MERSİN DEĞİRMENÇAY BARAJ SAHASI İÇİN DEPREM TEHLİKESİ ANALİZİ

M.T. Yılmaz[1] ve S. Akkar[2]

[1] *Yardımcı Doçent Doktor, Mühendislik Bilimleri Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara,068000*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 068000*
Email: mtyilmaz@metu.edu.tr, sakkar@metu.edu.tr

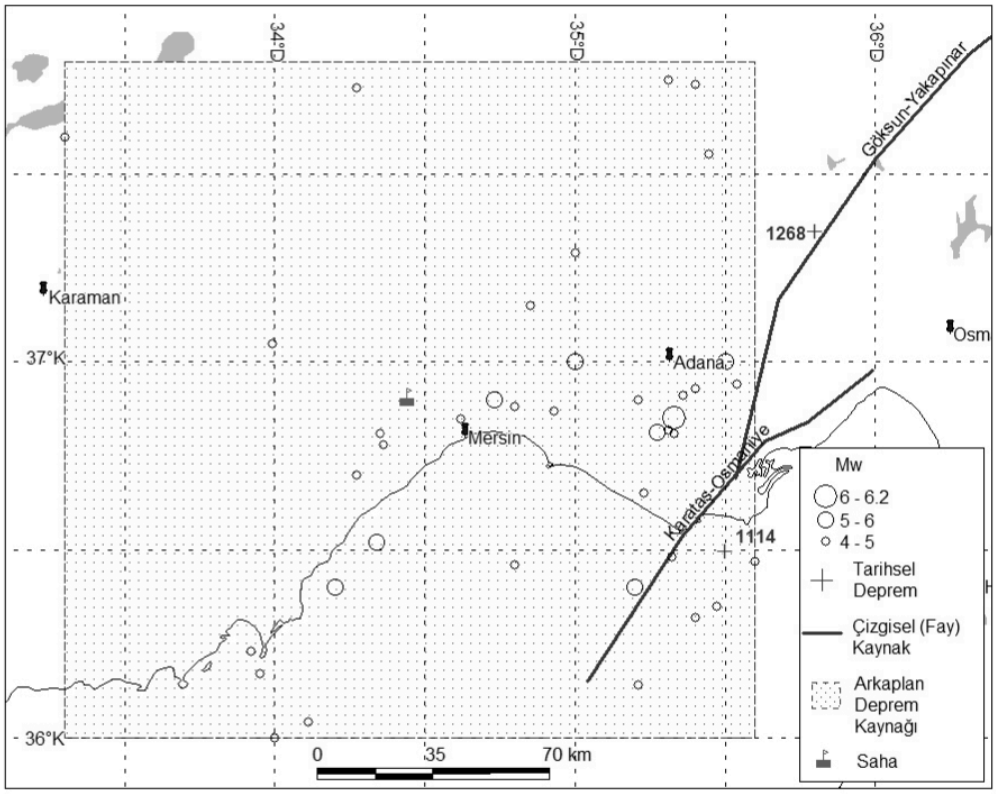
ÖZET:

Mersin Değirmençay'da ve Türkiye'nin 3ncü ve 4ncü deprem bölgeleri sınırında yer alan Değirmençay barajı sahası için olasılıksal ve deterministik yöntemlerle deprem tehlikesi analizi gerçekleştirilmiştir. Sahanın doğusunda yer alan İskenderun Körfezinin çevresinde, Afrika, Anadolu ve Arabistan plakalarının kesişimi sebebiyle oluşan, Karataş-Osmaniye ve Yakapınar-Göksun fay hatları baraj sahasına en yakın belirgin neotektonik yapılardır. Ayrıca baraj sahasının KD yöninde kabaca 50 km uzaklıkta Ecemiş Fay hattı bulunmaktadır. Çalışmada göz önüne alınan diri faylar üzerinde gerçekleşmeyen ve baraj sahasının çevresinde yaklaşık 200 km x 200 km kare alan içerisinde yer alan sığ depremler arkaplan deprem kaynağı ile modellenmiştir. Çizgisel (fay) kaynaklar için karakteristik deprem modeli ile magnitüd tekrarlama ilişkisi fay geometrisi ve atım hızı kullanılarak belirlenmiştir. Diri faylar hakkındaki veriler literatürden derlenmiştir. Alan kaynak (arkaplan depremselliği) için ise UDİM deprem kataloğu kullanılarak magnitüd tekrarlama ilişkisi istatiksel yöntem ile belirlenmiştir. Farklı deprem magnitüderinin katalogda eksiksiz olduğu farklı zaman dilimleri hesaplarda göz önüne alınmıştır. 2475 yıl, 975 yıl, 475 ve 244 yıl tekrarlama süreleri için olasılıksal spektral ordinatlar hesaplanmıştır. Deterministik hesapta Ecemiş Fayı'nın oluşturabileceği en büyük deprem (Mw7.5) için en kritik yer hareketi genlikleri dikkate alınmıştır. Determinisitik yöntemde olasılıksal hesaplarda dikkate alınan yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak "medyan" ve "medyan+standard sapma" spektral değerleri hesaplanmış ve sonuçlar olasılıksal analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Sismik tehlike, azalım ilişkileri, Doğu Akdeniz, Mersin.

1. GİRİŞ

Mersin Değirmençay'da ve Türkiye'nin 3ncü ve 4ncü deprem bölgeleri sınırında yer alan Değirmençay barajı sahası için olasılıksal ve deterministik yöntemlerle deprem tehlikesi analizinin gerçekleştirilerek, burada imal edilecek mühendislik yapıları için tasarım spektrumlarının ortaya çıkartılması gerekmiştir. Baraj sahasının yeri Şekil.1 üzerinde gösterilmiştir. Analizlerde, deprem kaynakları ve yer hareketi tahmini üzerine güncel verilerin kullanılması amaçlanmıştır. Çalışmada saha amplifikasyonu dikkate alınmamış ve hesaplar Z1 zemin sınıfı için gerçekleştirilmiştir. Z1 zemin sınıfının BSSC (2009) saha sınıflandırmasında B sınıfı sahalara karşılık geldiği kabul edilmiş ve ilk 30 m'deki ortalama kayma hızı (Vs30) parametresini göz önüne alan yer hareketi tahmin denklemleri için bu değer 760 m/s olarak dikkate alınmıştır. Olasılıksal yöntemle deprem tehlikesi EZ-FRISK yazılımı ile hesaplanmıştır (Risk Engineering, 2011). Bildiride deprem tehlikesi analizi sonucunda hesaplanan spektral ordinatlar sunulmaktadır.



Şekil 1. Çalışma sahasının çevresinde aletli dönemde gerçekleşen depremler (Ulusal Deprem İzleme Merkezi-UDİM, 2012, katalogda artçı ve öncü depremlerden Reasenberg (1985) yöntemi ile tesbit edilebilenler elenmiştir), tarihsel yıkıcı depremler (UDİM, 2012) ve olasılık yöntem ile hesapta kullanılan deprem kaynakları.

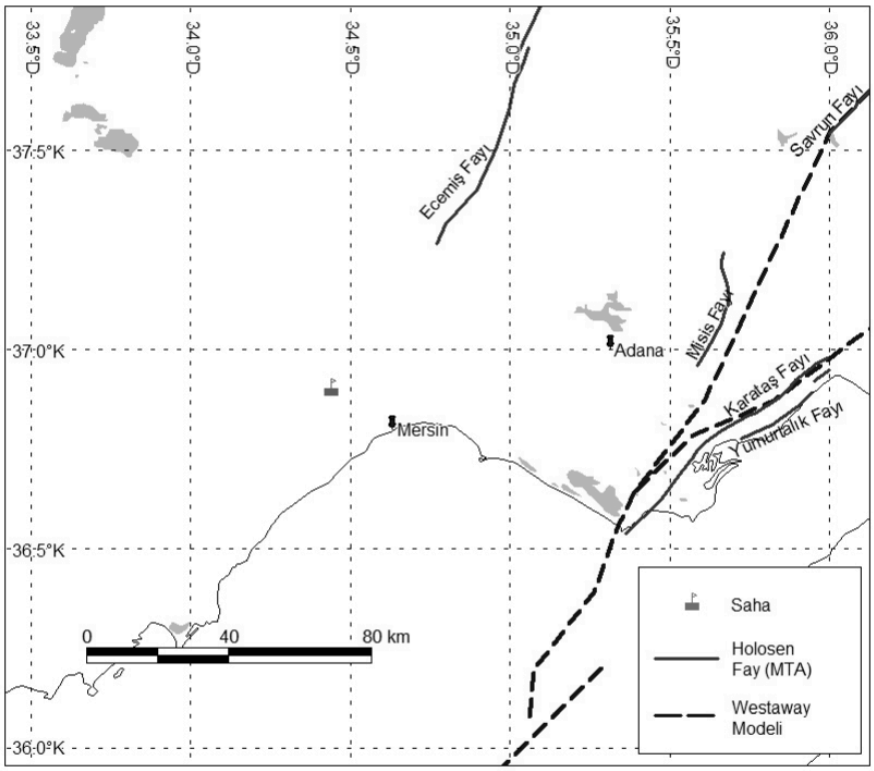
2. SİSMİSİTE

Çalışma sahasının çevresinde aletsel dönemde (yaklaşık son yüzyıl) kaydedilen deprem merkezleri ve magnitüdleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Deprem kataloğunda artçı ve öncü depremlerden Reasenberg (1985) yöntemi ile tesbit edilebilenler elenmiştir. Çalışma sahasının batısında yer alan İskenderun Körfezi ve çevresinde kaydedilen ve magnitüdü Mw5.0'den büyük depremler burada önemli deprem tehlikesi yaratan kaynakların varlığına işaret etmektedir. Bölgede aletsel dönemde kaydedilen en belirgin deprem 1998 Adana-Ceyhan depremidir (Mw6.2 ; UDİM, 2012). Yaklaşık 100 yıllık bir zaman dilimini kapsayan aletsel dönem verileri, kapsadığı zaman aralığı ve büyük depremler için daha çok söz konusu olan uzun tekrarlama devirleri göz önüne alındığında, bölgenin sismisitesinin ve sismotektoniğinin anlaşılmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, olasılık hesaplarına dayalı sismik tehlike analizleri kapsamında deprem kaynaklarının belirlenmesinde tarihsel depremler ile ilgili bulgular büyük önem taşımaktadır (McGuire, 2004). Şekil 1'de ayrıcabölgedeki tarihsel yıkıcı depremlerin tahmini merkezleri (UDİM, 2012) gösterilmektedir. Bu depremlerden en yakını çalışma sahasına yaklaşık 105 km uzaklıktaki 1114 depremidir. Dolayısı ile tarihsel veriler çalışma sahasına yakın şiddetli depremlerin gerçekleşme olasılığının düşük olduğunu göstermektedir. Özel jeolojik çalışmalarla doğrulanmadığı sürece, tarihsel deprem merkezlerinin merkezi ve şiddeti hakkındaki veriler bölgede önemli yerleşim merkezlerinin konumlarına ve kayıtların saklanmasına bağlıdır.

3. DİRİ FAYLAR

Çalışma sahası, doğusunda yer alan önemli tektonik yapılara rağmen sismik açıdan nisbeten hareketsiz bir bölgede yer almaktadır. Tarihsel depremlerin dış merkezleri ve aletsel dönemde elde edilen kayıtların dağılımı (Şekil 1) saha çevresinde yıkıcı bir deprem kaynağının varlığını göstermemektedir. Çalışma sahasının güneyinde ve doğusunda Anadolu, Afrika ve Arap plakalarının sınırları bölgenin belirgin tektonik yapısını ortaya çıkarmaktadır. Burada, Afrika plakasının Anadolu plakasına göre kuzeye doğru hareket etmesi Kıbrıs kavisinin oluşmasına neden olmuştur (Barka ve Reilinger, 1997). Arabistan plakasının kuzey yönünde göreceli olarak daha hızlı hareket etmesi ise Arap ile Afrika plakaları sınırında Ölüdeniz Fay Zonu'nun ve Anadolu ile Arabistan plakaları sınırında Doğu Anadolu Fay Zonu'nun oluşmasına sebep olmuştur. Bu üç ana plaka İskenderun Körfezi civarındaki bir noktada kesişmektedir. İskenderun Körfezi çevresinde üç plakanın kesiştiği sonucuna ulaşan birçok model bulunmaktadır. Bunlardan Westaway (2004) Doğu Akdeniz'deki birçok noktada son dönemdeki GPS kayıtlarından hesaplanan hız vektörleri ile tutarlı bir model önermiştir (Şekil 2). Westaway'in bölgedeki diri fay hatlarını basitleştirilmiş şekilde açıklayan modeline göreArap ve Anadolu plakalarının sınırını oluşturan Doğu Anadolu Fay Zonu ile Kıbrıs'tan geçerek Afrika ve Arap plakalarının sınırını oluşturan fay zonunun birleşimi Adana yakınında KB yönünde uzanan Yakapınar-Göksun fay hattı ile mümkündür. 1998 Adana depremi (Mw6.2) fay-düzlemi çözümü Westaway'in modeli ile tutarlı olarak doğrultu atım fayına işaret etmektedir (Ergin ve diğ., 2004). Ayrıca Maden Tetkik ve Araştırma Genel Müdürlüğü (MTA: Emre vd., 2011) tarafından hazırlanan diri fay haritasında (Şekil 2) Savrun, Misis ve Karataş-Osmaniye Fayları, bu modeli doğrular şekilde Yakapınar-Göksun hattı üzerine düşmektedir. Diğer taraftan, Yakapınar-Göksun fayı ile çalışma sahası arasındaki uzaklık yaklaşık 100 km olarak ölçülmektedir. Yakapınar-Göksun fayı için tahmin edilen atım hızı ortalama olarak 2 mm/yıl mertebesindedir. Dolayısı ile Yakapınar-Göksun fayı çalışma sahasındaki sismik tehlikeye katkısı çok sınırlıdır. MTA haritasında gösterilen Yumurtalık Fayının ise, kabaca 5 km uzaklıkta paralel uzanan Karataş-Osmaniye fayının göz önüne alınması sebebi ile deprem tehlikesi hesaplarına ayrıca katılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Westaway (2004) tarafından önerilen tektonik model ile oldukça tutarlı olarak, Ceyhan-Osmaniye volkaniklerini inceleyen Gürsoy vd. (2003) Doğu Anadolu Fay hattı üzerindeki atımın büyük oranda İskenderun Körfezinin batı kısmına aktarıldığı ve burada diri Karataş-Osmaniye fay hattı üzerinde en çok 6 mm/yıl atım hızında olabileceği sonucuna varmıştır.

Koçyiğit ve Beyhan (1998) Mersin, Kayseri ve Sivas arasında uzanan 2-3 mm/yıl hızında sol atım faylardan oluşan Orta Anadolu Fay Zonunun varlığını savunmaktadır. MTA diri fay haritasında (Şekil 2) bu zon üzerinde yer alan doğrultu-atım Ecemiş Fayı diri fay olarak gösterilmektedir. Bu çalışmalara rağmen, Ecemiş fayınının son jeolojik dönemde diri olduğunu gösteren sismolojik verilere ulaşılamamıştır. Şekil 1'de gösterilen katalog depremleri tarihsel deprem merkezleri Ecemiş Fay'ı üzerinde belirgin bir sismik hareketlilik göstermemektedir. Keza Westaway (1999, 2003) Ecemiş koridorundan ilerleyerek Gemerek'ten ve Sivas'ın güneyinden geçen bir doğru-atım fay zonunun varlığını gösteren jeolojik gözlemlerin kesin verilere dayanmadığını ve farklı şekilde yorumlanabileceğini belirtmiştir.Bunun yanında, fayların diriliğini gösteren sismik veriler ile atım hızlarını doğrulayacak kesinlikte verilerin bulunmaması ve Anadolu plakasını içeren kinematik modellerde bu fay hattının varlığına yer olmaması sebebiyle böyle bir diri fay zonunun varlığını kabul etmek için kesin delillerin gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, sahada yapılan ölçümlerin bu fay zonu üzerinde doğrultu atım hızının en çok 0.03 mm/yıl mertebesinde olabileceğini belirtmiştir. Uzaktan algılama verilerine dayanarak Anadolu ve çevresinin genel neotektonik çerçevesini açıklayan Reilinger vd. (2006), Orta Anadolu'da böyle bir fay zonunu göz önüne alan bir modeli değerlendirmiş ve bu verilerin Mersin-Gemerek arasında uzanan olası bir doğrultu atım fay hattı için yaklaşık 0 mm/yıl doğrultu atım hızına işaret ettiğini 0.5 mm/yıl belirsizlik ile hesaplamıştır. Dolayısı ile, Ecemiş Fayını kapsayacak şekilde bir doğrultu atım fay zonu olsa bile, üzerindeki atım hızı oldukça düşüktür. Bu durumda nisbeten büyük magnitüdlü depremlerin tekerrür süreleri tarihsel depremler kataloğu ile kapsanamayacak kadar uzun olabilir. Çok düşük atım hızına sahip bir fayın olasılıksal yöntemle hesaplanan deprem tehlikesine katkısı nisbeten düşük olmalıdır. Bu sebeple, sahaya yaklaşık 50 km uzaklıktaki Ecemiş fayı olasılıksal deprem tehlikesi hesabına katılmamıştır.



Şekil 2. Çalışma sahasının çevresinde Emre vd. (2011) göre diri faylar ve Westaway (2004) tarafından geliştirilen modele göre İskenderun Körfezinin batısında belirgin neotektonik yapılar.

4. DEPREM TEHLİKESİ HESABI

Bu çalışmada deprem tehlikesi olasılık ve deterministik yöntemle hesaplanmıştır. Deterministik deprem tehlikesi hesabı, çalışma sahasında en büyük yer hareketi parametrelerini veren ve bölgedeki deprem kaynaklarının özellikleri ile tutarlı birdeprem magnitüdü ve konumu (kaynak-saha mesafesi) senaryosunugöz önüne alır. Bu hesap uygun yer hareketi tahmin modelini kullanarak, tasarımda göz önüne alınacak yer hareketi seviyesini medyan veya belli bir persentil değere karşılık gelen değer ile belirler.Olasılıksal deprem tehlikesi yönteminde, deprem tehliksi hesabı sonuçlarına önemli şekilde etki eden parametrelerin belirsizlikleri olasılık dağılım fonksiyonları ile modellenir.Genel olarak, tüm deprem kaynakları içindepremlerin tekrarlama aralıkları, yer hareketi parametreleri ve depremlerin kaynak üzerinde lokasyonlarındaki belirsizliklerini dikkate alınır. Dolayısı ile olasılık yöntem çok sayıda deterministik analizi kapsamakta ve bunların sonuçlarını gerçekleşme olasılıkları dikkate alarak birleştirmektedir. Sonuçta bir yıllık aşılma olasılığı değerine karşılık gelen yer hareketi parametreleri hesaplanır (McGuire, 2004).Belirli bir magnitüd üzerindeki depremlerin gerçekleşmesininbir Poisson süreci olarak modellenebileceği kabul edilirse, olasılık hesaplarından elde edilen yıllık aşılma oranlarının tersine tekerrür süresi (TR) denir.Bu çalışmada sismik kaynak üzerinde depremlerin konumsal dağılımı tekdüze dağılım fonksiyonu ile modellenmiştir. Yer hareketi parametrelerindeki belirsizlik lognormal dağılımı kabul eden tahmin modelleri ile temsil edilmiştir. Proje sahası için önerilecek tasarım spektrumlarının hesabında kullanılan tehlike eğrileri farklı yer hareketi tahmin denklemleri için hesaplanmıştır. Bu tehlike eğrileri eşdeğer ağırlık kabulü ile birleştirilerek, seçilen tekrarlama devirlerine (TR) karşılık gelen spektral genlikler hesaplanmıştır.

3.1. Deprem Kaynakları Modeli

Kısım 2 ile verilen bilgiler doğrultusunda olasılık hesaplarına dayalı sismik tehlike çalışması için çizgisel ve alan kaynak modelleri kullanılmıştır. Sığ depremler 2 çizgisel (Göksun-Yakapınar fay hattı, Karataş-Osmaniye fayı), 1 alan deprem kaynağı (arkaplan depremsellik) ile modellenmiştir (Şekil 1). Ergin vd. (2004) bölgede sismik ağ verileri kullanılarak gerçekleştirdikleri çalışmada, İskenderun körfezi çevresindeki depremlerin genel olarak 5 ila 35 km derinlikte gerçekleştiğini bildirmektedir. Literatürde daha derin depremler için bir gerekçe bulunamadığından ve katalogda verilen deprem derinliklerinde önemli hata olabileceği dikkate alınarak, deprem kataloğunda verilen tüm depremlerin 5 ila 35 km derinlikleri arasında gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu derinlik aralığı kaynağı belirsizi arkaplan depremlerin modellenmesinde kullanılmıştır. Ancak, Karataş-Osmaniye fayı için derinlik, Reilinger vd. (2006) kullanılan Anadolu'nun kinematik modeli ile tutarlı olarak 15 km olarak seçilmiştir. Göksun-Yakapınar Fayı hattı ise, Ergin vd. (2004) tarafından sunulan fay düzlemi çözümlerinde 32 km olarak bulunan 1998 Adana depreminin derinliği göz önüne alınarak ve Ergin vd. (2004) ile de tutarlı olarak 35 km derinliğinde kabul edilmiştir. Olasılık yöntemler sismik tehlike hesabında göz önüne alınan deprem kaynakları için kullanılan magnitüd tekrarlama modelleri ve parametreleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Hesaplarda kullanılan deprem kaynaklarını tanımlayan parametreler.

Kaynak	Tip*	β	$\dot{s}$ (mm/yıl)*	$\nu_{M\min}$ **	M_{min}	M_{max}
Arkaplan Deprem Kaynağı	Alan(doğrultu atım)	2.28	-	1.52	4.0	5.9
Göksun-Yakapınar Fayı	Doğrultu atım	0.0	2.0	-	6.2	6.8
Karataş-Osmaniye Fayı	Doğrultu atım	0.0	6.0	-	7.0	7.5

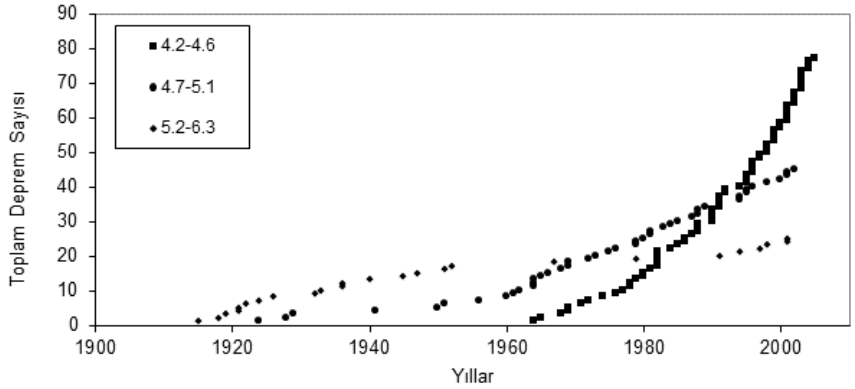
* Fay tipi kaynaklar için M_{min}*'den* büyük depremlerin oranını bulmak için kullanılan atım hızıdır.
** Alan tipi kaynaklar için1 yıl içinde M_{min}*'den* büyük depremlerin beklenen sayısıdır.

Deprem tekrarlama ilişkisi içinM_{max} değeri ile kesilmiş üstel dağılım fonksiyonu kullanılmıştır (McGuire, 2004). Bu modelde, birim zaman içinde belli bir deprem büyüklüğünün (M) geçilme oranı Denklem (1) ile hesaplanmaktadır.

$$n(M)=\nu_{M_{min}}\left[\frac{exp(\beta M_{min}-\beta M)-exp(\beta M_{max}-\beta M_{min})}{1-exp(\beta M_{max}-\beta M_{min})}\right] \qquad M_{min}\le M\le M_{max} \tag{1}$$

Bu denklemde ν_{Mmin} birim zamanda M_{min}'den büyük deprem depremlerin oranıdır ve birim zamanda gerçekleşen ve magnitüdü M_{min}'den büyük olan toplam deprem sayısını gösterir. β büyük magnitüdlü depremlerin küçük magnitüdlü depremlere olan oranını belirtir. Bu denklemde ν_{Mmin} birim zamanda M_{min}'den büyük depremlerin oranıdır ve birim zamanda gerçekleşen ve magnitüdü M_{min}'den büyük olan toplam deprem sayısını gösterir. β büyük magnitüdlü depremlerin küçük magnitüdlü depremlere olan oranını belirtir. Deprem kataloğunun zamana bağlı olarak eksik dağılım gösterdiği durum için ν_{Mmin} ve β en yüksek olasılık yaklaşımı ile temelinde Weichert (1980) tarafından formüle edilen yaklaşım ile iteratif olarak hesaplanır. Parametrelerin tahmininde, Poisson kabülünü ihlal etmesi sebebiyle çalışma sahasına konu olan geniş tektonik çerçeve içerisinde yer alan depremlerden öncü ve artçı olanları elenerek, bu depremlerin sismik momenti asıl depreme eklenmiştir. Deprem kataloğu UDİM (2012) tarafından derlenmiş ulusal deprem kataloğundan çıkartılmış olup bu çalışma ülkemiz için en güncel ve güvenilir deprem veri bankasını oluşturan resmi web sitesidir. Hesaplarda moment magnitüdü (Mw) dikkate alınmıştır. Şekil 1 Reasenberg (1985) yöntemi ile tesbit edilebilen bu depremlerin elenmesinden sonra istatistiksel çalışmalara veritabanı oluşturan katalog depremlerini göstermektedir. Kataloğun farklı magnitüd aralıklarında eksiksiz olduğu sürelerinin tesbiti için bu magnitüd aralıklarında toplam deprem sayısının

zamana göre artışı incelenir. Örneklemin yeterli büyüklükte olması içinsaha çevresinde (400 km x 400 km boyutunda bir kare alan içinde) gerçekleşmiş depremler dikkate alınmıştır. Reasenberg (1985) yöntemi ile elendikten sonra katalog eksiksizliği ilişkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'e dayanarak, M_w<4.2 depremlerinin katalogda tamam olmadığı, Mw≥4.2, Mw≥4.7, ve Mw≥5.2 magnitüd değerlerine sahip depremlerin ise bu bölgede sırasıyla 1988, 1960, ve 1915 yıllarından sonra eksiksiz olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. Şekil 1'de farklı magnitüd dilimlerinde gerçekleşen deprem sayılarının zamanla artışı.

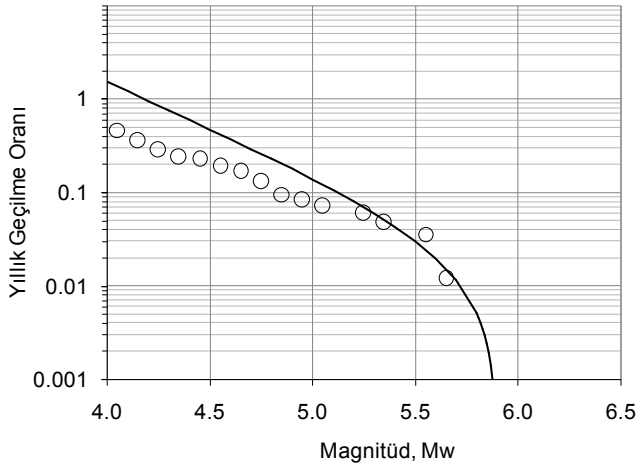
Weichert (1980) yöntemi magnitüd tekrarlama ilişkisinin sürekli dağılım fonksiyonu olduğu kabulüne dayanır. Bu sebeple, yöntem uygulanırken magnitüd aralıkları deprem kataloğunun verdiği en küçük aralık olan 0.1 değerinde hesaplanmıştır(Bender, 1983). ν_{Mmin} ise her alan kaynak üzerine düşen deprem merkezleri (Şekil 5.b) ve katalog eksiksizliği göz önüne alınarak ayrıca hesaplanmıştır. Yeterli örneklem büyüklüğüne ulaşmak için, β değeri bölgesel ortalama olarak değerlendirilip, Şekil 1 ile gösterilen depremler için Weichert (1980) yöntemiile hesaplanmıştır. Arkaplan (alan kaynak) depremleri için M_{max}değeri ise katalog verileri ile en tutarlı sonucu veren değer olarak seçilmiştir (Şekil 4). Tablo 1'de arkaplan depremleri için katalog bilgileri kullanılarak varsayılan kaynak parametreleri belirtilmiştir. Şekil 1 ile gösterilen aletsel dönem deprem kataloğu verileri ile arkaplan deprem kaynağı için kullanılan magnitüd tekrarlama modeli Şekil 4 ile karşılaştırılmaktadır.

Çizgisel (fay) sismik kaynaklar için (Şekil 1) ise Schwarts ve Coppersmith (1984) tarafından önerilen karakteristik deprem modeli kullanılmıştır. Bu model, fayın tektonik özelliklerinin sonucu olarak, fay üzerinde karakteristik olarak minimum (M_{min}) ve maksimum (M_{max}) magnitüd aralığında depremlerin gerçekleştiği gözlemine dayanır. ν_{Mmin} hesabında fayın geometrik özellikleri ve fay üzerinde literatürde sunulan verileri dikkate alınarak tahmin edilen ortalama atım hızı (Tablo 1) dikkate alınır. Bu modele göre yeterince uzun zamanda fayda toplanan sismik moment ile fayın yarattığı depremlerin toplam sismik momentinin eşit olması gerekir (McGuire, 2004):

$$\nu_{M_{min}} = \dot{s}\mu a_T \frac{\lambda(1-\beta/\lambda)}{k\beta \cdot \exp[\beta(M_{min}+d/c)]}\left(M_{0,max}^{1-\beta/\gamma} - M_{0,min}^{1-\beta/\gamma}\right)^{-1} \qquad M_{min} \le M \le M_{max} \tag{2}$$

Denklem 2'de a_T fayın alanı, μ fay kayasının rijitlik modülü (genelde $3\cdot10^{11}$ dyne/cm^2), $M_{0,max}$ve $M_{0,max}$ minimum ve maksimum magnitüde (M_{min} ve M_{max}) karşılık gelen sismik moment, $\dot{s}$ fay üzerindeki ortalama atım hızı, c ve $d$parametreleri sismik moment ve M arasındaki ilişkiyi veren iki katsayı (bkz. Hanks ve Kanamori, 1979) ve γ ise c·ln10 değerine eşit bir katsayıdır. M_{min} ve M_{max} değerlerinin hesabında söz konusu bölge için geçerli olan deprem katoloğu, fay uzunlukları dikkate alınmış, fay uzunlukları Wells ve Coppersmith (1994) amprik denklemleri kullanılarak deprem magnitüdü ile ilişkilendirilmiştir. Kırılan fayın genişliği için de gene Wells ve

Coppersmith (1994) amprik denklemlerinden yararlanılmıştır. M_{max} değeri fay uzunluğunun tek parça olarak kırılması halinde Wells ve Coppersmith (1994) denklemlerinden hesaplanacak maksimum magnitüd değerine uygun bir seçimdir. M_{min} ve M_{max} arasında karakteristik deprem magnitüdünün olasılık yoğunluğunun güvenilir tesbiti için yeterli veri bulunmaması sebebi ile, Schwartz ve Coppersmith'in çalışması ile uygun olarak, bu aralıkta uniform dağılım fonksiyonu kabul edilmiştir. Bu doğrultuda çizgisel deprem kaynakları için Denklem 1ve 2ile hesapta $\beta \cong 0$ alınmıştır.



Şekil 4. Arkaplan depremselliği içinde gerçekleşen depremler için kullanılan magnitüd tekrarlama ilişkisi ile katalog verilerinin karşılaştırılması.

Deterministik sismik tehlike yöntemi için, fay kaynağının hesapta kesinleştirilmiş özellikleri bilimsel açıdan güvenilir çalışmalara dayandırılmalıdır. Dolayısı ile hareketliliği ve geometrisi tam olarak belirlenememiş fayların deterministik hesaplarda göz önüne alınmasıyapı tasarımlarının depreme karşı güvenliğinin değerlendirilmesinde anlamlı olmayan sonuçlar verebilecektir. Bu çalışmada, deterministik deprem tehlikesi hesabında Şekil 1 ile gösterilen fay kaynaklarıyla beraber, Ecemiş Fayı (Şekil 2) da göz önüne alınmıştır. Ecemiş Fayının sismik aktivitesindeki belirsiz durum mevcut literatür çalışmalarında belirtilmiş olmasına rağmen, bu fayın Emre vd. (2011) tarafından yenilenen MTA'nın diri fay haritasında Holosen dönemde diri olarak gösterilmiştir. Çalışma bölgesi için Ecemiş fayının muhtemel hareketliliğinindeprem tehlikesini ne kadar etkileyebileceğinin incelenmesi gereklidir. Deterministik hesaplarda Ecemiş fayı ile çalışma sahası arasındaki en yakın mesafe yaklaşık 50 km olarak tespit edilmiştir. Söz konusu Ecemiş Fayı deterministik tehlike hesabında Mw7.5 büyüklüğünde bir deprem göz önüne alınarak meydana gelebilecek yer hareketi genliklerinin, yer hareketi tahmin denklemlerindemedyan veya medyan+standard sapma (σ) değerine karşılık geldiği kabul edilmiştir.

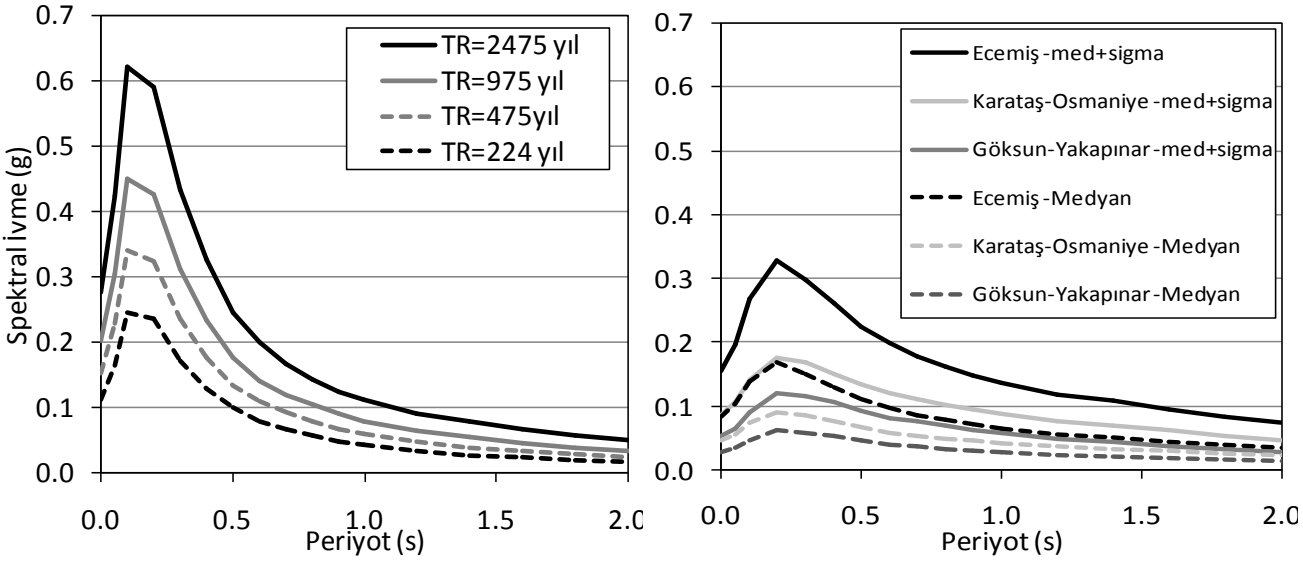
3.2. Seçilen Yer Hareketi Tahmin Denklemleri

Projede yer hareketi parametrelerinin tahminleri için 4 ayrı model kullanılmıştır. Yer hareketi tahmin denklemleri Akkar ve Bommer (2010), Akkar ve Çağnan (2010), Chiou ve Youngs (2008) ve Boore ve Atkinson (2008) modelleri olup aktif tektonik bölgelerde oluşan sığ depremler sonucu meydana gelen yer hareketi genliklerini tahmin ederler. Projeye konu olan sahanın aktif bir tektonik bölgede olması, burada gözlemlenen depremlerin derinliklerinin fazla olmaması nedeniyle proje için seçilen yer hareketi modelleri uygundur. Aynı zamanda bu modeller ülkemizin genel sismotektonik yapısı için de uygunluk göstermektedirler. Akkar ve Çağnan (2010) modeli Türkiye'de meydana gelen deprem hareketlerini derleyerek hesaplanmıştır. Akkar ve Bommer (2010) denklemi Türk yer hareketi kayıtlarını da ağırlıklı olarak içeren bir Avrupa veri tabanından

türetilmiştir. Boore ve Atkinson (2008) ve Chiou ve Youngs (2008) denklemleri ise sığ aktif tektonik rejimlere sahip Kaliforniya ve Tayvan ivme kayıtlarının çoğunlukta olduğu veri tabanları kullanılarak elde edilmiştir. Sığ aktif tektonik deprem hareketlerini temsil eden son 2 modelin Avrupa ve Orta Doğu bölgesindeki yer hareketi parameterelerinin tahminlerinde uygulanabilir oldukları farklı istatistiki yöntemler kullanılarak gösterilmiştir (Campbell ve Bozorgnia, 2006; Stafford vd., 2008). Bu modellerle beraber Akkar ve Çağnan (2010) aynı zamanda doğrusal olmayan saha tepkisini de dikkate almaktadır. Yatay yer hareketi için kullanılan bu tahmin denklemlerinden Boore ve Atkinson (2008) ve Chiou ve Youngs (2008) modelleri deprem dalgalarının yayılım yönü belirsizliğini Boore vd. (2006) tarafından önerilen yatay bileşen tanımını (GMRotI50) kullanarak dikkate almaktadir. Akkar ve Bommer (2010) ve Akkar ve Çağnan (2010) yer hareketi tahmin denklemleri ise yer hareketi sırasındaki yön belirsizliğini yatay bileşenlerin geometrik ortalamasını (GM) hesaplayarak dikkate almaktadır. GM ve GMRotI50 yatay bileşen tanımları ortalamada büyük farklılıklar göstermemektedir (Beyer ve Bommer, 2006). Gene Bommer ve Beyer (2006) çalışması rassal yatay bileşen tanımı ile GM veya GMRoTI50 yatay bileşen tanımları arasında tahmin denklemleri açısından büyük farklılıklar olmadığını belirtmişlerdir.

4. HESAPLANAN SAHAYA ÖZEL SPEKTRUMLAR

Olasılıksal yöntem sonucu projeye konu olan baraj için sahaya özel spektral ivmeler Şekil 5.a'da sunulmaktadır.Olasılıksal hesaplarda TR için sırasıyla 2475, 975, 475 ve 224 yıl süreleri dikkate alınmıştır. Bu spektrumlar %5 sönümleme oranı için geçerlidir. Aynı şekilde deterministik yöntemle proje sahasına etki edebilecek tüm fay kaynakları için hesaplanan %5 sönümleme oranına sahip spektral ordinatlar Şekil 5.b'da verilmiştir. Deterministik spektral ordinatlar yer hareketi tahmin denkleminde medyan+σseviyesine karşılık gelmektedir. Şekil 5'den anlaşılacağı gibi kısa periyot bölgesinde "medyan+σ" deterministik spektral ivmeler TR=2475 ile TR=975 yıl olasılıksal yöntemle hesaplanan spektral ivmelerden daha küçüktür. Bu spektrumlar için uzun periyot bölgesinde bu gözlemin tam tersi bir davranım vardır: "medyan+σ" deterministik spektral ivmeler TR=2475 ile TR=975 yıl olasılıksal yöntemle hesaplanan spektral ivmelerden daha büyüktür. "Medyan" deterministik değerler ile TR=475 yıl ve TR=224 yıl için olasılık yöntem sonuçlarının karşılaştırılması benzer sonuçlar sergilemektedir. Kısa periyot bölgesinde "medyan" deterministik spektral değerler TR=475 yıl ve TR=224 yıla karşılık gelen olasılıksal spektral değerlerden düşük çıkmakta, uzun periyot bölgesinde ise bu sefer TR=475 yıl ve TR=224 yıl için hesaplanmış spektral değerler "medyan" spektral değerlerden daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu sonuçlar, çalışma sahası çevresindearkaplanda belirsiz deprem kaynaklarında oluşan daha küçük magnitüdlü depremlerin kısa periyot aralığında belirgin rol oynaması ile açıklanmaktadır. Uzun periyotlarda ise spektral ordinatlar büyük magnitüdlü depremlerden etkilenmektedir. Bu durumda, deterministik deprem tehlikesinde göz önüne alınan Ecemiş fayında Mw=7.5 büyüklüğünde bir deprem senaryosu için hesaplanan "medyan+σ" spektral genlikleriolasılık deprem tehlikesinde uzun periyot aralığında TR=2475 yıl için verilen spektral genliklerden çok daha yüksek olmaktadır.Bu sonuçlar, Holosen devresinde Ecemiş fayı üzerindeki atım hızının kabul edilebilir bir kesinlik seviyesinde belirlenmesinin önemine işaret etmektedir. Literatürde sunulan tartışmalar ışığında, Holosen'de diri olmayabilecek bu fayı diri olarak kabul etmek ve deterministik hesaplarda "medyan+σ" genliklerini dikkate almak, göreli yüksek periyotlu yapılar için oldukça muhafazakar tasarım ivmelerinin kabulüne ve yapı maliyetlerini gereksiz olarak arttırılmasına sebep olabilecektir. Bu fayın diri olması durumunda, fay üzerindeki atım hızının olasılık hesaplarda yanlışlığı, uzun periyotlu yapılar için gerçekte farklı TR değerlerine karşılık gelen spektral ordinatlarının kullanılmasına sebep olacaktır. Bu durumda, Değirmençay ve çevresinde imal edilen yapılar için deprem riski diğer bölgeler ile tutarsız olabilecektir.



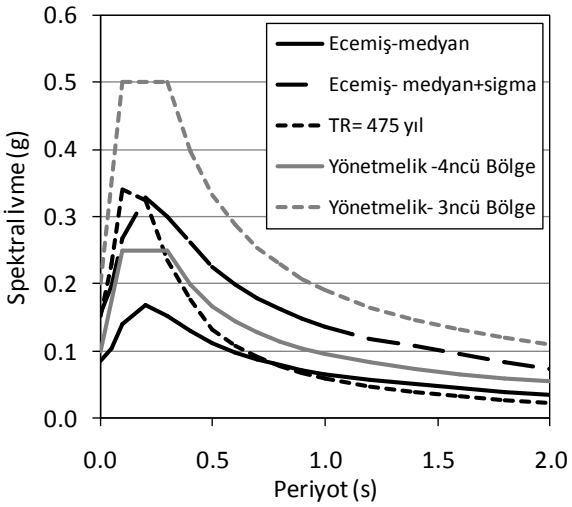
(a) (b)

Şekil 5. (a) olasılık ve (b) deterministik yöntem ile %5 sönümleme oranı için elde edilen spektral ordinatlar.

TR=475 yıl için olasılık yöntem ile hesaplanan spektral ordinatlar ve Ecemiş fayı ile uygulanan deterministikyöntemin sonuçları Şekil6'da Türk Deprem Yönetmeliği (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007) tarafından tanımlanan tasarım spektrumu ordinatları ile karşılaştırılmaktadır. Çalışma sahası deprem haritasında 3ncü ve 4ncü deprem bölgeleri sınırında yer alması sebebi ile iki bölge için verilen tasarım spektrumları karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Kısa periyotlarda olasılık yöntem 3ncü ve 4ncü bölge spektrumları arasında kalan spektral genlikler vermektedir. Ancak uzun periyotlarda 4ncü bölge tasarım spektrumunun altına düşmektedir. Deterministik sonuçlarda ise Ecemiş fayı için "medyan" değerler 4ncü bölge için yönetmelikte verilen spektral ordinatların altında, "medyan+σ" değerler ise üstünde vermektedir. Tüm analizler, 3ncü bölge tasarım spektrumunun çalışma sahası için önemli derecede muhafazakar olduğuna işaret etmektedir.

5. SONUÇ

Mersin Değirmençay'da ve Türkiye'nin 3ncü ve 4ncü deprem bölgeleri sınırında yer alan bir baraj sahası için olasılıksal ve deterministik yöntemlerle gerçekleştirilen deprem tehlikesi analizi sonuçları sunulmuştur. Olasılık yöntemle analiz sonucunda çalışma sahası için uzun periyotlarda Türk Deprem Yönetmeliği tarafından verilen spektral ordinatların önemli derecede muhafazakar olabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, deterministik yöntemde dikkate alınan ve bilimsel literatür ile deprem kataloglarında sismik hareketliliğini doğrular bilgilere ulaşılamayan Ecemiş fayının çalışma sahasındaki deprem tehlikesi üzerine belirgin etkisinin olabileceği görülmüştür. Bu fayın sahip olduğu atım hızı üzerindeki çalışmaların gerçekleştirilerek bilimsel literatürde sunulması, Mersin ilinin batı ve kuzeybatısındaki deprem tehlikesinin güvenilir şekilde hesaplanması için gereklidir.



Şekil 6. Olasılık ve deterministik yöntem ile hesaplanan spektral ordinatların yönetmelik spektrumları ile karşılaştırılması.

KAYNAKLAR

Akkar S. ve Bommer J.J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East, *Seismological Research Letters*. **81**, 195-206.

Akkar S. ve Çağnan Z. (2010). A local ground-motion predictive model for Turkey and its comparison with other regional and global ground-motion models, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 2978-2995.

Barka A. ve Reilinger R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali di Geofisica*, **XL(3)**, 587-610.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Bender B. (1983). Maximum likelyhood of b values for magnitude grouped data, *Bulletin of the Seismological Society of America*. **73(3)**, 831-851.

Beyer K. ve Bommer J.J. (2006). Relationships between median values and between aleatoryvariabilities for different definition of the horizontal component of motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96,** 1512–1522.

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 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra*, **24,** 99-138.

BSSC (2009). FEMA P-750, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences, Washington DC.

Campbell K.W. ve Bozorgnia Y. (2006). Next Generation Attenuation (NGA) empirical models: can they be used in Europe?, *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No. 458., Geneva, Switzerland.

Chiou B. ve Youngs R.R. (2008). An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, **24(1)**, 173-215.

Emre Ö., Doğan A., ve Özalp S. (2011). 1:250,000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Yenilenmiş Diri Fay Haritaları, http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=yeni_diri_fay_haritalari, son ulaşım: 26.08.2012.

Ergin M., Aktar M., ve Eyidoğan H. (2004). Present-day seismicity and seismotectonics of the Clician Basin: Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94(3)**, 930-939.

Gürsoy H., Tatar O., Piper D.A., Heimann A., ve Mesci L. (2003). "Neotectonic deformation linking the east Anatolian and Karataş-Osmaniye intracontinental transform fault zones in the Gulf of İskenderun, southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Ceyhan-Osmaniye volcanics. Tectonics, 22(6), 1-12.

Hanks T.C. ve Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research*. **84**, 2348-2350.

Koçyiğit A., ve Beyhan A. (1998). A new intracontinental transcurrent structure: the Central Anatolian Fault Zone, Turkey. *Tectonophysics*, **284**, 317-336.

McGuire, R.K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute Monograph, MNO-10, California.

Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity,1969–1982.*Journal of Geophysical Research*, **90**, 5479–5495.

Reilinger R., McClusky S, Vernant P, Lawrence S, Ergintav S, ve Cakmak R vd (2006). "GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions," Journal of Geopyhsical Research, 111, B05411.

Risk Engineering (2011). EZ-FRISK-Software for Ground Motion Estimation, Risk Engineering, Inc., 4155 Darley Avenue, Suite A, Boulder, Colorado 80305.

Schwarts D.P. ve Coppersmith K.J. (1984). Fault behavior and characteristic earthquakes: examples -from the Wasatch and San Andreas fault zones, *Journal of Geophysical Research*. **89(B7)**, 5681-5698.

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(2)**, 149-177.

UDİM, B.Ü. Kandilli rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Ulusal Deprem İzleme Merkezi (2012). http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo, son erişim: 01.11.2012.

Weichert DH (1980). "Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes," *Bulletin of the Seismological Society of America*. **70(4)**, 1337-1346.

Wells D.L. ve Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, ad surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84(4)**, 974-1002.

Westaway R. (1999). Comment on 'A new intracontinental transcurrent structure: the Central Anatolian Fault Zone, Turkey' by A. Koçyiğit and A. Beyhan. *Tectonophsics*, **314**, 469-479.

Westaway R. (2003). Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean Updated.*Turkish Journal of Earth Sciences*, **12**, 5-46.

Westaway R. (2004). Kinematic consistency between the Dead Sea Fault Zone and the Neogene and Quaternary left-lateral faulting in SE Turkey.*Tectonophysics*, **391**, 203-237.