



Faylara olan güvenli uzaklığın sismik yöntemle hesaplanması

Determination of safe distances from faults using the seismic method

Berkan ECEVİTOĞLU, Bülent KAYPAK, Gülsev UYAR ALDAŞ

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06100 Beşevler, ANKARA

Geliş (received) : 24 Temmuz (July) 2008

Kabul (accepted) : 05 Ocak (January) 2009

ÖZ

Bu çalışmada, faya olan güvenli uzaklığın sismik yöntemle hesaplanması için bir yöntem önerilmektedir. Yöntem, arazi ölçümlerine bağlı, herhangi bir yapay (bina) ve doğal (jeolojik) unsura bağlı olmayan nicel değerlendirmelere dayanmaktadır. Yöntemin esası, faya yakın çevredeki soğurganlığın ölçülmesidir. Kaynak ve en az iki alıcının aynı profil üzerinde bulunduğu bir arazi düzeninde, iki alıcı arasındaki ortamın soğurganlığı, bu istasyonlarda kaydedilen sismik dalgacıkların (yüzey dalgalarının) spektral oranlarının doğal logaritmasından hesaplanır. Bu ilişki doğrusal olduğundan, soğurganlık basit bir şekilde ilgili doğru parçasının eğiminden hesaplanır. Başka bir deyişle, sismik kalite faktörü (Q) ve sismik dalga hızına (v) bağlı A eğim parametresi, fay üzerinde yapılan bir veya birden fazla sismik ölçümle belirlenir; fay üzerinde ve fay doğrultusuna dik x uzaklığında ölçülen titreşim genliklerinin spektral oranına bağlı olarak r genlik azalması elde edilir. Böylece, istenilen deprem etken frekansı f ve genlik azalma oranı r için gereken faya olan güvenli uzaklık sınırı x bulunabilir. Bu çalışmada, ölçümler fay boyunca ve fayın her iki bloğunda yapılmıştır. 1 Hz etken frekansa sahip bir deprem için, titreşim genliği oranının 0.1 olması istendiğinde, fayın güney bloğundaki güvenli uzaklık 56 m, kuzey bloğundaki güvenli uzaklık ise 73 m bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Faya olan güvenli uzaklık, sismik kalite faktörü, soğurulma.

ABSTRACT

In this study, a method for determining the safe distance from a fault is proposed. The method is based on quantitative evaluations related to field measurements. Those evaluations are not based on any artificial (building) or natural (geological) materials. The principle of the method is to measure the absorptivity of the environment close to the fault. The absorptivity of an environment between two receivers (the source and at least two receivers should have the same profile) is calculated from the natural logarithms of the spectral ratios of seismic waves (surface waves) recorded at these stations. Because of this linear relationship, absorptivity can be calculated from slope of the line. In other words, parameter A , which depends on seismic quality factor (Q) and seismic wave velocity (v), is determined from one or more seismic measurements carried out on the fault. A decrease in amplitude, (r), which depends on the spectral ratio of vibration amplitudes measured on the fault and the perpendicular x distance to the fault. Therefore, using the proposed method, a buffer zone width, x , may be computed for a desired earthquake with a known dominant frequency f , and an amplitude ratio r . In this study, the measurements were done along the fault line and on each block of the fault. If the vibration amplitude ratio, (r), is desired to be 0.1 for a 1 Hz dominant earthquake frequency, safe distances on the south and north blocks of the fault were calculated as 56 m and 73 m, respectively.

Keywords: Safe distance to fault, seismic quality factor, absorption.

GİRİŞ

Toplumumuzun, bir kuşak gibi kısa bir sürede, başından geçen deprem felaketlerini unutmaya zaafı olduğu malumdur. Yıkılan binaların yerleri birkaç yıl içinde yenileriyle doldurulur, birkaç on yıl sonra başka bir depremle bunlar tekrar yıkılır, yerine yenileri yapılır. İçinde yaşadığımız bilgi çağına rağmen üzerimizde yarattığı farkındalık ve sorumluluk bilinci, geçmişten ders almamızı sağlamıştır. Faya olan güvenli uzaklık kavramı bunlardan birisidir.

Özellikle ABD (California Public Resources Code, 1970; Batatian, 2002; Rosenberg, 2005) ve Yeni Zelanda (Perrin ve Wood, 2003; Becker vd., 2005) örneklerine bakılırsa, faya olan güvenli uzaklığın belirlenmesi, inşaat mühendisleri, jeolog ve şehir plancılarının ilgi alanına girmektedir. Yapılan değerlendirmeler, genelde gözlemsel ve nitel esaslara dayanır. Fayın yüzlek vermediği veya izlerinin silindiği ve fayın etkilerinin (heyelan, sıvılaşma, kırık ve çatlaklar) belirgin olmadığı durumlarda veya fayın etkilerinin gözlenebildiği herhangi bir yapılaşmanın bulunmadığı bölgelerde, faya olan güvenli uzaklık hakkında değerlendirme yapılması güçleşmektedir. Öte yandan, her ne kadar fay hattı üzerine denk gelen yapılar doğrudan fayın mekanik hareketi ile hasar görseler de, fay hattı üzerinde bulunmayan yapıların deprem kaynaklı titreşimlerden etkilendiği yadsınamaz bir gerçektir.

Bu çalışmaya konu olan yöntem, arazi ölçümlerine bağlı ancak herhangi bir yapay (bina gibi) ve doğal (jeolojik) unsura bağlı olmayan nicel değerlendirmelere dayanmaktadır. Ölçümlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar, yorum farklılıklarını en aza indirmekte ve ölçümler açık arazide alınabildiği gibi yerleşim alanlarında da alınabilmektedir.

Yöntemin esası, faya yakın çevredeki soğurganlığın ölçülmesine dayanmaktadır. Kayaçlardaki soğurganlık frekans bağımlı olduğu için, hesaplamaların spektral ortamda yapılması gerekmektedir. Nispeten kuru kayaçlarda katı-katı sürtünmesi ile oluşan soğurlama, frekansın birinci kuvveti ile orantılıdır (White, 1983). Kaynak ve en az iki alıcının aynı profil üzerinde bulunduğu bir arazi düzeninde, iki alıcı arasındaki ortamın soğurganlığı, bu istasyonlarda kaydedilen sismik

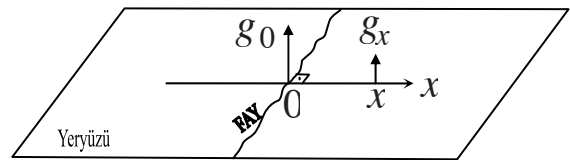
dalgacıkların (yüzey dalgalarının) spektral oranlarının doğal logaritmasından hesaplanır. Bu ilişki doğrusal olduğundan, soğurganlık basit bir şekilde ilgili doğru parçasının eğiminden hesaplanır. Bu hesaplama, ortamın sismik kalite faktörü (Q) ve sismik faz hızı (v) 'nin ayrı ayrı bilinmesini gerektirmemektedir. Benzer yaklaşımı Liu vd. (2005), yakın-alanda sismik anizotropi, sönümleme ve dispersiyonu incelemek için kullanmıştır. Bu araştırmacılar çalışmalarında sismik kalite faktörünü bağımsız hesaplamışlar ve bunun için direkt ve yansıyan dalga fazları arasındaki genlik spektrum oranını kullanmışlardır. Bu çalışmada ise Q ve v çarpımı beraber hesaplanmakta, diğer çalışmadan farklı olarak alıcılarda kaydedilen yüzey dalgalarının spektral oranlarının doğal logaritmasından yararlanılmaktadır.

SİSMİK DALGALARDA SOĞURLAMA

Sismik dalgalarda soğurulma frekansa bağımlıdır. Alçak frekanslar daha az soğurulurken, yüksek frekanslar daha fazla soğurulurlar (Stein ve Wysession, 2003).

Şekil 1 'de gösterildiği gibi, fay üzerinde g_0 genlikli bir titreşim, fay doğrultusuna dik x uzaklığında g_x genliğine sahipse, aralarındaki ilişki Strick (1970), Kjartansson (1979) ve White (1983) tarafından Eşitlik 1 'de verilmiştir.

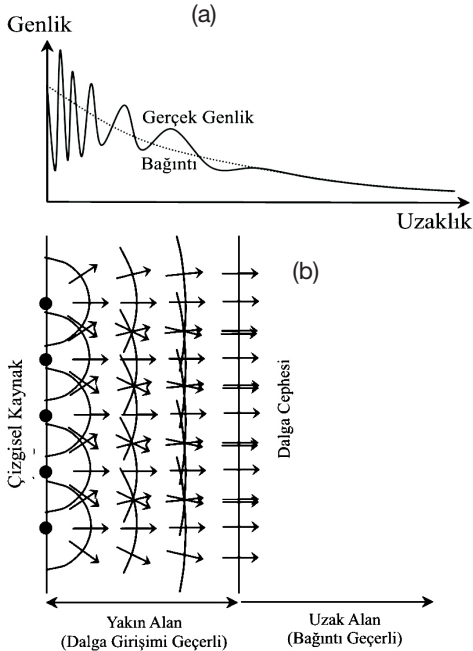
$$g_x = \frac{e^{-Afx}}{\sqrt{x+1}} g_0 \quad (1)$$



Şekil 1. Faya dik yönde titreşim genliğinin azalması.
Figure 1. Decrease in vibration amplitude at a direction perpendicular to the fault.

Bu bağıntı "uzak alan" için geçerlidir. Şekil 2a'da, gerçek genlik ve bu çalışmada kullanılan model bağıntı (kesikli çizgiyle gösterilen) gösterilmiştir. Şekil 2b'de düşey yönde sıralanmış 5 adet nokta sismik kaynaktan oluşan bir çizgisel kaynak görülmektedir (Huygens Yasası, Waters, 1981; Doyle, 1995; Udias, 1999). Çizgisel kaynaktan yola çıkan sismik dalgalar, homojen-izotrop bir

ortamda, yarıçapları giderek büyüyen daireler şeklinde sağa doğru yayılmaktadırlar. Çizgisel kaynağa yakın, daire yarıçaplarının küçük olduğu yerlerde, daire yaylarına dik oklarla gösterilmiş sismik ışınlar birbirleriyle açılı konumdadırlar. Bu durum, sismik dalgaların girişimine neden olur. Yersel ve zamansal şartlara bağlı olarak, sismik dalga girişimleri karmaşık bir şekilde birbirlerini destekledikleri gibi (yapıcı girişim), birbirlerini yok da edebilirler (yıkıcı girişim). Bu bölge “yakın alan” olarak adlandırılır (Bullen ve Bolt, 1985; Udias, 1999; Aki ve Richards, 2002) ve bu çalışmaya esas oluşturan model bağıntı bu bölgede geçerli değildir. Şekil 2a’da gösterildiği gibi, “yakın alan”da gerçek genlik değişimi kaotik bir salınım izler. Şekil 2b’de, okların birbirlerine paralel olduğu yerde, parçacık hareketleri aynı fazdadırlar ve dalga cephesinin oluşmasını sağlarlar. Bu noktadan itibaren sağa doğru “uzak alan”a geçilir ve çalışmanın esasını oluşturan model bağıntı bu bölgede geçerlidir. “Yakın alan” bölgesinin boyutlarını, fay yüzeyi geometrisi, yırtılma hızı ve yönü ile sismik dalga boyları (hız ve etken frekans) belirler.



Şekil 2. (a) Yakın alan / uzak alan tanımı (Gerçek genlik ve model bağıntısı ilişkisi), (b) Yakın alan / uzak alan tanımı (Huygens yasası).

Figure 2. (a) Definition of near field / far field (Relation of real amplitude and model equation), (b) Definition of near field / far field (Huygens principle).

Eşitlik 1’de f frekans (Hz) ve x fay doğrultusuna dik uzaklıktır (m). A ise (s/m),

$$A = \frac{\pi}{Qv} \quad (2)$$

eşitliğiyle verilmekte olup, Q sismik kalite faktörü (birimsiz) ve v (m/s) sismik dalga hızıdır. Eşitlik 2’nin frekans bağımlı hali Eşitlik 3’te verilmiştir.

$$A = \frac{\pi}{Q(f)v(f)} \quad (3)$$

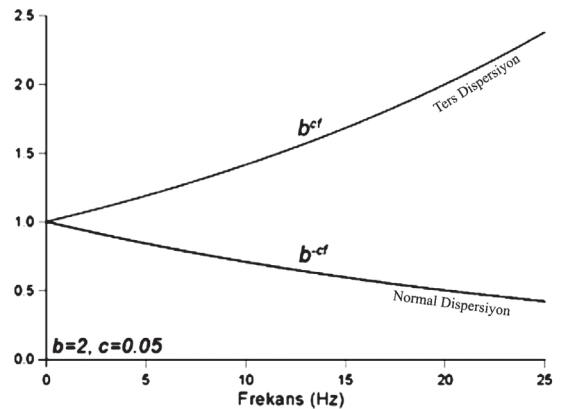
Bu durumda Q ve v , dispersif özellikler gösterirler. A parametresinin kolay bir şekilde ters dispersiyon eğrisinin eğiminden hesaplanabilmesi için, Q ve v frekansın fonksiyonu olsalar dahi, Qv çarpımının frekans bağımsız olarak kabulü (Bath, 1974; Anderson ve Hart, 1978; Liu, Teng ve Ben-Zion, 2005; Quan ve Harris, 1997), hesaplamalarda istenen kolaylığı sağlar. Örneğin $Q(f)$ ve $v(f)$,

$$Q(f) = Q_0 b^{cf}; \quad v(f) = v_0 b^{-cf} \quad (4)$$

şeklindeki model fonksiyonlarla ifade edilirse, Eşitlik 3

$$A = \frac{\pi}{Q_0 v_0} \quad (5)$$

halini alır. b^{cf} ve b^{-cf} fonksiyonlarının davranışı, $b=2$ ve $c=0.05$ değerleri için Şekil 3’de çizilmiştir. Q_0 ve v_0 sırasıyla sıfır frekansındaki Q ve v ’nin aldığı değerlerdir. Bu örnekte $Q(f)$ ters dispersiyon gösterirken, $v(f)$ normal dispersiyon göstermektedir.



Şekil 3. Q ve v ’nin frekans bağımlılığı.
Figure 3. Frequency dependency of Q and v .

Faya çok yakın uzaklıklarda dalga fazları (cisim ve yüzey dalgaları) henüz ayrılmaya zaman bulamamışlardır. Eşitlik 1'de, paydada görülen kareköklü ifade ($x = 0$ belirsizliğini ortadan kaldırmak için x 'e 1 eklenmiştir) yüzey dalgalarına ait geometrik yayılmaya işaret etmekte ve artan uzaklıklarla genliklerin giderek azaldığını göstermektedir (Sheriff ve Geldart, 1982; Aki ve Richards, 2002). Eşitlik 1, soğurulmanın sismik genlikler üzerinde üstel sönümleyen bir fonksiyon olarak çalıştığını, artan frekans ve uzaklıklarla soğurulmanın daha da etkili hale geldiğini belirtmektedir. Eşitlik 2, Q ve/veya ν 'nin artması halinde A 'nın, dolayısıyla soğurulma etkisinin azalacağına işaret etmektedir. A parametresi fay üzerinde yapılan bir veya birden fazla sismik ölçümle belirlenir.

Bu çalışmada 1 no. lu eşitlikten g_x / g_0 oranı çekilip, g_0 birim uzunluk alınmış ve

$$\frac{g_x}{g_0} = r = \frac{e^{-Afx}}{\sqrt{x+1}} \quad (6)$$

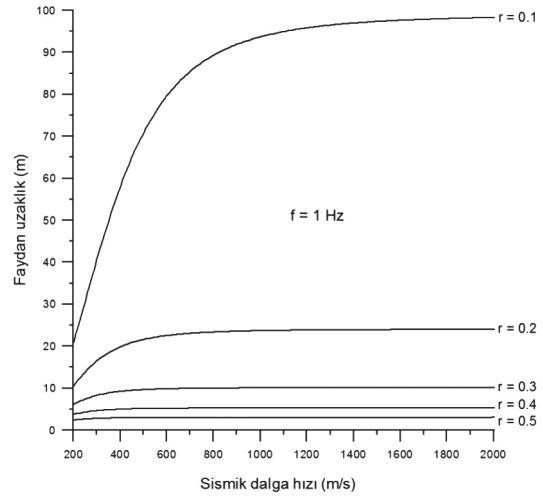
r genlik azalma oranı (yüzdesi) elde edilmiştir. Örneğin $r = 0.1$ (%10) alınırsa, faya dik yönde ve x uzaklığında bir noktadaki genliğin, fay üzerindeki genliğin 0.1 'i olması gerektiği anlaşılır. 6 no. lu eşitlikte, verilen r , A ve f değerleri için x 'in çözülmesi gerekir. Eşitlik 6 doğrusal olmadığından, çözüme bilgisayar ortamında yinelemeli yöntemlerle ulaşılmaktadır.

Örnek grafiklerin elde edilmesi amacıyla aşağıdaki deneysel eşitlik kullanılmıştır.

$$A = \frac{\pi}{Q\nu} = \left(\frac{c}{\nu}\right)^3, \quad c = 66.33 \quad (7)$$

7 no. lu eşitlik, Q ve ν arasındaki ampirik bağıntıya dayanmaktadır (Waters, 1981).

Şekil 4 'de, deprem etken frekansı f 'nin 1Hz olması durumunda (büyük depremlerin ürettiği tipik etken frekans), sismik dalga hızı ν 'nin 200 - 2000 m/s aralığında değişmesiyle, 6 no. lu eşitlikte verilen x uzaklığının aldığı değerler grafik halinde verilmiştir. r 'nin 0.3 ve daha büyük değerleri için x uzaklığı 10 m'den az olup, eğrilerin biçimleri ν sismik dalga hızından etkilenmemektedir. $r = 0.1$ genlik azalma oranı için eğrinin biçimi sismik dalga hızına bağlıdır ve $\nu = 2000$ m/s dolaylarında x uzaklığı 100 m'ye kadar



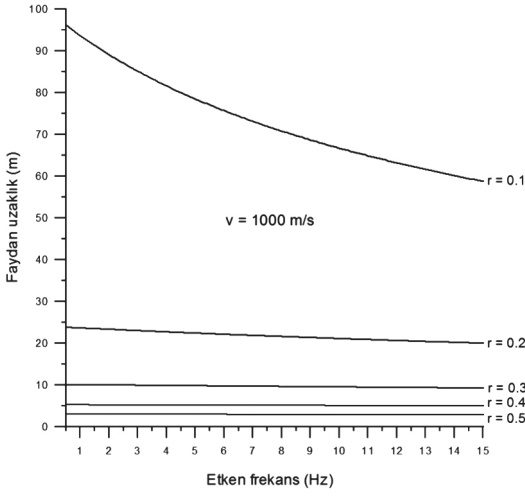
Şekil 4. Eşitlik 6'nın, x için, $f = 1$ Hz ve $\nu = 200 - 2000$ m/s aralığında çözümü (Eğriler $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ve 0.5 için üretilmiştir).

Figure 4. Solution of Equation 6 for x , at an interval of $f = 1$ Hz and $\nu = 200 - 2000$ m/s (The curves were produced for $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5).

ulaşmaktadır. Sismik dalga hızı ν 'nin 1000 m/s olması durumunda (büyük depremlerin ürettiği tipik yüzey dalgası hızı), deprem etken frekansı f 'nin 0.5 - 15 Hz aralığında değişmesiyle, 6 no. lu eşitlikte verilen x uzaklığının aldığı değerler Şekil 5'te verilmiştir. r 'nin 0.3 ve daha büyük değerleri için x uzaklığı 10 m'den az olup, eğrilerin biçimleri f deprem etken frekansından etkilenmemektedir. $r = 0.1$ genlik azalma oranı için eğrinin şekli f deprem etken frekansına bağlıdır ve $f = 0.5$ Hz dolaylarında x uzaklığı 100 metrelere kadar ulaşmaktadır.

Eşitlik 6 ve bununla ilgili Şekil 4 ve 5 'deki grafiklerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

(a) Q ve ν 'ye bağlı A parametresinin fay boyunca gösterdiği değişim, faya dik yöndeki x uzaklıklarını (güvenli bölge sınırlarını) etkilemektedir. Fayı çevreleyen jeolojik birimlerin soğurgan (düşük Q 'lu) ve düşük sismik dalga hızlarına sahip olması, depremlerle ortaya çıkan enerjinin önemli bir kısmının fay çevresinde yutulacağı ve yayılmasının önleneyeceği anlamına gelmektedir. Buradan çıkan ilginç sonuç, ilk kez kırılan bir fayın daha etkili olduğudur. Aynı kırık boyunca sürekli tekrarlanan depremler, içinde oluştukları çevre



Şekil 5. Eşitlik 6'nın x için, $v = 1000$ m/s ve $f = 0.5 - 15$ Hz aralığında çözümü (Eğriler $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ve 0.5 için üretilmiştir).

Figure 5. Solution of Equation 6 for x at an interval of $f = 0.5-15$ Hz and $v = 1000$ m/s (The curves were produced for $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5).

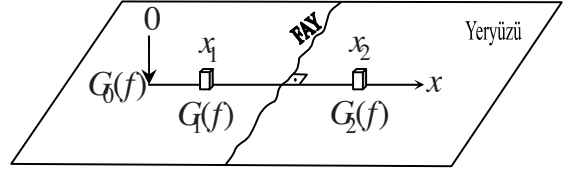
kayaçların Q ve v değerlerini giderek düşürecek (kayaçlar başlangıç özelliklerini yitirecek) ve sonradan aynı büyüklükte meydana gelecek depremlerin etkisinin azalmasını sağlayacaktır.

- (b) Yüksek f etken frekansına sahip depremlerin enerjisi, düşük etken frekanslılara göre daha hızlı soğrulur. Bu durum, soğrulma işlecinin frekans seçici olmasının doğal bir sonucudur. Genelde orta ve küçük ölçekte depremlerin, göreceli olarak daha yüksek etken frekanslar ürettikleri düşünülürse, bunlara ait x uzaklıklarının da göreceli olarak daha küçük olması beklenir (bkz. Şekil 5).
- (c) Eşitlik 6, soğurulma ve geometrik yayılma dışında, herhangi bir zemin etkileşim işleci (heylan, sıvılaşma, büyütme ve benzeri statik/dinamik parametreler) içermemektedir. Hesaplanan genlik azalma oranı r ise yalnızca bir oran olup, deprem büyüklüğü hakkında herhangi bir bilgi vermez.

A PARAMETRESİNİN BELİRLENMESİ

Şekil 6 'da, A parametresinin belirlenmesi için önerilen arazi düzeni görülmektedir. Fay doğrul-

tusuna dik konumda bir sismik profil boyunca, en az iki alıcılı (Şekil 6'da x_1 ve x_2 noktaları) bir atış düzeni gerekmektedir. Spektral ortamda, atışın bulunduğu 0 noktasındaki sismik dalgacık $G_0(f)$, x_1 noktasındaki sismik dalgacık $G_1(f)$, x_2 noktasındaki sismik dalgacık $G_2(f)$ şeklinde tanımlanırsa, aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.



Şekil 6. A parametresinin belirlenmesi için önerilen arazi düzeni.

Figure 6. Proposed field design for determining the parameter A .

$$G_1(f) = \frac{e^{-\frac{\pi f}{Qv} x_1}}{\sqrt{x_1}} G_0(f), \quad G_2(f) = \frac{e^{-\frac{\pi f}{Qv} x_2}}{\sqrt{x_2}} G_0(f) \quad (8)$$

$$\frac{G_2(f)}{G_1(f)} = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} e^{-\frac{\pi f}{Qv} (x_2 - x_1)}, \quad \ln \frac{G_2(f)}{G_1(f)} = -\frac{\pi f}{Qv} (x_2 - x_1) + \ln \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \quad (9)$$

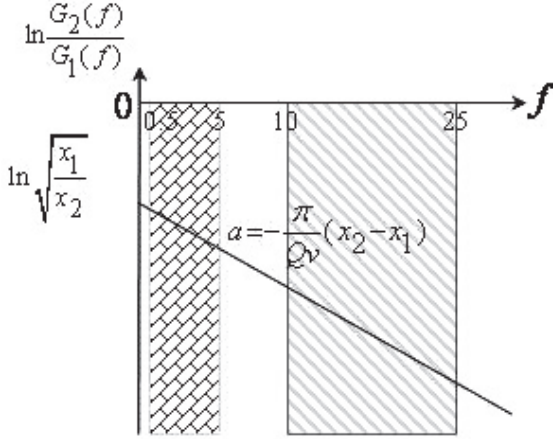
$$\ln \frac{G_2(f)}{G_1(f)} = af + \ln \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} \quad (10)$$

Eşitlik 8, $G_1(f)$ ve $G_2(f)$ 'nin $G_0(f)$ ile olan ilişkisini göstermektedir. Eşitlik 9, $G_2(f)$ 'nin $G_1(f)$ 'ye oranını ve bunun doğal logaritmasını vermektedir. 9 ve 10 no. lu eşitlikler arasındaki ilişki Şekil 7 'de gösterilmiştir. Şekil 7, 9 no.lu eşitliğin, f frekansının doğrusal bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. a bu doğru parçasının eğimidir ve soğrulmanın doğası gereği bu eğim eksi işaretlidir. Kullanılan yapay sismik kaynağın etken frekans aralığına bağlı olarak (örnekte 10-25 Hz) hesaplama aralığı, depremlere ait etken frekans aralığından (örnekte 0.5-5 Hz) farklı olsa da, Şekil 7'de doğru parçası ile gösterilen aynı eğimi paylaşırlar.

Her iki alıcıda kaydedilen sismik dalgacıkların spektral oranlarının doğal logaritmasına karşı frekans değerleri grafik halde gösterilirse, elde edilen doğru parçasının a eğiminden, A parametresi hesaplanır:

$$A = \frac{\pi}{Qv}, \quad a = -A(x_2 - x_1), \quad A = -\frac{a}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

Şekil 7 'de ki doğru parçasının a eğiminin, alıcılar arasındaki x_2-x_1 uzaklığına bölünmesiyle A parametresinin hesaplandığı Eşitlik 11'de açıkça görülmektedir.

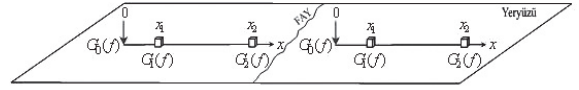


Şekil 7. A parametresinin hesaplanması.
Figure 7. Calculation of the parameter A .

ÖNERİLEN YÖNTEMİN ARAZİ UYGULAMASI

Önerilen yöntem, yüzlek veren bir fayın her iki yanında (fayın her iki tarafındaki özelliklerin değişebileceği düşünülerek), fay doğrultusuna

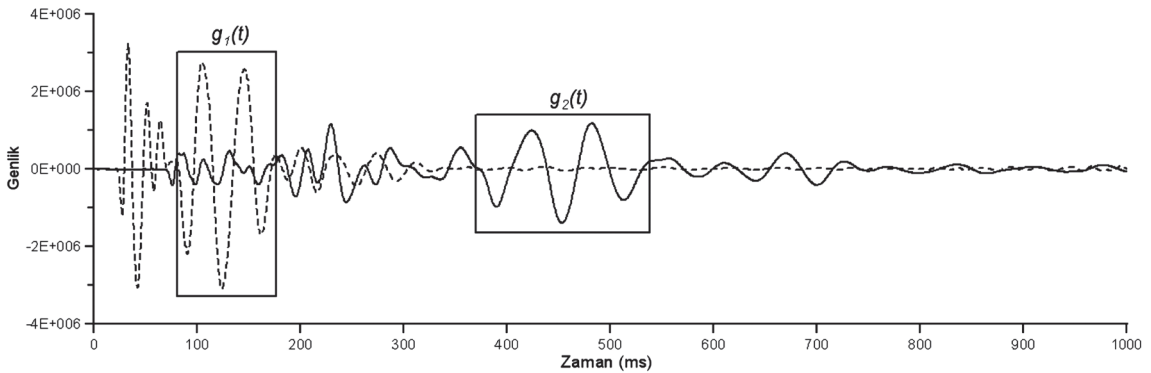
dik konumlanmış sismik hatlar boyunca ölçü alınmak suretiyle denenmiştir (bkz. Şekil 8). Veriler, fayı görüntülemek üzere gerçekleştirilen sondan-atışlı bir sismik yansıma hattından seçilmiştir. Sismik enerji kaynağı olarak 36 namlulu "Buffalo Gun"-Tabanca (Canyaran ve Ecevitoglu, 2002) ve alıcı olarak 48 adet 14 Hz 'lik düşey jeofonlar kullanılmıştır. Veri 0.5 ms örnekleme aralığı ile 1 s süreyle kaydedilmiştir. Orijinalliğinin korunması için, sismik veriye herhangi bir veri-işlem uygulanmamış ve hesaplamalar yüzey dalgaları üzerinde yapılmıştır.



Şekil 8. Yöntemin uygulamasında başvuru arazi düzeni.

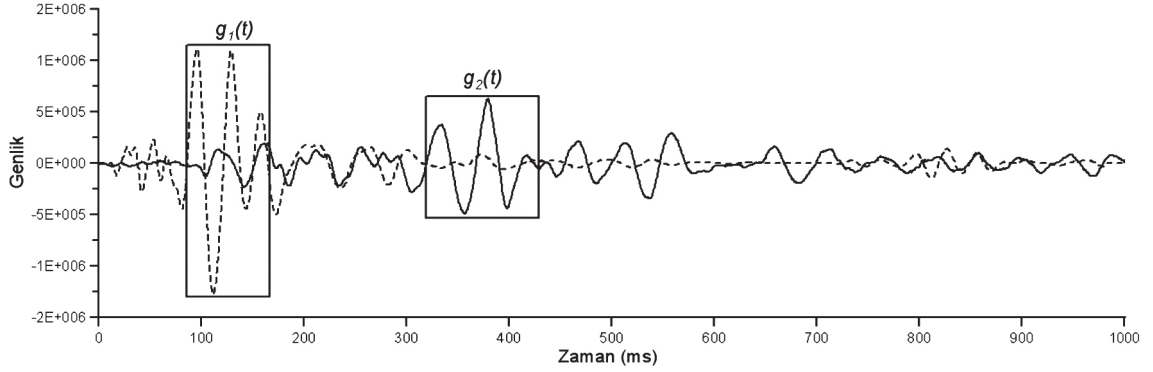
Figure 8. Field design in the application of the method.

Şekil 9 ve 10, sırasıyla fayın sol ve sağ yanındaki serimlere ait x_1 ve x_2 istasyonlarında elde edilen, sırasıyla $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ sismik dalgacıklarını (yüzey dalgaları) göstermektedir. Spektral analiz pencereleri (dikdörtgenler) $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ 'yi örtecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 9. Şekil 8'deki sol serimden elde edilmiş sismik kayıtlar ($x_2-x_1 = 90$ m dir. $g_1(t)$, x_1 istasyonundaki sismik dalgacığı, $g_2(t)$, x_2 istasyonundaki sismik dalgacığı ifade etmektedir. Dikdörtgenler, sismik dalgacıkları (yüzey dalgalarını) örten spektral analiz pencereleridir).

Figure 9. Seismic records obtained from left profile in Figure 8 ($x_2-x_1 = 90$ m. $g_1(t)$ is seismic wavelet at station x_1 and $g_2(t)$ is the seismic wavelet at station x_2 . Rectangles are spectral analysis windows which cover surface waves).



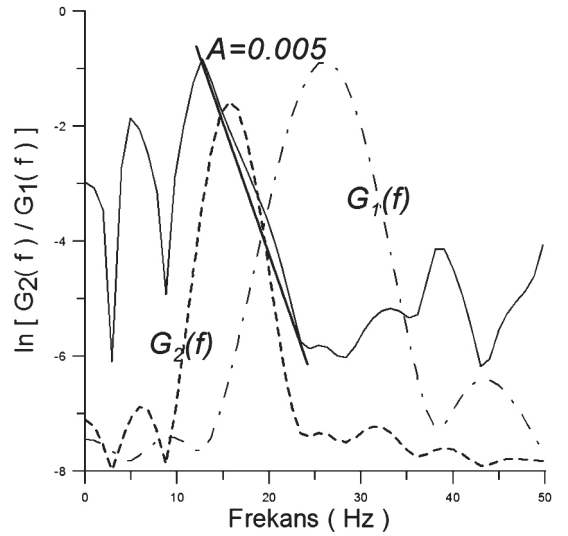
Şekil 10. Şekil 8'deki sağ serimden elde edilmiş sismik kayıtlar ($x_2 - x_1 = 100$ m dir. $g_1(t)$, x_1 istasyonundaki sismik dalgacığı, $g_2(t)$, x_2 istasyonundaki sismik dalgacığı ifade etmektedir. Dikdörtgenler, sismik dalgacıkları (yüzey dalgalarını) örten spektral analiz pencereleridir.

Figure 10. Seismic records obtained from right profile in Figure 8 ($x_2 - x_1 = 100$ m. $g_1(t)$ is seismic wavelet at station x_1 and $g_2(t)$ is the seismic wavelet at station x_2 . Rectangles are spectral analysis windows which cover surface waves).

Şekil 11 ve 12 'de, sırasıyla fayın sol ve sağ yanındaki serimlere ait $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ 'ye karşılık gelen $G_1(f)$ ve $G_2(f)$ genlik spektrumları görölmekte olup, hesaplanan $\ln[G_2(f)/G_1(f)]$ değerleri sürekli kalın çizgiyle ile gösterilmiştir. $G_2(f)$ eğrilerinin etkili olduğu, Şekil 11 'deki 10 – 25 Hz ve Şekil 12 'deki 20 – 35 Hz frekans aralıklarında, A parametresinin Eşitlik 11'den hesaplanan değerleri sırasıyla Şekil 11'de 0.005 s/m, Şekil 12 'de ise 0.002 s/m 'dir. 6 no. lu eşitliğin $f = 0.5 - 15$ Hz frekans aralığında x için çözüm eğrileri, $A = 0.005$ için Şekil 13 'de, $A = 0.002$ için Şekil 14'de verilmiştir. Bu grafiklerden, seçilen deprem etken frekansı f ve genlik azalma oranı r için gereken tampon bölge sınırı x bulunabilir. Örneğin, $f = 1$ Hz, $r = 0.1$ için fayın sol yanında $x = 56$ m, sağ yanında ise $x = 73$ m'dir.

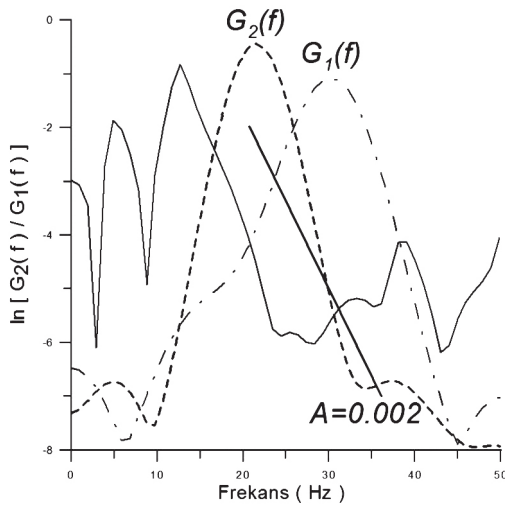
Önerilen yöntemin araziye uygulaması sırasında dikkat edilmesi gereken başlıca hususlar aşağıda verilmiştir.

- (1) Alıcılar, sismik dalgacığ biçimi üzerinde bir değişiklik yaratacak kadar uzak yerleştirilmelidir (bkz. Şekil 8).
- (2) Her iki alıcıdan elde edilen sismik kayıtlara uygulanacak spektral analiz pencerelerinin,



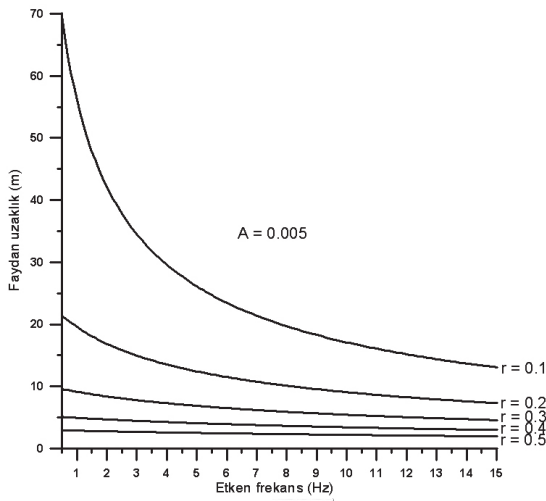
Şekil 11. Şekil 9 'daki $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ 'ye karşılık gelen $G_1(f)$ ve $G_2(f)$ genlik spektrumları ($\ln[G_2(f)/G_1(f)]$ ifadesi siyah eğri ile gösterilmiştir. A parametresi, doğru parçasının a eğiminden hesaplanmıştır.

Figure 11. $G_1(f)$ and $G_2(f)$ amplitude spectrums of $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ in Figure 9 ($\ln[G_2(f)/G_1(f)]$ is shown as black curve. Parameter A was calculated from the slope "a" of the line pieces).



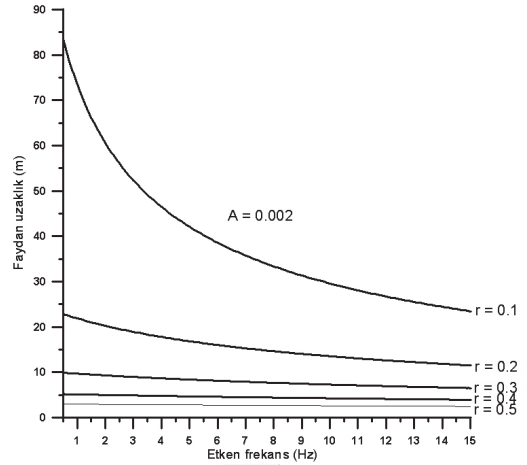
Şekil 12. Şekil 10 'daki $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ 'ye karşılık gelen $G_1(f)$ ve $G_2(f)$ genlik spektrumları ($\ln[G_2(f)/G_1(f)]$) ifadesi siyah eğri ile gösterilmiştir. A parametresi, doğru parçasının a eğiminden hesaplanmıştır.

Figure 12. $G_1(f)$ and $G_2(f)$ amplitude spectrums of $g_1(t)$ ve $g_2(t)$ in Figure 10 ($\ln[G_2(f)/G_1(f)]$) is shown as black curve. Parameter A was calculated from the slope "a" of the line pieces).



Şekil 13. Eşitlik 6'nın x için, $A = 0.005$ ve $f = 0.5 - 15$ Hz aralığında çözümü (Eğriler $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ve 0.5 için üretilmiştir. Örneğin $f = 1$ Hz, $r = 0.1$ için $x = 56$ m).

Figure 13. Solution of Equation 6 for x at an interval of $f = 0.5-15$ Hz and $A=0.005$ (The curves were produced for $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 . For example, for $f=1$ Hz, $r=0.1$, $x=56$ m).



Şekil 14. Eşitlik 6'nın x için, $A = 0.002$ ve $f = 0.5 - 15$ Hz aralığında çözümü (Eğriler $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ve 0.5 için üretilmiştir. Örneğin $f = 1$ Hz, $r = 0.1$ için $x = 73$ m).

Figure 14. Solution of Equation 6 for x at an interval of $f = 0.5-15$ Hz and $A=0.002$ (The curves were produced for $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 . For example, for $f=1$ Hz, $r=0.1$, $x=73$ m).

mümkün olduğunca yüzey dalgalarını kapsayacak şekilde seçilmeleri gerekmektedir. Pencere kenarları, dalga formlarının sıfır genlik geçişlerine denk getirilmelidir (bkz. Şekil 6).

- (3) A parametresi, 11 no. lu eşitlik yardımıyla, $G_2(f)$ 'nin etkili olduğu frekans aralığı içinde hesaplanmalıdır (bkz. Şekil 9). Yüzey dalgaları sismogramlarda göreceli olarak geç kaydedildiklerinden, başka dalga fazlarıyla üst üste binerler ve spektral ortamdaki eğrilerin gürültülü olmasına neden olabilirler (bkz. Şekil 9).
- (4) Ölçüm yüzeye yakın jeolojik birimler içinde yapılmaktadır. Yeryüzüne kadar ulaşarak yüzlek veren faylarda, yeryüzünde oluşan yüzey dalgaları, yüzeye yakın jeolojik birimleri kat ederler.
- (5) Beklenen, fayın ezilme (makaslanma) zonu içindeki Q ve v değerlerinin küçük (dolayısıyla a eğiminin büyük) olmasıdır. Böylece faylanmayla birlikte ortaya çıkan enerji mümkün olduğunca ezilme zonu içinde soğurulacaktır. Öte yandan, yapılaşmanın olduğu bölge için-

deki Q ve v değerlerinin büyük (dolayısıyla eğiminin küçük olması) olması arzulanır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir faya olan güvenli uzaklığın sismik yöntem yardımıyla nicel olarak hesaplanabileceği gösterilmiştir. Yöntem, arazi ölçümlerine bağlı, herhangi bir yapay (bina) ve doğal (jeolojik) unsura bağlı olmayan nicel değerlendirmelere (arazide sismik cihazlarla ölçülebilir parametrelere, matematik modelleme ve veri işlem tekniklerine) dayanmaktadır. Ölçümlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar, diğer nitel ve görsel yöntemlere göre daha somut ve objektiftir. Bu nedenle yorum farklılıklarını en aza indirirler. Ölçümler açık arazide alınabildiği gibi yerleşim alanlarında da alınabilirler. Ölçümlerin fay boyunca ve fayın her iki bloğunda yapılması önemlidir.

Kaynak ve en az iki alıcının aynı profil üzerinde bulunduğu bir arazi düzeninde, iki alıcı arasındaki ortamın soğurganlığının, bu istasyonlarda kaydedilen yüzey dalgalarının spektral oranlarının doğal logaritmasından hesaplandığı yöntemde, ilişki doğrusal olduğundan, soğurganlık basit bir şekilde ilgili doğru parçasının eğiminden hesaplanır. Yöntemin en önemli noktası ise, bu hesaplamaların ortamın Q ve v 'sinin ayrı ayrı bilinmesini gerektirmemesidir.

Yöntem, gerçek bir fay üzerinde yapılan ölçümlerle denenmiş olup, 1 Hz etken frekansa sahip bir deprem için titreşim genliği oranının 0.1 olması istendiğinde, fayın güney bloğundaki güvenli uzaklık 56 m, kuzey bloğundaki güvenli uzaklık ise 73 m bulunmuştur.

Değişik nedenlerle yüzey kırıkları izlenemediği zaman, dolayısıyla diğer yöntemlerin uygulanmadığı durumlarda, aradaki değerlendirilmesi yapılamamış boşlukların doldurulmasında bu çalışmada geliştirilen yöntem kullanılabilir.

Yöntemi geliştirmek için yaptığımız deneylerde sadece P türü, boyuna dalga üreten sismik kaynak (buffalo-gun) kullanılmıştır. Titreşimin enine, boyuna ve düşey bileşenlerinin sönümlenmeye nasıl tepki gösterdiklerini açıklayabilmek için deneylerin S-türü, enine dalga üreten sismik kaynakla da tekrarlanması gerekmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, yapıcı öneri ve eleştirileri için ismini belirtmeyen iki hakeme; şekillerin düzenlenmesindeki katkılarından dolayı Araş. Gör. Aslı Z. Can'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Aki, K., and Richards, P.G., 2002. Quantitative Seismology. University Science Books, California.
- Anderson, D. L., and Hart, R. S., 1978. Q of the Earth. Journal of Geophysical Research, 83, 5869-5882.
- Batatian, D., 2002. Minimum standards for surface fault rupture hazard studies. Salt Lake County Geologic Hazards Ordinance - Chapter 19.75 Appendix A, p.11. <http://www.pwpds.slco.org/zoning/pdf/geologichazards/AppAfault-ReportMinStds.pdf>, 2007.
- Bath, M., 1974. Spectral Analysis in Geophysics. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Becker, J., Saunders, W., and Dissen, R.V., 2005. Planning for the development of land on or close to active faults: a study of the adoption and use of the active fault guidelines. Science Report 2005/16. Institute of Geological and Nuclear Science. <http://www.gns.cri.nz>, 2005.
- Bullen, K.E., and Bolt, B.A., 1985. An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge University Press, Cambridge.
- California Public Resources Code, 1970. Earthquake Fault Zoning. Section 2621-2630. <http://law.justia.com/california/codes/prc.html>, 2003.
- Canyaran, L. ve Ecevitoglu, B., 2002. Yönlü sismik enerji kaynağı. Türk Patent Enstitüsü, Ankara, Patent No. 2002/01203.
- Doyle, H., 1995. Seismology. John Wiley & Sons, New York.
- Kjartansson, E., 1979. Constant Q wave propagation and attenuation. Journal of Geophysical Research, 84, 4737-4748.

- Liu, Y., Teng, T.L., and Ben-Zion, Y., 2005. Near-surface seismic anisotropy, attenuation and dispersion in the aftershock region of the 1999 Chi-Chi earthquake. *Geophysics Journal International*, 160, 695–706.
- Perrin, N.D., and Wood, P.R., 2003. Defining the Wellington Fault within the urban area of Wellington City. Client Report 2002/151. Institute of Geological and Nuclear Science. <http://www.gns.cri.nz>, 2003.
- Quan, Y., and Harris, J.M., 1997. Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 62 (3), 895–905.
- Rosenberg, L., 2005. San Luis Obispo County guidelines for engineering geology reports. San Luis Obispo County Department.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1982. *Exploration Seismology: History, Theory, and Data Acquisition*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Stein S., and Wysession, M., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing, USA.
- Strick, E., 1970. A predicted pedestal effect for pulse propagation in constant-Q solids. *Geophysics*, 35, 387-404.
- Udias, A., 1999. *Principles of Seismology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Waters, H. W., 1981. *Reflection Seismology*. John Wiley and Sons, New York.
- White, J. E., 1983. *Underground Sound*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.