

Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi

Recep İYİSAN*, M. Emre HAŞAL

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bir sahada yerel koşullara bağlı olarak oluşabilecek zemin büyütmesinin belirlenmesi, geoteknik deprem mühendisliğinin önemli konularından birini oluşturmaktadır. Anakaya seviyesinde bir kaynaktan açığa çıkan enerjinin oluşturduğu sismik dalgalar yayılımları sırasında, içinden geçtikleri ortamların özelliklerinden etkilenmekte; süre, frekans ve genliklerinde değişimler olabilmektedir. Deprem dalgalarının yüzeye yakın zemin tabakaları içinden geçerken genliklerinde meydana gelen artış zemin büyütmesi olarak tanımlanmaktadır. Zemin büyütmesi anakaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı, cinsi ve dinamik özellikleri, tabakaların yanal süreksizliği ve topografik özellikler gibi yerel koşullardan etkilenmektedir. Bu çalışmada, yerel koşulların zemin büyütmesine etkisini incelemek amacıyla tepe ve ovidan oluşan bir model seçilmiş, ova bölgesinde zemin kesitinin en üstünde yüksek plastisiteli kil ve siltli kum tabakasının olması durumu için, altı anakaya depremi kullanılarak bir (1D) ve iki boyutlu(2D) dinamik analizler yapılmıştır. Yüzeyde 19 farklı noktada farklı depremler için elde edilmiş ivme zaman geçmişleri ve ivme spektrumlarının mesafeye bağlı değişimleri incelenmiştir. Anakaya ivmelerinin, üst tabakanın kum olması durumunda zemin yüzeyinde ortalama iki kat, üst tabakanın kil olması durumunda ise daha fazla arttığı belirlenmiştir. Üst tabakanın kil olması hali için özellikle anakaya dalımının ova tabanına ulaştığı bölgenin izdüşümünde yer alan kesimlerde, spektral ivme oranlarının yüksek frekanslarda en büyük değerini aldığı, ova ortasına doğru 1D ve 2D analiz sonuçları arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir. 1D analizlerde sonlu farklar yöntemine dayanan, eşdeğer lineer malzeme modeli ile çalışan EERA yazılımı, 2D analizlerde ise frekans ortamında çalışan Flushplus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin büyütmesi, zemin koşulları, 2D dinamik analiz, spektral ivme oranı.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Recep İYİSAN iyisan@itu.edu.tr; Tel: (0212) 285 65 80.
Makale metni 22.02.2011 tarihinde dergiye ulaşmış, 11.08.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2012 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.
Bu makaleye “İyisan, R., Haşal, M.E., (2011) ‘Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi’, İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 4, 47-56” şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Soil amplification and effect of local site condition to spectral acceleration

Extended abstract

One of the most commonly encountered problems in geotechnical earthquake engineering is the evaluation of soil amplification. Soil amplification can be defined as the increase in the amplitudes of the earthquake waves. Soil amplification is mostly affected by the local soil conditions such as bedrock depth, the thickness and dynamic characteristics of the soil layers, the limited width of the soil layers and the topographical properties. The variation of ground motion is denoted as an amplification or de-amplification of amplitudes at all frequencies, which is dependent on many parameters. Some of them are inherent of the dynamic soil behavior and its physical properties such as shearing modulus, damping ratio, shear wave velocity, plasticity index etc., and others are related to the characteristics and the intensity of the incoming wave-field, geometrical features like surface/bedrock topography, lateral geological discontinuities etc. Site effects play an important role in the variation of ground motion intensity distribution during earthquakes and therefore they have to be evaluated correctly for the design of earthquake resistant buildings.

In this study, in order to investigate the effects of the local soil conditions to the soil amplification, an idealized simple model consisting of a crest and basin geometry was selected. One (1D) and two-dimensional (2D) dynamic analyses were performed for the two different cases of the top basin layer as high plasticity clay and silty sand, and the obtained results were compared. Six bedrock acceleration records with different frequency content were used in the dynamic analyses. Within the scope of this study, EERA and Flushplus softwares were used in the 1D and 2D dynamic nonlinear dynamic analyses, respectively. Flushplus is a finite element dynamic analysis software that is based on equivalent linear method and it works in the frequency domain. Viscous dashpots that were calculated proportional to the shear and pressure waves of the relevant layers were set at the boundaries of vertical and horizontal layers in the 2D model. The variations of the soil amplifications with the surface geometry were investigated by the 1D and 2D dynamic analyses. The 2D/1D spectral acceleration ratios were calculated for different period values at the lowland and

highland regions of the 2D model in order to understand the difference between 1D and 2D dynamic behaviors.

It was understood that the peak acceleration value of the bedrock ground motion was amplified by twice in case the top basin layer was selected as silty sand and the soil amplification value reached to 4.5 for the case of top basin layer as high plasticity clay. When the top soil layer was high plasticity clay, the 2D/1D spectral acceleration ratios reached their maximum values for high frequencies at the basin edge section where X/D is between 0.5 and 0.75, while X indicates the horizontal distance and D is the depth. As approaching to the mid part of the basin, 2D/1D spectral acceleration ratios reached their maximum values at lower frequencies because of the wave transformations that occur at basin edges. The difference between the results of 1D and 2D dynamic analyses decreased for higher frequencies with the increasing distance from the edge of the basin. When the top layer was selected as sand, the 2D/1D spectral acceleration ratios showed similar behavior for the lower frequencies, but an increase in the 2D/1D values was noticed at higher frequencies mainly for the sections $0.75 < X/D < 1$.

Because of the limited width of the soil layers in basin and vertical boundary conditions, the 2D predominant period of the model took a lower value when compared with the results of 1D dynamic analysis. As a result the spectral acceleration values obtained by the 2D dynamic analyses were different from the spectral acceleration values calculated by 1D dynamic analysis especially at higher frequencies. The peak surface acceleration values that were calculated by the 2D analyses approached to each other regardless of the basin geometry when the non-linear behavior became dominant at the top layers. Topographical effects were negligible for very low frequencies, while the effects became significant for high frequencies or low wavelengths comparable to the geometric characteristics of the model. The intensity of the bedrock acceleration and the variation of dynamic properties with soil type play an important role in the development of non-linear dynamic behavior.

Keywords: Soil amplification, local conditions, 2D dynamic analysis, spectral acceleration ratio.

Giriş

Yakın geçmişte ülkemizde ve dünyada yaşanan büyük depremlerde oluşan yapısal hasarlar ve aletsel ölçümlerle yüzeyde alınmış ivme kayıtları, yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi ve yapısal hasara etkisi konusunda ilk önemli bilgilere 1957 yılında San Fransisko Depremi sırasında alınmış olan ivme kayıtlarının incelenmesiyle ulaşılmıştır. Yakın bölgelerde, farklı noktalarda aynı depremde kaydedilen ivmelerin birbirinden çok farklı olması, kayıt alınan yerlerde zemin koşullarının farklı olması ile açıklanmıştır. Çok küçük değere sahip anakaya ivmeleri yerel koşulların etkisi ile bazı bölgelerde birkaç kat büyüyerek çok ağır hasara neden olabilmektedir (Kramer, 1996).

Yüzeye yakın zemin tabakalarından geçerken deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen artış zemin büyütmesi olarak bilinmektedir. Depremler sırasında bir kaynaktan açığa çıkan enerjinin neden olduğu sismik hareketler dalga yayılma yolu, jeolojik ve yerel zemin koşulları tarafından değişikliğe uğrarlar. Anakayadan zemin yüzeyine doğru hareket eden dalgaların süre, frekans ve genliklerinde önemli değişimler olabilmektedir. Deprem gibi tekrarlı yükler altında sıvılaşma, oturma ve şev stabilitesi gibi olguların ortaya çıkması için özel zemin koşulları gerekirken, zemin büyütmesi hemen her depremde meydana gelebilmekte ve yapısal hasar dağılımında önemli rol oynamaktadır. İlgilenilen saha anakaya üzerinde yer alıyorsa veya sağlam olarak nitelendirilebilecek tabakalar yüzeye yakınsa yerel zemin koşullarının etkisi kaynak etkilerinin yanında çok daha küçüktür. Ancak derin alüvyonlarda deprem dalgaları bu tabakaların özelliklerinden önemli derecede etkilenmekte ve genliklerinde önemli artışlar oluşabilmektedir (Psarropoulos vd., 1999).

Bir sahada oluşacak deprem hareketinin özellikleri tektonik yapı, kırılma mekanizması, merkezüstü uzaklığı, deprem dalgasının ilerleme yolu üzerindeki jeolojik yapının etkisi, yerel yüzey topografyasının ve zemin koşullarının etkisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Kaynak mekanizmasının

analizi ve deprem dalgasının yayılma yolu üzerindeki jeolojik formasyon etkisi sismolojinin inceleme konusu içinde yer alırken; yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketine etkisinin araştırılması geoteknik mühendisliğinin ilgi alanlarından birini oluşturmaktadır. Yapılan çalışmaların amacı mühendislik yapılarına faydalı ömürleri boyunca etkiyebilecek spektral ivmeyi ve tasarım deprem hareketinin genlik, frekans içeriği ve süresi gibi özelliklerini belirlemektir. Bir tasarım depreminin yüzeydeki etkilerini belirlemek için yapılan zemin tabakalarının dinamik analizinde, geoteknik özelliklerin yanında topografik özellikleri ve yanal jeolojik düzensizlikleri de kapsayan tüm yerel etkilerin göz önüne alınması gerekli olmaktadır (İyisan ve Haşal, 2006; 2007).

Zemin tabakalarının dinamik analizinde hesap kolaylığı açısından tercih edilen bir boyutlu yaklaşımda yüzey topografyası ile tabakaların yatayda sınırlı genişliğe sahip olmasının etkisi ihmal edilmektedir. Oysaki farklı kalınlıktaki tabakalar ile jeolojik ve topografik düzensizliklerden oluşmuş doğadaki gerçek yapı oldukça karmaşıktır ve iki veya üç boyutlu modellerle tanımlanabilmektedir. Bir boyutlu analizde geçerli olan kabuller ve sınır koşulları, zemin tabakalarının yarı genişliğinin, derinliğinden çok daha büyük olduğu sığ ve geniş ova modellerinde sağlanmaktadır. Aksi durumlarda yani dar ve derin ova modellerinde iki boyutlu rezonans durumları ortaya çıkmakta ve tek boyutlu dinamik analiz yetersiz kalmaktadır (Pitilakis, 2004). Zemin tabakalarının yatay yönde sınırlı genişliğe sahip olması, ova kenarlarında yüzey dalgalarının oluşmasına sebep olmakta, yer hareketinin frekans içeriği ovaların ortasından kenarlarına doğru değişmekte, kuvvetli yer hareketinin süresi uzayabildiği gibi özellikle yamaçlarda ve tepelerde kuvvetli yer hareketinin genliği de artmaktadır. Bu nedenle deprem hareketine karşı davranışı bulunacak yerin ova içindeki konumu da bu konuda önemli rol oynamaktadır (Haşal ve İyisan, 2004;2009).

Bu çalışmada, yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi araştırmak amacıyla bir ova ve tepeden oluşan düzgün geometriye sahip bir

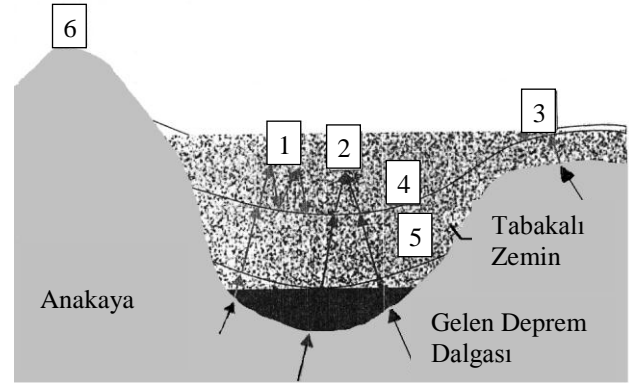
model seçilmiştir. Bu modelde ova bölgesindeki zemin kesitinde en üstte yer alan zemin tabakasının yüksek plastisiteli kil ve siltli kum olması durumu için, değişik frekans içeriğine sahip altı anakaya depremi kullanılarak bir ve iki boyutlu dinamik analizler yapılmıştır. Ova ve tepe bölgesinde yüzeydeki değişik noktalarda farklı depremler için ivme zaman geçmişleri ve ivme spektrumları elde edilmiş, bu değerlerin kenardaki anakaya mostrası sınırından uzaklığa bağlı değişimleri incelenmiş, bir ve iki boyutlu dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Zemin büyütmesi ve etkiyen faktörler

Yerel zemin koşulları kuvvetli yer hareketinin özelliklerini önemli derecede etkileyebildiği gibi deprem dalgaları da oluşturdukları kayma şekil değiştirme seviyelerine göre geçtikleri tabakaların özelliklerini etkileyebilmektedir. Kuvvetli yer hareketinin zemin yüzeyinde meydana getirdiği en önemli etkilerden birisi de yapısal hasara etki eden zemin büyütmesidir. Genel olarak anakayada oluşan ve yüzeye doğru hareket eden deprem dalgalarının zemin tabakalarından geçerken ivme genliklerinde meydana gelen artışa zemin büyütmesi adı verilmektedir. Bu etkinin sınırları anakaya hareketinin özelliklerinden yüzey altı tabakalarının geometrisine, zemin tabakalarının dinamik özelliklerinden topografik düzensizliklere kadar geniş bir alanda değişen faktörlere bağlıdır. Anakaya derinliği, anakaya üzerindeki zemin tabakalarının kalınlığı, cinsleri, kayma modülü ve sönüm oranı gibi dinamik özellikleri, bu özelliklerin derinlikle ve deformasyonla değişimi, zemin tabakalarının yanal düzensizliği ve topografik özellikler gibi yerel zemin koşulları, deprem dalgalarının yüzey altındaki tabakalaşmaya bağlı odaklanması, yüzey dalgalarına dönüşen cisim dalgaları ve tabakaların farklı dinamik özellikleri zemin büyütmesini etkileyen önemli faktörlerdir (Şafak, 2001, Bakır vd., 2002). Şekil 1'de zemin büyütmesine etkiyen faktörler şematik olarak gösterilmiştir.

Topografik özellikler, hem yüzey hem de yüzey altındaki zemin tabakalarının iki veya üç boyutlu geometrisiyle, bu tabakaları sınırlayan anakayanın geometrisinin yerel zemin hareketlerine etkisini içermektedir (Haşal, 2009). Yapılan çar-

lışmalarda bu etki genelde idealleştirilmiş malzeme ve ortam özelliklerine sahip düzgün geometrik modeller kullanılarak incelenmiştir.



1. Dinamik özellikler 2. Dalga odaklanması 3. Yüzey dalgaları 4. Zeminlerin mühendislik ve fiziksel özellikleri 5. Ortam özellikleri 6. Topografya
Şekil 1. Zemin büyütmesini etkileyen faktörler (Şafak, 2001)

Zemin büyütmesinin bir nedeni de anakaya üzerinde yer alan zemin tabakalarının farklı öz direnç (empedans) değerlerine sahip olmalarıdır. Ortamın yoğunluğu ($\rho = \gamma/g$) ve kayma dalgası hızından (V_s) belirlenebilen bu değer, yüzeydeki hareketin yerel zemin koşullarından etkilenmesini gösteren teorik temeli oluşturmaktadır. Deprem dalgalarının meydana getirdiği tekrarlı kayma şekil değiştirmeleri nedeniyle zeminde oluşan malzeme sönümü ile deprem dalgalarının yayılmasından kaynaklanan radyasyon sönümü ihmal edilirse, elastik dalga enerjisinin korunumu ilkesi gereği, denklemi aşağıda verilen bir boyutlu enerji akışı $E(t)$, alttan zemin yüzeyine kadar sabit kalacaktır.

$$E(t) = \frac{1}{2} (\rho V_s) \dot{u}^2(t) \quad (1)$$

Bağıntıda, ρV_s terimi, zemin tabakasının özgül direncini, $\dot{u}(t)$, deprem dalgası parçacık hızını göstermektedir. Genelde zemin kesitindeki tabakaların birim hacim ağırlıklarıyla kayma dalgası hızları yani özgül dirençleri derinlikle artmaktadır. Bağıntıdan da anlaşılacağı üzere özgül dirençteki azalma parçacık hızının artmasına sebep olacaktır. Eğer özgül direnç zemin yüzeyinden anakayaya doğru farklı zemin tabakaları arasında $(\rho V_s)_1$ 'den $(\rho V_s)_2$ 'ye değişiyorsa, bir

boyutlu enerji akışı denkleminde zemin büyütmesi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır (Şafak, 2001).

$$A = \left[\frac{\dot{u}_1(t)_{maks}}{\dot{u}_2(t)_{maks}} \right] = \frac{(\rho V_s)_2}{(\rho V_s)_1} = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

Bağıntıda α , özgül direnç oranıdır. Tabakalı zeminlerde bu oran azaldıkça büyütme artacaktır. Aynı kalınlık, yoğunluk ve sönüm oranına sahip fakat kayma dalgası hızları dolayısıyla özgül dirençleri değişik iki tabakanın büyütme fonksiyonları birbirinden çok farklı olabilmektedir. Zemin büyütmesi yerel zemin koşullarına bağlı olarak analitik modeller kullanılarak yapılan dinamik analizlerle belirlenebileceği gibi arazi deney sonuçlarına dayanan incelemelerle de elde edilebilmektedir. Zemin büyütmesinin en güvenilir şekilde elde edilmesi, kuvvetli yer hareketleri sırasında kaydedilen ivmelerin spektral analizi sonucunda olmaktadır.

Spektral ivme kavramı

Belirli bir sönüm oranı, rijitlik ve kütleyle sahip tek serbestlik dereceli sistemin kuvvetli yer hareketi etkisinde gösterdiği tepkinin zamana bağlı değişiminde ivme cinsinden hesaplanan en büyük mutlak değerine spektral ivme adı verilir. Spektral ivmelerin sistemin periyotlarına bağlı değişimine ise ivme spektrumu denilmektedir.

İvme spektrumu; birbirinden farklı özelliklere sahip sistemlerin deprem hareketi karşısındaki göreceli yer değiştirmelerine bağlı en büyük mutlak ivme değerlerinden oluşuyorsa göreceli ivme spektrumu olarak nitelendirilmektedir. Farklı sistemlerin göreceli ivme zaman geçmişlerinin, yer hareketinin ivme zaman geçmişiyle birleştirilmesiyle elde edilen toplam ivme zaman geçmişlerinin en büyük mutlak değerlerinden oluşan spektrum ise mutlak ivme spektrumu olarak tanımlanmaktadır.

Yapılara etkiyen en büyük taban kesme kuvvetinin elde edilmesinde mutlak ivme spektrumundan faydalanılır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin deprem kuvvetlerine karşı hesabında kullanılan eşdeğer deprem yükü ve mod süperpozisyonu yöntemlerinde; farklı kuvvetli yer

hareketi kayıtlarının analiziyle hesaplanan elastik mutlak ivme spektrumlarının istatistiksel açıdan değerlendirilmesiyle elde edilmiş olan elastik tasarım ivme spektrumları kullanılmaktadır.

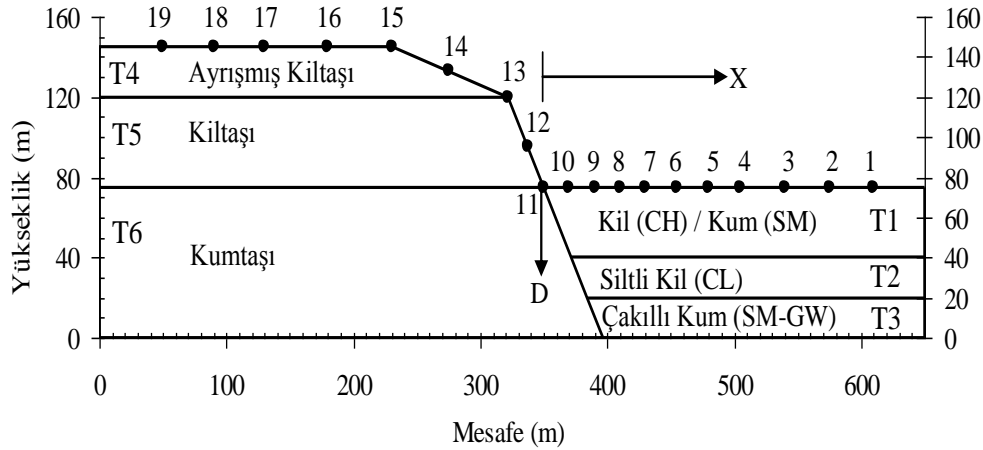
Depreme dayanıklı bina tasarımında, deprem yüklerinin belirlenmesi için ülkemizde geçerli olan yönetmelikte spektral ivme katsayısı $A(T)$ esas alınmaktadır. Bu katsayı belli bir sönüm oranı için yerel deprem ve zemin koşullarına bağlı olarak yapılan dinamik analizler sonucu elde edilen elastik tasarım ivme spektrumunun, yerçekimi ivmesine göre normalize edilmiş haline karşı gelmektedir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'de spektral ivme katsayısı,

$$A(T) = A_0 I S(T) \quad (3)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada A_0 etkin yer ivme katsayısı, I yapı önem katsayısı ve $S(T)$ spektrum katsayısıdır. Görüldüğü üzere spektrum katsayısı üstyapıya etkiyen deprem yüklerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Bu nedenle öncelikle zemin tabakalarının anakaya hareketine verdiği tepki frekans veya zaman ortamında belirlenerek yüzeyde oluşan deprem hareketi elde edilmekte, daha sonra yapıların deprem analizinde kullanılacak spektral ivme değerleri hesaplanmaktadır.

Ova - tepe modeli ve zemin kesiti

Bu çalışma kapsamında yerel zemin koşullarının dinamik davranışa etkisini incelemek amacıyla, düzgün geometriye sahip ova ve tepeden oluşan Şekil 2'de verilen bir model seçilmiştir. Bu tür modeller daha önceki çalışmalarda değişik araştırmacılar tarafından da kullanılmıştır. Modelde ova kesiminin üç farklı zemin tabakasından oluştuğu kabul edilmiş ve derinlik 75 m alınmıştır. En altta kalınlığı 20 m olan sıkı çakıllı kum (SW-GW) tabakası üstünde aynı kalınlıkta kumlu düşük plastisiteli kil (CL, $I_p = \%10$) tabakası yer almaktadır. Ova kesiminde en üstte ise 35 m kalınlığındaki tabaka, zemin cinsinin büyütme etkisini incelemek için önce yüksek plastisiteli kil (CH, $I_p = \%35$) sonra siltli kum (SM) olarak alınmıştır. Bu bölge deprem yönetmeliğine göre



Şekil 2. Çalışmada kullanılan tepe-ova modeli geometrisi ve zemin kesiti

Z3 yerel zemin sınıfında yer almaktadır. Yeraltı su seviyesi ovada zemin yüzeyine yakındır.

Sağlam tabakalardan oluşan tepe kesiminin toplam yüksekliği 145 m alınmış, alttaki sağlam kumtaşı ve kilitaşı tabakalarının üstünde 25 m kalınlığında ayrılmış kilitaşı tabakasının olduğu düşünülmüştür. Yapılan 1D ve 2D dinamik analizlerde tepe kesimindeki ve ova tabanındaki zemin tabakaları ve özellikleri sabit bırakılmıştır (Haşal, 2009).

Yöntem ve malzeme özellikleri

Şekil 2’de verilen modelin ova bölgesinde en üst tabakanın kum ve kil olması durumundaki davranışı, ova ve tepe kesiminde yüzey üzerinde gösterilmiş olan toplam 19 ayrı noktada yapılan bir ve iki boyutlu dinamik analizlerle incelenmiştir. Bir boyutlu dinamik analizlerde sonlu farklar yöntemine dayanan ve eşdeğer lineer malzeme modeli ile çalışan EERA yazılımı, iki boyutlu dinamik analizlerde ise frekans ortamında çalışan Flushplus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. İki boyutlu dinamik analizlerde model, anakaya seviyesinde düzlem içinde her iki doğrultuda mesnetli olarak tutulmuştur. Yatayda sonsuza uzandığı varsayılan zemin tabakalarının etkisi düşey sınırlarda viskoz sönümleyiciler kullanılarak modellenmiştir. Yapılan bir ve iki boyutlu dinamik analizlerde, zemin tabakalarının kuvvetli yer hareketine bağlı lineer olmayan davranışı eşdeğer lineer yaklaşımla modellenmiştir. Bilindiği üzere bu yaklaşımda kayma şekil değiştirmesiyle uyumlu

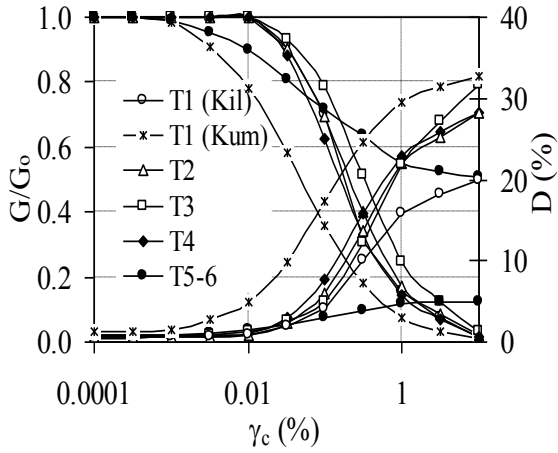
kayma modülü ve sönüm oranı değerleri iterasyonla elde edilmektedir. Tabakalara ait başlangıç dinamik özellikler ova ve tepe bölgesi için Tablo 1’de, tabakalara ait kayma modülü ve sönüm oranının kayma deformasyonu ile değişimi ise Şekil 3’te verilmiştir. Tablo 1’de parantez içi değerler kum tabakasına aittir.

Tablo 1. Zemin tabakalarının başlangıç dinamik özellikleri

	Ova Bölgesi			Tepe Bölgesi		
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
V_s	235	475	700	400	700	1200
γ	19	20	21	18	20	22
G_o	106	450	980	288	980	3168
E_o	308 (269)	1215	2548	766	2548	7920
ν	0.45 (0.30)	0.35	0.30	0.33	0.30	0.25

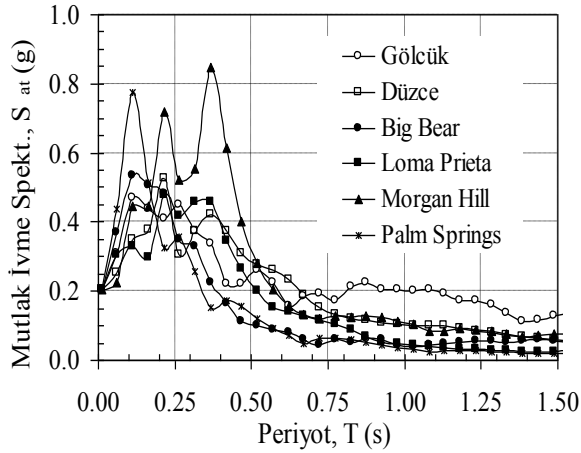
Şekil 3’te gösterilmiş olan ve eşdeğer lineer analizde kullanılan, tabakalara ait normalize kayma modülü (G/G_o) ve sönüm oranlarının (D) tekrarlı kayma deformasyonu (γ_c) ile değişimi, tabakaların etkisinde kaldığı efektif çevre gerilmeleri de dikkate alınarak Ishibashi ve Zhang (1993) tarafından önerilen bağıntılardan elde edilmiştir.

V_s (m/s): Kayma dalgası hızı, γ (kN/m³): Birim hacim ağırlık, G_o (MPa): Kayma Modülü, E_o (MPa): Elastisite Modülü, ν : Poisson Oranı



Şekil 3. Tabakalara ait kayma modülü ve sönüm oranının kayma deformasyonu ile değişimi

Anakayadaki sismik hareketin frekans özellikleri depremin büyüklüğüne, tektonik yapı ve kırılma mekanizmasına, merkezüstü uzaklığına ve dalga yayılma yolu özelliklerine bağlıdır. Anakayadaki deprem hareketinin frekans içeriğinin zemin tabakalarının dinamik davranışına etkisini yansıtmak amacıyla analizlerde yurtiçi ve yurtdışında anakayada kaydedilmiş farklı periyotlara sahip altı adet ivme kaydı kullanılmıştır. Seçilen depremlere ait mutlak ivme spektrumları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Dinamik analizlerde kullanılan depremlere ait ivme spektrumları

İvme kayıtları uygun frekans sınırları içerisinde filtrelenmiş ve taban düzeltmeleri yapılmıştır. Dinamik analizin yapılacağı bölgede anakayadaki en büyük ivme değeri, deprem büyüklüğü, odak derinliği ve merkezüstü uzaklığına bağlı

olarak azalım ilişkilerinden elde edilebilmektedir. Seçilen model üzerinde yapılan dinamik analizlerde kullanılan en büyük anakaya ivmesi, deprem büyüklüğünün 7.4, odak derinliğinin yaklaşık 15 km ve merkezüstü uzaklığının 20 km olduğu kabul edilerek Özbey ve diğerleri (2004) tarafından ülkemiz için geliştirilmiş azalım ilişkisi yardımıyla hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda modele etkiyecek anakaya ivmesi 0.2 g olarak elde edilmiş ve seçilen tüm deprem kayıtları en büyük ivmeleri bu değer olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

Dinamik analiz sonuçları

Zemin büyütmesine yerel zemin koşullarının etkisini incelemek amacıyla seçilen tepe-ova modeli için eşdeğer lineer yöntem kullanılarak, ova kesimindeki üst tabakanın yüksek plastisiteli kil ve siltli kum olması durumu için ayrı ayrı bir ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Farklı anakaya ivme kayıtlarının her biri için zemin yüzeyinde önceden belirlenmiş 19 ayrı nokta için, frekans ortamında çalışan Flushplus sonlu elemanlar ile iki boyutlu dinamik analiz yapılmıştır.

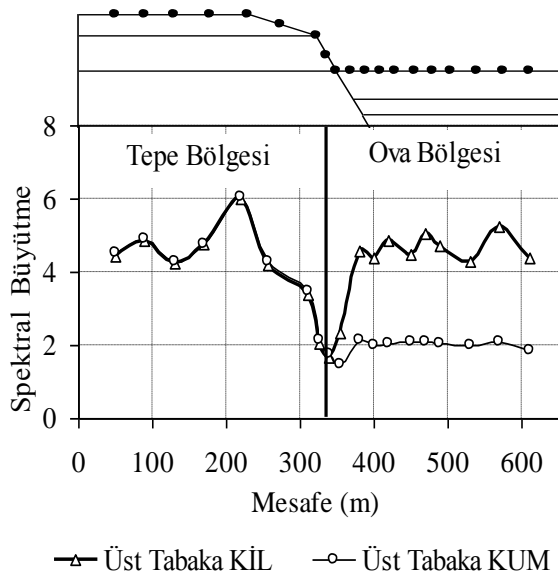
Yapılan bu analizler sonucunda zemin yüzeyindeki ivme zaman geçişleri elde edilmiş ve en büyük yatay ivme değerleri belirlenmiştir. Anakaya seviyesinden en büyük değeri 0.20 g olarak etkilenen ivmeler, üst tabakanın kum olması durumunda zemin yüzeyinde ortalama 0.40 g olarak elde edilmişken; üst tabakanın kil olması halinde yaklaşık 0.85 ile 1.00 g arasında değişmektedir. Tepe kesiminde ise en büyük yatay ivmenin 1.20 g değerine kadar yükseldiği görülmüştür.

Yüzeyde seçilen noktalarda her deprem için elde edilen en büyük ivmelerin ortalaması alınarak o nokta için bir değer elde edilmiş ve bu ortalama ivme değeri (a_y) anakaya ivmesine (a_k) oranlanarak spektral zemin büyütme hesaplanmıştır. Seçilen koordinat sistemine bağlı olarak spektral büyütme mesafe ile değişimi üst tabakanın kum ve kil olması durumu için Şekil 5’te verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, basamak şeklindeki topografya hareketin şiddetini arttırmakta ve tepe kesiminde

oldukça yüksek büyütme değeri ile karşılaşmaktadır. Özellikle en üst tabakanın kum olması durumunda, ova ve tepe kesimindeki spektral büyütme arasındaki fark daha belirgin olmaktadır. Üst tabakanın kil olması durumunda ise bu fark azalmaktadır.

Anakayadaki deprem hareketinin şiddetinin belirli bir eşik değerine kadar zeminlerde elastik ve elasto-plastik davranış hakim olmaktadır. Bu eşik değer özellikle yüksek plastisiteli killerde kaba daneli zeminlere oranla çok daha yüksektir. Bu nedenle özellikle yüksek plastisiteli killerde kayma şekil değiştirmelerinin küçük değerleri için hakim olan elastik davranış nedeniyle kumlara oranla daha yüksek spektral büyütmele karşılaşmaktadır.

Kum zeminlerde ise rijitlik azalımı killere göre daha küçük kayma şekil değiştirmelerinde başlamakta, sönüm oranının da daha yüksek olması nedeniyle yüzeyde daha küçük büyütme elde edilmektedir.



Şekil 5. Üst tabakanın kil ve kum olması durumları için büyütme mesafe ile değişimi

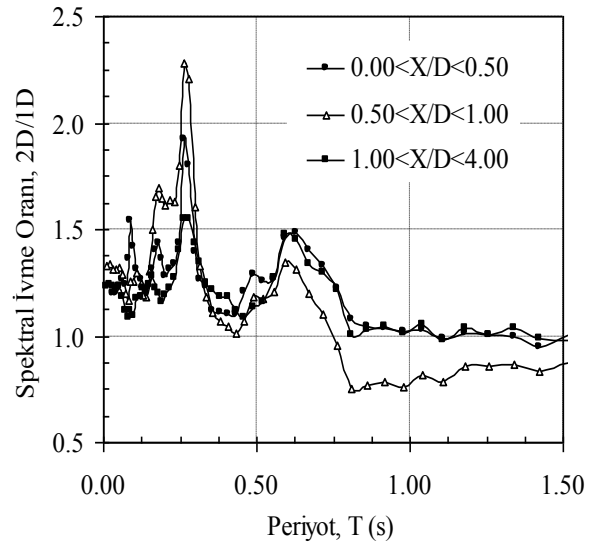
Bir ve iki boyutlu dinamik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Ova tepe modelinin yüzeyinde seçilen 19 ayrı noktada yapılan iki boyutlu analizlerden farklı deprem kayıtları için elde edilen ivme spekt-

rumlarının ortalamaları (2D), bir boyutlu analizlerden hesaplanan mutlak ivme spektrumlarına (1D) oranlanarak frekans ortamında bir karşılaştırma yapılmıştır. Spektral ivme oranlarının (2D/1D) en büyük değerleri, ovanın en üst tabakanın kil ve kum olduğu durum için X/D'ye bağlı olarak Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca ova kesiminde üst tabakanın kum olması hali için spektral ivme oranlarının periyot ve X/D ile değişimi ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada X ova başlangıcından itibaren yatay mesafe, D ise derinliktir.

Tablo 2. Hesaplanan en büyük spektral ivme oranlarının (2D/1D) mesafe ile değişimi

X/D	Üst Tabaka Kil	Üst Tabaka Kum
0.00-0.50	2.0	1.9
0.50-0.75	2.3	2.3
0.75-1.50	1.9	1.6
1.50-2.50	2.3	1.5
2.50-4.00	1.7	1.5



Şekil 6. Üst tabakanın kum olması durumu için spektral ivme oranlarının (2D/1D) periyot ile değişimi

En büyük ivme oranları üst tabakanın kum olması durumunda yaklaşık T=0.25 s periyotta meydana gelirken kil durumunda 0.25~0.70 s arasındaki farklı periyotlarda oluşmaktadır. Üst tabakanın kil olması durumunda, özellikle kenardaki anakaya dalımının ova tabanına ulaştığı

bölgenin yüzeydeki izdüşümünde ($0.5 < X/D < 0.75$) yer alan kısımda, iki boyutlu analizle hesaplanan spektral oran yüksek frekanslarda en büyük değerini almakta, daha sonra hakim periyotlarda daha büyük değerlere doğru bir ötelenme görülmektedir. Ova ortasına doğru artan mesafe ile daha yüksek periyotlarda bir ve iki boyutlu analiz sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.

Benzer sonuçlara Pitilakis (2004) tarafından yapılan çalışmada da ulaşılmış ve ova kenarlarında oluşan dalga dönüşümleri nedeni ile özellikle bir boyutlu hakim periyot civarında büyütmelerde ek artışların olacağı belirtilmiştir. Üst tabakanın kum olması durumunda ise yüksek periyotlarda benzer davranışlar gözlenmekte ancak anakayanın yüzeydeki izdüşümü bölgesinde düşük periyotlarda $2D/1D$ spektral ivme oranındaki artış kil durumu ile aynı olmaktadır. Üst tabakalarda lineer olmayan plastik davranışın hakim olması durumunda yüzey ivmeleri ova geometrisine bağlı olmaksızın iki boyutlu analizde birbirine çok yaklaşmaktadır.

Tepe bölgesinde de ova bölgesinde olduğu gibi iki boyutlu ve bir boyutlu dinamik analizlerden hesaplanmış ivme değerleri birbirlerine oranlanarak model üzerinde gösterilmiş olan noktalarda spektral ivme oranları elde edilmiştir. Tepe kesiminin hemen başlangıcında yer alan 15 nolu noktada spektral ivme oranı, özellikle yerel bir boyutlu hakim periyot ($T_o=4H/V_s$) civarında diğer noktalara oranla çok daha büyük değerler almaktadır. Diğer bir deyişle tepe bölgesinin başlangıç kesiminde yerel koşullara bağlı olarak önemli büyütme meydana gelmektedir. Tepe üzerindeki diğer noktalarda ise spektral ivme oranları 2 ile 3 arasında değişmekte ve hakim periyotlar ötelenerek büyümektedir.

Athanasopoulos ve diğerleri (1999) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmış ve yazarlar dik yamaç tepesindeki yapılar da depremlerde oluşan yüksek hasarın nedenini, bu tür topografyaya sahip bölgelerde hareketin şiddetinde meydana gelen artışa bağlamışlardır. Rassem ve diğerleri (1997) tarafından yapılan çalışmada; eğimli anakaya yüzeyinin üstünde

deprem dalgalarının tekrarlı yansımaları sonucunda vadi veya ova merkezine doğru ilerleyen yüzey dalgalarının olduğu, bu durumda spektral büyütme vadi kenarından ortasına doğru bir boyutlu analizle öngörülemez biçimde değiştiği belirtilmektedir. Yine aynı araştırmacılar geniş vadilerin kenarında oluşan spektral büyütme özellikle vadi derinliğinin ve kenardaki anakaya eğiminin fonksiyonu olduğunu belirterek, bir boyutlu analizin sadece sığ ve geniş vadilerde, kenardan vadi derinliğinin en az 10 katı uzaklıktaki noktalarda meydana gelen yüzey hareketini hesaplamak için kullanılabilirliğine dikkat çekmişlerdir.

Sonuçlar

Zemin büyütmesi anakaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı ve dinamik özellikleri, zemin tabakalarının yanal düzensizliği ve topografik özellikler gibi yerel koşullardan etkilenmektedir. Bu çalışmada, yerel koşulların zemin büyütmesine etkisini incelemek amacıyla, ova ve tepe bölgelerinden oluşan bir geometri üzerinde eşdeğer lineer malzeme modeli ile bir ve iki boyutlu analizler yapılmıştır. Zemin cinsinin dinamik davranışa etkini araştırmak için ova bölgesinde en üstte yer alan zemin tabakası yüksek plastisiteli kil ve siltli kum olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Analizlerde farklı frekans içeriğine sahip altı anakaya depremi kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Anakaya seviyesinden etkilenen ivmeler, üst tabakanın kum olması durumunda zemin yüzeyinde ortalama 2 katına çıkarken, üst tabakanın kil olması durumunda büyütme yaklaşık 5 kat artmıştır. Eğimli topografyaya sahip tepe kesiminde ise spektral büyütme 6 değerine kadar yükselmiştir. Üst tabakanın kil olması durumunda, anakaya dalımının ova tabanına ulaştığı bölgenin yüzeydeki izdüşümünde yer alan kesimlerde hesaplanan spektral ivme oranı, yüksek frekanslarda en büyük değerini almaktadır. Ova ortasına doğru artan mesafe ile yüksek periyotlarda bir ve iki boyutlu analiz sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Üst tabakanın kum olması durumunda ise yüksek periyotlarda yüzeyin farklı kesimlerinde birbiri ile benzer davranışlar gözlenmekte ancak anakayanın yüzeydeki izdüşümü bölgesinde düşük periyotlarda spektral ivme oranla-

rında artış olmaktadır. Anakaya ivmesinin yanında yerel zemin koşullarının ve dinamik özelliklerin zemin cinsine bağlı değişimi de dinamik davranışta önemli rol oynamaktadır. Rijitlik azalımının daha küçük kayma şekil değiştirmelerinde başladığı kum zeminlerde, rijitlik azalımının daha büyük şekil değiştirmelerde başladığı yüksek plastisiteli killere göre spektral büyütmeler daha az olmaktadır.

Kaynaklar

- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C. and Leonidou, E.A., (1999). Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18**, 135-149.
- Bakır, B.S., Özkan, M.Y. ve Cılız, S. (2002). Effects of basin edge on the distribution of damage in 1995 Dinar, Turkey Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 335-345.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007). T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- EERA (2000). A computer program for equivalent-linear earthquake response analyses of layered soil deposits, by Bardet, J. P., Ichii, K. & Lin, C. H., Depart. of Civil Eng., University of Southern California.
- FLUSHPLUS (1993). A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of soil-structure interaction problems, Berkeley, University of California.
- Haşal, M. E., (2009). Topoğrafik düzensizliklerin zemin büyütmesine etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haşal, M.E. ve İyisan, R., (2004). Yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi: Bir ve iki boyutlu analiz, *ZMTM 10. Ulusal Kongresi* 16-17 Eylül, 343-352, İ.T.Ü., İstanbul.
- Haşal, M.E. ve İyisan, R., (2009). Ova ve vadi kenarlarının zemin büyütmesine etkisi: Bir ve iki boyutlu davranış, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, **8**, 6, 25-36.
- Ishibashi, I., Zhang, X., (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, **33**, 1,182-191.
- Iyisan, R. ve Hasal, M.E., (2007). The effect of ground motion characteristics to the dynamic response of alluvial valley models, *13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, December 10-14, Kolkata, India.
- İyisan, R. ve Haşal, M.E., (2006). Farklı deprem hareketinin ve yerel zemin sınıfının dinamik davranışa etkisi, *ZMTM 11. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, K.T.Ü., Trabzon.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, USA, 653.
- Özbey, C., Sarı, A., Lance, M., Erdik, M., Fahjan, Y., (2004). Empirical strong ground motion attenuation relations for northwestern Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 2, 115-125.
- Pitilakis, K. (2004). *Recent advances in earthquake geotec. eng. and microzonation*, A.Ansal (ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 139-193.
- Psarropoulos, P. N., Gazetas, G. and Tazoh, T. (1999). Seismic response analysis of alluvial valley at bridge Site, *Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, **1**, 41-47.
- Rassem, M., Ghobarah, A., Heidebrecht, A.C. (1997). Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**, 477-493.
- Şafak, E. (2001). Local Site Effects and Dynamic Soil Behaviour, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **21**, 453-458.