

KİLLİ ZEMİNLERİN SAHAYA ÖZEL DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞ ANALİZİNİN TBDY (2018) İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Ersin GÜLER *^{id}
Kamil B. AFACAN **^{id}

Alınma: 04.07.2021; düzeltme:17.08.2021; kabul:13.10.2021

Öz: Deprem bölgelerinde yer alan zeminlerin dinamik yükler altında göstereceği davranış büyük önem taşımaktadır. Deprem anında ana kayadan yüzeye doğru hareket eden dalgalar buldukları zemin koşullarından etkilenerek değişim göstermektedir. Bu nedenle deprem dalgalarının frekansı ve genliğinde değişimler meydana gelmekte, bazen sönülmeye uğramakta bazen de büyütme etkisi ile karşılaşmaktadır. Yapıların deprem anında karşılaşacağı ivmelerin önceden belirlenmesi ile deprem bölgelerinde güvenli yapıların yapılması sağlanmaktadır. Yapıların dinamik yükler altında tasarımı için depremin zemin yüzeyindeki özelliklerinin ve buna karşılık zeminin dinamik davranışlarının bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Sahaya özel yapılan zemin büyütme analizlerinde bölgenin faylanma yapısının araştırılması gerekmektedir. Bu çalışma, aktif bir deprem bölgesi olan Afyonkarahisar ilinde yapılmıştır. Bölgede yapılan sondaj çalışması sonrasında bölgenin depremselliği göz önüne alınarak on bir adet deprem ivme kayıtları seçilmiş ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)'e göre sahaya özel ölçeklendirilerek tek boyutlu doğrusal olmayan zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Analizlerde DeepSoil programı kullanılarak yüzey tepkisi hesaplanmış ve TBDY 2018'in bölgeye ait önerdiği tepki spektrumları elde edilerek performansı incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre yerel zemin koşullarının yüzey davranışını etkilediği, doğrusal olmayan analizlerde tasarım yönetmeliğinin plato bölgesinin genel olarak belirlenmiş olsa da yüksek periyotlarda sahaya özel analizlerle örtüşmediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: TBDY 2018, Sahaya Özel Analiz, Lineer Olmayan Analiz, Zemin Davranışı.

Comparison of the Nonlinear Site Response Analysis of Clayey Soils with Turkish Earthquake Building Code (2018)

Abstract: The behavior of soils under dynamic loads is of great importance. Waves moving from the bedrock towards the surface during an earthquake change by the ground conditions in which they are located. For this reason, variations in the frequency and amplitude of earthquake waves occur, sometimes they are subjected to damping and sometimes they encounter to an amplification effect. By determining the accelerations that the structures will be exposed to during an earthquake, it is ensured that safe structures are built in earthquake zones. For the design of structures under dynamic loads, it is of great importance to know the characteristics of the earthquake on the ground surface along with the dynamic behavior of the soil. The faulting structure of the region should be investigated in the field-specific soil amplification analysis. This study was carried out in Afyonkarahisar province, which is located in an active earthquake zone. After the drilling work carried out in the region, eleven earthquake acceleration records were selected considering the seismicity of the region and one-dimensional non-linear soil amplification analyses were performed by scaling site-specific according to the Turkish Building Earthquake Code (TEC 2018). In the analyses, the surface response was calculated using the DeepSoil program, and its performance was examined by obtaining the response spectra proposed by TBDY 2018 for the region. According to the results of the analysis, it was determined that local soil conditions affected the surface behavior. Although

* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 26040, Odunpazarı, Eskişehir.

** Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 26040, Odunpazarı, Eskişehir.

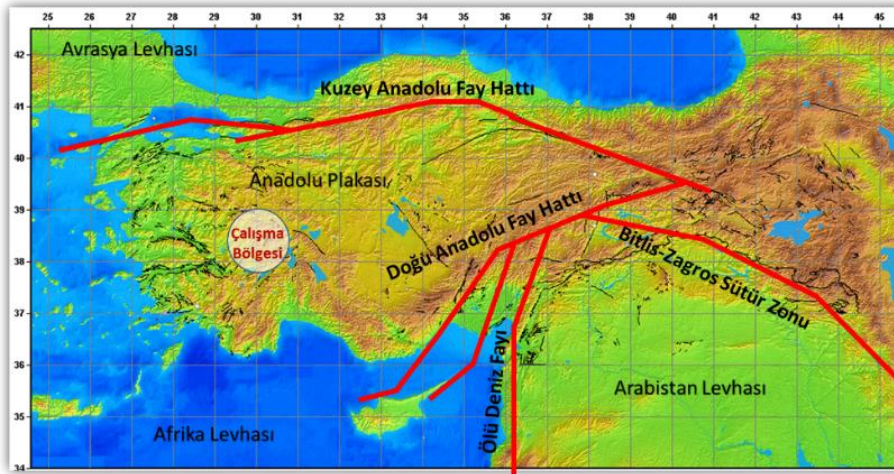
İletişim Yazarı: Kamil B.AFACAN (kafacan@ogu.edu.tr)

the plateau region of the design regulation was generally matched by the non-linear analyses, it remained on the unsafe side for the long periods.

Keywords: TBEC 2018, Site specific analysis, Non-linear analysis, Soil behavior.

1. GİRİŞ

Dünyadaki levha tektoniğinin temel felsefesine göre yer yüzeyi çok farklı bloklardan oluşmakta ve bu levhaların birbirine göre hareket ettiği bilinmektedir. Kabuğun iki bölümü arasındaki hareket, kabuğun jeolojik yapısı içerisinde fay olarak bilinen ve daha önceden mevcut olan veya yeni bir ötelenme hattı boyunca gelişmektedir. Faylar her bir taraftaki kaya bloklarının farklı yönlerdeki hareketinin olduğu yerlerdeki kırıklardır. Depremler fay hatları boyunca diğer bölgelere göre oldukça fazladır. Yer yüzeyini oluşturan altı adet levha birbirine göre göreceli hareket halindedir. Afrika Levhasının 5mm/yıl hızla kuzeye doğru, Arap Levhasının da 19mm/yıl yine kuzeye doğru hareket etmekte olduğunu ve Anadolu Levhasını Avrasya Levhasına doğru sıkıştırdığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda Anadolu Levhası yaklaşık 23mm/yıl batıya doğru hareket etmektedir (Mc Clusky ve diğ., 2000; Uzel ve diğ., 2011). Türkiye, Avrupa'nın en önemli deprem bölgelerinden biridir (Şekil 1). Depremlerin neden olduğu hasarlar ve can kayıpları nedeniyle çalışmalar yapılmakta ve bunları en aza indirmenin yolları aranmaktadır (Habibi ve Jami, 2017; Vahdani ve diğ., 2019).



Şekil 1:

Türkiye'nin aktif fay hatları ve levhalar (B.Ü.Kandilli Rasathanesi'nden uyarlanmıştır).

Yerel zemin tabakalarının yüzeyinde oluşacak deprem özelliklerini belirleyebilmek amacıyla, yerel sismik tehlike bulguları ile uyumlu zemin büyütme analizleri yapılmaktadır. Sismik hareketler, farklı nedenlerle oluşarak ana kayadan yüzeye doğru hareketinde yerel zemin koşullarından etkilenecek şekilde, zemin cinsine ve dinamik özelliklerine bağlı olarak da sönümlenerek ya da büyüyerek yüzeye iletilmektedir. Zemin tabakalarından geçen deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen bu artış literatürde zemin büyütmesi olarak tanımlanmıştır (Ansal ve diğ., 2011; Kaptan ve Tezcan, 2012; Horri ve Mousavi, 2019). Yapı temeline iletilen büyütülmüş deprem hareketi, yapı elemanları üzerindeki deformasyon seviyelerini arttırmakta ve olası yerel göçme veya yapısal göçmeyle sonuçlanmaktadır. Çok küçük değere sahip ana kaya ivmeleri yerel koşulların etkisi ile bazı bölgelerde birkaç kat büyüyerek çok ağır hasara neden olabilmektedir (Kramer, 1996).

Mühendislik alanında meydana gelen gelişmeler ile farklı metotlar kullanılarak deprem kayıtları ölçeklendirilmektedir. Gerçek deprem kayıtları, zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında ölçekleme yöntemleri kullanılarak ölçeklenebilir. Zaman tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde kaydın frekans içeriği değiştirilmeksizin sadece kaydın genliği ile değiştirilir. Frekans tanım alanındaki ölçekleme yöntemlerinde ise tasarım ivme spektrumuna bir eşlik bulmak için yer hareketi kaydının frekans içeriği değiştirilir. Ölçeklendirilecek olan deprem ivme kayıtları üç farklı yöntem ile temin edilebilir. Bunlar; yapay deprem kayıtları, simüle edilmiş kayıtlar ve gerçek deprem kayıtlarıdır (Özdemir ve Fahjan, 2007; Fahjan, 2008). Farklı yönetmeliklerin belirlediği sismolojik şartlara uyan depremler ile ölçeklendirme yapılarak deprem ivme kayıtları elde edilmekte ve yapılara olan zemin büyütme etkileri üzerine farklı çalışmalar yapılmaktadır (Alielahi ve Adampira, 2016; Arslan ve diğ., 2018; Ebrahimi Motlagh ve Rahai, 2017; Rodrigues ve diğ., 2018). Zemin büyütme etkisinin görüldüğü 1985 yılında meydana gelen Mexico City, 1989 Loma Prieta, 1999 yılında yaşanan Kocaeli ve 2020 yılında İzmir Bayraklı depremleri bunun örnekleridir (Liu ve Dobry, 1997; Toksöz ve diğ., 1999; Demir ve diğ., 2020).

Zeminlerin büyütme etkisinin incelenmesinde zemin yapısı kadar depremin özelliklerinin bilinmesi de önemlidir. Sahaya özel yapılacak olan analizlerde yapıların depreme göre analizlerinin ve tasarımlarının yapılabilmesi için bölgenin fay türü, yerel zemin koşulları gibi özelliklere göre depremler seçilerek analizler yapılmaktadır. Ülkelerin belirlemiş olduğu yönetmeliklerde deprem ivme kayıtlarının seçimi, ölçeklendirilmesi ve tasarım spektrum eğrilerinin elde edilmesi belirtilmiştir (TBDY, 2018).

Sahaya özel yapılan analizlerde diğer belirlenmesi gereken kavram ise tepki spektrumlarıdır. Mühendislik açısından incelendiğinde ivme spektrumları deprem özelliklerini yansıtan ve yapıların tasarımında kullanılan parametre olarak kabul edilmektedir (Ansal ve diğ., 2011). Yapılan analizlerin performansının yönetmelikler ile değerlendirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde hala devam etmekte ve geliştirilmeye çalışılmaktadır (Güler ve Afacan, 2019; Koçer ve diğ., 2018; Aksoylu ve Arslan, 2021). Depremler nedeniyle yapılarda meydana gelen hasarların azaltılması, depreme karşı güvenilir yapıların inşa edilmesi için zemin tabakalarının sismik yükler altında davranışının belirlenmesi ve üst yapının tasarımının yapılması gerekmektedir. Yer hareketlerinin belirlenmesi için deprem yönetmeliklerinde belirtilen tasarım spektrum değerleri kullanılmaktadır. Bu değerler ile yapıların doğal titreşim periyotları dikkate alınmakta ve yapıya etkiyecek yatay ve düşey yükler belirlenmektedir. Tasarım spektrumları, sahanın sismik özelliklerini ve zemin koşullarını dikkate alarak farklı deprem kuvvetlerine verdiği tepkinin maksimum değerlerinden oluşur. Yönetmeliklerin sundukları tasarım spektrumları zeminin kum-kil davranış özelliklerini göz önünde bulundurmadan salt kayma dalgası hızı, düzeltilmiş SPT vuruş sayısı ve drenajsız kayma dayanıma bağlı zemini sınıflandırarak noktasal olarak üretilmektedir. Bu çalışma kapsamında zemin tabaklanmasının zemin büyütmesine etkisi yönetmelik eşliğinde değerlendirilecektir.

Bu çalışmada sahaya özel zemin davranış analizlerinin yapılması amacıyla Türkiye'nin aktif bir deprem bölgesinde yapılan sondaj çalışmasının ardından, yönetmelikte belirtildiği üzere bölgenin depremsel özelliklerini yansıtan 11 adet deprem ivme kaydı seçilmiş ve anakaya ivmesi olarak ölçeklendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yüzey tepkisi hesaplanarak TBDY'nin bölgeye önerdiği tepki spektrumları ile karşılaştırılmıştır

2. SAHAYA ÖZEL ANALİZ

2.1. TBDY 2018'e göre zemin sınıfı ve tasarım spektrumunun belirlenmesi

Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY,2018) 2018'de yayınlanmış ve deprem anında meydana gelebilecek hasarların azaltılması hedeflenmiştir. Yönetmelik kapsamında yerel zemin sınıfları yenilenmiş ve tasarım ivme spektrumu değerleri bölgeye göre haritadan seçilme

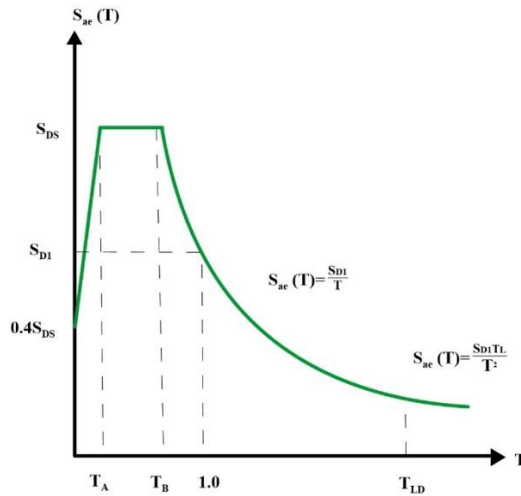
İmkânı sunulmuştur. Yapıların tasarımında önemli olan bu parametreler yeni yönetmelikten elde edilmektedir.

Geçmişten günümüze ülkemizin sürekli depremlere maruz kalması nedeniyle araştırmaların artması, teknolojik gelişmelerin yaşanması ile deprem yönetmelikleri revize edilmiştir. Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe giren Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) zeminleri 6 sınıfa ayırmıştır (Tablo 1). Sınıfların belirlenmesi, $V_{s,30}$ (zeminin ilk 30m'lik profilinden hesaplanan ortalama kesme dalgası hızı), $N_{60,30}$ (ilk 30m'deki teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı) ve $c_{u,30}$ (ilk 30m'deki kayma mukavemeti) parametrelerine dayandırılmıştır. Yönetmelikte belirtilen değerlerde en zayıf zemin olan ZF sınıfı sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler olarak adlandırılmaktadır (TBDY 2018).

Tablo 1. Yerel Zemin Sınıfları (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrıışmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşıabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer

Yapıların tasarımlarında deprem yüklerini belirlemek için tasarım spektrum eğrileri kullanılmaktadır. Yönetmeliklerde, yapıların depreme karşı tasarımı için genellikle normalleştirilmiş tasarım ivme spektrumu önerilmektedir.



Şekil 2:

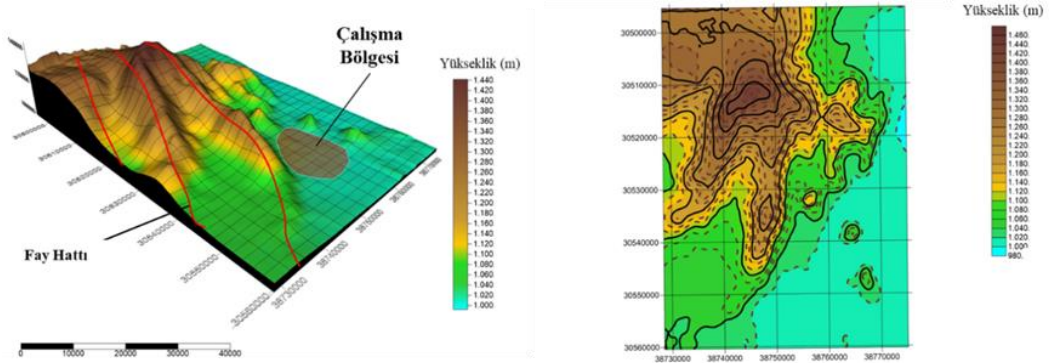
Yatay elastik tasarım ivme spektrum grafiği (TBDY, 2018).

Tasarım spektrumları, analizlerde farklı deprem kayıtlarından elde edilen sismik kayıtların dinamik karakteristiğini yansıtmaktadır. TBDY 2018'e göre yatay elastik tasarım grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Her bölgeye ait tasarım spektrumu karakteristikleri AFAD'ın internet sitesinde Türkiye Deprem Tehlikeleri Haritaları üzerinden yerel olarak belirlenmiş ve kullanıcıya sunulmuştur. Bu interaktif uygulama farklı deprem düzeyleri ve zemin sınıfları için spektrum katsayılarını vermekle birlikte, spektrum zarflarını da hesaplanmış bir şekilde sunmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Bölgesi

Ülkemizin farklı noktalarında meydana gelen depremler nedeniyle pek çok noktada deprem üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Çalışma bölgesi olarak Afyonkarahisar ili Merkez İlçesi Yenice Mahallesi (4293745, 287812) 2 farklı noktada sondaj çalışması sonrasında zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Bölgenin 3 boyutlu arazi görünümü Surfer 13.0 programında elde edilerek Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada çalışma alanının yakınında bulunan fay hatları da gösterilmiştir.

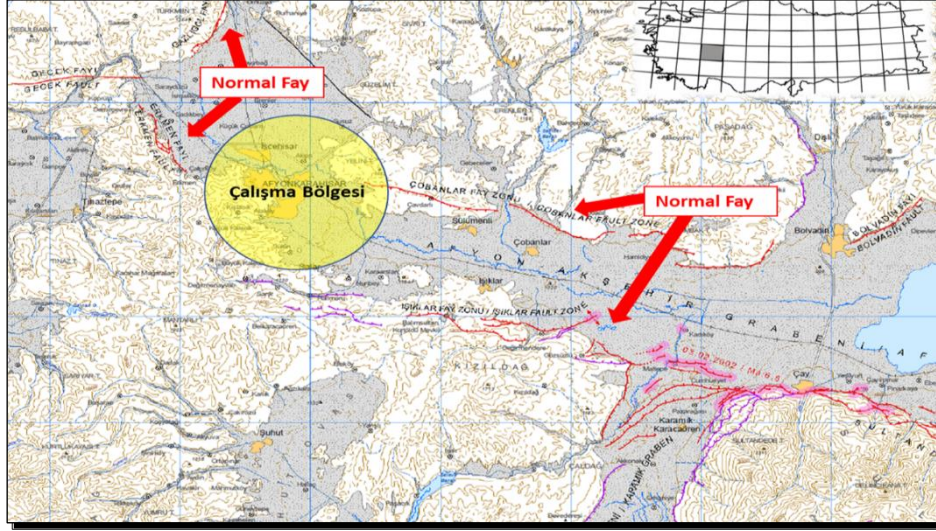


Şekil 3:

Çalışma bölgesinin 3 boyutlu gösterimi ve aktif fay hatları

Afyonkarahisar ili çevresinde eğim atımlı normal fay karakteristiği baskın olup, meydana gelen depremler BKB-DGD uzanımlı olarak gelişmektedir. Bölgede geçmişten günümüze çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Son yıllarda özellikle 1995 yılında Dinar (M:6.1), 2000 ve 2002 yıllarında Sultandağı (M:6.5) ve 2002 yılında Çay (M:6.0) depremleri meydana gelmiş, çok sayıda hasar vermiş ve can kayıplarına neden olmuştur.

Akşehir-Simav Fay Sistemi üzerinde farklı büyüklüklerde aktif fay hatları bulunmaktadır. Bölgenin hemen etrafındaki faylar incelendiğinde, Erkmen, Gazlıgöl, Çobanlar ve Işıklar Fay Zonlarının normal fay zonu olduğu Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4:

Çalışma bölgesinin etrafındaki fay hatları (Emre vd. 2011).

Çalışmada kullanılan sondajların zemin profil özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Profiller incelendiğinde Sk-1’de toplam 20m, Sk-2’de 17.5m kalınlıkta yüksek plastisiteli kil olduğu ve yer altı su seviyesinin 1.5m’den itibaren başladığı belirlenmiştir. Düşük plastisiteli killerde plastisite indisi %8-24 arasında değişirken yüksek plastisiteli killerde bu değer %29-38 arasında kalmıştır. Doğal birim yoğunluk 1.75-1.79 g/cm³ arasında değişirken, su muhtevasının %18-%28 arasında olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sonucu drenajsız kayma dayanımının ise 35-75 kPa arasında değiştiği görülmüştür.

Tablo 2. Sondajlardan belirlenmiş zemin sınıfları

Derinlik	Sk-1	Vs (m/s)	Sk-2	Vs (m/s)
0.00-3.50 m	CH	87	CH	75
3.50-7.0 m	CH	87	CH	75
7.00-10.5 m	CH	170	CH	165
10.5-14.0 m	CL	170	CL	165
14.0-17.5 m	CL	170	CL	165
17.5-21.0 m	CH	170	CL	165
21.0-24.5 m	CH	170	CH	165
24.5-27.5 m	CH	170	CL	165
27.5-30.0 m	CL	170	CH	165

Zeminin dinamik özelliklerini belirten modül azalım ve sönüm eğrileri belirlenirken Darendeli (2001) yaklaşımı benimsenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi Darendeli (2001) modeli %1 kayma birim şekil değiştirmelere kadar önerildiği gerçeğidir. Modül azalım eğrisinin yüksek deformasyon seviyelerindeki kısmı araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan UU (konsolide edilmemiş, drenajsız) deneyi sonucu elde edilen

drenajsız kayma mukavemeti değerlerine göre revize edilerek tabakaların dinamik özellikleri tanımlanmıştır.

2.1. Seçilen depremler ve ölçeklendirme

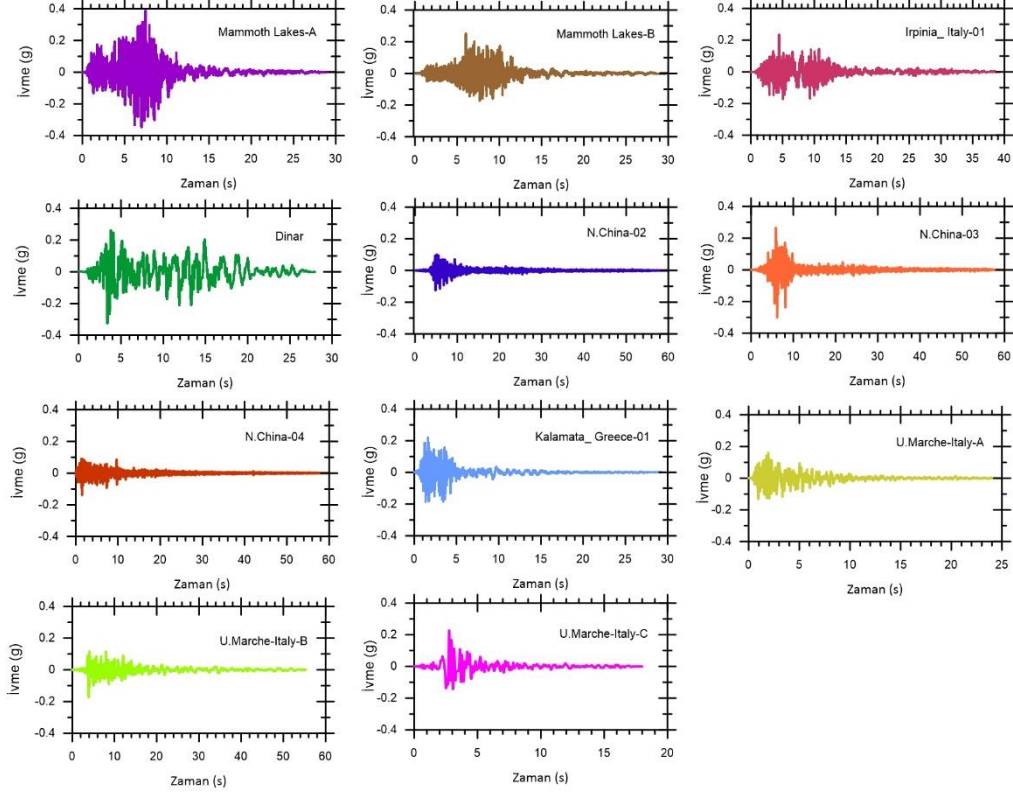
Sahaya özel analizlerde seçilecek olan depremlerin, bölgenin depremsel özelliklerini yansıtmaya gerekmektedir. Bina taşıyıcı sistemlerinin zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır. Binanın bulunduğu bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu geçmiş deprem kayıtlarının mevcut olması durumunda öncelikle bu kayıtların kullanılması gerekmektedir. Yapılan tarama sonucunda on bir adet deprem seçilmiş ve Tablo 3’de gösterilmiştir. (Rjb: Joyner-Boore mesafe birimi, $V_{s,30}$: zeminin ilk 30m’lik profilinden hesaplanan ortalama kesme dalgası hızı, PGA: Pik yer ivmesi, PGV: Pik yer hızı, PGD: Pik yer Deplasman değeri)

Tablo 3. Seçilen Depremler

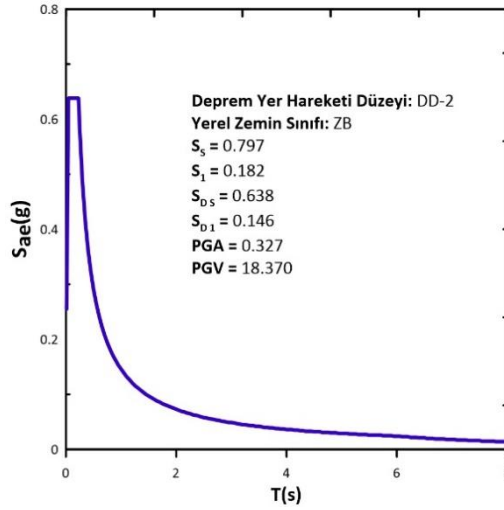
No	Deprem Adı	Yıl	Büyüklik (Mw)	Fay Tipi	Rjb (km)	$V_{s,30}$ (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (m)
1	Mammoth Lakes-A	1980	6.06	Normal/Oblik	1.1	382.12	0.386	0.211	0.060
2	Mammoth Lakes-B	1980	6.06	Normal/Oblik	4.48	346.82	0.249	0.111	0.021
3	Irpinia_Italy-01	1980	6.9	Normal	6.78	382.00	0.234	0.240	0.104
4	Dinar	1995	6.4	Normal	0.00	219.75	0.326	0.453	0.109
5	N.China-02	1997	5.93	Normal	17.9	240.09	0.124	0.109	0.030
6	N.China-03	1997	6.1	Normal	9.98	240.09	0.300	0.192	0.030
7	N.China-04	1997	5.8	Normal/Oblik	21.49	240.09	0.138	0.031	0.006
8	Kalamata_Greece-01	1986	6.2	Normal	6.45	382.21	0.220	0.089	0.014
9	U.Marche-Italy-A	1997	6.0	Normal	0.8	317.00	0.159	0.074	0.020
10	U.Marche-Italy-B	1997	6.0	Normal	17.28	293.00	0.172	0.142	0.024
11	U.Marche-Italy-C	1997	5.6	Normal	16.11	218.00	0.227	0.154	0.014

Yapılan tarama işlemi sonucunda bölgenin depremsellik özelliklerini yansıtan büyüklüğü M:5.6-6.9 arasında değişen normal ve normal/oblik fay tiplerinden istasyona en yakın yüzey kayıtları seçilmiştir. Elde edilen ivme kayıtları Şekil 5’te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, benzer jeolojiye ve kırılma özelliklerine sahip birçok kayıt frekans, süre, pik ivme ve bir sürü özellik bakımından birbirlerinden ayrılmaktadır. Seçilen depremlerin özelliklerinin farklı olması

yönetmeliğin sahaya özel analizler için önerdiği 11 farklı deprem kayıt koşulunu iyi bir şekilde sağlamaktadır.



Şekil 5:
Çalışmada kullanılan 11 adet ivme kaydı

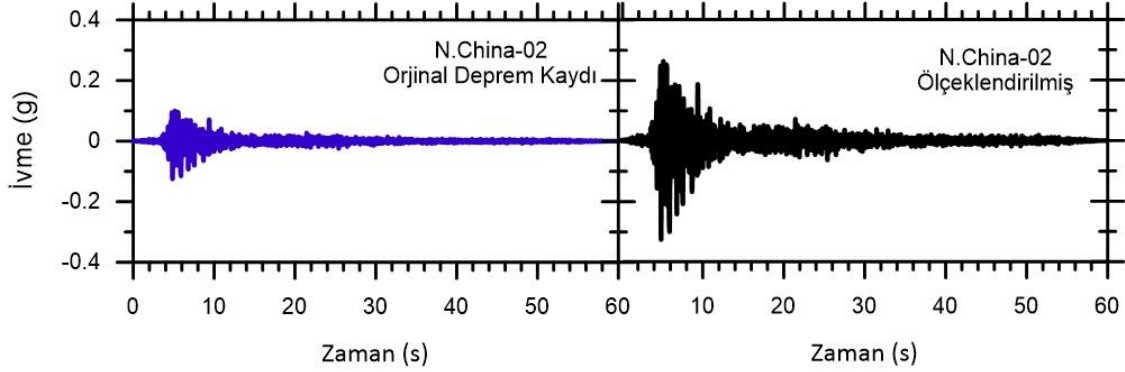


Şekil 6:
TBDY 2018'in bölgeye ait verdiği tasarım spektrumu.

Sahaya özel analizlerde kullanılacak olan depremlerin öncelikle çalışma bölgesinin deprem karakteristiğine göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Deprem kayıtları tasarım spektrumuna

uygun olacak şekilde iki farklı yöntem kullanılarak (zaman-tanım/frekans-tanım) ölçeklendirilebilir. Bu çalışmada zaman tanım alanında ölçeklendirilme yapılmıştır. Öncelikle TBDY 2018'in bölgeye ait spektrum eğrisi elde edilmiş ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılacak olan tüm yüzey ivme kayıtları bölgeden elde edilen pik yüzey ivmesi (PGA) baz alınarak ölçeklendirilmiştir. İvme kaydının yüzeye gelene kadar farklı tabakalar nedeniyle değiştiği bilindiği için analizlerde ölçeklendirilen ivme kayıtlarının kullanılması gerekmektedir. Şekil 7'de de görüleceği üzere N.China-02 depremine ait ivme kaydı bölgeye göre ölçeklendirildiğinde pik ivme değerinin yaklaşık 3 kat arttığı belirlenmiştir.



Şekil 7:
Ölçeklendirilen ivme kaydının zamana bağlı değişimi.

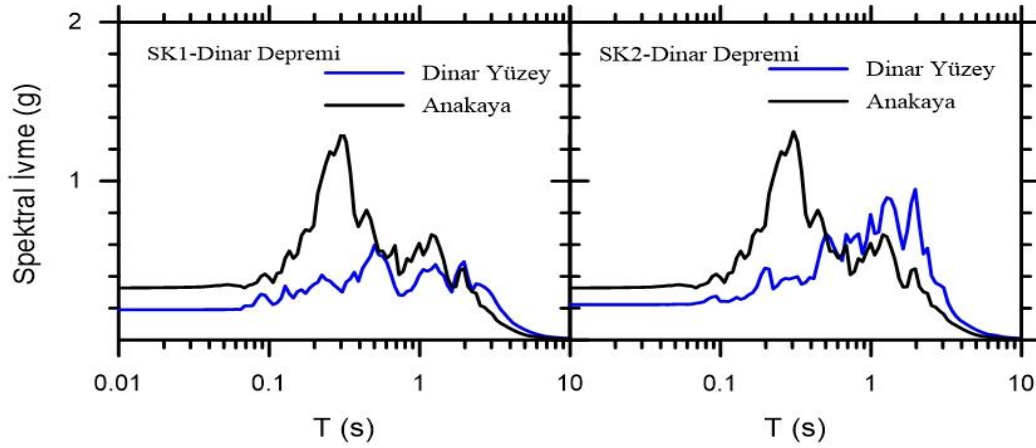
3. BULGULAR

3.1. Yüzey ivme değerleri

Çalışmada doğrusal olmayan (Non-Linear) analizler Deepsoil v7.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tercih edilen Deepsoil yazılımı, bir boyutlu zemin davranış analizleri çalışma prensibine dayalı olarak ilk olarak 1998 yılında geliştirilmiştir. Deepsoil ile hem frekans hem de zaman tanım alanında çözümlenmeler ile hem eşdeğer doğrusal, hem de doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir (Hashash ve diğ., 2016).

Bölgeden elde edilen iki adet sondaj ile TBDY 2018 yönetmeliğine göre seçilen depremler ve yapılan ölçeklendirilmeler sonucunda doğrusal olmayan analiz sonuçları elde edilmiştir.

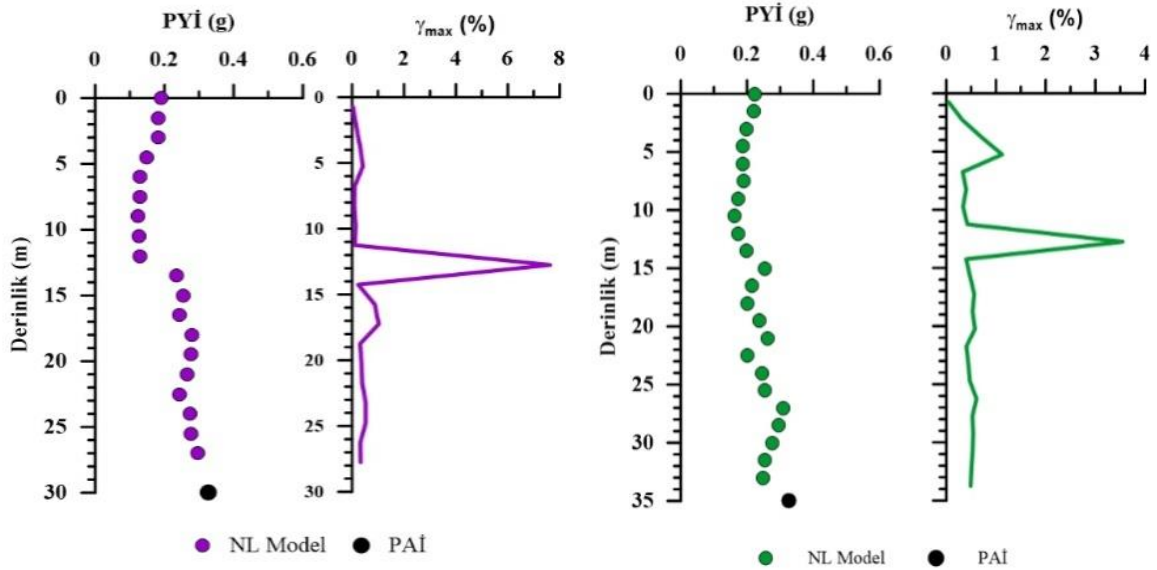
Öncelikle bölgede meydana gelen önemli depremlerden biri olan ve 1995 yılında meydana gelen Dinar depremi kullanılarak elde edilen spektral ivmenin anakaya ve yüzeydeki değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Sk-1 sondaj kuyusu incelendiğinde anakaya spektral ivmesinin 0.3 saniyede yaklaşık 1.3g seviyelerinde ve dar bir periyot aralığında olduğu görülürken, aynı ivme kaydına ait yüzey spektral ivmesinin 0.4-2 saniye aralığında 0.6 g seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Dinar depremine ait Sk-2 sondaj kuyusunda ise yüzey spektral ivmesinin 1.5 ve 2.5 saniyelerde 0.8-0.9g seviyelerinde olduğu görülmüştür. Buradan da anlaşılacağı üzere yüzey ile anakaya ivme kayıtları arasında büyük farklılıklar vardır. Aynı anakaya ivmesi zemin özelliklerinin farklılaşması özellikle plastisite indisine bağlı olarak farklı yüzey tepkileri vermiştir. Ayrıca pik ivme Sk-1'de daha fazla sönümlenmişken, Sk-2'de daha az sönümlenmiştir.



Şekil 8:

Sk-1 ve 2'de Dinar depremine ait yüzey ve anakaya tepki spektrumları.

Yapılan doğrusal olmayan analizlerde Sk-1 sondaj kuyusunda anakayadan yüzeye doğru pik yüzey ivmesi (PYİ) ve deformasyon değişimi incelendiğinde 0.327g olan pik anakaya ivmesinde (PAİ) profil boyunca sönümlenme meydana gelmiştir. Birim şekil değiştirmede ise 11-14m aralığında (düşük plastisiteli CL türü kil, kum davranışı göstermektedir) %8 oranında deformasyon meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 9).

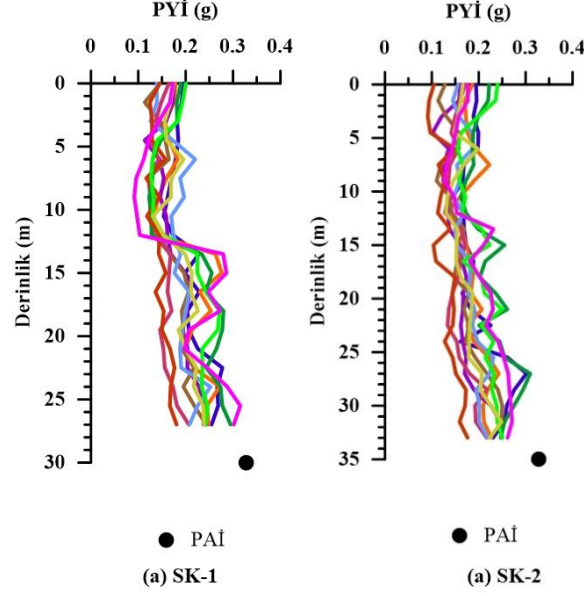


Şekil 9:

Sk-1 ve 2'de Dinar depremine ait pik anakaya ivmesinin ve kayma birim deformasyonların profil boyunca değişimi.

Sk-2 sondaj kuyusunda aynı deprem ile yapılan doğrusal olmayan analizde ise yine 0.327g olan anakaya ivme değerinin derinlik boyunca yüzeye doğru hareketi görülmektedir. Yüzeyde ise yine sönümlenme meydana geldiği belirlenmiştir. Birim şekil değiştirmenin derinlik boyunca değişimi incelendiğinde ise 12-14m aralığında (düşük plastisiteli CL türü kil, kum davranışı göstermektedir) %4 oranında deformasyon meydana geldiği belirlenmiştir.

TBDY 2018'e göre seçilen ve ölçeklendirilen tüm ivme kayıtları ile yapılan analizler ise Şekil 10'da gösterilmektedir. Sk-1 incelendiğinde bazı tabakalarda pik yüzey ivmelerinin anakaya ivmesine yakın olduğu ancak bazılarının ise derinlik boyunca 3 kat sönümlenmelere maruz kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca seçilen anakaya ivme kayıtlarının yüzeye ulaşan kısımlarında 2 kata kadar fark olduğu belirlenmiştir.

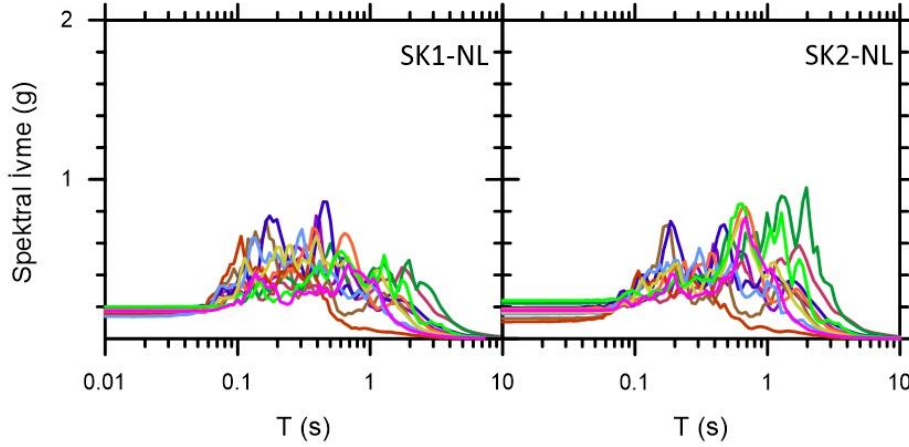


Şekil 10:

Sk-1 ve 2'de 11 adet pik anakaya ivmesinin profil boyunca değişimi.

3.2. Zemin tepki spektrumu

Doğrusal olmayan analizler, 11 adet deprem ivme kaydı kullanılarak yapılan 22 adet analizden oluşmaktadır. Elde edilen spektral ivme değerleri Şekil 11'de gösterilmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Sk-1 sondaj kuyusunda 0.45 saniyede 0.82g, Sk-2 sondaj kuyusunda ise 2 saniyede 0.9g olarak belirlenmiştir. Kayma dalgası hızları profil boyunca yakın olan iki farklı sondaj için spektral ivmelerin en büyük olduğu periyotlar farklılık göstermektedir. Bunun en önemli nedenlerinden birinin plastisite özelliklerinin değişkenlik göstermesi olarak yorumlanmaktadır.

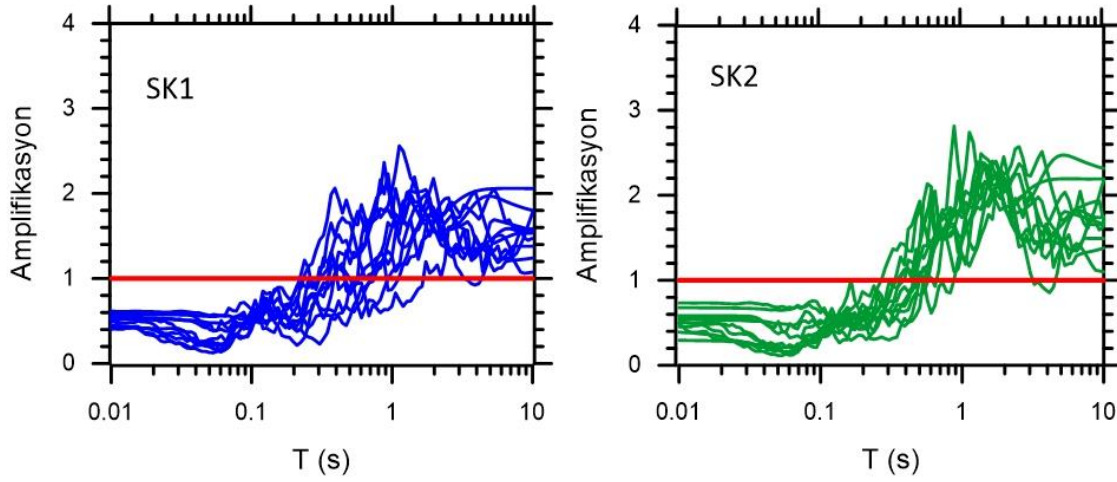


Şekil 11:

Sk-1 ve Sk-2' ye ait doğrusal olmayan spektral ivme-periyot grafikleri

Yapılan analizlerde farklı deprem ivme kayıtlarının maksimum spektral ivmelerinin farklı periyotlarda ortaya çıkması ve geniş bir bant aralığına yayılması nedeniyle baskın periyotun bu aralıkta değerlendirilmesi gerekmektedir. Analizlerde en az 11 adet deprem ivme kaydının kullanılması gerektiği Şekil 11'de görüldüğü üzere geniş periyot aralığı ile görülmektedir.

Deprem ivme kayıtlarının zemin tabakaları içerisinde anakayadan yüzeye doğru hareket ettiklerinde genliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Dalgaların genliklerinde meydana gelen artış zemin büyütmesi, azalış ise sönümlenme olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada yüzey tabakasında meydana gelen büyütme (amplifikasyon) değerleri Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12:

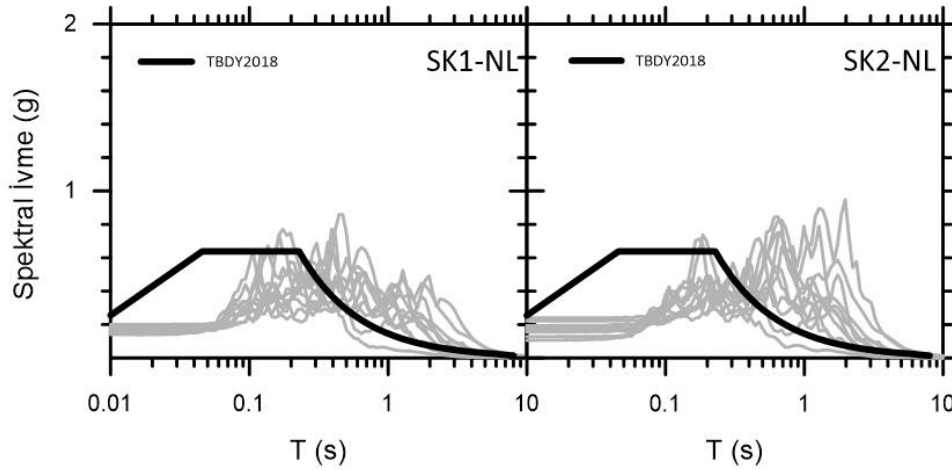
Sk-1 ve 2' ye ait doğrusal olmayan büyütme faktörü (amplifikasyon) değerleri

Analiz sonuçları incelendiğinde, Sk-1 sondaj kuyusunda 1s civarında yüksek periyot seviyelerinde yaklaşık 2.5 kat büyütmenin olduğu belirlenmiştir. Tüm ivme kayıtlarının da benzer periyot değerlerinde büyütme etkisi içerisinde olduğu görülmüştür. Sk-2 sondaj kuyusu incelendiğinde ise 1s ve daha büyük periyot değerlerinde büyütme etkisinin görüldüğü ve bazı ivme kayıtlarında 2.9 kat büyütme etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Tüm bu yapılan analizlerin ardından 2019 yılında yürürlüğe giren TBDY 2018'in bölgeden elde edilen veriler doğrultusunda değerlendirilmesi ise Şekil 13'te gösterilmiştir.

Yapılan analizlerde kullanılan deprem ivme kayıtları ile TBDY 2018'in bölgeye önerdiği tepki spektrum zarfı karşılaştırıldığında, Sk-1 sondaj kuyusu için plato değeri genel olarak doğru belirlenmiş olsa da köşe frekanslarının büyük farklılık göstermesi nedeniyle yüksek periyotlardaki spektral davranış daha düşük değerlerle temsil edilmiştir. Sk-2 sondaj kuyusu için de benzer yorumlar yapılabilir. Kısa periyot davranışı güvenli bir şekilde yönetmelik spektrumuyla tanımlanmışken uzun periyot davranışı sahaya iyi bir şekilde yansıtamamıştır.

Sahaya özel yapılan doğrusal olmayan davranışla yönetmelik tarafından önerilen zarfın örtüşebilmesi için köşe frekanslarının sağa doğru yavaşması gerekmektedir. Böylelikle uzun periyot davranışı yönetmelik tarafından da iyi bir şekilde tahmin edilmiş olacaktır.



Şekil 13:

Elde edilen spektral ivmeler ve TBDY 2018'e ait yüzey tepki spektrumu

Aynı zemin profiline bile farklı anakaya ivmelerinin uygulanmasıyla birlikte yüzeyde yapıya etkiyecek spektral davranışın ne kadar farklılaştığı aşikardır. Böylece, yerel zemin özelliklerinin ve anakaya ivme frekans özelliklerinin anakaya hareketini ne kadar değiştirdiği ve sahaya özel doğrusal olmayan analizlerin ne derece önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

4. SONUÇLAR

Deprem bölgelerinde yapılacak olan yapılar için yerel zemin koşulları büyük önem arz etmektedir. Yüzeye yakın tabakalarda deprem ivme kaydında meydana gelen değişimler nedeniyle yapılarda büyük hasarlar meydana gelmektedir. Bu çalışmada aktif deprem bölgelerinden biri olan Afyonkarahisar ilinde sahaya özel yapılan doğrusal olmayan analizler ve TBDY 2018'in performansının değerlendirilmesi sonucunda;

- Deprem bölgelerinde yapıların tasarımında kullanılan parametrelerin sahaya özel analizler sonucunda belirlenmesi ve yönetmelikle kıyaslanmasının faydalı olduğu düşünülmektedir.
- Sahaya özel analizlerde bölgenin depremsel özelliklerini yansıtan ivme kayıtlarının ölçeklendirilmesinin ve anakayadan uygulanarak yüzey boyunca değişiminin belirlenmesi gerekmektedir.

- Anakayadan yüzeye doğru hareketi sonucunda ivmelerin bazı tabakalarda büyütme, bazı tabakalarda ise sönümlenmeye maruz kaldığı belirlenmiştir. Özellikle her iki sondaj kuyusunda da 10-15m aralığında deformasyonların ani artışı belirlenmiştir.
- Zemin büyütme (amplifikasyon) değerleri incelendiğinde ise her iki sondaj kuyusunda yüksek periyotlarda 2-3 kat büyütme etkisinin olduğu görülmektedir.
- AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasında bölgeye ait önerilen spektrum zarfı incelendiğinde, Sk-1 sondaj kuyusunda plato bölgesinin ivme değerleri 0.638g olarak belirlenmiş olsa da periyot olarak düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Sk-2 sondaj kuyusunda da benzer davranış görülmüştür. Köşe frekanslarının değişmesi durumunda, arazi ve laboratuvar deneylerine bağlı doğrusal olmayan sahaya özel analizlerin sonuçlarının yönetmelik zarfıyla örtüşeceği tahmin edilmektedir.
- TBDY 2018'in bölgeye ait önerdiği spektrum zarfının genel olarak başarılı olduğu, yüksek periyotlarda eksik kaldığı, sahaya özel analizlerle değerlerin desteklenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.
- Yapılan çalışma tek bir lokasyon için yapılmış olduğundan ortaya çıkan sonuçlar sadece bu yerel zemin özelliklerini yansıtmaktadır. Sondaj ve arazi verilerinin artırılması ile daha genel sonuçlara varılacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışma doğrusal olmayan sahaya özel analizlere bir örnek olup, ortaya çıkan sonuçlar sadece ilgili zemin profilleri içindir. Net çıkarımların yapılabilmesi için farklı zemin özelliklerine, farklı faylanma yapılarına sahip bölgelerde de analizler tekrarlanabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ersin GÜLER, verilerin toplanması, analizlerin yapılması ve makalenin yazım süreçlerine, Kamil B.AFACAN ise analizlerin yapılması, yorumlanması, makalenin yazım süreçlerine ile son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Aksoylu, C., Arslan, M.K. (2021) 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması Olarak İrdelenmesi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi. Cilt:13 Sayı:2 359-374.
2. Alielahi, H., Adampira, M. (2016) Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: Amplification patterns and engineering applications. Int J Civ Eng. Vol:14. 233–251. DOI:10.1007/s40999-016-0020-7.
3. Ansal, A., Tönük, G., Kurtuluş, A. (2011) Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı:1–8.
4. Arslan, G., Borekci, M., Sahin, B., Denizer, MI, Duman, KS. (2018) Performance Evaluation of In-Plan Irregular RC Frame Buildings Based on Turkish Seismic Code. Int J Civ Eng. Vol: 16. 323–333. DOI:10.1007/s40999-016-0131-1.

5. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. <http://www.koeri.boun.edu.tr/new/>
6. Darendeli, M.B. (2001) Development of A New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Doktora Tezi. The University of Texas at Austin
7. Demir, A., Çiftçioğlu, A.Ö., Başarı, E., Doğan, E., Nohutcu, H., Bozkurt, M.B., Erdem, R.T., Altıok, T.Y. (2020) İzmir (Seferihisar-Sisam) Depreminin Sismik Karakteristiği ve Meydana Gelen Yapısal Hasarların İncelenmesi. Teknik Rapor. Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği.
8. Ebrahimi Motlagh, HR., Rahai, A. (2017) Dynamic Response of a Continuous-Deck Bridge with Different Skew Degrees to Near-Field Ground Motions. *Int J Civ Eng. Vol:15. 715–725. DOI:10.1007/s40999-017-0169-8.*
9. Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H., (2011) 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Afyon (NJ 36-5) Paftası, Seri No:16 Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye
10. Fahjan, YM. (2008) Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi (In Turkish). *Teknik Dergi/Technical J Turkish Chamb Civ Eng. Vol:19, Issue: 93. 4423–4444.*
11. Güler, E., Afacan, K.B. (2019) Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının Zemin Büyütme Analizi ile Belirlenmesi. 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
12. Habibi, A., Jami, E. (2017) Correlation between Ground Motion Parameters and Target Displacement of Steel Structures. *Int J Civ Eng. Vol: 15, 163–174. DOI:10.1007/s40999-016-0084-4*
13. Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D., Phillips, C. A. & Park, D. (2016) DEEPSOIL V6.1, User Manual. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
14. Horri, K., Mousavi, M. (2019) Modeling and Studying The Impact of Soil Plasticity on The Site Amplification Factor in Ground Motion Prediction Equations. *Journal of Seismology. Vol: 23. 1179–1200. DOI:10.1007/s10950-019-09871-w*
15. Kaptan, K., Tezcan, S. (2012) Deprem Dalgalarının Zemin Büyütmesi Üzerine Örnekler. *Türk Bilim Araştırma Vakfı. TUBAV Bilim Dergisi. V:5 S:4 17-32.*
16. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
17. Koçer, M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-Hagri, M.G., Arslan, M.H. (2018) Deprem Kuvvetine Esas Spektral İvme Değerlerinin TBDY 2018 ve TDY 2007'ye Göre Karşılaştırılması. *Selçuk Üniv.-Teknik Dergisi. Vol: 17. 43-58.*
18. Liu, L., Dobry, R. (1997) Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand. *J Geotech Eng. Vol: 123. 557–566. DOI:10.1061/(asce)10900241(1997)123:6(557)*
19. Mc Clusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., ERgintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Şanlı, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N., and Veis, G., (2000). GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *J.Geophys. Res.*, 105, 5695-5719.

20. Rodrigues, H., Furtado, A., Vila-Pouca, N., Varum, H., Barbosa, AR. (2018) Seismic Assessment of a School Building in Nepal and Analysis of Retrofitting Solutions. *Int J Civ Eng.* Vol: 16. 1573–1589. DOI:10.1007/s40999-018-0297-9.
21. Özdemir, Z., Fahjan, YM. (2007) Comparison of Time and Frequency Domain Scaling of Real Accelerograms to Match Earthquake Design Spectra. *Sixth Natl Conf Earthq Eng.* 435–446.
22. TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
23. Toksoz MN, Reilinger RE, Doll G, Barka AA. (1999) Izmit (Turkey) Earthquake of 17 August 1999: Preliminary Report. 70 p.
24. Uzel, T., Eren, K., Gülal, E., Dindar, A.A., Tiryakioğlu, İ., Yılmaz, H. (2011) Tusaga Aktif (Cors-Tr) Verileri ile Tektonik Plaka Hareketlerinin İzlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası. 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı.* 18-22 Nisan 2011. Ankara.
25. Vahdani, R., Gerami, M., Vaseghi-Nia, MA. (2019) The Spectra of Relative Input Energy per Unit Mass of Structure for Iranian Earthquakes. *Int J Civ Eng.* Vol: 17, 1183–1199. DOI:10.1007/s40999-018-0377-x.