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

KUZEY ANADOLU FAY'ININ BOLU-ILGAZ BÖLÜMÜ İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ SİSMİK KAYNAK MODELLERİ

M. Levendoğlu[1], Z. Gülerce[2] ve F. Şaroğlu[3]

[1]*İnşaatYüksek Müh., Kayen Kayı Enerji Yatırımları A.Ş., Ankara*
[2]*Yardımcı Doçent Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[3]*Jeoloji Müh. Dr., Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara*
Email: zyilmaz@metu.edu.tr

ÖZET:

Kuzey Anadolu Fay'ı (KAF) aktif olup son yüzyıldaki hareketleri sonucunda sekiz büyük ve yıkıcı deprem meydana getirmiş ve 1942 Erbaa-Niksar, 1943 Tosya ve 1944 Bolu-Gerede depremlerinin kırık bölgeleri yaklaşık 500 km uzunluğunda belirgin ve doğrusal bir fay çizgisini açığa çıkartmıştır. KAF üzerinde pek çok araştırma yapılmış olmasına rağmen olasılıksal sismik tehlike analizinde (OSTA) kullanılacak kritik fay özellikleri bu fayın birçok bölümü (segmenti) için halen belirsizlikler içermektedir. Bu çalışmanın amacı,1944 Bolu-Gerede Depremi kırılma bölgesi içinOSTA çerçevesinde kullanılacak sismik kaynak karakterizasyon modelinin oluşturulması ve bu modeldeki belirsizliğin OSTA sonuçlarına olan etkisinin irdelenmesidir. Çalışma kapsamında kırılma bölgesi için düzlemsel fay geometrisi tanımlanmış vegüncel fay haritalarının yardımıyla alt bölüm geometrileri (uzunluk, derinlik ve bölümlenme noktaları) belirlenmiştir. Ek bir arka plan sismik kaynağı tanımlanmadan KAF'ın karakteristik davranışını doğru bir şekilde yansıtabilmek için kompozit büyüklük dağılım modeli (Youngs ve Coppersmith, 1985) uygulanmıştır. Fay bölümleri, sismik kaynaklar, kırılma senaryoları ve fay kırığı modeli Amerika Jeoloji Araştırma Kurumu'nun (USGS) WGCEP-2003 terminolojisi kullanılarak tanımlanmış ve çok-bölümlü kırılma senaryoları dikkate alınmıştır. Güncel deprem kataloğundaki etkinlikler (Kalafat, 2010),tanımlanan sismik kaynaklar ile eşleştirilmiş ve senaryo ağırlıklarısismik momentin denkleştirilmesi yöntemi ile bulunmuştur. Bazı parametrelerdeki belirsizliklerin sonuç üzerindeki etkisi elde edilen sismik tehlike eğrileri karşılaştırılarak irdelenmiş ve gelecekte daha fazla araştırma gerektiren parametreler belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kuzey Anadolu Fay'ı (KAF), Olasılıksal sismik tehlike analizi (OSTA), Sismik olmayan deformasyon, Kaynak karakteristiği modeli, Deprem büyüklüğü tekrarlanma modeli.

1. GİRİŞ

Kuzey Anadolu Fay'ı (KAF) dünyadaki en aktif fay sistemlerinden biridir ve son yüzyıl içerisinde sekiz büyük (M_w>6) ve yıkıcı deprem meydana getirmiştir. 1942 Erbaa-Niksar, 1943 Tosya ve 1944 Bolu-Gerede depremlerinin kırık bölgeleri 500 km uzunluğunda belirgin ve doğrusal bir fay çizgisini açığa çıkartırken, 1999 Kocaeli ve Düzce Depremleri yaklaşık 200 km'lik paralel ve karmaşık bir faylanma bölgesi oluşturmuştur. KAF bölümlerinin farklı kaynak karakterleri, Doğu-Batı hattı üzerinde değişkenlik gösteren deformasyon hızları ve büyük depremlerin tekrarlanma periyodları göz önüne alındığında KAF için doğru bir sismik kaynak modeli oluşturmak oldukça kapsamlı ve çok-disiplinli bir araştırma sürecini zorunlu kılmaktadır. Özellikle 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinden sonra KAF üzerinde pek çok araştırma yapılmış olmasına rağmen olasılıksal sismik tehlike analizinde (OSTA) kullanılacak önemli olan fay parametreleri bu fayın birçok bölümü için hala belirsizdir.

Tamamlanma aşamasında olan bu çalışmanın amacı, 1944 Bolu-Gerede Depremi kırılma bölgesi için OSTA çerçevesinde kullanılacak sismik kaynak karakterizasyon modelinin oluşturulması ve bu modeldeki belirsizliklerin OSTA sonuçlarına olan etkisinin irdelenmesidir. Sismik kaynak modelinin oluşturulması için kırılma bölgesinin geometrisi tanımlanmış, güncel fay haritalarının yardımıyla alt bölüm geometrileri (uzunluk, derinlik ve bölümlenme noktaları) ve yıllık kayma hızları belirlenmiş ve Bölüm 2'de özetlenmiştir.Ek bir arka plan sismik kaynağı tanımlanmadan KAF'ın karakteristik davranışını doğru bir şekilde yansıtabilmekiçin kompozit büyüklük dağılım modeli (Youngs ve Coppersmith, 1985) uygulanmıştır. Fay bölümleri, sismik kaynaklar, kırılma senaryoları ve fay kırığı modeliAmerika Jeoloji Araştırma Kurumu'nun (USGS) WGCEP-2003 terminolojisi kullanılarak tanımlanmış ve çok-bölümlü kırılma senaryoları dikkate alınmıştır. Güncel deprem kataloğundaki etkinlikler (Kalafat, 2010),tanımlanan sismik kaynaklar ile eşleştirilmiş ve senaryo ağırlıklarısismik enerjinin denkleştirilmesi yöntemi ile bulunmuştur. Kullanılan fay kırılma ve deprem büyüklüğü tekrarlanma modelleri 3. Bölüm'de özetlenmektedir. Tanımlanan modeldeki parametrelerin (yıllık kayma hızı, yıllık sürünme hızı, fay derinliği, karakteristik deprem büyüklüğü, b-değeri ve senaryo ağırlıkları gibi) belirsizlikleri, mantık ağacı yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Parametrelerdeki belirsizliklerin sonuç üzerindeki etkisi, elde edilen sismik tehlike eğrileri karşılaştırılarak irdelenmiş ve gelecekte daha fazla araştırma gerektiren parametreler belirlenmiştir.

2. 1944 BOLU-GEREDE DEPREMİNİN KAYNAK GEOMETRİSİNİN BELİRLENMESİ

1 Şubat 1944 tarihinde Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın orta-batı bölümünde yer alan Bolu-Gerede bölgesinde yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir. Söz konusu depremin büyüklüğü sismogram kayıtlarına gore M_S=7.3 (Dewey, 1976) ve deneysel büyüklük-kayma bağıntılarına gore ortalama kayma kabulüyle M_w=7.4 (Barka, 1996) olarak belirlenmiştir. Depremin kırık izleri ilk olarak Taşman (1944) tarafından incelenmiş ve kırık boyu 180 km, sağ-yanal doğrusal atım 3.5 m ve düşey yer değiştirmeler 0.4-1.0 m olarak raporlanmıştır. 1944 Bolu-Gerede depremi süreç içerisinde birçok araştırmacı (Ketin 1948, 1969; Ambraseys 1970; Lienkaemper 1984; Özturk ve diğ.1985; Barka 1996; Ambraseys ve Jackson 1998; Herece 2005; Kondo ve diğ. 2005) tarafından da incelenmiştir. Ketin (1969), Ambraseys (1970) veÖzturk ve diğ. (1985) çalışmalarında kırık bölgesinin Kurşunlu (Bayramören) yöresinin kuzeyinden Abant Gölü bölgesine kadar (yaklaşık 165 km) devam ettiğini belirtmişlerdir. Depremin merkez üssü kırık bölgesinin doğu yönündeki bitişinin yakınlarındadır (Dewey, 1976) ve depremin derinliği 21.6 km olarak tahmin edilmiştir (Jackson ve Mckenzie, 1988). Sismojenik katmanın ve kabuğun kalınlığı bu bölgelerde 17 km ve 31 ± 2 km olarak raporlanmıştır. İlaveten, Gerede fay bölgesi boyunca kilitleme derinliğinin 15-21 km aralığında olabileceği çeşitli kaynaklarca (Meade ve diğ. 2002; Reilinger ve diğ. 2006) önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında güncel kaynaklarda önerilen (Ayhan ve Koçyiğit, 2009; Kondo ve diğ., 2005) segmanlanma modelleri değerlendirilerek 1944 Bolu-Gerede depreminin kırık bölgesi 3 alt bölüme ayrılmıştır (Şekil-1). Şekil 1'de görüleceği üzere ana fay bölümleri batıdan doğuya doğru Ilgaz-Ismetpaşa Bölümü (Bölüm-1), Ismetpaşa-Yeniçağa Bölümü (Bölüm-2) ve Yeniçağa-Abant Bölümü (Bölüm-3) olarak sıralanmıştır.

Şekil 1. Fay bölümlerinin genel görünüşü ve her bölüm için kabul edilmiş kayma hızları

Fay kırık alanının genişliği Wells ve Coppersmith (1994) tarafından önerilen alan-deprem büyüklüğü bağıntıları kullanılarak 16 km olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer Barka ve diğ. (2002) tarafından 1999 Kocaeli depremi için belirlenen 17 km'lik genişlik ve Ayhan ve Koçyiğit(2009) tarafından 1944 kırığı için hesaplanan 17 km değerleri ile kıyaslandığında makul gözükmektedir.GPS (Tatar ve diğ., 2011)ve arazi çalışmaları ile belirlenen uzun ve kısa dönem yıllk kayma hızı ölçümleri göz önüne alınarak Ismetpaşa – Yeniçağa bölümü haricinde diğer fay bölümleri için 20 mm / yıl yıllık kayma hızı değeri kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan fay bölümleri içinkırık uzunluğu, kırık genişliği, yıllık kayma hızı ve karakteristik deprem büyüklüğü değerleri Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo1.Bölüm geometrileri, kayma hızları ve karakteristik deprem büyüklüğü değerleri.

Bölüm Adı		**Boy (km)**	**Genişlik (km)**	**Kayma Hızı (mm/yıl)**	**Karakteristik Büyüklük (M_{char})**
1	Ilgaz - İsmetpaşa	69	16	20	7.08
2	İsmetpaşa - Yeniçağa	47	16	12	6.91
3	Yeniçağa – Abant Gölü	75	16	20	7.12

KAF üzerindeki yıllık kayma hızının belirlenmesine yönelik yapılan birçok çalışmaya ilaveten, İsmetpaşa-Yeniçağa fay bölümü üzerinde sürünme (creep, aseismic deformation) olduğunu belirten birçok çalışmada mevcuttur. Kondo ve diğ. (2005) ve Çakır ve diğ. (2005) çalışmalarında Ismetpaşa fay bölümünün 1951 depreminde tekrar kırıldığını belirtmişlerdir. 1944 Bolu-Gerede depreminin ardından yaşanan 1951 Kurşunlu depreminin atım miktarı ve güncel büyük depremler tarafından uzaktan tetiklenmiş yüzeysel kaymalar Ismetpaşa-Yeniçağa bölümü üzerindeki sürünmenin en önemli kanıtları olarak gözükmektedir (Çakır ve diğ., 2005). Barka'nın (1996) 1944 Bolu-Gerede depremi kırık bölgesi ile ilgili çalışmasında da Ismetpaşa'nın doğusunda sürünme (creep) olduğunu belirtilmektedir. Ismetpaşa – Yeniçağa bölümü üzerindeki sürünmenin miktarını belirlemek amacıyla 1957 ve 2010 yılları arasında yapılan tüm çalışmalar derlenerek, bu çalışmalarda belirlenen sürünme (creep) miktarları, zaman aralığı ve ölçüm hataları Tablo2'de özetlenmiştir. Söz konusu tablodan da görülebileceği üzere geçmiş çalışmalardaki ortalama sürünme hızı yaklaşık olarak 8 mm / yıl olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, yukarıda bahsedilen KAF üzerindeki 20 mm / yıl kayma hızı miktarından belirlenen 8 mm / yıl sürünme hızı,yalnızca Ismetpaşa – Yeniçağa bölümü için geçerli olmak üzere, düşülmüş ve bu fay bölümünedaha düşük bir kayma hızı değeri (12 mm / yıl) atanmıştır (Şekil 1).

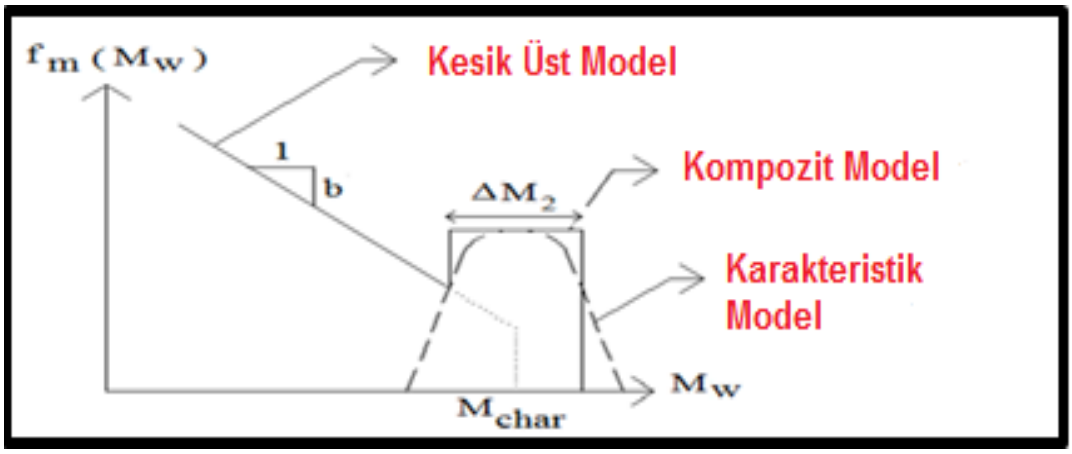
Tablo 2. Ismetpaşa – Yeniçağa Bölümü üzerindeki sürünme hızını belirten geçmiş çalışmalar

Zaman Aralığı	Sürünme Hızı (mm/yıl)	Ölçüm Hatası	Ölçüm Şekli	Çalışma Sahipleri
1957-1969	20	0.6	tren istasyonu duvarı üzerindeki ölçümler	Ambraseys, 1970
1969-1978	11	0.4	jeodezik ağ (nirengi)	Aytun, 1982
1972-1982	10	0.1	jeodeiz ağ (nirengi)	Uğur, 1974
1982-1992	9	0.1	jeodeiz ağ (nirengi)	Deniz et al., 1994
1992-2002	7	0.1	jeodeiz ağ (GPS)	Kutoglu and Akcın, 2006
2002-2007	12	0.1	jeodeiz ağ (GPS)	Kutoglu et al., 2008
1992-2000	8	0.3	InSAR	Cakır et al., 2005
2010	9,1-1,01	0.4	LIDAR	Karabacak et al., 2011

3. DEPREM BÜYÜKLÜĞÜ DAĞILIMI VE FAY KIRILMA MODELİ

Bir sismik kaynak bir dizi deprem büyüklüğü oluşturabilir ve deprem büyüklüğü dağılımı modeli, bir sismik kaynağın üretebileceği büyük, orta ve küçük büyüklükteki depremlerin oranınıgösterir. OSTA çalışmalarında

kullanılan tipik deprem büyüklüğü dağılım modelleri: i) kesik üstel model (truncated exponential or G-R model), kesik normal model (veya karakteristik model) ve kompozit model (Youngs and Coppersmith, 1985) olarak üç gruba ayrılabilir. Bu modellerin teorik deprem büyüklüğü dağılım eğrileri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Olasılıksal sismik tehlike analizinde kullanılan deprem büyüklüğü dağılım modelleri

Bu çalışmada, herhangi bir arka-plan sismik kaynağa gerek kalmadan düzlemsel sismik kaynakların üretebileceği farklı büyüklüklerdeki depremlerin bağıl oranlarını gösterebilmek içinkompozit model (Youngs and Coppersmith, 1985) tercih edilmiştir. Bilindiği üzere, kompozit model kesik üstel model ile karakteristik modeli birleştirir ve küçük depremler kesik üstel model ile,orta-büyük depremler ise karakteristik model ile temsil edilir. Kompozit modelin en önemli özelliği, Denklem 1 ve 2'de verilen model kısıtları sayesinde sismik momentin %94'ünün karakteristik depremler ile, kalan kısmının ise küçük-orta büyüklükteki depremler ile boşaltılmasına izin vermesidir.

$$fm(Mw) = \begin{cases} \dfrac{\beta \exp(-\beta(\mathrm{Mw} - \mathrm{Mmin}))}{1 - \exp(-\beta(\mathrm{Mmax} - \Delta\mathrm{M}_2 - \mathrm{Mmin}))} \mathrm{x} \dfrac{1}{1+\mathrm{c}}, & Mw \le Mmax - 0.5\Delta M2 \\ \dfrac{\beta \exp(-\beta\,(\mathrm{Mmax} - \Delta\mathrm{M}_1 - \Delta\mathrm{M}_2 - \mathrm{Mmin}))}{1 - \exp(-\beta\,(\mathrm{Mmax} - \Delta\mathrm{M}_2 - \mathrm{Mmin}))} \mathrm{x} \dfrac{1}{1+\mathrm{c}}, & Mw > Mmax - 0.5\Delta M2 \end{cases} \quad (1)$$

Denklem 1 içerisindeki ΔM_1 ve ΔM_2 parametreleri sırasıyla 1.0 ve 0.5'e eşittir. C değeri ise;

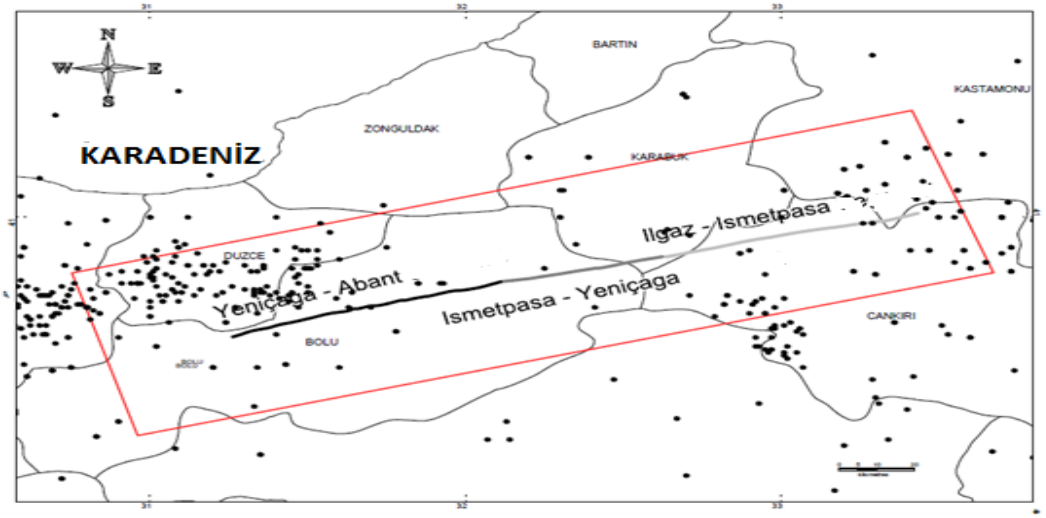
$$c = \frac{\beta \exp(-\beta\,(\mathrm{Mmax} - \Delta\mathrm{M}_1 - \Delta\mathrm{M}_2 - \mathrm{Mmin}))}{1 - \exp(-\beta\,(\mathrm{Mmax} - \Delta\mathrm{M}_2 - \mathrm{Mmin}))} \mathrm{x}\, \Delta\mathrm{M}_2 \quad (2)$$

olarak hesaplanabilir. Youngs ve Coppersmith (1985)'e göre sismik tehlike eğrisi "b" değerinin değişmesinden fazla etkilenmese de deprem büyüklüğünün üst limitinden etkilenecektir (M_{max}).Denklem 1 ve 2'de verilen minimum deprem büyüklüğü değeri mühendislik uygulamaları göz önüne alınarak M_w=4.5 olarak belirlenmiş, maksimum deprem büyüklüğü ise her sismik kaynak için karakteristik deprem büyüklüğüne 0.25 eklenerek hesaplanmıştır.

Kesik üstel model veya kompozit model uygulamalarında "b" değerinin hesaplanması küçük depremlerin frekanslarının tanımlanması açısından mecburidir. Fay geometrilerinin tam olarak belirlenemediği ve alan kaynakların tanımlandığı durumlarda genellikle bölgesel depremsellik analizinden elde edilen "b" değeri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında "b" değerini hesaplayabilmek için Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü tarafından yayınlanan en güncel bütünleştirilmiş Türkiye Deprem Kataloğu kullanılmıştır

(Kalafat, 2010).Çalışma alanı içine düşen depremlerin merkezüssü dağılımı Şekil 3'de görülebilir. Aynı depremlerin deprem büyüklüklerine göre adet dağılımı ise Tablo 3'de gösterilmektedir. Listelenen merkezüssü bilgileri kullanılarak, tanımlanan tüm sismik kaynaklar için "b" değeri 0.6 olarak hesaplanmıştır.

"b" değerindeki değişkenliğinin sismik tehlike eğrisi üzerindeki etkisini gösterebilmek için bir duyarlılık analizi planlanmış ve analiz kapsamında "b" değeri sırasıyla 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, ve 1.0 olarak seçilerek Bolu Şehir Merkezi için OSTA yapılmıştır. Analiz sonucunda oluşturulan sismik tehlike eğrileri (kırmızı eğri "b" değerinin 0.6 olduğu temel durumu göstermektedir) Şekil 4'de kıyaslanmıştır. Şekil 4'ten de anlaşılacağı üzere "b" değerinin sonuç üzerindeki etkisi, özellikle mühendislik önemi arzeden yüksek risk seviyeleri için, ihmal edilebilir düzeydedir.



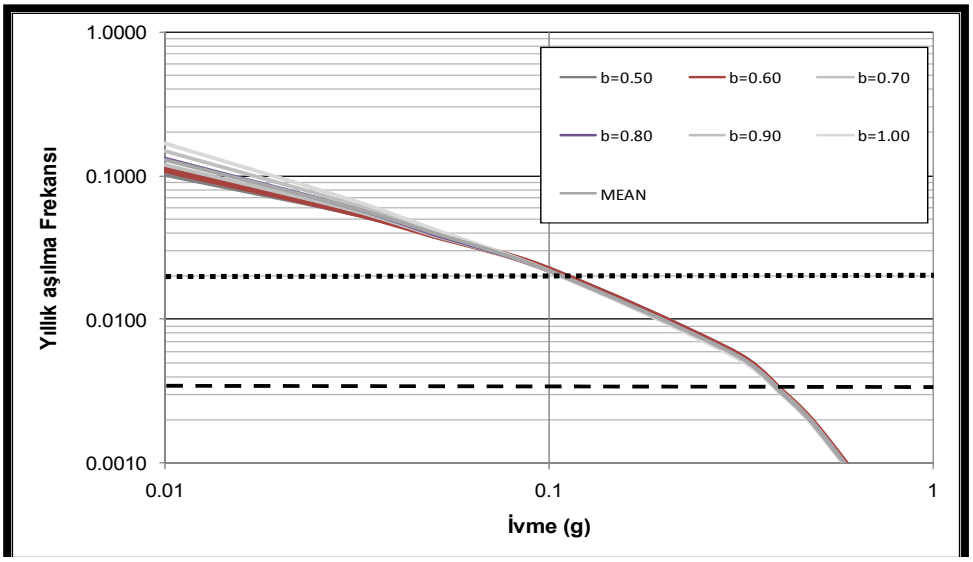
Şekil 3. Çalışma bölgesi içerisindeki depremlerin merkez üssü lokasyonlarının dağılımı

Tablo 3. Çalışma bölgesi içerisindeki depremlerin büyüklük aralığına göre adet dağılımı

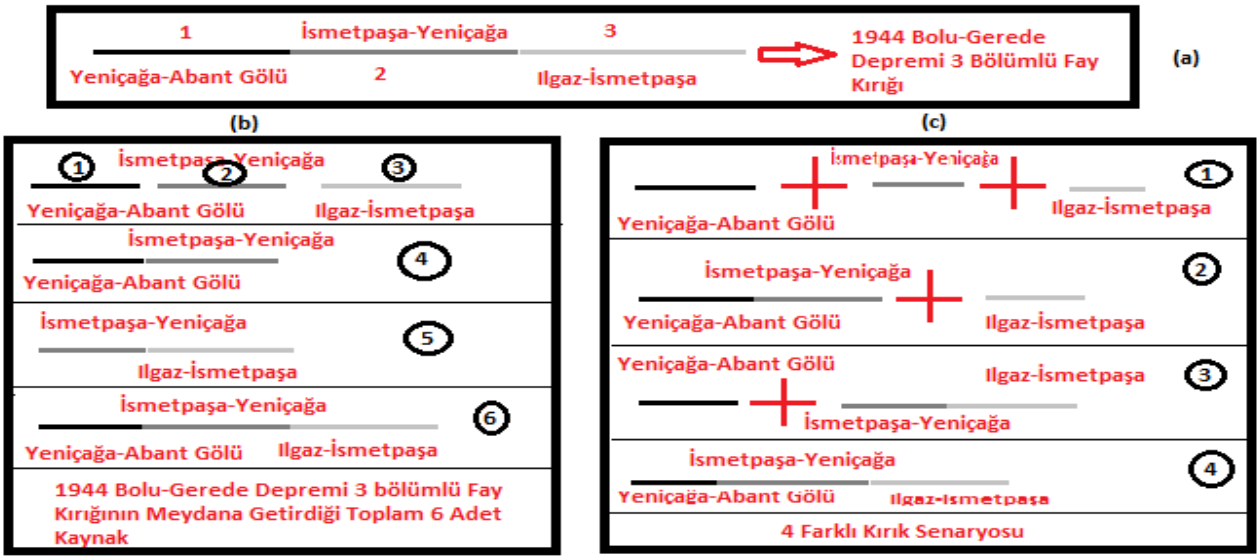
Büyüklük Aralığı	Deprem Adedi
≥ 4 - < 4.5	78
≥ 4.5 - < 5.0	46
≥ 5.0 - < 5.5	26
≥ 5.5 - < 6.0	10
≥ 6.0 - < 6.5	2
≥ 6.5 - < 7.0	2
≥ 7.0	2
Toplam	**166**

Fay kırılma modeli oluşturulurken Amerika Jeoloji Araştırma Kurumu (USGS) Kalifornia Çalışma Grubu'nun önerdiği model örnek alınmıştır (WGCEP-2003). WGCEP-2003 kapsamında *fay bölümü* tekrarlanabilir büyük depremler üreten en kısa uzunluktaki fay parçası olarak tanımlanmıştır, bu tanıma göre 1944 Bolu-Gerede depremi kırık bölgesi ardışık ve üst üste binmeyen 3 fay bölümü halinde değerlendirilebilir (Şekil 5a). Aynı model kapsamında *sismik kaynak* bir veya birbiri ardına devam eden birden fazla fay bölümünün birleşimi olarak tanımlanır. Şekil 5(b)'de görüleceği üzere 3 bölümlü bir fay toplam 6 adet sismik kaynak oluşturur. Bu kaynaklar; fay segmentlerinin kendi içlerinde bireysel kırıldığı kaynaklar (Şekil 5(b)'deki kaynak 1,2 ve 3), 2 ardışık fay bölümünün birleşerek kırıldığı kaynaklar (Şekil 5(b)'deki kaynak 4 ve 5) ve 3 ardışık fay bölümünün birleşerek kırıldığı kaynaklar (Şekil 5(b)'deki kaynak 6) olarak tanımlanmaktadırlar. Sismik kaynakların, tüm

fayın kırılmasına yok açan herhangi bir kombinasyonu WGCEP-2003 kapsamında *fay kırılım senaryosu* olarak isimlendirilir. Yukarıda tanımlanan 6 adet sismik kaynak toplam 4 adet kırık senaryosu oluşturmaktadır (Şekil 5(c)). Bu senaryolar; 3 fay bölümünün kendi başlarına ayrı ayrı kırılma senaryosu (Şekil 5(c)'deki senaryo 1), başlangıçtaki 2 ardışık fay bölümünün beraber ve son fay bölümünün tek başına kırılma senaryosu (Şekil 5(c)'deki senaryo 2), ilk fay bölümünün tek başına ve son iki ardışık bölümün beraber kırılması senaryosu (Şekil 5(c)'deki senaryo 3) ve ardışık 3 fay bölümünün beraber kırılması senaryosu (Şekil 5(c)'deki senaryo 4) olarak özetlenebilir.



Şekil4.Bolu Şehir Merkezi için farklı "b"değerleri kullanılarak elde edilen sismik tehlike eğrileri



Şekil 5. WGCEP-2003 tanımları doğrultusunda 3 bölümlü bir fay kırığının bölüm, sismik kaynak ve kırılma senaryo şeması (Gülerce ve Ocak (2013)'ten adapte edilmiştir)

Tüm kırılım senaryolarının ağırlıklı ortalaması fay kırılım modelini oluşturur ve mantık ağacı kullanılarak OSTA çerçevesine adapte edilir.Tanımlanan bu yöntemin 1944 Bolu-Gerede depremi kırık bölgesine uyarlanması Tablo 4'de gösterilmektedir. Tablo 4'de her bir kırılma senaryosu içerisinde var olan sismik kaynak "1" rakamı ile ve yer almayan sismik kaynak "0" rakamı ile ifade edilmiştir.

Tablo 4. 1944 Bolu-GeredeDepremikırılma bölgesi için kırılma senaryosu ve sismik kaynak listesi

Sismik Kaynaklar / Kırık Senaryoları	S1	S2	S3	S(1+2)	S(2+3)	S(1+2+3)
S1, S2, S3	1	1	1	0	0	0
S(1+2), S3	0	0	1	1	0	0
S1, S(2+3)	1	0	0	0	1	0
S(1+2+3)	0	0	0	0	0	1

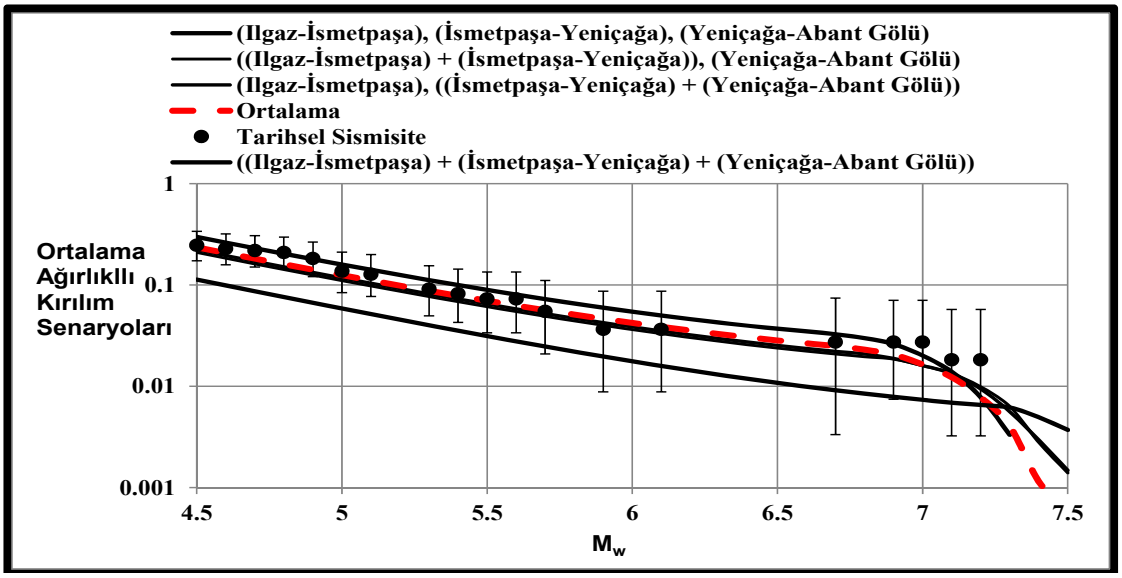
S1 = Ilgaz - İsmetpaşa Bölümü (Bölüm-1)
S2 = İsmetpaşa - Yeniçağa Bölümü (Bölüm-2)
S3= Yeniçağa - Abant Gölü Bölümü (Bölüm-3)

4. SİSMİK MOMENTİN DENGELENMESİ YÖNTEMİ

Fay kırılım senaryolarına mantık ağacına konmak üzere uygun ağırlıklar atayabilmek için fay kırığının geçmişte ürettiği deprem aktivitesi hakkında yeterli ve doğru bilgi sahibi olmak gerekir. Bu amaçla, deprem kataloğundaki merkezüsü bilgileri 1944 depremi fay kırığı ile eşleştirilmiş ve eşleştirilen depremlerin boşalttığı sismik momentin fay boyunca biriken sismik moment ile dengelenmesi yöntemi kullanılmıştır. Moment dengeleme yöntemi Denklem 3'te tanımlanmıştır.

$$N(M) = \frac{\mu \times A \times s}{\int_{M_{min}}^{M_{max}} f_M(M) \times 10^{1.5M+16.05}} \int_{M_{min}}^{M_{max}} f_M(M) \qquad (3)$$

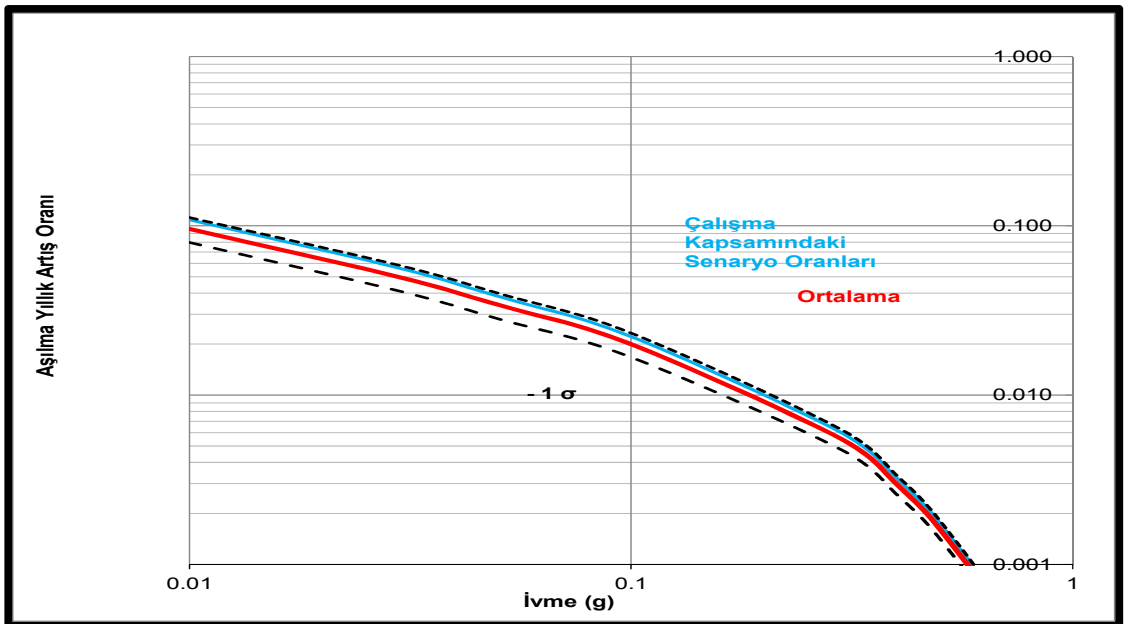
Denklem 3'te yıllık kayma hızı s ile, fay alanın A ile, deprem büyüklüğü dağılım modeli $f_M(M)$ ile gösterilmiştir ve $10^{1.5M+16.05}$ her bir depremin boşaltabildiği sismik momenti temsil etmektedir (Hanks ve Kanamori, 1979).



Şekil 6.1944 depremi kaynak bölgesi için tasarlanan fay kırılma modeli

Tablo 4'te gösterilen her fay kırığı senaryosu için Denklem 3 kullanılarak hesaplanan eğriler ve bu eğrilerin ağırlıklı ortalaması (kırmızı çizgi) Şekil 6'da gösterilmektedir. Aynı şekil üzerinde katalogdaki sismik aktiviteninin deprem büyüklüğüne göre dağılımı siyah noktalar ile verilmiştir. Noktalar üzerinde gösterilen hata çizgileri, Weichert (1980) tarafından belirlenen hata oranları kullanılarak çizilmiştir. Fay kırılma modelinin ağırlıklı ortalaması (biriken sismik enerji) ve deprem aktivitesi (boşalan sismik enerji) arasındaki dengeyi sağlayan en uygun senaryo ağırlıkları belirlenmiştir.

Her bir kırılma senaryosunun fay kırılma modeline katkısını belirlemek için bir duyarlılık analizi tasarlanmış ve senaryoların ağırlıkları değiştirilerek Bolu Şehir Merkezi için OSTA analizleri tekrarlanmıştır. Toplamda 223 farklı katılım oranlı senaryo için yapılan analizlerin ortalaması ve 65 persentil eğrileri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'deki kırmızı eğri ortalama değeri, mavi eğri ise bu çalışma kapsamında kullanılan ağırlıklı ortalamalara tekabül eden tehlike analizi eğrisini temsil etmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan ağırlıklı ortalamaların sonucunda elde edilen tehlike eğrisi, ortalama tehlike eğrisi değerine çok yakın ancak kısmen üzerindedir. Bu da kullanılan kırılım senaryosu ağırlıklı ortalama değerlerinin uygun seçilmiş olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 7. Bolu Şehir Merkezi için farklı senaryo ağırlıkları kullanılarak elde edilen sismik tehlike eğrileri

5. BULGULARIN ÖZETİ VE SONUÇ

Tamamlanma aşamasında olan bu çalışmanın amacı, 1944 Bolu-Gerede Depremi kırılma bölgesi için OSTA çerçevesinde kullanılacak sismik kaynak karakterizasyon modelinin oluşturulması ve bu modeldeki belirsizliklerin OSTA sonuçlarına olan etkisinin irdelenmesidir. Çalışma kapsamında kırılma bölgesi için düzlemsel fay geometrisi tanımlanmış ve literatürdeki segmanlanma modelleri göz önünde bulundurularakalt bölüm geometrileri (uzunluk, derinlik ve bölümlenme noktaları) belirlenmiştir. Ek bir arka-plan sismik kaynağı tanımlanmadan KAF'ın karakteristik davranışını doğru bir şekilde yansıtabilmekiçin kompozit büyüklük dağılım modeli (Youngs ve Coppersmith, 1985) tercih edilmiştir. Komposit deprem büyüklü dağılım modelinin parametreleri (b değeri ve maksimum deprem büyüklüğü) güncel deprem kataloğu kullanılarak belirlenmiştir. Fay bölümleri, sismik kaynaklar, kırılma senaryoları ve fay kırığı modeli WGCEP-2003 terminolojisi kullanılarak tanımlanmış ve çok-bölümlü kırılma senaryoları dikkate alınmıştır. Fay kırılma modeli

tanımlandıktan sonra kırılma senaryolarının ağırlıkları sismik momentin denkleştirilmesi yöntemi ile belirlenmiştir. Tasarlanan sismik kaynak modelindeki parametrelerin belirsizliklerinin sonuç üzerindeki etkisi, duyarlılık analizleri sonucunda elde edilen sismik tehlike eğrileri karşılaştırılarak irdelenmiştir.

Çalışma sonucunda "b" değerinin sismik tehlike eğrisi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu gözlenmiştir, komposit model tercih edildiği için bu sonuç beklentiler dahilindedir. Senaryolara atanan ağırlıkların sonuç üzerindeki etkisi ise daha büyüktür, dolayısıyla alt bölüm geometrilerinin doğru belirlenmesi OSTA sonuçlarının güvenilirliğini arttıracaktır. Bu çalışma kapsamında 1944 Bolu-Gerede Depremi kırığı bölgesi için oluşturulan sismik kaynak modeli dünya literatüründeki en güncel yöntemleri (WGCEP-2003 fay kırılım modeli ve sismik momentin denkleştirilmesi yöntemi) kullanılarak oluşturulmuştur ve bölgede yapılacak OSTA analizlerinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Ambraseys, N. N. (1970). Some characteristic features of the Anatolian fault zone, *Tectonophysics* **9,** 143–165.

Ambraseys, N.Nve Jackson,J.A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, *Geophysical Journal International*, **133,** 390–406.

Ayhan, M. E. ve Koçyiğit, A. (2009). Displacements and kinematics of the February 1, 1944 Gerede Earthquake (North Anatolian Fault System, Turkey): Geodetic and Geological Constraints,*Turkish Journal of Earth Sciences*, **19,** 285–311.

Aytun, A. (1982). Creep measurements in the Ismetpasa region of the North Anatolian Fault Zone, in: Multidisciplinary approach to earthquake prediction, edited by: Isikara, A. M. and Vogel, A., 2. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 279–292.

Barka, A. A. (1996). Slip distribution along the North Anatolian fault associated with large earthquakes of the period 1939 to 1967, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86,** 1234–1238.

Barka, A.A. ve 22 diğer yazar, (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault,*Bulletin of the Seismological Society of America*, **92,** 43-60.

Çakir, A., Akoglu, M., Belabbes, S., Ergintav,S. ve Meghraoui,M. (2005). Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR, Ear. Pla. Sci. Let., **238,** 225–234.

Deniz, R., Aksoy, A., Yalin, D., Seeger, H., ve Hirsch, O. (1994). Determination of crustal movement in Turkey by terrestrial geodetic methods, J. Geodyn., **18,** 13–22.

Dewey, J. W. (1976). Seismicity of Northern Anatolia, *Bull. of the Seismo. Society of America,* **66,** 843-868.

Gülerce, Z. ve Ocak, S. (2013). Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Eastern Marmara Region, *Bulletin of Earthquake Engineering. (online DOI 10.1007/s10518-013-9443-6).*

Herece, E. (2005). Neotectonics of the Western Section of the North Anatolian Fault Zone. PhD Thesis, Ankara University, Ankara.

Jackson, J. ve McKenzie, D. (1988). The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East,*Geophysics J.*, **93,** 45-73.

Kalafat, D. (2010). Statistical Evaluation of Turkey Earthquake Catalog: Case Study.

Karabacak, V., Altunel, E., Çakır, Z. (2011) Monitoring aseismic surface creep along the North Anatolian Fault (Turkey) using ground-based LIDAR: Earth and Planetary Science Letters**,** Vol.304, Issues 1–2,**1,** Pages 64–70.

Ketin, L. (1948). Son on yılda Türkiye'de vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında, *TJK Bülteni* **2:1,** 1-13.

Ketin, I. (1969). Uber die nordanatolishe horizontal verschiebung, *Bull. Min. Res. Explor. Inst. Turkey,***72,** 1–28.

Kondo, H., Awata, Y., Emre, Ö., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F., Yıldırım, C., Yoshioka, T., Okumura, K. (2005). Slip Distribution, Fault Geometry, and Fault Segmentation of the 1944 Bolu-Gerede Earthquake Rupture, North Anatolian Fault, Turkey: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95:4,** 1234–1249.

Kondo, H., Özaksoy, V., ve Yıldırım, C. (2010). Slip history of the 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture along the North Anatolian fault system: Implications for recurrence behavior of multisegment earthquakes: Journal of Geophysıcal Research, vol. **1,** 115.

Kutoglu, H. S. ve Akcin, H. (2006). Determination of 30-Year Creep on The Ismetpasa Segment of the North Anatolian Fault Using an Old Geodetic Network, Earth Planets Space, **58,** 937–942

Kutoğlu, H. S., Akcin, H., Kemaldere, H., Görmüş, K. S. (2008) Triggered creep rate on the Ismetpasa segment of the North Anatolian Fault: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **8,** 1369–1373.

Lienkaemper, J.J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74:6,** 2379-2411.

Meade, B.J., Hager, B.H., McClusky, S.C., Reilinger, R.E., Ergintav, S., Lenk, O., Barka, A., Ozener, H. (2002). Estimates of seismic potential in the Marmara Sea region from Block modles of secular deformation constrained by global positioning system measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**, 1238-1254.

Oztürk, A., S. Inan, and Z. Tutkun (1985). Abant-Yeniçağa Yöresinin Tektoniği, *Bull. Earth Sci. Cumhuriyet Univ.***2,** 35-52.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G. (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:B5,** B05411.

Tatar, O., Poyraz, F., Gürsoy, H., Cakir, Z., Ergintav, S., Akpınar, Z., Koçbulut, F., Sezen, F., Türk, T., Hastaoğlu, K.Ö., Polat, A., Mesci, B.L., Gürsoy, O., Ayazli, I.E., Çakmak, R, Belgen, A. and Yavaşoğlu, H. (2011). Crustal deformation and kinematics of the Eastern Part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) from GPS measurements. *Tectonophysics* **518**, 55–62.

Taşman, C. E. (1944). Gerede-Bolu depremi, *Bull. Mineral Res. Explor. Inst. Turkey,***1,** 31.

Ugur, E. (1974). Analysis of the Crustal Movements along the North Anatolian Fault Using Geodetic Methods, PhD Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

Weichert, D. H. (1980).Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **4,** 1337–1346.

Wells, D.L. ve Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America,* **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. Seismological Soc. Am. **75:4,** 939–964.