TÜRKİYE'DE KAYDEDİLEN DEPREMLERİN DAVRANIŞ SPEKTRUMLARININ TASARIM SPEKTRUMLARI İLE KARŞILAŞTIRMASI

H. Polat GÜLKAN
Prof. Dr.
Başkent Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü
hpgulkan@baskent.edu.tr
Ankara,Türkiye

Vesile Hatun AKANSEL
Dr. Öğr. Üyesi
Muğla Sıtkı Koçman
Üniversitesi, İnşaat
Mühendisliği Bölümü
vesileakansel@mu.edu.tr
Muğla, Türkiye

Erol KALKAN
Dr.
QuakeLogic Inc.
erol@quakelogic.net
Roseville, CA,
Amerika Birleşik
Devletleri

ÖZET

Halen, deprem tasarımına yönelik birçok standart ve yönetmelikte tasarım spektrumu şekli, $T_{s,(\sim 0.2s)}$ ve $T_{1,(\sim 1\ s)}$ periyotlar için hesaplanmış spektral ivmelerle tanımlanmaktadır. Bu tehlike kaynaklı değerlerin her ikisi de ilgili yerdeki kaya için belirlenir ve daha sonra yer hareketi seviyesine ve üst 30 m katmanın jeolojik özelliklerine bağlı faktörlerle tasarım hesaplarında kullanılmak üzere değiştirilir. Bu bildiri, ulusal sismik tehlike haritası yardımıyla çıkartılmış tasarım spektrumları ile AFAD tarafından işletilen Türkiye ulusal kuvvetli yer hareketi ölçüm ağının bazı istasyonlarındaki gerçek kayıtlardan elde edilen davranış spektrumları arasındaki uyumsuzluklara dikkat çekmektedir. Bu amaçla, ulusal kuvvetli yer hareketi ağının istasyonlarında kaydedilen gerçek yer hareketleri kullanılmış ve aynı konum ve zemin özellikleri için oraya ait tasarım spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki tasarım spektrumunun, geçmiş depremlerin temsil ettiği sabit hız kırılmasındaki uzun periyot talebini tutarlı bir şekilde tanımadığı ve yumuşak zemin profilleri için artan periyot değerlerine taşımadığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Köşe Periyotları, Sahaya Özel Tasarım Spektrumu, Kuvvetli Yer Hareketi Verisi, Sismik Tasarim

ABSTRACT

RESPONSE SPECTRUM SHAPES IMPLIED BY EARTHQUAKES IN TURKEY: COMPARISONS WITH DESIGN SPECTRA

Design spectrum shape in many recent standards and codes is defined by spectral accelerations for two periods [$T_{s,(\sim 0.2s)}$ and $T_{1,(\sim 1\ s)}$], modified by multiplicative factors that account for the site class and intensity of the ground shaking. This article draws attention to apparent discord between response spectra of actual recordings at a number seismic stations in Turkey with the design spectra for the same location and site characteristics as given by the national seismic hazard map. While the nature of the two sets of spectra are not the same, we found that, for deep basins with Site Class D or E profiles the design spectrum seems not to recognize consistently the constant velocity, longer period demand. This may lead to erroneous building designs in practice, and establish misleading record sets in spectrum-matching applications for nonlinear response history analyses.

KEYWORDS: Earthquake, Response Spectrum, Corner Periods, Site Specific Design Spectrum, Strong Motion Database, Seismic Design.

GİRİŞ

Deprem mühendisliğinin temel aracı, 1930'larda geliştirilmesinden itibaren davranış spektrumu olmuştur (Trifunac, 2003; Chopra, 2007). Tasarım spektrumu, davranış spektruma dayalı, fakat onun sert iniş ve çıkış noktalarının bulunmadığı, lineer sistemlerin azami tepkilerinin tahmini için hazırlanmış bir grafiktir. Tasarımcılara lineer bir taşıyıcı sistemdeki gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri tahmin etmede rehberlik eder. İlerideki bir deprem sırasında performansı kabul edilebilir doğrulukta ve resmi yol gösterici belgelerin aradığı şartların yerine gelip gelmediğini denetlemek üzere kullanılan bir araçtır. Son 50 yıl boyunca mühendislik sismolojisinin ana odak noktası, tasarım spektrumunu şekillendirecek, bir sahada beklenen güçlü zemin hareketinin özelliklerini tanımlamak için bir araya gelen çeşitli parametrelerin makul bir şekilde doğru tahminini elde etmek olmuştur. Gerçekten de, Housner (1959) veya Newmark ve ortak araştırmacıları (her ikisi de Housner ve Jennings, 1982 ve Newmark ve Hall, 1973, 1982'de özetlenmiştir) tarafından, yapısal sistemlerin tasarımında kullanılmak üzere henüz oluşmamış depremlerin etkilerine direnen o

parametreye odaklanan ve tasarım spektrumu tanımlamak için yapılan ilk çalışmalardır. Davranış spektrumunun sağladığı kolaylık lineer sınırlar içinde kalan sistemler için azami tepkinin zaman tanım alanındaki uzun ve zahmetli hesaplara girmeksizin mühendisçe bir çırpıda hesaplanmasıdır. Üstelik mod birleştirmelerine dayalı usullerde hesapta kullanılacak parametrik eleman etkileri tahmin edilebilir. Spektrumun dezavantajı zaman boyutuna sahip olmaması, dolayısıyla 5 s uzunluğundaki bir depremle 50 s süreli bir depremin etkilerini ayırt edememesidir.

İlk uygulamalar, tasarım mühendislerinin çalışmalarında kullanabileceği ortalama sonuçlara varmak için çok yetersiz kalan bir kuvvetli hareket kayıtları kütüphanesine dayanmaktaydı. Bunlar sayıca az olmalarının yanısıra şu anda neredeyse tüm yer hareketi tahmin modellerinde (GMM'ler) yeralan ek değişkenler kümesini göz ardı etmekteydi. Bu ilave parametreler kümesinde uzun periyotlu yakın saha etkileri, yırtılmanın ortaya çıkardığı yönlenme ve yer hareketinin ihtiva ettiği frekans dağılımı ile havza rezonansı hususlarını içerir. Çok geniş bir aralıktaki büyüklükler, mesafeler, faylanma tarzları ve kayıt alanı zemin şartlarındaki yer hareketi kayıtlarının hızla çoğalmasıyla, bu modelleri ayrıntılı olarak incelemek mümkün hale gelmiştir. Ancak, yer hareketi veri tabanındaki sayıca büyük artış, bu veri tabanını kullanan kişilere daha hassas öngörme yeteneği kazandırmış değildir. Her yeni deprem, mevcut modellerden farklı olan yer hareketleri üretir, çünkü bu hareket kaynak, yol ve saha özelliklerinin karmaşık bir kombinasyonundan etkilenir (Douglas, 2019; Kaklamanos ve diğerleri, 2021). Birinci nesil yer hareketi tahmin denklemlerinin (GMME) performansı, gözleme dayalı gerçeklik ile denklemce tahmin edilen yer sarsıntısı arasındaki boşluğu daraltmaya yönelik ilerleme uzun çalışmalar ile elde edilmiştir (Boore v.d., 2014). Ölçümler ve tahminler arasındaki uyumsuzluğun azaltılması, kuvvetli yer hareketi sismolojisi için aşılması gereken bir engel olmaya devam etmektedir.

Sahaya özel tasarım spektrumları ve bunlarla eşleşen yer hareketi kayıtları üretme motivasyonu, hem statik hem de dinamik karakterli doğrusal olmayan yapısal analiz prosedürlerinin çoğalan uygulamalarından kaynaklanmaktadır (Kalkan ve Chopra, 2010). Buradaki çalışmamızın esas motivasyonu, ABD'deki araştırma bulgularının ve şartname tadilatlarının aralarında Türkiye'nin de bulunduğu ülkelerdeki deprem tasarım uygulamalarına ilave tamamlayıcı parametreler (malzeme standartları, izin verilen yer değiştirme sınırları, statik yükler v.b.) ve tecrübe dikkate alınmadan doğrudan ithal edilen

hükümlerle sonuçları bilinemeyen etkiler yaratmasıdır. ASCE7-10'u andıran özelliklere sahip zorunlu bir bina tasarımı yönetmeliğinin 2019'da yürürlüğe girdiği ülkemizdeki durumun böyle olduğu görüşündeyiz. Yönetmelikle aynı zamanda yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritası, hesapta kullanılacak spektrumun temelini temsil etmektedir. ASCE7'de USGS tarafından hazırlanan ve 2475 senelik tasarım spektrumunu şekillendirmeye yardımcı olan yer hareketi etkilerini kullanan hükümlerin aksine, ülkemizdeki yönetmelik tasarım ölçüsü olarak 475 yıllık tekerrür periyodu esas almaktadır. Muhakkak olan husus davranış spektrumunun hesap spektrumu ile aynı şey olmadığı gerçeğidir. Bu yazıda dile getirdiğimiz nokta herhangi bir coğrafi nokta için o nokta için tarif edilmiş tasarım spektrumu ile aynı koordinatta kaydı alınmış yer hareketlerinin davranış spektrumları arasındaki benzerliklerin veya aykırılıkların irdelenmesidir.

Aşağıdaki yorumlar, yalnızca tasarım yelpazesine atıfta bulunan yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin tasarım özellikleri ile ilgilidir. Bu spektrumun şekilsel görünümü, 2022'den önceki tüm ASCE7 belgelerindeki benzerleriyle aynıdır. Biri 0.2 s (S_S) "kısa" periyot aralığında ve diğeri T = 1 s (S_1) 'de olmak üzere iki periyottaki spektral ivmelerle tanımlanır. Zemin etkisi faktörleri tarafından değiştirilmeden önce bu iki değişken, herhangi bir yer için tasarım spektrumunun temelini tanımlayan temel bileşenlerdir.

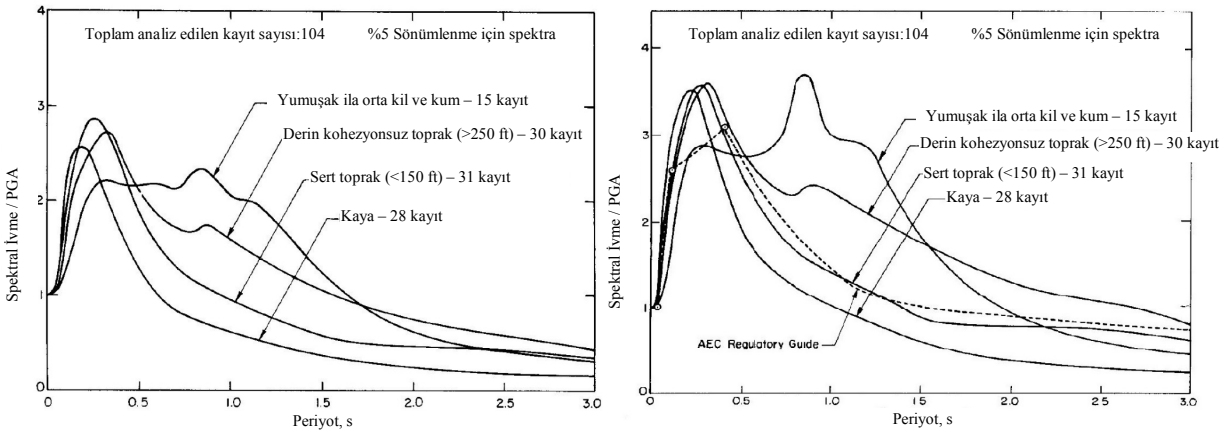
DAVRANIŞTAN TASARIM SPEKTRUMUNA GEÇİŞ

Sismik güvenlik için tatmin edici bir tasarım temeline ulaşmak, yalnızca anakayadaki hareketi tahmin etmek için güvenilir bir araç değil, aynı zamanda derindeki bu hareketin, alttaki daha yumuşak zemin katmanlarının çeşitli dilimleri boyunca ilerlerken nasıl değişeceğini tahmin etmek için ek bir araç gerektirir. Saha davranışı hesabı, derinlikteki dalgaların zemin üstündeki yapıya doğru ilerlerken nasıl değiştiklerini hesaplama sürecidir. Bu sırada zemin malzemelerinde doğrusallıktan sapma mevcuttur ve asıl ilgilenilen nokta, temel seviyesine girdi olan nihai yer hareketi üzerinde ne kadar bir değişime uğrayacağını belirlemektir (Guéguen v.d., 2018).

Yer hareketlerinin sahaya bağımlılığının incelenmesinde çığır açan değerlendirme Seed v.d., (1976) tarafından ifade edilmiştir. Çoğunlukla batı ABD'deki depremlerden toparlanan 100'ü aşkın kuvvetli yer hareketi zaman serisinden oluşan bir koleksiyonu kullanan bu

çalışma Şekil 1'de görüldüğü gibi "farklı zemin ve jeolojik şartlar için" spektral eğrilerdeki farklılıkları bariz olarak resmetmiş ve bu etkilerin depreme dayanıklı yapı tasarım kriterleri seçiminde dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Bu tür farklılıklar elbette daha önce de gözlemlenmiş bulunuyordu (Kaklamanos v.d, 2021). En üstteki 30 m'lik örtünün ortalama kayma dalgası hızıyla belirlenen jeolojik tabakaların sınıflandırılmış özellikleri, rijitlik azaldıkça spektrumun sabit hıza geçiş periyodunun uzadığını, sabit ivmedeki yer hareket büyütmesinin genellikle daha kısa periyotlarda azaldığını göstermektedir. Şekil 1'deki yer rijitliği için tanımlayıcı sıfatlar bu gözlemin genellemesidir.

Şartname hazırlayıcısı makamlar, bu yeni gözlemi güncellenmiş sürümlerinde hüküm haline getirmekte gecikmediler, UBC-1994 (REF??). ICBO 1994 notasyonunda V, Denklem (1)'de verilen taban kesme kuvvetini ve S ($1.0 \leq S \leq 2.0$) zemin etkisi faktörünü ifade etmektedir.



Şekil 1. (a) Ortalama ivme spektrumları, (b) Farklı saha koşulları için yüzde 84'lük ivme spektrumları (Seed v.d. (1976'den alınmıştır) (Spectral Acceleration: Spektral ivme, Maximum Ground Accelerations: En büyük yer ivmesi)

$$V = \frac{ZIC}{R_w} W \quad \text{burada} \quad C = \frac{1.25S}{T^{2/3}} \leq 2.75 \tag{1}$$

S'nin alt değeri, tipik olarak $V_{s30} > 750$ m/s olan kaya benzeri veya çok sert zeminler içindi ve üst değer, V_{s30}'u < 150 m/s olan zemin profilleri için geçerliydi [International Building Code (IBC) gibi şartname veya yönetmelikler arasındaki zemin türü tariflerinde küçük farklılıklar bulunmaktadır]. Denklem (1)'de, S değişkeni S1 türü zemin için 0.31 s köşe periyoduna ve S4 için 0.87 s değerine sahiptir.

Hesap uygulamalarında kabaca tarif edilen bu dört zemin profili, dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Bu zemin türleri ve özellikleri işin tabiatı icabı ancak kabaca tariflenmiştir. Kullanılmalarını gerektiren hesap şartlarına göre sıralandığında birinden diğerine nasıl geçiş yapacaklarına karar vermek kolay değildir. V_{s30} profillerinin saha ölçümlerinden belirlendiği sırada gözetilen kesinlik, bu profillerin daha sonra nasıl gruplandırıldığı ve tasarım uygulamaları için ortalamasının nasıl alındığı ile bağdaşmaz. Bu bağlamda sık dile getirilen şikayet, bir profilin şartname maddelerinde bu bilginin nasıl kullanılacağını kontrol eden zemin tipi gruplarından birine kopyalandığı sıradaki takribiyet ile tezat teşkil eden kayma dalgası hızlarının elde edilmesindeki hassasiyet ile ilgilidir. Mecazi olarak, takdire şayan süslü bir şekilde tasarlanmış bir kutsal heykel, nihayetinde kör bir keski ile yontulmaktadır.

Bu çalışmanın amaçları doğrultusunda, $V_{s,30} > 750$ m/s "kaya zemin", $375 < V_{s,30} < 750$ m/s "çok sert zemin", $180 < V_{s,30} < 375$ m/s "sert zemin" ve $V_{s,30} < 180$ "yumuşak zemin veya kil" olarak adlandıracağız. Bu dört bölmeli sınıflandırma, farklı belgeler (B – E veya S1 – S4) arasında farklı adlandırmalar alır, ancak bunların tam nitelikleri ve adları bu makale için önemsizdir. Bu zemin sınıfı belirleme tarzı, UBC, IBC ve ASCE7 yeni versiyonlarının hazırlanmasında da devam etmiştir. Türk yönetmeliğinin üslubu da en azından kendi kayıtlarımızla uyuşup uyuşmadığı teferruatlı biçimde ele alınmamış, aceleyle ve harfiyen ithal edilmiş rakamlardan ibarettir.

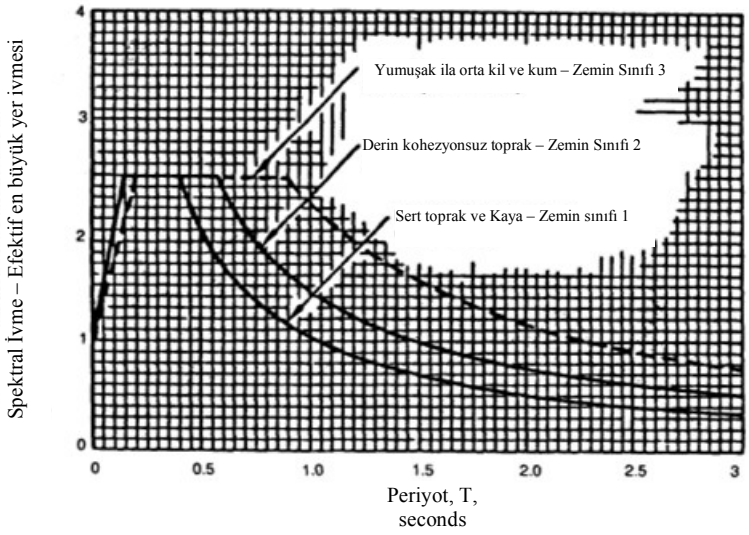
TASARIM SPEKTRUMUNA GEÇİŞ

Şekil 2'de artık kullanılmayan UBC'deki (1994) normalleştirilmiş spektral şekiller, tasarım mühendislerine yol gösteren metinlerin hazırlanmasında yetkilendirilmiş grupların, Seed ve ekibinin (1976) bulgularını nasıl dikkate aldığını temsil etmekteydi. Bunu eşdeğer statik prosedüre uygulanan ihtiyaçlar açısından tartışacağız çünkü bu ölçü, rutin tasarımda kullanılacak etkinin rakamlara çevrilmesi sırasında benimsenen düşünceyi en iyi şekilde tarif eder. Eşdeğer deprem kuvveti usulünü takip ederken dikkate alınan spektral şekillerin iki özelliği Şekil 2'de gösterilmektedir. Sabit ivme bölgesinin (mevcut ASCE7 ifadesiyle T_I ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) tarafından T_B olarak adlandırılan) geçiş noktasına işaret eden periyot, azalan ortalama rijitlik ile 0.4-0.9 s arasında değişmektedir, ancak maksimum yer ivmesinin büyütmesi tüm zemin profilleri için periyot bu aralığında

sabit 2.5 değerine sahiptir. Daha küçük spektral ivmelere maruz kalan profillerde meydana gelen daha fazla büyütmeler, Şekil 2'de bulunmayan bir nüanstır. Bu nüans, UBC'nin (1997) bir sonraki sayısında geldi, ancak artma oranları o sırada var olan Bölge Faktörleriyle ilişkilendirilmiş Z değerlerine sabitlendi. Şartname için, ivmenin kısa (0.2 s) ve uzun (1.0 s) periyotlu kısımları için C_a ve C_v tanımlayan büyültme faktörleriyle $C_a/(2.5C_v)$ oranınca verilen T_o'nun spektrum değerleri için spektral ivmenin değişimini veren düzeltme yapılmıştır. Artan yer ivmesi genlikleri için (hesaplanan tehlike koordinatlarından ziyade sismik bölge faktörleri tarafından ima edilen), hem C_a hem de C_v, artan T için bir azalma yapar. Spektrumun sabit hıza geçiş periyoduna denk gelen değerini geçtikten sonra, spektral ivme doğru ifadesiyle 1/T ile değişir hale gelir.

Halihazırda birçok deprem hesabı standardında görünen saha büyütme faktörlerinin gelişimi ve iyileştirilmesi Borcherdt (1994, 2012) ve Seyhan ve Stewart'a (2014) çalışmalarına kadar izlenebilir. IBC için kaynak belge olarak hizmet veren ASCE7-16, tasarım spektrumuna ulaşmak için basit bir prosedür geliştirmiştir. Belirli bir saha için kısa ve uzun periyotlar için iki spektral koordinat, tipik olarak 50 yıllık uzun bir zaman penceresi boyunca yüzde 2 ihtimale sahip olan bir yer hareketi için (genellikle haritalanmış) bir sismik tehlike çalışmasından tanımlanır. Bunlar sırasıyla S_s ve S_1 olarak adlandırılır. Ardından, S_s ve S_1'yi aşağıdaki gibi değiştirerek zemin etkileri tanıtılır:

$$S_{MS} = F_a S_S \quad \text{and} \quad S_{M1} = F_v S_1 \tag{2}$$



Şekil 2. Normalize edilmiş Spektral Şekiller, UBC94

F_a ve F_v faktörleri, Tablo 1 ve Tablo 2'de verilen saha özelliklerine ve tehlike seviyelerine bağlıdır. F_a için daha önceki tablolarda Zemin Sınıfı B genelindeki değer baştan sona 1.0 olarak listelenirken, V_{s30} tanımındaki değişiklikler nedeniyle 0.9'a düşürülmüştür. Yatay doğrultuda ara değer hesabına (enterpolasyona) izin verilir. Her iki tabloda da yıldız işareti, ASCE7'nin sahaya özel zemin çalışmalarının yapılmasını gerektirdiği halleri belirtir. 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY (2018), ASCE7-16 girdileri ile her nasılsa aynı F_a değerlerini listelemektedir. Zemin Sınıfı E satırının son üç sütununun altı çizili rakamlar ile değiştirilmesinin dayanağı meçhuldür. Bunların Loviknes'te (2021) olduğu gibi hesap veya ölçümle kontrol edilmiş ve yayınlanmış olmaları mümkün görünmemektedir. Benzer keyfi bir tadilat, Tablo 2'de TBDY'de Zemin Sınıfı E için verilen son beş sütun F_v değerleri için yapılmıştır. Bu keyfi tadilatın spektrumlarda kalıcı değişiklere yol açıp açmadığı yazımızın irdeleyeceği başlıklar arasındadır.

Tablo 1. Kısa Periyot Zemin Katsayısı F_a, ASCE 7-16 / TBDY (2018)

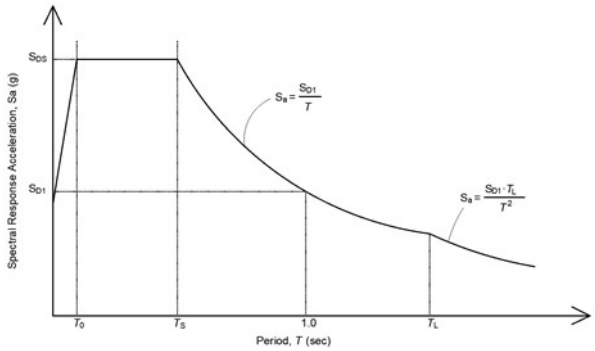
Zemin Sınıfı	Haritalanmış Risk Hedefli Maksimum Deprem (MCER) Kısa Periyot Spektral Davranış İvme Parametresi					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s = 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	* (1.1)	* (0.9)	* (0.8)
F	*	*	*	*	*	*

Tablo 2. Uzun Periyot Zemin Katsayısı F_v, ASCE 7-16 / TBDY (2018)

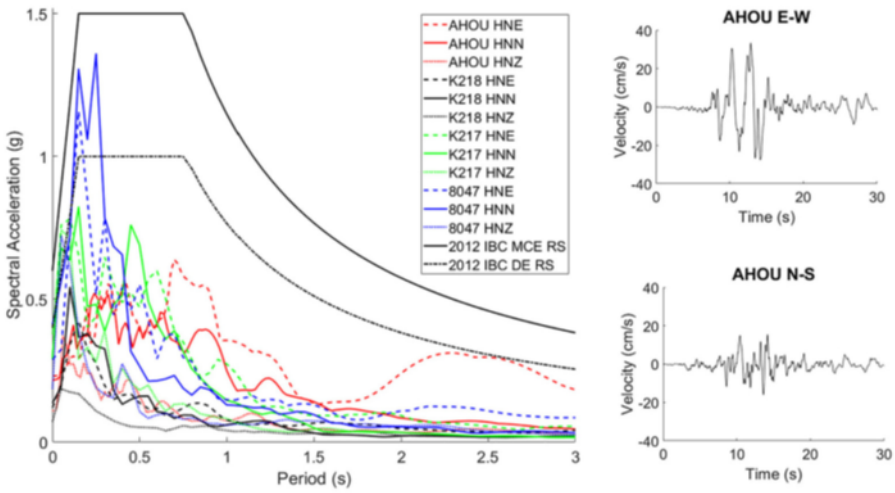
Zemin Sınıfı	Haritalanmış Risk Hedefli Maksimum Dikkate Alınan Deprem (MCER) Uzun Periyot Spektral Davranış İvme Parametresi					
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 = 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
E	4.2	* (3.3)	* (2.8)	* (2.4)	* (2.2)	* (2.0)
F	*	*	*	*	*	*

ASCE7'de, değiştirilmiş S_{MS} ve S_{MI} değerleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi, $S_{DS} = 0.67\ S_{MS}$ ve $S_{DI} = 0.67\ S_{MI}$, $T_S = S_{DI} / S_{DS}$ ve $T_o = 0.2T_S$ olan tasarım tepki spektrumu haline gelir. Hesapta kullanılacak katsayılar 2475 senelik depremin ordinatlarının 2/3 oranında azaltılmış halidir. Bu husus ABD'ye mahsus bir tadilattır. TBDY (2018)'deki tehlike seviyesi 475 yıllık bir tekerrür periyotu için tanımlandığından, S_{DS} ve S_{DI} için 2/3 azalmaya yer vermez. Ülke şartlarında 475 ile 2475 senelik deprem etkilerinin 2/3 oranında bulunduğu gösterilmemiştir.

Şekil 3'te, daha yumuşak zemin profilleri için F_v değerlerinin Tablo 2'de gösterildiği gibi artacağı ve bu yüzden T_B'nin daha büyük değerlere kayacağı varsayılır. Ancak T_s artık fiziki saha özelliklerinden bir kademe koparılmakta ve ihtimalen hesaplanmış değerlerden gelmektedir. Tasarım ve davranış spektrumları arasındaki kavramsal farklılıklara rağmen, şu haklı soru akla gelebilir: Ampirik veriler, yönetmelik tarafından dikte edilen tasarım spektrumunun ima ettiği beklentiyle tutarlı mıdır, yoksa hangi karakterde olursa olsun, ihtimallerle hesaplanmış spektral değerler, işimize uygun düşen bilgeliğimize ters midir? Bu soru haklıdır çünkü sahaya özel tasarım spektrumları, aynı sahada kaydedilen yer hareketi spektrumlarına beklenti olarak en azından itibari bir benzerlik göstermelidir. Örnek olarak 2018'deki Alaska depreminin Anchorage şehrinde yol açtığı yer hareketlerinin aynı yer için verilen hesap spektrumlarıyla mukayeseli görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir (Rodgers v.d., 2021). Spesifik olarak, aynı saha için yönetmelikle belirlenmiş şekil ile gerçek yer hareketi şekli arasındaki bariz farklılıklar bir uyarı işareti oluşturmalıdır çünkü farklılıklar doğrusal olmayan hesaplarda kullanılan tasarım yer hareketleri sırasında başka tezahürle ortaya çıkacaktır. Hedef spektrumu bir şekilde yanlış şekillendirilmişse, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan yer hareketi kayıtları yanlış sonuçlara yol açacaktır. Kaldı ki spektruma uygun yer hareketi tayin etme işleminin istatistik dayanağı zayıftır (Baltzopoulos v.d., 2020).



Şekil 3. Tasarım Davranış Spektrumu (ASCE7-16'dan alınmıştır.)



Şekil 4. M7.1 Alaska Depremi Sırasında Hasar Gören Okul Binalarına 5-10 km Mesafedeki Kayıt İstasyonlarınca Kayıt Edilen Yer Hareketlerinin Hesap Spektrumuyla Mukayesesi (Rodgers v.d., 2021)

Bu metnin geri kalanında, Türkiye Ulusal Kuvvetli Hareket Ağı'ndan alınan verileri kullanarak bu şartın geçerliliği test edilmiştir (Gülkan, v.d., 2007, Gülkan, 2011). İzlediğimiz prosedür, Ulusal Ağ istasyonlarından alınan kuvvetli hareket kayıtlarının iki yatay bileşeninin geometrik ortalamasını kullanmak ve herhangi bir ölçeklendirme olmaksızın bu olayların ivme davranış spektrumunu hesaplamaktır. Hedefimiz bu yer hareketlerinin maksimum oryantasyonlarını belirlemek olmadığı için yatay bileşenler için başka bir ayar yapılmamıştır. Ulusal sistemdeki her istasyonun zemin özellikleri, 2003-2008 dönemi boyunca bir jeofizik araştırma programı aracılığıyla tayin edilmiştir, dolayısıyla zemin türü tanımları kabul gören prosedürlere uygun olarak güvenilir bir şekilde önceden tayin edilmiştir. Ulusal deprem tehlike haritası, TBDY (2018) 'in farklı maddeleri için 43, 72, 475 ve 2475 yıllık tekerrür periyotlarına dayalı tasarıma izin verir. Yetkili makam tarafından düzenlenen etkileşimli bir web sayfası, mühendislerin tasarımda kullanmaları için hem yatay hem de dikey yönler için bu spektrumlardan herhangi birini sağlamaktadır.

Belirli bir yıllık meydana gelme ihtimali (tekerrür periyodu) için tasarım spektrumu, hesaplanan kısa ve uzun periyotlu spektral ivme koordinatları göz önüne alındığında, TBDY izlenerek elde edilebilir, ancak halihazırda meydana gelmiş bir depremin spektral ivme koordinatları, buna karşı gelen yer hareketinin aynı tekerrür periyoduna denk gelmeyecektir (Gülkan, 2013).

MUKABİL ARGÜMANLAR

Yeryuvarının herhangi bir yerindeki tek bir kayıttan gelen tepki spektrumunun, aynı lokasyon için geçerli olan belirli bir tehlike seviyesi için tasarım spektrumu ile aynı olmadığını kabul etmek zorundayız çünkü ihtimaller hesabına dayali sismik risk hesabi (PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Analysis) farklı sismik kaynaklardan birçok büyüklük-mesafe kombinasyonunun zarfıdır. Bunun sonucu olarak, her periyottaki spektral değerlerin tek bir yer hareketinde meydana gelmesi muhtemel değildir. Aynı istasyonda kaydedilen farklı sismik olaylara ait birkaç yer hareketi kaydı mevcut olsaydı, bunların ergodikliği hakkında fikir edinme mümkün olurdu. Davranış spektrumu eğrilerimiz, iki yatay bileşenin geometrik ortalamasıdır (yayınlarda "RotDD50" olarak kısaltılır). Ancak bunlar risk hedefli bir çalışmanın rakamları değildir. Farklı koordinatlardaki depremlerin aynı istasyonda doğurduğu eğriler, aynı depremin farklı istasyonlardaki kayıtlarıyla aynı değildir. Yazımızın dayanağı büyük ölçüde 30 Ekim 2020 tarihli M6.9 depremi sırasında İzmir'deki derin yumuşak zeminlerde yerleştirilen istasyonlar tarafından kaydedilen hareketleridir. Bu elbette veri tabanındaki ergodiklik iddiasının yerini tutmaz ancak İzmir'deki yumuşak zemin yataklarındaki tüm istasyonlar daha uzun periyotlar için daha yüksek talepler gösterir ve TBDY haritasından aynı noktalar için elde edilen spektrumlar hep farklı çıkarsa ters giden bir şeyin olduğu iddiasını ortaya sürmek mümkün hale gelir.

VERİ TABANI

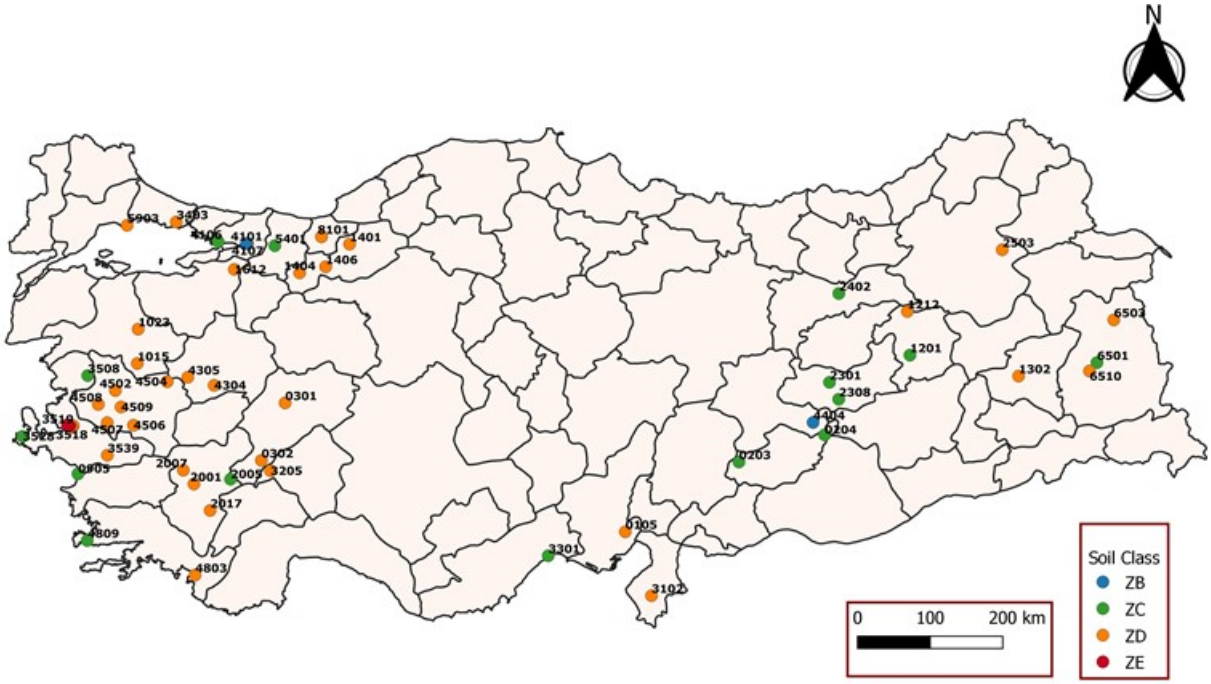
Yazımızda Türkiye'deki Ulusal Sistem veri tabanından seçilen ivme zaman dizilerini kullanıp bunların davranış spektrumlarını çizmek suretiyle Şekil 3'teki şeklin uygunluğunu irdeleyeceğiz. Burada kullanılan istasyonların listesi ve deprem yer hareketleri Ek A'da verilmiştir. Bu eğrilerdeki S_{DS} değerlerini, ulusal tehlike haritasından çıkarılan aynı koordinatlar ve aynı zemin sınıfları için kaydedilen hareketin parametresini alt ve üstten zarflayan iki tekerrür periyodu için tasarım spektrumuyla karşılaştırıyoruz. Davranış ve tasarım spektrumları aynı amaca hizmet etmese de şekilleri arasında bir benzerlik olması gerektiğini düşünmekteyiz. Belirli bir yer hareketi için çizilen belirli bir tepki spektrumunun tekerrür periyodu bilinemez. Aynı zaman serisinin kaydedildiği yerin tasarım spektrumu için eldeki spektrumun en yakın benzeri olduğu iddiasını destekleyecek bir kıstas da bulunmamaktadır. Diğer bir ifadeyle deprem tekerrür süreleri ve bunların temsil ettiği yer

hareketleri itibari değerlerdir. Burada kullandığımız yer hareketi kayıtlarının çoğu 72 - 475 yıl aralığında çıkmaktadır. Bu tekerrür periyotlarının 50 yıl süreli zaman penceresinde sırasıyla 0.5 ve 0.1 gerçekleşme ihtimaline denk geldiği kabul edilmektedir fakat bu kabulün ampirik doğrulaması mevcut değildir.

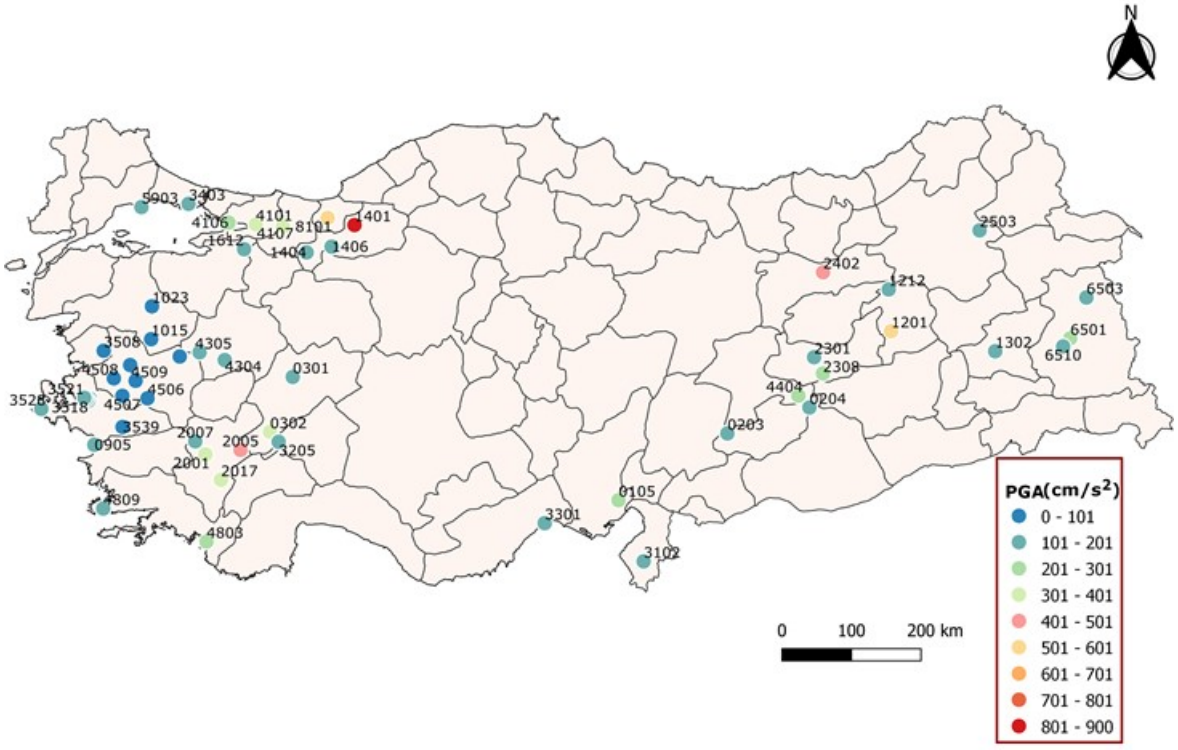
Kavramın ispatı olarak, verilen büyüklük, mesafe ve saha jeolojisini ele alıp, bize gelecekteki bir deprem sırasında ne tür yer sarsıntısı beklememiz gerektiğini söyleyen bir model var mıdır? Eldeki kayıtlarla tutarlı mıdır? Nihai yer hareketini şekillendiren parametrelerin karmaşık etkileşimini doğrulamanın yanı sıra rasyonel tasarımın hedefine varmasında çok önemlidir. Yerkabuğunda meydana gelen ve gözlemleyip ölçemediğimiz süreçler nicel olarak kalır ve kendilerini bilimin temel doğal yasalarına dayanan formülasyonlarına kolayca teslim etmezler. İstatistik yöntemleri elimizdekileri mevcut bilgi havuzundan çıkarmak ve belirli kalıplara sokmak için uygun bir araç haline gelir.

Tablo A.1'de özetlenen bilgiler bu bildirinin temel gözlemlerini oluşturmaktadır. Adları, istasyon atamaları, koordinatları, yer sınıfları, merkez üssü uzaklığı ve depremler dahil olmak üzere Ulusal Ağ istasyonu bilgilerini ve o istasyondaki kayıt cihazın tetiklendiği tarihleri listelemiş bulunuyoruz. Odak noktamız tipik olarak 0.1 g'den büyük azami ivmeli yer hareketi kayıtlarıdır. Bahse konu istasyonların gelen zemin tipleri renk kodlu biçimde Şekil 5'te ve istasyonların kaydedilen maksimum PGA değerleri Şekil 6'da verilmiştir. 1999 Düzce, 2011 Simav ve 1999 Kocaeli depremlerinde Bolu, Demirci ve İzmir'de yer alan 1402, 4504 ve 4107 istasyonlarında kaydedilen en yüksek PGA değerleri sırasıyla 807 cm/s^2, 700 cm/s^2 ve 612 cm/s^2'dir.

Mühendisler ve yerbilimciler, gelecekteki depremler nedensel olarak önceki olaylar tarafından belirlendiği için istatistiklere başvururlar. İstatistiksel olarak konuşurlar, ancak her deprem, yakındaki bir depremde verilen bir noktada hangi yer hareketinin gerçekleşeceğini önceden tahmin etmek için tahmin araçları koleksiyonumuzdan hala farklılık barındırır. Douglas (2019) tarafından derlenen bir özet, yer hareketi modelleme denklemlerinde (GMME'ler) gerçekleştirilen küresel çalışmanın kapsamını göstermede öğreticidir.



Şekil *5*. Ek A, Tablo A.1'de verilen istasyonların Zemin Sınıfları (Soil Classes).



Şekil 6. Tablo A.1'de verilen istasyonlarda kaydedilen maksimum ivme değerleri (PGA)

ÖLÇÜLEN SPEKTRUMLAR İLE KARŞILAŞTIRMA

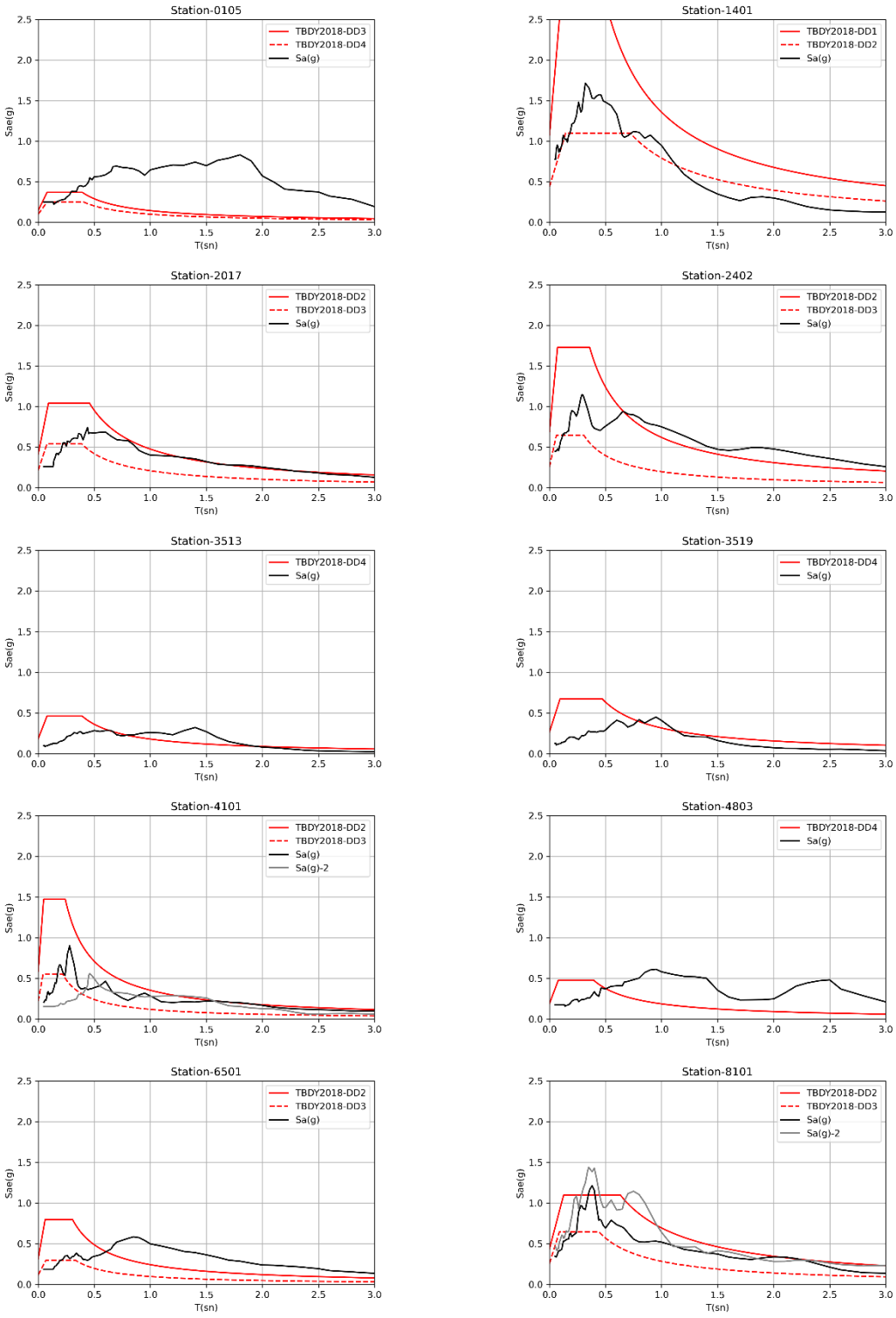
Şöyle bir soru soralım: Bu çalışmanın Ek A'da dizilen her bir istasyonda kaydedilen yer hareketlerinden elde edilen davranış spektrumları, aynı coğrafi konum için aynı dört seviye

için tasarım spektrumları ile karşılaştırılacak olursa TBDY'in (2018) o istasyonun hemen yanıbaşında hesabı yapılacak bir yapıya uygulanmak üzere aynı zemin sınıfı için verdiği eğri hesap spektrumunu ne ölçüde andırmaktadır? Bu sualin cevabının tek bir deprem kaydına bakarak verilemeyeceğini daha önce ifade etmiştik. Hesap spektrumu birçok deprem kaynağı, farklı magnitüd değerleri, odak mesafesi göz önüne alınarak belirlenir. Kaydı yapılan deprem ise bu geniş yelpazenin sadece tek bir üyesidir. Öte yandan komik ve aldatıcı bir hassasiyet ile ifade edilen 2475 senelik tekrarlanma süresinin sonunu bekleyecek halimiz de yoktur. Derin alüvyon zemin katmanları taşıdıkları yapıların daha uzun periyotlara kadar yükseltilmiş spektral ivmelere maruz kalmalarına yol açar. Şekil 1 bu gerçeğe dairdir. Örnekler çoktur ve Mexico City gibi aşırı bir uca gitmemize gerek yoktur: 30 Ekim 2020'de Sisam adası açıklarındaki bir noktadan kaynaklanan M6.9 depremin İzmir Bayraklı'da yol açtığı yer hareketlerine bakıldığında ihtimali hesapların verdiği kısa ve uzun periyotlardaki spektral ivmelerin tariflediği hesap spektrumunun Bayraklı havalisinde kaydı yapılmış kayıtlardan türetilen davranış spektrumlarından bariz farklara yer verdiği görülecektir. Şekil 7'deki karşılaştırmada Ek A'daki kayıtlardan seçilmiş 10 istasyona yer verilmektedir. Ulusal tehlike haritasından türetilen spektrumların iki üst ve alt sınırlayıcı eğrisini dahil etmenin dışında, ölçülen yer hareketi zaman serilerini, spektrumların bir periyotta eşleşmesine yönelik ölçeklendirmekten kaçınıyoruz. Yönetmelikte belirtilen tasarım spektrumlarının üst ve alt sınırlarını T = 0.2 s'de, gerçek kayıtın spektral ivmesini araya alacak tarzda tanımlıyoruz. Şekil 7'deki eğriler, bu eylemin görselleştirilmiş cevabıdır. Her iki eğri takımı da aynı ölçekleri paylaşmaktadır, ancak odak noktamız tasarım spektral şeklinin periyot ekseni boyunca ölçülen spektrumlara ne kadar benzediğidir. İzmit (İstasyon #4101) ve Düzce (İstasyon #8101) ölçümlerinde iki farklı depreme ait iki farklı kayıt bulunmaktadır. İki farklı deprem, kendi aralarında benzer spektral şekiller ve T_B'yi geçen daha yüksek S_a değerlerine yer veriyor gibi durmaktadır. T_B'de efektif sağa kayma da gözlemlenebilir, ancak aynı konumlar için tasarım spektrumları ile benzerlik göstermez. Yer darlığı nedeniyle Şekil 7'de sadece sınırlı sayıda eğri verilmektedir. Geri kalan eğriler Ek A'da belirtilen linkten görülebilir.

Ek A'daki istasyonlardaki kayıtlar incelendiğinde çok sayıda eğri, mevcut Türk Yönetmeliğine göre tariflenmiş spektral talepler ile ölçülen deprem yer hareketleri arasında T_B periyodunda uyuşmazlık olduğunu göstermektedir. 0.9 s – 1.6 s aralığında bu uyuşmazlık en güçlü olanıdır. Bu aralık, bugün inşa edilmekte olan bina stokundaki 8 – 15 katlı binaların

birçoğunun en büyük periyoduna karşılık gelmektedir. Bu gözlemin ekstrapolasyonu, cevap bekleyen önemli bir soruya yol açar: Önümüzdeki otuz yıl boyunca tüm binalar, 2019 Türk Yönetmeliğindeki (TBDY, 2018) spektral şekil kullanılarak tasarlanırsa, bazı bölgelerde, özellikle uzun periyot aralığında, gelecekteki bina stokunun bir kısmını düşük kapasiteye maruz bırakma riskiyle karşı karşıya mıyız? Yer hareketi frekansına bağlı olmayan büyütme faktörleri F_s ve F_1, bu anomaliden kısmen sorumludur. Farklılık, S_{DS} ve S_{D1}'nin lognormal dağılımı temsil eden yer hareketi modellerinden (GMM'ler) çıkarılmış yer hareketi verilerinin tahminleri olduğu hatırlanarak açıklanabilir. Bu spektral ordinatlar, vektörün elemanları arasındaki rastgele değişkenliğinin farklı olduğu dağılımın PSHA medyan değerlerinden elde edilir. Üstelik dağılım periyot ekseni boyunca değişken varyanslıdır. S_{DS} ve S_{D1}'deki varyansın aynı olmasını beklemek doğru değildir, bu yüzden kısa ve uzun periyotlu spektral ivme koordinatlarının üst ve alt bir sigma aralıklarını dikkate almak birkaç farklı T_B tahminine yol açacaktır. Spektrumun sabit ivmeden sabit hız kısmına geçiş, daha önce düzgün bir şekilde tanımlanmış profile bağlı dönemlerin aksine dağınık hale gelmektedir. Farklılıkları doğuran bir başka kaynak, kısmen tartışmalı olan S_s ve S_1'nin artmasıyla azalan F_a (veya F_S) ve F_v (veya F_1) takdirle tayin edilmiş değerleri olabilir (Borcherdt, 2012). Bildiğimiz kadarıyla ASCE7'den direkt ithal edilen değerlerin ülkemizdeki kayıtlarca doğrulandığı güvenilir çalışmalarca gösterilmemiştir. Tablo 1 ve 2'deki kimi büyütme faktörlerinin göz kararıyla tayin edilmiş olduğunu yukarıda ifade etmiştik.

Uzun tekerrür periyotlu depremler için elde edilen tasarım spektrumları, kısa zaman aralıklarında tekrarlanan depremler için çıkarılanlara benziyor mu, ya da daha uzun köşe periyotları ile mi karakterize ediliyor? Diyelim ki 72 yıllık bir depremin frekans içeriğinin, 2475 yıllık bir dönüş periyodundakinden farklı olduğuna dair yeterli gözlem vardır. Yine de, TBDY'deki (2018) mevcut prosedürler, temelde aynı şekle sahip farklı tehlike seviyeleri için tasarım spektrumlarını birbirinin üzerine yığmaktadır. Daha yüksek gerinim seviyelerinde zemin katmanlarının efektif kayma modülünün azalmasının, dolayısıyla artmış geçiş periyoduna yol açmasının tehlike eğrilerine tam olarak yansımadığı görülmektedir.



Şekil *7*. Seçilen 10 istasyonda ölçülen hareketlerin spektral ivmeleri ve TBDY (2018)'a göre aynı noktaların hesap spektrumları: [Adana Ceyhan (0105); Bolu (1401); Acıpayam (2017); Erzincan (2402); İzmir Bayraklı (3513); İzmir Karşıyaka (3519); Kocaeli (4101); Fethiye (4803); İpekyolu (6501); Düzce (8101)] (Station: İstasyon)

Spektrumların bir periyotta eşleşmesi için ölçülen yer hareketi zaman serileri ölçeklendirilmemiştir. Şekil 7'de bazı örnek istasyonlar için verilen eğriler aynı ölçeklere sahiptir, ancak buradaki odak noktası tasarım spektral şeklinin ölçülen spektrumları ne kadar iyi taklit ettiğidir. Eğrilerin önemli bir kısmı, mevcut Türk Yönetmeliğine göre ima edilen spektral talepler ile ölçülen deprem yer hareketleri arasında periyot farklılığı olduğunu göstermektedir. 0.9 s – 1.6 s aralığında, farklılık en güçlü olanıdır. Ek-A'da verilen tablo diğer istasyon verileri için de aynı çıkarımlar geçerlidir.

ÖYLEYSE FARKLILIKLAR NEDEN?

ASCE7 ve TBDY'nin tasarım spektrumunu tanımlamaya yönelik uygulamaları arasında önemli farklılıklar vardır. ASCE7'de, sismik tehlike haritasını tanımlayan sayılar risk hedefli bir hesaplamadan gelmektedir. Kaydedilen verilerin tek tek yatay bileşenlerini, geometrik ortalama dikkate alınarak birleştirilmiş olarak hesaplanan TBDY'nde içinde gizli UHRS (uniform hazard response spectrum) ile karşılaştırmak bir tutarsızlıktır. Daha önce belirtildiği gibi, ihtimali sismik tehlike analizine dayalı UHRS ve kaydedilen yer hareketlerinin davranış spektrumlarının hesaplanmasının arkasındaki mantık, her spektral ordinatın eşit bir aşılma oranına sahip olmasıdır. UHRS kavramı, bu spektrumun, her biri farklı bir deprem olayından (yani, basitçe büyüklük – uzaklık çiftleri olarak kaynak katkıları) çıkmış olabilecek farklı periyotlarda ayrı spektral koordinatlardan oluşan bir zarf olduğuna dayanmaktadır. Ferdi kayıtlar bu tür çiftleri temsil etmez çünkü bunlar vuku bulabilecek depremlerden yalnızca birini temsil eder. ASCE7'de GMM'lerden tahmin edilen yer hareketi verilerinin tahminleri, PSHA'dan elde edilen spektral koordinatlardan çizilen log-normal dağılımı temsil eder. Tek bir münferit kayıt, bu prosedürün burada uygulanmasına izin vermez. Kısacası UHRS verilerini risk tabanlı bir uygulamaya dahil etmek tutarlı değildir.

$T_B > 1$ s hali $S_{D1} > S_{DS}$ olduğunda gerçekleşir, ancak incelemelerimiz bunun Türkiye'nin hiçbir yerinde olmadığını göstermiştir. Böylece spektrumun problemli yumuşak zemin büyütme aralığı için tasarımda kullanılması imkanını dışlamaktadır. Mexico City'ye benzer hiçbir kentsel alanın (Murcia-Delso vd., 2020) bulunmadığını iddia eden bu çıkarımın altında yatan veri tabanını sorgulumak lazımdır.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Herhangi bir yerdeki her deprem, öncekilerin hepsinden farklılıklar içerir, dolayısıyla kendisini takip edeceklerden de ayrılır. Daha akla yakın bir tasarım temeli elde edebilmek için bunları yorumlamak ve müşterek noktalarını sabitlemek lazımdır. Bu yazıda, Türkiye'deki ulusal ağdan elde edilen yer ivmesi kayıtlarının ülkedeki bina hesabı üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Türkiye'de 2019'un başında yeni bir deprem yönetmeliği yürürlüğe girmiştir, şimdi bu yönetmeliğin bazı hususiyetlerinin değerlendirilmesi için fırsat doğmuştur. Elbette, deprem tasarımında kullanılan parametrelerin çoğu, gelecekte meydana gelecek yer hareketlerinin spektral özellikleriyle ilgili değildir, ancak nihayetinde bir şekilde parametreler üzerinde şekillendirici rol oynarlar. Eğer hesapta kullanılan parametreler o koordinatlar için gözlenen yer hareketlerinden ısrarlı biçimde farklıysa, gözlemlerin son kullanıcıları olarak gözlerimizin üzerine görmemezi engelleyen bir bez örtüp tasarım spektrumun gelecekteki bir depremin davranış spektrumuna ölçüyü kaçırmaksızın denk gelmesine dua edemeyiz. Onun yerine, eldeki verilerimizin bize söylediklerini düzenleyici teknik belgelerdeki hükümlerin yansıttığı beklentiyle karşılaştırmalıyız. Yeni TBDY (2018)'deki (büyük ölçüde ASCE7-16'ya benzeyen) tasarım spektrumunun, özellikle daha yumuşak zeminlerle dolu derin havzalarda, gelecekteki depremlerin daha uzun dönemli taleplerini kaçırma eğilimini yansıttığına dair emareler mevcuttur. Yakın mesafede vuku bulan kısa tekerrür periyoduna sahip depremler için geçerli tasarım spektrumu, daha uzak mesafelerde vuku bulan uzun tekerrür periyotlu depremler için geçerli olanla aynı değildir. Bir standart şekil, bu fiziken farklı depremlerin ikisini temsil edemez. Ayrıca, tasarım spektrumu için fay hatlarının yakın çevresinde matematikçe çıkarılmış düzensiz ve mantıksız tepe noktalı spektral eğrilere sahip yer hareketlerini "tıraşlamak" amacıyla başka matematik algoritmalarla makyajlanmış yuvarlatıcı prosedürlerin kullanılması fiziken dayanağı bulunmayan bir yaklaşımdır.

Şurasını not etmeliyiz ki, T_B = 1 s için $S_{DS} = S_{DL}$ olması gerekir, ancak Türkiye'deki hiçbir istasyon için bu şartı sağlayan bir tasarım spektrumu bulunmamaktadır. Ancak yakın zamanda imara açılan genç derin alüvyon çökeltilerine sahip kentsel alanlarımız bulunmaktadır. Etkileyen deprem kaynakları hariç birçok bakımdan Mexico City'ye benzeyen Adapazarı Merkez için ZE zeminde dahi T_B 0.8 s mertebesindedir. Bunun bir sonucu olarak, 30 Ekim 2020 Sisam Adası depreminde İzmir'de teyit edildiği gibi bu tür sahalar beklenmedik hareketlere maruz kalabilir. Bu gerçek ilerideki bina hesapları için

farkında olmadığımız bir kapan olabilir mi? İkna edici cevap için çok daha fazla veriye ihtiyacımız vardır. O zamana kadar emniyetli tarafta kalmak lazım gelmektedir.

Farklılığın başka makul açıklamaları olabilir, ancak S_s, S_1 ile temsil edilen bir tehlike haritasının bileşenlerini bir araya getirmekte ve F_s ve F_1'yi işe katmadaki ardışık belirsizlik ile bir hesap spektrumu ortaya koymak, yersiz bir basitleştirmedir, çünkü çok farklı etkiler bir arada harmanlanmaktadır. Çözüm, yakın bir gelecekte elde edilmesi mümkün olmayan ampirik verinin senteziyle mümkün olacaktır. Spektrumun şekline yönelik revizyon, bunlara göre yapılan tasarımlarda farklı şekillerde tezahür eder, çünkü tasarım akışının diğer yönleri için ihtiyaçlar da tadil olur.

Bir tehlike haritası ne kadar "yeni" olursa olsun, oradan kaynaklanan tasarım spektrumları gözlemsel kanıtlarla eşleşmezse, güvenilir bir tasarım aracı olarak hizmet edemez. Bu bağlamda ülkemizde on yılda bir zuhur eden (Yönetmelik'in 1998, 2007 ve 2019 sürümleri kastedilmektedir) kutsal ruh arayışı, Türkiye için yeni geliştirilen tehlike haritası tarafından cevaplanmış görünmemektedir. Daha eski olmasına rağmen, T_B'yi peşinen daha büyük değerlere sabitlemek için 2007 Yönetmeliğinin hükümlerinin daha iyi bir tasarım esasını temsil ettiğini düşünüyoruz (Kalkan ve Gülkan, 2004). Bu sonuç elbette sadece Türkiye kayıtları ve yürürlükte olan sismik tasarım yönetmeliği ile yaptığımız çalışmalara dayanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Türkiye Ulusal Kuvvetli Hareket Ağı'ndan indirilen yer ivme kayıtları, Türkiye Doğal Afet ve Acil Durum Yönetimi Kurumu (AFAD)'ın izniyle bu rapora dahil edilmiştir. Yazarlar, yer hareketi verilerinin ve spektrum grafiklerinin düzenlenmesindeki yardımlarından dolayı Ozan Öğünç ve Mehmet Artun Baki'ye minnettardır.

KAYNAKLAR

1. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı AFAD, https://tadas.afad.gov.tr/ 2020.
2. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, 2018.

3. ASCE/SEI, (ASCE7-16), Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, Reston, VA, 2016.

4. Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Giorgio, M. and Iervolino, I. "Why Determining the Number of Code Spectrum-Matched Records Based on Usual Statistics Is an Ill-Posed Problem," Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan, 2020 (paper 2a-0015).

5. Boore, D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson, "NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes", Earthquake Spectra, 2014, 30(3), pp. 1057-1085.

6. Borcherdt, R.D., "Estimates of Site-Dependent Spectra for Design (Methodology and Justification)", Earthquake Spectra, 1994, 10(4), pp. 617-653.

7. Borcherdt, R.D., "V_{S30} – A Site-Characterization Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPEs, and ShakeMaps", Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisbon, Portugal.

8. Chopra, A.K., "Elastic Response Spectrum: A Historical Note", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36:3–12.

9. Douglas, J., "Ground motion prediction equations 1964-2018", Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2019, (available online at https://www.strath.ac.uk/staff/douglasjohndr/).

10. Guéguen P., Bonilla F., Douglas J., "Comparison of Soil Non-Linearity (In-Situ Stress-Strain Relation and G/Gmax Reduction) Observed in Strong-Motion Databases and Modelled in Ground Motion Prediction Equations", Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, doi:10.1785/0120180169.

11. Gülkan, P., "The Turkish National Accelerometric Network: 1973-2010, in Accelerometric Data Exchange and Archiving", Ed. S. Akkar, P. Gülkan and T. Van Eck, Elsevier, 2011.

12. Gülkan, P., "A Dispassionate View of Seismic Hazard Assessment", Seismological Research Letters, 2013, (84)3: 413-416.

13. Gülkan, P., U. Çeken, Z. Çolakoğlu, T. Uğraş, T. Kuru, A. Apak, J.G. Anderson, H. Sucuoğlu, M. Çelebi, D.S. Akkar, U. Yazgan, A.Z. Denizlioğlu, "Enhancement of the National Strong Motion Network in Turkey", Seismological Research Letters, 2007, (78)4: 429-438.

14. Housner, G. W., "Behavior of Structures during Earthquakes", Proc. ASCE, 85, 1959, October.

15. Housner, G. W. and Jennings, P. C., Earthquake Design Criteria, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.

16. International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, Whittier, CA 90601 USA, 1994.

17. International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, Whittier, CA 90601 USA, 1997.

18. Kalkan, E., and Gülkan, P. “Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey,” Earthquake Spectra, 20(4), pp. 1111–1138, November 2004

19. Kaklamanos, J., A. Cabas, S. Parolai, and P. Guéguen, “Introduction to the Special Section on Advances in Site Response Estimation”, Bull. Seismol. Soc. Am., 2021, 111, 1665–1676, doi: 10.1785/0120210152

20. Kalkan E. and Chopra A.K., Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures”, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010, 113 p.

21. Loviknes, K., S. R. Kotha, F. Cotton, and D. Schorlemmer, “Testing Nonlinear Amplification Factors of Ground-Motion Models”, Bull. Seismol. Soc. Am., 2021, 111, 2121–2137, doi:10.1785/0120200386/

22. Murcia-Delso, M., Alcocer, S.M., Arnau, O., Martinez, Y. and Muria-Vila, D, “Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings after the 1985 and 2017 Earthquakes in Mexico City”, Earthquake Spectra, 2020, Vol. 36, No. 2, pp. 175-198.

23. Newmark, N. M. and Hall, W. J.,. Earthquake Spectra and Design, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.

24. Rodgers, J., Wael H., Motter, C. and Thornley, J. “Impacts of the 2018 M7.1 Anchorage Earthquake on Schools,” Earthquake Spectra 2021, Vol. 37(3): 1849–1874.

25. Seed, H.B., C. Ugas and J. Lysmer, “Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design”, Bulletin of the Seismological Society of America., 1976, Vol. 66, No. 1, pp. 221-243.

26. Seyhan, E. and Stewart, J.P., “Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification Factors from NGS West2 Data and Simulations”, Earthquake Spectra, 2014, 30(3), pp. 1241-1256.

27. Trifunac, M.D., “70-th Annıversary of Biot Spectrum,,” ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 431, Vol. 40, No. 1, March 2003, pp. 19-50.

EK A. Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ölçüm Şebekesinden Alınan Kayıtlar (en büyük yer ivmesi, PGA > 0.1g)

İstasyon	İstasyon Adı	Boy.	Enl.	ZS	S_S DD1	S_S DD2	S_S DD3	S_S DD4	S_1 DD1	S_1 DD2	S_1 DD3	S_1 DD4	Deprem No	Deprem Tarihi	M	PGA (cm/s^2) NS	PGA (cm/s^2) EW	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	R_{epi} (km)	R_{hy} (km)
0105	Adana Ceyhan	35.82	37.03	ZD	1.3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0		27-06-1998 13:55	6.2	223.3	273.6	40.0	58.2	48.2	67.0
0203	Adıyaman Akçakaya	37.66	37.79	ZC	2.4	1.2	0.4	0.3	0.7	0.3	0.1	0.1		05-05-1986 03:35	6	114.7	76.0	23.9	24.0	29.2	29.6
0204	Gerger	39.03	38.03	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	94.3	110.1	30.9	30.9	36.8	37.7
0301	Afyonkarahisar Merkez	30.53	38.78	ZD	1.6	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	241600	03-02-2002 07:11	6.5	112.8	93.9	51.7	57.7	64.7	68.4
0302	Dinar	30.15	38.06	ZD	1.7	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	240861	01-10-1995 15:57	6.4	272.3	320.8	0.0	2.9	0.5	5.0
0905	Kuşadası	27.27	37.86	ZC	2.0	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	179.3	144.0	35.6	41.1	42.9	46.0
1201	Bingöl Merkez	40.50	38.90	ZC	2.8	1.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.2	0.1	236848	01-05-2003 00:27	6.3	501.4	297.5	2.2	5.8	11.8	15.5
1212*	Yedisu	40.54	39.44	ZD	2.9	1.7	0.7	0.4	0.9	0.5	0.2	0.1	475667	14-06-2020 14:24	5.7	177.6	93.1			16.7	
1302*	Bitlis Merkez	42.16	38.47	ZD	1.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	141933	23-10-2011 10:41	7	89.7	102.2	107.0	110.0	116.0	117.6
1401	Bolu Merkez	31.61	40.75	ZD	2.7	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	724.0	807.0	8.0	8.6	36.1	37.6
1404	Bolu Göynük	30.78	40.40	ZD	1.5	0.8	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	138.0	119.2	44.2	45.7	80.7	82.5
1406	Bolu Mudurnu	31.21	40.47	ZD	1.8	1.0	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	58.3	121.0	32.1	32.3	37.5	39.0
1612	İznik Merkez	29.72	40.44	ZD	1.7	0.9	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	91.9	123.3	33.2	34.8	40.3	43.8
2001	Denizli Çamlık	29.09	37.76	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1		19-08-1976 01:12	6.1	348.5	290.4	6.4	17.9	9.9	22.1
2005	Çardak	29.67	37.82	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	444581	08-08-2019 11:25	6	423.2	273.9			8.0	
2007	Denizli Sarayköy	28.92	37.93	ZD	2.3	1.2	0.5	0.3	0.6	0.3	0.1	0.1	253439	26-07-2003 08:36	5.6	107.5	121.1	11.2	22.0	13.8	25.4
2017	Acıpayam	29.35	37.43	ZD	1.8	0.9	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	433515	20-03-2019 06:34	5.5	361.2	184.4			7.4	
2301	Elazığ Merkez	39.19	38.67	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	118.1	137.8	30.4	30.5	36.4	37.3
2308	Sivrice	39.31	38.45	ZC	2.8	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	235.8	292.8	17.9	17.9	23.8	25.1
2402	Erzincan Merkez	39.49	39.75	ZC	2.7	1.4	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	236369	13-03-1992 17:18	6.6	405.0	479.5	3.3	16.8	12.8	26.0
2503	Erzurum Horasan	42.17	40.04	ZD	1.3	0.7	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1		30-10-1983 04:12	6.6	149.3	168.7	22.6	24.7	34.5	38.1
3102*	Antakya Merkez	36.16	36.21	ZD	2.1	1.1	0.3	0.2	0.6	0.3	0.1	0.1		22-01-1997 17:57	5.7	136.0	150.5	19.2	46.8	19.8	49.5
3205*	Keçiborlu	30.30	37.93	ZD	1.6	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	444581	08-08-2019 11:25	6	161.2	109.3			63.1	
3301	Yenişehir	34.60	36.78	ZC	0.7	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0		27-06-1998 13:55	6.2	132.1	119.3	57.5	71.2	64.9	79.9
3403	İstanbul Küçükçekmece	28.76	41.03	ZD	1.8	1.0	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	118.0	89.6	55.9	56.0	105.2	106.6
3513	Bayraklı	27.17	38.46	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	106.3	94.7	64.6	67.8	72.0	73.9

Tablo A.1 (Devam) Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ölçüm Şebekesinden Alınan Kayıtlar (en büyük yer ivmesi, PGA > 0.1g)

İstasyon	İstasyon Adı	Boy.	Enl.	ZS	S_S DD1	S_S DD2	S_S DD3	S_S DD4	S_1 DD1	S_1 DD2	S_1 DD3	S_1 DD4	Deprem No	Deprem Tarihi	M	PGA (cm/s^2) NS	PGA (cm/s^2) EW	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	R_{epi} (km)	R_{hy} (km)
3518	Konak	27.14	38.43	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	106.1	91.4	61.0	64.3	68.4	70.3
3519	Karşıyaka	27.11	38.45	ZE	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	150.1	110.0	61.8	65.2	69.2	71.2
3521	Karşıyaka	27.08	38.47	ZE	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	110.8	94.0	62.2	65.5	69.6	71.5
3528	Çeşme	26.37	38.30	ZC	1.9	1.0	0.4	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	117.6	149.3	50.8	54.8	58.2	60.5
4101	İzmit Kocaeli	29.92	40.77	ZB	2.9	1.6	0.6	0.3	0.8	0.4	0.2	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	163.7	228.3	0.6	3.9	3.4	17.3
4101	İzmit Kocaeli	29.92	40.77	ZB	2.9	1.6	0.6	0.3	0.8	0.4	0.2	0.1	248095	13-09-1999 11:55	5.8	73.7	318.3	8.7	12.4	13.8	17.3
4106	Gebze	29.45	40.79	ZC	2.4	1.3	0.5	0.3	0.7	0.4	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	264.8	141.5	4.9	6.2	42.8	46.0
4107	İzmit	29.93	40.76	ZD	2.9	1.7	0.6	0.3	0.8	0.5	0.2	0.1	248095	13-09-1999 11:55	5.8	341.1	611.5	1.5	7.6	3.3	10.9
4304	Gediz	29.40	38.99	ZD	2.3	1.2	0.4	0.3	0.6	0.3	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	92.3	103.9			31.5	
4305*	Kütahya Simav	28.98	39.09	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	71.2	115.6			10.0	
4404	Pütürge	38.87	38.20	ZB	2.8	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	193.6	228.4	18.6	18.6	24.6	25.8
4504	Demirci	28.65	39.04	ZD	1.7	0.9	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	625.8	699.8	35.4	40.9	39.0	46.0
4803	Fethiye	29.12	36.63	ZD	1.9	1.0	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	167145	10-06-2012 12:44	6	136.2	230.1			32.6	
4809	Bodrum	27.44	37.03	ZC	1.8	1.0	0.4	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1	381491	20-07-2017 22:31	6.5	158.8	102.0			12.6	
5401	Adapazarı	30.38	40.74	ZC	2.9	1.7	0.7	0.3	0.8	0.5	0.2	0.1	246561	11-11-1999 14:41	5.6	197.1	322.5	10.4	11.3	11.2	13.5
5903*	Çorlu M.Ereğlisi	27.95	40.97	ZD	1.9	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	90.4	101.4	116.9	116.9	170.8	171.6
6501	İpekyolu	43.40	38.50	ZC	1.3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	146290	09-11-2011 19:23	5.6	148.1	245.9			13.5	
6503*	Van Muradiye	43.76	38.99	ZD	1.4	0.7	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	141933	23-10-2011 10:41	7	178.3	168.8	33.1	11.6	42.2	46.3
6510*	Van Edremit	43.27	38.41	ZD	1.2	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	146290	09-11-2011 19:23	5.6	65.7	102.6			3.7	
8101	Düzce Merkez	31.15	40.84	ZD	2.3	1.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	314.3	365.9	46.0	46.2	101.2	102.7
8101	Düzce Merkez	31.15	40.84	ZD	2.3	1.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	400.1	512.9	0.0	9.7	5.3	11.7

*Zemin Sınıfları 1212, 1302, 3102, 3205,4305, 5903, 6503 ve 6510 'da ZD kabul edilmiştir.