Deprem Dinamiğinin Olay Eş Zamanlılığı ve Yineleme Grafiği Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi

Program Kodu: 3001

Proje No: 115F596

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Çelikoğlu

Danışman:
Prof. Dr. Uğur Tırnaklı

Bursiyerler:
Arş. Gör. Dr. İbrahim Özken
Kıvanç Çetin

Mayıs 2018
İZMİR

ÖNSÖZ

Bu çalışmada çeşitli deprem katalogları olay eş zamanlılığı ve yineleme grafiği analiz yöntemleri kullanılarak hem uzaysal hem de zamansal ölçekte incelemelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda yen

115F596 numaralı ve "**Deprem dinamiğinin olay eş zamanlılığı ve yineleme grafiği yöntemleri kullanılarak incelenmesi**" isimli projemize verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK'a ve Matematik, Fizik Araştırma Destek Grubu (MFAG)'na teşekkürlerimi sunmak isterim.

Ayrıca projenin çeşitli aşamalarında her türlü desteği esirgemeyen Prof. Dr. Uğur Tırnaklı'ya ve Arş. Gör. Dr. İbrahim Özken'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ I

İÇİNDEKİLER II

ŞEKİLLER DİZİNİ III

ÖZET VII

ABSTRACT VIII

1. GİRİŞ 1

2. DEPREM HAKKINDA BİLİNENELER VE YENİ ARAYIŞLAR 3

3. KULLANILAN YÖNTEMLER 6

3.1 Olay Eş Zamanlılığı 6

3.1.1 Ağ Yapısının Oluşturulması 7

3.1.2. Yönelimli Ağ Yapısının Oluşturulması 8

3.2 Yineleme Grafiği Analiz Yöntemi 8

3.2.1 Yineleme Grafiği Sayısal Nicelikleri 10

3.3 Metrik Uzaklık Ve Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi Yöntemi 12

4. ANALİZ SONUÇLARI 20

4.1 Kaliforniya Kataloğu İçin Yönelimsiz Ağ Oluşturulması Ve Analizi 20

4.2 Türkiye Kataloğu İçin Yönelimsiz Ağ Oluşturulması Ve Analizi 40

4.3 Kaliforniya Kataloğu İçin Yönelimli Ağ Oluşturulması 53

4.4 Türkiye Kataloğu İçin Yönelimli Ağ Oluşturulması 55

4.5 Kaliforniya Kataloğu İçin Yineleme Grafiği Analizleri 56

4.6 Alaska Bölgesi İçin Yineleme Grafiği Analizleri 60

4.7 Türkiye Kataloğu İçin Yineleme Grafiği Analizleri 62

5. SONUÇ VE TARTIŞMA 63

KAYNAKLAR 65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Farklı yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri; (a) Periyodik, (b) Kaotik ve (c) Stokastik 10

Şekil 3.2. S_a veri grubunun S_b veri grubuna dönüştürülmesinin gösterimi. S_a S_b ye S_1 ,S_2,...., S_7 (S_b) olmak üzere toplam yedi adımda dönüştürülmüştür. Minimum maliyet ile dönüşüm yapılabilmesi için spikelar kaydırılmış, silinmiş ve eklenmiştir. 14

Şekil 4.1. Güney Kaliforniya Bölgesi için deprem ağ modeli örneği..... 21

Şekil 4.2. Güney Kaliforniya Bölgesi için büyüklüğü 6.0'ın üstünde olan kabaca son yüzyıldır meydana gelmiş tarihsel depremleri gösteren harita. Kırmızı daireler 7.0'den büyük depremleri , sarı daireler ise 6.0'dan büyük depremleri göstermektedir. Harita Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nün Güney Kaliforniya Deprem Veri Merkez (SCEDC) web sitesinden alınmıştır (http://scedc.caltech.edu/significant/index.html)..... 21

Şekil 4.3. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği $a)\ M_{th} = 2.0,\ b)\ M_{th} = 2.5,\ c)\ M_{th} = 3.0,\ d)\ M_{th} = 3.5.$ Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 24

Şekil 4.4. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 25

Şekil 4.5. Azalan hücre boyutuna göre derece merkezliliği grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, \tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir. 26

Şekil 4.6. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6,$ b)$Q_{th} = 0.7,$ c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, L = 0.125^o, \tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 27

Şekil 4.7. Arasındalık merkeziliği için bir görselleştirme..... 28

Şekil 4.8. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği $a)\ M_{th} = 2.0,\ b)\ M_{th} = 2.5,\ c)\ M_{th} = 3.0,\ d)\ M_{th} = 3.5.$ Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o, \tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 29

Şekil 4.9. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 30

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.10. Azalan hücre boyutuna göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, \tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 32

Şekil 4.11. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.7$, c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, L = 0.125^o, \tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 33

Şekil 4.12. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği $a)\ M_{th} = 2.0,\ b)\ M_{th} = 2.5,\ c)\ M_{th} = 3.0,\ d)\ M_{th} = 3.5$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o, \tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 35

Şekil 4.13. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o, M_{th} = 2.5, Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 36

Şekil 4.14. Azalan hücre boyutuna göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, \tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 37

Şekil 4.15. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.7$, c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, L = 0.125^o, \tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 38

Şekil 4.16. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece dağılımı a) $Q_{th} = 0.8$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.0, L = 0.125^o, \tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 39

Şekil 4.17. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği $a)\ M_{th} = 2.5,\ b)\ M_{th} = 3.0$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 40

Şekil 4.18. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre derece merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 41

Şekil 4.19. Azalan hücre boyutuna göre derece merkezliliği grafiği a) $L = 0.250^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5, \tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.20. Olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler her iki grafikte de, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 44

Şekil 4.21. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği $a)\ M_{th} = 2.5,\ b)\ M_{th} = 3.0.$ Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 45

Şekil 4.22. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 46

Şekil 4.23. İki farklı hücre boyutuna göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $L = 0.25^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 47

Şekil 4.24. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre arasındalık merkeziliği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir. 48

Şekil 4.25. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği $a)\ M_{th} = 2.5,\ b)\ M_{th} = 3.0,$ Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 49

Şekil 4.26. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 50

Şekil 4.27. İki farklı hücre boyutuna göre yerel kümelenme katsayısı grafiği, a) $L = 0.25^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir..... 51

Şekil 4.28. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir..... 52

Şekil 4.29. Kaliforniya için yerel ağ akısı grafiği. a) $q_{th} = 0.2$, b) $q_{th} = 0.9$. Diğer parametreler $M_{th} = 2.0$, $L = 0.125^o$, $\tau = 30$ olarak seçilmiştir..... 54

Şekil 4.30. Türkiye için yerel ağ akısı grafiği. a) $q_{th} = 0.2$, b) $q_{th} = 0.9$. Diğer parametreler $M_{th} = 2.0, L = 0.125^o, \tau = 30$ olarak seçilmiştir..... 55

Şekil 4.31. Kaliforniya deprem kataloğunda yer alan Landers (7.3), Hector Mine (7.1) ve El Mayor (7.2) depremlerini bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla ana şoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir..... 59

Şekil 4.32. Alaska bölgesinde meydana gelen 7.4, 7.7 ve 7.9 büyüklüğüne sahip depremlerin bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla anaşoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir..... 61

Şekil 4.33. Van depreminin bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla ana şoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir..... 63

ÖZET

Bu çalışmada gerçekleştirdiğimiz ağ analizlerinde sadece ham deprem verilerinden yola çıkarak depremce aktif bölgelerin tesbiti, bu bölgeler üzerinde bir sürekliliğin olup olmadığı ve ağ üzerinde köprü görevi gören hücrelerin tesbiti amaçlanmıştır. Analizi yapılan yönelimli ve yönelimsiz ağ modelleri olay eş zamanlılığı yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak gerek Kaliforniya gerekse Türkiye için bazı bölgelerin depremsellik açısından oldukça aktif oldukları ve bu bölgelerde stresin ana fay hatları boyunca taşındığı tesbit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak Türkiye için özellikle bazı illerin risk analizi haritasının yapılması önerilmiştir.

Yineleme grafiği analizlerinde ise farklı bölgelerde gözlemlenen yedi farklı deprem için determinizm değerlerinin ana şoktan önce azalma, ana şoktan sonra artma eğiliminde olduğu tesbit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstatistiksel Fizik, Dinamik Sistemler, Karmaşık Sistemler

ABSTRACT

The goal of this project is, by using network analysis, to determine the active earthquake fields extracting from the raw earthquake data and to find whether the existence of a continuity between these fields and to detect the cells which are bridge between these fields on the network. The directed and undirected network of interest have been produced using event synchronization method. The analysis revealed that some regions in both California and Turkey are quite active in terms of earthquake and it has come to light that the main stress in these region is carried over the main stream fault. In the light of these results we suggest to map the risk analysis of some provinces in Turkey.

In the direction of results obtained from recurrence plot analysis for seven different earthquake, it has been determined that the determinism value of these earthquakes decrease before the aftershock and increase straight after the aftershock.

Keywords: Statistical Physics,Dynamical Systems, Complex Systems

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yüz yıllar boyunca yaşadığı çevreyi anlama ve onu kendi yararına kontrol etme çabası içinde olmuştur. Öyleki uzun süreli gözlemlerle hangi yollardan av geçtiğini öğrenmiştir. Ayak izlerinden avının türünü tayin etmeye başlamıştır. Zamanla gökyüzündeki cisimlerin hareketleri ile çevresindeki doğal yaşam arasında ilişkiler kurmaya başlamıştır. Bu sayede mevsimleri ve diğer periyodik döngüleri kavramıştır. Bu doğamızda var olan ve bizi diğer canlılardan üstün kılan örüntüleri tanıma ve keşfetme yeteceğimizin bir sonucudur. Yüzyıllar ilerledikçe daha karmaşık doğa olaylarını anlama çabası içinde olmuştur. Özellikle büyük afetlerin altında yatan mekanizmaları bilmek ve bunlara karşı önlem alabilmek türümüzün devamı için elzem hale gelmiştir.

Deprem karmaşık doğası gereği yüzyıllarca anlamakta zorlandığımız ve korktuğumuz bir doğa olayıdır. Antik çağlardan beri depremin nasıl meydana geldiği sorusuna yanıt aranmış ve çeşitli mitler üretilmiştir. Bu yöndeki hikayeler ülkemizde Dünya'yı tutan sarı öküzün başını sallamasından, Japonya'da nehirdeki dev yayın balığının hareket etmesine kadar uzanmaktadır. Bu tür mitler üretilmiş olmasının ortak yanı insanların ellerindeki bilgi ve teknoloji ile anlamlı bir bilgi üretememiş olmasıdır. Fakat özellikle geçtiğimiz yüzyıldaki teknolojik gelişmeler ve bilgisayarın hayatımıza girmesi karmaşık sitemler hakından bizi atalarımıza göre daha donanımlı kılmıştır. Bununla beraber her ne kadar bazı temel yasalar bulunmuş olsa da en temel soru hala gizemini korumaktadır. Bu noktada tekrar örüntü tanıma yeteneğimize güvenmek bir seçenek olarak durmaktadır. Bilgisayarlar sayesinde artık verileri işleyerek bu tür örüntüler kurmak ve anlamlandırmak daha mümkün hale gelmiştir.

Yaptığımız çalışmanın temel amacı hem uzaysal hem de zamansal olarak bu tür örüntüler ve eğilimler bulmaya çalışmaktır. Bu yönde literatürde mevcut olan çalışmalara yeni analiz yöntemleriyle katkıda bulunulmuştur.

Bu bağlamda ikinci bölümde depremlerin uyduğu temel yasalar, yeni ölçeklenme ve örüntü arayışlarına yer verilmiştir.

Bölüm üçte olay eş zamanlılığı ve yineleme grafiği yöntemleri tanıtılmıştır. Olay eş zamanlılığı yöntemi kullanılarak nasıl yönelimli ve yönelimsiz ağlar oluşturulabileceğine yer verilmiştir.

Dördüncü bölüm ise Kaliforniya ve Türkiye deprem kataloglarından alınan verilerle oluşturulan yönelimsiz ağlar için derece merkeziliği, arasındalık merkeziliği, yerel kümelenme katsayısı, asortatiflik niceliklerinin değişik parametre değerlerine göre analizlerine ayrılmıştır. Yine bahsi geçen bölgeler için yönelimli ağlar oluşturulmuş ve in-degree ve out-degree

farklarına bakılmıştır. Ayrıca çeşitli deprem katalogları için yineleme grafiği analizlerine yer verilerek bir ana şoktan önce ve sonra sistemin determinizm değerinin bir eğiliminin olup olmadığı sorusuna cevap aranmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise özellikle ülkemiz açısından bulgular değerlendirilmiş ve bu bağlamda önerilerde bulunulmuştur.

2. DEPREM HAKINDA BİLİNENLER VE YENİ ARAYIŞLAR

Depremler milyonlarca yıldır yer yüzünü şekillendirmektedir. İnsanoğlu ise bu mekanizmayı binlerce yıldır anlamaya çalışmaktadır. Karmaşık doğasından dolayı tam olarak anlaşılamamış olsa da, geçtiğimiz yüz yıldaki çalışmalar ve teknolojik gelişmeler sayesinde büyük aşama kaydedilmiştir. Bilindiği gibi yerküre çeşitli katmanlardan meydana gelmiş olup en üst katman ise yer kabuğudur. Yer kabuğu tek bir parça halinde olmayıp levhalar halindedir. Altındaki magmanın sağladığı enerjiyle bu levhalar sürekli hareket halindedir. Birbirlerine göre farklı hızlarda veya yönlerde hareket eden levhaların temas ettikleri noktalarda enerji birikmesi olur. Biriken enerjinin aniden boşalmasına deprem denir.

Depremlerin uyduğu bilinen üç temel yasa vardır. Bu yasalar gözlemsel yasalar olup en bilineni Gutenberg-Richter yasasıdır (Gutenberg ve Richter, 1944). Yasa depremin ortaya çıkardığı enerji cinsinden ifade edilebileceği gibi deprem büyüklükleri cinsinden

$$logN(\geq m) = a - bm, \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada m depremlerin büyüklüklerini, N, m'den büyük depremlerin sayısını, a tüm depremlerin sayısının logaritmasını temsil eder. b üsteli bölgenin büyük deprem üretme potansiyelini gösteren bir parametredir ve genelde 0.8 ile 1.2 arasında değişir. b küçüldükçe büyük deprem olma olasılığı artar.

Bir diğer yasa Omori yasası olarak bilinir ve 1894 yılında keşfedililmiştir (Omori, 1894). Bir ana şoktan sonra gelen artçıların sayısının zamanla değişimini ifade eden yasa

$$\frac{dN}{dt} = K(C + t)^{-p}, \tag{2.2}$$

şeklindedir. Görüldüğü gibi bu yasada kuvvet yasası formunda olup p parametresinin büyük olması artçı şok serisinin daha kısa zaman aralığında son bulacağını gösterir. Bu artçı şok rejimi de kendi içinde Gutenberg-Richter yasasına uyar. Burada K ve C ise pozitif iki sabittir.

Üçüncü deneysel yasa ise Bath yasası olarak bilinir (Bath, 1965). Bu yasaya göre ana şoktan sonra meydana gelen en büyük artçı ile ana şok arasındaki büyüklük farkı ana şokun büyüklüğünden bağımsızdır ve yaklaşık olarak sabittir. Aradaki bu fark kabaca 1'e eşittir. Dolayısıyla 7 büyüklüğündeki bir depremin akabinde yaklaşık 6 büyüklüğünde bir deprem daha beklenir.

Bunların dışında oluşan depremlerin merkez üslerinin fraktal yapıda dağıldıkları bilinmektedir.

Bilim insanları depremleri tam olarak anlayabilmek için yukarıda bahsi geçen ölçeklenmeler dışında yeni ölçeklenmeler, motifler veya örüntüler arayışındadır. Bu tip örüntüler kendini uzaysal, zamansal veya her ikisinde birden gösterebilir. Bu arayışlarda çapraz korelasyon, koherens, otokorelasyon gibi doğrusal analiz yöntemleri kullanılabileceği gibi karşılıklı bilgi (mutual information) (Shannon ve Weaver, 1949; Eckhom ve Popel, 1974; Pereda vd., 2005) ve olay eş zamanlılığı (event synchrozation) (Quian Quiroga vd., 2002) gibi doğrusal olmayan analiz yöntemleri de kullanılabilir. Son yıllarda karmaşık sistemlerin dinamiği üzerine yapılan çalışmalarda doğrusal olmayan yöntemler popülerlik kazanmıştır. Doğrusal olmayan yöntemlerin farklı üstünlükleri bulunduğu için bu popülerlik giderek artmaktadır.

Son yıllarda popülerlik kazanan bir başka yaklaşım ise karmaşık sistemlerin ağ özelliklerinin incelenmesidir. Bu ağlarının oluşturulmasında çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Deprem ağları için yapılan bazı çalışmalarda korelasyon katsayısı (Jimenez vd., 2008), Pearson momentler çarpımı korelasyon katsayısı (Tenenbaum vd., 2012) gibi niceliklerin hesabına dayalı koşullarla ağ oluşturulabilirken, doğrudan depremlerin uzay-zamansal konumlarından yararlanarak da ağlar oluşturulmuş ve incelenmiştir (Abe ve Suzuki, 2004; 2006).

Yukarıda bahsi geçen olay eş zamanlılığı çalışması ise sinir ağların karmaşık yapısı dolayısıyla doğrusal olmayan yöntemlere odaklanmışlardır (Quian Quiroga vd., 2002). Deprem dinamiğinin de karmaşık yapıda olduğu göz önüne alındığında doğrusal olmayan yöntemler kullanmak akla yatkın görünmektedir. Abigail Jimenez tarafından 2013 yılında yapılan bir çalışmada ilgilenilen coğrafi bölge kare hücrelere ayrılmış, karşılıklı bilgi yöntemi kullanılarak bu hücreler arasında karmaşık bir ağ modeli oluşturulmuş ve bu ağın değişik özellikleri araştırılmıştır (Jimenez, 2013). Karşılıklı bilgi yönteminin temeli Shannon ve Weaver tarafından 1949 yılında ortaya koyulan bilgi teorisidir (Shannon ve Weaver,1949). Bu teorinin merkezinde ise Shannon entropisi yatmaktadır. Yöntem veri grubu üzerinden olasılıkların tayinine dayandığı için iyi bir kestirim yapmak ancak yüksek sayıda veri kullanarak mümkün olmaktadır. Deprem kataloglarının en büyük sorunu ise verilerin düzensiz veya eksik olmasının yanı sıra yeterince büyük veri sayısına sahip olmamalarıdır. Bununla birlikte yöntem hangi iki veri grubu arasında ilinti var sorusunu cevaplayabilmekte fakat kimin kimi sürdüğü sorusuna cevap verememektedir.

Bu zorlukları aşma potansiyeline sahip bir yöntem olarak yukarıda bahsi geçen ve sara nöbetlerinin önceden tahmini ve yerinin belilenmesi amacı ile kullanılan olay eş zamanlılığı yöntemidir. Bu yöntem sonraki bölümde açıklanacaktır.

Başka bir doğrusal olmayan analiz yöntemi ise yineleme grafiği analiz yöntemidir. Bu yöntem yeteri kadar veriye sahip olmayan zaman serilerinin birçok karakteristik özelliğinin anlaşılabilmesi için oldukça elverişlidir (Marwan vd. 2007). Dinamik bir sistemin faz uzayındaki yinelemeleri göreselleştiren bu yöntem ile yineleme grafiğinde meydana gelen yapılardan yineleme grafiği sayısal nicelikleri hesaplanabilmektedir. Bu yöntemde temel mantık, sistemin yörüngelerinin faz uzayında birbirleri ile olan ilişkisini irdelemektir. Bu ilişkiyi kurabilmek için, yörüngelerin birbirleriyle olan uzaklıkları hesaplanır. Bu uzaklık hesabında genellikle Öklidyen uzaklık kullanılır. Öklidyen uzaklık için gerekli olan koşul; yörüngeleri meydana getiren verilerin eşit zaman aralığında örneklemeye sahip olmasıdır. Fakat karmaşık yapıya sahip olan iklim, sismik hareketler gibi sistemler eşit zaman aralıklı örneklemeye sahip değildirler. Bu tarz sistemlerin analizlerini gerçekleştirebilmek için kullanılan yaygın yöntem interpolasyon yöntemidir. Bu yöntemde her ne kadar zaman serisinin dağılımından faydalanılsa da, siteme dışarıdan nokta eklendiği için sistem hakkında bilgi kaybına sebep olmaktadır (Rehfeld vd. 2011). Bu söz konusu sorunu aşabilmek için Ozken vd. tarafından ortaya atılan Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi (TACTS) yöntemi ile sistemin tamamen iç dinamiğinden faydalanılarak, zaman serisi eşit zaman aralıklı hale getirilir (Ozken vd., 2015). Bu yöntem kullanılarak yapılan Logistik map ve Rössler salınıcısı gibi model sistemlerin yineleme grafiği analizleri, yöntemin çalışırlığını doğrulamıştır. Yöntem kullanılarak yapılan paleoiklim zaman serisi analizlerinde, geçmiş dönemlere ait ve literatürde var olduğu düşünülen bir çok iklim olayı, istatistiksel olarak doğrulanmıştır. Zaman bakımından oldukça bozuk olan bu tarz sistemlerde de yöntemin çalışırlığı doğrulanmıştır. Paleoiklim verileri ile benzer yapıya sahip olan sismik hareketlerin analizleri için Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi yönteminin kullanılması, deprem dinamiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için uygun olabilir.

3. KULLANILAN YÖNTEMLER

3.1 Olay Eş Zamanlılığı

Olay eş zamanlılığı (event synchronization) yöntemi Quian Quiroga vd tarafından 2002 yılında sara nöbetlerinin önceden tahmini ve yerinin belirlenmesi amacıyla ortaya atılmış doğrusal olmayan bir yöntemdir (Quian Quiroga vd., 2002). Yöntem adından da anlaşılacağı gibi aynı zaman aralığında kaydedilmiş iki zaman serisinin olay diye nitelenen olgularının eş zamanlılığını ölçmek üzerine kurgulanmıştır. Bahsi geçen çalışmada beynin değişik bölgelerine elektrotlar bağlanarak beyin sinyalleri her bölge için zaman serisi olarak kaydedilmiştir. Bu sinyallerden belirli bir eşik değerin üzerinde pik yapanlar olay olarak alınmıştır. Bu elektrotlardan alınan sinyallerin analizi ile bir ağ yapısı kurulmuş ve bu sayede sara nöbeti sırasında beynin hangi bölgelerinin birbirini etkilediği incelenmiştir. Yine farklı bir çalışmada olay eş zamanlılığı yöntemi Hindistan yarımadasındaki muson yağışlarının uzaysal ve zamansal analizi için kullanılmıştır (Malik vd. 2010;2011). Bahsi geçen çalışmalarda olay olarak belirli bir eşik değerin üzerindeki yağışlar alınmıştır. Yapacağımız analizlerde ise olay olarak belirli bir eşik değerin üzerindeki deprem büyüklükleri kullanılacaktır.

x_n ve y_n $(n = 1,...,N)$ eş zamanlı olarak ölçülmüş iki zaman serisi olmak üzere, bu serilerdeki olayların zamanları sırasıyla t_i^x ve t_j^y $(i = 1,...,m_x; j = 1,...,m_y)$ şeklinde ifade edilebilir. Burada m_x ve m_y, x ve y serilerindeki olayların sayısını ifade etmektedir. Serilerinden birisinde bir olay meydana geldikten belirli bir süre sonra diğerinde de bir olay meydana gelmiş ise bu iki olay bir olay çifti olarak adlandırılır. Bahsi geçen zaman farkı için eşik değer τ olarak ifade edilirse, x serisinde bir olay meydana geldikten sonraki τ kadarlık süre içerisinde y serisinde bir olay meydana gelmiş ise koşul sağlanmış olur. Bu olay çiftlerinin toplam sayısı,

$$c^{\tau}(y\,|\,x) = \sum_{i}^{m_x} \sum_{j}^{m_y} J_{ij}^{\tau} \ , \tag{3.1}$$

şeklinde ifade edilir. J_{ij}^{τ} ise

$$J_{i,j} = \begin{cases} 0 < t_i^x - t_j^y & \text{ise} \quad 1 \\ t_i^x = t_j^y & \text{ise} \quad \dfrac{1}{2}, \\ \text{diğer hallerde} & \text{ise} \quad 0 \end{cases} \tag{3.2}$$

şeklinde ifade edilebilen olay çiftlerini sayma kuralıdır. Benzer şekilde y serisinde bir olay meydana geldikten sonraki τ kadarlık süre içerisinde x serisinde bir olay meydana gelmesini ifade eden $c^{\tau}(x\,|\,y)$ ise Denklem 3.1'de x ve y ifadelerinin yer değiştirilmesiyle elde edilir. Bu iki niceliğin simetrik ve anti simetrik toplamları

$$Q_{\tau} = \frac{c^{\tau}(y\,|\,x) + c^{\tau}(x\,|\,y)}{\sqrt{m_x m_y}}, \tag{3.3}$$

ve

$$q_{\tau} = \frac{c^{\tau}(y\,|\,x) - c^{\tau}(x\,|\,y)}{\sqrt{m_x m_y}}, \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edilir. Burada Q_{τ} olay eş zamanlılığının bir ölçüsü olup $0 \leq Q\tau \leq 1$ aralığında değerler alır. $Q\tau = 1$ zaman serilerinin tamamen eş zamanlı olduğunu $Q\tau = 0$ ise eş zamanlı olmadıklarını ifade eder. Asimetrik ifade q_{τ} serilerden hangisinin diğerinden önce olduğunu ve diğerini sürdüğünü gösteren bir ifadedir. Bu nicelik $-1 \leq q_{\tau} \leq 1$ aralığında değerler alır. $q_{\tau} = 1$, x serisinin y serisini tam anlamıyla sürdüğü anlamına gelir. $q_{\tau} = -1$ durumunda ise süren y serisidir.

3.1.1 Ağ Yapısının Oluşturulması

Bahse konu deprem bölgesi LxL büyüklüğünde kare hücrelere bölünür. Her bir hücre içerisine düşen depremler ayrı zaman serileri şeklinde tutulur. Daha sonra olay eş zamanlılığı yöntemi kullanılarak hücreler arasında bağlantılar oluşturmak yoluyla bir bağ yapısı kurulur. Bu aşamada anlaşılırlık açısından işleyişin nasıl çalıştığını iki hücre üzerinden örnekleyelim. Elimizde iki hücre dolayıyla da x ve y şeklinde iki zaman serisi olsun. Bu hürcelerde meydana gelmiş belirli bir eşik değer üzerindeki depremler olay olarak kabul edilir ve bu depremlerin meydana geldikleri zamanlar t_i^x ve t_j^y şeklinde belirlenir. Bu serilerden birisinde bir deprem meydana geldikten sonra önceden belirlenen bir τ eşik değeri kadar süre içerisinde diğerinde de bir deprem meydana geliyorsa bunlar bir olay çifti olarak sayılır. Bu olay çiftlerinin sayma kuralı Denklem 3.2'de verilmiştir. Denklem 3.2'den elde edilen olay çiftleri Denklem 3.1'de kullanılarak toplam olay çiftleri $c^{\tau}(y\,|\,x)$ ve $c^{\tau}(x\,|\,y)$ hesaplanır. Denklem 3.3 kullanılarak iki hücre arasındaki eş zamanlılık değeri belirlenir. Eğer elde edilen bu değer önceden belirlenen bir eşik değerden büyükse bu iki hücre arasına bir bağ atanır.

Bahsi geçen yöntem N tane hücreye sahip bir bölge için genelleştirilerek herbir hücre çifti için tekrarlanır. N tane hücrenin karşılıklı durumunu temsilen NxN lik bir matris temsili kullanılır. Bu matrisi A ile gösterirsek, eğer i. ve j. hücreleri için bağ oluşturma koşulu sağlanmış ise matrisin A_{ij} ve A_{ji} elemanları bağı temsilen 1 değerini alır. Koşulun sağlanmadığı hücrelerde matris elemanının değeri 0 atanır. Bu şekilde oluşturulan A_{ij} matrisi bitişiklilik (adjacency) matrisi olarak bilinir ve matrisin oluşturulma kuralı matematiksel olarak

$$A_{i,j} = \begin{cases} Q_{ij} > Q_{thr} & \text{ise} \quad 1 \\ \text{diğer hallerde} & \text{ise} \quad 0 \end{cases} \tag{3.5}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu şekilde oluşturulmuş ve bitişiklilik matrisinin simetrik olduğu ağ yönelimsiz bir ağa örnektir.

3.1.2 Yönelimli Ağ Yapısının Oluşturulması

Yönelimli bir ağ oluşturmak için, bitişiklilik matrisi Denklem 3.4 ile verilen q_τ ifadesi kullanılarak oluşturulur. Yukarda bahsedildiği gibi bu nicelik hangi zaman serisinin diğerinin sürdüğü hakkında bilgi tutar. Dolayısıyla bu nicelikle hangi hücrenin diğerini sürdüğü yani ağ üzerindeki bağlantıların yönünü belirlenebilir. Bitişiklilik matrisi

$$A^{q}_{i,j} = \begin{cases} q_{ij} > q_{thr} & \text{ise} \quad 1 \\ \text{diğer hallerde} & \text{ise} \quad 0 \end{cases} \tag{3.6}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu şekilde oluşturulmuş ve bitişiklilik matrisinin simetrik olmadığı ağ yönelimli bir ağa örnektir. Burada $A^{q}_{i,j} = 1$ olması i'den j'ye bir bağ olduğu anlamına gelir ve tersi doğru değildir.

3.2 Yineleme Grafiği Analiz Yöntemi

Dinamik bir sistemin faz uzayındaki yörüngelerinin yinelemelerini görsel hale getirebilmek adına ortaya atılan yineleme grafiği (recurrence plot) analiz yöntemi, özellikle doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin veri analizlerinde yaygın olarak kullanılması ile birlikte

literatürde geniş bir yer sahip olmuştur. 1897 yılında Eckmann tarafından literatüre kazandırılan bu yöntemin yaygın olarak çalışılmasıyla birlikte ortaya atılan yineleme grafiği sayısal nicelikleri sayesinde doğrusal olmayan dinamik sistemlerin bir çok karakteristik özelliği anlaşılmıştır (Eckmann vd., 1987; Marwan vd., 2007)

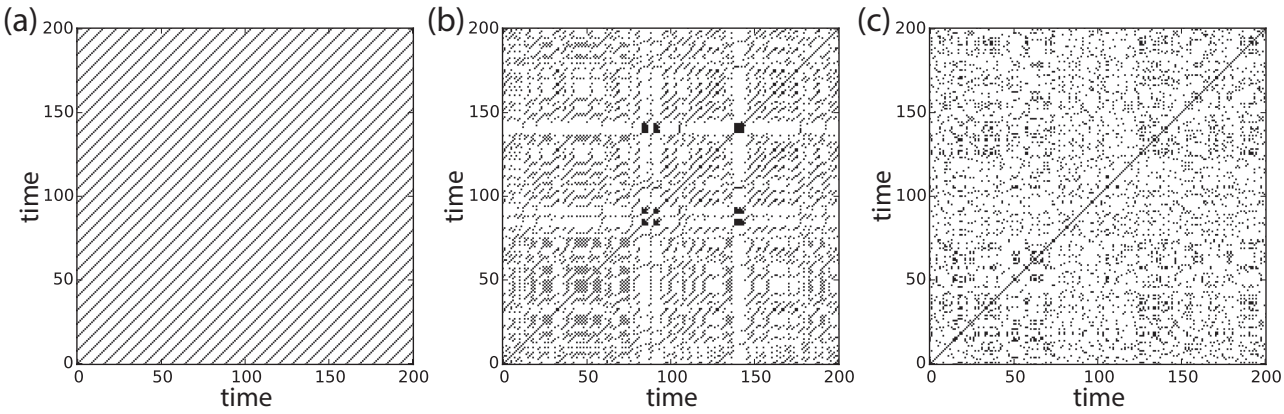
Yineleme grafiğini oluşturabilmek için ilgili sistemin yörüngelerinin faz uzayındaki birbirleriyle olan ilişkisi incelenir. Dinamik bir sistemin faz uzayındaki zamanla gelişimini bir vektör serisiyle tanımlayabilmek için sistemin faz uzayındaki yörüngelerini $\{\overrightarrow{x_i}\}_{i=1}^{N}$ olarak ifade edelim. Sistemin yörüngelerinin faz uzayındaki $i.$ ve $j.$ durumlarının karşılaştırılması prensibine dayanan yineleme grafiğini elde edebilmek için yineleme matrisini oluşturmak gerekmektedir. Yineleme matrisi,

$$R_{i,j}(\epsilon) = \Theta(\epsilon - ||\overrightarrow{x_i} - \overrightarrow{x_j}||)\ i, j = 1,\ldots, N, \tag{3.7}$$

olarak verilmektedir. Burada N yörüngenin sayısını, $\Theta(.)$ Heaviside fonksiyonunu, $||.||$ 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 ($x < 0$, $\Theta(x) = 0; x \geq 0, \Theta(x) = 1$) 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, $R_{i,j} \equiv 0$ olduğu durumlarda ise beyaz nokta konulmaktadır. Oluşturulan yineleme grafiğinde tanımdan dolayı $R_{i,i} \equiv 1|_{i=1}^{N}$ olduğundan yineleme grafiğinde her zaman siyah ana köşegen meydana gelmektedir.

Şekil 3.1'de farklı yapıya sahip üç sistem için yineleme grafikleri verilmiştir. Şekil 3.1.a'da yer alan yineleme grafiği, periyodik yapıya sahip bir sistem içindir. Uzun ve kesiksiz köşegen yapılardan meydana gelen bu yineleme grafiğinde, köşegen yapılar arasındaki dikey uzaklıklar eşittir. Bu uzaklıklar periyodik hareket yapan bir sitemin salınım frekansı ile ilgilidir. Şekil 3.1.b'de Rössler salınıcısının kaotik hareket sergilediği parametre değerlerindeki yineleme grafiği verilmiştir. Grafiğe dikkatli bir şekilde bakıldığı takdirde periyodik harekette olduğu gibi köşegen yapılar mevcuttur. Fakat bu yapılar hem daha kısa hem de arasındaki dikey uzaklıklar düzensizdir. Son grafikte ise herhangi bir köşegen yapı görülmemektedir. Stokastik bir sisteme ait olan bu yineleme grafiğinde, siyah noktalar tüm grafiği kaplamışır. Bunun sebebi stokastik sistemin rastgeleliğidir.

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, yineleme grafiğinin hepsi siyah noktalardan oluşacaktır. Bahsedilen iki durumda da ilgilenilen sistemin dinamiği hakkında herhangi bir bilgi alınamaz (Marwan vd., 2007).



Şekil 3.1. Farklı yapıya sahip sistemler için yineleme grafikleri; (a) Periyodik, (b) Kaotik ve (c) Stokastik

Eşik değerinin 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 (Koebbe ve Kress, 1992; Zbilut vd., 1992; Mindlin ve Gimore, 1992). İkinci bir seçim kuralında ise; içinde gürültü bulunduran gerçek sistem verileri için, sistemin σ standart sapması kullanılmaktadır (Thiel vd., 1992).

Üçüncü seçim kuralı ise oluşturulan yineleme grafiğindeki yineleme noktalarının yoğunluğun kullanılmasıdır. Bu seçim kuralında, yineleme noktalarının belirli bir yüzdede olması için farklı ϵ değerleri kullanılarak yineleme grafiği elde edilir (Schinkel vd., 2008).

3.2.1 Yineleme Grafiği Sayısal Nicelikleri

Yineleme grafiğinde oluşan yapılardan faydalanılarak hesaplanabilen yineleme grafiği sayısal nicelikleri yardımıyla herhangi bir sistemin dinamiği hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu niceliklerden faydalanılarak dallanma noktalarını ve kaotik-periyodik

(periyodik-koatik) geçişlerinin tespit edilebildiği gösterilmektedir (Trulla vd., 1996; Webber ve Zbilut, 1994; Zbilut ve Webber, 1992; Marwan vd., 2002).

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 NxN olur ve yineleme yoğunluğu;

$$RR(\epsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^{N} R_{i,j}(\epsilon), \tag{3.8}$$

şeklinde verilir.

Determinizm Niceliği: 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. Yineleme grafiğinde farklı yapıdaki sistemler için köşegen yapılarının nasıl değiştiğini Şekil 3.1'de görmekteyiz. Yineleme grafiğinde oluşan bu köşegen yapılardan faydalanarak sistemlerin karmaşıklık ölçümleri yapılabilmektedir. Bu köşegen yapıların uzunluklarının $P(\epsilon, l)$ dağılımı, dinamik bir sistemin yörüngelerinin birbirlerinden ayrılmasının bir ölçütüdür. Bu nicelik Lyapunov üsteli ile ilintilidir (Trulla vd., 1996; Marwan vd., 2007).

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

$$P(\epsilon, l) = \sum_{i,j}^{N-l} (1 - R_{i-1,j-1}(\epsilon))(1 - R_{i+l,j+l}(\epsilon)) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}(\epsilon), \tag{3.9}$$

denklemi kullanılarak bulunur.

Bu niceliği hesaplarken 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. Determinizm niceliği

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N} P(\epsilon, l)}{\sum_{l=1}^{N} P(\epsilon, l)}, \tag{3.10}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $l_{min} = 1$ olarak seçilirse, bu durumda köşegen yapıları oluşturan tüm noktalar hesaba katılmış olur ve determinizm niceliğini değeri 1 olur. Sonuç olarak determinizm niceliği 0 ile 1 arasında değişir ve 1'e yaklaştıkça sistemin tahmin edilebilirliği artarken, 0'a yaklaştığı durumda ise sistemin tahmin edilebilirliğinin azaldığı söylenir. Determinizm niceliği sitemdeki rejim geçişlerini tespit edebilmek için oldukça elverişlidir ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Trulla vd., 1996; Marwan vd., 2007).

3.3 Metrik Uzaklık ve Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi Yöntemi

Karmaşık yapıya sahip doğal sistemlerin zaman serisi analizlerinde kullanılan yineleme grafiği (Marwan vd., 2007), maksimum Lyapunov üsteli (Rosenstein vd., 1993), korelasyon boyutu (Grassberger ve Procacia, 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 uygulanabilinir. 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 sahiptir. 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 müdehale edildiği için ek bir gürültüye sebebiyet vermektedir (Rehfeld vd., 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.

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 (Victor ve Purpura, 1997). 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

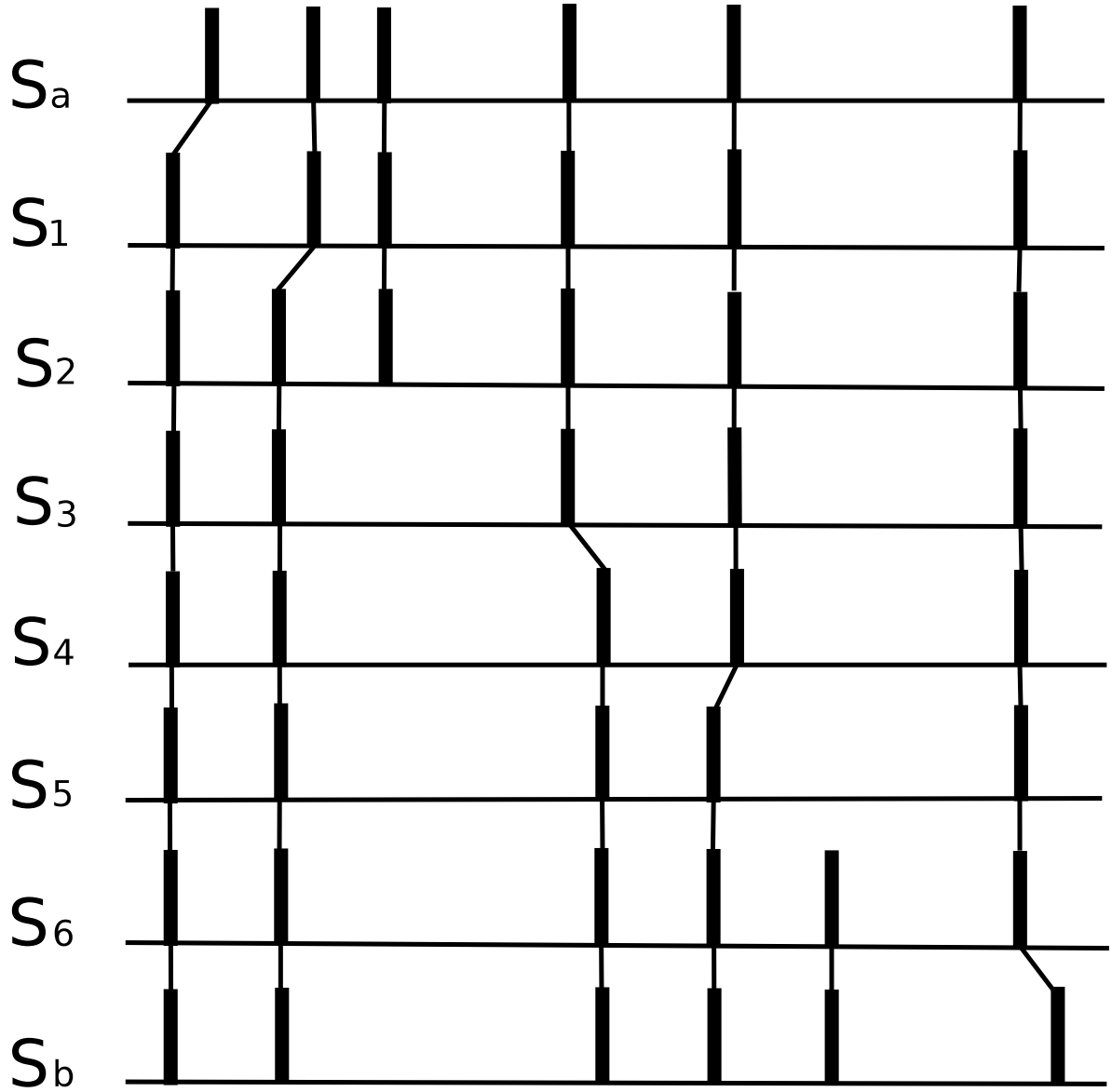
maliyetlerinin toplamı, iki veri grubu arasındaki metrik uzaklığı vermektedir. Victor ve Purpura, yapmış oldukları çalışmada ekleme p_e ve silme p_s işlemlerinin maliyetlerini 1 olarak almışlardır. Kaydırma p_k işleminin maliyeti için ise;

$$p_k = \lambda_0 | t_a - t_b |, \tag{3.11}$$

denklemini önermişlerdir. Burada yer alan λ_0 parametresi zamanla ilgili parametre 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 ve Purpura, 1997).

Metrik uzaklık hesabı için gerekli olan dönüşümün nasıl gerçekleştiğini daha iyi anlayabilmek için Şekil 3.2'yi 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 spikelara kaydırma işlemi ile dönüştürülürken, 3. adımda silme ve 6. adımda ise ekleme işlemi kullanılarak spikelar birbirlerine dönüştürülmüştür (Ozken vd., 2015).

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi dönüşüm için kaydırma, ekleme ve silme işlemlerinin her biri kullanılmıştır. Burada kritik olgu, hangi işlemi ne zaman kullanmamız gerektiğini doğru bir şeklide 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 seçenek mevcuttur. İlk seçenek olarak kaydırma işlemini uygulayabiliriz ve Denklem 3.11'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



Şekil 3.2. S_a veri grubunun S_b veri grubuna dönüştürülmesinin gösterimi. S_a S_b ye S_1 ,S_2,…., S_7 (S_b) olmak üzere toplam yedi adımda dönüştürülmüştür. Minimum maliyet ile dönüşüm yapılabilmesi için spikelar kaydırılmış, silinmiş ve eklenmiştir.

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 3.11'i tekrar incelersek denklemde yer alan λ_0 parametresinin seçiminin dönüşüm için kritik önem taşıdığı ortaya çıkmaktadır. λ_0 parametresinin alacağı değerle doğru orantılı bir sekilde kaydırma işleminin maliyeti değişmektedir. Bu durumda λ_0 parametresinin seçimi için limit koşullar incelenirse;

- $\lambda_0 \to 0 \Longrightarrow \lambda_0 |t_a - t_b| \to 0$
- $\lambda_0 \to \infty \Longrightarrow \lambda_0 |t_a - t_b| \to \infty$

durumları meydana gelir. $\lambda_0 \to 0$ 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 gelmektedir. Tam tersi durumda ise $\lambda_0 \to \infty$ 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 ve 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;

- $D(S_a, S_b) \geq 0$ (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 ve Purpura, 1997).

Victor ve Purpura metrik uzaklık tanımını ortaya attıktan sonra bu konuyla ilgili bir çok çalışma yapılmıştır (Hirata ve Aihara, 2009; 2012; Diez vd., 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 hesaplamak adına aşağıdaki denklemi önermişlerdir (Suzuki vd., 2010).

$$p(c) = \sum_{(\alpha,\beta)\in C} \{\lambda_0 \,|\, t_a(\alpha) - t_b(\beta) \,| \tag{3.12}$$

$$+\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} \lambda_k \,|\, L_{a,k}(\alpha) - L_{b,k}(\beta) \,|\, \} + |\, I \,| + |\, J \,| - 2\,|\, C \,|$$

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 parametreli ilk terim verilerin zaman bakımından kaydırma maliyetini vermektedir. λ_k ile başlayan ikinci terim ise aynı verilerin büyüklüğünün değiştirilmesiyle ilgilidir. Toplam işaretindeki m ise verilerde birden fazla boyut (büyüklük) olduğu takdirde hesaba katılmasını sağlamaktadır. Denklemde 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 vd., 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 ve Aihara, 2009; 2012; Diez vd., 2012).

Parametre seçimlerine motivasyon sağlayabilmek adına Victor ve Purpura'nın metrik uzaklık tanımını incelendiğinde, 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 3.12'de yer alan λ_0 ve λ_k parametreleri ile başlayan kısımlar, dönüşüm sırasında kullanılacak olan kaydırma işlemlerinin toplam maliyetini hesaplamaktadır. Kaydırma işleminin 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 Ozken vd. tarafından ;

$$\lambda_0 = \frac{M}{Toplam\ \ Zaman} \tag{3.13.a}$$

$$\lambda_k = \frac{M-1}{\sum_i^{M-1} |L_{i+1} - L_i|}, \tag{3.13.b}$$

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

Kaydırma işleminin maliyetini hesaplamak için gerekli olan parametrelere motivasyon katıldıktan sonra, metrik uzaklık tanımındaki başka bir eksiklik olduğu kanısına varılmıştır. Victor ve Purpura'nın tanımında, ekleme ve silme işlemeleri için maliyetin 1 olduğunu söylenmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi söz konusu çalışmada spikelar 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 3.12'deki ekleme ve silme maliyetlerinin önüne λ_S parametresi eklenmiştir. Böylece toplam maliyet yani metrik uzaklık denklemi;

$$p(c) = \sum_{(\alpha,\beta)\in C} \{\lambda_0 \,|\, t_a(\alpha) - t_b(\beta) \,|\, + \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} \lambda_k \,|\, L_{a,k}(\alpha) - L_{b,k}(\beta) \,|\, \} + \lambda_S(\,|\, I \,|\, + \,|\, J \,|\, - 2\,|\, C \,|\,) \tag{3.14}$$

şeklini almıştır. Bu eklenen parametre ile farklı sistemler için farklı ekleme ve silme maliyetleri, metrik uzaklık hesabına katılmıştır (Ozken vd., 2015). λ_S parametresini seçimine ileride değinilecektir.

Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi yönteminin temelini oluşturan metrik uzaklık kavramı detaylı bir şekilde bahsedildikten sonra Dönüşüm Maliyet zaman serisinin nasıl uygulandığını inceleyelim. Dönüşüm maliyet zaman serisi yöntemini uygulamak için elimizde N tane veriye sahip bir zaman serisi düşünelim ve bu zaman serisi $X = (x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_N)$ 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 3.14'ten faydalanılarak hesaplanır. Eğer her bir pencere $W_i(i = 1,2,3.....,n)$ile temsil edilirse, $p(W_1, W_2), p(W_2, W_3), p(W_3, W_4), \ldots, p(W_{n-1}, W_n)$ 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 (Ozken vd., 2015).

λ_S parametresinin seçimi için merkezi limit teoreminden faydalanılmıştır. Bu teoreme göre, doğada bulunan herhangi bir sistemde gerçekleşen olayların sayısı yeteri kadar fazla ise $(n \to \infty)$, 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;

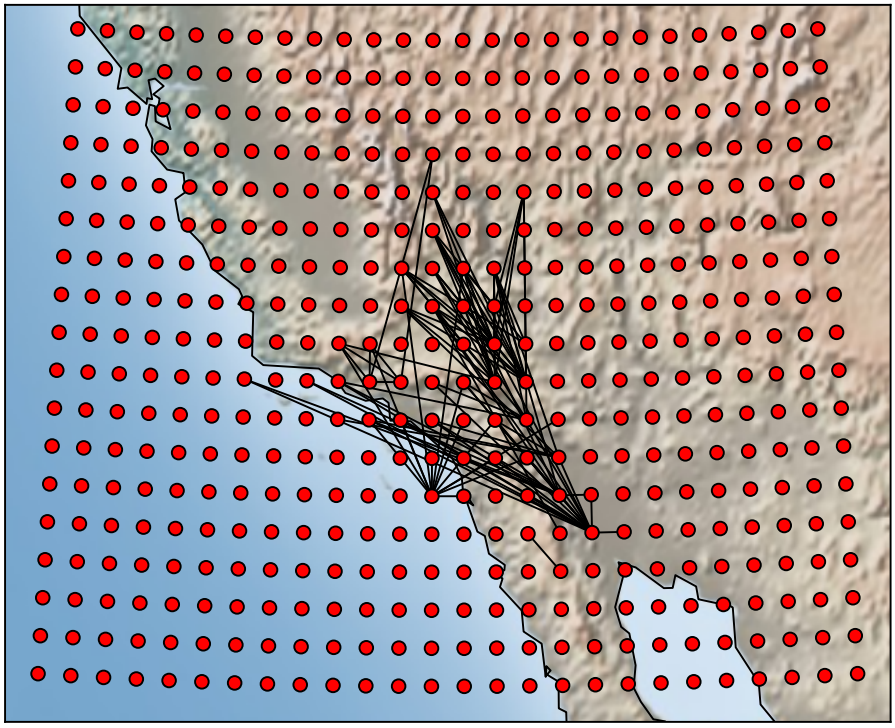
ilk olarak zaman serisi eşit büyüklüğe sahip pencerelere bölünür ve tüm pencerelerin birbirleri arasındaki metrik uzaklıklar $\lambda_S \in [0,4]$ aralığında $\Delta\lambda_S = 0.01$ duyarlılık ile hesaplanır. λ_S parametresinin tüm değerleri için hesaplanan pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımı çizdirilir ve bu dağılımlardan normal dağılıma en yakın dağılımı meydana getiren λ_S parametresi sistemin ekleme ve silme maliyeti olarak alınır (Ozken vd., 2015).

4. ANALİZ SONUÇLARI

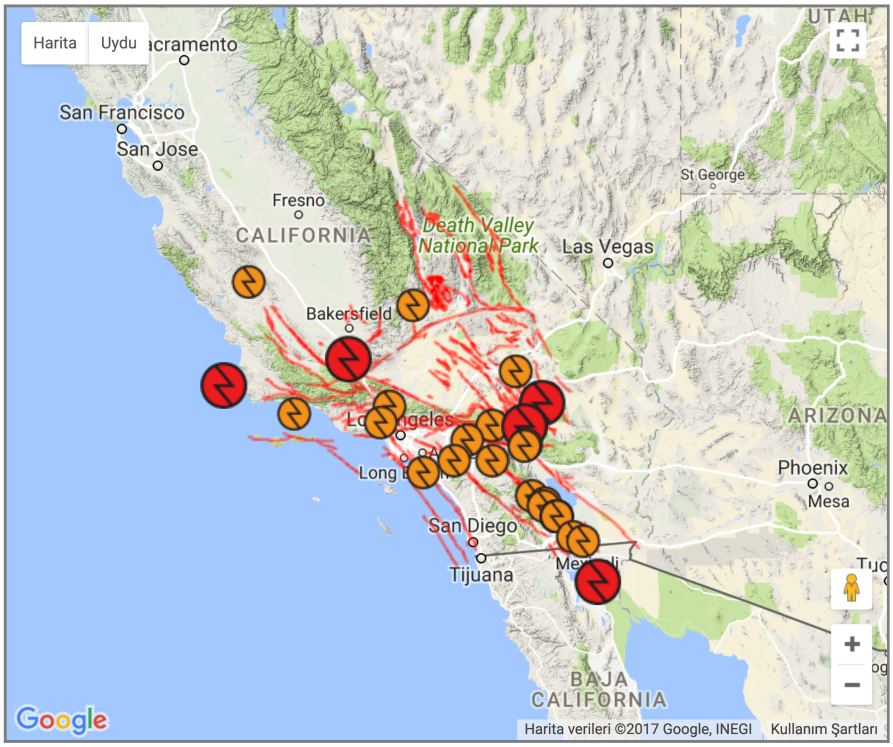
4.1 Kaliforniya Kataloğu İçin Yönelimsiz Ağ Oluşturulması Ve Analizi

Bir önceki bölümde bahsedilen olay eş zamanlılığı yöntemi kullanılarak Kaliforniya Bölgesi için yönelimsiz ağlar oluşturulmuştur. Güney Kaliforniya bölgesi için http://service.scedc.caltech.edu/eq-catalogs/date_mag_loc.php adresinden indirilen veriler kullanılmıştır. Kaliforniya bölgesinde Güney ve Kuzey olmak üzere iki farklı katalog mevcuttur. Bazı depremler iki kataloğun da kapsama bölgesine girdiği için her ikisinde de yer almıştır. Bununla birlikte bu depremlerden özellikle büyüklüğü 3.0'den ($M < 3.0$) küçük olanlardan bazılarının büyüklükleri farklı kaydedilmiştir (Efstathiou vd. 2017). Bu tür farklar ihmal edilemeyecek derecede olduğundan Kuzey ve Güney Kaliforniya katalogları birleştirilerek incelenmemiştir. Üzerine daha çok çalışma yapılmış olan Güney Kaliforniya kataloğu ele alınmıştır. Bahse konu katalogdan alınan ve incelenen veriler 01/01/1984 - 01/01/2017 zaman dilimini kapsamaktadır. Katalogda daha önceki yıllara ait veriler mevcut olmasına rağmen literatürdeki genel eğilim 1984 yılından sonraki verileri kullanmak şeklindedir.

Bahsi geçen bölgede yönelimsiz ağlar oluşturmak için, bölge LxL boyutunda hücrelere ayrılmıştır. Hücre boyutu L için $L = 0.125^o, L = 0.25^o, L = 0.50^o, L = 1.0^o$ değerleri kullanılmıştır. Burada en küçük değer olan $L = 0.125^o$ değeri seçilirken hücreler içerisine düşen deprem sayılarının ağ oluşumuna izin vermeyecek kadar az olmaması birincil öncelik olmuştur. Bununla birlikte daha küçük hücre boyutlarına gidildikçe deprem merkez üslerinin konumlarındaki küçük belirsizlikler bir hücrede meydana gelen depremin diğer hücredeymiş gibi hesaba katılmasına neden olabilir. Wells ve Coppersmith tarafından yapılan bir çalışmada deprem büyüklükleri ile fay uzunlukları arasında gözlemsel bağıntı aktarılmıştır (Wells ve Coppersmith, 1994). Bu çalışmaya göre yüzeydeki uzunluğu kabaca $50\ km$ olan bir fay $M \approx 7.0$ büyüklüğünde bir deprem üretebilir. Ele aldığımız bölgedeki en büyük depremlerin büyüklüğü 7.0'nin biraz üzerindedir. Jimenez tarafından karşılıklı bilgi yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada yukarıdaki gözlemsel sonuçlardan yola çıkılarak hücre büyüklüğü $0.5^o x 0.5^o$ olarak seçilmiştir (Jimenez, 2013). Yaptığımız çalışmalarda yukarıdaki bilgiler ışığında hücre boyutunun en üst değeri $L = 1.0^o$ olarak belirlenmiştir. Böylece bölgede meydana gelebilecek olası en büyük depremin fay uzunluğundan daha büyük bir hücre büyüklüğü belirlenmiştir. Bu farklı hücre büyüklüğü seçimlerindeki amaç olası tüm durumları değerlendirmek ve seçimin sonuçlar üzerine etki edip etmediğini görmektir. Aynı şekilde olay olarak ele aldığımız depremler için de farklı deprem büyüklüğü eşik değerleri kullanılmıştır. Deprem büyüklüğü eşik değerleri için $M_{th} = 2.0, M_{th} = 2.5, M_{th} = 3.0,$



Şekil 4.1. Güney Kaliforniya Bölgesi için deprem ağ modeli örneği



Şekil 4.2. Güney Kaliforniya Bölgesi için büyüklüğü 6.0'ın üstünde olan kabaca son yüzyıldır meydana gelmiş tarihsel depremleri gösteren harita. Kırmızı daireler 7.0'den büyük depremleri , sarı daireler ise 6.0'dan büyük depremleri göstermektedir. Harita Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nün Güney Kaliforniya Deprem Veri Merkez (SCEDC) web sitesinden alınmıştır (http://scedc.caltech.edu/significant/index.html).

$M_{th} = 3.5$ değerleri kullanılmıştır. Literatüre göre ele alınan katalog 2.0 veya 2.5 için tamdır denir. Bu değerler deprem büyüklüklerinin sıklık dağılımlarının (Gutenberg-Richter yasası) kuvvet yasası davranışı gösterdiği aralığın başlangıç değerine karşılık gelir. Tarafımızdan daha küçük olan değer tercih edilmiştir. Üst sınır içinse her ne kadar büyük depremleri ele almak istesek de Gutanberg-Richter yasası gereği katalogda büyüklüğü 3.5'den daha büyük olan depremlerin sayısı çok az olduğundan daha büyük eşik değerlerinde deprem sayısı yetersiz gelmektedir. İki olay arasında azami süreler için eşik değerler ise $\tau = 10$ gün, $\tau = 30$ gün, $\tau = 180$ gün, $\tau = 365$ gün şeklinde seçilmiştir. Buradaki seçim Omori yasası gereği bir depremin artçı şok serisinin son bulması için yani deprem olan bölgenin durulması için geçen süre göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Büyük bir depremin artçı şokları genelde bir yıl olmadan son bulur. Dolayısıyla en büyük değer olarak bir yıl seçilmiştir. Daha küçük ölçekli bir depremin artçı şok serisininde daha az zaman aralıklarında son bulacağı düşünülerek alt sınır 10 gün olarak belirlenmiştir. Bunların dışında son olarak eş zamanlılık değeri $0 < Q_{th} < 1$ aralığında 0.1 adım aralıkları ile seçilmiştir. Literatürde ağ oluşturulurken eşik değer ağdaki noktaların belirli bir kesri ağa katılsın sınırı ile seçilebilmektedir (Malik vd., 2011). Bu tür seçimlerdeki amaç gerçekten sıra dışı olayların ağın dinamiğine etkisini araştırmaktır. Yüksek eşik değerleri ağın az sayıda noktasının olmasına veya hiç noktasının olmamasına yol açacağından aslında ortada bir ağ yok demektir. Benzer biçimde eşik değerin çok küçük seçilmesi neredeyse her noktanın ağa katılmasına sebep olur. Bu durumda ağın dinamiği maskelenebilir ve ağ için önemli olan hücrelerin tesbiti zorlaşır. Dolayısıyla pek çok farklı parametre için farklı eşik değerler kullanarak ağ oluşturmuş olmamıza rağmen sonuçlar aktarılırken bazı parametre değerindeki ağların üzerinde durulacaktır.

Güney Kaliforniya bölgesi için yukarıdaki anlattığımız şekilde oluşturulan bir ağ örneği Şekil 4.1'de verilmiştir. Verilen örnekte eşik değerler, deprem büyüklüğü eşik değeri $M_{th} = 2.5$, hücre boyutu eşik değeri $L = 0.5^0 x 0.5^0 (18 x 26)$, iki deprem arasındaki azami sürenin eşik değeri $\tau = 10$ gün ve olay eş zamanlılığı eşik değeri $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

Şekil 4.2'deki haritada yer alan büyük depremlerden birbirine bitişik olan iki kırmızı daireden altta olanı Landers (28/06/1992, $M = 7.3$) ve üstte olanı ise Hector Mine (16/10/1999, $M = 7.1$) depremlerini göstermektedir. En güneyde kalan büyük deprem ise El Mayor-Cucapah (04/04/2010, $M = 7.2$) depremidir. Haritanın sol üst kısmında kalan büyüklüğü 7.0'nin üzerinde olan iki deprem ise 1984 yılından önce meydana geldiği için

analizlerimizde yer almamaktadır. Haritada görülen büyüklüğü $6.0 - 7.0$ aralığında olan pek çok depremde yine 1984 yılından önce meydana gemiştir. 1984 yılından önce meydana gelmiş bu depremlere haritada yer vererek daha aktif olan bölgelerin görselleştirilmesi amaçlanmıştır. Bölgenin en önemli fayı olan San Andreas Fayı kuzeybatıdan, güneydoğuya doğru sahile paralel şekilde 1200 kilometre boyunca uzanır. Fayın Güney Kaliforniya Bölgesi'nde kalan kısmı kuzeyde Parkfield'den (en kuzeydeki sarı daire) başlayıp, güneyde Indio'ya (Landers depremini gösteren kırmızı dairenin biraz aşağısında bir bölge) kadar uzanır. Fayın $6.8 - 8.0$ büyüklükleri arasında bir deprem üretme potansiyeli olduğu bilinmektedir. Faylar haritada kırmızı çizgiler olarak gösterilmiştir. Bölgede San Andreas Fayı'na paralel pek çok irili ufaklı fay mevcuttur. Bölgede bu faylara dik olarak uzanan irili ufaklı görece az sayıda faylar da mevcuttur. Bunlardan en bilineni haritada Bakersfield'in hemen altından başlayan ve Las Vegas'a doğru ilerleyen Garlock Fay Kuşağı'dır. Bu fay kuşağının toplam uzunluğu 250 kilometredir.

Merkezilik Ölçümleri:

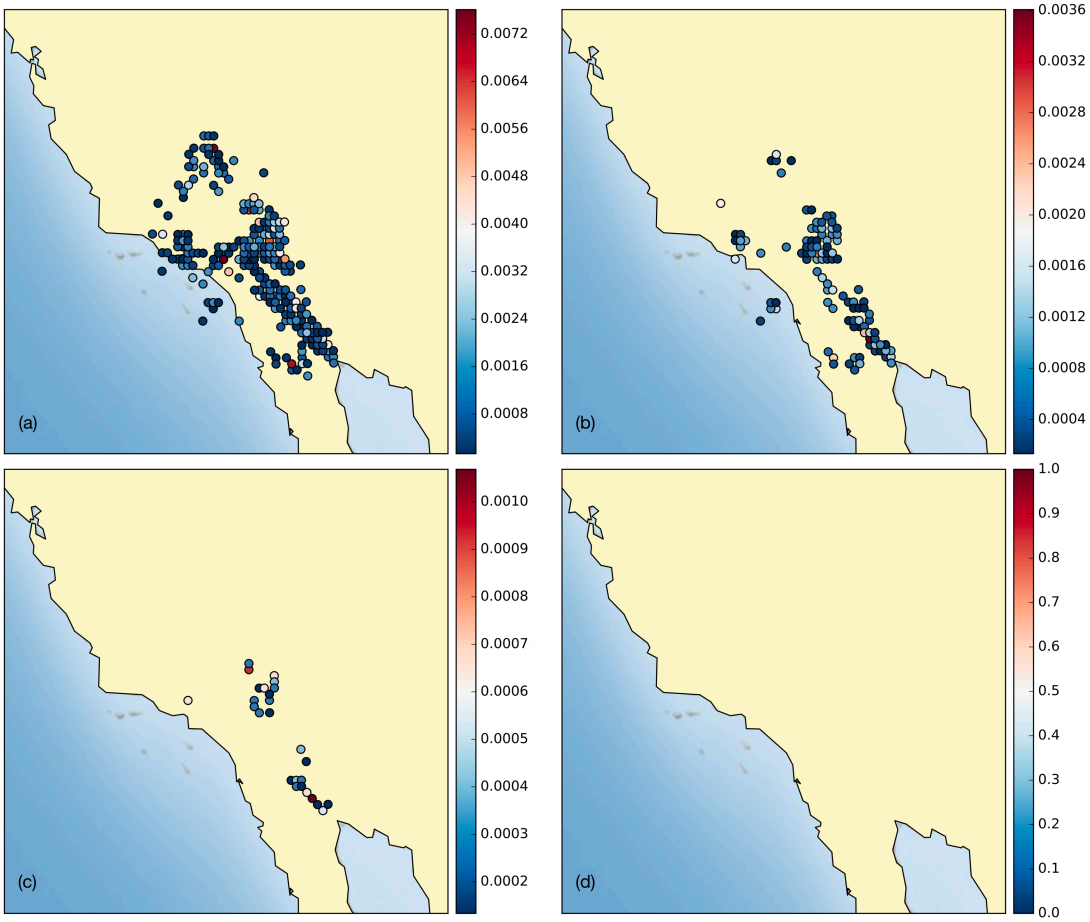
Ağ üzerine yapılmış pek çok çalışma merkezilik üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalar, ağ üzerinde hangi noktanın en önemli ve merkezi olduğu sorusuna cevap ararlar. Tabiki bu sorunun önemden ne kastettiğimize göre değişen çok sayıda cevabı olabilir. Dolayısıyla literatürde bir noktanın ağ üzerindeki etkinliğinin farklı ölçümleri mevcuttur. Bunlardan bazıları oluşturduğumuz deprem ağlarının analizi için kullanılmıştır. Kullandığımız merkezilik ölçümleri aşağıda açıklanmıştır.

Derece Merkeziliği : Bahsi geçen merkeziliklerden belkide en bilineni derece merkeziliğidir. Bağlantı sayısı çok olan noktanın ağ içinde daha önemli role sahip olacağı fikrine dayanır. Bu fikre göre bir sosyal grup içerisinde en çok kişiyi tanıyan birey daha etkin ve önemlidir. Sanal ortamda daha çok takipçisi olan bireyler daha popülerdir. Bu nicelik bir hücreye bağlı bulunan hücrelerin sayısının toplam hücre sayısına oranı olarak verilir. Bir ağ noktası (j) için derece merkezliliği C_{Dj},

$$C_{Dj} = \frac{\sum_{i=1}^{N} A_{ij}}{N-1}, \tag{4.1}$$

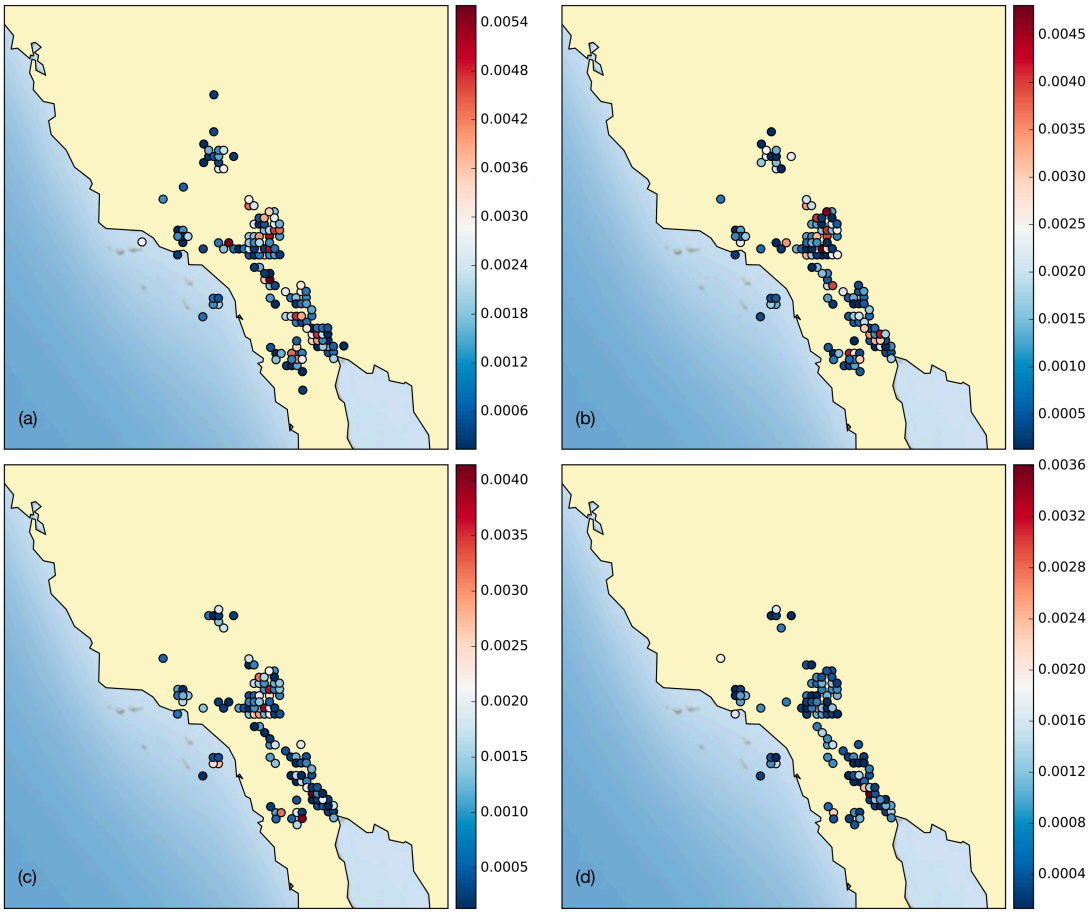
şeklinde ifade edilir. Burada N ağ üzerindeki noktaların toplam sayısı, A_{ij} oluşturduğumuz ağı temsil eden bitişiklilik matrisidir.

Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi deprem büyüklüğü eşik değeri arttıkça deprem sayısı azaldığı için ağdaki nokta sayısı ve buna bağlı olarak bağlantı sayısı azalmaktadır. Öyle ki deprem



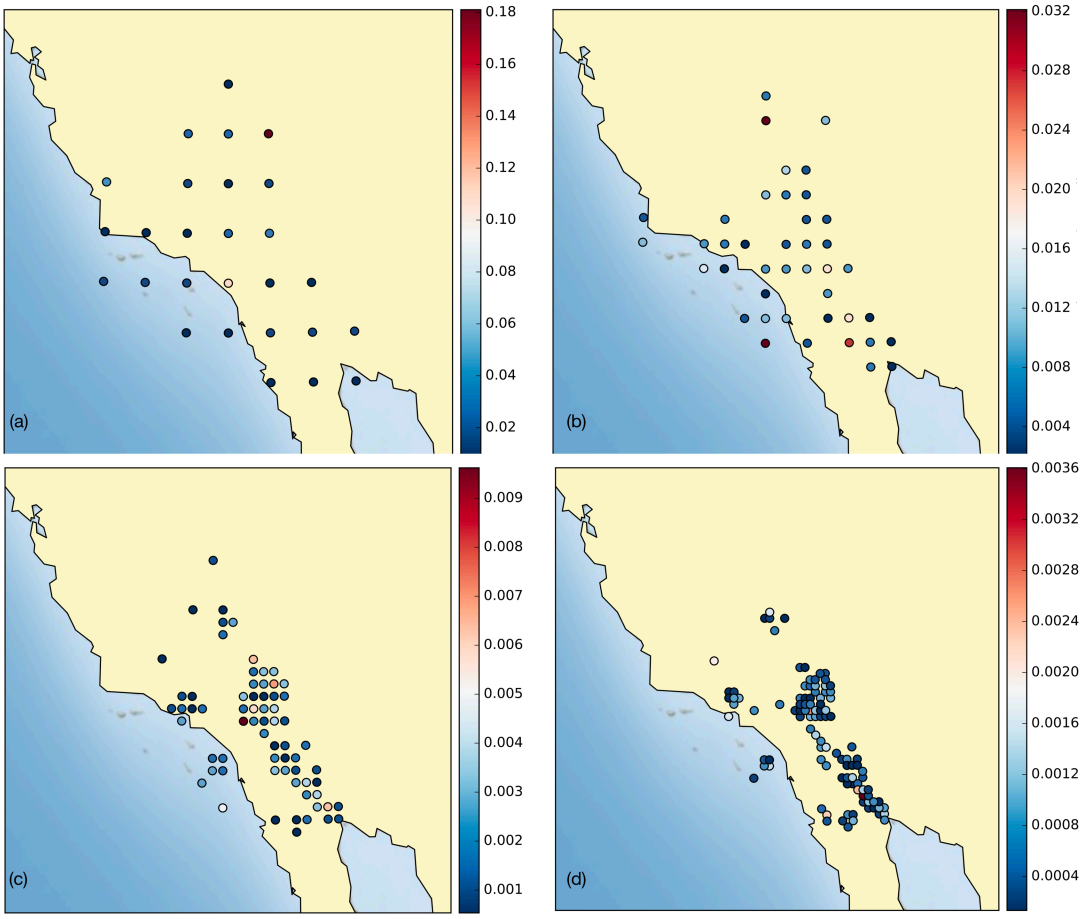
Şekil 4.3. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği *a)* $M_{th} = 2.0$, *b)* $M_{th} = 2.5$, *c)* $M_{th} = 3.0$, *d)* $M_{th} = 3.5$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

büyüklüğü eşik değeri 2.0 için, bu büyüklüğü geçen çok sayıda deprem olduğundan her hücre içerisine yeterli sayıda deprem düşmektedir. Dolayısıyla küçük depremler açısından aktif olan tüm hücreler ağa katkı verir. Bu durumda bölgede neredeyse irili ufaklı tüm fayların olduğu hücrelerden katkı geldiğinden Şekil 4.2 ile Şekil 4.3.a karşılaştırıldığında Şekil 4.3.a gibi bir derece merkezliliği grafiğinden bölgenindeki fayların yerleri hakkında kabaca bilgi elde edilebileceği görülmektedir. Deprem büyüklüğü eşik değeri arttıkça hücreler içerisine düşen veri sayısı azaldığından ağa katkıda bulunacak hücrelerin görece büyük depremler açısından daha aktif olmaları, başka bir ifadeyle daha yüksek enerjili depremler üretmeleri gerekmektedir. Fay uzunluğu ile fayın üretebileceği azami deprem büyüklüğü arasında ilişki olduğu bilinmektedir (Wells ve Coppersmith, 1994). Her ne kadar veri azlığından dolayı büyük eşik değerleri kullanamıyor olsak da deprem büyüklüğü eşik değeri artıkça görece daha aktif ve daha uzun fayların olduğu hücrelerin katkısı gözlenmeye başlar. Deprem büyüklüğü eşik değeri $M_{th} = 2.0$ den (Şekil 4.3.a) başlayarak sırasıyla, $M_{th} = 2.5$



Şekil 4.4. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

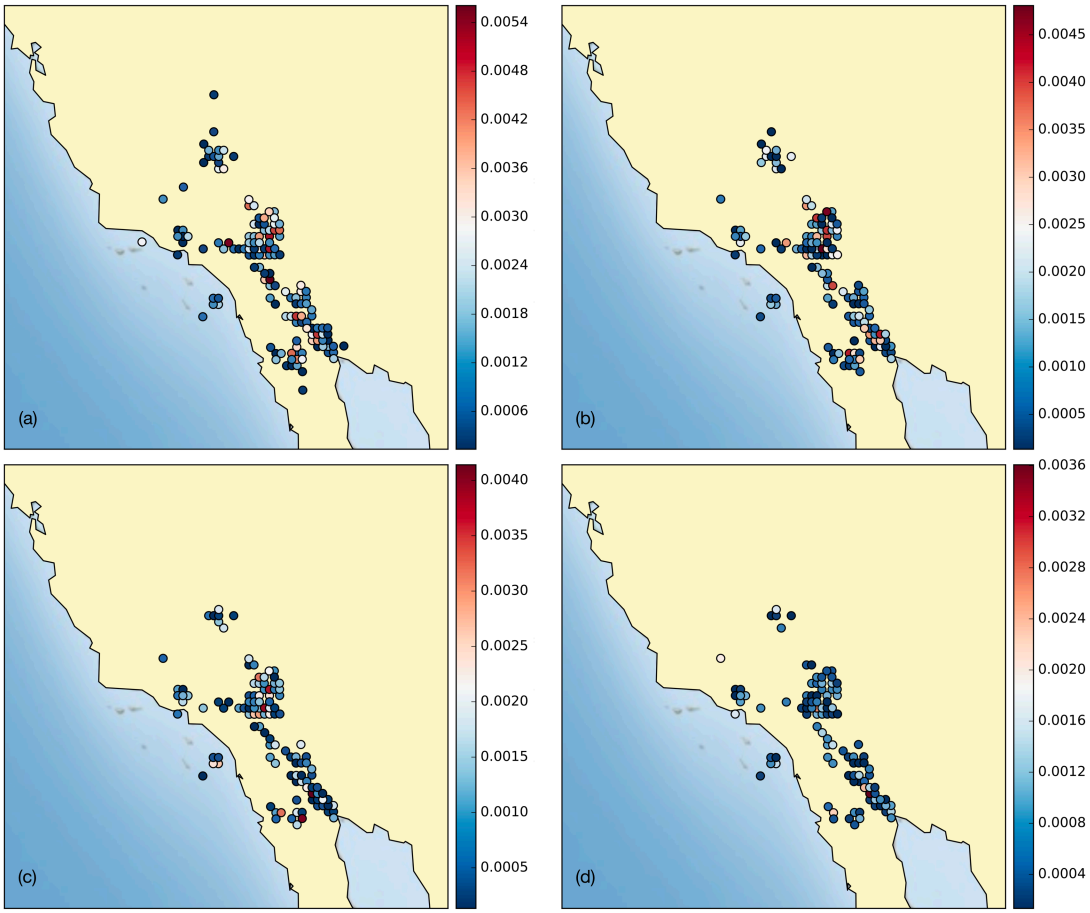
(Şekil 4.3.b), $M_{th} = 3.0$ (Şekil 4.3.c), $M_{th} = 3.5$ (Şekil 4.3.d) şeklinde artırıldıkça önce San Andreas Fay Kuşağı ve paralelindeki bölgelerin, Garlock Fay Kuşağı ve üstündeki hücrelerin ($M_{th} = 2.5$) büyük depremler açısından aktif kalabildikleri görülmektedir. $M_{th} = 3.0$ değeri geçildiğinde ise yine San Andreas Fay Kuşağı'na yakın bölgelerden daha çok katkı geldiği görülmektedir. Burada kümelenmenin yukarıda bahsettiğimiz üç büyük depremin çevresinde meydana geldiğine dikkat edilmelidir. Bu depremlerin artçıları yakın çevresinde daha çok kümelendiğinden ağa katkı konusunda bu hücreler devamlılık göstermektedir. $M_{th} = 3.5$ değerine gelindiğinde deprem sayısı azaldığından 10 günlük eşik değer içinde hücrelerde $Q = 0.9$ değerini aşacak kadar fazla deprem olmadığından hiç bir hücre ağa katılamamıştır. Deprem büyüklüğü eşik değeri biraz daha artırıldığında hücrelerde yeterli sayıda deprem kalmadığından daha büyük şiddetteki depremler için bir analiz yapılması mümkün olmamıştır. Şekil 4.3'deki derece merkeziliği grafiğinden bölgenin fay yapısı, bu faylardan hangi



Şekil 4.5. Azalan hücre boyutuna göre derece merkezliliği grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

hücrelerden geçenlerinin geçmişte belirli bir büyüklüğün üzerinde deprem üretttiği ve en aktif olan bölgelerin nereler olduğu soruları yanıtlanabilmektedir.

Şekil 4.4'e bakıldığında ise depremler arasındaki azami bekleme süresinin artışının ağa etkisi görülmektedir. Bir hücrede bir deprem olduktan azami ne kadar zaman sonra başka bir hücrede de deprem olursa bu iki depremin olay eşzamanlılığı ölçümüne katkı sağlayacağını sınırlayan bu parametre arttıkça bir önceki grafik için ortaya koyulan bulgular çok fazla değişmemektedir. Öyle ki daha büyük τ değerine doğru gidildikçe mevcut aktif hücrelere ek olarak az sayıda yeni hücre ağa eklenmekte veya mevcut hücreler kendi aralarında daha çok bağ kurma eğiliminde olmaktadırlar. Bahsi geçen bekleme süresi 1 yıla kadar artırıldığında çok aktif olamayan fakat her yıl bir kaç tane depremin olduğu hücreler ağa katılmaya başlar. Aynı şekilde bu süre arttıkça her hücreye daha fazla sayıda deprem düşeceğinden hali hazırda ağa bağlı fakat birbirinden bağımsız olan hücreler bağ oluşturma imkanı bulurlar. Dolayısıyla artan τ değerleriyle derece merkezliliği artan (daha kırmızı



Şekil 4.6. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.7$, c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

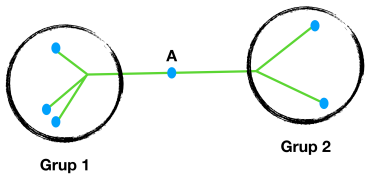
olmaya başlayan) bu noktalar mevcut aktif hücreler olabilleceği gibi görece daha küçük depremlerin olduğu kısa faylara sahip noktalar da olabilir. τ süresini çok artırmanın gerçekten aktif olan bölgeleri maskelediği düşünülmektedir. Sıra dışı aktivitelerin olduğu hücreleri gözlemleyebilmenin yolu ağdaki bağ sayısını sınırlandırmaktır.

Şekil 4.5'e bakıldığında büyük hücre boyutlarında (Şekil 4.5.a) az sayıda nokta olduğu ve bu noktaların büyük bir bölgeye yayıldığı fakat fay yapısı veya aktivitesi hakkında bilgi elde edilemediği görülmektedir. Bu durum adeta düşük çözünürlükte bir fotoğrafa bakmak gibidir. Dolayısıyla daha küçük hücre boyutlarında çalışmanın daha uygun olacağı görülmektedir. Azalan hücre boyutlarına gidildikçe hem hücre saysısı artmakta hem de hücrelerin içerisine düşen deprem sayısı azaldığı için ağ çok sayıda aktif hücrenin katılımından oluşmaktadır. Şekil 4.5 incelendiğinde hücre büyüklüğü eşik değerini $L = 0.125^o$ seçmenin daha uygun olduğu görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi

hücre büyüklüğü daha da küçültüldüğünde hücrelere düşen deprem sayısı çok azaldığı için ağ oluşumunda problemler yaşanmaktadır.

Şekil 4.6'da ise artan olay eşzamanlılığı eşik değerinin etkisi görülmektedir. Olay eş zamanlılığının küçük değerlerine doğru gidildikçe (Şekil 4.6.a) artan τ ile benzer etkiler görülmektedir. Q_{th} eşik değerinin küçük seçilmesi iki hücre arasında birbirini takip eden depremlerin sayısının görece daha az olduğu durumlarda dahi aralarında bağ oluşmasına izin verir. Dolayısıyla daha önce ağa bağlı olmayan noktalar küçük Q_{th} değerlerinde ağın parçası haline gelebilirler veya ağa bağlı noktalar daha çok bağ yaparak derece merkeziliği değerlerini artırabilirler. Bu durum tıpkı artan τ değerlerinde olduğu gibi aktif hücrelerin ağ içinde sıradanlaşmasına ve bu hücrelerden alınacak bilginin maskelenmesine sebep olabillir.

Arasındalık Merkeziliği: Bir hücrenin (nodun, noktanın) ne kadar önemli olduğunun bir diğer ölçüsü de arasındalık merkeziliğidir (betweenness centrality). Diğerlerinden farklı olarak bir noktanın ağa ne kadar iyi bağlandığını ölçmez. Aksine ilgilenilen noktanın diğerlerinin arasında olmasının bir ölçüsüdür. Birbirleri ile bağlantılı olmayan iki hücre veya hücre gurubu

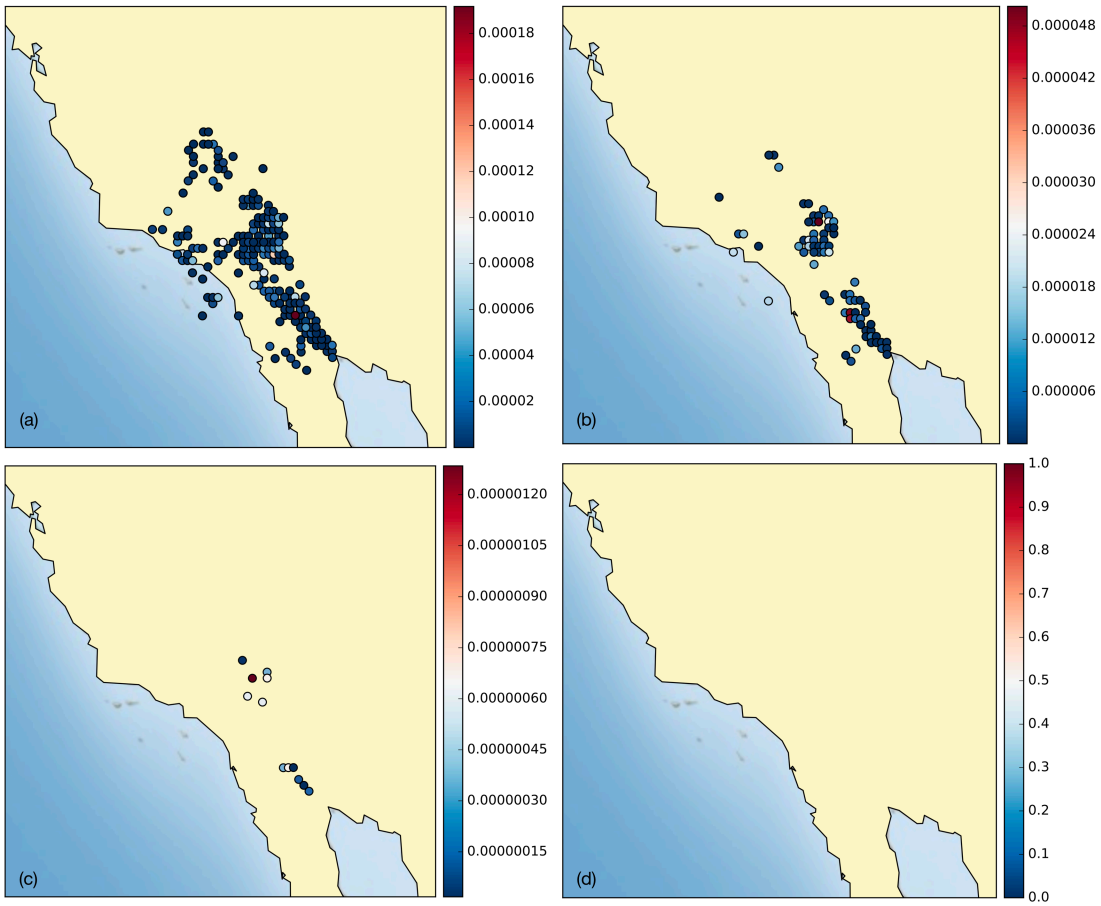


Şekil 4.7. Arasındalık merkeziliği için bir görselleştirme.

başka bir hücre ile birbirlerine bağlanmış olabilirler. Arasındalık merkeziliği bu şekildeki bağlantıların ne kadarının seçilen bir hücre üzerinden olduğunun bir ölçüsüdür. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi A noktasının derece merkeziliği düşük olmasına rağmen farklı grupları birbirine bağladığı için arasındalık merkeziliği yüksektir.

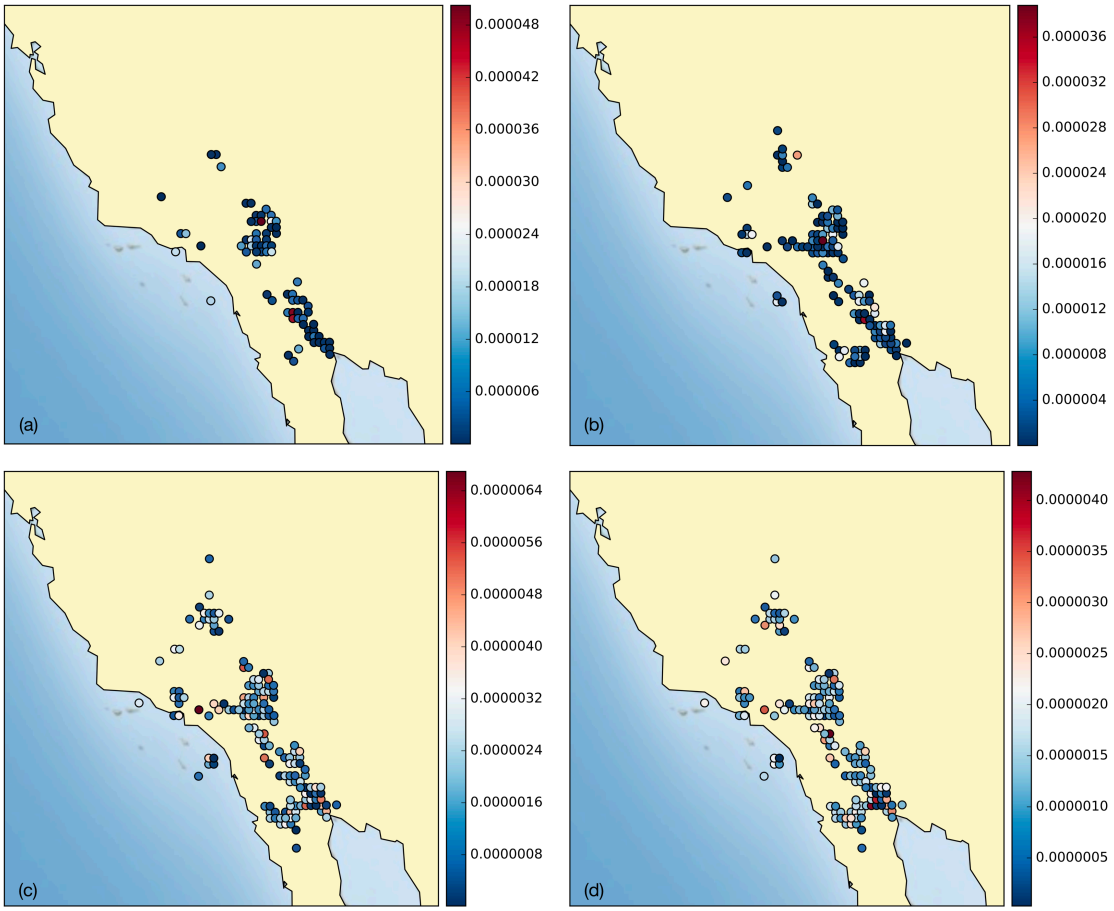
Bir noktadan başka bir noktaya akan herhangi bir nicelik olduğunu varsayalım. Bu internet ağı için veri paketleri olabileceği gibi sosyal bir ağ için bir mesaj olabilir. Bu mesajın geçiş yolunda olan bir kişi mesajları okursa veya mesaj başına bir miktar para alırsa, bulunduğu konumdan dolayı bir güç elde etmiş olur. Bu duruma zıt pencereden bakarsak ağdan o noktayı çıkarmak ağın bozulmasına ve hatta ağdaki iki farklı küme arasındaki bağlantının kopmasına sebep olacaktır. Yüksek arasındalık değerine sahip noktalar ağ üzerinde köprü görevi gördükleri için önemlidirler.

Freeman tarafından iki nokta arasındaki en kısa yolları saymak için ortaya atılmış bir niceliktir (Freeman 1977). Freeman ağdaki akışın pek çoğunun bu en kısa yollar üzerinden olacağı varsayımından yola çıkarak arasındalık merkeziliğini tanımlamıştır. Zaman içinde değişik genelleştirmeleri yapılmış olup bunlardan bazıları en kısa yol arasındalığı, akış arasındalığı ve rasgele yürüyüş arasındalığıdır. Yapılan analizlerde literatürde de daha sık kullanılan en kısa yol arasındalığı kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre arasındalık merkezililiği grafiği $a)\ M_{th} = 2.0,\ b)\ M_{th} = 2.5,\ c)\ M_{th} = 3.0,\ d)\ M_{th} = 3.5.$ Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^{o}$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

Fiziksel açıdan ele alındığında bir bilginin en kısa yol üzerinden yayılacağı kabulü yapılırsa, arasındalık değeri yüksek noktalar bilginin akış yolu hakkında bilgi verir. Bir deprem bölgesinde farklı yoğunluğa sahip kayaç bölgeleri olabileceğinden stres bir doğrultuda diğerinden hızlı yayılabilir. Arasındalık merkezliği yardımıyla bu yayılmanın doğrultusu ve bağlantı noktalarını ortaya çıkarmayı hedefledik. Bu nicelik matematiksel olarak



Şekil 4.9. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

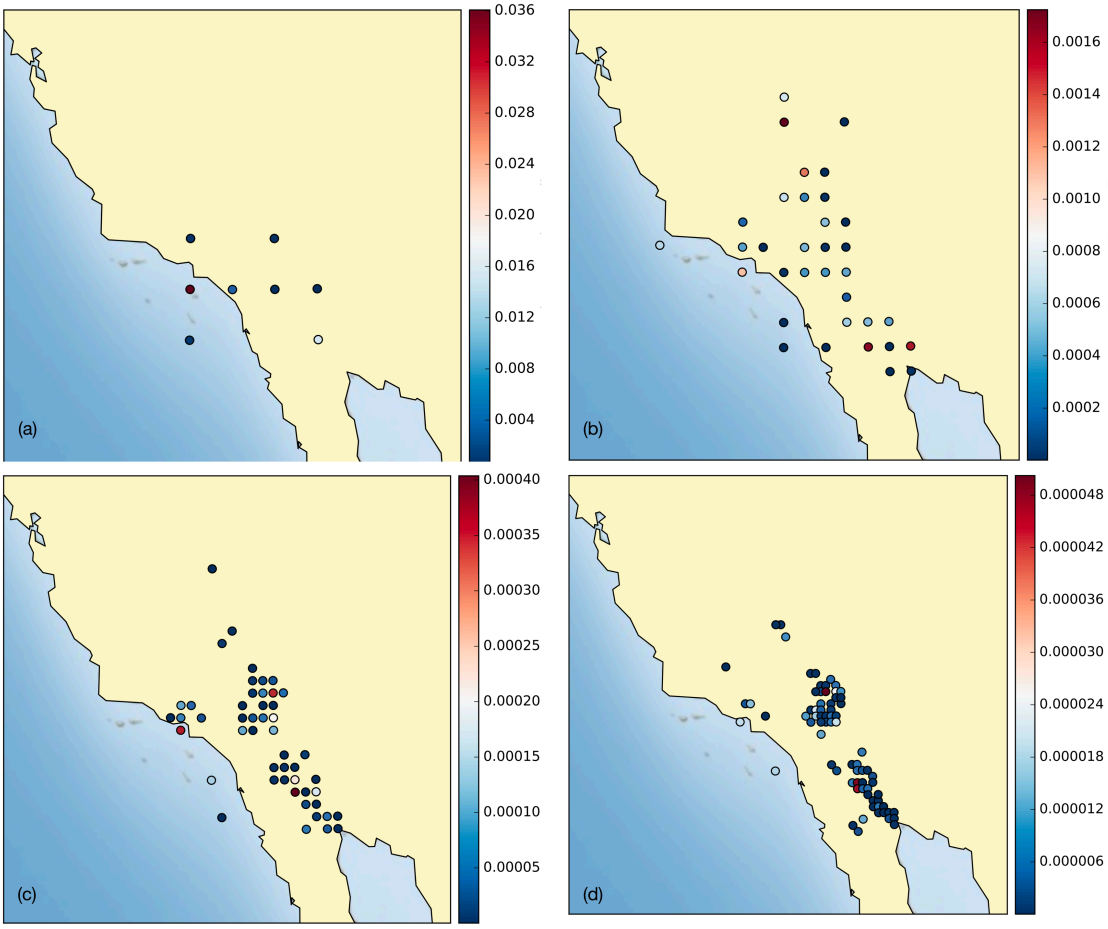
$$C_{Bj} = \sum_{j \neq s \neq t \in V} \frac{\sigma_j(s,t)}{\sigma(s,t)} \tag{4.2}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\sigma(s,t)$ s ve t hücreleri arasındaki en kısa yolların sayısını, $\sigma_j(s,t)$ ise bu yollardan j üzerinden geçenlerin sayısını ifade eder.

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi artan deprem büyüklüğü eşik değeri, derece merkeziliğindekine benzer bir etki yapmaktadır. $M_{th} = 2.0$ (Şekil 4.8.a) için neredeyse tüm hücrelerden katkı gelmektedir. Gutenberg-Richter yasasının bir yansıması olarak deprem büyüklüğü eşik değeri arttıkça bu eşik değerini geçen depremlerin sayısı kuvvet yasası şeklinde azalır. Dolayısıyla ele alınan bölgede $M_{th} = 2.0$ den büyük pek çok sayıda deprem olduğundan ağa katılan hücrelerin sayısı yüksektir. Böyle görece küçük bir eşik değeri için ağda çok fazla

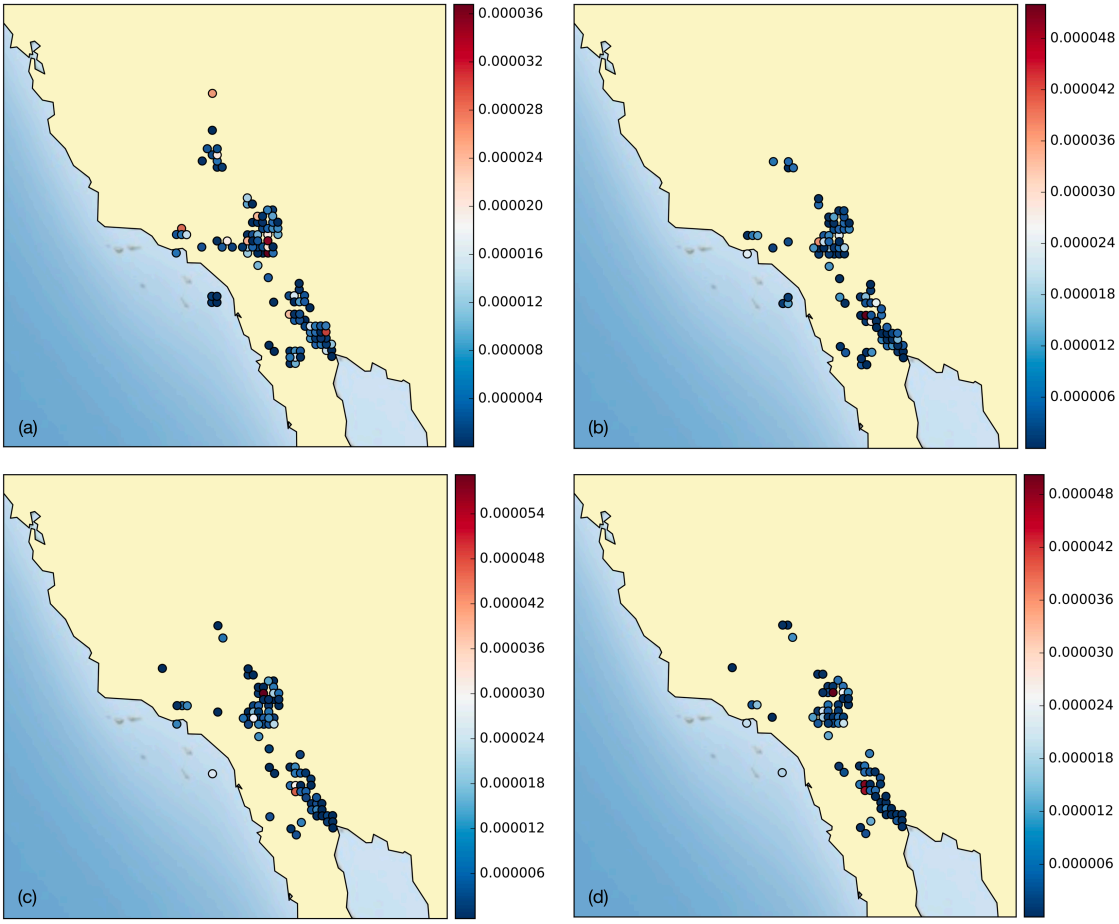
bağlantı olduğundan, hemen hemen her hücre başka hücre bağlantılarının yolu üstünde yer almaktadır. Hücrelerin büyük bir kısmının arasındalık değeri birbirine yakındır. San Andreas Fay Kuşağı'nın Güney ucuna doğru bir hücre ise görece daha yüksek arasındalık değerine sahiptir. Bu hücre daha aktif dolayısıylada çevresiyle daha çok bağ yapmış olabilir. Bunun bir sonucu olarak çevresindeki pek çok bağlantının yolu üzerinde yer almıştır. Eşik değer artırıldığında ($M_{th} = 2.5$ (Şekil 4.8.b)) hücrelerin yaklaşık yarısının ağdan koptuğu görülmektedir. Şekilde arasındalık değerlerinin azaldığı buna rağmen yukarda bahsi geçen görece yüksek arasındalık değerine sahip hücrenin değişmediği görülmektedir. Bununla beraber bahsi geçen hücrenin yanında başka bir hücrenin arasındalık değeri artmıştır. Eşik değerin artmasıyla ağdaki hücre sayısının azalması daha önce varolan bazı yolların artık kullanılamaması sebebiyle bazı hücrelerin bağlantı sayısının arttığı yönünde değerlendirilebilir. Landers ve Hector Mine depremlerinin olduğu bölgede bir kümelenme görülmektedir. Bir diğer kümelenme El Mayor depreminin olduğu bölgeye doğru devam etmektedir. Eşik değer biraz daha artırıldığında ($M_{th} = 3.0$ (Şekil 4.8.c)) derece merkeziliğinde olduğu gibi sadece bahsi geçen üç büyük depremin olduğu bölgeden katkı geldiği görülmektedir. El Mayor depreminin merkez üssüne doğru olan bölgede $6.0 < M < 7.0$ aralığında depremler mevcuttur. Bahse konu depremlerin streslerini güneye doğru San Andreas Fayı ve paralelinde uzanan faylar üzerinden taşıdıkları düşünülmektedir. Landers ve Hector Mine depremlerinin bulunduğu bölgede yine bu iki depremin çevrelerine enerji aktardıkları düşünülmektedir. Bölgenin yukarısında Garlock Fayı uzanmaktadır ve bu fay Landers depreminin ardından (11/07/1992) $M = 5.7$ büyüklüğünde bir deprem üretmiştir. Garlock ile San Andreas fayları arasında kalan üçgen şeklindeki bölge literatürde Doğu Kaliforniya Makaslama Bölgesi (Eastern California Shear Zone) olarak adlandırılmakta olup Landers ve Hector Mine depremleri bu bölgenin ortasında meydana gelmiştir (Platter v.d 2010). Bölgedeki fayların kompleks etkileşmeleri deprem bilimciler açısından iyi bir araştırma konusu olmakla beraber halen gizemini korumaktadır. Eşik değer biraz daha artırıldığında ($M_{th} = 3.5$ (Şekil 4.8.d)) deprem sayısı çok azaldığından $Q = 0.9$ için ağ ortadan kalmaktadır. Daha küçük olay eş zamanlılığı eşik değerlerinde ise az sayıda hücrenin yer aldığı ağlar oluşmaktadır. Görüldüğü gibi analiz için ideal deprem büyüklüğü eşik değeri $M_{th} = 2.5$ tir. Bu değerin altında ağdaki önemli bağlantılar maskelenmekte, üstünde ise ağda yeteri kadar hücre kalmamaktadır.

Şekil 4.9'da ise depremler arasında etkileşme var kabulü yapılan bekleme süresinin (τ) değişik değerlerine göre arasındalık merkeziliğini vermektedir. Süre arttıkça her bir hücre içerisine düşen deprem sayısı da artmaktadır . Bu durumda daha önce ağda yer almayan yeni hücreler ağa eklenebildiği gibi ağdaki mevcut hücreler de daha fazla bağ yapma olacağı bulmaktadır. Böylece herhangi bir s hücresinden t hücresine giden en kısa yolların sayısı



Şekil 4.10. Azalan hücre boyutuna göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

artmaktadır. Yeni eklenen yolların bir kısmı j hücresinden geçse dahi geri kalanı başka hücreler üzerinden geçiyorsa Denklem 4.2'den de görüldüğü gibi paydanın paya göre daha hızlı artması ile j nin arasındalık değeri düşmektedir. Bu senaryonun tam terside mümkün olabilir. Hatta başlangıçta ağa dahil olmayan bir hücre birden en kısa yolların üzerinde yer alabilmektedir. τ zamanı artıkça ağdaki pek çok noktanın arasındalık değeri düşmektedir. Şekil 4.9'da verilen grafiklerin yanındaki ölçekler maksimum ve minimum değere göre normalize edildiğinden Şekil 4.9.d'deki hücreler renk olarak daha yüksek arasındalık değerine sahipmiş algısı yaratabilirler. Fakat dikkatli bakıldığında artan τ ile pek çok hücrenin önemini yitirdiği görülmektedir. Bununla beraber bu durumdan, bir depremden kısa süre sonra yakınındaki bölgeler etkilenirken, yani stresten öncelikle o bölgeler etkilenirken, uzun süreli bakıldığında tektonik plakaların zorlaması ile stres fay hatları üzerinden daha uzağa taşındığı anlamıda çıkarılabilir.



Şekil 4.11. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.7$, c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^{o}$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

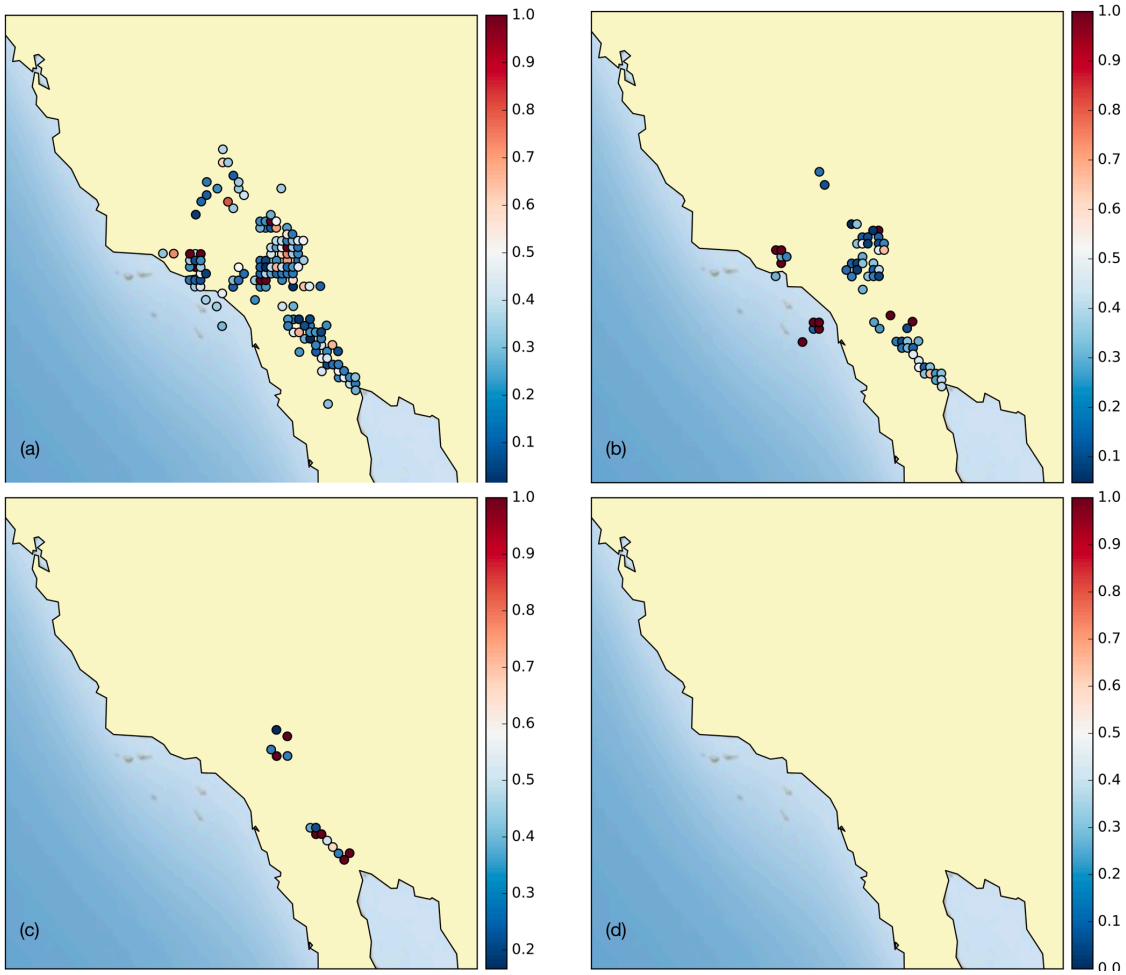
Şekil 4.10'a bakıldığında ise hücre boyutu küçüldükçe hücrelerin arasındalık değerlerinin ortalamada (yandaki ölçeklenmenin en üst değeri baz alındığında) düştüğü görülmektedir. Fakat bu durum ağ üzerindeki toplam hücre sayısının değişmesinin bir yansımasıdır. Zira Şekil 4.10.a'ya bakıldığında sadece 8 hücre başka hücrelerin bağlantı yolları üzerinde yer almıştır. Hali hazırda $L = 1.0^{o}$ durumunda ağa katılabilecek toplam hücre sayısı en fazla 117 olabilir. Bu hücrelerin pek çoğunda ise az sayıda deprem meydana geldiğinden ağdaki hücre sayısı çok daha az olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak oluşan ağ çok kaba ölçekli olduğundan, bölgenin depremselliği hakkında bilgi vermemektedir. Hatta bazı hücrelerin içine aynı anda önemli fayların bir kaç tanesi düşmektedir. Oysaki hücre boyutu mümkün olduğunca küçültüldükçe yukarıdada bahsi geçen Garlock Fayı Kuşağı ve San Andreas Fay Kuşağı'nın güney kısmının etkisi ortaya çıkmaktadır.

Son olarak Şekil 4.11'de ise artan olay eş zamanlılığı eşik değerine (Q_{th}) göre arasındalık merkeziliği grafiği görülmektedir. Eşik değerinin artması maksimum ve minimum arasındalık değerlerini çok fazla değiştirmemekle beraber ağdaki hücre sayısının giderek azaldığı görülmektedir. Bu eşik değerin artışı iki hücre içinde ard arda daha çok deprem olması anlamına geldiğinden bu şartı sağlayan hücreler görece daha aktif olanlardır. Dolayısıyla aktifliği düşük olan hücreler giderek ağdan kopmaktadır. Fakat eşik değerdeki artışa karşılık olan bu değişim diğer eşik değerlerindeki (Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10) değişimler kadar trajik değildir. Şekildeki diğer parametreler üzerinden bu durumu irdelemek daha uygundur. Deprem büyüklüğü eşik değeri $M_{th} = 2.5$ olduğundan görece aktif olan hücrelerde hemen hemen her gün bu büyüklüğün üzerinde deprem gözlemlemek mümkündür. Özellikle Landers ve Hector Mine depremlerini üreten makaslama bölgesi, yine San Andreas fayının güney kısmı ve buna paralel faylar sıklıkla küçük şiddette deprem üretmişlerdir. Şekil 4.2'den de görüldüğü gibi bölgede 6.0 ve üzerinde büyüklüğe sahip depremler de mevcuttur. Bu büyüklükte depremler altı aydan daha fazla süreyle artçı şok üretme potansiyelleri ile bölgedeki hücrelerin çoğunun sürekli deprem üretmesini sağlamışlardır. Bunun bir sonucu olarakta bahsi geçen hücreler arasındaki olay eş zamanlılığı değeri yüksek olduğundan eşik değerin artması aktif hücreleri pek fazla etkilememektedir.

Yerel Kümelenme Katsayısı: Bir hücrenin ağ içerisinde ne kadar öneme sahip olduğunun bir diğer ölçüsü de yerel kümelenme katsayısıdır. Birbirleri ile bağlı iki hücrenin aynı zamanda üçüncü bir ortak hücre ile de bağlantılı olma olasılığını verir. Tüm hücreler birbirleri ile bağlı ise maksimum değeri olan 1 değerini alır, tersi durumda ise 0 dır. Sosyal ağlar için iki arkadaşınızın birbirlerini tanımasının ortalama olasılığını verir. Arkadaşlarınızın sizin bulunduğunuz ortamlarda tanışmış olma ihtimalleri yüksek olduğundan bu katsayı sosyal ağlar için rasgele ağlardan daha yüksektir. Bir hücre noktası j'nin diğer hücrelerle bağlantı sayısı k ise bu hücrelerin kendi aralarında oluşturabilecekleri toplam bağ sayısı $k_j(k_j-1)/2$ tanedir. Gerçekte ise bu topluluğun ϵ_j kadar bağlantı yaptığını varsayarsak yerel kümelenme katsayısı,

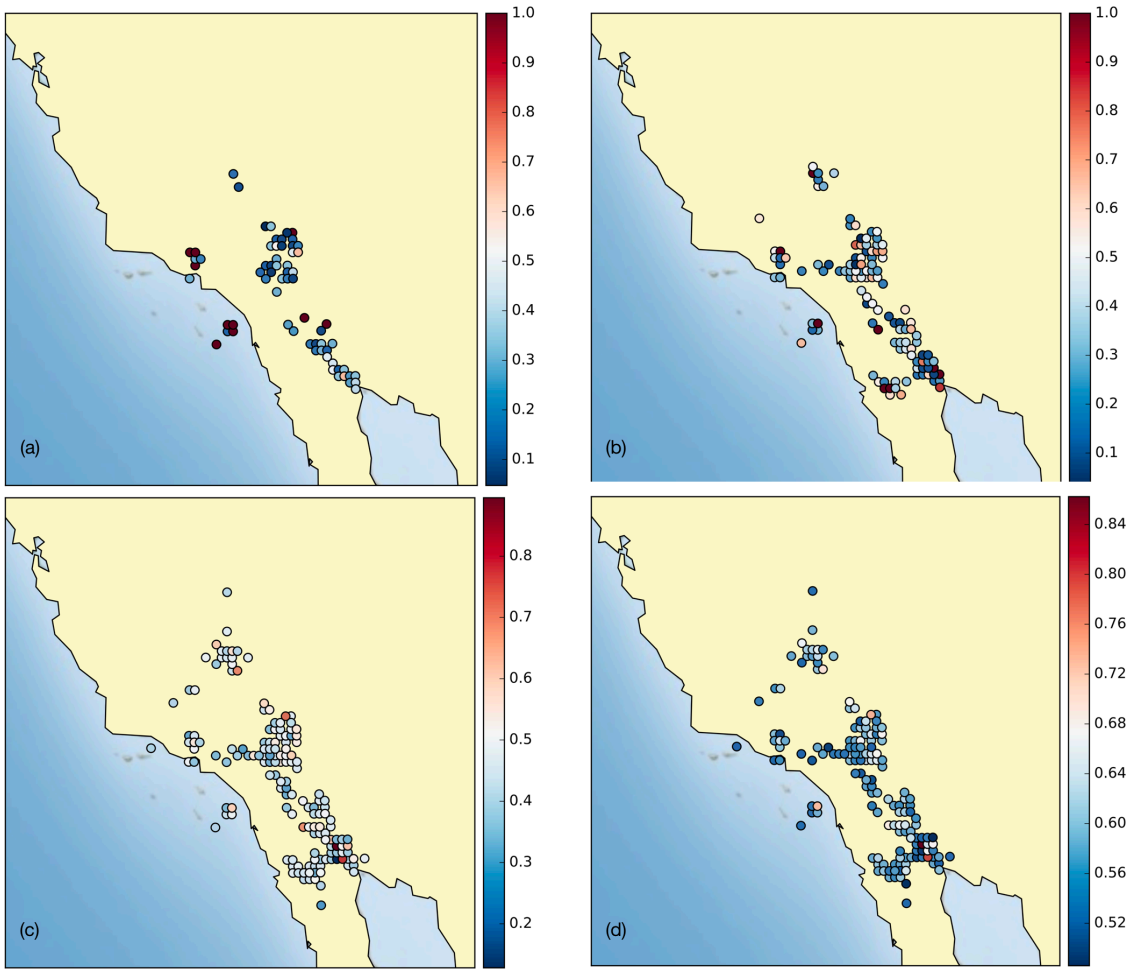
$$c_j = \frac{2\epsilon_j}{k_j(k_j-1)}, \tag{4.3}$$

olarak verilir. Bu nicelik Malik vd. tarafından muson yağış alanlarının sürekliliğini kestirmek için kullanılmıştır (Malik vd., 2011).



Şekil 4.12. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği $a)\ M_{th} = 2.0,\ b)\ M_{th} = 2.5,\ c)\ M_{th} = 3.0,\ d)\ M_{th} = 3.5.$ Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^{o}$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

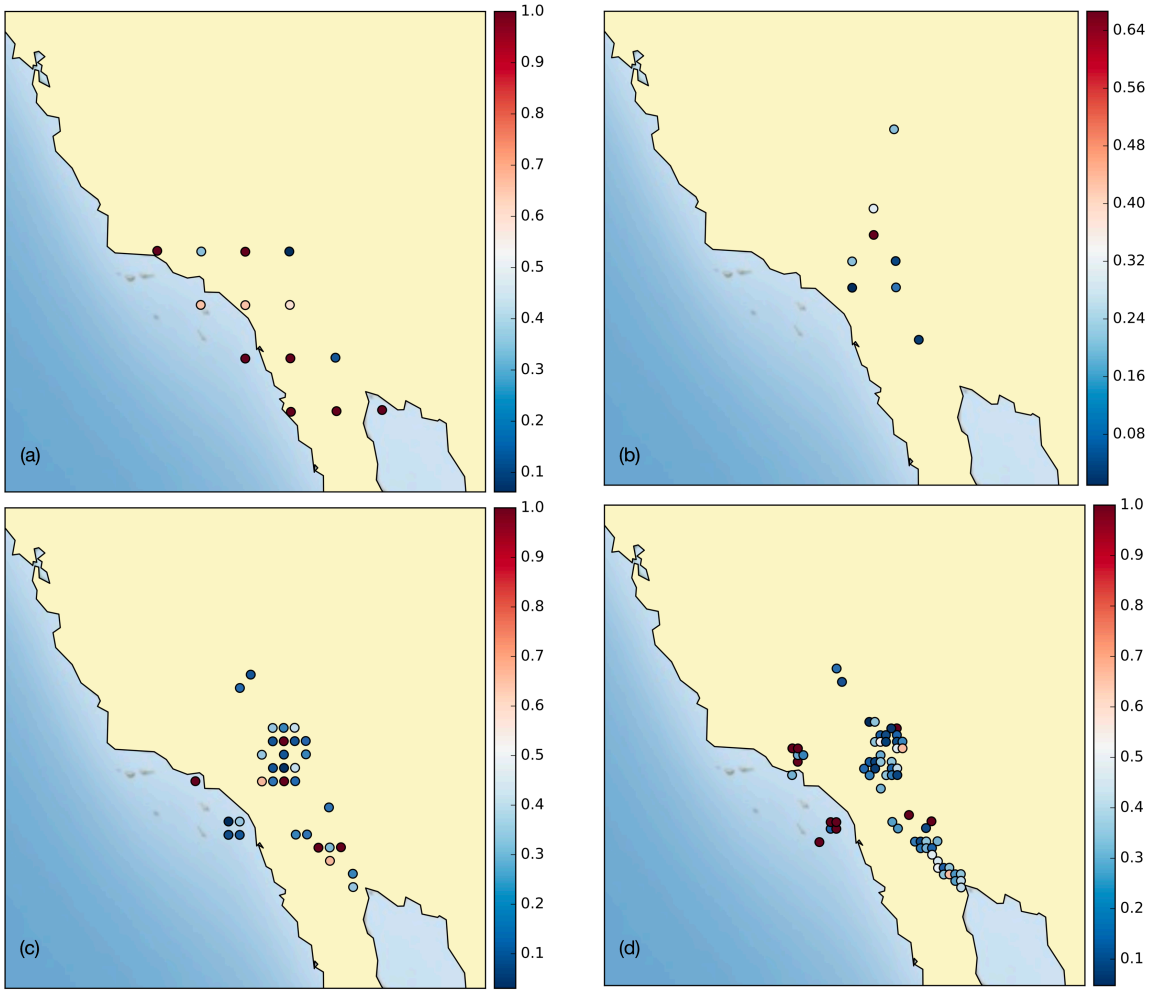
Şekil 4.12'de artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafikleri görülmektedir. Şekil 4.12.a ile Şekil 4.12.b kıyaslandığında eşik değer artıkça yine hücrelerin içine daha az sayıda deprem düşmesinin etkisi görülmektedir. Eşik değerin artması ile ağa katılan hücre sayısı azalmaktadır. Özellikle sahil bölgesindeki hücreler kendi aralarında kümelendiklerinden yerel kümelenme katsayıları artmıştır. Daha önce varolmayan dörtlü bir kümenin birden ortaya çıkması garip gelebilir fakat bu durum Denklem 4.3'ten anlaşılacağı gibi hücre içine düşen depremlerin sayısının azalmasıyla açıklanabilir. Şekil 4.12.a'da hücreler içindeki deprem sayıları m_i ve m_j büyük olduğundan her ne kadar Denklem 4.2'deki şartı sağlayan daha çok olay olsa da payda paydan daha hızlı büyüdüğünden olay eş zamanlılığı değerleri eşik değerin altında kalmıştır. Bununla beraber içerideki pek çok hücre Landers, Hector Mine depremleri bölgesi ile El Mayor depreminin merkez üssüne doğru olan hat üzerinde kümelenmiştir. Görüldüğü gibi yerel kümelenme katsayıları ise çok büyük değildir. Bununla beraber deprem aktivitelerinin Doğu Kaliforniya



Şekil 4.13. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

Makaslama Bölgesi ve San Andreas Fayı'nın güney kısmında bir sürekliliğe sahip olduğunu söyleyebiliriz. Eşik değer daha da artırıldığında ($M_{th} = 3.0$), sadece bahsi geçen deprem bölgelerinde az sayıda hücre kalmaktadır. Bu depremler öncelikle yakın çevrelerini etkilediklerinden aktivite sürekliliğinin bu bölgeler üzerinde olması olağandır. Son olarak eşik değer $M_{th} = 3.5$ olarak seçildiğinde diğer merkezilik ölçümlerinde olduğu gibi ağa katılacak yeterli hücre kalmamaktadır.

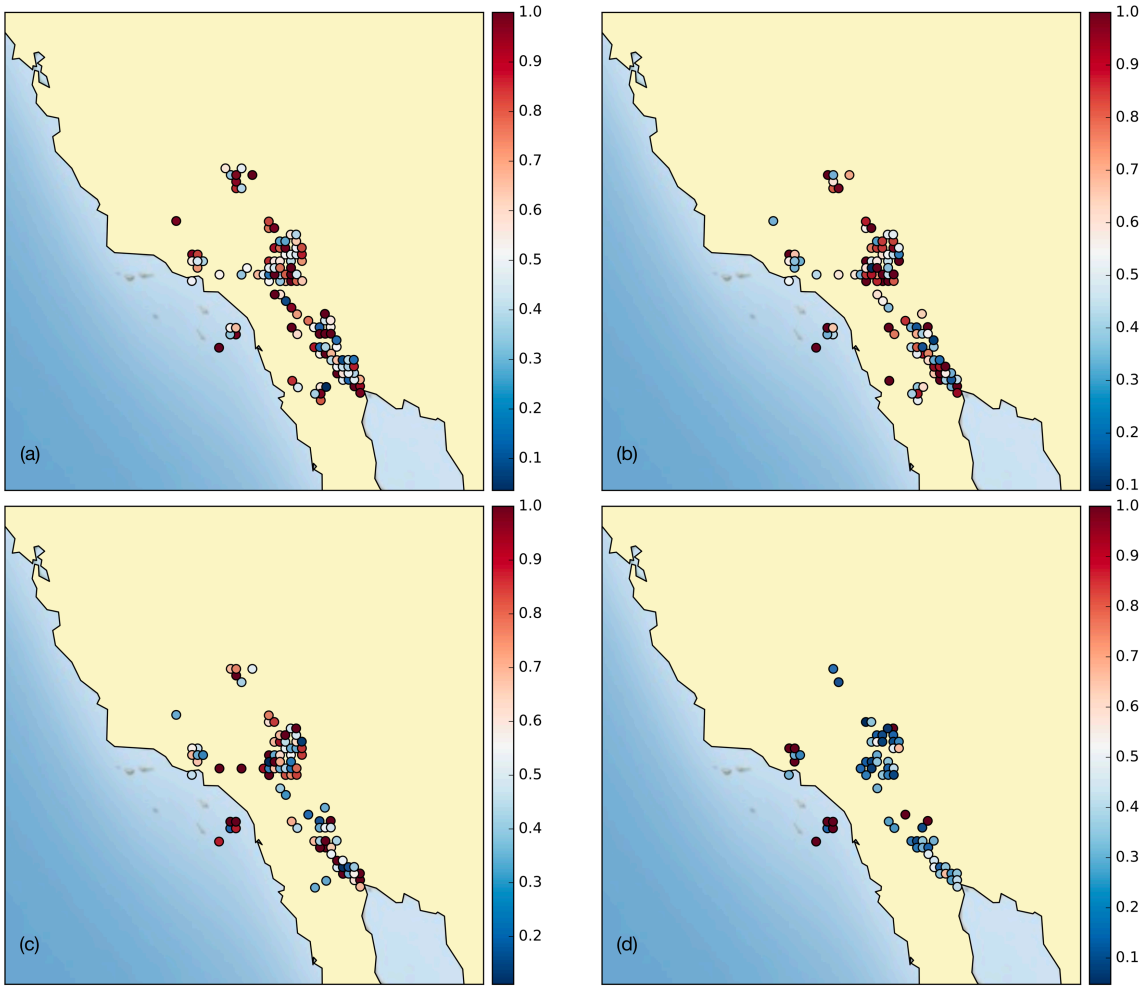
Şekil 4.13'te ise τ eşik değerinin artan değerlerine karşılık yerel kümelenme katsayısı görülmektedir. Her dört durumda da $M_{th} = 2.5$ olduğundan her bir hücre içine düşen deprem sayısı sabittir. τ değeri artıkça, bir hücredeki depremden τ kadarlık zaman içinde bir başka hücrede de deprem bulma olasılığı artacağından ağa katılan hücre sayısı artmaktadır. Dolayısıyla olası bağlantı sayıları da artmaktadır. Her ne kadar bir hücre ağ üzerinde daha



Şekil 4.14 Azalan hücre boyutuna göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $L = 1.0^o$, b) $L = 0.5^o$, c) $L = 0.25^o$, d) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

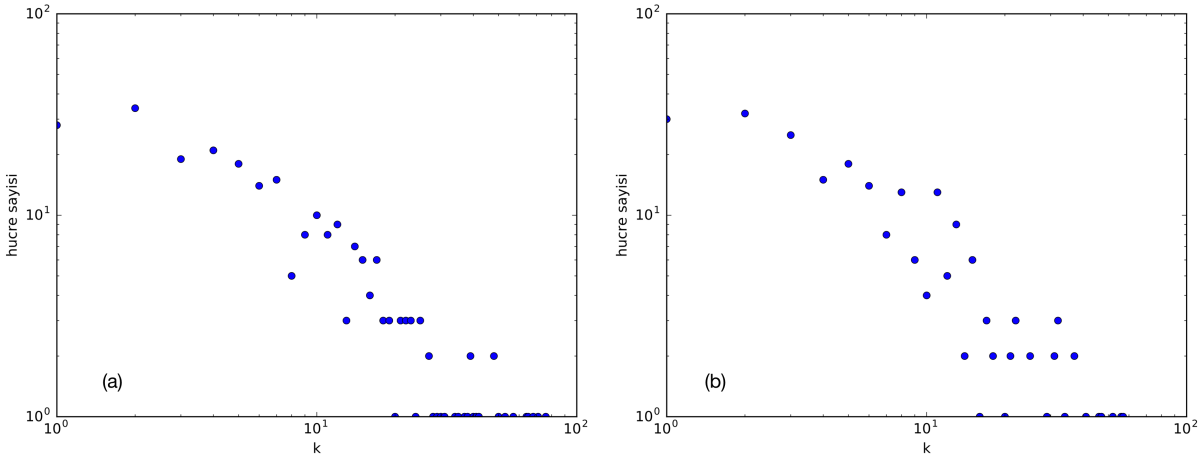
çok bağlantı yapma imkanı bulsa da, bu Denklem 4.3'de paydanın artması anlamına geldiğinden ve pay her zaman bu kadar hızlı artamayacağından maksimum yerel kümelenme katsayısı azalır. Bu durum özellikle Şekil 4.13.c ve Şekil 4.13.d'de kendini göstermektedir. Öte yandan bağ sayısının artması ile neredeyse hiç bir komşusu birbirleri ile bağlı olmayan bir hücreninde bazı komşuları kendi aralarında bağ yapma imkanı bulacağından minimum değerler artmaktadır. Dolayısıyla artan τ değeriyle birlikte yerel kümelenme katsayısının ortalaması artmaktadır. Bu durum bölgedeki deprem aktivitelerinin zaman arttıkça daha sürekli hale geldiğini göstermektedir. Bu durum bilinen ölçeklenme yasaları ile uyumludur. Zira hiç kimse bir bölgede 10 gün içinde $M > 4.0$ den büyük deprem olacak mı söyleyemez. Fakat bir yıl içerisinde kabaca kaç tane olacağını söyleyebilir. Uzun zaman ölçeğinde depremlerin bir sürekliliği mevcuttur.

Şekil 4.14'te azalan hücre büyüklüğüne göre yerel kümelenme katsayısı grafiği görülmektedir. Hücrenin boyutunun büyük olması ağda az sayıda hücre olması ve bu hücrelerin içine daha fazla sayıda deprem düşmesi anlamına geldiğinden ağa katılan hücreler kendi aralarında üçgen bağlar oluşturular. Dolayısıyla yerel kümelenme katsayıları yüksektir (Şekil 4.14.a). Fakat önceki merkezilik niceliklerinde de olduğu gibi oluşan ağ çok kaba ölçekli olduğundan pek bilgilendirici değildir. Hücre boyutları küçüldükçe ise yavaş yavaş fay hatlarının olduğu bölgeler şekilenmeye ve yukarıda da defalarca söz ettiğimiz depremler etkisini göstermeye başlar. Dolayısıyla yine deprem aktivite sürekliliğinin San Andreas Fayı ve paralelindeki faylar ile Doğu Kaliforniya Makaslama Bölgesi'nde yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 4.15. Artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.7$, c) $Q_{th} = 0.8$, d) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler dört grafik içinde, $M_{th} = 2.5, L = 0.125^{o}, \tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

Şekil 4.15 ise artan olay eş zamanlılığı eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiğini göstermektedir. Olay eş zamanlılığı eşik değeri arttıkça ağa katılan hücre sayısı düşmekte bununla birlikte olası bağların sayısı azalmaktadır. Hücre sayısındaki düşüş çok dramatik görünmese de, olası bağ sayısınındaki düşme Şekil 4.15.a'dan, Şekil 4.15.d'ye doğru gidildikçe kırmızıdan mavi doğru kayma olarak yani yerel kümelenme katsayılarının ortalamasında bir düşme şeklinde kendini görsel olarak daha iyi göstermektedir. Olası bağların azalması üçlemelerin kırılmasına sebep olmaktadır. Bununla beraber eşik değer arttıkça geriye görece daha aktif hücreler kaldığından bölgeyi depremsellik açısından süren fayların etkisi gözükmektedir. Yukarda da bahsedildiği gibi bu faylar üzerinde aktivite sürekliliği mevcuttur.



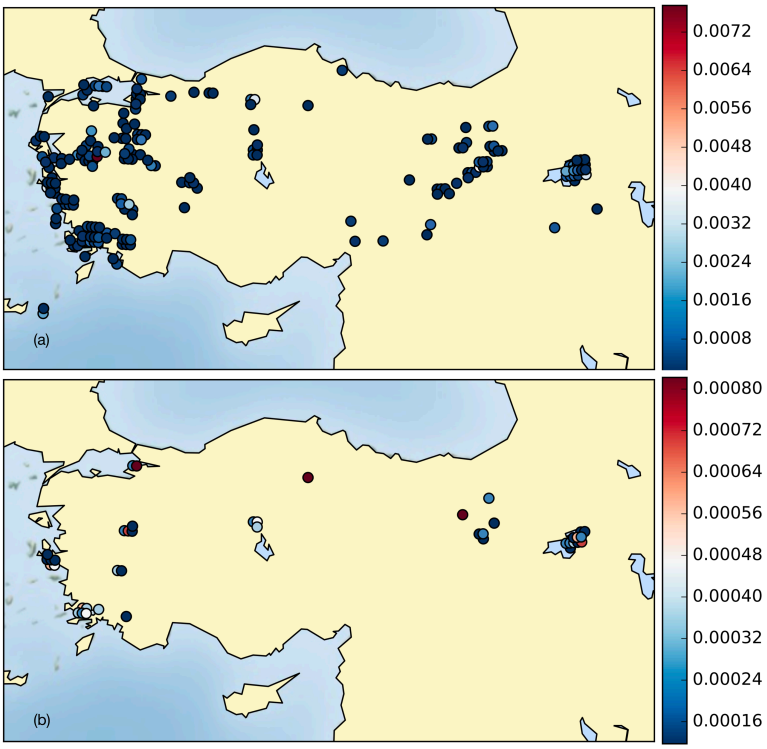
Şekil 4.16. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece dağılımı a) $Q_{th} = 0.8$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.0$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

Şekil 4.16'dan da görüldüğü gibi bazı uygun parametre değerlerinde derece dağılımının kuvvet yasası formunda olduğu görülmüştür. Burada yatay eksen (k) bir hücrenin yaptığı bağ sayısını, dikey eksen ise hücre sayısını göstermektedir. Bu tür kuvvet yasası dağılımına uyan ağlar ölçekten bağımsız ağlar olarak adlandırılırlar. Ölçekten bağımsız ağlara örnek olarak protein etkileşmeleri, internet ve sosyal ağlar verilebilir. Literatürde bu tür ağların, ağa bağlı noktanın (nodun) birisinin ağdan çıkarılmasına karşı dayanıklı olduğuna dair çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bir tanesi perkalasyon teorisi kullanılarak ağın dayanıklılığını analitik ve sayısal olarak göstermiştir (Cohen vd.,2000). İncelenen ağda nokta sayısı az olduğu durumlarda bu tür kuvvet yasası davranışlarını gözlemlemek pek mümkün olmamaktadır. İncelediğimiz bölgede en küçük hücre boyutunda dahi ($L = 0.125^o$) maksimum 7488 tane nokta ağa katkı verebilir. Bununla beraber bu hücrelerin (noktaların) pek çoğu aktif faylar üzerinde bulunmadığından bu sayı çok daha düşüktür. Bu sebepten yapılmış bazı çalışmalarda hücreler konumun yanında zaman ölçeğinde de parçalara

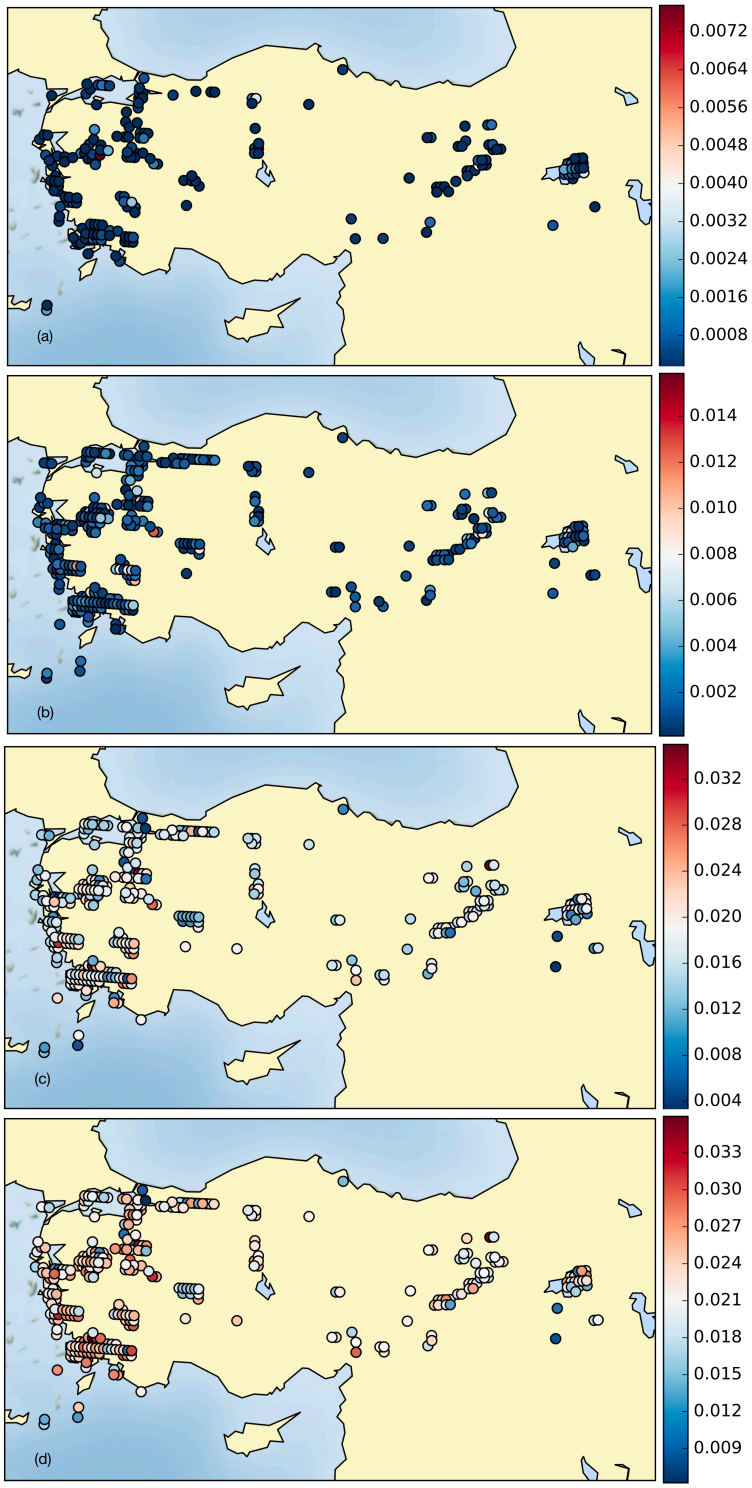
ayrılarak, ağa katılabilecek hücre sayısı artırılmaya çalışılmıştır (Abe ve Suziki, 2004;2006). Bundan dolayı incelememizde dar bir parametre aralığında ölçekten bağımsızlık gözlenmiştir.

4.2 Türkiye Kataloğu İçin Yönelimsiz Ağ Oluşturulması Ve Analizi

Anadolu Bölgesi için öncelikle yönelimsiz ağ yapısı incelenmiştir. Bu incelemede Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nün http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqdb/ internet sitesinden indirilen veriler kullanılmıştır. Bahse konu veri grubu 01/01/1999-01/01/2017 yılları arasını kapsamaktadır. Katalog daha önceki yıllara uzanmasına rağmen özellikle 2000'li yıllardan önceki kısmında geçmişe doğru gidildikçe yıllık veri sayısı giderek azalmaktadır. Öyleki günümüzdeki yıllık deprem sayısının beşte biri civarında yıllık deprem sayıları mevcuttur. Daha da eski yıllara gidildikçe bu oran daha da artmaktadır. Bu sebeple Gölcük depremini veri setine dahil edebilmek için başlangıç yılı 1999 olarak seçilmiştir ancak daha önceki tarihler analize dahil edilmemiştir. Bununla birlikte bahsi geçen yıllarda katalogdaki depremlerin büyüklük alt sınırı $M = 2.5$ dir. Sonraki yıllarda bu sınır $M = 2.0$ olarak güncellenmiştir. Dolayısıyla analizlerde tutarlılık için en düşük alt sınır $M_{th} = 2.5$ olarak seçilmiştir. Bu değer Kaliforniya Bölgesi için $M_{th} = 2.0$ olarak



Şekil 4.17. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği $a)$ $M_{th} = 2.5$, $b)$ $M_{th} = 3.0$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

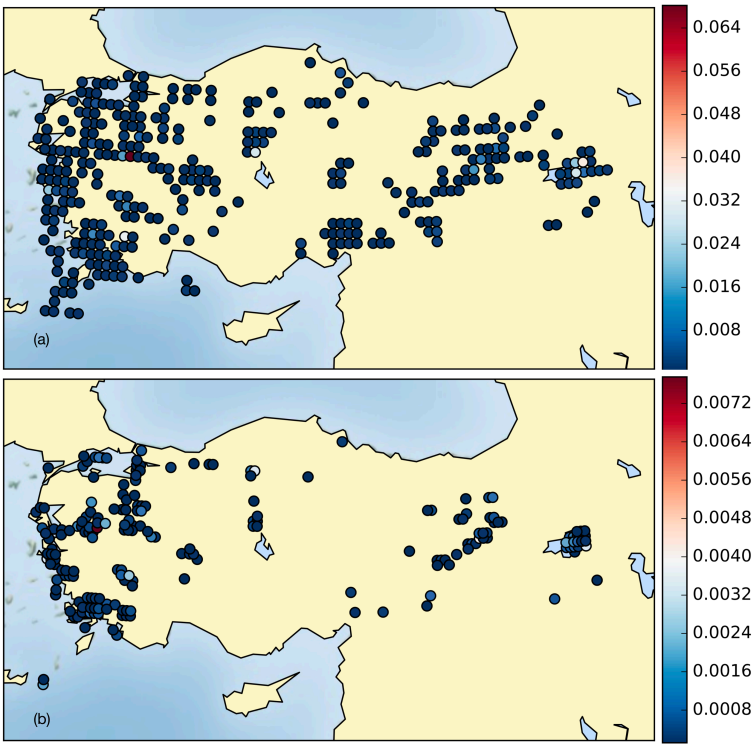


Şekil 4.18. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre derece merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

seçilmişti. Bunula birlikte diğer alt sınır değerleri $M_{th} = 3.0$, $M_{th} = 3.5$ ve $M_{th} = 4.0$ için de analizler yapılmıştır. Diğer parametreler yine daha önce Kaliforniya Bölgesi için açıklandığı

gibi seçilmiştir. Bunlar iki deprem arasındaki azami süre eşik değeri için $\tau = 10$ gün, $\tau = 30$ gün, $\tau = 180$ gün, $\tau = 365$ gün iken, hücre boyutu L için $L = 0.125^o$, $L = 0.25^o$, $L = 0.50^o$, $L = 1.0^o$ şeklindedir. Yine olay eşzamanlılığı eşik değeri $0 < Q_{th} < 1$ aralığında 0.1 aralıklarla değiştirilerek yönelimsiz ağlar oluşturulmuştur. Kaliforniya Bölgesi için yapılan analizlerde parametrelerin ideal değerleri tesbit edilmişti. Bu parametre değerlerinin tümü için işlem yapılmasına rağmen $M_{th} = 3.5$ ve $M_{th} = 4.0$ gibi neredeyse hiç ağ oluşmayan değerler, $L = 0.5$ ve $L = 1.0$ gibi kaba ölçekli grafik sonuçlarına Türkiye kataloğu analizlerinde yer verilmeyecektir.

Derece Merkeziliği: Şekil 4.17'de derece merkeziliğinin iki farklı eşik değere karşılık grafiği görülmektedir. $M_{th} = 2.5$ (Şekil 4.17.a) eşik değeri için son yıllarda meydana gelmiş büyük depremlerin olduğu bölgelerin öne çıktığı görülmektedir. Doğudan başlayacak olursak özellikle Van depreminin olduğu bölgede bir kümelenme söz konusudur. Bu deprem ve artçılarının etkisiyle bölgedeki hücreler bağ yapma ve ağa katılma imkanı bulmuştur. Yine bir yığılma da Bingöl'den Hatay'a doğru uzanan Doğu Anadolu Fayı üzerinde meydana gelmektedir. İncelenen zaman aralığında bahse konu fayın özellikle kuzeydoğu bölgesinin



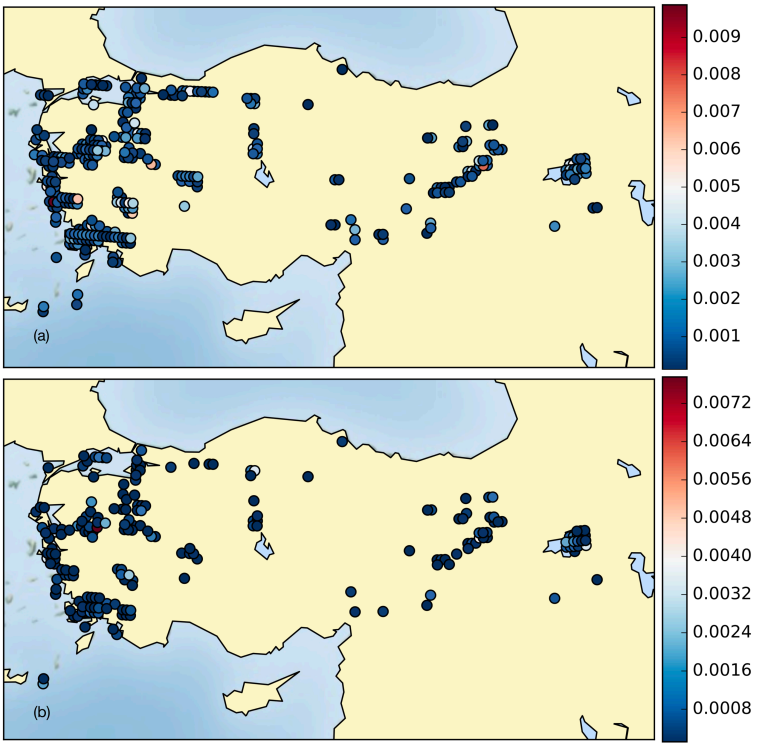
Şekil 4.19. Azalan hücre boyutuna göre derece merkezliliği grafiği a) $L = 0.250^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

aktif olduğu görülmektedir. Deprem büyüklüğü eşik değeri $M_{th} = 2.5$ olduğundan tüm incelemelerde bölgenin aktifliği ne kadar büyük bir deprem ürettiğiyle değil ne sıklıkta deprem ürettiği ile ilintilidir. Tabiki depremin şiddeti arttıkça çevresine olan etkiside artmakta ve yakın çevresinde pek çok artçı şok meydana getirmektedir. Bingöl civarında incelenen tarihler arasında çok şiddetli bir deprem olmasa da, orta ve düşük şiddetteki depremler bölgenin derece merkeziliğini artırmıştır. Grafikte asıl dikkat çekici bölge İstanbul, Bursa, Manisa, İzmir ve Muğla hattıdır. Bu hat üzerinde dikkat çeken kümelenmelerin bazıları Gölcük ve Simav depremleridir. Bu hattın daha batısında 2014 yılında Gökçeada açıklarında bir deprem meydana gelmiştir. Bahsi geçen depremin etkisi Gelibolu yakınlarında bir hücrenin ağa bağlanması ile analizde kendini göstermektedir. Bununla birlikte Marmara Denizi'nin batı kısmı, İzmir bölgesi ve Muğla civarında derece merkeziliği bakımından öne çıkmış pek çok hücre mevcuttur. Başlangıçta da belirtildiği üzere incelenen veriler 01/01/2017 tarihine kadar olup 2017 yılı içerisinde İzmir (Midilli), Bodrum, Manisa ve Çanakkale'de gerçekleşen depremleri içermemektedir. Buna rağmen bahsi geçen bölgeler ağda pek çok bağlantıya sahiptir. Bu bölgelerin son depremlerden önce de aktif oldukları açıktır. Özellikle Muğla ve ilçeleri geçmişte pek çok kez deprem fırtınaları ile gündeme gelmiştir. Bu tür aktivitelerin bir etkisi olarak Bodrum civarı ağ üzerinde öne çıkan bölgelerden biridir. İzmir civarı içinde benzer bir durum geçerlidir. Bölgede hemen hemen her gün $M < 4.0$ civarında deprem meydana gelmektedir. Bu da bölgenin aktif kalmasını ve ağa katılmasını sağlamaktadır. Batı Ege'nin bu kadar aktif olması Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı arasında kalan Anadolu'nun Ege Denizi'ne doğru ilerlemesi ve bu bölgede bir sıkışmaya sebep olmasıdır (Sözbilir, 2017). Eşik değer artırıldığında ise (Şekil 4.17.b) az sayıda hücrenin aktif olarak ağa katıldığı görülmektedir. Bunlar yine yukarıda bahsi geçen bölgelere karşılık gelmektedir. Çorum civarında bir hücre yüksek sayıda bağ yaparak öne çıkmıştır. Bununla beraber İzmir Körfezi'ndeki hücreler varlıklarını sürdüremezken Seferihisar, Sığacık tarafı artan eşik değere rağmen ağda yer almaya devam etmiştir. Bu da İzmir'in güneyinin daha aktif olduğunun göstergesidir. Yine daha önce en yüksek derece merkeziliğine sahip Manisa bölgesi artan eşik değer sonucunda varlığını sürdürememiştir. Buradan bölgedeki depremlerin pek çoğunun $2.5 < M < 3.0$ aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.18'de ise artan sürenin derece merkeziliğine etkisi görülmektedir. Beklendiği gibi süre arttıkça ya yeni hücreler ağa dahil olmakta veya eski hücreler kendi aralarında daha çok bağ yapmaktadır. Böylece derece merkeziliği değerleri artmaktadır. Ağa yeni dahil olan hücrelerin hemen hemen hepsi yukarda bahsi geçen aktif bölgelerde yer almaktadır. Bu bölgelerde ki kümelenmeler daha kalabalık hale gelmekle birlikte $\tau = 10$ günden, $\tau = 365$ güne doğru gidildikçe kendi aralarında da daha çok bağ yapmaktadır. Grafiklere bakıldığında Gökova Körfezi'nde, Bodrum civarından başlayıp Fethiye'nin üst kısmında son bulan aktif

hücreler dizisi görülmektedir. Bir deprem bilimci veya jeolog olmamakla beraber bahsi geçen bölgede haritalarda gösterilenden daha fazla fay olması gerektiği kanaatindeyim. Bu fayların Bodrum'un alt kısmında deniz den başlayarak küçük küçük birbiri ardına devam eden bir yapıda olma ihtimali mevcuttur. Bununla beraber eğer burada bilinmeyen tek bir parça halinde körfezi baştan başa geçen bir fay mevcut ise bu fayın 2017'de olandan daha şiddetli deprem üretme potansiyeli olabileceğinden Gökova Körfezi'nin ülkemiz jeolog ve deprem bilimcileri tarafından fay haritalarının güncellenmesi gerekir. Başka yine çizgi halinde görülen hat ise Marmara Denizi civarında görülmektedir. Hali hazırda Kuzey Anadolu Fayı'nın denizin içine doğru devam ettiği bilinmektedir. Yine Denizli ve Afyon civarındaki kümelenmeler artarak devam etmiştir. Bahsi geçen bölgelerde de çizgi şeklinde hücre sıralanmaları mevcuttur. Bunun dışında Bursa, Balıkesir, Manisa, İzmir hattındaki hücrelerin daha çok bağ yaptıkları görülmektedir.

Şekil 4.19 azalan hücre boyutuna göre derece merkeziliğini göstermektedir. Büyük hücre boyutlarında (Şekil 4.19.a) hücre içine daha çok deprem düşmekte ve ağa bağlanma olasılığını artırmaktadır. Bu durumda derece merkeziliği değerleri artmaktadır. Bununla beraber daha önceden bahsedilen hatlar daha az kendini belli etmektedir. Yani hücre

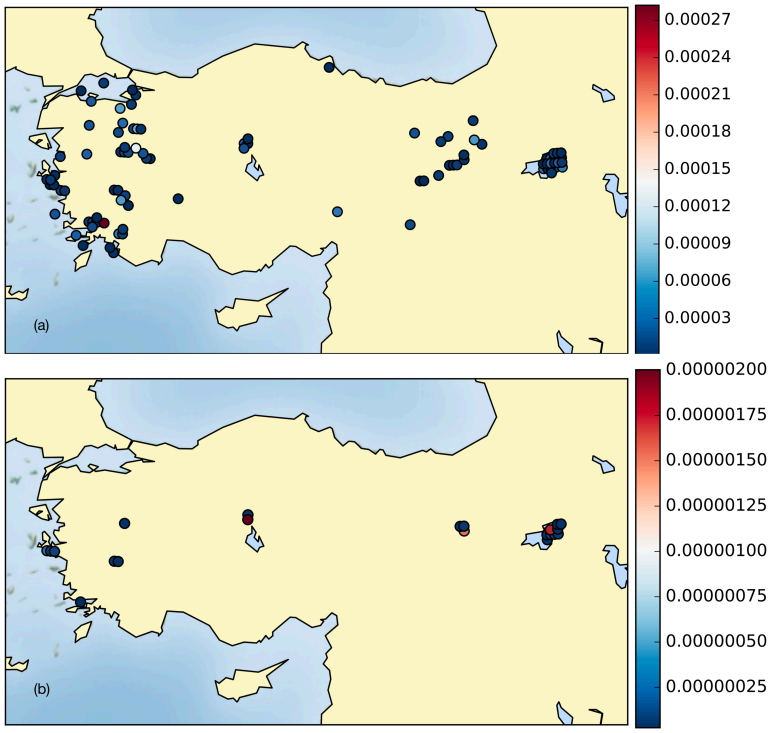


Şekil 4.20. Olay eş zamanlılığı eşik değerine göre derece merkezliliği grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler her iki grafikte de, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

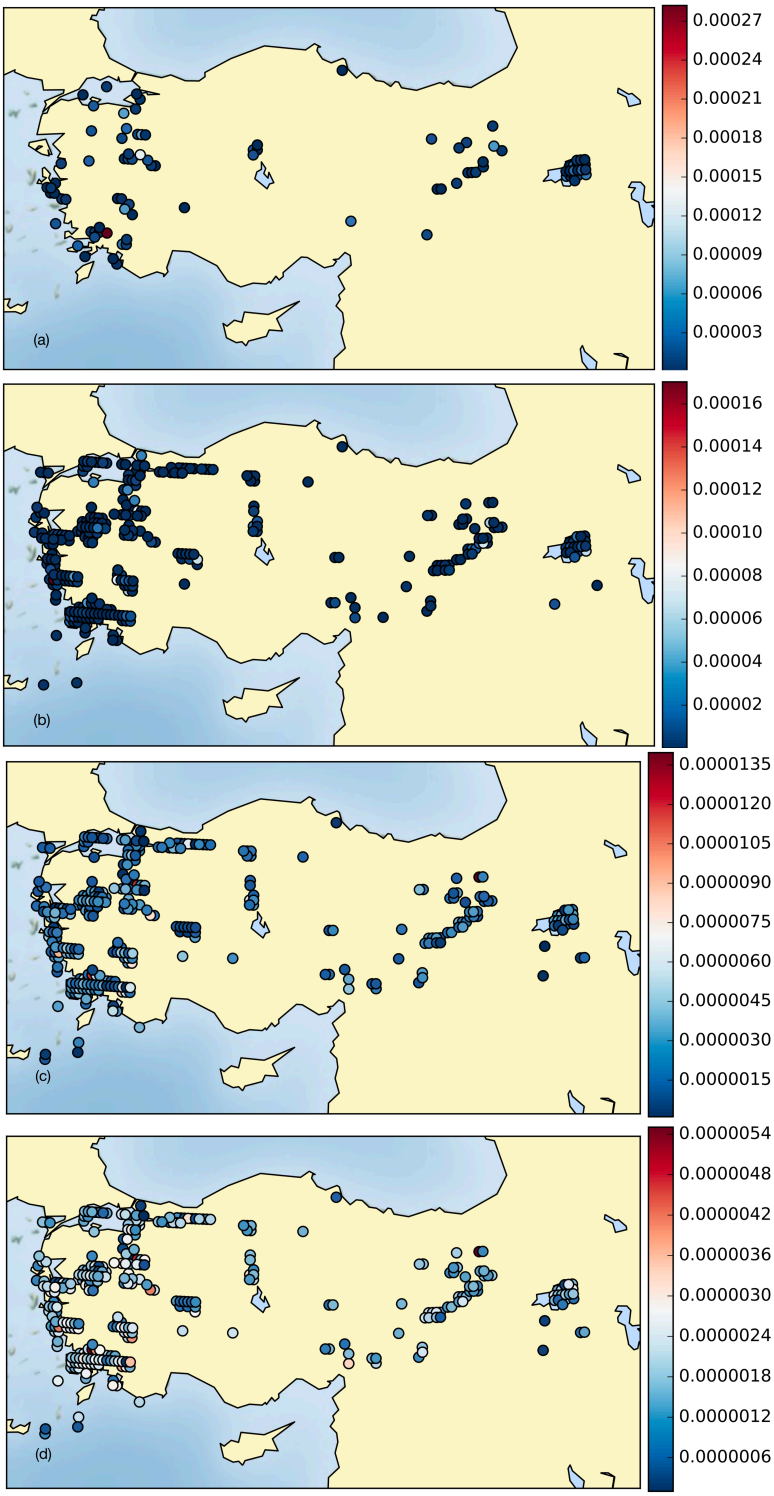
boyutunu artırmak çözünürlüğü daha düşük bir resme bakmak gibi bir etki yapmaktadır. Bu durum bölgedeki depremselliğin daha geniş bir coğrafyada mevcut olduğunu gösterirken asıl daha sık aktivitelerin olduğu yerleri maskelemektedir.

Şekil 4.20'de ise iki farklı olay eş zamanlılığı değerine karşılık derece merkeziliği görülmektedir. Olay eş zamanlılığı eşik değerinin küçük olması (Şekil 4.20.a) daha az sayıda deprem eş zamanlılığı olan hücreler arasında bağ kurulmasına izin verdiğinden τ parametresinin artması ile benzer etki göstermektedir. Yukarda bahsedilen bölgelerde kümelenmeler görülmeye devam etmektedir. Buna ek olarak daha çok hücre bağa katılmıştır. Derece merkeziliği değerleri ise fazla değişmemiştir.

Arasındalık Merkeziliği: Güney Kaliforniya deprem kataloğunu incelerken söylediğimiz gibi arasındalık merkeziliği bir noktanın hücreler arasındaki bağlantı yollarının üzerinde olup olmadığını verir. Şekil 4.21'de arasındalık merkeziliğinin grafiği iki farklı eşik değer için görülmektedir. $M_{th} = 2.5$ (Şekil 4.21.a) için daha önce bahsi geçen bölgelerde bazı hücrelerin bağlantı yolları üzerinde olduğu görülmektedir. Van ve Simav depremlerinin



Şekil 4.21. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre arasındalık merkezililiği grafiği $a)\ M_{th} = 2.5,\ b)\ M_{th} = 3.0.$ Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

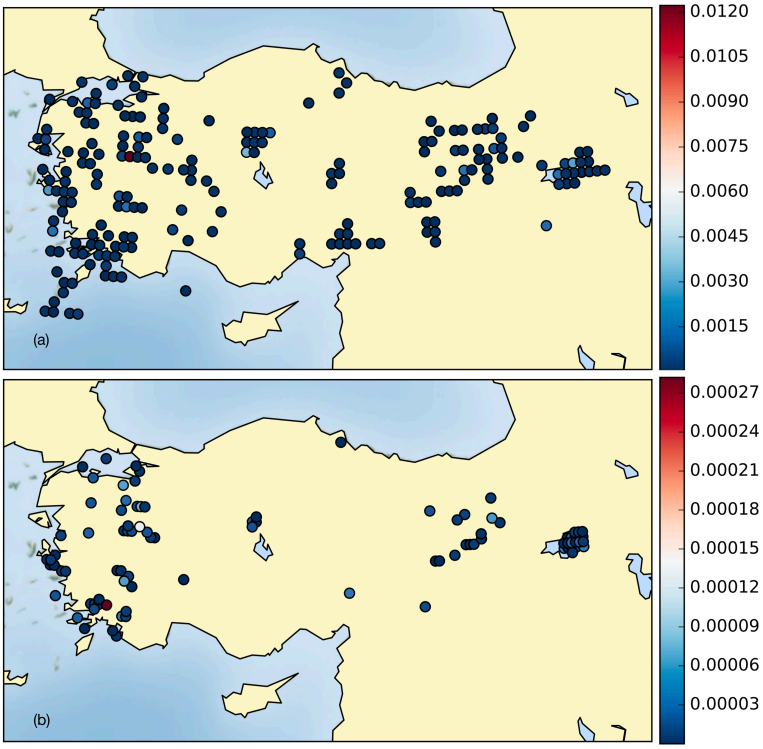


Şekil 4.22. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

etkisinin bahsi geçen bölgelerde küçük kümelenmelere yol açtığı görülmektedir. Artçı şoklar sebebiyle bölgede hücrelerin birbirleriyle bağlama olasılığı artmıştır. Bu hücreler başka

hücrelerin yolları üzerinde olabilirler. Fakat genel itibari ile birbirlerinden çok farklı arasındalık değerlerine sahip olmadıkları görülmektedir. Bununla birlikte Bingöl, İzmir, Muğla gibi bölgelerde ise bazı fay hatlarının içinden geçtiği hücrelerin bağlantı yollarını oluşturduğu görülmektedir. Bu durum bahsi geçen fayların deprem sıklığı açısından aktif olmasının yanında bu faylar boyunca stres aktarımı olabileceğinin düşünülmesine sebep olmaktadır. Eşik değer artırıldığında (Şekil 4.21.b) deprem sayısının azalması ağda yeterince hücre olmamasını sağlamış ve pek çok bölge hakında bilgi alınamamıştır. Fakat Tuz Gölü'nün hemen üstündeki hücrenin arasındalık değeri düşmesine rağmen diğer hücrelerle kıyaslandığında öne çıkmaktadır. Tabi yine Van'ın dışında Sığacık ve Gökova körfezleri, Bingöl ve Denizli aktif deprem bölgeleri olarak öne çıkmaktadır.

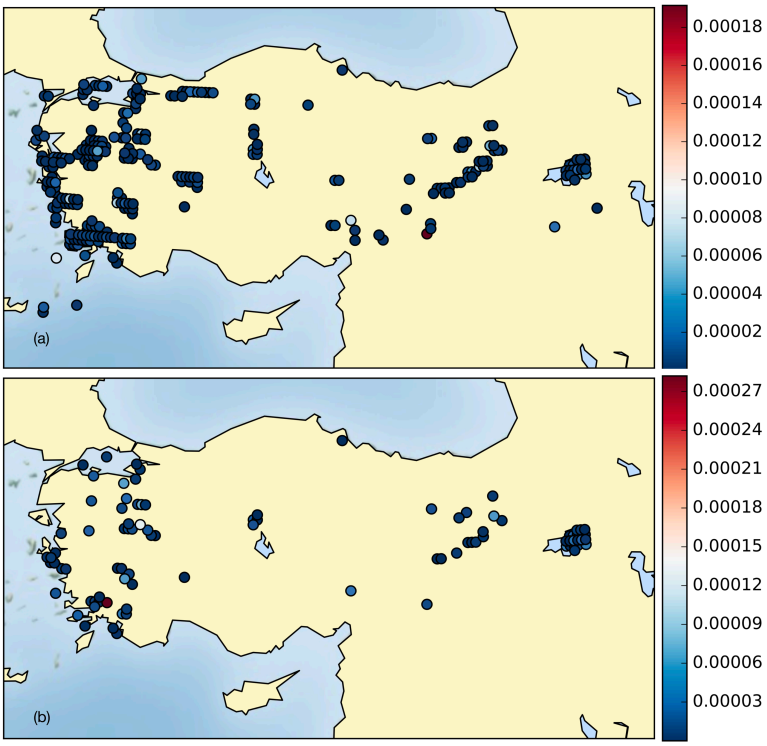
Şekil 4.22'de ise arasındalık merkeziliğinin τ eşik değerine göre nasıl değiştiği görülmektedir. Görüldüğü gibi eşik değer arttıkça ağa daha fazla hücre noktası katılmakla beraber arasındalık değerleri düşmektedir. Bu uzun zaman aralıklarında hücrelerin önemini yitirmeye başladığının bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Bununla beraber daha önce bahsi geçen bölgeler ve o bölgelerdeki faylar boyunca uzanan sıralı hücreler yine bölgede aktif faylar üzerinden stresin taşındığını göstermektedir. Özellikle artan zamanla beraber



Şekil 4.23. İki farklı hücre boyutuna göre arasındalık merkeziliği grafiği a) $L = 0.25^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

Marmara Deniz'i boyunca uzanan bir hat dikkat çekmektedir. Buna yaklaşık dik olarak güneye inen ve daha sonra Manisa üzerinden İzmir'e bağlanan bir ağ yapılanması görülmektedir. Her ne kadar bu kümelenmeler kendi içinde bağımsız gibi görünse de Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisinin bu hat üzerinden kıyı Ege'ye taşındığı izlenimi uyandırmaktadır. Yine arasındalık merkeziliği bakımından İzmir bölgesinde Midilli Adası civarından İzmir Körfezi'ne, sonra Sığacık Körfezin'den güneye doğru bir bağlantı ve aynı noktadan da doğuya doğru bir hat görülmektedir. Daha güneyde ise Gökova Körfezi'nde körfez boyunca bir hücreler zinciri göze çarpmaktadır. Burada küçük faylar üzerinden bir stres transferi olabileceği gibi daha önce de vurgulandığı gibi hat boyunca daha büyük bir fay üzerinden stres taşınmakta olabilir. Fakat fay haritalarında bu kadar uzun bir fay görülmemektedir. Bunların dışında Denizli, Afyon, Tuz Gölü civarlarında kümelenmeler mevcuttur. Artan zamanla beraber Bingöl, Hatay arasındaki Doğu Anadolu Fayı'nın üzerindeki hücrelerin daha belirgin biçimde ortaya çıktığı görülmektedir. Yani bu hat boyunca bir stres transferi mevcut olduğu düşünülmektedir. Van Gölü civarındaki kümelenme Van depreminin etkisidir.

Daha küçük hücre boyutlarına inildikçe (Şekil 4.23) daha önce de vurguladığımız gibi hücreler içindeki deprem sayısı artmakta fakat hücreler kaba bir görünüme sahip olduğundan

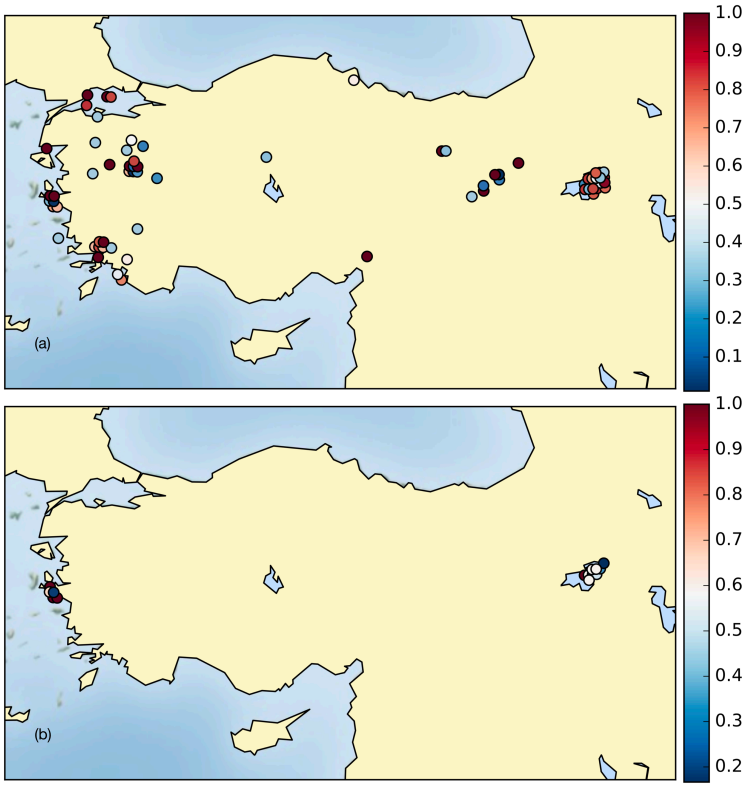


Şekil 4.24. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre arasındalık merkeziliği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir.

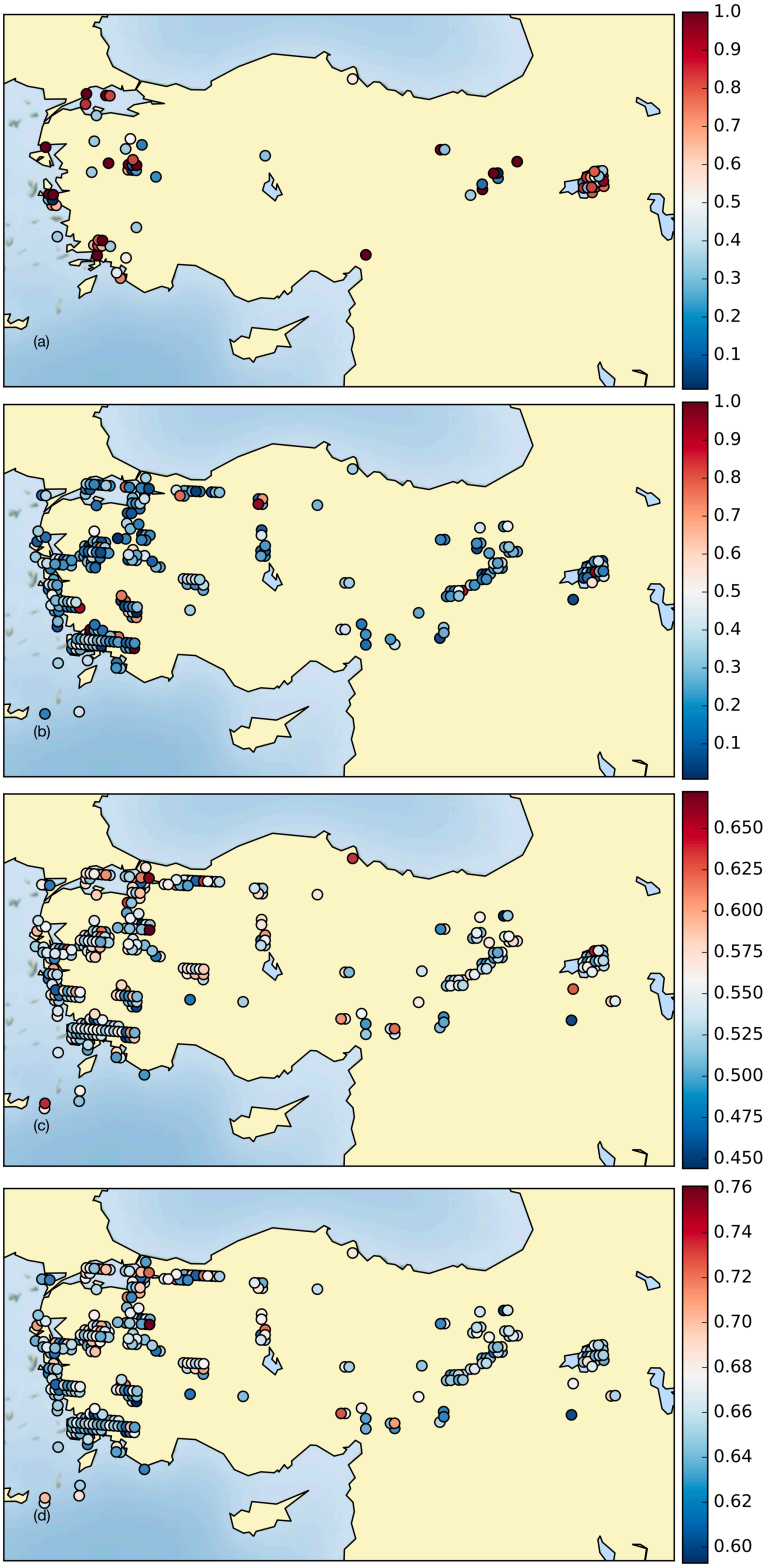
hatlar çok iyi belli olmamaktadır. $L = 0.125^o$ hücre boyutu ideal olarak gözükmektedir.

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi azalan olay eş zamanlılığı eşik değerlerinde, τ değerlerindeki artmaya benzer bir etki görülmektedir. Öyle ki daha önce ortaya çıkan kümelenme ve yapıların hemen hemen benzerleri görülmektedir. Dolayısıyla Kuzey Anadolu Fayı'ndan Batı Ege'ye doğru olan hatın ve Doğu Anadolu Fayı üzerinde bulunan hücrelerin çok yüksek olay eş zamanlılığında kendilerini gösteremedikleri veya ancak uzun süreler zarfında iyi bir şekilde ortaya çıktıkları görülmektedir. Buradan hareketle yayılmanın küçük depremler aracılığı ile ve uzun sürde gerçekleştiği düşünülebilir.

Yerel Kümelenme Katsayısı: Daha önce de belirtildiği gibi bu nicelik birbiri ile bağlı olan iki hücrenin aynı zamanda üçüncü bir hücre ile de bağlantılı olma olasılığının bir ölçüsüdür. Literatürde muson yağmurlarının sürekliliğini kestirmek için kullanılmıştır (Malik vd. 2011). Şekil 4.25'de iki farklı deprem büyüklüğü eşik değerine karşılık yerel kümelenme katsayısı grafiği görülmektedir. $M_{th} = 3.0$ (Şekil 4.25.b) durumunda görüldüğü gibi sadece Sığacık Körfezi ve Van Gölü civarındaki hücrelerin katkısı mevcuttur. Van depremi Van Gölü civarındaki yapıyı açıklayabilir. Sığacık Körfezi'nde ise bu eşik değerin üzerinde sıklıkla



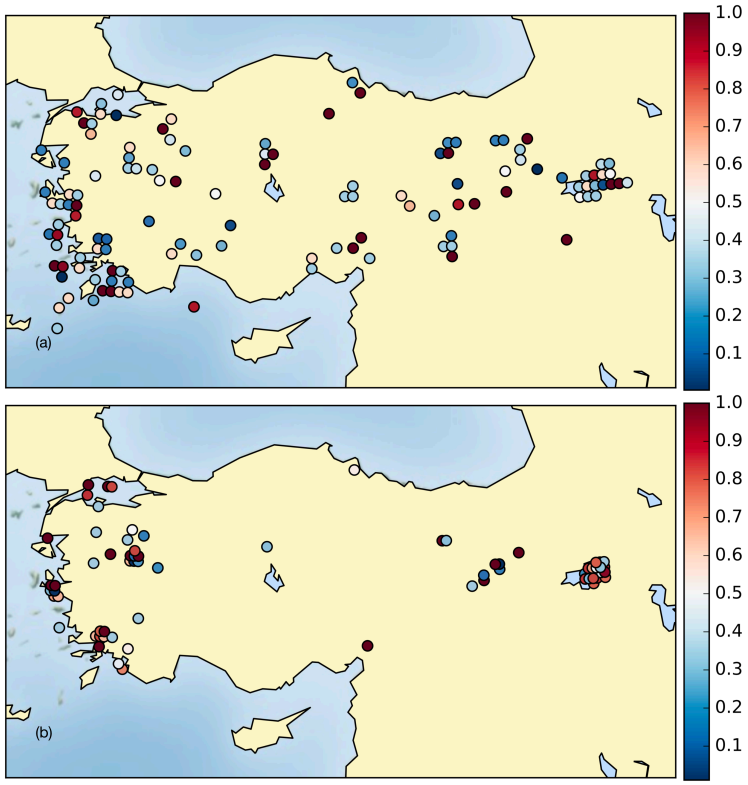
Şekil 4.25. Artan deprem büyüklüğü eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği $a)\ M_{th} = 2.5,\ b)\ M_{th} = 3.0,$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.



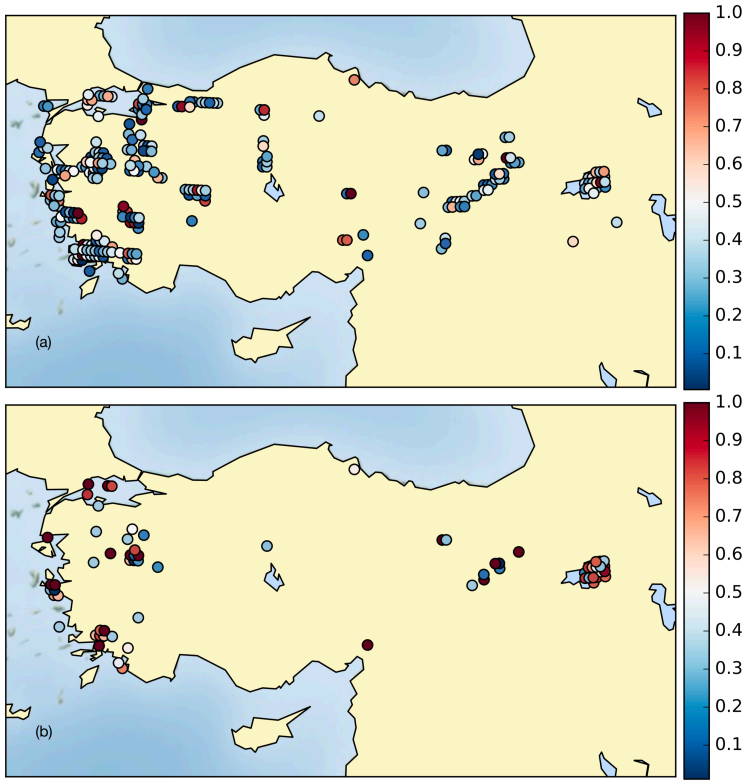
Şekil 4.26. İki deprem arasındaki azami sürenin artan eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $\tau = 10$ gün, b) $\tau = 30$ gün, c) $\tau = 180$ gün, d) $\tau = 365$ gün. Diğer eşik değerler dört grafik içinde $L = 0.125^o$, $M_{th} = 2.5$, $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.

deprem olduğu anlaşılmaktadır. $M_{th} = 2.5$ (Şekil 4.25.a) seçildiğinde ise bu eşik değer için daha fazla hücrenin aktif olarak bağda yer aldığı görülmektedir. Van Gölü ve Sığacık Körfezi'ndeki hücrelerin yanında Bingöl, Kütahya ve Marmara Denizi'ndeki hücrelerden de ağa katkı gelmiştir. Yani bu bölgelerdeki hücreler arasında bir deprem sürekliliği mevcuttur. Bu hücrelerde olan depremlerden sonra çevrelerinde de depremler meydana gelmektedir. Dolayısıyla stres sürekliliğinin bu hücreler arasında mevcut olduğu söylenebilir.

Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi artan τ değerleriyle birlikte Doğu Anadolu Fayı ve Van Gölü civarında oluşumların kendilerini daha fazla gösterdiği görülmektedir. Fakat asıl artış Ege ve Marmara bölgelerinde olmaktadır. Yine zamanla Kuzey Anadolu Fayı'nın üzerinde Kocaeli üzerinden Marmara Denizi'ne ve sonrasında Trakya'ya doğru uzanan hücrelerin stres sürekliliğine sahip oldukları görülmektedir. Daha önceki analizlere benzer şekilde Balıkesir'den İzmir'e doğru bir kümelenme mevcuttur. Bu yapı Sığacık Körfezi'nden güneye doğru devam etmektedir. Yine Gökova Körfezi boyunca oluşan bir yapı dikkati çekmektedir. Tüm bunların ışığında kısa süreli incelemelerde kendini çok belli etmeyen fakat uzun zaman aralıklarında bahsi geçen bölgeler üzerinde bir stres sürekliliğinin olduğu söylenebilir. τ eşik değerinin artması ile yerel kümelenme katsayısının minimum değerleri artarken, maksimum



Şekil 4.27. İki farklı hücre boyutuna göre yerel kümelenme katsayısı grafiği, a) $L = 0.25^o$, b) $L = 0.125^o$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $\tau = 10$ gün $Q_{th} = 0.9$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.28. İki farklı olay eş zamanlılığı eşik değerine göre yerel kümelenme katsayısı grafiği a) $Q_{th} = 0.6$, b) $Q_{th} = 0.9$. Diğer eşik değerler iki grafik içinde, $M_{th} = 2.5$, $L = 0.125^o$, $\tau = 10$ gün olarak seçilmiştir

değer azalmaktadır. Bununla beraber ortalama değerde artış olmaktadır. Bu durum ağa daha çok hücrenin bağlanmasının bir sonucudur. Hücre sayısı arttıkça yeni gelen hücreler daha önceki aktif hücrelerle bağ yapmakta, ayrıca daha önce mevcut olan hücrelerde kendi arasında daha fazla bağ yapmakta dolayısıyla minimum değer artmaktadır. Fakat daha önce yerel kümelenme katsayıları 1'e yaklaşan bir kaç hücreye eklenen yeni bağlantılar ise görece daha az bağ yaptıklarından bu hücrelerin değerlerinin düşmesine yol açmaktadır. Buradan hareketle kısa zaman diliminde hücrelerin daha çok yakın mesafedeki hücrelerle bağ yaptıkları, zamanla ise özellikle fay doğrultularında bağ yapmaya devam ettikleri sonucu çıkarılabilir. Yapılan bağların ve stres devamlılığının genelde faylar boyunca ve mesafeyle azalan şekilde olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.27.a'da da ($L = 0.25^o$) görüldüğü gibi hücre boyutlarının büyümesi daha önceki analizlerde de vurgulandığı gibi daha kaba bir yaklaşım sunmaktadır. Buna rağmen yukarıda bahsi geçen bölgelerde stres devamlılığının varlığı görülmektedir.

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi olay eş zamanlılığı eşik değerini düşürmek ise yine τ'nun artmasına benzer bir etki yapmaktadır. Daha çok hücre ağa katılabildiğinden depremce aktif

bölgelerde genelde kümelenen bir yapı görülmektedir. Dolayısıyla kısa zaman aralığında eş zamanlılığın daha düşük olduğu ve farklı hücrelerdeki iki depremin ilintili olduğu varsayılan zaman artıkça olay eş zamanlılığının giderek attığı görülmüştür. Çok yüksek deprem büyüklüğü eşik değeri kullanma imkanına sahip olamadığımız için kullanılan yöntem depremin büyüklüğünden ziyade sıklığına duyarlıdır. Bu durumda küçük depremlerin hem uzaysal hem de zamansal olarak daha kısa erimli olacağı ve altı ay veya bir yıl gibi τ sürelerinden ziyade on gün gibi kısa zaman aralığının daha uygun olduğu düşünülebilir. Ortaya çıkabilecek böyle bir soruya ise daha düşük olay eş zamanlılığı değeri kullanılarak yanıt verilebilir. Her iki durumda da benzer yapıların ortaya çıkması, ilgilenilen coğrafyadaki ağ özelliklerinin kararlı olduğunu göstermektedir. Bu sebeple analizler olası tüm durumlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Yönelimsiz ağlar için yapılan diğer analizden biri ise asortatifliktir. Bir hücrenin kendisi gibi olana bağlanma eğiliminde olması anlamına gelir. Literatürde pek çok gerçek ağ için bu nicelik ölçülmüştür. Sosyal ağlarda genelde pozitif değerler alır. Bu tür ağlara fizik, biyoloji, matematik gibi bilim dallarında yayınlanan makalelerde ortak yazarlık veya film aktörlerinin kendi aralarında oluşturdukları işbirliği gösterilebilir. Fakat doğada karşılaşılan protein etkileşmesi, metabolik ağlar ve sinir ağları ile güç nakil şebekesi ve internet gibi teknoloji ile hayatımıza giren ağlarda ise bu nicelik negatif değerler almaktadır (Newmann, 2003). Negatif değer alması ağdaki hücrelerin kendi gibi olmayan hücrelerle bağlantı yapma eğiliminde olduğu anlamına gelir. Mesela bağlantı sayısı küçük olan bir hücre yeni bir bağlantı yapacağı zaman yine kendisi gibi bağlantı sayısı küçük olan bir hücre yerine daha büyük bağlantı sayılı hücreye bağlanmaya yatkınsa ele alınan ağın asortatifliği negatif değerler alır. Yönelimsiz ağlar oluşturarak gerek Kaliforniya, gerekse Anadolu için yaptığımız analizlerin tümünde bu nicelik için negatif değerler ölçülmüştür. Bu sonuçlardan depremlerin de tıpkı pek çok doğal kompleks ağlarla aynı karakterde olduğunu anlıyoruz. Depremlerde hücrelerin ana şokun olduğu hücrelere daha fazla bağlanma eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum doğanın özel bir seçimi olabilir.

4.3 Kaliforniya Bölgesi İçin Yönelimli Ağ oluşturulması

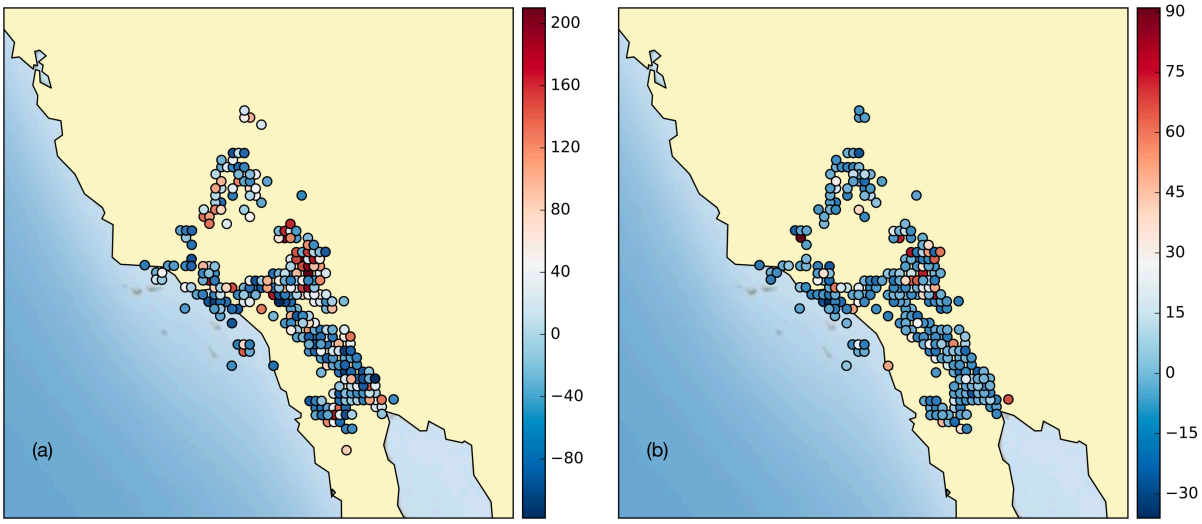
Kaliforniya bölgesi için yönelimli bir ağ modeli önceki bölümde açıklandığı şekilde oluşturulabilir. Bu ağın oluşturulmasında deprem büyüklüğü eşik değeri (M_{thr}), hücre boyutu eşik değeri (L) ve farklı hücrelerdeki depremler arasında olabilecek maksimum zaman aralığı (τ) değerleri yönelimli ağ oluştururken kullanılanlarla aynı seçilmiştir. Benzer şekilde olay eş zamanlılığı Q_{th} yerine kullanılan, q_{th} eşik değeri de 0'dan başlayarak 1'e kadar 0.1 adım aralıkları ile taranmıştır.

Yerel Ağ Akısı: Yönelimsiz ağlarda ele alınan derece merkeziliğine benzer şekilde hücrenin yapmış olduğu bağlantılar üzerinden ölçülen bir niceliktir. Yönelimli ağlarda bir hücreye dışarıdan gelen bağlantıların sayısı (in-degree) k_{in} ve hücreden dışarıya giden bağlantı sayısı (out-degree) k_{out} ile temsil edilirse yerel ağ akısı

$$\Delta k = k_{in} - k_{out} \tag{4.4}$$

şeklinde ifade edilir. Nicelik Malik vd. tarafından muson yağmurları ağı incelemesinde kullanılmıştır (Malik vd., 2011). Bu çalışmada yüksek pozitif Δk değerlerinin olduğu hücreler buhar toplanma noktaları olarak ele alınmıştır. Bu noktalar aynı zamanda alçak basınç noktaları olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte bu buhar toplanma noktalarının her zaman yüksek yağış noktaları olmasının gerekmediği yönünde yorum yapılmıştır. Negatif Δk değerlerinin olduğu bölgeler ise buharın üretildiği noktalar olarak dikkat ele alınmıştır.

Yaptığımız analizde bu nicelik depremler için stres odaklı olarak ele alınmıştır. Yerel ağ akısı kullanılarak büyük bir depremden önce o bölgede bir stres yığılması olup olmadığı sorusuna cevap aranmıştır. Bunu için Kaliforniya kataloğunda meydana gelen üç büyük deprem arasındaki veriler ayrı ayrı analiz edilmiştir. Katalog bu şekilde bölündüğünde veri sayısı iyice



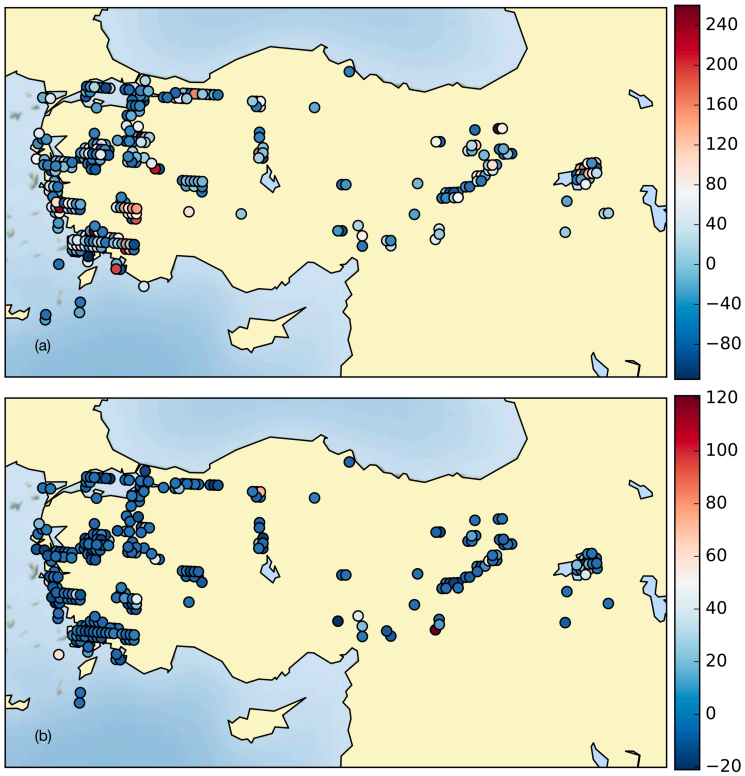
Şekil 4.29. Kaliforniya için yerel ağ akısı grafiği. a) $q_{th} = 0.2$, b) $q_{th} = 0.9$. Diğer parametreler $M_{th} = 2.0, L = 0.125^{o}, \tau = 30$ olarak seçilmiştir.

azaldığından bahsi geçen hallerde elde edilen sonuçlar seçilen q_{th} eşik değerine göre farklılık göstermektedir. Her durum altında tutarlı bir sonuç elde edilemediğinden yukarda bahsi geçen çalışmada olduğu gibi tüm katalog incelenmiştir.

Şekil 4.29'da farklı iki q_{th} eşik değeri için yerel ağ akısı grafiği görülmektedir. Hem düşük hem de yüksek eşik değer durumlarında özellikle Kaliforniya Makaslama Bölgesi dikkat çekmektedir. Ağ daki bağlantılar bu bölgedeki hücrelere doğru oluşmaktadır. Bahsi geçen bölgede Landers ve Hector Mine depremleri meydana gelmiştir. Şekil 4.29.a'da Garlock Fayı yakınlarında ise küçük bir yüksek ağ akısı kümelenmesi yer almaktadır. Yine her iki grafikte bazı hücreler yüksek pozitif değerler almıştır. Yerel ağ akısının yüksek olduğu bölgelerde stres birikmesi olabilir. Zira Kaliforniya Makaslama Bölgesi'nde yüksek şiddette depremler meydana gelmiştir.

4.4 Türkiye Kataloğu İçin Yönelimli Ağ Oluşturulması Ve İncelenmesi

Kaliforniya ile benzer şekilde ve tüm parametre değerlerinde Türkiye kataloğundan alınan verilerle yönelimli ağlar oluşturulmuştur. Türkiye için her ne kadar Kaliforniya



Şekil 4.30. Türkiye için yerel ağ akısı grafiği. a) $q_{th} = 0.2$, b) $q_{th} = 0.9$. Diğer parametreler $M_{th} = 2.0, L = 0.125^o, \tau = 30$ olarak seçilmiştir.

bölgesindeki kadar belirgin kümelenmeler söz konusu olmasa da $q_{th} = 0.2$ eşik değeri için (Şekil 4.30.a) özellikle Denizli ve Van bölgelerinde küçük kümelenmeler mevcuttur. Yine Gökova Körfezi'nden Fethiye'ye doğru uzanan hatta yüksek ağ akısı değerleri gözlenmektedir. Bunların dışında dağınık olarak bazı hücreler yüksek pozitif değerler almıştır. Eşik değer artırıldığında (Şekil 4.30.b) yerel ağ akısı değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Şanlıurfa civarında tek bir hücre ise çok yüksek değer alarak öne çıkmıştır. Kümelenmelerin olduğu bölgeler göz önüne alındığında Gökova Körfezi deprem fırtınaları ile bilinen ve geçtiğimiz yıl içinde 6.6 büyüklüğünde bir deprem üretmiş (bahse konu deprem incelenen veri aralığında yer almamaktadır) aktif bir bölgedir. Yine Van depreminin olduğu bölgede görece yüksek ağ akısı değerleri mevcuttur. Her ne kadar bu analiz için elimizdeki veri grubu çok yeterli olmasa da, eğer stresin ağ akısının yüksek olduğu noktalarda toplandığı yorumu yapılırsa Denizli bölgesinin yer ve deprem bilimciler tarafından incelenmesi yerinde olacaktır. Yaptığımız çalışmada ağ akısının yüksek olduğu noktalarda stres birikmesi olabileceği yorumu tamamen Malik vd.(2011) çalışmasından esinlenilerek yapılmıştır.

4.5 Kaliforniya Kataloğu İçin Yineleme Grafiği Analizleri

Kaliforniya kataloğunda 529827 adet deprem mevcut olmasına rağmen ilgili analizler 27943 veri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi, çok küçük depremlerin etkisinden kurtulmak için $M > 2.5$ olan depremlere odaklanmamızdır. Elimizde kalan az sayıda veri üzerinden hedeflenen, büyüklüğü 7 ve üzerinde olan ana şokların öncesinde ve sonrasında belirli bir dönem içinde herhangi bir eğilime sahip olup olmadığını araştırmaktır. Kaliforniya kataloğunda bu koşulu sağlayan üç adet deprem mevcuttur. Bunlar 28/06/1992, 16/11/1999 ve 04/04/2010 tarihinde gerçekleşen sırasıyla Landers, Hector Mine ve El Mayor depremleridir. Söz konusu depremlerin büyüklükleri sırasıyla $7.3, 7.1, 7.2$'dir. Ana şokların öncesindeki ve sonrasındaki periyotlarda her hangi bir farklı eğilim yakalayabilmek, ana şoktan önce ve sonra sisteminin farklı davranıp davranmadığını anlayabilmek için oldukça önemlidir. Bu çalışmadaki temel amaç bu iki periyot arasında sistemin farklı bir işleyişe sahip olduğunu ortaya koyabilmek ve mümkünse gerçekleşebilecek yeni ana şokların öncesinde, ana şokun gerçekleşebileceğini ilişkin bir bilgi olup olmadığını araştırmaktır. Bu hedefle Kaliforniya deprem kataloğunda yer alan üç ana şokun öncesi ve sonrası belirli periyotlarla ($6, 12, 18$ ve 24 aylık) incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda bir yıllık dönemin, en uygun zaman aralığı olduğu anlaşılmıştır. 6 aylık yapılan analizlerde karşılaşılan en önemli sorun, özellikle ana şok öncesindeki dönemde veri sayısını oldukça az olması ve sisteminin dinamiğini tam olarak anlaşılamamasıdır. İncelenecek periyodu 1.5 ve 2 yıl olarak aldığımız takdirde, ana şok öncesinde ve sonrasında gerçekleşmiş olan büyüklüğü 5 ve üzerindeki bir çok depremin de incelenen periyotların içersinde kalmasından kaynaklı olarak istenmeyen

etkiler oluştuğu görülmüştür. Periyodu bir yıl seçerek hem ilgili ana şokun öncesinde hem de sonrasında yer alan görece büyük depremlerin etkisini en aza indirmiş olduk.

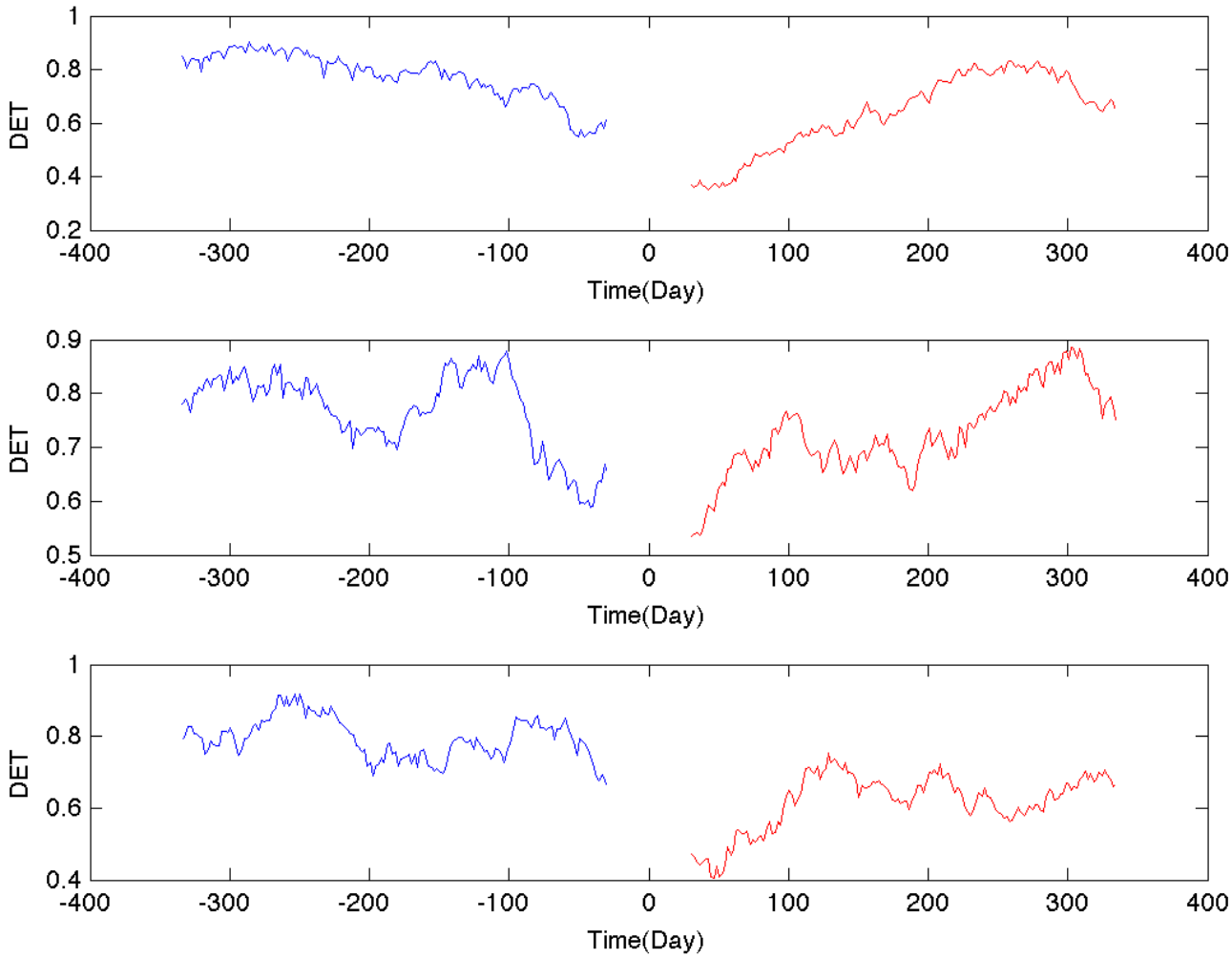
Ana şokun öncesinde ve sonrasında incelenecek olan periyotları tespit edildikten sonra, yineleme grafiği analiz yöntemi uygulanarak, yineleme grafiği sayısal niceliklerinden olan determinizm niceliği değerleri hesaplanmıştır. Bu hesap için ilgili ana şokların öncesinde ve sonrasındaki bir yıllık periyotlar bulunmuştur. 7.3, 7.1 ve 7.2 büyüklüğüne sahip olan depremlerin öncesinde ve sonrasındaki bir yıllık periyotta gerçekleşen deprem sayısı sırasıyla 1059, 614, 627; 4189, 1811, 3690'dır. Özellikle ana şok öncesindeki veri sayısına bakıldığı takdirde, analizler için veri sayısının sorun teşkil edeceği açık bir şekilde görülmektedir. Bu sorunu aşabilmek için literatürde zaman serisi analizlerinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan pencere kaydırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yönteme değinmeden önce zaman serisi analizlerin karşılaşılan zorluklardan bir tanesi olan zaman serisisinin eşit aralıklarla örneklemeye sahip olmaması sorunu Dönüşüm Maliyet Zaman Serisi (TACTS) yöntemi kullanılarak aşılmıştır. Bu yöntem sistemin tamamen iç dinamiğinden faydalanarak zaman serisini eşit zaman aralıklı hale getirmektedir. Bu yöntemi uygulayabilmek için, ilk olarak ilgili zaman serisi eşit uzunluğa sahip pencerelere bölünür ve ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklık Denklem 3.14 kullanılarak hesaplanır. Analizlerimizde pencere boyutu bir gün olarak alınmıştır. İncelenen zaman aralığı bir yıl olduğundan toplam 365 pencereye sahip olunmuştur. Ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklığı hesaplayabilmek için gerekli olan üç parametre mevcuttur. Kaydırma işleminin maliyetini hesaplayabilmek için gerekli olan λ_0 ve λ_k parametreleri Denklem 3.13.a ve Denklem 3.13.b 'den faydalanılarak hesaplanmıştır. Ekleme ve silme işlemlerinin maliyetini veren λ_S parametresinin değeri ise yukarıda bahsedildiği gibi belirli bir aralıkta taranarak ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımları çizdirilerek, Gaussiyen dağılıma en yakın dağılıma sahip λ_S parametre değeri alınmıştır. Kaliforniya kataloğu için söz konusu olan bu üç parametre tespit edildikten sonra her bir periyot için Dönüşüm Maliyet Zaman Serileri elde edilmiştir. Elde edilen bu zaman serilerinin her birinde 364 adet veri bulunmaktadır. Eşit zaman aralığına sahip olan dönüşüm maliyet zaman serileri elde edildikten sonra yineleme grafiği analizlerine geçilmiştir.

Dinamik bir sistem farklı zaman dilimlerinde farklı yapıda yineleme grafiğine sahip olmaktadır. Sistemin dinamiğini zamanla değişimini incelemek için sisteme ait zaman serisi eşit uzunluktaki pencerelere bölünür. Her bir pencerenin içerisinde kalan verilerle her bir pencereye ait yineleme grafiği çizdirilir ve her bir pencere için yineleme grafiği sayısal niceliklerinden determinizm niceliği hesaplanarak zamana göre grafiğe dökülür.

Zaman serisinde yeteri kadar uzun olmaması durumunda, zaman serisinin başından belirli bir uzunlukta alınan pencere belirli bir oranla kaydırılarak, ilgili zaman serisinin veri sayısı arttırılmış olur. Örnek olarak elimizde bir yıllık bir zaman serimiz olsun ve bu zaman serisinin iki aylık eşit uzunluktaki pencerelere bölelim. Bu işlem sonucunda eliminizde toplam altı adet pencere olmaktadır. Her bir pencere için çizdirilen yineleme matrislerinden toplam altı adet determinizm niceliği hesaplanabilenicektir. Bir yıllık sürecin dinamiğini sadece altı nokta ile irdelemek, sistemin dinamiği hakkında iyi bir sonuç vermeyebilir. Pencere kaydırma yöntemi ile bu veri sayısı arttırabilir. İlk iki aylık pencerenin başlangıcından itibaren ikişer gün kaydırırsak, sistemin dinamiğini toplam 153 nokta üzerinden değerlendirebilir ve daha sağlıklı bir sonuc elde etmiş oluruz. Bu doğrultuda analizlerimiz için pencere boyutunu 60 gün seçerek, her bir pencereyi 2 gün kaydırarak sistem hakkında daha fazla bilgi elde edilmiştir.

Kaliforniya kataloğu için hesaplanan determinizm niceliği sonuçları Şekil 4.31'de verilmektedir. Şekilde yer alan üç grafik sırası ile Landers (7.3), Hector Mine (7.1) ve El Mayor (7.2) büyüklüğüne sahip depremlere karşılık gelmektedir. Her bir grafikte mavi ve kırmızı renkle ifade edilen determinizm niceliği eğrileri ise sırasıyla ana şokun öncesi ve sonrasındaki bir yıllık periyotları göstermektedir. Şekilde yer alan üç öncü periyot için determinizm niceliği değerlerinin ana şoka yaklaştıkça azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Buna zıt olarak ana şoktan sonraki bir yıllık periyottaki determinizm niceliği değerlerinin artış göstererek ana şoktan uzun süre öncesindeki determinizm niceliği değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Ana şok açık bir şekilde sistemin olağan yapısında değişime sebep olmuştur. Bunun sebebi olarak ana şokun meydana gelmesiyle birlikte açığa çıkan büyük enerjinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Determinizm niceliğinin, sistemin tahmin edilebilirlik düzeyini gösteren bir nicelik olduğu dikkate alınırsa, ana şokun öncesinde sistemin daha tahmin edilebilir davrandığı söylenebilir. Aynı yaklaşımı kullanarak, ana şok sonrası gerçekleşen artışı da açıklayabiliriz. Sistemde gerçekleşen ani enerji boşalımı ile birlikte artan depremsellik tahmin edilebilirliği azalmış fakat belirli bir zaman dilimi sonrasında, artçı şokların sayısının giderek azalması ile sistem ana şok öncesindeki yapısını dönme eğilimine girmiştir. Belirli bir zaman sonra ana şok öncesindeki determinizm niceliği değerine yaklaşarak olağan duruma dönmüş ve sistemin tahmin edilebilirliği artmıştır.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda, ana şokun etkisi ile birlikte gerçekleşen bu farklılığın sebebi, ani enerji çıkışına bağlanabilinir. Her üç ana şok için hesaplanan determinizm niceliği değerlerini genel eğilimleri öncüler için azalma, artçılar için artış olarak görülse de, her bir grafik için dalgalanmalar mevcuttur. Bunun sebebi ana şokun öncesinde ki ve sonrasında ki bir yıllık zaman dilimi içerisinde gerçekleşen orta şiddetteki depremlerin istem üzerindeki etkisi olarak düşünülmektedir. Söz konusu bu depremler de kendi içinde



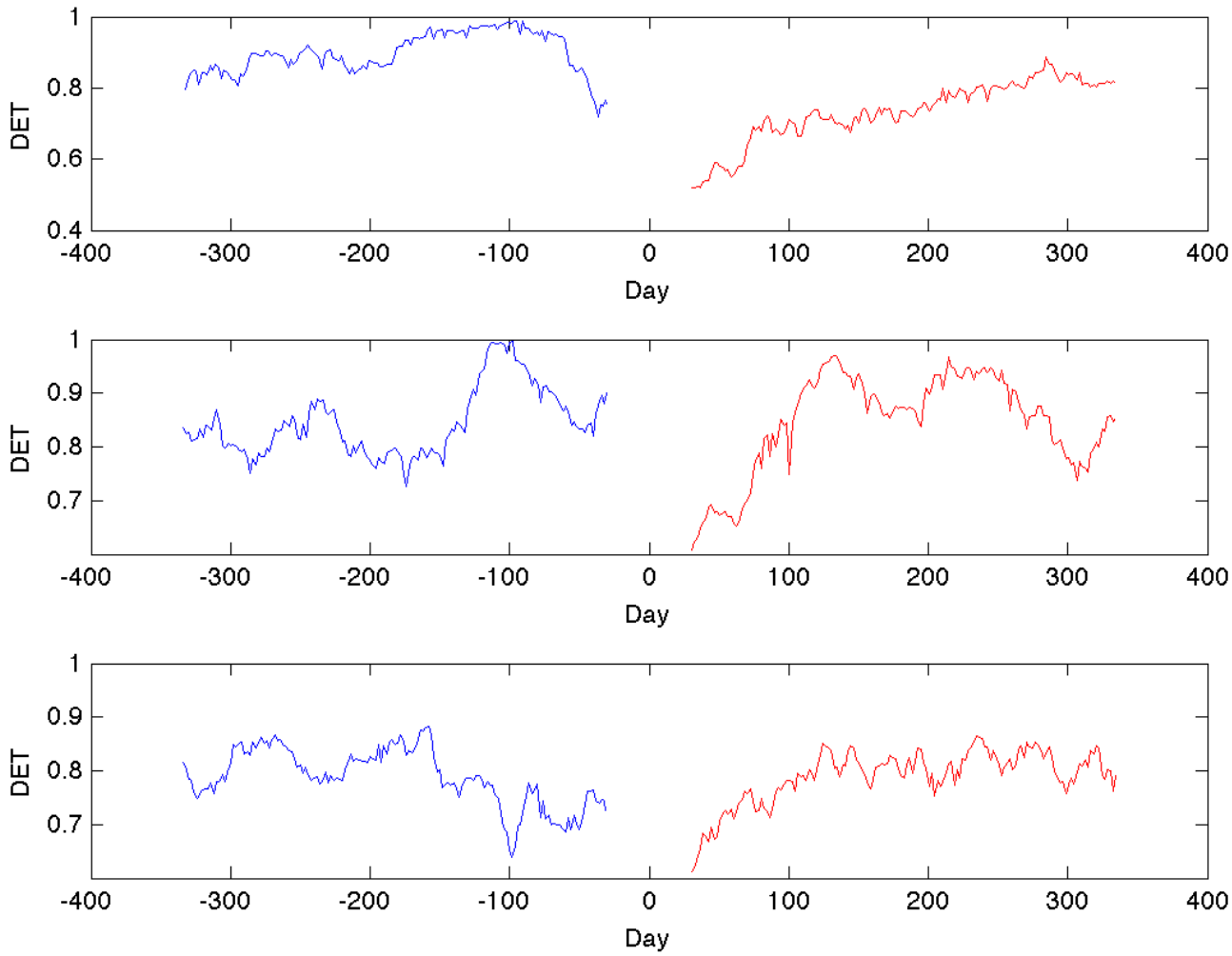
Şekil 4.31. Kaliforniya deprem kataloğunda yer alan Landers (7.3), Hector Mine (7.1) ve El Mayor (7.2) depremlerini bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla ana şoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir.

sistemi düzensizliğe itmektedir. Bunun bir yansıması olarak enerjileri mertebesinde determinizm niceliğinde dalgalanmalara sebep olmaktadırlar. Bu etkiyi azaltabilmek için öncesi ve sonrası incelenilecek olan ana şokun öncesinde ve sonrasında görece büyük deprem sayısının mümkün mertebe az olması gerekmektedir. Fakat her hangi bir ana şokun öncesindeki ve sonrasındaki bir yıllık periyotta başka bir görece büyük depremin olmaması sistemin doğasıyla örtüşmemektedir. Dinamik bir sistem olan levha hareketleri her zaman bu tarz orta şiddette depremler üretmektedir.

4.6 Alaska Bölgesi İçin Yineleme Grafiği Analizleri

Alaska bölgesi analizleri için Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu'nun (USGS) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/ internet adresinden alınan veriler kullanılmıştır. Bu adresten Dünya üzerinde herhangi bir bölge için veri temin edilebilmektedir. Bununla beraber verilerin alt sınırı 3.0'dır. Dolayısıyla bu adresten alınan veriler ağ analizi için uygun değildir. Bununla beraber çok büyük depremlerin yineleme grafiği analizleri için uygun oldukları düşünülmektedir. Bahse konu bölge için 3.0 ve üzeri büyüklüğe sahip olan 26013 adet deprem bulunmaktadır. Veriler 01/06/1970- 25/09/2013 zaman aralığını kapsamaktadır. Alaska'da bu zaman aralığında üç ana şok ele alınmıştır. Kaliforniya deprem kataloğunda olduğu gibi farklı dönemler kullanılarak, ana şokun öncesi ve sonrası için optimum sürenin bir yıl olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu üç depremin büyüklüğü sırasıyla 7.4, 7.7 ve 7.9'dur. Her bir depremin öncesinde ve sonrasında ki bir yıllık zaman diliminde gerçekleşen deprem sayısı sırasıyla 342, 357, 503; 793, 684 ve 821 adettir. İlgili periyot için tespit edilen deprem verileri kullanılarak yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek için her bir zaman serisi eşit zaman aralıklı hale getirilmiştir. Bu işlem için TACTS yöntemi kullanılmıştır. TACTS yöntemini kullanabilmek için gerekli olan pencere uzunluğu bir gün olarak alınmıştır. Bir yıllık zaman serisinde toplam 365 adet pencere elde edilmiş ve ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklık Denklem 3.14'den faydalanılarak hesaplanmıştır. Bu hesap için gerekli olan parametre değerlerinde iki tanesi Denklem 3.13'den elde edilmiştir. Sistemdeki ekleme ve çıkartma işleminin değerini temsil eden λ_S değeri ise belirli bir aralık taranarak, her bir değer için ardışık pencereler arasındaki metrik uzaklıkların dağılımının Gaussiyen dağılıma en yakın olan değeri alınmıştır.

İlgili periyotlar için elde edilen TACTS eşit zaman aralığına sahip olmasıyla birlikte yineleme grafiği analizlerine geçilmiştir. Yineleme grafiği analiz yöntemini uygulayabilmek için iki aylık büyük bir pencere seçilmiş ve iki gün kaydırarak bir yıllık zaman dilimi için toplam 153 yineleme grafiği çizdirilerek, her bir yineleme grafiği için determinizm niceliği değerleri hesaplanmıştır. Bu analiz ile ilgili sonuçlar Şekil 4.32'de verilmiştir. Şekil üç adet farklı determinizm niceliği sonucu verilmektedir. Bunlar sırasıyla 7.4, 7.7. ve 7.9 büyüklüğüne sahip depremler içindir. Mavi renkli determinizm niceliği eğrileri ana şoktan önceki, kırmızı renkliler ise ana şokun sonrasındaki bir yıllık dönemi simgelemektedir. Sonuçlara bakıldığı takdirde, sistemin ana şok üretmesinden önceki dönemde determinizm niceliği değerlerinin belirgin bir şekide düşüşe geçtiği görülmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi determinizm niceliği değerleri her ne kadar deprem öncesinde bir düşüşe geçse de, daha öncesinde dalgalanmalar mevcuttur. Bunun sebebinin söz konusu ana şoklardan önce, yine sistemin üretmiş olduğu orta şiddetli depremler olduğu düşünülmektedir. Daha önceden de belirtildiği

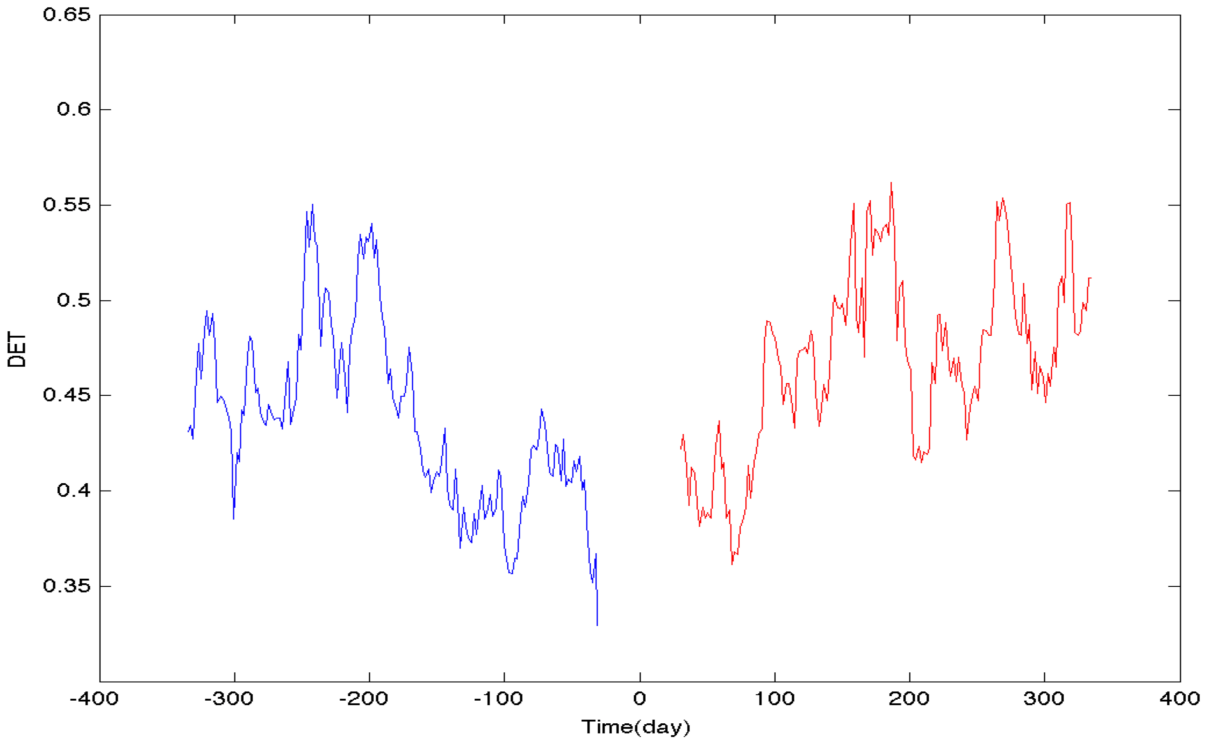


Şekil 4.32. Alaska bölgesinde meydana gelen 7.4, 7.7 ve 7.9 büyüklüğüne sahip depremlerin bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla anaşoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir

gibi, gerçek deprem kataloglarında her hangi bir ana şokun öncesindeki ve sonrasındaki bir yıllık periyotta başka görece büyük depremler olması olağandır. Ana şokun gerçekleşmesi ile birlikte açığa çıkan enerjinin, determinizm niceliğinden ani düşüşe sebep olduğu düşünülmektedir. Determinizm niceliğinde ki düşüş sistemin tahmin edilebilirliğinin azaldığı anlamına gelmektedir. Artçı şok serilerinin sistemin tahmin edilebilirliğini azalttığı açık bir şekilde görülmektedir. Artçı şok serisinin etkisinin zamanla azalmasıyla bölge eski haline dönmektedir. Bu durum ana şokun sonrası için yapılan analizlerimize yansımıştır. Kırmızı renk ile verilen sonuçlarda ana şoktan sonra determinizm niceliğinin belirgin bir şekide arttışa geçtiği görülmektedir.

4.7 Türkiye Kataloğu İçin Yineleme Grafiği Analizleri

Daha önceden bahsedildiği gibi Türkiye için kullandığımız veriler 01/01/1999'dan başlamaktadır. Bu veriler Gölcük depremini kapsamasına rağmen bu tarihten önceki depremlerdeki veri azlığı sebebiyle Gölcük depremi incelenmemiştir. Dolayısıyla 23/11/2011 yılında gerçekleşen büyüklüğü 7.2 olan Van depremine odaklanılmıştır. Söz konusu depremden önceki bir yıllık zaman aralığında 9175, sonraki bir yılda ise 9012 adet deprem mevcuttur. Her iki döneminde yineleme grafiği analizlerini gerçekleştirebilmek için önceki iki analizde tercih edilen pencere büyüklükleri kullanılmıştır. Yapılan analizlerin sonucu Şekil 4.33'te verilmektedir. Daha önceki yapılan analizlerde olduğu gibi ana şokun öncesindeki bir yıllık periyotta, determinizm niceliği eğrisi düşeşe geçmiştir. Mavi renk ile verilen sonuca bakıldığında bu düşüş açık bir şekilde görülmektedir. Diğer analizle uyumlu olduğu saptanan bu sonuç, ana şokun gerçekleşmesinden önce determinizm niceliğinin düşme eğilimine geçtiği konusundaki görüşü pekiştirmektedir. Diğer katalogların analizlerinde olduğu gibi, Van depreminden sonraki bir yıllık periyotta ise determinizm eğrisinin artışa sahip olduğu kırmızı renkle ifade edilen grafikte açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.33. Van depreminin bir yıl öncesi ve sonrasına ait determinizm niceliği sonuçları. Mavi ve kırmızı renk ile verilen determinizm niceliği eğrileri sırasıyla ana şoktan önceki ve sonraki bir yıllık dönemi temsil etmektedir

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada gerçekleştirdiğimiz ağ analizlerinde sadece ham deprem verilerinden yola çıkarak depremce aktif bölgelerin tesbiti, bu bölgeler üzerinde bir sürekliliğin olup olmadığı ve ağ üzerinde köprü görevi gören hücreler tesbiti amaçlanmıştır.

Kaliforniya Bölgesi için yaptığımız analizlerde özellikle Kaliforniya Makaslama Bölgesi, Garlock Fayı, San Anreas Fayı ve bu faya paralel irili ufaklı fayların bulunduğu hücrelerin hem depremce aktif oldukları hem de bu bölgelerde bir süreklilik olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak arasındalık değeri analizlerinde pek çok hücrenin benzer yapıda olması ve genelde başat fay hatları üzerinden katkı gelmesi oluşan stersin özellikle yukarda bahsi geçen fay hatları boyunca taşındığı sonucuna varılmasına neden olmuştur. Her ne kadar ağ üzerinde uzun erimli bağlar olsa da hücrelerin yakın çevresi ile daha çok bağ yapması sonuçlara yakın bölge gözüyle bakmamıza sebep olmuştur. Bu çerçevede Kaliforniya Bölgesi için başat olan deprem merkezleri Kaliforniya Makaslama Bölgesi, Garlock Fayı, San Anreas Fayı çevreleri olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle Kaliforniya Makaslama Bölgesi'nde stres birikmesi olabileceği düşünülmektedir.

Türkiye'deki depremsellik incelendiğinde ise doğudan başlayarak Van gölü civarı, Doğu Anadolu Fayı, İzmit yakınlarında Kuzey Anadolu Fayı aktif bölgeler olarak görülmektedir. Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi'ne doğru devam ettiğinin izleri grafiklerde görülmektedir. Fakat asıl ilgi çekici olan neredeyse tüm analizlerde ve tüm parametre değerlerinde İzmit civarından başlayıp Bursa, Balıkesir, Manisa üzerinden İzmir'e doğru ilerleyen ve biraz daha güneyde son bulan hücrelerin aktif olarak gözlenmesidir. Anadolu'nun, Ege Denizi'ne doğru olan hareketinin bu aktiflikten sorumlu olduğu ve Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisinin bu hat vasıtasıyla Ege kıyılarına taşındığı düşünülmektedir. Parametre değerleri artırıldıkça analizlerde kendini göstermeye devam eden Sığacık Körfezi ise deprem sıklığı açısından en aktif bölge olarak dikkat çekmektedir. Buna ek olarak Gökova Körfezi girişinden başlayarak Fethiye'nin üst bölgelerine kadar uzanan hücreler dizisi "Bölgede tek ve uzun bir fay olabilir mi?" sorusunu akla getirmektedir. Yine Denizli de genelde analizlere katkı sağlamıştır. Sonuç olarak yukarıda bahsi geçen bölgelerin hem aktif hem de deprem sürekliliğine sahip oldukları görülmüştür.

Ülkemizde tüm kamuoyu İstanbul depremine odaklanmasına rağmen diğer bölgelerin aktifliği ilgi çekmektedir. Bu aktifliğin her ne kadar görece küçük deprem sıklığından kaynaklanmış olaması muhtemel olsa da, başta İstanbul olmak üzere, özellikle İzmir, Bursa, Balıkesir, Manisa, Muğla ve Denizli illeri için risk analiz haritaları hazırlanmalıdır. İzmir çevresinde ki fayların geçmişte 7.0'dan büyük depremler ürettiği göz önüne alınırsa İzmir çevresinin diri faylarının hem karada hem de denizde haritalanması ve risk analizinin

yapılması elzemdir. Olası İstanbul depreminden sonra hem can hem de mal kaybı olarak en büyük zararı olarak en büyük potansiyelin bu bölgede olabileceği düşünülmektedir.

Olay eş zamanlılığı analizlerinde ise determinizm niceliğinin ana şoklardan önce azaldığı sonrasında ise arttığı görülmektedir. Bu eğilim üç farklı bölge ve yedi farklı deprem için tesbit edilmiştir. Çok kısa aralıklarla olan büyük depremler sistemi çok fazla bozduğundan bir birine yakın ana şokların tesbiti zordur.

KAYNAKLAR

Abe, S., Suzuki, N. 2004. “Small-word structure of earthquake network”, Pysica A, 337, 357-362.

Abe, S., Suzuki, N. 2006. “Complex-network description os seismicity", 13, 145-150.

Bath, M. 1965. “Lateral inhomogeneities of the upper mantle”, Tectonophysics, 2, 483.

Cohen R., Erez K., ben-Avraham D., Havlin S. 2000. “Resilience of the Internet to Random Breakdowns”, PRL, 85, 21, 4626-4628

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.

Eckhom R., Popel B. 1974. “Rigorous and extended application of information theory to the afferent visual system of the cat: I. Basic concepts”, Biol. Cybern., 16, 191-200.

Eckmann J.P., Kamphorst O., Ruelle D. 1987. “Recurrence Plots of Dynamical Systems”, Europhysics Letters, 4, 973p.

Efstathiou A., Tzanis A., Vallianatos F. 2017. “On the nature and dynamics of the seismogenetic systems of North California, USA: An analysis based on Non-Extensive Statistical Physics” , Physics of the Earth and Planetary Interiors, 270, 46-72

Freeman L. C.1977. “A set of measures of centrality based upon betweenness”, *Sociometry* 40, 35-41.

Grassberger P, Procacia I. 1983. "Characterization of Strange Attractors”, Physical Review Letters, 50-5, 346p. 13, 14

Gutenberg B., Richter C.F. 1944. “Frequency of earthquakes in California”, Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185.

Hirata Y., Aihara K., 2009. “Representing spike trains using constant sampling intervals”, Journal of Neuroscience Methods, 183, 277p.

Hirata Y., Aihara K., 2012. “Timing matters in foreign exchange markets”, Physica A, 391, 760p.

Jimenez A. 2013. “A complex network model for seismicity based on mutual information”, Physica A, 392, 2498-2506.

Jimenez A. 2008. “Small word in aseismic network: the California case”, Nonlinear Processes in Geoscience, 15, 389-395.

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.

Malik N., Marwan N., Kurths J. 2010. “Spatial structures and directionality’s in Monsoon precipitation over South Asia”, Nonlinear Processes in Geophysics, 17, 371-381

Malik N., Bookhagen B., Marwan N., Kurths J. 2011. “Analysis of spatial and temporal extreme monsoonal rainfall over South Asia using complex networks”, Clim Dyn, 39, 971-987.

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.

Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths, J. 2007. “Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems”, Physics Reports, 438, 237p.

Mindlin G.M., Gilmore R. 1992. “Topological analysis and synthesis of chaotic time series”, Physica D, 58 (1-4), 229p.

Newman M.E.J. 2003. “Mixing patterns in networks”, Phys. Rev. E, 67, 026126

Omori F. 1894. “On the aftershocks of earthquakes”, J. Coll. Sci. Imp. Tokyo, 7, 111.

Ozken I., Eroglu D., Stemler T, Bagci G.B., Marwan N., Kurths J. 2015. “Transformation-cost time-series method for analyzing irregularly sampled data”, Phys. Rev. E, 91, 6p.

Pereda E., Quiroga, R. Q., Bhattacharya J. 2005. “Nonlinear multivariate analysis of neurophysiological signal”, Progress in Neurobiology, 77, 1-37.

Plattner C., Malservisi R., Furlong K.P., Govers R. 2010. “Development of the Eastern California Shear Zone — Walker Lane belt: The effects of microplate motion and pre-existing weakness in the Basin and Range”, Tectonophysics 485, 78–84.

Quian Quiroga R., Kreuz T., Grassberger P. 2002. “Event synchronization: a simple and fast method to measure synchronicity and time delay patterns” Phys. Rev. E 66, 041904.

Rehfeld K., Marwan N., Heitzig J., Kurths J. 2011. “Comparison of correlation analysis techniques for irregularly sampled time series", Nonlinear Processes Geophysics, 18, 389p.

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.

Sözbilir H., Sümer Ö., Uzel B., Eski S., Softa M. 2017. “12 Haziran 2017 Midilli Depremi (Karaburun Açıkları) ve Bölgenin Depremselliği”, Teknik Rapor DOI: 10.13140/RG. 2.2.19984.20481

Schinkel S., Dimigen O,. Marwan N. 2008. “Selection of recurrence threshold for signal detection”, European Physical Journal, 164, 45p.

Shannon C. E., Weaver W. 1949. “The mathematical theory of information”, University Press, Urbana, Illinois.

Suzuki S., Yoshita H., Kazuyuki A. 2010. “Defination of Distance for Marked Point Process Data and Its Application to Recurrence Plot-Based Anaylsis of Exchange Tick Data of Foreign Currencies”, International Journal of Bifurcation and Chaos, 20, 3699p.

Tenenbaum J.N., Havlin S., Stanley H.E. 2012. “Earthquake networks based on similar activity patterns”, Physical Review E, 86, 046107.

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.

Trulla L.L., Giuliani A., Zbilut J.P., Webber Jr C.L. 1996. “Recur- rence quantification analysis of the logistic equation with transients”, Phys. Lett. A, 223 (4), 255p.

Victor J. D., Purpura K. P. 1997. “Metric-space analysis of spike trains: theory, algorithms and application”, Network: Computation in Neural Systems, 8, 127.

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.

Wells D. L., Coppersmith K.J. 1994. “New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture area and surface displacement”, Bull, Seismol. Soc. Am. 84, 974-1002

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.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. AHMET ÇELİKOĞLU
Proje No:	115F596
Proje Başlığı:	Deprem Dinamiğinin Olay Eş Zamanlılığı ve Yineleme Grafiği Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	UĞUR TIRNAKLI
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	EGE Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2016 - 15/03/2018
Onaylanan Bütçe:	87650.0
Harcanan Bütçe:	35752.68
Öz:	Bu çalışmada gerçekleştirdiğimiz ağ analizlerinde sadece ham deprem verilerinden yola çıkarak depremce aktif bölgelerin tesbiti, bu bölgeler üzerinde bir sürekliliğin olup olmadığı ve ağ üzerinde köprü görevi gören hücrelerin tesbiti amaçlanmıştır. Analizi yapılan yönelimli ve yönelimsiz ağ modelleri olay eş zamanlılığı yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak gerek Kaliforniya gerekse Türkiye için bazı bölgelerin depremsellik açısından oldukça aktif oldukları ve bu bölgelerde stresin ana fay hatları boyunca taşındığı tesbit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak Türkiye için özellikle bazı illerin risk analizi haritasının yapılması önerilmiştir. Yineleme grafiği analizlerinde ise farklı bölgelerde gözlemlenen yedi farklı deprem için determinizm değerlerinin ana şoktan önce azalma, ana şoktan sonra artma eğiliminde olduğu tesbit edilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	İstatistiksel Fizik, Dinamik Sistemler, Karmaşık Sistemler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK