2013). Her iki zaman serisi de son 9000 yılı kapsamaktadır ve örnekleme zamanları eşit değildir. KNI-51 zaman serisinde 1432, Dongge zaman serisinde 2125 adet veri bulunmaktadır (Şekil 4.6). Zaman

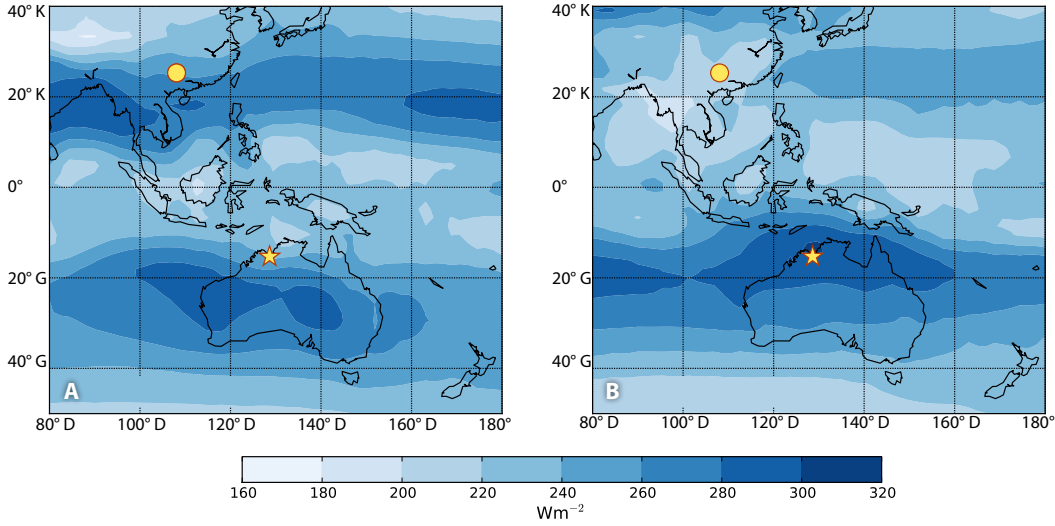


Şekil 4.4: (a) Secret Mağarası'ndan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopları verileri, (b) Determinizm niceliği sonuçları

serilerini eşit zaman aralıklı hale getirebilmek için dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4.6'nin alt kısmında yer alan zaman serileri her iki sistem için elde edilen dönüşüm maliyet zaman serileridir.

Dönüşüm maliyet zaman serisi elde edebilmek için bir önceki analizdeki yol izlenmiştir. Bunun için ilk olarak her iki zaman serisi de 20 yıllık pencere-
lere bölünmüş ve ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklık hesaplanmıştır. Ekleme ve silme maliyetini veren parametre λ_S , KNI-51 için 1.09, Dongge için 1.03 olarak bulunmuştur.

Dönüşüm maliyet zaman serileri elde edildikten sonra yineleme grafiği analizlerine geçilmiştir. Bu analiz için her bir dönüşüm maliyet zaman serisi-
nin başından 400 yıllık pencere alınmış ve %10 oranında kaydırılarak pencere sayısı arttırılmıştır. Her bir pencerenin yineleme matrisini oluşturmak için eşik değeri, yineleme grafiğini oluşturan noktaların yoğunluğunun %15'i olarak alın-

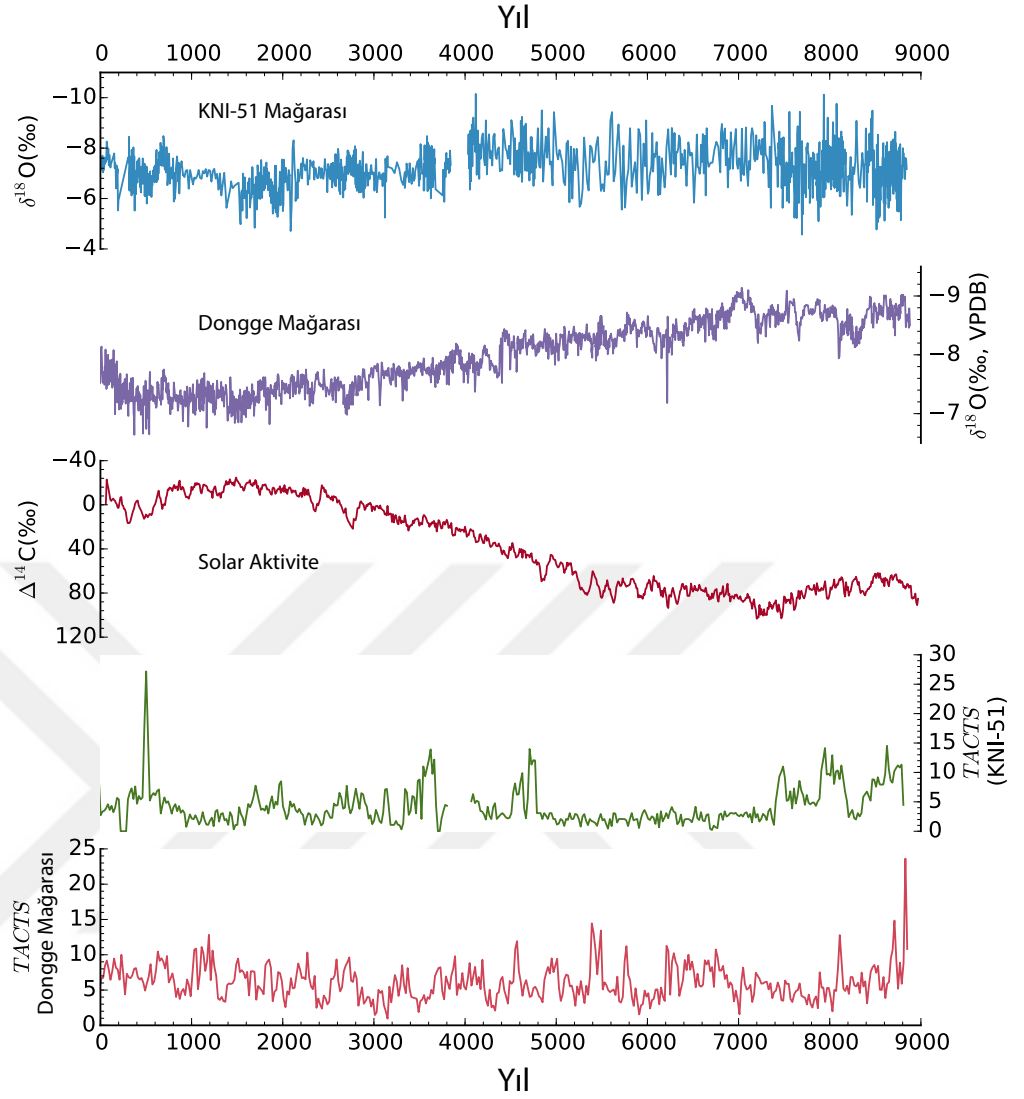


Şekil 4.5: KNI-51 ve Dongge Mağaralarının Coğrafik Konumları

mıştır. Oluşturulan her bir yinleme matrisi için hesaplanan determinizm niceliği sonuçları Şekil 4.7’te verilmektedir. Şekil 4.7(a)’da KNI-51, Şekil 4.7(b)’de Dongge mağaraları için determinizm niceliği sonuçları verilmektedir. Her iki şekilde de verilen gölgeli bölge ilgili zaman serisi için bootstrapping yöntemiyle elde edilen %90 güven aralığını simgelemektedir. Determinizm niceliği eğrisinin bu bölgelerin dışarısına çıktığı yıllarda bölgelerde sıradışı olaylar meydana gelmiştir.

Şekil 4.7’te her iki bölge için verilmiş olan sonuçların üzerinde bölgelerle ilgili yapılmış çalışmaların ve analiz sonuçlarına göre bölgelere hakim olan kuraklık (kahverengi) ve yağış rejimleri (mavi) gösterilmiştir. KNI-51 için literatürde iki adet çalışma vardır. Bu çalışmalar McGowan vd. (McGowan et al., 2012) ve Denniston vd. (Denniston et al., 2013) tarafından yapılmıştır. Dongge için yapılan iki çalışmadan ilki Wang vd. (Wang et al., 2013) tarafından gerçekleştirilmiş ve Hu vd. (Hu et al., 2008) tarafından Wang vd.’nin yapmış oldukları çalışmayı detaylandırmışlardır .

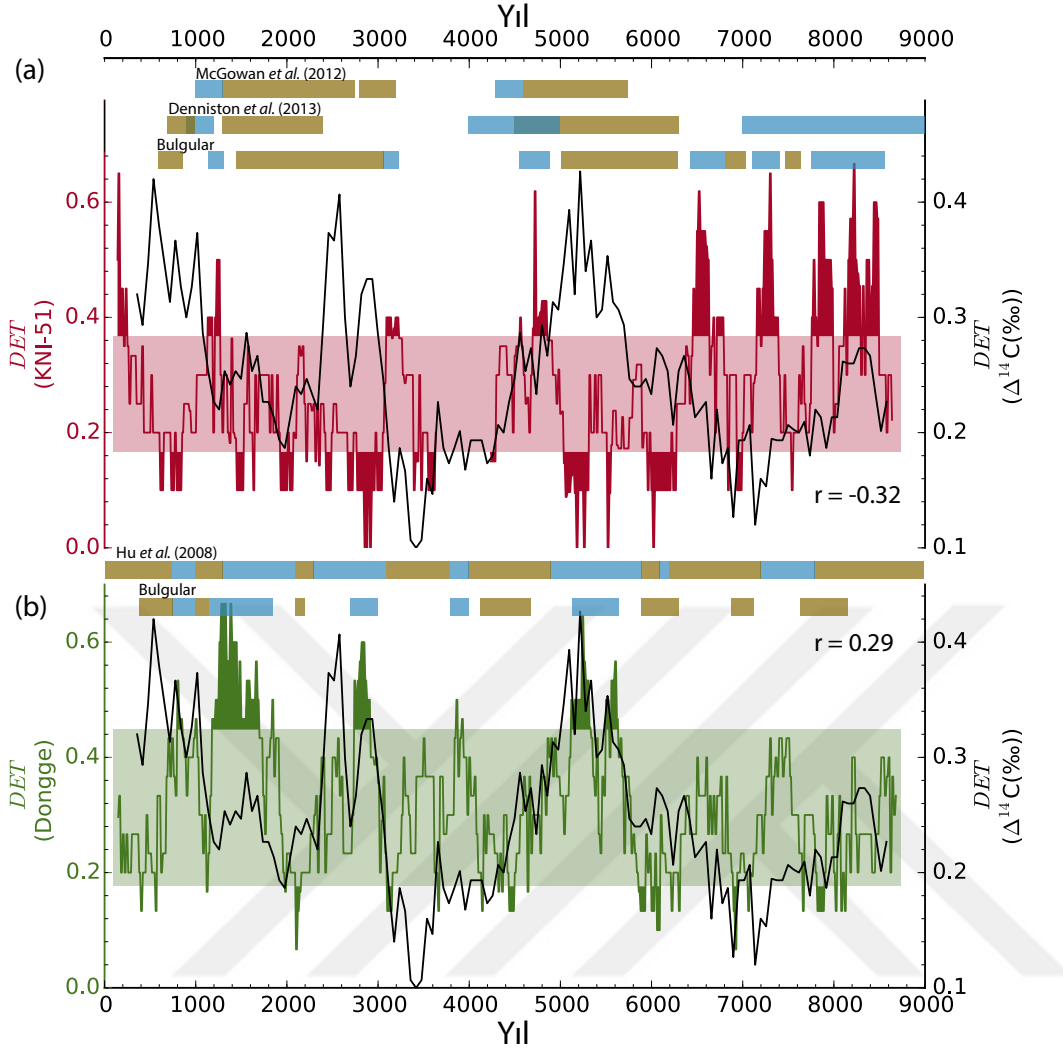
Analizlerimiz sonucunda KNI-51 için 8500 – 6400, 5000 – 4000 ve 1300 – 900 yılları arasında yağış rejiminin baskın olduğu, 6300 – 5000, 3000 – 1400 ve 900 – 0 yılları arasında ise kuraklık rejiminin etkin olduğu söylenebilir. Sonuçlarımız literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında %90 oranında uyum sağlamaktadır. 6600 – 6400 yılları arasındaki yağış ve 7000 – 6800 yılları arasında tespit edilen kuraklık rejimleri Denniston vd. tarafından yapılan çalışmada mevcut değildir. Denniston vd.’nin sonuçlarıyla ters düşen iki sonucumuz ise 3200 – 3100 yılları arasında yağış, 7600 – 7500 yılları arasında kuraklık rejimleridir.



Şekil 4.6: KNI-51 ve Dongge mağaralarından elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen ve Kuzey yarım küreden elde edilen $\Delta^{14}C$ karbon izotop oranlarının zaman serileri. KNI-51 ve Dongge mağaraları için dönüşüm maliyet zaman serileri

Dongge Mağarası içi yapılan analizler sonucunda, bölgede 8200 – 7600, 7100 – 6900, 6400 – 5800, 5000 – 4000, 2200 – 2000 ve 700 – 400 yılları arasında kuraklık rejimi, 7600 – 7200, 5800 – 5000, 3000 – 2200, 1900 – 800 yılları arasında ise yağış rejimi etkindir. Analizlerin sonucunda tespit edilen 7500 – 7600 ve 6100 – 6200 yılları arasındaki kuraklık rejimi, bölge için Hu vd. tarafından yapılmış olan çalışmayla örtüşmemektedir. 3200 – 3400, 6300 – 6900 ve 8200 – 8800 yılları arasında yağış rejiminin baskın olduğu bulunmuş olan sonuçlar Hu vd.lerinin sonuçlarıyla örtüşmemektedir.

Her iki sistemin dinamiğini gösteren determinizm niceliği sonuçlarının birbirleriyle olan çapraz korelasyonu -0.27 olarak bulunmuştur. Sonuçlara ba-



Şekil 4.7: (a) (kırmızı) KNI-51 ve (b) (yeşil) Dongge Mağarası'nın dönüşüm maliyet serisi için determinizm niceliği sonuçları. Grafiklerin üstlerinde yer alan mavi ve sarı bantlar önceki çalışmalarda ve bu çalışmada yağışın çok ve az olduğu durumları ifade etmektedir. (Siyah) $\Delta^{14}C$ 'ün determinizm niceliği sonuçlarını vermektedir. $\Delta^{14}C$ zaman serisinin determinizm niceliği sonuçları ile KNI-51 ve Dongge Mağarası zaman serilerinin determinizm niceliği sonuçları arasındaki çapraz korelasyon sırasıyla $r = -0.32$ ve $r = 0.29$ dur.

kıldığı takdirde Kuzey yarım kürede yer alan Dongge ile Güney yarım kürede yer alan KNI-51 mağaraları için az da olsa ters korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar literatürde yaygın bir kanıyla örtüşmektedir. Farklı iki yarım kürenin muson yağmurlarının ters ilişkili olduğu söylenmektedir. Yapılmış olan korelasyon hesabı sonrasında her iki sistemin dinamiğinin anti fazda olduğu ve literatür ile uyduğu gözlemlenmiştir.

Bu sonucu güçlendirebilmek adına Kuzey yarım küreden elde edilen solar aktivite zaman serisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda güneşin pozisyonu ile muson rejiminin değiştiği ve güneşin muson re-

jimini sürdürdüğü söylenmektedir (Wang et al., 2013). Bu kanıyı analizlerimize yansıtılabilmek için solar aktivite verisi olarak kullanılan $\Delta^{14}C$ izotop oranları ele alınmıştır (An et al., 2012). Söz konusu zaman serisi yaklaşık olarak 9700 yıllık ve eşit zaman aralıklıdır (Şekil 4.6). Bu sebepten dolayı dönüşüm maliye zaman serisi yöntemini kullanmaya gerek duyulmamıştır. İlgili zaman serisinin determinizm niceliği sonuçları Şekil 4.7’te siyah renk ile verilmiştir. Solar aktivite sonuçları ile NKI-51 ve Dongge mağaralarından elde edilen sonuçlar arasındaki korelasyon hesabı yapılarak her iki bölgede etkili olan muson rejiminin güneşin pozisyonuyla ilişkilendirilmiştir. Bu korelasyon hesabı için gaussien kernel çapraz korelasyonu kullanılmıştır. Bunun sebebi $\Delta^{14}C$ zaman serisi ile $\delta^{18}O$ zaman serilerinin determinizm niceliği sonuçlarının aynı zaman aralığında olmamasıdır.

Bu tekniğin temelinde farklı iki zaman serisini ağırlık fonksiyonu kullanarak eşleştirmek vardır. Klasik çapraz korelasyonda iki zaman serisinde bulunan noktaların çarpımlarının toplamını alırken, bu teknikte bir zaman serisindeki nokta diğer zaman serisindeki tüm noktalarla ağırlık fonksiyonu kullanılarak çarpılır. Bu ağırlık fonksiyonu gözlemlerin olduğu zamanlar arasındaki uzaklık ile ilişkilidir. Kernel çapraz korelasyon;

$$\hat{\rho}_{x,y} = \frac{\sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} x_i y_j b(t_j^y - t_i^x)}{\sum_i^{N_x} \sum_j^{N_y} b(t_j^y - t_i^x)} \quad (4.1)$$

denklemi ile verilir. Burada $b(t_j^y - t_i^x)$ kernel’dir ve x_i ile y_j gözlemlerinin ne kadar ağırlık ile çarpılacağını iki gözlem arasındaki zaman farkıyla ilişkilendirmektedir. Kernel;

$$b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-|d|^2/2\sigma^2} \quad (4.2)$$

olarak verilmektedir. Burada d , iki gözlem Δt_{ij}^{xy} arasındaki uzaklık ve σ kernel dağılımının standart sapmasıdır. Kernel ölçeklendirme parametresi olarak geçen σ ’nın seçimin için her hangi bir yaklaşım yoktur. Bu çalışmada Rehfeld vd.’nin yapmış olduğu çalışmada kullanmış oldukları $\sigma = \Delta t^{xy}/4$ değeri alınmıştır (Rehfeld et al., 2011).

Yapılan hesaplar sonucunda $\Delta^{14}C$ solar aktivite sonuçları ile kuzey yarım küreden elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotoplarının sonuçları arasındaki çapraz korelasyon 0.29, güney yarım küreden elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotoplarının sonuçları arasında -0.32 dir. Bunun sonucunda kuzey yarım küreden elde edilen sonuçların birbirleriyle az da olsa korele, Güney yarım kürede yer alan KNI-51 sonuçlarıyla az da olsa ters korele olduğu görülmektedir. Sonuçlar bu iki böl-

genin birbirleriyle antifaza sahip olduğu kanısını hakim kılmıştır. Yani kuzey yarım kürede güçlü muson etkili ise Güney yarım kürede zayıf muson etkisi olmaktadır. Bunun sebebi Güneşin pozisyonudur.



5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Zaman serisi analizleri henüz yapısını tam olarak bilmediğimiz karmaşık yapıya sahip olan sistemlerin yapısını anlayabilmek için çok önemlidir. Bunun için birçok analiz yöntemi olmasına rağmen çoğunun uygulanabilmesi için gerekli koşullardan biri zaman serisinin eşit zaman aralıklı olmasıdır. Çünkü analiz yöntemlerinin çoğunun temeli, sistemin yörüngelerinin faz uzayındaki birbirleriyle olan ilişkisini incelemektir ve bu ilişki, birbirleriyle olan uzaklığı hesaplamaktan geçer. Bu uzaklık hesabı, eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serileri için bir problem teşkil eder. Literatürde bu zorluğun üstesinden gelebilmek için yaygın olarak kullanılan yöntem interpolasyon yöntemidir. Bu yöntemle zaman serisinin dağılımından faydalanılarak zaman serisindeki boşluklar doldurulur ve zaman serisi analiz için uygun hale getirilir. Her ne kadar zaman serisinin dağılımdan faydalanılsa da, sisteme dışarıdan müdahale edildiği için sistem hakkında bilgi kaybına sebep olmaktadır.

Tezin ilk kısmında bu sorunu aşabilmek için metrik uzaklık tanımından faydalanılmıştır. Metrik uzaklık veri gruplarının eşit zaman aralıklı olmasına bakmaksızın, iki veri grubu arasındaki uzaklığı ölçebilmektedir. Metrik uzaklık tanımında yer parametreler için seçim kuralları önerildikten sonra, yineleme grafiği analiz yönteminde var olan uzaklık problemi için kullanılmıştır. Metrik uzaklık kullanılarak yapılan, kesikli yapıya sahip olan Logistik map ve sürekli yapıya sahip olan Rössler salıncısı yineleme grafiği analizlerinin sonuçları, her iki sistem için rejim geçişlerini veren Lyapunov üsteli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki sistem için de rejim geçişlerinin hepsinin tespit edilebilmesi, eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerinin analizlerinde metrik uzaklık tanımının kullanılabileceği kanısını hakim kılmıştır. Metrik uzaklığın çalışırılığı, dinamiği iyi bir şekilde bilinen sistemlerde test edildikten sonra karmaşık yapıya sahip olan doğal sistemlerin yineleme grafiği analizlerinde kullanılmıştır. Bunun için Çin’de yer alan Dayu Mağarası’ndan elde edilen ve bölgesel muson rejiminin etkisiyle yakın ilişkili olan $\delta^{18}O$ oksijen izotop oranlarının kayıtları yineleme grafiği analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dayu Mağarası’nda yer alan yazıtlar, bölge halkının belirli yıllarda mağaraya gelip yağmur duası yaptıklarını ortaya koymaktadır. Bu yazıtlarda yer alan yedi kuraklık rejiminin altı tanesi analizlerimizde düşük determinizm niceliği değeri ile tespit edilmiştir. Bunun dışında mağarada her hangi bir kanıt olmamasına rağmen 1908 yılında Çin’de gerçekleşmiş olan büyük kuraklık dönemi analiz-

lerimize yansımıştır. Ayrıca 1500 yılından önceki dönemlerde analizlerimizde yüksek determinizm niceliği değeri ile dört farklı olay tespit edilmiştir. Söz konusu dört olaydan iki tanesi kuraklık, iki tanesi yağış bolluğu olarak literatürde karşımıza çıkmaktadır. Yüksek determinizm niceliği değeri ile kuraklık döneminin tespit edilmesi, kuraklık rejiminin düşük determinizm niceliği değeri ile ilişkili olduğunu söyleyebilmek için belirsizlik yaratmıştır. Ayrıca analizler sonucunda determinizm niceliği değerinin yaklaşık olarak 1500 yılları civarında ani bir şekilde düşüş gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu ani düşüşün sebebi yaklaşık olarak 1500 ile 1900 yılları arasında gerçekleşen Küçük Buzul Çağı ile ilişkilidir.

Tezin ikinci kısmında yer alan ve literatüre kazandırılan Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi (TACTS) yöntemi ile eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serileri, tamamen sistemin iç dinamiğinden faydalanarak eşit zaman aralıklı hale getirmesinin yanı sıra belirli bir eğilime sahip olan zaman serilerindeki istenmeyen bu katkıyı aza indirmektedir. Yöntem, yapay sistemlerin yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek için uygulanmış ve iyi sonuçlar vermiştir. TACTS yöntemi paleoiklim verilerinin analizlerinde uygun olduğunu gösterebilmek için Endonezya'da yer alan Secret Mağarası'ndan elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopu oranlarının zaman serisi üzerinde test edilmiştir. TACTS yöntemi kullanılarak eşit zaman aralıklı dönüşüm maliyet zaman serisi üzerinde uygulanan yineleme grafiği analiz yöntemi ile 62000 yıllık veriden, muson aktivitelerindeki değişim tanımlanabilmektedir. Analiz sonucunda Henrich olayları olarak bilinen altı olayın her biri tespit edilebilmiştir. Bu olaylar sırasında Atlantik Okyanusu'na buzulların erimesi ile birlikte bol miktarda su katkı yapmış ve okyanuslar üzerinden karaya soğuk hava etkisi olmuştur. Bu olay ise muson rejimi üzerinden etki yapmıştır. Ayrıca Youngers Drys dönemi olarak bilinen kuzey yarım küredeki soğuk hava periyodu da analizlerimizde tespit edilmiştir.

TACTS yöntemi kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada ise Çin'de bulunan Dongge ve Avustralya'da bulunan KNI-51 mağaralarından elde edilen $\delta^{18}O$ oksijen izotopu oranlarının zaman serileri analiz edilmiştir. Söz konusu iki mağaradan biri kuzey, bir diğeri ise güney yarım kürede konumlanmış olmasından dolayı Doğu Asya yaz muson ve Endonezya Avustralya yaz muson rejimi arasındaki ilişkiyi anlayabilmek için çok elverişlidir. Son 9000 yıllık periyodu kapsıyan veriler üzerinde uygulanan TACTS yöntemi yardımıyla yapılan yineleme grafiği analiz sonuçlarında her iki bölge için literatürde var olan sıra dışı iklim olaylarının %90'ı tespit edilmiştir. Bu iki bölgenin dinamiğinin çapraz korelasyonu hesaplandığında, her iki bölge arasındaki korelasyon -0.27 olarak

bulunmuştur. Bu sonuç iki bölgenin muson rejimleri arasındaki az da olsa ters faza sahip olduğu kanısını hakim kılmıştır. Literatürde de hakim olan bu kanıya, güneşin konumunun sebep olduğu söylenmektedir. Bu olguyu analizlerimizde görebilmek adına Kuzey yarım küreden toplanan ve güneş aktiviteleri ile doğrudan ilişkili olan $\Delta^{14}C$ karbon izotop oranlarının zaman serisinin yinleme grafiği analizleri gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda Güney ve Kuzey yarım küreden elde edilen $\delta^{18}O$ ve Kuzey yarım küreden elde edilen $\Delta^{14}C$ zaman serilerinin determinizm niceliklerinin çapraz korelasyonları sırasıyla -0.32 ve 0.29 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç literatürdeki yaygın kanıyı doğrulamaktadır. Her iki bölgenin muson rejimleri arasında bir ters faz vardır ve bunun sebebi güneşin pozisyonudur.

Bu tezde kullanılan iki farklı yöntem ile eşit zaman aralığına sahip olmayan zaman serilerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tarz zaman serilerini iyi bir örnek teşkil eden paleoiklim verilerinde muson rejiminin geçmiş yıllardaki etkisi analizlerle ortaya konmuştur. Söz konusu iki yöntem ile karmaşık yapıya sahip sistemlerin analizlerinin gerçekleştirilebileceği anlaşılmıştır. Bu yöntem, sismik aktiviteler, beyin aktiviteleri vb. sistemlerin analizleri için elverişlidir. Fakat zaman serileri eşit zaman aralıklı olan sistemler için bu yöntemlere gerek duyulmamaktadır.

İleride yapılacak olan çalışmalarda, sismik aktivitelerin analizleri TACTS yöntemi yardımıyla gerçekleştirmeye çalışılacak ve anaşokun öncesinde ve sonrasında farklı eğilim olup olmadığı araştırılacaktır. Aynı zamanda gerçek sismik verilerinde anaşokun meydana gelmediği dönemler incelenerek, anaşokun öncesi ve sonrasında ver olan eğilim ile ilişkilendirilmeye çalışılacaktır. Bu çalışma ile deprem dinamiğinin anaşok öncesinde her hangi bir farklılık sergileyip sergilemediği ve anaşoku ne düzeyde etkilediği incelenecektir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Marwan, N., Romano, M.C., Thiel, M., Kurths, J.,** 2007, Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, Physics Reports, 438, 237p. 2, 7, 8, 10, 11, 13, 23
- Eckmann, J.P., Kamphorst, O., Ruelle, D.,** 1987, Recurrence Plots of Dynamical Systems, Europhysics Letters, 4, 973p. 2, 7, 8
- Koebbe, M., Mayer-Kress, G.,** 1992, Use of recurrence plots in the analysis of time-series data), Proceedings of SFI Studies in the Science of Complexity, XXI, 361p. 9
- Zbilut, J.P. Webber Jr., C.L.,** 1992, Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots, Phys. Lett. A, 171 (3-4), 199p. 9
- Thiel, M., Romano, M.C., Kurths, J., Meucci, R., Allaria, E., Arecchi, F.T.,** 1992, Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis, Physica D, 3, 138p. 9
- Mindlin, G.M., Gilmore, R.,** 1992, Topological analysis and synthesis of chaotic time series, Physica D, 58 (1-4), 229p. 9
- Schinkel, S., Dimigen, O., Marwan, N.,** 2008, Selection of recurrence threshold for signal detection, European Physical Journal, 164, 45p. 9, 30
- Trulla, L.L., Giuliani, A., Zbilut, J.P., Webber Jr, C.L.,** 1996, Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients, Phys. Lett. A, 223 (4), 255p. 2, 9, 10, 11
- Webber Jr, C.L., Zbilut, J.P.,** 1994, Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies, J. Appl. Physiol., 76 (2), 965p. 9
- Marwan, N., Wessel, N., Meyerfeldt, U., Schirdewan, A., Kurths, J.,** 2002, Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data, Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 66, 1p. 9

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Ozken, I., Eroglu, D., Stemler, T., Bagci, G.B., Marwan, N., Kurths, J.,** 2015, Transformation-cost time-series method for analyzing irregularly sampled data, *Physical Review E*, 91, 6p. 3, 14, 16, 19, 20, 34
- Suzuki, S., Yoshita, H., Kazuyuki, A.,** 2010, Defination of Distance for Marked Point Process Data amd Its Application to Recurrence Plot-Based Anaylsis of Exchange Tick Data of Foreign Currencies, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20, 3699p. 18
- Victor, J. D., Purpura, K. P.,** 1997, Metric-space analysis of spike trains: theory, algorithms and application, *Network: Computation in Neural Systems*, 8, 127. 15, 17
- Rehfeld, K., Marwan, N., Heitzig, J., Kurths, J.,** 2011, Comparison of correlation analysis techniques for irregularly sampled time series, *Nonlinear Processes Geophysics*, 18, 389p. 2, 13, 24, 33, 45
- Eroglu, D., McRobie, F. H., Ozken, İ., Stemler, T. J., Wyrwoll, K.H., Breitenbach, S.F.M., Marwan, N., Kurths, J.,** 2016, See-saw relationship of the Holocene East Asian-Australian summer monsoon, *Nature Communications*, 7, 12929p. 14, 33
- Carolyn, S. A., Cobb, K. M., Adkins, J. F., Clark, B., Conroy, J. L., Lejau, S., Malang, J., Tuen, A. A.,** 2013, Varied Response of Western Pacific Hydrology to Climate Forcings over the Last Glacial Period, *Science Report*, 340, 1564p. 39
- Denniston, R. F., Wyrwoll, K. H., Polyak, V. J., Brown, J. R., Asmerom, Y., Wanamaker Jr, A. D., LaPointe, Z., Ellerbroek, R., Barthelmes, M., Cleary, D., Cugley, J., Woods, D., Humphreys, W. F.,** 2013, A Stalagmite record of Holocene Indonesian Australian summer monsoon variability from the Australian tropics, *Quaternary Science Reviews*, 78, 155p. 40, 42
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M. J., Dykoski, C. A., Li, X.,** 2005, The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate., *Science*, 308, 854p. 40, 42, 45
- Hu, C., Henderson, G. M., Huang, J., Xie, S., Sun, Y., Johnson, K. R.,** 2008, Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records., *Earth Planet Sci. Lett*, 266, 221p. 40, 42

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- An, Z., Colman, S. M., Zhou, Li, Brown, Jull, Cai, Huang, Lu, Chang, Song, Sun, Xu, Liu, Jin, Liu, Cheng, Liu, Ai, Li, Liu, Yan, Shi, Wang, Wu, Qiang, Dong, Lu, Xu,** 2012, Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka, *Scientific Reports*, 2, 619p. 45
- Grassberger, P, Procacia, I.,** 1983, Characterization of Strange Attractors, *Physical Review Letters*, 50-5, 346p. 13, 14
- Rosenstein, M. T., Collins, J. J., De Luca, C. J.,** 1993, A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. , *Physica D*, 65, 117p. 13, 14
- Diez, D. M., Schoenberg, F. P., Woody, C. D.,** 2012, Algorithms for computing spike time distance and point process prototypes with application to feline neuronal responses to acoustic stimuli, *Journal of Neuroscience Methods*, 203, 186p. 17, 18
- Hirata, Y., Aihara, K.,** 2009, Representing spike trains using constant sampling intervals. , *Journal of Neuroscience Methods*, 183, 277p. 17, 18
- Hirata, Y., Aihara, K.,** 2012, Timing matters in foreign exchange markets, *Physica A*, 391, 760p. 17, 18
- Rehfeld, K., Kurths, J.,** 2014, Similarity estimators for irregular and age-uncertain time series, *Climate of the Past* , 10, 107p. 24
- Tan, L., Cai, Y., An, Z., Cheng, H., Shen, C. C., Breitenbach, S. F. M., Gao, Y., Edwards, R. L., Zhang, H., Du, Y.,** 2015, A Chinese cave links climate change, social impacts, and human adaptation over the last 500 years. , *Scientific Reports*, 5:12284, 1p. 27, 28
- Marwan, N., Schinkel, S., Kurths, J.,** 2013, Recurrence plots 25 years later – Gaining confidence in dynamical transitions, *Europhysics Letters*, 101, 20007p. 28
- Pausata, F. S. R., Battisti, D. S., Nisancioglu, K. H., Bitz, C. M.,** 2011, Recurrence plots 25 years later – Gaining confidence in dynamical transitions, *Nature Geoscience*, 4, 474p. 40
- McGowan, H., Marx, S., Moss, P., Hammond, A.,** 2012, Evidence of ENSO mega-drought triggered collapse of prehistory Aboriginal society in northwest Australia., *Geophys. Res. Lett*, 39,L22702. 42

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Packard, N. H., Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Shaw, R. S.,** 1980, Geometry from a Time Series, Physical Review Letters, 45,9, 712p. 2
- Baker, A., Hellstrom, J. C., Kelly, B. F. J., Mariethoz, G., Trouet, V.,** 2015, A composite annual-resolution stalagmite record of North Atlantic climate over the last three millennia, Scientific Reports, 5, 10307p. 27
- Breitenbach, S.F.M., Adkins, J. F., Meyer, H., Marwan, N., Kumar, K. K., Haug, G. H.,** 2013, Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India, Earth Planet, Scientific Letters, 292, 212p. 27
- Tan, L., Cai, Y., Yi, L., An, Z., Ai L.,** 2008, Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity, Climate of the Past , 4, 19p. 30
- Matthews, J. J. A., Briffa, K. K. R.,** 2005, The Little Ice Age Reevaluation of an evolving concept, Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography, 87, 17p. 31
- Zheng, J., Wang, W. C., Ge, Q., Man, Z., Zhang, P.,** 2006, Precipitation Variability and Extreme Events in Eastern China during the Past 1500 Years, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 17, 579p. 31
- Hilborn C. R.,** 2000, Chaos and Nonlinear Dynamics, Second Eddition, U.K., 672, . 2, 5, 6, 21

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL

BİLGİLER

Adı Soyadı: **İbrahim ÖZKEN**

Doğum Tarihi: 26 Mayıs 1984

Doğum Yeri: Konak/İZMİR

Yabancı Dil: İngilizce

EĞİTİM

Doktora

Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Matematiksel Fizik ABD*, 2018

Y.Lisans

Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Nükleer Fizik ABD*, 2011

Lisans

Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 2007

YAYINLAR

Cam N. F., Ozken İ., Gunseli Y., *A survey of natural radiation levels in soils and rocks from Aliaga-Foca region in Izmir, Turkey*, Radiation Protection Dosimetry , **155**, 2, 169 2013.

Ozken İ., Eroglu D., Stemler T., Marwan N., Bagci G. B., Kurths J., *Transformation-cost time-series method for analyzing irregularly sampled data*, Physical Review E, **91**, 6, 2015.

Eroglu D., McRobie F. H., Ozken İ., Stemler T., Wyrwoll K.H., Breitenbach S.F.M., Marwan N., Kurths J., *See-saw relationship of the Holocene East Asian-Australian summer monsoon*, Nature Communications **7**, 12929, 2016.

Marwan N., Eroglu D., Ozken İ., Stemler T., Wyrwoll K.H., Kurths J., *Regime Change Detection in Irregularly Sampled Time Series*, Advances in Nonlinear Geosciences, Springer, 2017.

Ozken İ., Eroglu D., Breitenbach S.F.M., Marwan N., Tan L., Tirnakli U., Kurths J., *Nonlinear time series analysis of irregularly sampled data*, 2018, Physical Review E Dergiye Gönderildi.