

ARALIK 1997 VE MART 1998 BALA DEPREMLERİNE ÖZEL AZALIM KATKILARININ GELİTİRİLMESİ VE BUNA BAĞLI OLARAK ANKARA VE ÇEVRESİNDEKİ YER ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

M.K. Koçkar¹

¹ Ph.D., Deprem Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Merkezi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Maltepe, Ankara
Email: mkoçkar@gazi.edu.tr

ÖZET:

Yerel zemin koşulları depremler esnasında yer sarsıntısının büyüklüğü ve frekansını ciddi şekilde etkileyebilir. Son yıllarda meydana gelen önemli depremlerin yer sarsıntısı kayıtları göstermektedir ki yüzeye yakın yerel zemin koşulları yer hareketi büyütmelerine dair çok önemli bilgiler sağlayabilir ve nümerik simülasyonlar ile tahmin edilen büyütme katsayıları ve mevcut bina kodlarıyla karşılaştırılabilir. Bu çalışmada, Ankara güneyinde gerçekleşen Bala depremleri serilerinin kuvvetli yer hareketi verilerinin yerel zemin koşullarının yer sarsıntısı üzerindeki etkisini hesaba katarak analiz etmektedir. Öncelikle, Ankara ve çevresindeki kuvvetli yer hareketi istasyonlarının zemin sınıflamasının yapılması için bu alanlarda kayma dalgası hızı profilleri değerlendirilmiştir. Bala depremleri serisi (M_w aralığı 5.7 - 4.8) sırasında kaydedilen kuvvetli yer hareketi verileri ile bölgeye ait en yüksek yer ivmesi, farklı periyot ve zemin koşullarındaki spektral ivmeler depreme özgü azalim katsayılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Depreme-özel (event-specific) azalim katsayılarının regresyon sonuçlarından saha büyütme katsayıları elde edilmiştir (S_a , zemin/ S_a , kaya). Sonuç olarak, kayıt istasyonlarından alınan tepki spektrumları farklı zemin sınıfları için büyütme katsayılarının belirlenmesi amacıyla, yerel koşulları bölgelerin saha tepkisinin anlaşılmasında kullanılmıştır. Bu büyütme katsayıları ayrıca uygun Bina kodlarında belirtilen depremlerle karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Kuvvetli yer hareketi istasyonlarının yüzey dalgası yöntemleri ile karakterizasyonu, Yer etkisi, Yer büyütme katsayıları, Bina Kodu, Bala depremleri

1. GİRİŞ

Ankara civarında 20-27 Aralık 2007 ($M_w= 5.7, 5.6, 5.2, 4.8$) ve 15 Mart 2008 ($M_w= 5.2$) gerçekleşen Bala depremleri serisi deprem mühendisliği çevrelerinde büyük ilgi uyandırmıştır. Bunun sebebi Ankara civarının sismik aktivite açısından sakin olarak kabul edilmesi ve Orta Anadolu'nun iç kesimlerinde nadiren orta şiddette ($M_w > 5$) depremlerin meydana gelmesidir. Ancak, bu algı Ankara'nın güneyinde meydana gelen Bala depremleri serisi ile çürütülmüştür. Bir diğer önemli konu da orta şiddette olan Bala depremlerinin merkez üssünden yaklaşık 50 km uzaktaki Başkent Ankara'da güçlü bir şekilde hissedilmesi olmasıdır. Kısaca, yerel zemin koşulları Bala depremleri sırasında oluşan kuvvetli yer hareketlerinden etkilenmemiştir olabilir. Bu nedenlerle, Ankara'nın sismik aktivitenin merkezine nispeten uzak bir konumda olduğu düşünülse de deprem etkisiyle oluşan ve sismik hasara katkısı olan yerel zemin koşullarının etkisi araştırılmalıdır (Koçkar ve Akgün, 2012; Eker ve diğeri, 2015).

Daha önce de belirtildiği gibi, yüksek sismik aktivitenin sıklık aralığının az olduğu Ankara bölgesine az sayıda kuvvetli hareket istasyonu bulunmaktadır. İstasyonlar genel olarak Ankara'dan 80-100 km uzakta bulunan ve büyük depremler yaratan önemli fay sistemleri veya deprem yaratma potansiyeli daha yüksek olan aktif bölgeler

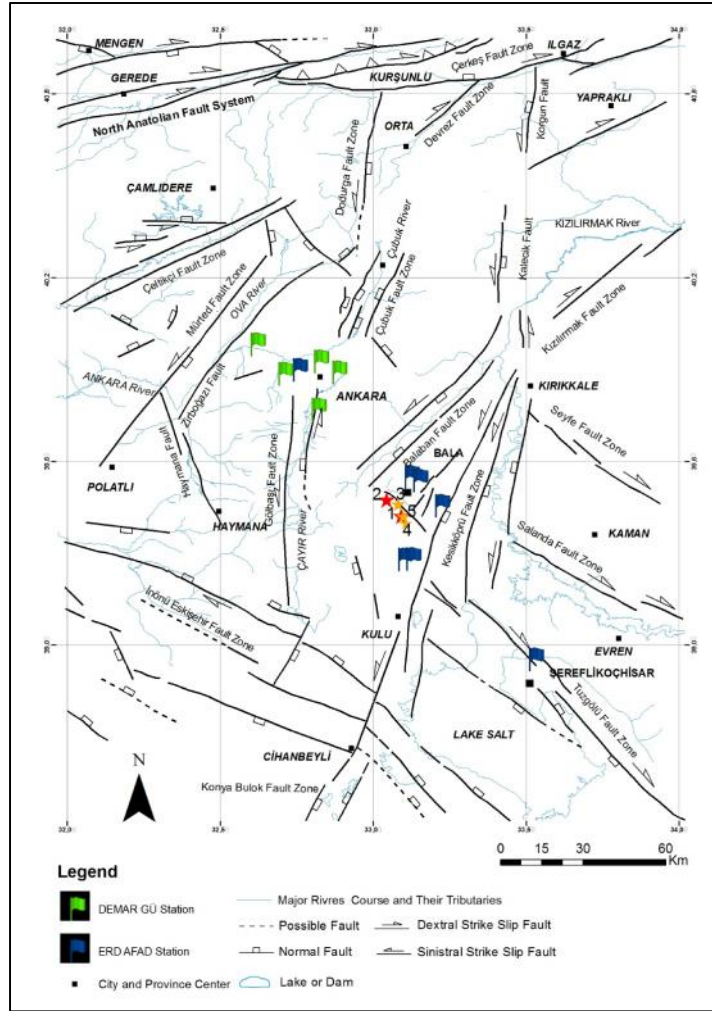
boyunca yerle tirilmi tir. Bu sebeple, bu bölge için yapılacak olan sismik tehlike tahminleri belirsiz va buna ba lı olarak sismik kayna ın bölgeselle tirilmesini (seismic source regionalization) saptamak çok zordur.

Yer hareketinin sebep oldu u sismik zarar da ılımları genellikle yerel zemin ko ullarında mekânsal farklılıklar oldu unu yansıtmaktadır. Bu nedenle, yer hareketindeki de i imlerin anla ılmasında ve zemin farklılıklarından dolayı zemin büyütme tahmini için sayısal zemin parametreleri gereklidir. Yerel zemin ko ullarının bu ekilde de erlendirilmesi sismik kod hükümlerine yansıtılmı tır. IBC 2009 ((International code council, ICC, 2009) gibi tasarım kod hükümleri sismik sediman özelliklerini ölçen tek parametre olarak ilk 30 m'deki ortalama kayma dalgası hızlarını (V_{s30}).kullanan zemin sınıflama sistemlerini benimsemi tir (Dobry ve di ., 2000). Alternatif olarak, Türk tasarım kodu (TSC 1998, Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve skân Bakanlığı, 1998) gibi bazı sınıflama sistemleri ise kayma dalgası hızlarını (V_s) stratigrafik very ile birlikte de erlendirmektedir. Bu yüzden, kuvvetli hareket istasyonlarındaki kayma dalgası hızlarının karakterizasyonu ve zemin ko ullarının kaydedilen harekete etkisi, yer etkisi de erlendirmelerinde çok önemlidir. Bu çalı mada, kayma dalgası hızlarının yerinde tanımlanması Rayleigh yüzey dalgalarını da kapsayan, tahribatsız sismik test yöntemleri kullanılarak gerçekte tirilmi tir. Çalı ma alanında ölçümlenen ve di er çalı malardan derlenen V_s sonuçları kuvvetli hareket istasyonlarında zemin karakterizasyonlarının yapılmasında kullanılmı tır.

Bala depremleri serisi için Gazi Üniversitesi-DEMAR ve AFAD (Ulusal kuvvetli yer hareket istasyonları) veri bankaları kullanılarak kaydedilen kuvvetli hareket verileri orta iddetteki depremlerin yer hareketi özelliklerinin ve zemin etkisinin de erlendirilmesi için çok önemli bilgiler sa lamaktadır. Bala depremleri sırasında kaydedilen kuvvetli yer hareketi verileri zemin ko ullarının yer sarsıntısı üzerindeki etkisini de erlendirmede kullanılmı tır. Maksimum yer ivmesi ve farklı periyotlardaki spectral ivmeler için deprme özel azalım ili kileri geli tirilmi tir. Sonuç olarak, kayıt istasyonlarından alınan tepki spektrumu, yerel olarak co rafik bölgelerde saha tepkisinin gösterebilece i de i ikli i anlamak amacıyla herbir zemin sınıfı için büyütme katsayılarının geli tirilmesinde kullanılmı tır.

2. KUVVETL YER HAREKET STASYONLARININ ZEM N KARAKTER ZASYONU ÇALI MALARI

Daha önce bahsedildi i gibi, Bala depremi serisi Ankara'nın güneydo usunda 20 ve 26 Aralık 2007 tarihlerinde sırasıyla 5.7 ve 5.6 moment magnitüdü büyüklüklerinde olmu tur (ekil 1; AFAD Deprem Ara tırma Dairesi, ERD, 2007). Depreme yakla ık 65 km uzaklıkta bulunan bir istasyon (ERD-Lodumlu) dı nda Deprem kaydı alınan di er istasyonlar 150 km'den daha uzaktadır ve bunlardan on tanesi 20 Aralık, yirmi tanesi ise 26 Aralık depremini kaydetmi tir. Bu nedenle, 5.7 iddetindeki deprem verileri bu çalı maya dahil edilmemi tir. Bununla birlikte, Gazi-DEMAR'ın be adet kuvvetli yer hareketi istasyonu 5.6 iddetindeki ikinci depremi kaydetmi tir (Pampal ve di ., 2007). Daha sonra, 27 Aralık 2007'de iki tane orta iddette, 5.2 (ERD, 2007) ve 4.8 (Gazi-DEMAR, 2007) büyüklüklerinde deprem meydana gelmi tir (ekil 1). Depremlerin yarattı ı bu faylara 100 km'den daha yakında bulunan DEMAR ve ERD'nin sırasıyla sekiz ve dokuz kuvvetli yer hareketi istasyonu bu depremleri kaydetmi tir. 15 Mart 2008'de gerçekte en 5.2 moment magnitüde büyüklü ündeki son deprem ise toplam yedi kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmı tir (ekil 1; Gazi-DEMAR, 2008). Çe itli sebeplerden dolayı (geçici istasyon olması veya istasyon yeri de i ikli i) çalı mada kullanılacak olan kayma dalgası hızı profilleri AFAD-ERD (2007)'nin Ankara istasyonlarının bir kısmında mevcut de ildir. Bu çalı ma öncesinde yapılan bilimsel bir proje ile Gazi-DEMAR'ın istasyonlarında V_s profilleri ölçümlenerek karakterizasyonları yapılmı tır (Can ve di ., 2013). Tüm bu istasyonların ve Bala Depremlerin konumsal da ılımları ekil 1'de verilmi tir.



Şekil 1. Çalı ma alanındaki kuvvetli yer hareketi istasyonlarının ve Bala depremlerinin yerleri. Numaralandırılmı yıldızlar gerçekte en Bala depremlerinin episantr noktalarını göstermektedir (1-20.12.2007, M_w : 5.7; 2-26.12.2007, M_w : 5.6; 3-27.12.2007, M_w : 5.2; 4-27.12.2007, M_w : 4.8; 5-15.03.2008, M_w : 5.2).

2.1. Sismik test yöntemleri

Ankara ve çevresindeki Gazi-DEPAR'a ait be ve AFAD-ERD'ye ait yedi kuvvetli hareket istasyonundaki V_s profillerinin bulunduğu alanlardaki zeminlerin karakterizasyonu Rayleigh tipi yüzey dalgalarının dispersif özelliğini temel alan sismik test metodları ile yapılmıştır. Çalı mada aktif yüzey dalgası metodu olarak kullanılan Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) ve pasif yüzey dalgası metodu olarak kullanılan Titre imcik Dizi Yöntemi Metodları (MAM) kar ılı tırılabilen sonuçlar vermekte ve alınan sonuçlar kuvvetli hareket istasyonları çevresinde V_s profillerinin çıkarılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalı mada aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemlerinin bir arada kullanılmasıdır. Bunun sebebi sı derinliklerde yüksek çözünürlüklü veri alınmasını sağlamak ve V_s ölçümlerinin derinlere ulaşmasına imkân vermek içindir.

Ankara civarındaki farklı birimlerin dinamik zemin karakterlerini anlamak amacıyla 11 farklı kuvvetli yer hareketi istasyonundan 22 adet yüzey dalgası ölçümü alınmıştır. Bu ölçümler genellikle do rusal bir dizilim boyunca yirmi adet 4.5 Hz'lik do al frekanslı dü ey jeofon kullanılarak 1.5 m aralıklı MASW ve 10 m aralıklı

MAM ölçümlerinden alınmıştır. MASW yöntemi ile yapılan aktif yüzey dalgası ölçümlerinde enerji kaynağı olarak 26.5 kg'lık bir ağırlıklı düzme yöntemi kullanılmıştır. Bu enerji kaynağı, Gazi Üniversitesi-DEMAR tarafından zeminlerin özelliklerine göre gerekli ekipman ve donanıma uygun olarak elektrik motorlu bir düzmeyle çalıştırılan, kullanıcı kontrolü olmadan yay gerilmesi sayesinde ivmeli bir hareketle tetiklenebilen ve yaklaşık olarak 100 kg'dan 1000 kg ve üzerine kadar artırılabilir hidrolik mekanizmalı, kolay taşınabilir bir ağırlıklı düzme düzeneğidir. Kuvvetli yer hareketi istasyonlarında yapılan MASW arazi deneylerinde kullanılan bu ağırlıklı düzme düzeneği yüzey dalgası frekanslarının kontrol altına alınarak dispersif etkilerinin (hıza karşı frekans veya dalga boyu) daha düşük frekanslarda da belirlenebilmesine ve derin penetrasyonlar sağlanarak sismik kayma dalgası hızlarının ölçülebilmesine olanak sağlayan enerji kaynağıyla derin zemin karakterizasyonlarının (30-50 m) yüzey dalgası ölçümleriyle ayrıntılı olarak değerlendirilmesine imkân sağlanması amacıyla tasarlanmıştır (Can ve diğeri, 2013). Bu enerji kaynağı hızlı kurulum sağlanarak ve kentsel alanlarda güvenli olarak kullanılabilmek amacıyla tasarlanan mobil bir kaynaktır. MAM yöntemi ile yapılan pasif yüzey dalgası ölçüm çalışmalarında ise her ölçüm için standard olarak optimum zaman aralığı 10 dakika (Hayashi, 2008) ve ölçümleme zaman aralığı ise 2 ms olarak seçilmiştir. Dispersiyon etkisini ortadan kaldırmak için mekansal otokorelasyon (SPAC) analizi (Okada, 2003) kullanılmıştır. Lineer olmayan en küçük kareler tekniği ile tek boyutlu ters çözümleme ile faz hızı etkilerine uygulanmış ve 30 m'den daha derine inen tek boyutlu S-dalgası hızı profilleri elde edilmiştir.

Daha sonrasında çalışılan alanındaki kuvvetli yer hareketi istasyonlarındaki ortalama kayma dalgası hızlarını (V_{s30}) elde etmek için kör yol tekniği (a blind way technique) uygulanmıştır. Bu amaçla, jeofon tipi, jeofon mesafesi ve ofset uzunluğu 30 m'den fazla derinlikteki tabakaları karakterize edebilecek şekilde seçilmiştir. Bu yöntem aktif ve pasif kaynaklara dayanan iki yüzey dalgası yöntemi olan MASW ve MAM verilerinden elde edilen dispersif etkilerinin birleştirilmesine imkân sağlamaktadır. Böylece, daha güvenilir ve detaylı V_s profilleri geliştirilerek zeminler sınıflandırılmıştır. Aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemlerinin beraber kullanılması ile elde edilen bu profiller kuvvetli yer hareketi istasyonlarının bulunduğu alanlarda yanal depremlerin de olduğu alanları işaret etmektedir.

2.2. Zemin sınıflandırmaları

Kayma dalgası hız profilleri, daha önce ekil 1'de verilen kuvvetli yer hareketi istasyonlarından elde edilen aktif ve pasif yüzey dalgası ölçümlerinin beraber kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Daha sonrasında, yüzeye yakın sediman birimlerinden elde edilen V_s profilleri, zemin sınıflandırma sistemleri yardımıyla karakterize edilmiştir. Burada zeminlerin sınıflandırılması için bahsedilen tasarım sistemleri IBC 2009 ve TSC (1998)'dir. IBC sistemi zeminleri yumuşak zeminden sert kayaya kadar derinden ve sadece V_{s30} 'a göre ayrılmış beş ana kategoriye ayırır. TSC sistemi ise zemin sınıflarını yüzeydeki zemin tabakalarının stratigrafik özelliklerinin V_s verisi ile birlikte kullanılması esasına dayanır. Yüzey tabakası bir zemin grubuna V_s değeri ile atanmakta ve atanan zemin sınıfı zemin türüne ve en üstteki tabakanın kalınlığına göre derinleştirilmektedir. TSC sınıflandırma sisteminin zemin kalınlığını hesaba katıyor olması bir avantaj olsa da sadece yüzeydeki tabaka ile ilgilenir, yani daha altta bulunan tabakaları yok sayar. Bala deprem serilerini kaydeden kuvvetli yer hareketi istasyonları için hazırlanan IBC 2009 ve TSC ait zemin sınıflandırmaları Tablo 1'de V_{s30} değerleri ve yüzey jeolojisi özellikleri ile birlikte verilmiştir. Ankara ve çevresindeki zeminleri, jeolojik olarak üç ana birimde ayırtlayabiliriz. Bunlar, (1) Üst Miyosen öncesi-Alt Pliyosen ya da lı temel kayaları (makale içerisinde kaya olarak bahsedilen birim), (2) Üst Pliyosenden Pleistosen'e kadar devam eden fluvial akarsu ve göl çökelleri (Pliyo-Pleistosen fluvial), (3) Kuvaterner ya da lı teras ve aluvial çökellerdir (Akyürek ve diğeri, 1997).

IBC sonuçlarına göre, kuvvetli yer hareketi istasyonlarındaki Kuvaterner ve Pliyo-Pleistosen çökellerinin V_{s30} değerleri istatistiksel olarak farklı olsalarda her ikisinin de IBC-D zemin sınıfı aralığına düşmektedir (Koçkar ve diğeri, 2010). Aslında, Kuvaterner ve Pliyo-Pleistosen çökelleri arasında doğal bir sınır bulunmamaktadır. Ayrıca, IBC zemin sınıfı sınırlarını (temel kayası için B ve C sınıfları arasında) kesen kaya

birimleri jeolojik birim ve zemin sınıfı arasında direkt bir ilişkinin kurulması da zordur (örneğin çok sıkı zemin, yumu ak/ayrım kaya veya sağlam kaya). IBC tasarım koduna dayalı sınıflandırma sistemleri jeolojik birimleri ve özellikle ayrım kaya ve çok sıkı zeminleri, ayrı kaya sınıfları olarak uygun bir şekilde ayırtlayamadığından bu çalışmalar için zemin sınıflandırmaları yaparken jeolojik tanımların da dikkate alınması önemlidir.

TSC ile zemin sınıflarını tanımlamak için V_s ve yüzey tabakası kalınlıkları kullanılmaktadır. Yüzey tabakası hızdaki ani değişikliklerin olduğu noktalar temel alınarak veya mevcut sondaj verileri kullanılarak belirlenmektedir. Kuvvetli yer hareketi istasyonlarından elde edilen sonuçlar Kuvaterner zeminlerin yüzeyde yumu ak (D sınıfı) içerdiği göstermiş ve yumu ak zemin kalınlığına dayanılarak TSC Z3 ve Z4 olarak sınıflandırılmıştır. Pliyo-Pleyistosen zeminler ise Z3 olarak sınıflanmıştır. Ancak, Pliyo-Pleyistosen zeminler IBC ile de D sınıfı olarak tanımlanmaktadır ve TSC sisteminin Z3 sınıfından daha yumuaktır. Yani, TSC sistemi (Z3) genel olarak Pliyo-Pleyistosen çökelleri için IBC sisteminden (D) daha sağlam bir zemin sınıfı sonucu vermektedir. IBC sistemi zemin profilindeki 30 m'lik kısmın kayma dalgası hız ortalamasını alıyor ve yüzey tabakasının altındaki daha sıkı zemini hesaba katıyor olsa da Pliyo-Pleyistosen zeminlerin V_{s30} değerleri D-sınıfı aralıktadır (180 - 360 m/s) (Koçkar ve diğ., 2010). TSC hakkındaki diğer önemli bulgu da Pliyo-Pleyistosen zeminlerin Kuvaterner zeminlerden daha yüksek V_{s30} değerlerine sahip olduğudur. IBC ve TSC sistemleri karşılaştırıldığında TSC sınıflama sisteminin sadece yüzeydeki tabakayı hesaba katması sebebiyle zeminleri daha yumu ak sınıflandırdığı açıktır. Bu yüzden, kuvvetli yer hareketi istasyonlarının zemin karakterizasyonları yapılırken IBC ve TSC sistemleri birlikte değerlendirilerek daha güvenilir sonuçların elde edilmesine çalışılmıştır.

Tablo 1. Ankara ve çevresindeki kuvvetli yer hareketi istasyonlarının zemin sınıflandırmaları

stasyon	stasyon Sahibi	Yüzey Jeolojisi	V_{s30} (m/s)	IBC-2009 Zenin Sınıfı	TSC Zemin Sınıfı	Tanımlanan Zemin Sınıfı (IBC/TSC)
Gazi Üniversitesi Gölbaşı Kampüsü	Gazi-DEMAR	1	528	S _C Sınıfı	B-Z2	Yumu ak Kaya/ Ayrım Kaya
Eryaman-Güzelkent	Gazi-DEMAR	2	255	S _D Sınıfı	D-Z3	Sıkı Zemin/ Yumu ak Zemin
Gazi Üniversitesi Beşevler Kampüsü	Gazi-DEMAR	3	195	S _D Sınıfı	D-Z4	Sıkı Zemin/ Yumu ak Zemin
Çankaya	Gazi-DEMAR	1	728	S _C Sınıfı	B-Z2	Yumu ak Kaya/ Ayrım Kaya
Ümitköy	Gazi-DEMAR	2	300	S _D Sınıfı	C-Z3	Sıkı Zemin/ Sıkı Zemin
Bala-Sırapınar Köyü-Qdr	AFAD-ERD	2	356	S _D Sınıfı	C-Z3	Sıkı Zemin/ Sıkı Zemin
Deprem Araştırma Merkezi (ERD)-Lodumlu	AFAD-ERD	2	291	S _D Sınıfı	C-Z3	Sıkı Zemin/ Sıkı Zemin
Bala-Eski Valilik Binası	AFAD-ERD	1	590	S _C Sınıfı	B-Z2	Yumu ak Kaya/ Ayrım Kaya
Bala-Sofular Köyü, Yem fabrikası	AFAD-ERD	1	373	S _C Sınıfı	C-Z2	Çok Sert Zemin/ Ayrım Kaya
Bala-Sofular Köyü, Yem fabrikası_Qdr	AFAD-ERD	1	392	S _C Sınıfı	C-Z2	Çok Sert Zemin/ Ayrım Kaya
Bala-Bölge Polis Merkezi	AFAD-ERD	1	626	S _C Sınıfı	B-Z2	Yumu ak Kaya/ Ayrım Kaya
ereflikoçhisar	AFAD-ERD	2	325	S _D Sınıfı	C-Z3	Sıkı Zemin/ Sıkı Zemin

3. DEPREME ÖZEL AZALIM KATILIMLARI

Bala deprem serilerinden elde edilen veriler maksimum yer ivmesi, farklı zemin koşullarındaki ve deprem periyotlarındaki spectral ivmeler için depreme özel azalım katsayılarının geliştirilmesinde kullanılmıştır. Herbir olay için, farklı zeminlerde ve depremin merkezine en fazla 100 uzaklıktaki bir bölgede alınan ölçümlerin sayısı Tablo 2’de gösterilmiştir. Tabloda, C/B-Z2 (IBC/TSC) yumuşak kaya ile ayrımsız kayayı, C/C-Z2 çok sert zemin ile ayrımsız kayayı temsil etmektedir, buna göre kaya zeminler bu kategorilerin kombinasyonu olacak şekilde IBC ve TSC’ye göre birlikte tanımlanmıştır. Aynı şekilde, D/D-Z3 or Z4 sıkı zemin ile yumuşak zemini temsil etmektedir ve zemin olarak adlandırılan birimler bu iki kategorinin kombinasyonu alınarak belirlenmiştir. Tablo 2’de verilen Bala deprem kayıtlarının ölçümlendiği istasyon bölgelerindeki zemin koşulları tam olarak literatürde tanımlanan temel kayasını ($V_s > 750$ m/s) temsil etmemektedir (örneğin, IBC-A or TSC A- or B-Z1). Sadece iki istasyon bu kategoriye uygundur. Bu sebeple, kaya ve çok sıkı zeminlerin Deprem esnasında zemin tepkileri farklı olsa da bazı uygun sahalarda benzer kaya kategorileri kayıt sayısını artırmak amacıyla birlikte kullanılabilir (örneğin, Rodriguez-Marek ve diğeri, 2001). Ayrıca, zemin olarak tanımlanan alanlardaki verilerin istatistiksel çalışmalarında hata payını azaltacak şekilde homojen dağılımını sağlamak amacıyla her ikisi de derin zeminleri temsil eden IBC sıkı zemin ve TSC yumuşak zemin alanları genel olarak bir arada değerlendirilmiştir (Rathje ve diğeri, 2003).

Tablo 2. Analizi yapılan Bala deprem serileri (M_w aralığı 5.7 - 4.8) ve IBC 2009 ve TSC (IBC/TSC) temel alınarak herbir zemin sınıfından elde edilen ölçüm sayısı

M_w	Tarih	C/B-Z2 Zemin	C/C-Z2 Zemin	sonuç Kaya Sınıfı	D/C-Z3 Zemin	D/D-Z3 ve Z4 Zemin	Sonuç Zemin Sınıfları
5.6	26.12.2007 23:47	2	-	2	2	2	4
5.2	27.12.2007 13:47	3	-	3	3	2	5
4.8	27.12.2007 17:56	2	2	4	3	2	5
5.2	15.03.2008 10:15	3	-	3	2	2	4

Mesafe aralığı göz önüne alındığında Bala depremler serisi kuvvetli yer hareket verisinin tüm zemin sınıflarına eşit dağılımı görülmemiştir. 0-10 km mesafe aralığında hiçbir deprem için veri bulunmamaktadır. 5.6 büyüklüğündeki deprem dışındaki kuvvetli hareket verilerinin çoğu 10-80 km aralığında depremlerdir. 5.6 büyüklüğündeki deprem için alınan en yakın mesafeli kayıt 40 km uzaklıktadır. Bunlara ilave olarak, farklı zemin sınıflarındaki kayıtların sayısı ve dağılımları her zaman tam anlamıyla uygun değildir. Örneğin, C sınıfı ve D/D-Z4 yumuşak zemin sınıfları için alınan veriler sınırlıdır. Bu sebeplerden dolayı farklı kaya ve zemin sahalardan uygun kategoriler birlikte kullanılarak IBC ve TSC’ye göre kaya için B/C ve zemin için D sınıfının çalışmalarında kullanılmasının uygun olacaktır (Tablo 3).

Çalışmada kullanılan depreme özel azalım katsayısının fonksiyonel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\ln Y = c_1 + c_2 \cdot \ln \left(\sqrt{R^2 + c_3^2} \right) + \tau \quad (1)$$

Bu eşitlikte, $\ln Y$ seçilen T periyotlarındaki spectral ivmenin doğal logaritmasını, R fay kırığı düzlemine olan en kısa uzaklığın Km cinsinden karışıklığını, sıradan en küçük kareler yöntemi (ordinary least square method) ile hesaplanan hata terimini, ve c_1 , c_2 ve c_3 terimleri regresyon katsayılarını temsil etmektedir. Bu fonksiyonel ilişki

daha önce Rodriguez-Marek ve diğ. (2001) ve Rathje (2004)'nin azalım ili kilerinde de kullanılmıştır. Yukarıda verilen bu denklem faya 0 ile 100 km mesafede bulunan kuvvetli yer hareketi verileri kullanılarak PGA ve S_a 0.3, 1.0 ve 2.0 periyotlarına adapte edilmiştir. Daha sonra, kaya ve zemin sınıfı sahalar için seçilen periyotlardaki tepki değerlerini bulmak amacıyla sahaya özel azalım ili kileri için bir regresyon analizleri uygulanmıştır. Zemin sınıfları ve her deprem için regresyon katsayıları Tablo 3'te verilmiştir. Yapılan bu çalışma mada hesaplanan regresyon analizi çözümlerinde, bu çalışmalar için uygun bir istatistik yazılımı olan JMP IN (SAS Institute Inc.) programı kullanılmıştır.

Denklem 1'deki bazı katsayılar doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için kısıtlı tutulmuştur. Bağıntıdaki analizlerde c_3 için literatürdeki azalım ili kileriyle uyum göstermeyen büyük değerler hesaplanmıştır. Daha sonrasında c_3 katsayısını belirsizlik kuplajından kaçınmak için sabit tutulmuştur (Abrahamson and Silva, 1997; Rodriguez-Marek ve diğ., 2001, Rathje, 2004 and Rathje ve diğ., 2005). Bu regresyon çalışması sırasında, c_3 herbir yer hareketi parametresi için kaya ve zemin sınıfları kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonrasında regresyon analizinde, c_3 parametresi her zemin sınıfı için sabit tutulmuş ve c_1 ile c_2 katsayılarının elde edilmesi için regresyon analizi her zemin sınıfı için tekrar hazırlanmıştır. Bu sınırlama Bala depremlerinde kaya verilerinin bütün mesafelerde düzenli dağılması ve buna bağlı olarak iyi örneklemeler olmaması sebebiyle gereklidir.

Tablo 3. Bala serileri için depreme özel azalım ili kilerinin regresyon katsayıları
(M_w aralığı 5.7 - 4.8)

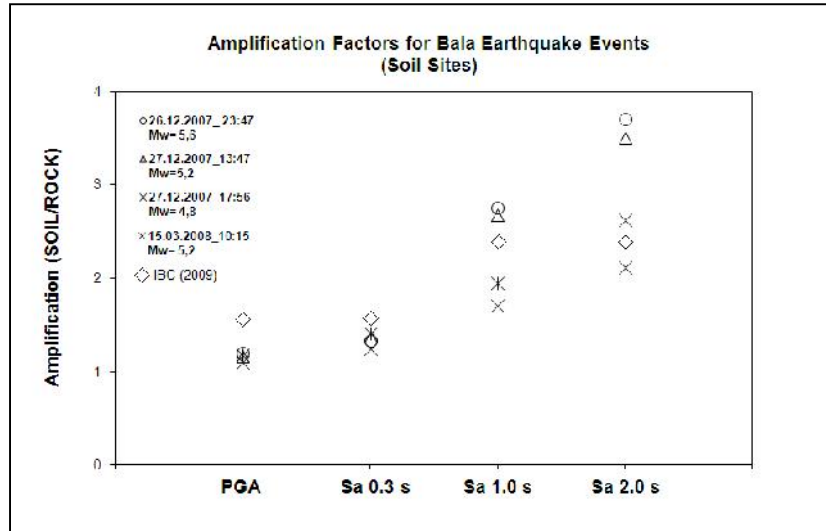
26.12.2007 23:47 $M_w=5.6$								
	PGA		$S_a (T=0.3)$		$S_a (T=1.0)$		$S_a (T=2.0)$	
	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)
c_1	-0.952	-1.124	-0.782	-0.413	-0.233	0.411	-0.655	-0.377
c_2	-0.787	-0.656	-1.028	-1.172	-1.432	-1.246	-1.146	-0.626
c_3	5.000		5.000		5.000		5.000	
s	0.525	0.614	0.642	0.594	0.613	0.520	0.796	0.657
27.12.2007 13:47 $M_w=5.2$								
	PGA		$S_a (T=0.3)$		$S_a (T=1.0)$		$S_a (T=2.0)$	
	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)
c_1	-1.943	-1.574	-1.526	-1.782	-1.353	-0.431	-0.314	0.746
c_2	-0.475	-0.587	-0.552	-0.239	-0.642	-0.609	-1.262	-1.124
c_3	5.000		5.000		5.000		5.000	
s	0.475	0.520	0.480	0.592	0.430	0.382	0.588	0.402
27.12.2007 17:56 $M_w=4.8$								
	PGA		$S_a (T=0.3)$		$S_a (T=1.0)$		$S_a (T=2.0)$	
	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)
c_1	-1.820	-1.625	-0.342	0.249	0.567	0.618	0.815	1.184
c_2	-0.687	-0.656	-1.423	-1.581	-1.917	-0.290	-2.052	-1.672
c_3	5.000		5.000		5.000		5.000	
s	0.480	0.384	0.465	0.429	0.486	0.512	0.615	0.523
15.03.2008 10:15 $M_w=5.2$								
	PGA		$S_a (T=0.3)$		$S_a (T=1.0)$		$S_a (T=2.0)$	
	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)	Rock (B/C Site)	Soil (D Site)
c_1	-1.643	-1.815	0.415	0.971	1.376	0.654	0.187	0.377
c_2	-0.702	-0.583	-1.905	-2.225	-2.487	-1.723	-1.655	-0.819
c_3	5.000		5.000		5.000		5.000	
s	0.675	0.794	0.635	0.714	0.705	0.572	0.512	0.674

4. SAHA BÜYÜTME KATSAYILARI

Depreme özel azalım ili kileri, daha sonra referans alınan temel zemin koşullarına bağlı büyütmeye katsayıları geliştirmek için kullanılmıştır. Standard uygulamada kaya birimler referans ölçüm olarak kullanılmıştır (Idriss, 1991, Abrahamson and Silva, 1997). Çalışılan alana bağlı büyütmeye katsayıları zemin koşullarının (örneğin, zemin sınıfı) ve kaya hareketi şiddetinin (PGA_{KAYA}) bir fonksiyonudur. Büyütmeye oranlarının değerlendirilmesinde (S_a , zemin/ S_a , kaya) en önemli husus, kaya için depreme-özel azalım ili kilerinin

geli tirilmesidir (B ve C sınıfı için yapılan regresyon sonuçları). Büyütme oranlarının geli tirilmesinin temelini de bu durum te kil etmektedir. Daha önce belirtildi i üzere, kaya verilerinin bütün mesafelerde düzenli da ılmaması kaya hareketlerinin makul büyütme katsayıları vermemesine neden olmu tur. Bu yüzden, PGA ve $T=0.3, 1.0$ ve 2.0 s'deki spektral ivmeler için büyütme katsayılarının elde edilmesi için kaya zeminlerin (B- ve C-Sınıfı) sınırlandırılmı regresyon sonuçları zemin için olan regresyon sonuçları ile birlikte (D-Sınıfı) kullanılmı tır.

Bala depremleri için geli tirilen spektral büyütme katsayıları ekil 2'de gösterilmı tır. Ayrıca bu ekilde IBC (2009) tarafından önerilen büyütme katsayıları da kar ıla tırma amacıyla verilmi tır. Bala deprem serileri büyütme katsayıları açısından de i iklikler göstermektedir. Maximum yer ivmesi (PGA) regresyon sonuçları Bala depremleri için benzer büyütme de erlerini i aret etmektedir. $T=0.3$ s spektral ivme de erleri için $M_w=4.8$ depremi dı nda neredeyse aynı sonuçlar bulunmu tur. Kısa periyotlarda Bala depremlerinin büyütme katsayıları IBC (2009) tarafından önerilen katsayı de erlerinden daha küçüktür. İginç bir ekilde $M_w=4.8$ depreminin büyütme katsayıları daha büyük magnitüdü depremlerden daha yüksektir. Bunun sebebi kaya verilerinin iyi örneklemler olmaması ve fay kırına yakın mesafedeki verilerin eksikli i olabilir. Yüksek periyotlarda ise ($T=1.0$ and 2.0 s), $M_w=5.6$ ve $M_w=5.2$ (27.12.2007_13:47) depremlerinin büyütme katsayıları di er depremlerden daha büyüktür. Bununla birlikte, $M_w=5.2$ (27.12.2007_13:47) ve $M_w=4.8$ olaylarının de i kenli i di er olaylarla kar ıla tırıldı nda daha fazladır. Örne in, yüksek periyotlarda $M_w=5.2$ (27.12.2007_13:47) depreminin büyütmesi neredeyse $M_w=5.6$ depremi ile aynıdır ama $M_w=4.8$ depreminin büyütmesi $M_w=5.2$ (15.03.2008_10:15) depreminden daha yüksek ancak tutarlı sonuçlar vermektedir. Tüm depremler içerisinde iyi kaydedilmı ve daha homojen da ılmı istatistiksel verilere dayanan $M_w=5.2$ (27.12.2007_13:47) ve 4.8 depremleri seçilen periyotlarda daha uyumlu büyütme katsayıları vermektedir. Bu durum zeminlerin do rusal olmayan davranı ları sebebiyle yüksek periyotlarda zemin yumu amasının bir sonucu olarak büyütme katsayılarının artmaya meyilli olması ekinde açıklanabilir. Bunun yanı sıra daha ba ka faktörler de bu büyütme katsayılarının artmasına sebep olabilir (basen etkisi, topo rafa etkisi, yüzey dalgası vb.). Buna ek olarak, bu depremler uzun periyotlarda ($T=2.0$ s) IBC (2009) ile önerilenden daha yüksek büyütme katsayı de erleri göstermektedirler.



ekil 2. Bala Deprem serileri için PGA ve $T=0.3, 1.0$ ve 2.0 s'deki spektral ivmeler için büyütme katsayıları

5. SONUÇLAR

Bu çalışma ile 1997 Aralık ve 1998 Mart Bala deprem verileri analiz edilerek ve maximum yer ivmesi ve $T = 0.3, 1.0, \text{ and } 2.0$ s periyotlarındaki spektral ivmeler için depreme özel azalım ili kileri getirilmiştir. Bu azalım ili kileri her bir deprem için merkez üssüne 100 km'den daha yakın bir alanda kaydedilen veriler kullanılarak getirilmiştir. Veri setinin miktarının göreceli olarak az olmasına ve verilerin 10 ile 80 km mesafede bulunmasına rağmen, genel olarak kaya ve zemin arasındaki dalga hızları uyumludur. Depreme özel azalım ili kileri ile elde edilen büyütme katsayıları Bala depremlerinin kısa periyotlarda benzer büyütme katsayıları sergilerken daha uzun periyotlarda büyük büyütme katsayıları sergilediğini göstermektedir. Bu durum depremler esnasında doğrusal olmayan zemin davranışlarının zeminlerin yumuşamasına sebep olması sonucu olarak daha büyük periyotlarda artmasına neden olduğu söylenebilir.

Bu çalışma ile Ankara ve çevresinde meydana gelebilecek önemli bir sismik aktivitenin Ankara kent merkezi ve çevresini etkileyebileceğini göstermiştir. Bala depremleri orta şiddette olmasına rağmen merkez üssünün yaklaşık 50 km kuzeybatısında bulunan Bala kent Ankara'da güçlü bir şekilde hissedilmiştir. Dolayısıyla, yerel zemin koşulları büyük periyotlarda tepkiyi yani büyütme yeteneğine sahip olan kuvvetli yer hareketlerini etkileyebilir. Bu sebeplerden dolayı Ankara genel olarak sismik aktivitelere uzak bir mesafede bulunuyor olmakla birlikte deprem kaynaklı sismik yer hareketi etkisi altındaki zayıf zemin koşulları sebebiyle sismik zarara katkıda bulunmada önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, orta büyüklükteki depremlerden elde edilen kuvvetli hareket verileri ve buna bağlı olarak yerel zemin koşullarının yer sarsıntısı üzerindeki etkisi konusunda kıymetli bilgiler sağladığı için önemlidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya katkılarından dolayı Sn. Mert Eker, Sn. Hakan Felek ve AFAD, Deprem Dairesi Başkanı Sn. Ulubey Çeken'e teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR

Abrahamson N. A., Silva W. J. (2007). Empirical Response Spectral Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes. *Seis. Res. Letters*, **68(1)**, 94-127.

Akyürek B., Duru M., Sütçü Y. F., Papak A., Arslanlu F., Pehlivan N., Gönenc O., Granit S., Yağcı T. (1997). The surrounding geology of the city of Ankara and natural resources project. MTA compilation no. 9961. In Turkish.

Can H., Koçkar M. K., Felek G. (2013). Evaluation of the Site Characterization of the Weak and Strong Motion Stations Installed in Ankara and its Surroundings by Gazi University, DEMAR. Gazi University, Scientific Research Project; BAP-06/2011-22; 19 p.

Dobry R., Borcherdt R. D., Crouse C. B., Idriss I. M., Joyner W. B., Martin G.R. (2000). New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, **16(1)**, 41-67.

Eker, A.M., Akgün, H., and Koçkar, M.K. (2015). Evaluation of site effect within the tectonic basin in the northern side of Ankara. *Engineering Geology*, **192**, 76-91.

Gazi University, Earthquake Engineering Implementation and Research Center (GAZ -DEMAR 2007 and 2008), Ankara. <http://deprem.gazi.edu.tr/>

Hayashi, K. (2008). Development of surface-wave method and its application to site investigations, PhD Thesis, Kyoto University, 278 p.

Idriss I. M. (2010). Procedures for Selecting Earthquake Ground Motions at Rock Sites, a report to the National Institute of Standards and Technology, University of California at Davis, September 2010 (Revised March 1993).

International Code Council, ICC. (2009). International Building Code. Structural and fire- and life-safety provisions (seismic, wind, accessibility, egress, occupancy and roof codes), Whittier, CA.

Koçkar M. K., Akgün H., Rathje E. M. (2010). Evaluation of site conditions for the Ankara basin of Turkey based on seismic site characterization of near-surface geologic materials. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 8–20.

Koçkar M. K., Akgün H. (2012). Evaluation of site effects of the Ankara Basin, Turkey. *Journal of Appl. Geophys.*, **83**, 120–134.

Ministry of Public Works and Settlement (1998). Turkish Seismic Code, specification for structures to be built in disaster areas, Ankara, Turkey.

Okada H. (2003) The microtremor survey method, Geophysical Monograph Series no. 12. Published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa.

Pampal S., Özmen B., Ba kaya G., Gel A. C., nan E. (2007) Development of weak and strong motion station in and around the Ankara. Gazi University, Scientific Research Project, BAP-00/2007-01.

Rathje E. M., Stokoe K. H., Rosenblad B. L. (2003) Strong Motion Station Characterization and Site Effects During the 1999 Earthquakes in Turkey. *Earthquake Spectra*, Earthquake Engineering Research Institute, **19(3)**, 653-676.

Rathje E. M. (2004). Evaluation of Site Effects During the 1999 Chi-Chi Earthquake and its Aftershocks. Final Project Report to United States Geological Survey Earthquake Hazard Reduction Program, USGS- Award No. 03HQGR0040; 16 p.

Rathje E. M., Koçkar M. K., Özbey M. C. (2005). Observed Site Effects During the 1999 Chi-Chi Earthquake and its Aftershocks, *Seismological Research Letters*, **76 (2)**, 238.

Republic of Turkey Prime Ministry Disaster & Emergency Management Authority, Earthquake Department (AFAD-ERD 2007). Ankara. <http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm>

Rodriguez-Marek A., Bray J. D., Abrahamson N. A. (2001) An empirical geotechnical seismic site response procedure, *Earthquake Spectra*, **17**, 65–87.