*2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*
*25-27 Eylül 2013 – MKÜ – HATAY*

# DOĞU MARMARA BÖLGESİNİN SİSMİK TEHLİKE DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİSMİK KAYNAK MODELİ: KUZEY ANADOLU FAY SİSTEMİ SEGMANLARINA DAİR BİR UYGULAMA

**S. Cambazoğlu[1], H. Akgün[1] ve M.K. Koçkar[2]**

[1]*Jeoteknoloji Birimi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06531, Ankara, Türkiye*
[2]*Deprem Mühendisiliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*

*Email: e129007@metu.edu.tr*

**ÖZET:**

Kuzey Anadolu Fay Sistemi (Zonu) (KAFZ) en son gerçekleşen 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinin yaşandığı, dünyadaki en önemli aktif fay sistemlerinden biridir. Yaşanan yıkıcı depremler bilim camiasının dikkatini bu fay sistemine ve özellikle de Doğu Marmara Bölgesine çekmiştir. Karadeniz kıyısına paralel devam eden KAFZ'nin ana kolunun Doğu Marmara Bölgesinde karmaşık bir geometriye sahip olarak çeşitli dallara ayrılması ile fay zonu bölgede nispeten kompleks bir segmentasyona sahiptir ve Marmara Denizi'nin alyında da farklı dallara ayrılarak batıya doğru devam etmektedir. Bu bölgede gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar sonucunda bir çok fay ve fay segmantasyonu yorumu ortaya çıkmıştır. Bu çalışma fay segmentasyonuna dair literatür çalışmalarını bölgesel ölçekte bir araya getirmeyi amaçlamaktadır ve KAFZ'nin Doğu Marmara Bölgesindeki karasal segmanları ile bunları denize doğru bilinen uzanımlarına odaklanmaktadır (yani, Kocaeli Deprem Kırığının denize doğru devamı vb.). Farklı ölçeklerde, farklı amaçlarla hazırlanmış ve dolayısı ile farklı fay segmantasyonlarına sahip bir çok literatür kaynağı ile karşılaştırmak amacı ile ASTER uydu görüntülerinden kapsamlı bir çizgisellik çıkarımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir sismik tehlike değerlendirilmesinde çizgisel kaynak modeli olarak kullanılabilmesi amacı ile segmantasyon, fay uzunlukları, derinlikleri ve kayma hızı bilgilerini içeren bir sismik kaynak modeli oluşturulmuştur. Bu modelin uygulanabilirliğinin kontrol edilmesi amacı ile Düzce şehir merkezi için segman-kaynak-senaryo ilişkisi ve deprem kataloğu bazlı depremsellik kullanılarak bir olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Sismik kaynak modellemesi, KAFZ, Çizgisel kaynak, Olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi, Düzce, Doğu Marmara

## 1. GİRİŞ

Kuzey Anadolu Fay Sistemi (Zonu) 1939 Erzincan depremi ile başlayan ve en son 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinin yaşandığı genel olarak batıya doğru ilerleyen bir sismik faaliyete sahip dünyadaki en önemli yanal atımlı fay sistemlerinden biridir. NAFZ bu dönemde ondan fazla yıkıcı deprem üretmiş ve 50.000'den fazla can kaybı yaşanmıştır (Barka, 1996; MTA, 2003a; MTA, 2003b). 40.00 - 41.20 boylam ve 28.55 - 33.75 enlemleri arasında bulunan ve Doğu Marmara Bölgesi ile Batı Karadeniz Bölgesinin bir kısmını kapsayan çalışma alanı depremsellik açısından kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Ancak bölge için hazırlanan aktif fay haritaları farklı ölçeklere sahiptir ve bu nedenle KAFZ için farklı aktif fay ve segmantasyon modelleri söz konusudur. Olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi (OSTD) çalışmalarının uygulanması üç temel bileşeni gerektirir; 1) Sismik kaynak modeli, 2) Deprem kataloğu ve 3) Yer hareketi tahmin denklemleri (Cornell, 1968). Güvenilir ve uygulanabilir bir sismik kaynak modelinin oluşturulması OSTD çalışmaları için çok önemlidir.

Bu amaçla, 10 adet ASTER (Advanced Spacebore Thermal Emission and Reflection Radiometer - Gelişmiş Uzay Termal Emiston ve Yansıma Radyometresi) uydu görüntüsü analiz edilmiş ve çizgisellikler çıkarılmıştır (Cambazoğlu vd., 2012). Çıkarılan çizgisellikler, yakın zamanda MTA tarafından hazırlanan aktif fay haritası da dahil olmak üzere (Emre vd., 2011) literatürden alınan ve sayısallaştırılan haritalar ile karşılaştırılmış ve OSTD için bir sismik kaynak modeli oluşturulmuştur. Toplam altı sismik kaynak bölgesi belirlenmiş ve bunlar Kandilli Rasathanesi, Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından hazırlanan deprem kataloğu (KRDAE, 2011) kullanılarak depremsellik yönünden incelenmiştir. Her segmanın kayma dalgası hızları ve derinlikleri literatür araştırması sonucu belirlenmiştir. Ardından Youngs ve Coppersmith (1985) karakteristik model baz alınarak bu sismik kaynak bölgeleri için kaynak-segman-senaryo ilişkileri (SF Bay WG Report, 2003) belirlenmiştir. Son olarak 50 yıl için %10 aşılma olasılığı ile dört farklı yer hareketi tahmin modelleri için (YHTM) Abrahamson ve Silva 2008 (AS08), Boore ve Atkinson, 2008 (BA08), Campbell ve Bozorgnia, 2008 (CB08), Chiou ve Youngs, 2008 (CY08) geliştirilen sismik kaynak modeli kullanılarak bir olasılıksal sismik tehlike analizi gerçekleştirilmiştir. OSTD analizleri farklı fay segmantasyonlarını göz önünde bulundurmak amacı ile Düzce sismik kaynağı için iki farklı segmantasyon modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 2. SİSMİK KAYNAK MODELİ HAZIRLANMASI

Olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi (OSTD) çalışmalarının uygulanması üç temel bileşeni gerektirir; 1) Sismik kaynak modeli, 2) Deprem kataloğu ve 3) Yer hareketi tahmin denklemleri (Cornell, 1968). 40.00 - 41.20 boylam ve 28.55 - 33.75 enlemleri arasında bulunan ve Doğu Marmara Bölgesi ile Batı Karadeniz Bölgesinin bir kısmını kapsayan çalışma alanında sismik kaynak modeli geometrileri ASTER uydu görüntüleri ve literatür kullanılarak belirlenmiştir. Arazi çalışmaları veya literatür ile karşılaştırılarak gerçekleştirildiğinde uydu görüntülerinden çizgisellik çıkarımı fay (veya olası fay) yerlerinin belirlenmesi için etkili bir yöntemdir (Gupta, 2003; Koç, 2005; Sarp, 2005). Çizgiselliklerin elde edilmesinde yine ASTER görüntülerinden elde edilen nispeten yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) de ayrıca kullanılmıştır.

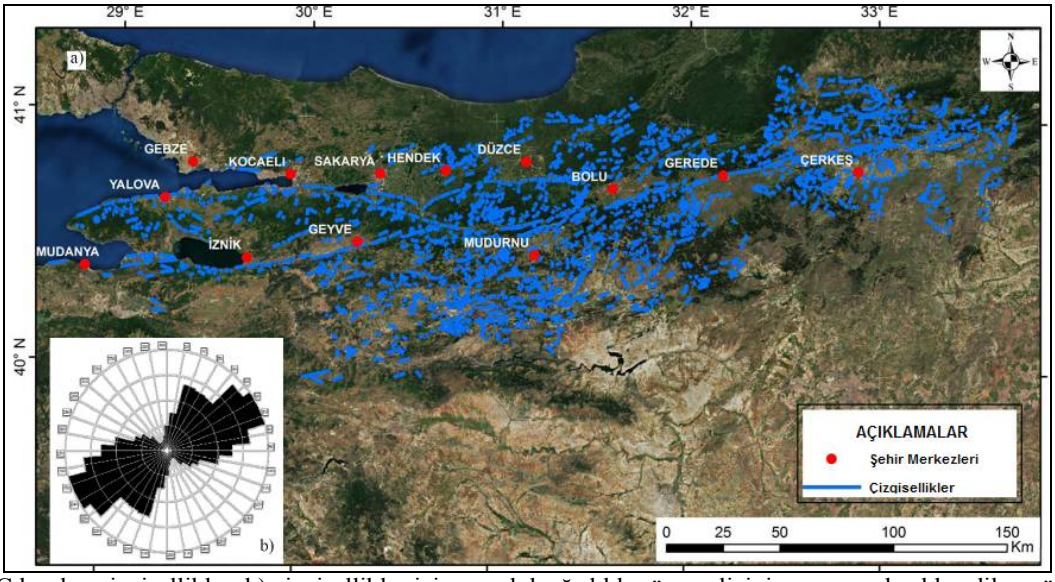
Çizgisellik çıkarımı, ASTER görüntülerinin 14 farklı spektral bandındaki bilgilerin bir araya getirilip düşük gürültü seviyesi ile üç banda düşürülerek Kırmızı, Yeşil ve Mavi (KYM) kompozitleri olarak görselleştirilmesini sağlayan Temel Bileşenler Analizi kullanılarak manüel olarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle bir ASTER görüntüsündeki verinin tamamının en az %97.8' i kullanılarak ilişkili olmayan bantlardaki bilgiler bir araya getirilmiştir. Görüntünün 3B olarak görselleştirilmesi için bu renk kompozitleri SYMlerinin üzerine konmuştur. Ortalama 1984 m uzunluğa sahip toplam 2454 çizgisellik çıkarılmış (Şekil 1) ve bunlar altı sismik kaynak göz önünde bulundurularak literatür ile karşılaştırılmıştır.

Bu sismik kaynaklar: 1) Hendek Fayı da dahil edilerek 1999 Kocaeli Depremi Kırık Zonu, 2) 1999 Düzce Depremi Kırık Zonu, 3) 1967 Mudurnu ve 1957 Abant Depremlerinin Kırık Zonu ile bunların Batı Devamları, 4) Geyve-İznik Fayı, 5) 1944 Bolu Depremi Kırık Zonu ve 6) Çınarcık Fayı'dır. Emre vd. (2011) tarafından deniz altında bir segman olarak önerilen Çınarcık Fayı dışındaki bu sismik kaynakların tamamı ayrıntılı bir şekilde literatür ile karşılaştırılmıştır (Ambraseys ve Zatopek, 1969; Ketin, 1969; Ambraseys, 1970; Öztürk vd., 1985; Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Barka, 1992; Şaroğlu vd., 1992; Emre vd., 1998; Akyüz vd., 2002; Barka vd., 2002; Harris vd., 2002; Langridge vd., 2002; Lettis vd., 2002; MTA, 2003a; MTA, 2003b; Duman vd., 2005; Kondo vd., 2005; Palyvos vd., 2007; Pucci vd., 2007, Emre vd., 2011).

### *2.1. Segmantasyon Modelleri için Literatür Korelasyonu*

Her sismik kaynak için olan segmantasyon literatür araştırması sonucu belirlenmiştir. Kocaeli Depreminin (17 Ağustos 1999, $M_w$=7.4) kırık zonunun 125 ila 145 km uzunluğunda yüzey kırığını olduğu belirtilmiştir (Lettis vd., 2002 ve Barka vd., 2002). Kocaeli depremi için olan bu segmantasyon modeli temel olarak Barka vd. (2002) tarafından önerilen model kullanılarak belirlenmiş ve kırığın deniz içindeki devamı literatürden alınmıştır (Emre vd., 1998; Barka vd., 2002; MTA, 2003b; Harris vd., 2002; Duman vd., 2005, Emre vd., 2011). Bu sismik

kaynak Barka vd. (2002) baz alınarak 5 segmana ayrılmıştır; Hersek (K1.H), Karamürsel-Gölcük (K2.KG), İzmit-Lake Sapanca (K3.IS), Sapanca-Akyazı (K4.SA) ve Karadere (K5.K). Ayrıca, 1999 Kocaeli depremi ve artçı şokları dolayısıyla 5 km yüzey kırığının gerçekleştiği belirtilen Hendek Fayı (MTA, 2003a) da bu sismik kaynağa eklenmiştir ve Kocaeli depreminin ana şokunun artçılarının merkez üssü dağılımı da Hendek Fayı ve civarında gözlemlenmektedir (Cambazoğlu, 2012). Bu nedenle, Hendek Fayı segmanı da OSTD analizinde Kocaeli depremi kırık zonu sismik kaynağına alternatif bir ilerleme yönü olarak dahil edilmiştir.



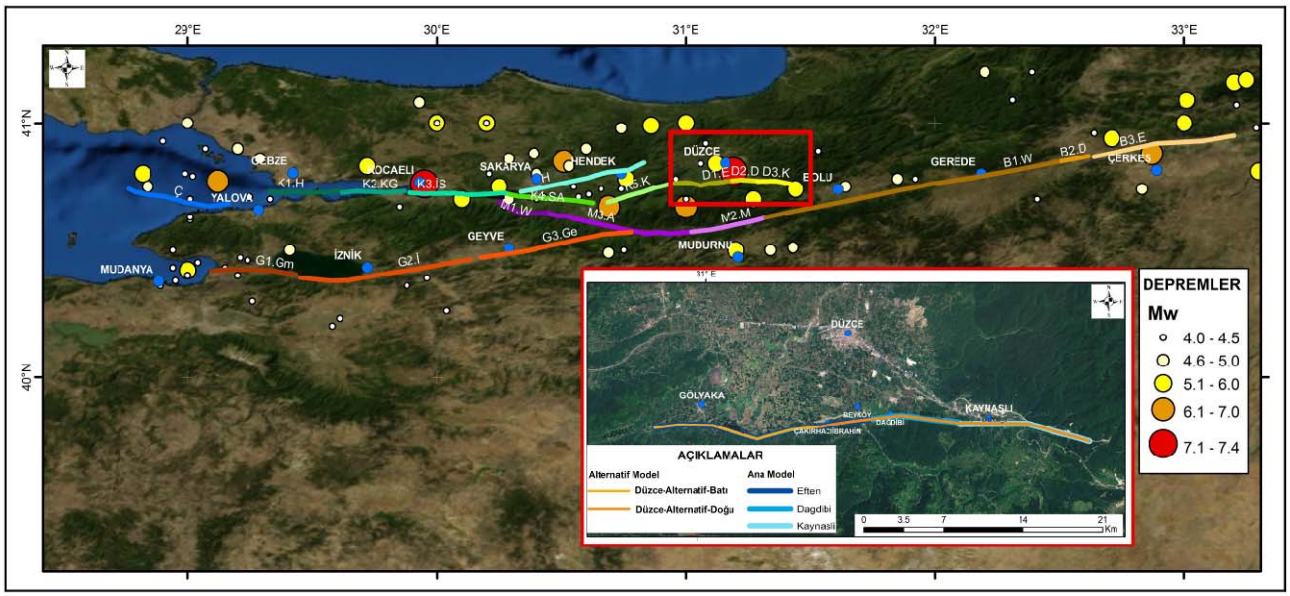

Şekil 1. a) Çıkarılan çizgisellikler, b) çizgisellikler için uzunluk ağırlıklı yön analizinin sonucunda elde edilen gül diyagramı

İkinci sismik kaynak olan Düzce Depremi Kırık Zonu (12 Kasım 1999, $M_w$=7.2) 30 ila 45 km'lik bir uzunluğa sahiptir (Duman vd., 2005). Bu kaynak için olan segmantasyon modeli iki farklı literatür kaynağından adapte edilmiştir. Bunlardan ilki Duman vd. (2005) tarafından önerilen üç segmanlı modeldir (Eften (D1.E), Dağdibi (D2.D) ve Kaynaşlı (D3.K)) ve diğer ise Pucci vd. (2006) tarafından önerilen iki segmanlı modeldir.

Bu çalışmada belirlenen üçüncü sismik kaynak Abant (26 Mayıs 1957, $M_s$=7.0) (M3.A) ve Mudurnu (22 Haziran 1967, $M_s$=7.1) (M2.M) Depremlerinin Kırık Zonları ve Bunların Batı devamıdır (M1.W) (Ambraseys ve Zatopek, 1969). Bu kaynak Sapanca Gölüne kadar devam eden (Palyvos vd., 2007) üç segmanlı bir model olarak adapte edilmiştir. 1967 Mudurnu depreminin yaklaşık 55 km'lik bir kırık zonu vardır. Bu zon yaklaşık 25 km boyunca 1957 Abant depreminin yüzey kırığı ile çakışmaktadır (Ambraseys ve Zatopek, 1969) ve deformasyon zonu 25 km boyunca batıya doğru devam etmektedir. 1957 Abant depreminin Abant Gölü ve Dokurcun civarı arasında kalan 30 km (Barka, 1996) ve 40 km (Ambraseys ve Zatopek, 1969) arasında bir yüzey kırığı vardır.

Bolu Depremi (1 Şubat 1944, $M_w$=6.8) Yüzey Kırığı için olan segmantasyon Barka ve Kadinsky-Cade (1988) tarafından önerilen üç segmanlı modele göre ayrılmıştır. Kırık Zonu Abant Gölü ile Bayramören arasında devam etmektedir (Ketin, 1969; Öztürk vd., 1985) ve Batı (B1.W), ara segman (B2.D) ve doğu segmanı (B3.E) olarak ayrılmıştır. Düşük kayma hızlarından dolayı (McClusky vd., 2000; Meade vd., 2000 ve Reilinger vd., 2006) az sayıda deprem üreten Geyve-İzmik Fay Zonu sismik bir sessiz bölge olarak adlandırılmaktadır (Barka ve Kadinsky-Cade, 1988; Barka, 1992). Bu sismik kaynak Barka ve Kadinsky-Cade (1988) tarafından önerilen segmantasyon baz alınarak Mudurnu Depremi yüzey kırığının batısından başlayarak üç segman olarak modellenmiştir (Gemlik (G1.Gm), İznik (G2.İ) ve Geyve (G3.Ge). Bu çalışmada kullanılan son sismik kaynak

olan Çınarcık Fayı Emre vd. (2011) tarafından önerilen deniz aşırı segman olarak doğrudan literatürden alınarak kullanılmıştır.




Şekil 2. Nihai sismik kaynak modeli

## 3. OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE DEĞERLENDİRMESİ İÇİN PARAMETRELER

### *3.1. Segmantasyon Modeli için Uzunluklar, Derinlikler ve Kayma Hızları*

Wells ve Coppersmith (1994) ilişkileri baz alınarak (Denklem 1) karakteristik büyüklükleri belirlemek ve Youngs ve Coppersmith (1985) karakteristik modelini uygulamak için yukarıda bahsedilen yöntem ile elde edilen yüzey kırığı uzunluklarının yanı sıra (Tablo 1) her segman için kırık derinlikleri ve kayma hızlarının da belirlenmesi gerekmektedir.

$$M_w = 3.98 + 1.02 \log (RA) \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde RA, yüzey kırık uzunluğu ile kırık derinliğinin çarpımı ile elde edilen kırık alanıdır. Her segman için olan kırık derinlikleri literatür taraması sonucu elde edilmiştir (Ayhan vd., 2002; Burgmann vd., 2002; Meade vd., 2002; Özalaybey vd., 2002; Utkucu vd., 2003; Reilinger vd., 2006; Ayhan ve Koçyigit, 2010; KRDAE, 2011).

Tekrarlama modellerini oluşturmak için her fay segmanında biriken sismik momenti hesaplamak gereklidir ve sismik moment aşağıda verilen denklem ile hesaplanır (Aki, 1996):

$$M_0^T = \mu A D \quad (2)$$

yukarıdaki denklemde $M_0^T$: toplam sismik moment, $\mu$: rijidite (dyne/cm$^2$), $A$: kırık alanı (km$^2$) ve $D$: yıllık kayma hızıdır (mm). Rijidite değeri 3.0 x $10^{11}$ dyne/cm$^2$ olarak alınmıştır (Youngs ve Coppersmith, 1985; Ambraseys, 2002). Her segman için olan kayma hızları literatürden elde edilmiş (Okumura vd., 1993; Ayhan vd., 2000; McClusky vd., 2000; Meade vd., 2000; Kondo vd., 2005; Koçyiğit vd., 2006; Reilinger vd., 2006; Ayhan ve Koçyiğit, 2010) veya segmantasyon modeli göz önünde bulundurularak jeolojik veriye göre 16 ile 25 mm/yıl (McClusky vd., 2000; Reilinger vd., 2006) ve GPS verisine göre 25 ± 5 mm/yıl (Straub vd., 1997; McClusky

vd., 2000; Kahle vd., 1999 ve 2000; Reilinger vd., 2006) olarak verilen toplam bölgesel kayma hızlarından önerilen değerlerin çıkarılması sonucu elde edilmiştir (Cambazoğlu, 2012).

İzmik, Mudurnu ve Batı Devamı, Sapanca-Akyazı ve Hendek segmanlarının birbirlerine paralel veya paralele yakın olduğu kesişim noktasını modellemek için OSTD analizi esnasında ya Sapanca-Akyazı ile Karadere segmanlarının ya da Hendek Segmanının kırıldığı bir senaryo yaklaşımı uygulanmıştır. Böylece herhangi bir senaryo için K-G yönünde toplam kayma hızı değeri asla aşılmamış ve ayrıca 1999 Kocaeli depremi esnasında Hendek Segmanının ana şok esnasında kırılmamış olduğu asıl durum da modellenmiştir.

Tablo 1. Her sismik kaynak için toplam yüzey kırığı uzunlukları ve sagman sayıları

| Sismik Kaynak | Segman Sayısı | Uzunluk (kn) | Sismik Kaynak | Segman Sayısı | Uzunluk (kn) |
|---|---|---|---|---|---|
| Kocaeli Depremi | 5 | 130.16 | Hendek Fayı | 1 | 43.93 |
| Düzce Depremi | 3 ve 2 | 41.25 | Geyve - İznik Fayı | 3 | 127.13 |
| Mudurnu - Abant Depremleri | 3 | 93.82 | Çınarcık Fayı | 1 | 35.22 |
| Bolu Depremi | 3 | 160.69 | - | - | - |

### *3.2. Deprem Kataloğu*

Her sismik kaynağın tarihsel depremselliğini yansıtmak üzere 4.0'dan büyük büyüklüklükleri içeren ve 1900-2011 yılları arasını kapsayan KRDAE (2011) homojen deprem kataloğunda yer alan deprem verisi CBS ortamına aktarılmış ve her sismik kaynağın merkez üssü dağılımı elde edilmiştir. Depremlerin sismik kaynaklarla olan ilişkisini ortaya koymak için hem depremlerin karşılıklı dışlamalarını (mutually exclusive) yansıtmak hem de kataloğun deprem fenomenini zaman uzayında açıklamak için kullanılan Poisson ilişkisini temsil ettiğini kesinleştirmek üzere ikincil deprem analizi (de-clustering) yapılmıştır (Gardner ve Knopoff, 1974). Bu amaçla çalışma alanı içine düşen depremler Deniz (2006) tarafından önerilen zaman-mekan pencereleri kullanılarak elenmiştir (de-clustering). Bu pencereler kullanılarak gerçekleştirilen eleme işleminin ardından her deprem CBS ortamında tek tek incelenmiş ve bu çalışmada tanımlanan fay modelinin dışında kalan faylarla ilişkili depremler de daha sonra gerçekleştirilen analizlere dahil edilmemiştir. Bu işlemler sonucunda sonraki analizlerde ilk başta 487 adet olan deprem arasından 101 tanesi kullanılmıştır. Gerçek uzun dönem depremsellik ilişkilerini temsil edip etmediklerini test etmek amacıyla kataloglar üzerinde gerçekleştirilen ikinci düzeltme Stepp (1973) tarafından önerilen katalog tamlık analizidir. Deprem kataloglarının tamamı sismogramların daha az sıklıkta olması ve yerleşim yerlerinin az olmasından dolayı eski deprem kayıtları açısından eksiktir (Stepp, 1973). Bu doğrultuda Cambazoğlu (2012) ve Cambazoğlu vd. (2912) tarafından gerçekleştirilen analizlerde deprem kataloğunun 1964'ten önceki yıllar için 4.6'dan küçük depremler açısından eksik (biased) olduğu gözlemlenmiştir. Aynı gözlem modern cihaz periyodunun başladığı yıl olan 1964'ü belirten Atakan vd. (2002) ve Kalkan vd. (2009) tarafından da yapılmıştır. Bu nedenle, büyüklüğü 4.6'dan küçük olan depremler sadece 1964'ten itibaren olan dönem için tam olarak kabul edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda Gutenberg ve Richter (1949) tarafından önerilen ve aşağıda verilen denklem kullanılarak nihai katalog parametreleri göz önünde bulundurularak "a ve "b" regresyon katsayıları elde edilmiştir.

$$log(N) = a - b(M) \tag{3}$$

yukarıda N: M' ye eşit veya büyük büyüklüğe sahip depremlerin sayısıdır. Böylelikle hem en küçük kareler yöntemi hem de maksimum olabilirlik yöntemi kullanılarak bölgenin tamamı için $\log_{10}$ tabanında ortalama yıllık aşılma oranı olan "b" değeri elde edilmiştir. Yani her bir sismik kaynak için ayrı bir "b" değeri elde edilmemiştir, çünkü ayıklama (de-clustering) işlemi esnasında her büyük depremin bölgenin tamamına yayılmış segmanlar üzerinde artçı depremleri tetiklediği gözlemlenmiştir. En küçük kareler ve maksimum olabilirlik yöntemlerinin eşit ağırlıklı ortalaması alınarak "b" değeri 0.68 olarak elde edilmiştir ve bu sonuç daha önce belirtilen "b" değeri sonuçları ile uyumludur (Erdik vd., 2004; Deniz, 2006; Crowley ve Bommer, 2006; Kalkan vd., 2009).

### *3.3. Yer Hareketi Tahmin Denklemleri ve Segmantasyon İlişkisi*

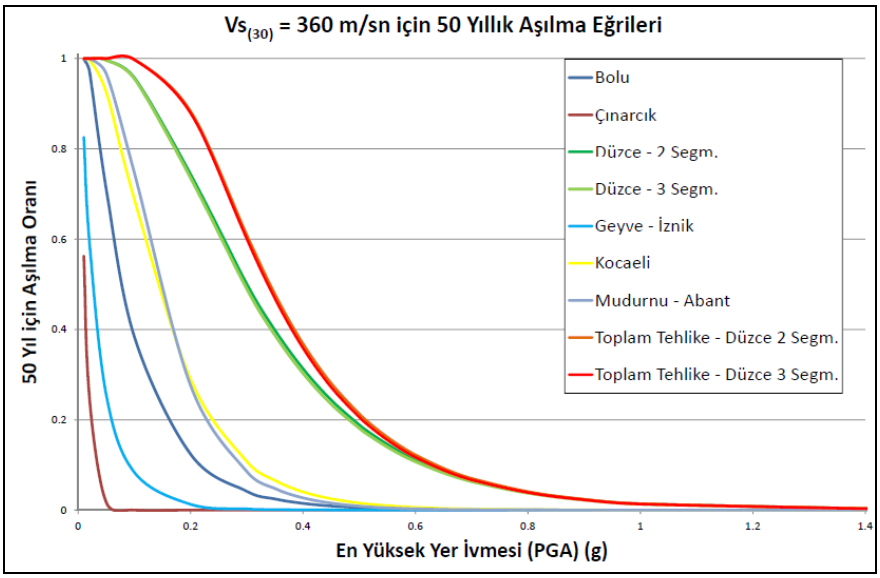
Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi esnasında dört adet Yeni Nesil Azalım İlişkisi Yer Hareketi Tahmin Denklemi kullanılmıştır, bunlar: Abrahamson ve Silva (2008), Boore ve Atkinson (2008), Campbell ve Bozorgnia (2008), ve Chiou ve Youngs (2008)' dir. Bu YHTD' lerin tamamı dünya genelinde sığ kabuk verisi için (<70 km) ve Avrupa ile Orta Doğu için uygulanabilir denklemlerdir (Stafford vd., 2008; Douglasi, 2011); yani çalışma alanı için uygundurlar.

Bu çalışmada USGS San Francisco Kaliforniya Deprem Olasılıkları Çalışma Grubu (SF Bay WG Report, 2003) tarafından belirlenen segman, kaynak ve senaryo ilişkisi kullanılmıştır. Böylelikle her bir segmanın kırılmasının yanı sıra takip eden segmanların kırılmalarını içeren her bir farklı kırılma senaryosu modellenebilir. Ancak modele her bir senaryoyu dahil edebilmek için bu senaryolara ait ağırlık değerleri belirlenmelidir. Bu ağırlık değerlerini belirlemek için bu kaynakların depremsellikleri ile Youngs ve Coppersmith karakteristik model baz alınarak sismik kaynakların tekrarlama modelleri oluşturulmuştur. Segman-kaynak-senaryo ilişkileri ve ağırlıklarının ayrıntıları Cambazoğlu (2012) ve Özkan vd. (2011)' de verilmiştir.

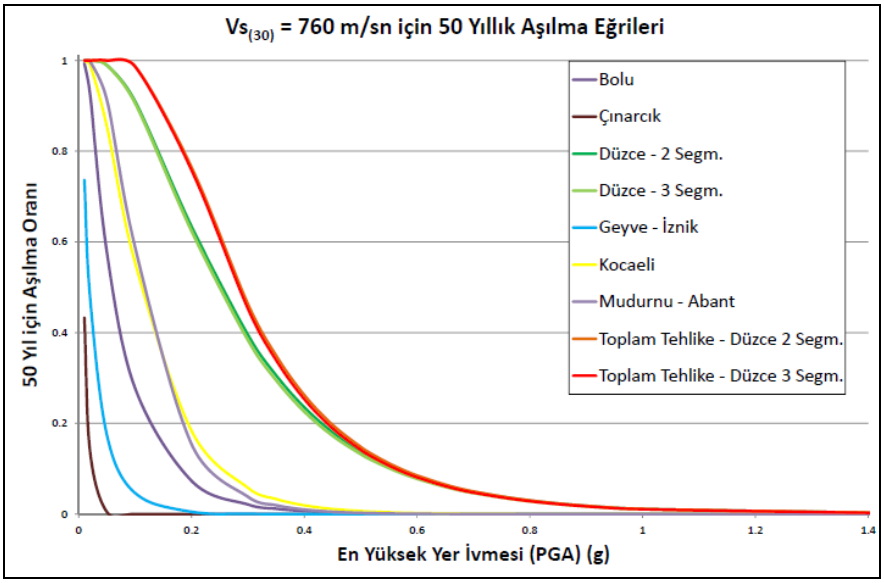
## 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Daha önce de bahsedildiği üzere, olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi 31.16K ve 40.84D koordinatlarındaki Düzce şehir merkezi için gerçekleştirilmiştir. 50 yıl için %10 aşılma olasılığı göz önünde bulundurularak 3 standart sapma değeri ile dört YHTD için de $Vs_{30}$ = 360 ve 760 m/s olmak üzere iki farklı zemin koşulu için analizler gerçekleştirilmiştir. Bütüm bu parametreler Norman Abrahamson tarafından geliştirilmiş olan Haz39 koduna girilmiştir (Abrahamson, 2006, yayınlanmamış). Bu kod Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi tarafından test edilmiştir (Thomas vd., 2010). Bu yazılım Cornel (1968) tarafından geliştirilen olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi metodolojisini uygulayarak sismik tehlikeleri hesaplamaktadır ve belirli bir kaynak bölgesi içinde verilen depremlerin mekansal olarak tamamen rastgele olduğu ve bu olayların (depremlerin) Poisson işlemi varsayımı gereğince zaman içerisinde birbirlerinden bağımsız olarak gerçekleştiği temel varsayımları üzerine çalışmaktadır. Standart sapma değeri önemli bir değişkendir ve normal dağılıma göre 1 standart sapma, verinin %84'ünün; ve 3 standart sapma verinin %99 'unun kapsanmasını sağlamaktadır.

Dört YHTD' nin eşit ağırlıklandırılmış ortalaması alınarak ve 3 standart sapma eklenerek yapılan hesaplamalar Düzce Depremi Sismik Kaynağı için 2 Segman ve 3 Segman olmak üzere iki farklı modelde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3 ve 4). Hesaplamalar sonucunda 2 segmanlı ve 3 segmanlı Düzce kaynağı modelleri için $Vs_{30}$=360 m/s zemin koşulu için sırası ile 0.623g ve 0.615g değerleri alde edilirken yine 2 ve 3 segman Düzce kaynağı modelleri için $Vs_{30}$=760 m/s zemin koşulu için bu değerler sırası ile 0.564g ve 0.555g olmuştur. Bu sonuçlar Kalkan vd. (2009) tarafından Yeni Nesil Azalım İlişkisi YHTD'leri kullanılarak bu çalışmadaki alanı da kapsayan bölge için yapılan çalışma ile karşılaştırıldığında değerlerin Kalkan vd. (2009) tarafından $Vs_{30}$=360 m/s zemin özelliği için 0.44 ve 0.72g arasında ve $Vs_{30}$=706 m/s kaya zemin için 0.4 ile 0.6 arasında verildiği görülmektedir. Bu karşılaştırma da göz önünde bulundurulduğunda, standart sapma ile ilgili daha önce yapılan gözlemin geçerli olduğu görülmüştür. Şekil 3 ve 4 incelendiğinde, beklendiği üzere Düzce Sismik Kaynağı analiz noktasına yakınlığından dolayı (8 km) toplam sismik tehlike eğrisine en büyük katkıyı sağlamaktadır. Diğer yandan, 2 segmanlı Düzce modelinin 3 segmanlı modele göre daha yüksek PGA (en yüksek yer ivmesi) değeri vermesinin nedeni, toplam boyları aynı olmasına karşın 2 segmanlı modelde münferit segmanların boylarının 3 segmanlıya göre daha uzun olmasından kaynaklanmaktadır.




Şekil 3. $Vs_{(30)}$=360 m/s zemin koşulu için 50 Yıllık Aşılma Eğrileri




Şekil 4. $Vs_{(30)}$=760 m/s zemin koşulu için 50 Yıllık Aşılma Eğrileri

**TEŞEKKÜR**

Bu çalışma ODTÜ Bilimsel Araştırmalar Fonu BAP-03-03-2009-01 tarafından desteklenmiştir. Yazarlar projeye katkılarından ve Haz39 tehlike kodunu temin etmesinden dolayı Dr. Zeynep Gülerce'ye ve bu metnin hazırlanmasında yaptığı katkılardan dolayı Sayın Arif Mert Eker'e teşekkür eder.

**KAYNAKÇA**

Abrahamson, N. A., ve Silva, W. (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthquake Spectra*. 24 (1), 67-97.

Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, 2 , Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G-waves spectrum. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*. 44, 73-88.

Akyüz H.S., Hartleb R, Barka A, Altunel E ve Sunal G (2002). Surface rupture and slip distribution of the 12 November 1999 Düzce earthquake (M 7.1), North Anatolian Fault, Bolu, Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 61–66.

Ambraseys, N. N. ve Zatopek, A. (1969). The Mudurnu Valley, West Anatolia, Turkey, earthquake of 22 July 1967. *Bull. Seismol. Soc. Am.*. 59, 521-589.

Ambraseys, N.N. (1970). Some characteristic features of the North Anatolian Fault Zone. *Tectonophysics*. 9, 143-165.

Ambraseys, N. N. (2002). The seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 1– 18.

Atakan, K., Ojeda, A., Meghraoui, M., Barka, A., Erdik, M., ve Bodare, A. (2002). Seismic hazard in Istanbul following the 17 August 1999 Izmit and 12 November 1999 Duzce earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92 (1), 466-482.

Ayhan, M.E., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Aktug, B., Herece, E. ve Reilinger, R.E. (2002). Kinematics of the *M*w:7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake, *Geophy. Res. Lett.* 28,367– 370.

Ayhan, M. E., ve Koçyiğit, A. (2010) Displacements and kinematics of the February 1, 1944 Gerede earthquake (North Anatolian Fault System, Turkey): Geodetic and geological constraints. *Turkish J. Earth Sci.* 19, 285–311.

Barka, A. ve Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics.* 7 (6), 63–84

Barka, A. (1992) *The North Anatolian Fault Zone*. *Ann. Tecton.* 6 (1), 64–95

Barka, A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bull. Seismol. Soc. Am. 86*, 1238-1254.

Barka A., Akyüz, H.S., Altunel, E., Sunal, G. ve Çakır Z. (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault. *Bull. Seismol. Soc. Am.,* 92, 43–60.

Boore, D.M. ve Atkinson, G.M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s. *Earthquake Spectra.* 24, 99-138.

Bürgmann, R., Ayhan, M.E., Fielding, E., Wright, T., McClusky, S., Aktug, B., Demir, C., Lenk, O. ve Türkezer, A. (2002). Deformation during the 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake from GPS and InSAR data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92 (1), 161–171.

Cambazoğlu, S. (2012). Preparation of a Source Model for the Eastern Marmara Region Along the North Anatolian Fault Segments and Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Düzce Province. M.Sc. Thesis, METU.

Cambazoglu, S., Akgün, H., Koçkar, M.K. (2012). Preparation of a line source model for probabilistic seismic hazard analyses of Düzce Province, Turkey. In: Proceedings of 15th world conference on earthquake engineering, Paper# 3472, Lisbon, Portugal

Campbell, K.W. ve Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*. 24, 139-171.

Chiou, B.S.J. ve Youngs, R. (2008) An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*. 24, 173-215.

Cornell, C. (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 1583-1606.

Crowley, H. ve Bommer J.J. (2006), *Modeling seismic hazard in earthquake loss models with spatially distributed exposure. Bull. of Eq. Eng.* 4, 249-273.

Deniz, A. (2006). Estimation of earthquake insurance premium rates based on stochastic methods. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

Douglas, J. (2011). Ground-Motion Prediction Equations 1964-2010*, Final report RP-59356-FR. BRGM, Orléans, France*.

Duman, T. Y., Emre, O., Doğan, A. ve Özalp, S. (2005). Step-over and bend structures along the 1999 Düzce earthquake surface rupture, North Anatolian fault, Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 1250 – 1262.

Emre, O., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazanci, N., Kecer, M. ve Unay, E. (1998) Neogene–Quaternary evolution of Eastern Marmara Region. *Bull. MTA.* 120, 233–258.

Emre, Ö., Doğan, A., Duman, T.Y., Özalp, T. (2011). 1:250.000 Scale Active Fault Map Series of Turkey. General Directorate of Mineral Research and Exploration. Ankara-Turkey.

Erdik, M., Demircioglu, M., Sesetyan, K., Durukal, E., Siyahi, B. (2004) *Earthquake hazard in Marmara Region, Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 24, 605-631.

Gardner, J.K. ve Knopoff, L. (1974). Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America.* 64, 1363-1367.

Gupta, R. P. (2003) *Remote Sensing Geology,* Springer-Verlag, Berlin.

Gutenberg, B. ve Richter, C.F. (1949) Seismicity of the Earth and Associated Phenomenon*.* Princeton University Press, Princeton, New York.

Harris, R. A., Dolan, J.F., Hartleb, R., ve Day, S.M., 2000, The 1999 İzmit, Turkey earthquake - A test of the dynamic stress transfer model for intra-earthquake triggering, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92 (1), 245-255.

Kahle, H.G., Concord, M., Peter, Y., Geiger, A., Reilinger, R., Barka, A., ve Veis G. (2000) GPS derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian plates. *J. Geophys. Res.* 105 (23), 353-370.

Kalkan, E., Gulkan, P., Yilmaz, N., ve Celebi, M. (2009) Reassessment of probabilistic seismic hazard in the Marmara region. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99 (4), 2127-2146.

Ketin, I. (1969) *Uber die nordanatolische Horizontalverschiebung. Bull Mineral Res. Explor. Inst. (MTA) Turkey.* 72, 1-28.

Koç, A. (2005). Remote sensing study of Sürgü Fault Zone (Malatya, Turkey). M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

Koçyiğit, A., et al. (2006) *Earthquake Hazards of the Section Between İsmetpaşa-Gerede and Mengen of the North Anatolian Fault System (NAFS)*. TÜBİTAKYDABAG- 102Y053 project report [in Turkish with English abstract, unpublished].

KOERI (2011). A Revised and Extended Earthquake Catalogue for Turkey since 1900 (M≥4.0). Bebek, İstanbul.

Kondo, H., Awata, Y., Emre, O., Dogan, A., Ozalp, S., Tokay, F., Yildirim, C., Yoshioka, T. ve Okumura, K. (2005) Slip distribution, fault geometry, and fault segmentation of the 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture, North Anatolian Fault, Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95(4), 1234-1249.

Lettis, W., Bachhuber, J., Witter, R., Brankman, C., Randolph, C.E., Barka, A., Page, W.D. ve Kaya, A. (2002) Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92(1), 19-42.

Langridge, R. M., Stenner, H.D., Fumal, T.E., Christofferson, S.A., Rockwell, T.K., Hartleb, R.D., Bachhuber, J. ve Barka, A.A. (2002) Geometry, slip distribution, and kinematics of surface rupture on the Sakarya fault segment during the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92 (1), 107–125.

McClusky, S., et al. (2000) Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus. *J. Geophys. Res.* 105, 5695-5719.

Meade, B.J., Hager, B.H., McClusky, S., Reilinger, R.E., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A. ve Ozener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara region from block models of secular deformation constrained by Global Positioning System measurements. Bull. Seismol. Soc. Am. 92, 208–215.

MTA (2003a). Surface Rupture Associated with the Auguts 17, 1999 İzmit Earthquake. Special Publications Series:1. MTA Press, Ankara.

MTA (2003b). Atlas of North Anatolian Fault: Special Publications Series:2. MTA Press, Ankara.

Okumura, K., Yoshioka, T., ve Kuscu, I. (1993). Surface Faulting on the North Anatolian Fault in these two Millennia. *U.S. Geol. Surv. Open-file Rep., 94-568*, 143-144.

Özalaybey, S., Ergin, M., Aktar, M., Tapırdamaz, C., Biçmen, F., ve Yörük, A. (2002) The 1999 İzmit earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 376–386.

Özkan, M.Y., Akgün, H., Gülerce, Z., Koçkar, M.K., Ocak, S. ve Cambazoğlu, S. (2011). Seismic Modeling and Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Marmara Sea and Adapazari Region via Preparation of an Earthquake Catalogue, BAP-0303200901 Final Report, METU, Ankara.

Öztürk, A., Inan, S. ve Tutlean, Z. (1985). Abant-Yeniçağa yöresinin tektoniği. *Bull. Earth Sci. Cumhuriyet Univ.* 2, 35-52 (In Turkish).

Palyvos, N., Pantosti, D., Zabci, C. ve D'Addezio, G. (2007) Paleoseismological evidence of recent earthquakes on the 1967 Mudurnu Valley Earthquake Segment of the North Anatolian Fault Zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97(5), 1646-1661.

Pucci S., De Martini, P.M. ve Pantosti D. (2007). Preliminary slip rate estimates for the Duzce segment of the North Anatolian fault Zone from offset geomorphic markers. *Geomorphology.* 97 (3-4), 538-554.

Reilinger, R., Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gurkan, O., Hearn, L., Feigl, K.L., Cakmak, R., Aktug, B., Ozener, H. ve Toksöz, M.N. (2000). Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M: 7.5, Izmit, Turkey. *Earthquake, Science.* 289, 1519–1524.

Reilinger, R., et al. (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.

Sarp, G. (2005). Lineament Analysis from Satellite Images, North-East of Ankara. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara.

Stepp, J. C. (1973). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound area, In *Contributions to Seismic Zoning: U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report ERL 267-ESL 30* (edited by Harding, S. T.), 16-28.

Straub, C, H., Kahle, G. ve Schindler, C. (1997). GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara sea region, NW Anatolia, *J. Geophys. Res*., 102, 27587-27601.

Stafford, P.J., Strasser, F.O., ve Bommer, J.J. (2008). An evaluation of the applicability of the NGA models to ground-motion prediction in the Euro-Mediterranean region. *Bulletin of Earthquake Engineering* 6,144-177.

Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ. (1992). Active Fault Map of Turkey, General Directorate of the Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey, 2 sheets, 1.2.000.000 scale.

Utkucu, M., Nalbant, S.S., McCloskey, J., Steacy, S., ve Alptekin, O. (2003). Slip distribution and stress changes associated with the 1999 November 12, Düzce (Turkey) earthquake (Mw = 7.1). *Geophys. J. Int.* 153, 229–241.

Wells, D.L. ve Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 974-1002.

Working Group on California Earthquake Probabilities (2003). Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002–2031. U.S. Geological Society Open File, Report 03–214.

Youngs, R. R., ve Coppersmith K.J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75 (4), 939–964.