



Deprem Etkileşimlerinde Coulomb Gerilme Kriteri Değerlendirmesi; Doğu Anadolu Fay Hattı

Evaluation of Coulomb Stress Criteria in Earthquake Interactions; East Anatolian Fault Line

Fatih Sünbül¹ , Ayşe Bengü Sünbül^{2*}

¹İzmir Bakırçay Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İzmir, Türkiye

²Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

Türkiye'nin önemli fay zonlarından biri olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), içinde bulunduğumuz yüzyılda çok aktif görünmemesine rağmen, tarihsel dönemlerde büyük depremler üretmiş bir fay zonudur. DAFZ'in yakın çevresinde büyük yerleşim birimlerinin bulunması, dolayısıyla gelecekte meydana gelebilecek muhtemel bir depremin yerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Fayların içinde buldukları gerilme durumları ve komşu faylara olan etkisi Coulomb gerilme kriteri ile modellenebilmekte, gerilmenin arttığı bölgeler tespit edilerek, gelecekte oluşabilecek bir deprem lokasyon olarak değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada DAFZ üzerinde 1822 yılından günümüze kadar meydana gelmiş orta ve büyük ölçekli depremler Coulomb kriteri kullanılarak modellenmiş ve incelenen depremlerin birbirleri ile olan ilişkileri araştırılmıştır. Ayrıca, lehva hareketlerine bağlı meydana gelen tektonik gerilme değişimleri analiz edilerek, bölgede deprem riski oluşturabilecek gerilmenin yüksek olduğu alanlar incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre; modellenen 18 depremden 12 tanesi oluşumları itibarıyla gerilme ilişkileri tespit edilmiş ve bir anlamda birbirlerini tetiklemişlerdir. Geçmiş yıllarda araştırmacılar tarafından gerilme artışı saptanan Elazığ-Bingöl arasındaki segmentin 2003 Bingöl ve 2010 Elazığ depremlerinden sonra kısmen deprem riski taşımadığı da tespit edilmiştir. İnceleme alanında yer alan Kahramanmaraş-Malatya illeri arasında yer alan segmentte hem deprem tetiklemelerinden, hem de tektonik hareketlerden kaynaklı bir gerilme artışı tespit edilerek, deprem riskinin yüksek olduğu alan olarak çalışmada belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Coulomb gerilme analizi, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ), Gölbaşı-Türkoğlu segmenti, Sismik tehlike

Abstract

East Anatolian Fault Zone (EAFZ), one of Turkey's major fault zones, is quiescent in this century, was very active and produced major earthquakes in historical periods. In terms of large cities existence along the EAFZ, It is important to identify a possible location of the earthquake that may occur in the future. The stress state in the faults and their possible triggering effect to neighboring faults can be modelled by the Coulomb stress criterion. Hence, the future earthquake location can be determined by detecting the stress increased areas. In this study, moderate and large earthquakes that have been occurred since 1822 were modelled using the Coulomb criterion and their stress interactions were investigated. In addition, by analyzing the tectonic stress changes due to plate motions, the areas where the positive stress change is high, which may create earthquake risk in the region, were also investigated. According to the study findings; 12 of the 18 modelled earthquakes have a causal link between their occurrence; it can be concluded that the earthquakes were triggered by their subsequent ones. Furthermore, the segment between Elazığ and Bingöl cities, where the stress increased area examined by the researchers in the previous years, was currently determined to be partially relaxed following the 2003 Bingöl ve 2010 Elazığ earthquakes. In conclusion, the segment between Kahramanmaraş and Malatya cities was determined to be a seismic hazard which poses a high earthquake risk due to both earthquake interactions and tectonic movements modelling.

Keywords: Coulomb stress analysis, East Anatolian Fault Zone (EAFZ), Gölbaşı-Türkoğlu segment, Seismic hazard

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: absunbul@beun.edu.tr

Fatih Sünbül orcid.org/0000-0002-3590-374X

Ayşe Bengü Sünbül orcid.org/0000-0002-3131-7997

1. Giriş

Sismoloji biliminin hedefleri arasında depremin yerini, büyüklüğünü ve oluş zamanını tahmin etmek; buna bağlı olarak gerekli tedbirlerin alınmasına öncülük etmek yer almaktadır. Son yirmi yılda deprem fiziğindeki araştırmalar depremlerin oluşumunu kontrol eden en önemli parametrenin fayların içinde buldukları “gerilme durumu” (stress state) olduğunu göstermektedir (Steacy vd. 2005). Fay üzerindeki gerilme seviyesi değişimleri deprem döngüsü (earthquake cycle) içerisinde 3 periyotta değerlendirilir. Deprem öncesi veya iki deprem arası (intersismik) periyotta levha hareketlerinin etkisiyle zamana bağlı olarak fay zonlarında sürekli bir gerilme meydana gelir. Oluşan bu gerilme seküler veya tektonik gerilme olarak ifade edilir. Deprem anı (kosismik) periyot olarak ifade edilen ve saniyeler içerisinde meydana gelen ikinci periyot ise, hem fay hattında hem de civar faylar üzerinde gerçekleşen ani gerilme değişimleri olarak değerlendirilir. Deprem sonrası (postsismik) periyot olarak nitelendirilen ve depremi izleyen dönemde yeni yer değiştirmelerin gözlemlendiği ve dolayısıyla fay hatları civarında gerilme değişimlerinin gözlemlendiği üçüncü ve son dönem fazdır. Araştırmacılar çalışmalarında bu üç fazdan bazen birini, bazen ikisini ve nadiren de üçünü birlikte modellemişlerdir (Stein vd. 1992, Nalbant vd. 2002, Pollitz ve Sacks 2002, Freed vd. 2007).

Deprem oluşma anında veya art arda meydana gelen depremlerin komşu fayları tetikleemesinin sonucu olarak, deprem odağı çevresinde statik Coulomb gerilme dağılımı oluşur. Laboratuvar ortamında da simüle edilen bu gerilme kriterinin, yapılan çalışmalarda deprem mekanizmasını açıklayabileceği kanaatine varılmıştır. Deprem anında kayma gerilmesi ile birlikte normal gerilme, gözenek sıvı basıncı ve sürtünme katsayısının da içinde bulunduğu kırılmayı tespit eden parametreler daha büyük ölçekte uygulandığında, Coulomb kriterinin yer kabuğunda oluşan kırıkları da tatmin edici şekilde açıklayabileceği rapor edilmiştir (King vd. 1994). Coulomb gerilme analizi yöntemi ilk olarak bu amaç doğrultusunda Stein vd. (1992) tarafından kullanılarak geliştirilmiş ve daha sonraları birçok çalışmada başarı ile uygulanmıştır (Stein vd. 1997, Hubert-Ferrari vd. 2002, Lorenzo-Martin vd. 2006).

Depremler sırasında oluşan gerilme değişimi hesaplamaları literatürde yerini almaya başlamasıyla, bir depremin yer kabuğunda gerilme seviyesini değiştirdiği, (gerilimin düşmesi veya artması şeklinde) dolayısıyla deprem oluşum periyotlarını etkilediği kanıtlanmıştır (King 2007). Buna göre; gerilimin arttığı komşu faylar üzerinde, izleyen belirli

bir zaman diliminde, deprem olma olasılığı artmaktadır. Bu yöntem ile depremlerin olabilecekleri yüksek gerilmeli faylar veya alanlar belirlenebilmektedir. Bunun başarılı örnekleri Nalbant vd. (1998) ve McCloskey vd. (2005) gösterilebilir. Nalbant vd. (1998) 1912’den günümüze kadar Marmara ve kuzey Ege bölgelerinde meydana gelen büyük depremlerin deprem anı (kosismik) gerilme değişimlerini modelleyerek birbirlerini oluşuma hazırlama etkilerini araştırmışlardır. Oluşan deprem veya depremlerin daha sonra meydana gelen depremlerin üzerinde gerilme artımına sebep olduğunu fark etmişlerdir. Buna göre gerilme artımı olan alanlar ile o alanlarda yer alan aktif faylar göz önünde bulundurmuş ve 1999 Kocaeli depreminin meydana geldiği fayın üzerinde yüksek gerilme birikiminden ve burada büyük bir depremin meydana gelebileceğinden bahsetmişlerdir. Maalesef bu çalışmanın yayınlanmasının ardından bir yıl geçmeden 1999 M=7.4 büyüklüğündeki Kocaeli depremi yazarların tamda işaret ettikleri bölgede meydana gelmiştir. McCloskey vd. (2005) benzer şekilde 2004 M=9.2 Sumatra-Andaman depreminin civarındaki komşu faylara 9 bara yakın bir gerilme yüklemesi yaptığını vurgulayarak, bahsedilen faylar üzerinde yakın bir zamanda büyük bir deprem meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir. Bu tahmin benzer şekilde, bu çalışmanın yayınlanmasından bir hafta sonra, Sunda dalma-batma zonunda yazarların işaret ettiği bölgede M=8.7 2005 depremi meydana gelmiştir. Bu yöntem birçok önemli fay hatlarında başarılı bir şekilde uygulanmıştır; San Andreas Fay hattı (Freed vd. 2007), Moğolistan (Vergnolle vd. 2003), Kuzey Anadolu Fay hattı (Stein vd 1997, Lorenzo-Martin vd. 2006).

Türkiye’nin en önemli fay hatlarından biri olan Doğu Anadolu Fay Zonu’nda da (DAFZ) Coulomb kriterine bağlı analizler yapılmış ve oluşan gerilme ilk defa Nalbant vd. (2002) tarafından ortaya konmuştur. Araştırmacılar DAFZ üzerinde gerçekleşmiş 10 adet depremi modelleyerek artan gerilmeyi incelemiş ve sismik tehlikenin oluştuğu 2 adet fay segmenti tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada daha önceki yıllarda yapılan çalışmalar genişletilerek, 1822 yılından günümüze kadar geçen yaklaşık iki yüzyıllık sürede oluşan 18 adet deprem Coulomb kriteri ile modellenerek, bölgenin deprem öncesi (intersismik) ve deprem anı (kosismik) periyot güncel gerilme analizi yapılmıştır. Sırasıyla şu sorulara cevaplar aranmaktadır; son iki yüzyılda Doğu Anadolu Fay hattında oluşumları itibariyle hangi depremler birbirleri ile ilişkilidir? Depremler meydana gelirken komşu faylar üzerinde ne kadarlık bir gerilme meydana getirmiştir? DAFZ üzerinde güncel gerilme analizleri ne tür veriler içermektedir?

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı Tektonik Özellikler

Yer bilimciler tarafından doğal laboratuvar olarak isimlendirilen Türkiye; doğuda Arabistan ve Avrasya plakalarının çarpışma sınırını oluşturan, Helenik yay ve Kıbrıs yayı boyunca uzanan, Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı boyunca batı yönüne göç eden çok karmaşık bir yapıda, aktif tektonik özelliklere sahip bir bölgede yer almaktadır (Arpat ve Saroglu 1972, McKenzie 1976, Ambraseys 1989). Türkiye ve çevresinin tektonik oluşumu, Üst Kretase dönemden bu yana kuzey-güney (KG) yönlü, göreceli olarak birbirine yaklaşan Avrasya ve Afrika-Arap Levhalarının çarpışması sonucu güncel yapısına ulaşmıştır (Saroglu vd. 1992). Yapılan tektonik çalışmalara göre; Anadolu levhası içerisinde sağ-yanal atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu ile sol-yanal atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu ve Ege bölgesi graben yapısı yer almaktadır (McKenzie 1976). Jeodetik çalışmalar, KAFZ üzerinde ortalama 24 mm/yıl ve DAFZ üzerinde ortalama 9 mm/yıl kayma hızına işaret etmektedir (Reilinger vd. 2006). Bu iki önemli fay zonu Bingöl-Karlıova civarında birleşmektedir. Doğu Anadolu'da Arabistan levhası, Bitlis-Bindirme Kuşağı (BBK) olarak adlandırılan deformasyon zonu boyunca Anadolu levhası ile Karlıova'da çarpışmakta ve Karlıova üçlü birleşmesini oluşturmaktadır (Barka ve Kandinsky-Cade 1988, Sengor ve Yılmaz, 1981). DAFZ büyük deprem üretimi açısından 19. yüzyıl içinde oldukça hareketli olmasına rağmen, 20. yüzyıl

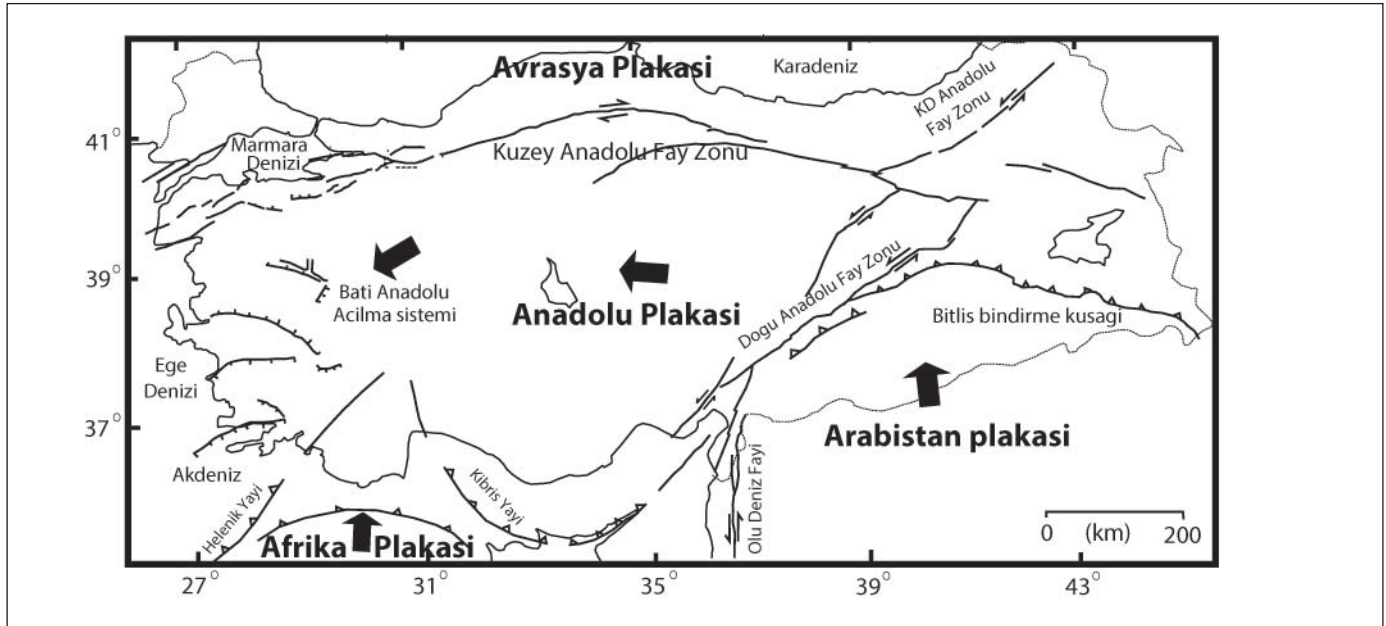
içinde göreceli olarak sessiz bir dönem geçirmiştir. Ancak bu sessizliğin geçici olduğu ileri sürülmüştür (Ambraseys 1989, Nalbant vd. 2002).

2.2. Yöntem

2.2.1 Coulomb Gerilme Kriteri

Okada (1992) geliştirdiği metotla depremlerin kayma yüzeyleri olarak modellenebilmesini sağlamış ve sismoloji alanına yeni bir yaklaşım sağlamıştır. Bu yaklaşım birçok araştırmacı tarafından açık kaynak kodlu programlarda kullanılmıştır (Cocco ve Rice 2002). Buna göre; yarı sonsuz elastik bir ortamda faylar dikdörtgen şekillerden oluşturulabilmekte ve üzerlerine istenilen miktarlarda kayma değerleri verilerek, deprem oluşumu simüle edilebilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki faylar istenilen eğim ve doğrultuda programa girilebilmekte ve fay üzerinde atım geometrisi kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Hareket eden fayların çevresinde istenilen noktalarda ve bir örnekleme alanında gerilmenin altı bağımsız bileşeni hesap edilebilmektedir. Daha sonra bu altı bağımsız bileşen istenilen hedef bir yüzeye veya fay düzlemine projekte edilerek kırılmada etkin rol oynayan kayma ve normal gerilme bileşenleri hesap edilmektedir. Hedef kayma yüzeyinin geometrisini belirlemede Coulomb kriteri kullanımı oldukça yaygın bir uygulamadır. Bir deprem nedeniyle yer kabuğu içinde oluşan Coulomb gerilme değişimi;

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu'(\Delta\sigma_n - \Delta p) \quad (1)$$



Şekil 1. Türkiye'nin major tektonik elemanları (değiştirilmiş Barka ve Kandinsky-Cade 1988), siyah kalın oklar bölgede yer alan levha hareketlerinin göreceli yönünü göstermektedir.

bağıntısı ile verilir. Bu bağıntıda $\Delta\sigma_n$ normal gerilme değişimi, $\Delta\tau_s$ makaslama (shear) gerilme değişimi, μ' içsel efektif sürtünme katsayısı ve Δp gözenek sıvı basıncında meydana gelen değişimi ifade eder. Coulomb gerilme değerinin sıfırdan büyük olması kırılmanın olası hale geldiğine işaret ederken, negatif durumda tersi söz konusudur.

2.2.2. Depremlerin Modellenmesi

Inceleme alanında meydana gelen 18 adet deprem, Coulomb gerilme metodu ile modellenmiştir. Tablo 1 çalışmada modellenen depremleri, atım bileşenlerini ve fay uzunluklarını göstermektedir. Depremde oluşan kırılmalar, elastik yarı-sonsuz ortamlarda oluşan dikdörtgen şekilli dislokasyon yüzeyleri olarak simüle edilmiştir (Okada 1992). Çalışmada kullanılan tarihsel depremlerin yerleri Ambraseys (1989) ve Ambraseys ve Melville'nin (1995) verdikleri episantr ve isoseist (eş-şiddet) haritaları

esas alınarak seçilmiştir. Doğu Anadolu Fay zonu 3 km aralıklarla modellenmiş ve oluşan gerilme 15 km derinliğe kadar düşey olarak incelenmiştir. Gerilme analizleri açık kaynak Fortran koda sahip Farfalle programı ile yapılmıştır (Nostro vd. 1997). Literatürde yer alan Coulomb gerilme çalışmalarında efektif sürtünme katsayısı (μ') 0.2'den 0.8'e kadar değişen değerlerde kullanılmıştır (King vd. 1994). King (2007) efektif sürtünme katsayısının (μ') 0.4 olarak alınmasının modelleme sonuçlarındaki hata payını %25 oranında azalttığını belirtmiştir, dolayısıyla bu çalışmada katsayı 0.4 olarak kabul edilmiştir.

Modellemelerde tarihsel depremler için (kırılan fay uzunlukları ve atım miktarları gözlenemeyen depremler) Ambraseys ve Jackson (1998)'in bölge için önerdikleri aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır,

$$\text{Log}(L) = -4.09 + 0.82M_s \quad (2)$$

$$\text{Log}(M_0) = 9.0 + 1.5M_s \quad (3)$$

Çizelge 1. Çalışmada modellenen depremler.

No	Tarih	Lokasyon	Magnitüt	Segment sayıları	Fay Uzunluk (km)	Atım (cm)	Strike	Dip	Rake
1	1822, Agu. 13 ^a	36.7-39.9	7.5	1	140	500	204	90	0
2	1866, May 12 ^a	39.2-41.0	7.2	1	45	424	226	90	0
3	1872, Nis. 3 ^a	36.4-36.5	7.2	1	34	313	217	90	0
4	1874, May 3 ^a	38.5-39.5	7.1	1	45	177	64	90	0
5	1875, Mar. 27 ^a	38.8-39.5	6.8	1	20	181	243	90	0
6	1893, Mar. 2 ^a	38.0-38.3	7.1	1	54	267	250	90	0
7	1905, Ara. 4 ^a	38.1-38.6	6.8	1	38	252	234	90	0
8	1924, Eyl. 13 ^b	40.0-42.0	6.8	1	30	110	215	80	10
9	1939, Ara. 26 ^c	39.8-39.3	7.9	Seg. 1	25	150	77	90	180
				Seg. 2	74	250	98	90	180
				Seg. 3	96	400	109	90	180
				Seg. 4	61	500	110	90	180
				Seg. 5	100	600	113	90	180
10	1949, Agu. 17 ^a	39.6-40.5	6.9	1	38	178	280	90	180
11	1966, Agu. 19 ^a	39.2-41.5	6.8	1	30	160	308	90	180
12	1971, May 22 ^a	38.9-40.5	6.8	1	38	60	43	90	0
13	1976, Kas. 24 ^d	39.1-44.0	7.2	Seg. 1	14	250	99	90	176
				Seg. 2	40	250	115	90	180
14	1983, Eki. 30 ^b	40.3-42.1	6.8	1	30	110	215	64	7
15	1992, Mar. 13 ^e	39.7-39.6	6.8	1	30	110	126	72	172
16	2003, May, 1 ^f	39.0-40.5	6.4	1	20	100	154	90	-178
17	2010, Mar., 08 ^g	38.7-40.0	6.1	1	30	110	54	80	-10
18	2011, Eki 23 ^h	38.7-43.3	7.2	1	55	350	246	46	59

^a Nalbant vd. (2002); ^b Eyidoğan ve Akinci (1999); ^c Barka (1996); ^d Utukcu (2013); ^e Grosser vd. (1998); ^f Milkereit vd. (2004); ^g Tan vd. (2011); ^h Doğan ve Karakas (2013).

Burada L , fay uzunluğu (km); W , fay genişliği (km); M_s , yüzey dalgası büyüklüğü; ve M_0 is sismik momenttir (Nm). Daha sonra atım değerleri sismik moment-atım eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır (Kanamori ve Anderson 1975),

$$U = M_0 / (L \times W \times G) \quad (4)$$

Burada u , atım miktarı (m); G , kayma modülüdür (3.0×10^{10} N/m²).

Tektonik hareketler sebebiyle alt kabuktan üst kabuğa transfer edilen seküler gerilme değişimi ise sismojenik kabuğun altına yerleştirilen ve GPS ölçümlerinden elde edilen yıllık levha hareketlerine göre hareket eden dislokasyon yüzeyleri olarak modellenmiştir (Şekil 2). Burada yapılan modelleme Gombert ve Ellis (1994) ve Stein vd. (1997) modelleme kavramlarının benzeridir. Bu modellemeye göre segmentler üzerindeki elde edilen yıllık

gerilme artışları Tablo 2' de verilmiştir. Segmentlerdeki 50 senelik ortalama gerilme artışları Doğu Anadolu Fay hattı üzerinde 2 ile 2.6 bar arasında değişmektedir.

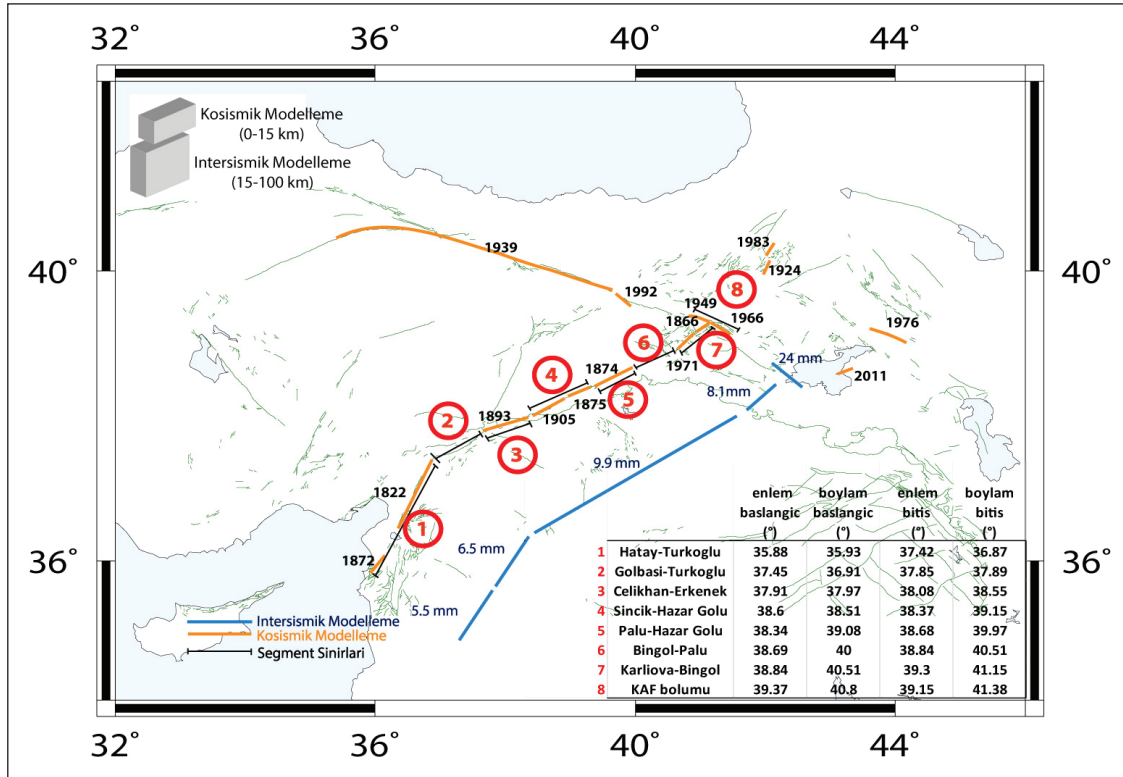
3. Bulgular

3.1 Fay Segmentlerinde Sismik Gerilme Değişimleri

Çalışmada 1822 yılı nötr (gerilme başlangıcı=0 bar) gerilme kabul edilmiş ve fay segmentlerindeki gerilme değişimleri bu tarihten itibaren hesaplanmıştır. Her ne kadar 1949 ve 1966 depremleri KAF üzerinde meydana gelmiş olsa da çalışma bölgesinde oluşturacağı kosismik gerilme değişimi, toplam gerilme analizlerini etkileyeceğinden, çalışmada yer almıştır. İncelenen 8 adet fay segmentinde hesaplanan değerler alt başlık olarak sunulmuştur. Gerilme analizlerinin sunulduğu şekillerde renklendirme lejant ile sağlanmış,

Çizelge 2. Segmentler üzerinde elde edilen intersismik gerilme artışları.

	Atım miktarı (mm/yıl)	Ortalama gerilme artışı (bar/yıl)
1. segment	6 mm/yıl	~0.04
2., 3., 4., 5., ve 6. segmentler	9 mm/yıl	~0.052
7. segment	8 mm/yıl	~0.048
8. segment (KAF segmenti)	24 mm/yıl	~0.14



Şekil 2. Gerilme analizlerinde kullanılan modelleme parametreleri.

kırmızı bölgeler gerilmenin (pozitif) arttığını, mor bölgeler gerilmenin (negatif) düşmekte olduğunu göstermektedir. Segmentlerdeki maksimum gerilme artışı ve düşüşü -70 bar ile +40 bar arasında değişmektedir. Bu sebeple Coulomb gerilme değerleri için maksimum +40 bar kırmızı, minimum -80 bar mor olarak renklendirme lejantı ile tanımlanmıştır (King 2007).

3.1.1 Hatay-Türkoğlu (HT) Segmenti

HT segmenti 200 km uzunluğuyla Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca yer alan en uzun segmenttir. Bu segmentin 140 km'lik kısmında ortalama 5 m'lik atıma sahip 1822 depremi meydana gelmiştir (Ambraseys ve Jackson 1998). Bu fayın harekete geçmesi ile birlikte DAFZ'nin güney ve kuzey uç kısımlarına doğru pozitif gerilmeler oluşmuştur. Bu depremden 50 sene sonra 1872 depremi meydana gelmiş ve bu segment üzerinde deprem döngüsü (earthquake cycle) son bulmuştur.

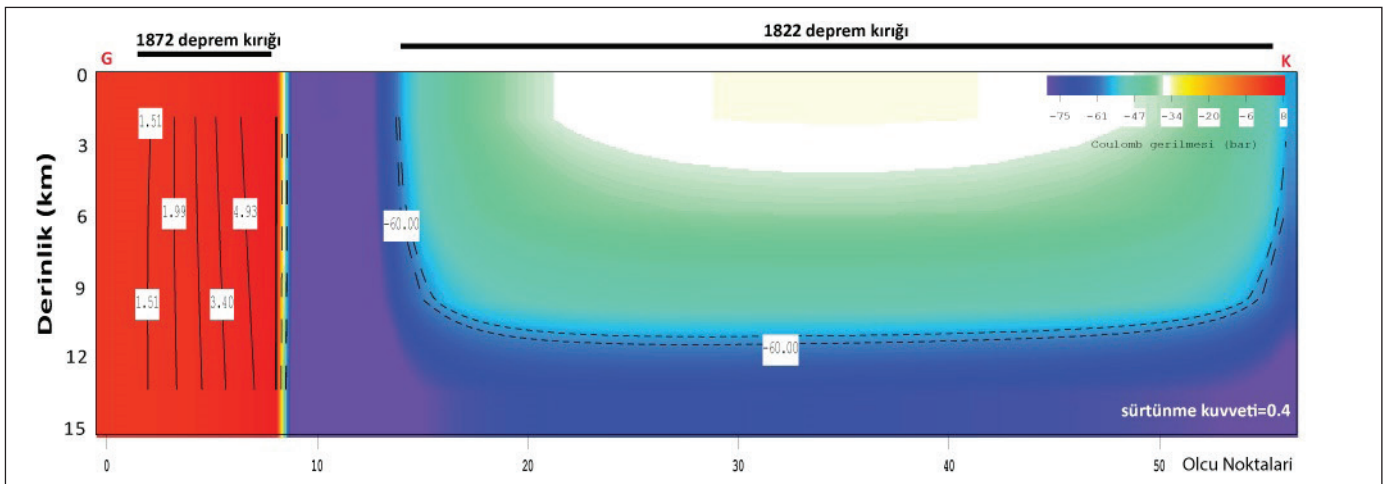
Şekil 3'te 1822 deprem kırığının 1872 deprem kırığına uyguladığı Coulomb gerilme değişim grafiği derinlik boyutunda sunulmuştur. Efektif sürtünme kuvveti (μ')'nin 0.4 olduğu durum için; 1822 depremi 1872 deprem fayı üzerinde kuzey ucuna 4.5 bar gerilme yüklerken güney ucuna 1.5 bar değerinde gerilme yüklemiştir.

Güncel durumda segment üzerinde toplam gerilme negatiftir. Buna göre, 1822 depreminin oluşturduğu maksimum gerilme -60 bar civarında, 1872 depreminin oluşturduğu gerilme değeri -40 ve -50 bar arasında değişmektedir. Seküler değişim (tektonik yüklenme) yıllık 0.04 bar ile, geçen 195 yılda (1822-2017) ortalama $\sim +7$ bar kuvveti bu segmente yüklemiştir.

3.1.2 Gölbaşı-Türkoğlu (GT) Segmenti

GT segmenti yaklaşık 100 km uzunluğundadır. Nalbant vd. (2002)'de gerilmenin arttığı iki bölgeden biri olan bu bölüm, Kahramanmaraş ve Malatya illeri sınırları içerisinde yer alan ve yüksek gerilme değerine sahip, bir anlamda deprem potansiyeli bulunan bir segmenttir. Coulomb gerilme analizlerine göre GT segmentinin güney bölümünde gerilme $\sim +16$ bar civarında değişmektedir. Bu segmente yakın oluşan 1822 depremi segmentin orta bölümlerinde gerilme değişimini $\sim +4$ bar, kuzey kısımlarda ise $\sim +7$ bar civarında arttırmıştır (Şekil 4). Seküler değişimin 0.052 bar/yıl hesaplanan bu bölümde, 195 yıl için toplam etki $\sim +9$ bar değerine ulaşmaktadır.

Stacy vd. (2005) Coulomb gerilme analizi yapılırken, gerilmenin pozitif olduğu yerlerde normal gerilmedeki değişimin de etkili olduğunu belirtmişlerdir. Coulomb gerilme hesaplamalarında normal gerilme değeri pozitif ise ($\Delta\sigma_n > 0$); normal gerilme artan tensiyon kuvveti gibi davranır. Teğetsel gerilmenin pozitif olduğu durumlarda normal gerilme değişimi pozitif ise kenetlenmeden kurtularak (unclamping) hareket gerçekleşir, normal gerilmenin negatif olduğu durumda kenet (clamp) durumu oluşur ve teğetsel gerilme değeri pozitif bile olsa muhtemel yer değiştirme oluşmayabilir. Dolayısıyla gerilme artışının olduğu yerlerde, normal gerilme değişiminin de modellenmesi gerekmektedir. GT segmentindeki gerilme artışı ile birlikte, normal gerilme değişimi de incelenmiştir. Şekil 5'te GT segmentindeki güncel gerilme değişimi verilmiştir. Buna göre segmentin orta ve güney kısımları negatif gerilme eğiliminde, bu yüzden fay segmentinin bu bölümünde teğetsel gerilmedeki artış Coulomb gerilmesine pozitif olarak yansımamakta ve kenet



Şekil 3. 1822 depreminin 1872 depremine olan Coulomb gerilme etkisi.

(clamp) durumu oluşmaktadır, bunun aksine segmentin kuzey kesimlerinde normal gerilme pozitif değer vermekte ve daha kırılğan bir model oluşturmaktadır.

3.1.3 Çelikhan-Erkenek (ÇE) Segmenti

Bu segment yaklaşık 60 km uzunluğundadır. 1893 depremi bu segmentte 54 km uzunluğundaki kırığı oluşturmuştur (Ambraseys 1989). Depremin ortalama kayma oranı 2.5 metredir. Bu segmentin güney ve kuzey uçlarında gerilme artımı oluşmuştur (Şekil 6). Bu gerilme güney uçta; +15 ile +20 bar, kuzey uçta ise; -10 ile -20 bar arasında değişmektedir. Kırılmanın meydana geldiği orta kısımda ise gerilme -40 bar civarındadır. Bu segment üzerinde seküler gerilme değişimi ~+9 bar civarındadır.

3.1.4 Sincik-Hazar Gölü (SH) Segmenti

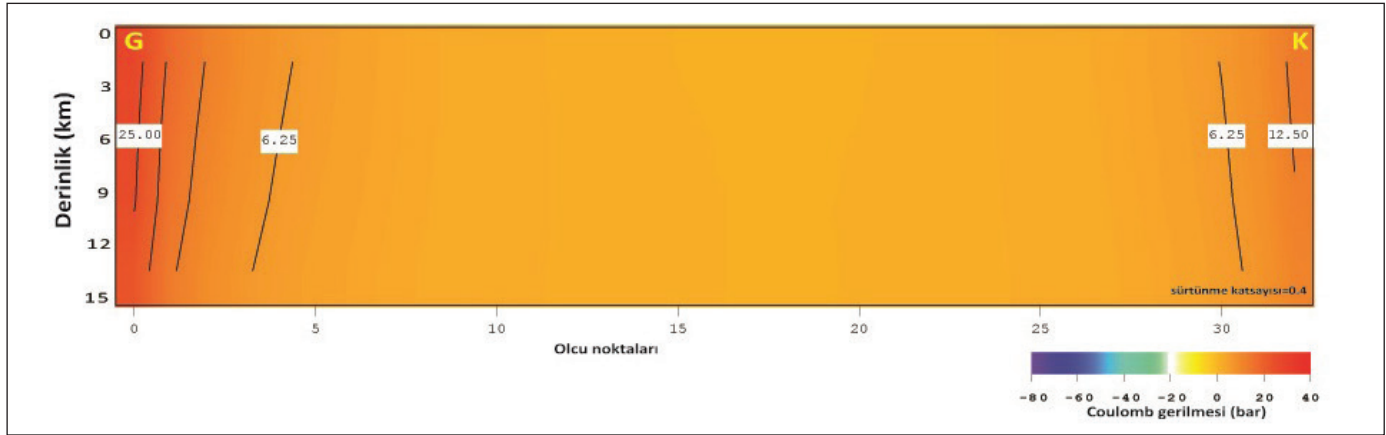
Bu segment 70 kilometre uzunluğundadır. 20 km uzunluğundaki ve ortalama 1.8 m atıma sahip 1875 depremi, yaklaşık 40 km uzunluğunda ve ortalama 2.5 m atıma sahip 1905 depremleri bu segment üzerinde meydana gelmiş-

tir (Şekil 7). Seküler gerilme artışı bu segmentte ortalama +9 bar olarak hesaplanmıştır. Segmentin 1905 depreminin meydana geldiği güney kısmında ortalama gerilme değeri -10 bar civarındadır, Bunun yanında, 1875 depreminin olduğu kuzey uçta ise gerilme değeri -30 ile -40 bar arasında değişmektedir. Her iki depremin bulunduğu orta bölümde ise gerilme değerleri -30 ile -40 bar arasında değişmektedir.

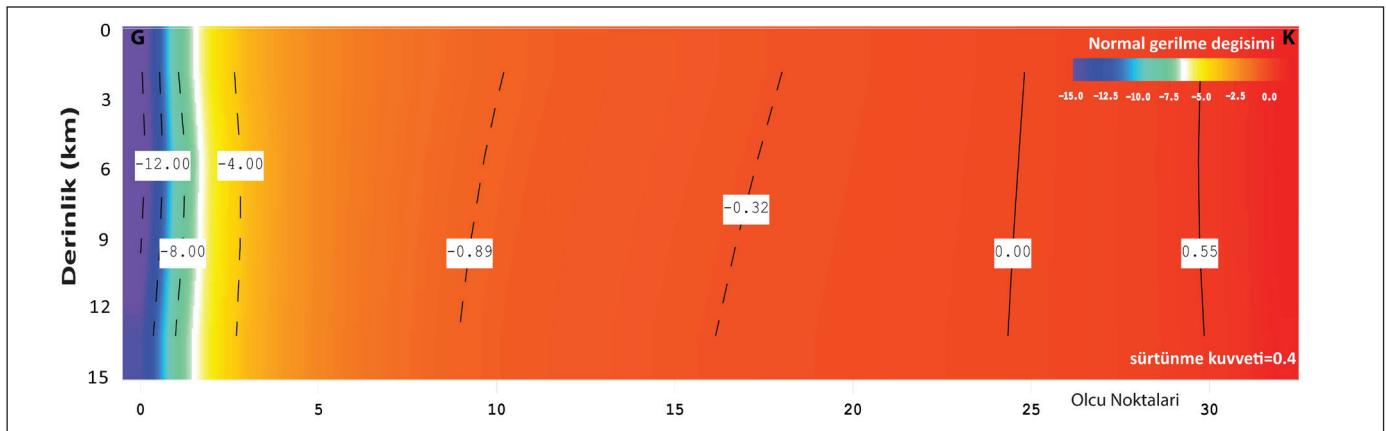
1875 depreminin, 1893 deprem kırığı üzerine 0.1 bar kuvvetinde gerilme transferi gerçekleştirirken, 1905 deprem kırığı üzerine etkisi 1.5 bar civarındadır (Şekil 8a). 1875 ile birlikte 1893 depremleri birlikte modellendiğinde, iki depremin 1905 depremi kırığına etkisi 6 bar büyüklüğündedir (Şekil 8b).

3.1.5 Palu-Hazar Gölü (PH) Segmenti

Bu segment 80 km uzunluğundadır. 45 km uzunluğundaki 1874 kırığı bu segment üzerinde bulunmaktadır (Ambraseys 1989). Bu segmentin kuzey kısmında ise 8 Mart 2010 tarihinde Elazığ-Kovancılar mevkiinde meydana gelen



Şekil 4. Gölbaşı-Türköğlü segmenti üzerinde kosmik Coulomb gerilme değişimi.



Şekil 5. Gölbaşı-Türköğlü segmenti üzerinde kosmik normal gerilme ($\Delta\sigma_n$) değişimi.

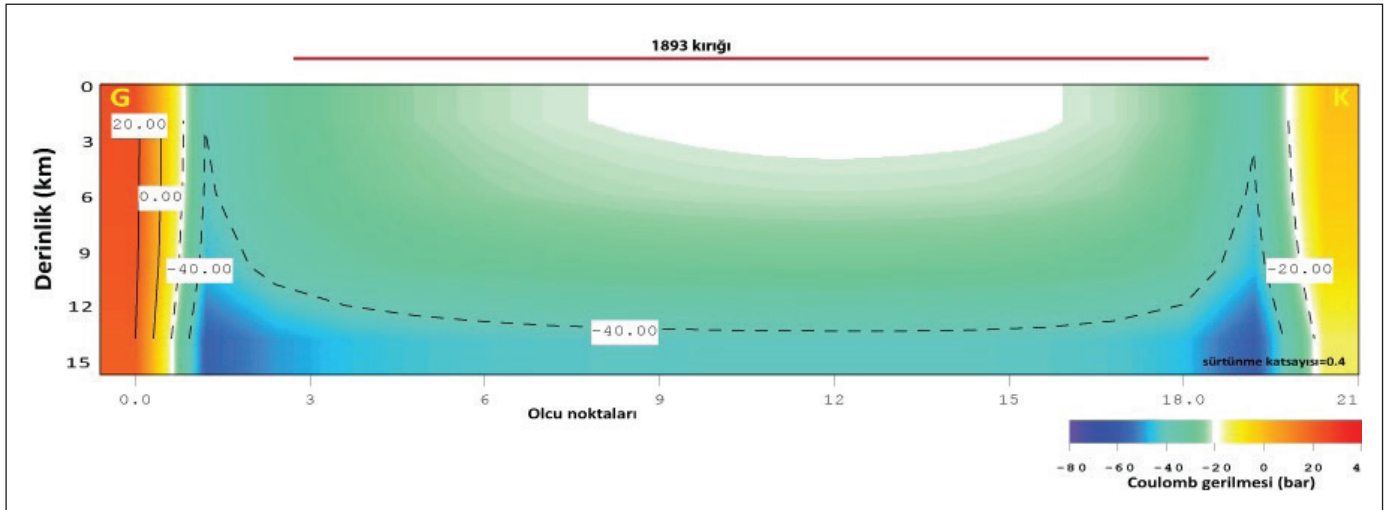
Mw=6.1 büyüklüğünde deprem episentri yer almaktadır (Tan vd. 2011). Bu segment üzerinde seküler gerilme değişimi +9 bar civarındadır. Segmentin orta ve güney bölümlerinde gerilme -40 bar civarındadır. Segment üzerinde kuzeye hareketle gerilme pozitif değerler vermeye başlamaktadır. 2010 yılına kadar oluşan gerilme Şekil 9'da sunulmuştur. 2010 depreminden sonra bu segmentte gerilme negatif değerdedir.

3.1.6 Bingöl -Palu (BP) ve Karlıova-Bingöl (KB) Segmentleri

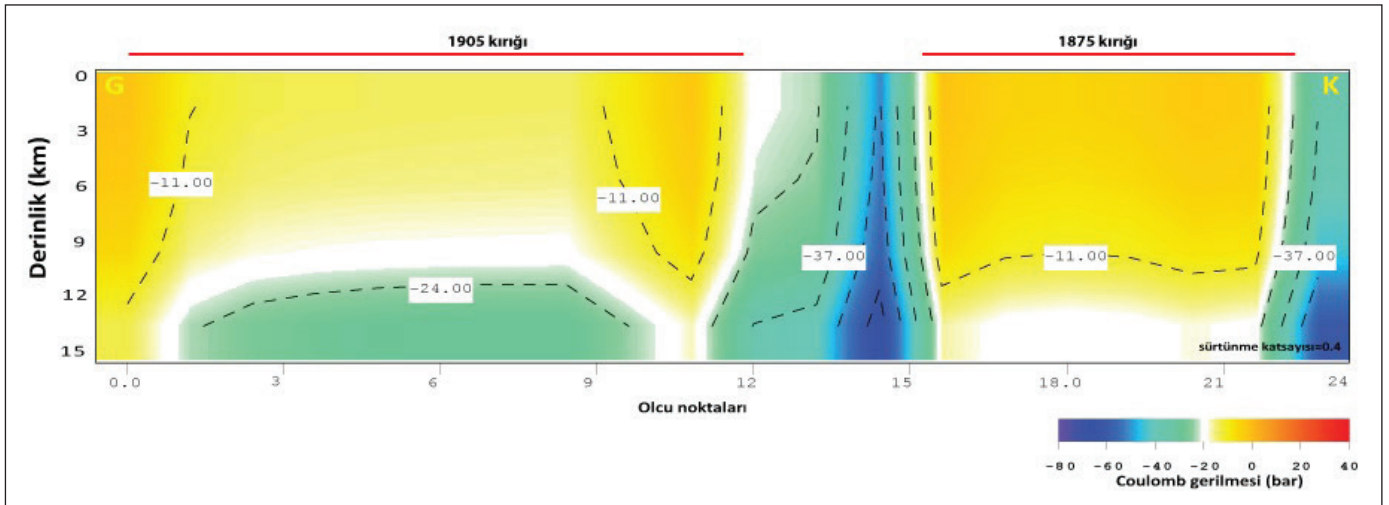
Bingöl-Palu segmenti 55 km uzunluğundadır. 2010 Elazığ deprem kırığının kuzey kısmının oluştuğu segmenttir. Nalbant vd. (2002)'de gerilme artımının hesaplandığı bir diğer bölge bu kısımda yer alır. Bu segmentte seküler geril-

meden dolayı artan gerilme ortalama +9 bar civarındadır. Bu segmentin kuzey kolu, güneye göre gerilme alanı yüksek kısımda yer alır.

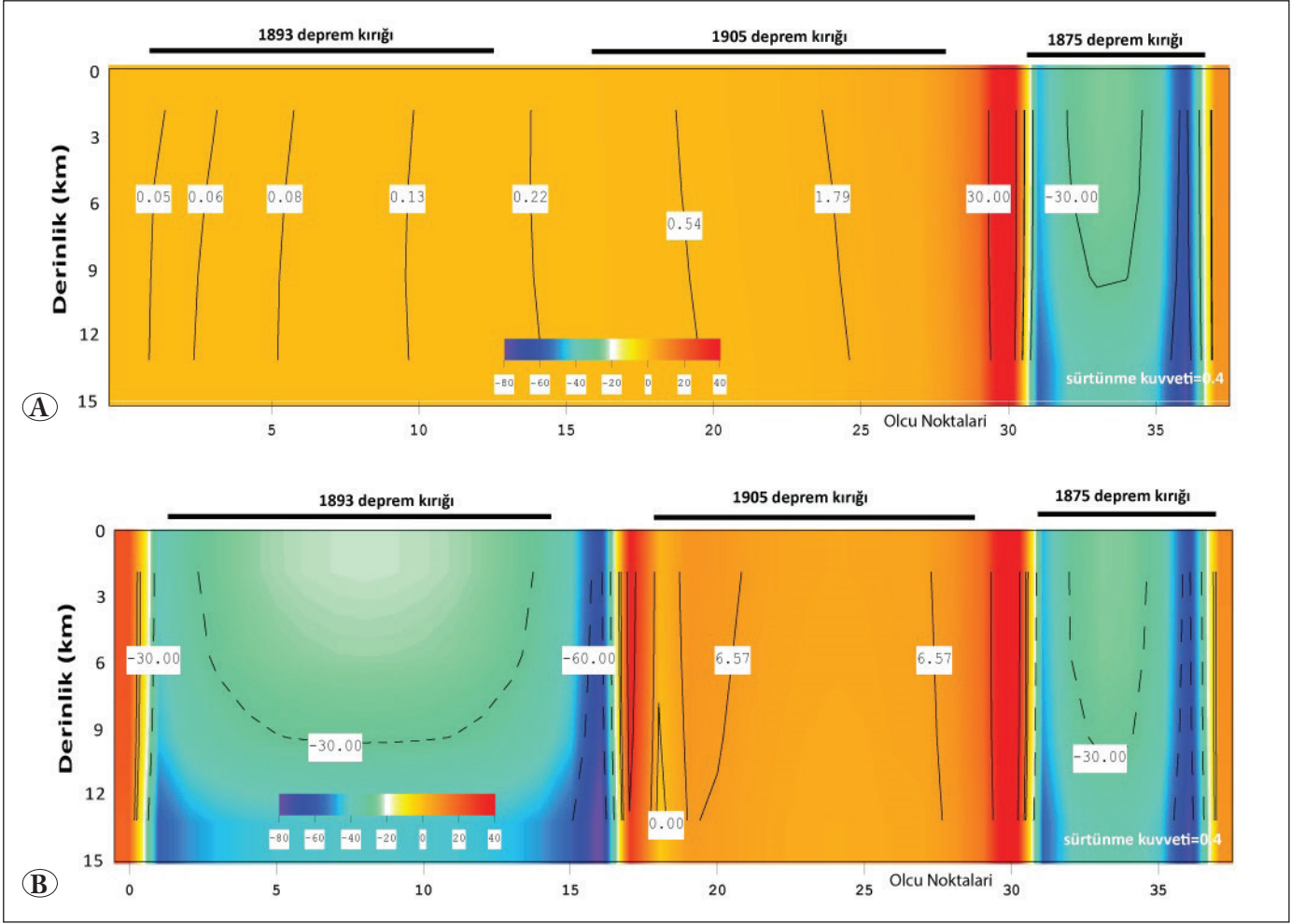
Karlıova-Bingöl segmenti 60 km uzunluğundadır. 45 km uzunluğundaki 1866 depremi 4.2 metre atım ile bu segmentin orta-kuzey bölümünde yer almaktadır. Güney uçta ise 1971 Bingöl depreminin orta-kuzey kısmı bulunmaktadır. 1866 kırığının bulunduğu bölümlerde gerilme -20 ile -45 bar arasında değişirken, gerilmenin arttığı güney bölümde ortalama gerilme artışı +0.2 bar civarındadır (Şekil 10). Bu kısım Reilinger vd. (2006)'da belirtilen ortalama 8 mm/yıl levha hareketine sahiptir. Buna göre gerilme artışı 0.048 bar/yıl ile, toplamda ~+9 bar civarında seküler gerilme artışı gözlemlenen segmenttir.



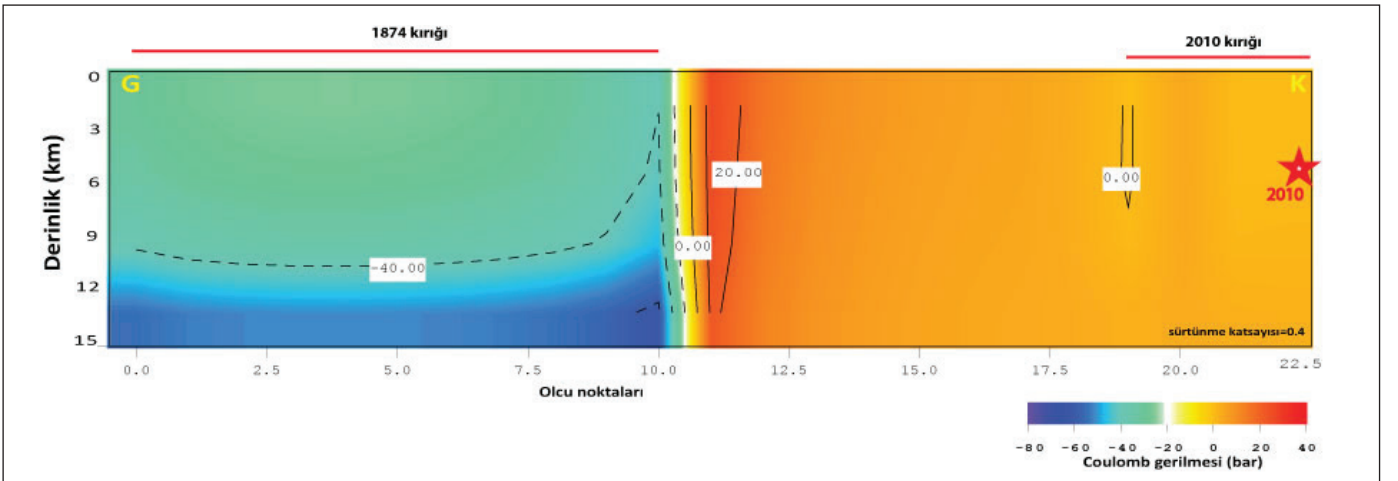
Şekil 6. Çelikhan-Erkenek segmenti üzerinde kosismik Coulomb gerilme değişimi.



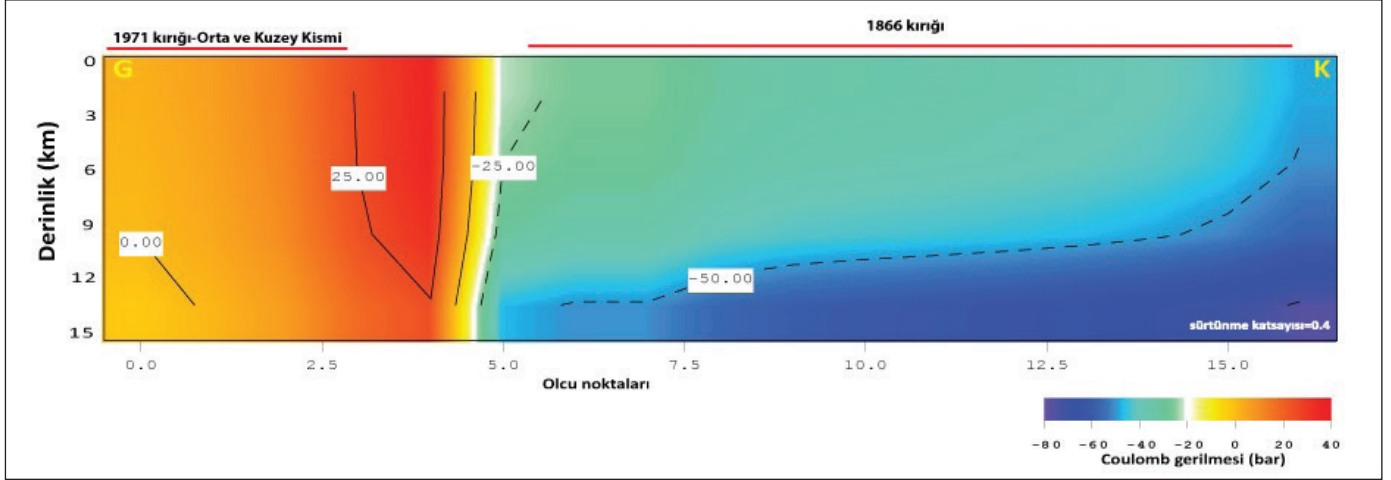
Şekil 7. Sincik-Hazar Gölü segmenti üzerinde kosismik Coulomb gerilme değişimi.



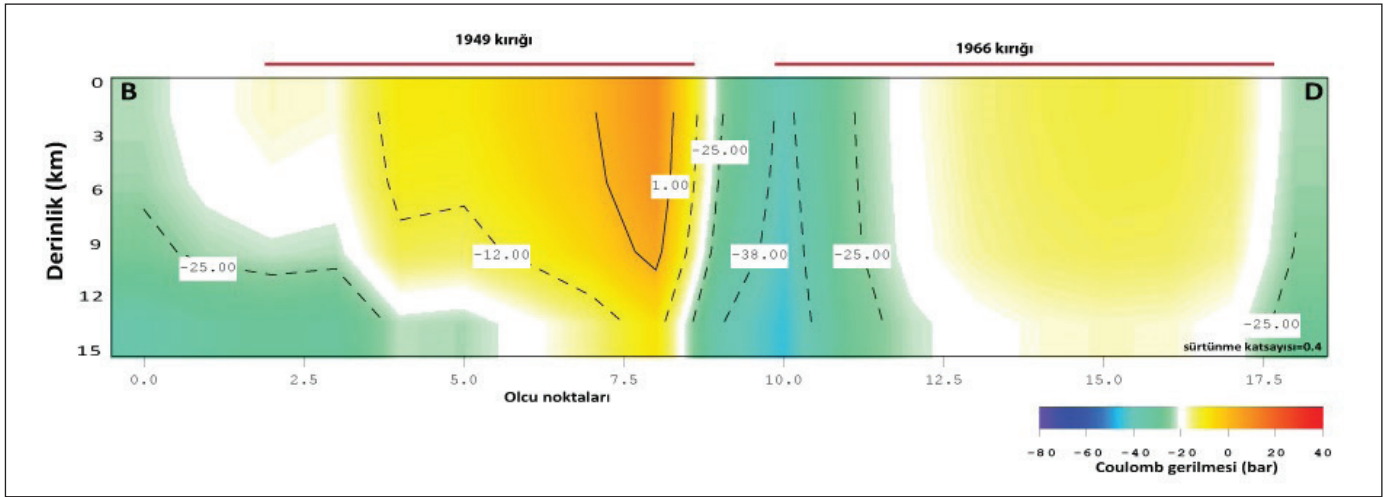
Şekil 8. Sincik-Hazar Gölü segmenti üzerinde kosismik Coulomb gerilme değişimi A) 1875 yılında oluşan deprem sonrası gerilme değişimi B) 1893 yılında oluşan deprem sonrası gerilme değişimi.



Şekil 9. Çalışma alanında 2010 yılına kadar oluşan Coulomb gerilme transferi.



Şekil 10. 1866 depreminin 1971 depremine Coulomb gerilme transferi.



Şekil 11. Çalışma kapsamında değerlendirilen 1949 ve 1966 depremleri Coulomb gerilme analizi.

3.1.7 Kuzey Anadolu Fay (KAF) Segmenti

Bu segment 70 km uzunluğuna sahip olup KAFZ üzerinde yer alır ve sağ yanal doğrultu atımlı fay mekanizmalarından oluşur. Stein vd. (1997) bu fay zonu üzerinde detaylı Coulomb gerilme çalışması yapmıştır. Bu çalışmada da yer alan 1939 depreminin bu bölgede oluşan 1949 depremini +1 bara kadar tetiklediğini belirtmiştir, 1949 depreminin oluşmasıyla da 1966 depremi +2 bara kadar tetiklendiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada KAF üzerinde yer alan 1939 ve 1992 depremlerinin çalışma bölgesinin kuzey kısımlarına etki edeceği düşünülerek gerilme değişimleri hesaplamalarında modele dahil edilmiştir.

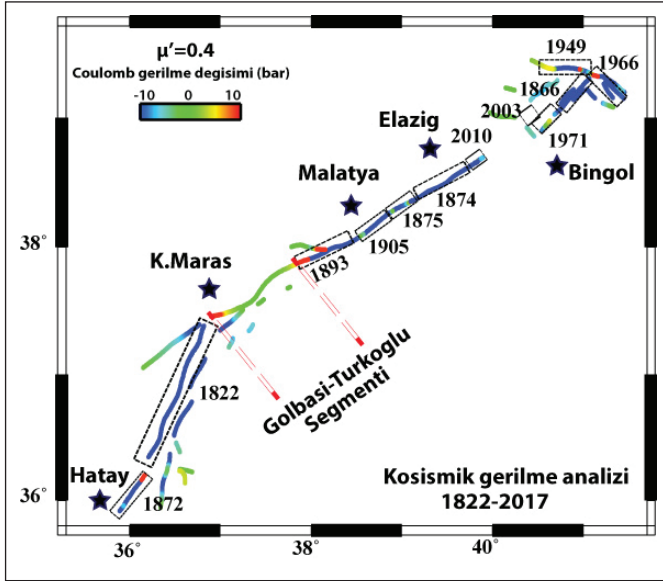
KAF segmentinin en doğu kısmı ile ilgili gerilme analizi Şekil 11'de sunulmuştur. Bu segment üzerinde meydana gelen 1949 ve 1966 depremleri, segment boyunca gerilme

boşalması meydana getirmişlerdir. 1949 kırığının olduğu batı bölümünde gerilme -20 bar civarındadır. 1966 depreminin olduğu doğu bölümünde ise gerilme -25 bar civarındadır. Segmentin orta bölümlerinde gerilme değeri -40 bara kadar düşerek DAF Zonu ile Karlıova kısmında birleşim oluşturmaktadır.

4. Tartışma

1822 yılından günümüze Doğu Anadolu Fay Hattı boyunca incelenen segmentlerde meydana gelen gerilme değişimleri incelendiğinde, Gölbaşı-Türkoğlu segmenti üzerinde kosismik ve intersismik periyoda ait modele dayalı gerilmenin artış gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 12).

Anadolu levhası üzerinde daha önce yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde; 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi



Şekil 12. Çalışma kapsamında modellenen depremlerin DAF hattı boyunca oluşturdukları toplam kosismik Coulomb gerilme analizi; bölgede bulunan önemli yerleşim yerleri yıldız işareti ile belirtilmiştir.

Coulomb gerilme değerinin 1 ila 2 bar arasında arttığı bir alanda olduğu Stein vd. (1997) tarafından tespit edilmiştir. Kocaeli depreminin, 12 Kasım Düzce depremine etkisinin 1 ila 2 bar arası olduğu ve KAF'ın İstanbul tarafı koluna ise 0.5 ila 5 bar arası etki ettiği belirtilmiştir (Parsons vd. 2000). Bu bağlamda DAF hattı boyunca elde edilen gerilme analizlerine göre Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde 6 bar'a kadar bir yüklem olduğundan bahsedilebilir. Tarihsel deprem kayıtları bu bölgede 1114 ve 1513 yıllarında meydana gelen ve magnitüdüleri 7.4'ten büyük iki depremi rapor etmiştir (Ambraseys 1989). Dolayısıyla bu geçen süre zarfında DAFZ'ın bu bölümünde önemli bir gerilme birikiminin olduğu söylenebilir. Kullanılan Coulomb gerilme metodu her ne kadar dünya üzerinde bulunan birçok önemli fay hatlarında başarılı bir şekilde uygulansa da, bazı sınırlamaları da mevcuttur. Analizler modele dayalı olduğundan, geçmiş depremlere ait verilerin hassasiyeti, sürtünme kuvvetinin değişimleri ve deprem sonunda meydana gelebilecek post-sismik periyota ait gerilme değişimleri bu fay segmentleri üzerinde yapılan analizlere etki edebilir. Ayrıca analizlerin güvenilirliğinin artırılması amacıyla modelde kullanılan tarihsel depremlerdeki epicentr ve kırılma mesafeleri paleosismolojik verilerle desteklenmeli, segmentlerdeki gerilme analizleri jeodetik verileri ile de korele edilmelidir.

Modelleme sonuçları DAF hattı boyunca oluşan depremlerin birbirleri ile ilişkili olduğunu, önceden oluşan bir depremin,

bir sonra oluşan depreme etki ettiğini göstermiştir. Elde edilen bu veriler, daha önce Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yapılan gerilme analizi çalışmaları ile uyumludur (Nalbant vd. 1998, Stein vd. 1997, Lorenzo-Martin vd. 2006). Son iki yüzyıldaki kosismik ve intersismik gerilme analizlerinden elde edilen bulgulara göre Kahramanmaraş ve Malatya illeri arasında yer alan Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde Coulomb gerilme değeri (intersismik+kosismik) ortalama ~15 bar civarındadır. Bu değer Parsons vd. (2000)'de belirtilen bir depremin diğer depremi tetiklemesi için gerekli eşik değeri olan 1 bar değerinden yüksektir. Dolayısıyla bu segmentin mutlaka daha detaylı farklı gerilme analizleri ile araştırılması gerekmektedir.

Gerilmede gözlemlenen çok küçük artışlar ($\Delta\sigma < 0.1$ bar), komşu hedef fay üzerindeki gerilme artışı fayın kırılma noktasına yaklaşmış ise, onu harekete geçirebilir. Bu yüzden deprem tetikleme çalışmalarında elde edilen çok küçük gerilme artışları da deprem kestirimi çalışmalarında önem arz etmektedir. Stein vd. (1992) San Andreas fayı üzerinde yaptıkları çalışmalarında levha hareketleri ile 1 bar'lık (0.1 MPa) yüklemenin oluşması için 10 yıl geçmesi gerektiğini belirtmiştir. Stein vd. (1997) çalışmalarında ise 0.3 bar ila 3 bar gerilme artımının Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerindeki bir depremin oluş periyodunu 3 ila 30 yıl öncesine çektiğini belirtmişlerdir. Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde hesaplanan gerilme değeri bu kapsamda değerlendirilebilir.

Daha önce Nalbant vd. (2002)'de gerilme artışının tespit edildiği Bingöl-Palu ve Karlıova-Bingöl segmentlerini içine alan bölgede meydana gelen 2003 Bingöl ve 2010 Elazığ depremleri bu segmentler üzerinde oluşan gerilmeyi kısmen boşaltmıştır. Bu segmentlere daha yakın konumda olan 1924, 1939, 1976, 1983, 1992, 2011 depremleri DAF hattında $\Delta\sigma_f < 0.1$ bar değerinde gerilme değişimi oluşturmuşlardır. Dolayısıyla etkileri kosismik ve intersismik dönemde ele alınan diğer 12 depremden hayli düşüktür.

5. Sonuç

Bu çalışmada Doğu Anadolu Fay Hattı'nda oluşabilecek gerilme dağılımlarını tespit edilmesi amacıyla Hatay-Türkoğlu segmentinde meydana gelen 1822 depremi sıfır gerilme başlangıcı kabul edilerek, son iki yüzyıl içerisinde oluşan 18 adet deprem modellenmiş ve depremlerin birbirleri ile olan oluşum ilişkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen depremlerden altı tanesi (1924, 1939, 1976, 1983, 1992 ve 2011) DAF hattına 0.1 bar'dan küçük değerlerde kosismik yüklem yapmıştır. Bunların dışında kalan 12 adet deprem birbirleri ile doğrudan ilişkili olarak

deprem tetiklemelerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Güncel gerilme dağılımına bakıldığında Bingöl-Palu ve Palu-Hazar gölü segmentleri, 2003 Bingöl ve 2010 Elazığ depremlerinden sonra, kısmen deprem riski taşımadığı tespit edilmiştir. İncelenen 195 yıllık zaman dilimi içerisinde Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde gerilme artmış ve deprem tehlikesini doğurmuştur. Intersismik ve kosismik gerilme birlikte değerlendirildiğinde Gölbaşı-Türkoğlu segmentinde gerilme artışı ~15 bar değerine ulaşmıştır.

Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) Kahramanmaraş ve Malatya'nın çok yakınlarından geçen önemli ve aktif bir fay zonedir. Bölgenin depremselliğine bakıldığında küçük ve orta büyüklükte depremler bu bölgeyi uyarsa da, bu yüz yılda çok büyük bir deprem meydana gelmemiştir. Ancak tarihsel kayıtlar bunun yanıltıcı olduğunu ve Kahramanmaraş ile Malatya arasında kalan bölgede birisi 1114, diğeri 1513 yıllarında olmak üzere iki büyük depremin (magnitüdüleri 7.4'ten daha büyük) meydana geldiğini ve bu geçen süre zarfında DAFZ'ın bu bölümünde önemli bir gerilme birikiminin oluştuğunu göstermektedir. Elde edilen veriler gelecekte DAFZ üzerinde olabilecek büyük bir depremin bu bölümünde olma olasılığının en yüksek olduğu işaret etmektedir. Dolayısıyla, depreme hazırlıklı olmak ve uzun vadede planlamaya gidilmesi gerekmektedir. Bu riskin varlığını kabul ederek yeni yapılaşmayı yüksek standartlara uygun (7.5 büyüklüğünde bir depreme dayanabilecek şekilde) tutarak ve çoğu kırsal kesimde bulunan düşük kaliteli yapıların bölge ihtiyaçları da göz önünde bulundurularak ayrıca değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

6. Kaynaklar

- Ambraseys, NN. 1989.** Temporary seismic quiescence: SE Turkey. *Geophys. J. Int.*, 96: 311- 331.
- Ambraseys, NN., Melville, CP. 1995.** Historical evidence of faulting in Eastern Anatolia and Northern Syria. *Ann. Geofis.*, 38: 337-344.
- Ambraseys, NN., Jackson, JA. 1998.** Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophys. J. Int.*, 133: 390-406.
- Arpat, E., Saroglu, F. 1972.** The East Anatolian Fault System: thoughts on its development. *Bull. Miner. Res. Explor. Ins. Turk.*, 78: 33-39.
- Barka, AA., Kadinsky-Cade, K. 1988.** Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonophysics*, 7: 663 – 684.
- Barka, A. 1996.** Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86: 1238-1254.
- Cocco, M., Rice, J. 2002.** Pore pressure and poroelasticity effects in Coulomb stress analysis of earthquake interactions. *J. Geoph., Res.*, 107:1-17.
- Dogan, BA., Karakas, 2013.** Geometry of co-seismic surface ruptures and tectonic meaning of the 23 October 2011 M w 7.1 Van earthquake (East Anatolian Region, Turkey). *J. Struct. Geol.*, 46: 99-114.
- Eyidoğan, H., Akinci, A. 1999.** Site Attenuation and source parameters on the North Anatolian Fault zone, eastern Turkey estimated from the aftershocks of 13 March 1992 Erzincan earthquake. *J. Seismol.*, 3: 363-373.
- Freed, A., Syed, T., Burgmann, R. 2007.** Evolution of stress southern California for the past 200 years from coseismic, postseismic and interseismic processes. *Geop. Jour. Int.*, 169: 1164-1179.
- Gomberg, J., Ellis, MA. 1994.** Topography and tectonics of the New Madrid seismic zone: Results of numerical experiments using a three-dimensional boundary element program. *J. Geophys. Res.*, 99: 20299-20310.
- Grosser, H., Baumbach, M., Berckhemer, H., Baier, B., Karahan, A., Schelle, H., Kruger, F., Paulat, A., Michel, G., Demirtas, R., Gencoglu, S., Yılmaz, R. 1998.** The Erzincan (Turkey) earthquake (Ms=6.8) of March 13, 1992, and its aftershock sequence. *Pure Appl. Geophys.*, 152: 465–505.
- Hubert-Ferrari, A., Armijo, R., King, GCP., Meyer, B., Barka, A. 2002.** Morphology, displacement and slip rates along the North Anatolian Fault, Turkey. *J. Geophys. Res.*, 107: 2156-2202.
- Kanamori, H., Anderson, DL. 1975.** Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65: 1073-1095.
- King, GCP., Stein, R., Lin, J. 1994.** Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84: 935–953.
- King, GCP. 2007.** Fault interaction, earthquake stress changes, and the evolution of seismicity. *Treatis. Geophys.*, 4: 225-255.
- Lorenzo Martin, R. 2006.** Time dependent crustal deformation after strong earthquakes-rheological model calculations, *PhD thesis*, Ruhr University.
- McCloskey, J., Nalbant, SS., Steacy, S. 2005.** Indonesian earthquake: Earthquake risk from co-seismic stress. *Nature*, 434: 291.
- McKenzie, DP. 1976.** The East Anatolian fault: a major structure in eastern Turkey. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 29: 189–193.

- Milkereit, C. 2004.** Implications of the 2003 Bingol earthquake for the interaction between the North and East Anatolian faults. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94: 2400–2406.
- Nalbant, SS., Hubert, A., King, GCP. 1998.** Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea. *J. Geophys. Res.*, 103: 24469–24486.
- Nalbant, SS., McCloskey, J., Steacy, S., Barka, A. 2002.** Stress accumulation and increased seismic risk in Eastern Turkey. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195: 291–298.
- Nostro, C., Cocco, M., Belardinelli, M. 1997.** Static stress changes in extensional regimes: An application to southern Apennines (Italy). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87: 234–248.
- Okada, Y. 1992.** Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82: 1018–1040.
- Parsons, T., Toda, S., Stein, RS., Barka, A., Dieterich, JH. 2000.** Heightened odds of large earthquakes near Istanbul: an interaction-based probability calculation. *Science*, 288: 661–66.
- Pollitz, FF., Sacks, IS. 2002.** Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by transient deformation following the 1992 Landers earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92: 1487–1496.
- Reasenber, PA., Simpson, RW. 1992.** Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255: 1687–1690.
- Reilinger, R., McClusky S., Vernant, P. 2006.** GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *J. Geophys. Res.*, 111: B05411, doi: 10.1029/2005JB004051.
- Steacy, S., Gomberg, J., Cocco, M. 2005.** Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering and time-dependant seismic hazard. *Journal of Geophysical Research*, 110: doi: 10.1029/2005JB003692.
- Stein, R., King, GC., Lin, J. 1992.** Change in failure stress on the southern San Andreas Fault system caused by the 1992 M: 7.4 Landers earthquake. *Science*, 258: 1328–1332.
- Stein, RS., Barka A., Dieterich, JH. 1997.** Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 128: 594–604.
- Şaroglu, F., Emre, Ö., Kuşcu, İ. 1992.** The East Anatolian fault zone of Turkey. *Annal. Tecton.*, 6: 99–125.
- Şengör, AMC., Yılmaz, Y. 1981.** Tethyan evolution of Turkey, a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75: 181–241.
- Tan, O., Pabuccu Z., Tapirdamaz C., Inan, S., Ergintav, S., Eyidogan, H., Aksoy, E., Kuluozturk, F. 2011.** Aftershock study and seismotectonic implications of the 8 March 2010 Kovancılar (Elazığ, Turkey) earthquake (MW = 6.1). *Geoph. Res. Lett.*, 38: L11304, doi:10.1029/2011GL047702.
- Utkucu, M. 2013.** 23 October 2011 Van, Eastern Anatolia, earthquake (Mw=7.1) and seismotectonics of Lake Van area. *J. Seismol.*, 17: 783–805.
- Vergnolle, M., Pollitz, F., Calais, E. 2003.** Constraints on the viscosity of the continental crust and mantle from GPS measurements and postseismic deformation models in western Mongolia. *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2002JB002374.