

TASARIM SPEKTRUMU KÖŞE PERİYOTLARI VE ZEMİN AMPLİFİKASYON KATSAYILARININ OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZLERİ İLE BELİRLENMESİ

Ö. Kale¹ ve S. Akkar²

¹ Doktor, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Profesör, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Email: ozkankale@gmail.com

ÖZET:

Bu çalışma kapsamında Türkiye’ de Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde seçilen bir bölge için yapılan olasılıksal sismik tehlike analiz sonuçlarına dayalı tasarım spektrumu kontrol periyotları (sabit ivme bölgesi köşe periyotları ve uzun periyot bölgesine geçiş periyodu) ve zemin amplifikasyon katsayıları önerilmiştir. Sonuçlar farklı zemin türleri ve farklı dönüş (tekrar) periyotlarına göre elde edilmiştir. Sabit ivme bölgesi köşe periyotları ve zemin amplifikasyon katsayılarının hesabı PGA veya $T=0.2$ s ve 1.0 s’ deki spektral ivme değerlerine bağlı olarak üretilen ampirik bağıntılara dayanmaktadır. Uzun periyot bölgesine geçiş periyodunun (T_L) belirlenebilmesi için ise gerçek ve sentetik ivme kayıtları kullanılarak çıkarılan magnitüd- T_L ampirik ilişkisi ile sismik tehlike ayrıştırma analizi sonuçlarına göre elde edilen baskın magnitüde bağlı T_L kontur haritalarının kullanılması önerilmiştir. Sonuçta elde edilen tasarım spektrumları mevcut Türk Deprem Yönetmeliği (TDY07; DBYBHY, 2007), Avrupa Standardı (EC8; CEN, 2004) ve Amerikan Şartnamesi (NEHRP-2009; BSSC, 2009) tasarım spektrumları ile karşılaştırılmıştır.

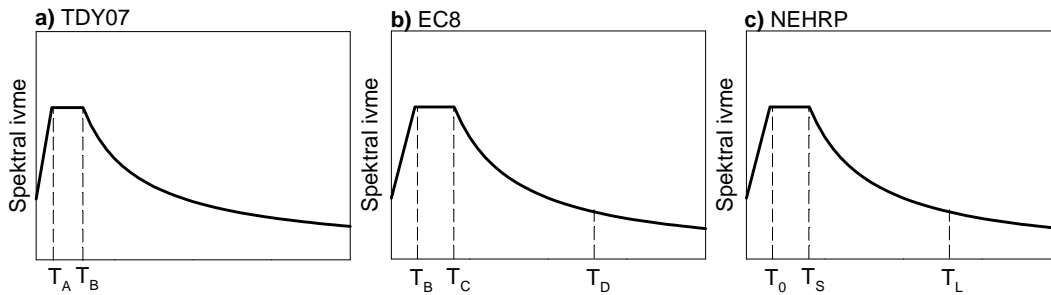
ANAHTAR KELİMELER: Olasılıksal sismik tehlike analizi, yer hareketi tahmin denklemi, tasarım spektrumu, kontrol periyotları, zemin amplifikasyonu

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, kuvvetli yer hareketi zorlaması altında bir yapıya etkiyecek olan deprem yüklerinin belirlenmesinde, deprem yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım spektrumları kullanılmaktadır. Bir başka deyişle tasarım spektrumları, yapıların depreme dayanıklı olarak dizayn edilmesinde, binaların doğal titreşim periyoduna göre deprem etkisi altında maruz kalacakları yatay yükleri belirlemede kullanılırlar. Spektrum eğrisi (tepki spektrumu), farklı doğal titreşim periyoduna sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin, belirli bir sönüm oranı dikkate alınarak yer hareketi etkisi altında yapacakları en büyük davranış değerleri hesaplanarak elde edilir. Tasarım spektrumları ise bölgenin sismik özelliklerini ve zemin koşullarını dikkate alarak oluşabilecek maksimum deprem etkilerini göz önüne alabilmek için farklı yer hareketi ivme kayıtlarından hesaplanan tepki spektrumlarına düzgünleştirilmiş bir zarf eğrisi oturtulmak suretiyle elde edilmektedir. Bunun yanısıra daha özel tasarım gerektiren durumlarda sismik tehlike analizi sonucundan da tasarım spektrumları elde edilebilmektedir. Özellikle son yıllarda kuvvetli yer hareketi istasyonlarının sayısındaki artış beraberinde yer hareketi ivme kayıtlarının da artışı getirerek deprem tehlikesini tahmin etmeye yönelik araştırmalara yeni bir ufuk açmıştır. Sayısal verinin zenginleştirilmesini güvenilir zemin koşulu, sismik kaynak istasyon arası mesafe, fay türü gibi bilgilerin de iyileştirilmesi izlemiştir. Bu çalışmalar paralelinde üretilen yer hareketi tahmin denklemlerinin sayısında da artış olmuştur. Sonuç olarak da sismik tehlike analizlerinin popülaritesi artarak bu çalışmalardan daha güvenilir bilgiler alınmaya başlanmıştır.

Türk Deprem Yönetmeliği (TDY07; DBYBHY, 2007), Eurocode-8 Avrupa Standardı (EC8; CEN, 2004) ve NEHRP-2009 Amerikan Şartnamesi (BSSC, 2009) kapsamında yer alan tasarım spektrumlarının genel görünüşü Şekil 1’de verilmektedir. Bu şekillerde, EC8 spektrumunda T_B ve T_C ve NEHRP spektrumunda T_0

ve T_S tasarım spektrumu köşe periyotlarını (sabit spektral ivme platosunun alt ve üst limit periyot değerlerini) gösterirken T_D ve T_L sabit yer değiştirme (veya uzun periyoda geçiş) bölgesinin (veya platosunun) başlangıç periyodunu temsil etmektedir. TDY07’ de spektrum köşe periyotları sadece T_A ve T_B değerleri ile temsil edilirken sabit yer değiştirme bölgesine geçişte herhangi bir değişim dikkate alınmamaktadır. Sabit deplasman platosunun başlangıç noktasını tarif eden T_L uzun periyotlu yapıların deplasman kontrollü tasarımları veya performans tahkikleri için spektral değerlerin hesaplanmasında önemli bir rol oynamaktadır ve bu periyottan sonra yer değiştirme istemi sabit kalmaktadır (Newmark ve Hall, 1982). TDY07’ de karşılaşılan bu durum doğal titreşim periyodu sabit yer değiştirme periyodundan daha büyük yapıların aşırı güvenli dizayn edilmesi sonucunu doğurmaktadır. Buna ek olarak TDY07 tasarım spektrumunda zemin amplifikasyon etkileri de dikkate alınmamaktadır.

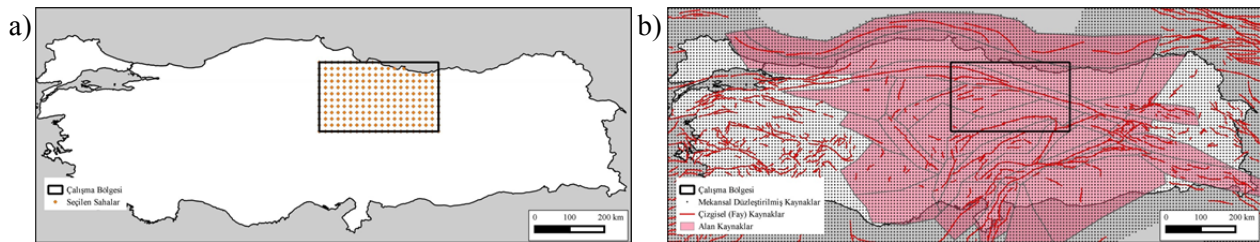


Şekil 1. a) Türk Deprem Yönetmeliği (TDY07; DBYBHY, 2007), b) Eurocode-8 Avrupa Standardı (EC8; CEN, 2004) ve c) NEHRP Amerikan Şartnamesi (BSSC, 2009) için tanımlanan tasarım ivme spektrumları.

Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike analizlerinden elde edilen eşit (üniform) tehlike spektrumları kullanılmıştır. İlk aşamada seçilen sahaların farklı zemin türleri ve dönüş periyotları dikkate alınarak her bir grup için zarf eğrileri oturtulmak suretiyle sabit ivme platosu köşe periyotları ampirik bağıntıları elde edilmiştir. Sonrasında gerçek ve simülasyon deprem kayıtları kullanılarak ve sismik tehlike ayrıştırma (deaggregation) analizleri yapılarak tasarım spektrumu uzun periyot bölgesine geçiş periyodu (T_L) belirlenmiştir. Son aşamada ise $V_{S30} = 760$ m/s değerindeki (kaya zemin) PSA değerleri referans alınmak üzere zemin amplifikasyon katsayıları için ampirik bağıntılar önerilmiştir. Bu çalışmada köşe periyotları için kullanılan terminoloji, tasarım spektrumunun genel formu üzerinde T_0 ve T_S ivme platosu başlangıç ve bitiş periyotlarını ve T_L uzun periyot bölgesine geçiş periyodunu temsil edecek şekilde verilmiştir (bkz. Şekil 1.c).

2. OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZLERİ VE MANTIK AĞACI UYGULAMASI

Olasılıksal sismik tehlike analizleri için sismik kaynak modeli olarak UDAP-Ç-13-06 kodlu Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi (TSTHG; Akkar vd., 2015) projesi kapsamında oluşturulan model kullanılmıştır. Burada bölge alan kaynak ve çizgisel (fay) ve mekansal düzleştirilmiş kaynak model olmak üzere iki farklı şekilde modellenmiştir. Proje kapsamında olasılıksal sismik tehlike analizlerinin yapılacağı bölge olarak Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAFH) üzerinde bir alan seçilmiştir. Bu alan içinde de analiz sonuçları $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ’lik enlem ve boylam aralıklarıyla toplam 224 noktada alınmıştır (Şekil 2.a). Projede seçilen çalışma bölgesi, sahalar ve sismik kaynaklar da Şekil 2.b’ de gösterilmiştir. Sismik tehlike yer hareketi mantık ağacı uygulaması Kale vd. (2015), Akkar vd. (2014), Chiou ve Youngs (2014) ve Zhao vd. (2006) yer hareketi tahmin denklemlerinin sırasıyla 0.30, 0.30, 0.30 ve 0.10 ağırlıklarıyla oluşturulmuştur.



Şekil 2. Olasılıksal sismik tehlike analizleri için seçilen çalışma bölgesi, seçilen sahalar ve sismik kaynaklar.

3. TASARIM SPEKTRUMU KÖŞE PERİYOTLARININ BELİRLENMESİ

3.1. İvme platosu köşe periyotları

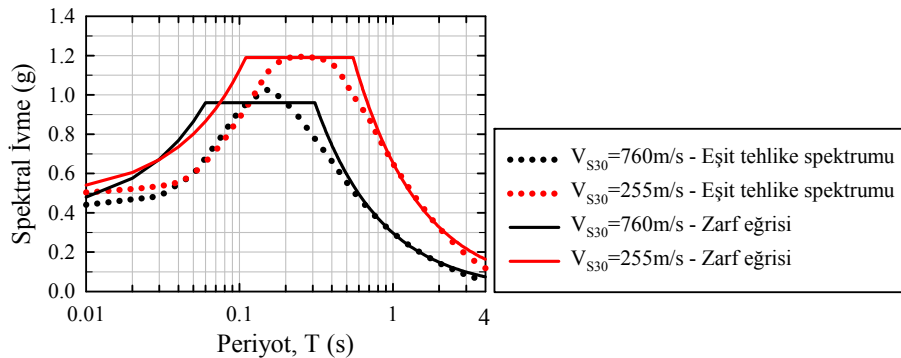
Eşit tehlike spektrumları kullanılarak çıkarılacak olan tasarım spektrumu ivme platosu köşe periyotlarının (T_0 ve T_S) belirlenmesi için NEHRP (BSSC, 2009) şartnamesinde tanımlanan yöntem dikkate alınmıştır. NEHRP şartnamesindeki tanıma göre ivme platosunun bitiş periyodu (T_S) $T=1.0$ s'deki spektral ivme değerinin ($SA_{1.0}$) $T=0.2$ s'deki spektral ivme değerine ($SA_{0.2}$) oranı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 1). Burada $SA_{0.2}$ kısa periyot ivme değerini, $SA_{1.0}$ ara periyot ivme değerini temsil etmektedir. T_0 değeri ise T_S değerinin %20'si olarak dikkate alınmaktadır (Denklem 1).

$$T_S = SA_{1.0}/SA_{0.2} \quad \& \quad T_0 = 0.2T_S \quad (1)$$

Bu yöntemle hesaplanan ivme platosu köşe periyotları kullanılarak elde edilen zarf eğrileri ve proje kapsamında dikkate alınan dönüş periyotlarına (72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl) ve zemin türlerine (kaya, sert, yumuşak ve çok yumuşak zemin) göre hesaplanan eşit tehlike ivme spektrumları karşılaştırıldığında yöntemin oldukça tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Zarf eğrileri oluşturulurken $T=0$ s'deki ivme değeri $SA_{0.2}$ 'nin %40 olarak dikkate alınmıştır (Denklem 2). Bu kabul birçok yönetmelik tarafından kabul edildiği gibi bu çalışmada elde edilen eşit tehlike spektrumlarının $PGA / SA_{0.2}$ oranları da incelendiğinde ortalamada iyi bir oran olduğu söylenebilmektedir. T_S periyodundan daha büyük periyotlar için tasarım ivme spektrumu değerleri de Denklem 2' de verilen bağıntılarla hesaplanabilmektedir.

$$\begin{aligned} T < T_0; \quad SA &= SA_{0.2} \left(0.4 + 0.6 T/T_0 \right) \\ T_0 \leq T \leq T_S; \quad SA &= SA_{0.2} \\ T_S < T \leq T_L; \quad SA &= SA_{0.2} T_S/T \\ T > T_L; \quad SA &= SA_{0.2} T_S T_L/T^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Şekil 3 $V_{S30} = 760$ m/s (kaya zemin) ve $V_{S30} = 255$ m/s (yumuşak zemin) için elde edilmiş 475 yıl dönüş periyoduna karşılık gelen eşit tehlike spektrumları ile bunlara oturtulmuş zarf eğrisi (tasarım) spektrumlarının proje çalışma bölgesinde seçilen bir saha için karşılaştırmalarını göstermektedir. Bu şekilde eşit tehlike spektrumları noktasal, zarf eğrisi spektrumları ise düz çizgilerle gösterilmiştir. Kaya ve yumuşak zemin için farklı renklerle temsil edilmiştir. Denklem 1 ve 2' ye göre hesaplanan tasarım spektrumunun eşit tehlike spektrumunu uygun bir şekilde temsil edebildiği açıkça görülmektedir. Buna ek olarak zeminin yumuşamasına (veya V_{S30} değerinin düşmesine) bağlı olarak da sabit ivme platosunun genişliğinin ve genliğinin arttığı da gözlemlenmektedir. Çalışma bölgesinde seçilen bu saha için elde edilen gözlemlere benzer bulgular diğer bütün sahalarda için de benzer şekildedir. Bu bağlamda, bu proje kapsamında $SA_{0.2}$ ve $SA_{1.0}$ değerlerinin mevcut olduğu durumlarda tasarım spektrumu ivme platosu köşe periyotlarının Denklem 1' de verilen bağıntılara göre belirlenerek kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. $SA_{0.2}$ ve $SA_{1.0}$ değerlerinin mevcut olmadığı durumlarda ise T_S değerinin PGA değerine bağlı olarak elde edilebileceği ampirik bağıntılar türetilmiştir. Bu durumda T_0 değerinin hesaplanabilmesi için yine Denklem 1 kullanılabilir.

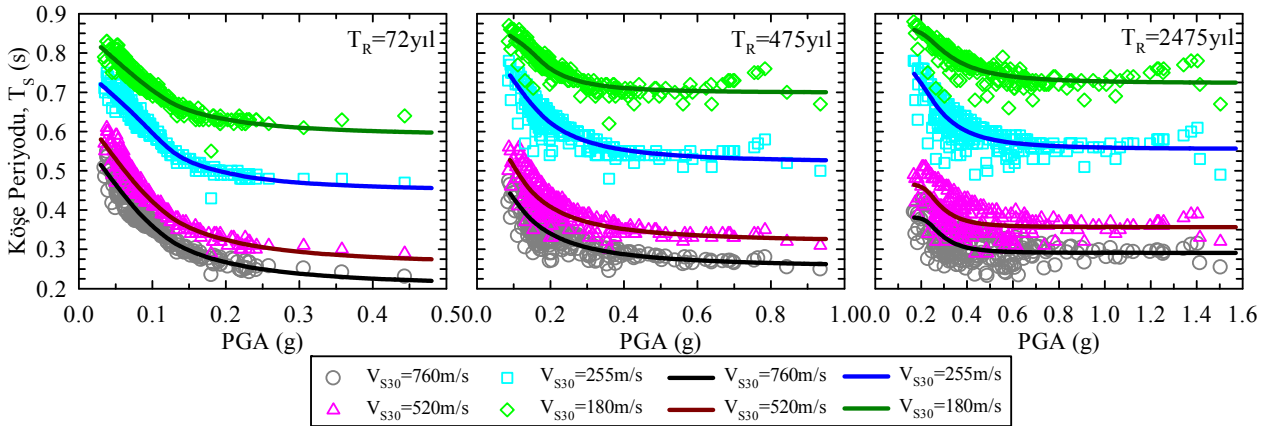


Şekil 3. Kaya ($V_{S30} = 760$ m/s) ve yumuşak ($V_{S30} = 255$ m/s) zemin için 475 yıl dönüş periyodu seviyesinde eşit tehlike spektrumu ile zarf eğrisi spektrumu kıyaslaması.

PGA- T_S ampirik bağıntıların türetilmesi için öncelikli olarak her bir saha için Denklem 1' e göre T_S değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler projede göz önüne alınan 3 farklı dönüş periyodu ve 4 farklı zemin sınıfı (sırasıyla $V_{S30} = 760, 520, 255$ ve 180 m/s ile temsil edilen kaya zemin, sert zemin, yumuşak zemin ve çok yumuşak zemin) için ayrı ayrı belirlenmiştir. Sonrasında T_S değerlerinin PGA ile ilişkilerinin araştırılması amacıyla farklı dönüş periyotları farklı alt şekillerde ve farklı zemin sınıfları da farklı renk skalalarında temsil edilerek PGA değerlerine karşılık T_S değerlerinin dağılımları Şekil 4' te gösterilmiştir. Buradaki dağılımlara ampirik denklemler uydurulduğunda Weibull modelin bütün durumlar için iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. PGA (kaya zemin) ile T_S değerleri arasındaki ampirik bağıntının genel formu Denklem 3' de verilmiştir. Farklı dönüş periyotları ve farklı zemin türleri için T_S değerlerinin elde edilebilmesini sağlayan denklem katsayıları ise Tablo 1' de listelenmiştir. Bu katsayılar kullanılarak PGA değerlerine göre hesaplanan ampirik T_S değerlerinin değişimi Şekil 4' te ilgili dağılımların üzerinde farklı renk skalalarındaki eğrilerle gösterilmiştir.

$$T_S = a - b * \exp(-c * PGA^d) \quad (3)$$

Şekil 4' e göre yapılan genel gözlemler ışığında zeminlerin V_{S30} değerlerinin düşmesine paralel olarak T_S değerlerinin arttığı görülmektedir. Dikkate alınan bütün dönüş periyotlarında belirli bir PGA değerine kadar T_S değerlerinde belirli bir düşüş gözlenmekte ve sonrasında ise T_S değerleri neredeyse sabit değerlere ulaşmaktadır. Kaya zeminlerde daha düşük PGA değerlerinde sabit T_S değerlerine ulaşılırken bu değer daha düşük V_{S30} değerine sahip yumuşak zeminlere doğru gidildikçe artmaktadır. Benzer irdeleme dönüş periyotları cinsinden incelendiğinde ise yüksek dönüş periyotlarında T_S değerlerinin sabitlenmesinin daha büyük PGA değerlerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak T_S köşe periyodunun dikkate alınan dönüş periyodunun artmasına bağlı olarak da arttığı görülmektedir.



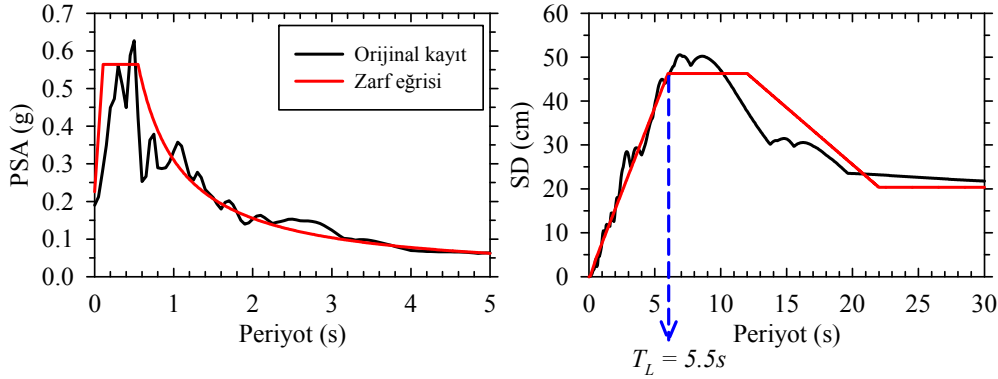
Şekil 4. Farklı dönüş periyotları (72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl) ve zemin türleri (kaya, sert, yumuşak ve çok yumuşak zemin) için PGA (kaya zemin) değerlerine karşılık orijinal ve ampirik T_S değerlerinin dağılımları.

Tablo 1. Farklı zemin sınıfları ve dönüş periyotları için T_S köşe periyodu denklem katsayıları.

Zemin Sınıfı	Dönüş Periyodu (T_R , yıl)	a	b	c	d
Kaya ($V_{S30}=760$ m/s)	72	0.51891	0.31731	0.01878	-1.55510
	475	0.49810	0.24568	0.03851	-1.51627
	2475	0.38125	0.09011	0.00254	-4.51748
Sert ($V_{S30}=520$ m/s)	72	0.58318	0.32717	0.01841	-1.57401
	475	0.59724	0.28033	0.03108	-1.57838
	2475	0.46481	0.10818	0.00299	-4.32884
Yumuşak ($V_{S30}=255$ m/s)	72	0.72000	0.27301	0.00826	-1.95645
	475	0.76447	0.24461	0.02636	-1.87939
	2475	0.76045	0.20488	0.01883	-2.80825
Çok Yumuşak ($V_{S30}=180$ m/s)	72	0.81562	0.22872	0.01336	-1.72052
	475	0.84546	0.14631	0.00722	-2.67902
	2475	0.86110	0.13761	0.03139	-2.75553

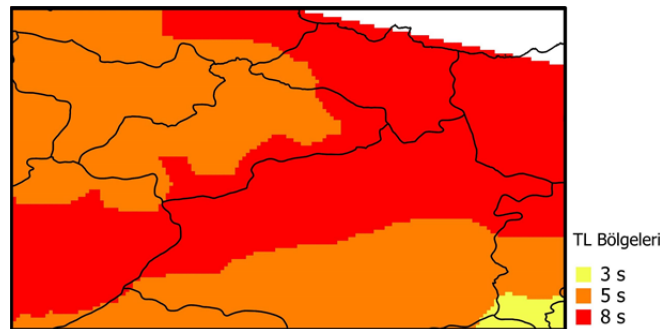
3.2 Uzun periyoda geçiş periyodu

Tasarım spektrumu sabit ivme bölgesi köşe periyotlarının belirlenmesinden sonra uzun periyot bölgesine geçiş periyodunun (T_L) belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu işlemler için ilk olarak gerçek ve simülasyon deprem kayıtları kullanılarak moment magnitüd - periyot (M_w-T_L) ilişkisi çıkarılmıştır. Bu işlemler için Türkiye kuvvetli yer hareketi veri tabanından (Kale, 2014) magnitüd aralığı $6.0 \leq M_w \leq 7.6$ ve Joyner-Boore mesafe (R_{JB}) aralığı $0 \leq R_{JB} \leq 50$ km olan 41 ivme kaydının geometrik ortalaması ve M_w değerleri 6.0, 6.4, 6.8, 7.2 ve 7.6, R_{JB} değerleri 1, 3, 5, 10, 20, 30 ve 50 km, V_{S30} değerleri 255, 520 ve 760 m/s için elde edilmiş 210 sentetik (simülasyon) kayıt kullanılmıştır. Bu kayıtların spektral yer değiştirme (SD) ve yalancı ivme (PSA) değerleri hesaplandıktan sonra spektrumları çizilmiştir. Sonrasında bu spektrumların kısa periyot değerleri için (T_0 ve T_S) PSA spektrumları, uzun periyot değerleri (T_L) için de SD spektrumları kullanılarak kontrol periyotları belirlenmiş ve zarf eğrisi spektrumları elde edilmiştir. Sabit ivme platosunun genliği maksimum ivme değerinin %90' ı olarak dikkate alınmıştır. Şekil 5 seçilen bir kayda ait bu yöntemle elde edilmiş ivme ve yer değiştirme spektrumlarını ve buradan belirlenen T_L değerini göstermektedir. Bu işlem veri setinde bulunan 41 gerçek ve 210 sentetik kayıt için ayrı ayrı yapılarak her bir kayda ait T_L değerleri belirlenmiştir. Veri setindeki kayıtlara ait M_w ile T_L arasındaki dağılımlardan elde edilen ampirik ilişki $T_L=0.00784*\exp(0.887*M_w)$ şeklindedir ve bu proje kapsamında 6.0-6.5, 6.5-7.0, 7.0-7.5 ve 7.5-8.0 M_w aralıkları için önerilen değerler sırasıyla $T_L = 2s, 3s, 5s$ ve $8s$ dir.



Şekil 5. Veri setinden seçilen bir kayda ait PSA ve SD spektrumları ve belirlenen T_L değeri.

Bu işleme paralel olarak fay ve mekansal düzleştirilmiş sismik kaynak model kullanılarak $T=4.0$ s için hesaplanan 2475 yıl dönüş periyoduna ait PSA değerlerine göre çalışma bölgesi için sismik tehlike ayrıştırma (deaggregation) analizleri yapılmış ve her bir sahaya karşılık gelen baskın magnitüd değerleri belirlenmiştir. Bununla birlikte $T=2.0$ s ve $T=3.0$ s için yapılan ayrıştırma analizleri de yapılmıştır ve magnitüd aralığı olarak bütün analizlerden benzer sonuçlar elde edilmiştir. Baskın M_w değerlerinin projede dikkate alınan çalışma bölgesindeki dağılımına göre çıkarılan T_L haritası Şekil 6' da verilmiştir. Bu harita kullanılarak tasarım spektrumu elde edilecek olan sahanın konumuna göre T_L değeri belirlenerek tasarım spektrumunun Denklem 1 ve 2' ye göre elde edilmesi önerilmektedir. Burada T_L değerlerinin elde edilemesinde izlenen yol NEHRP tasarım spektrumu çıkarılırken izlenen yöntem (Crouse vd., 2006) ile paralellik göstermektedir.

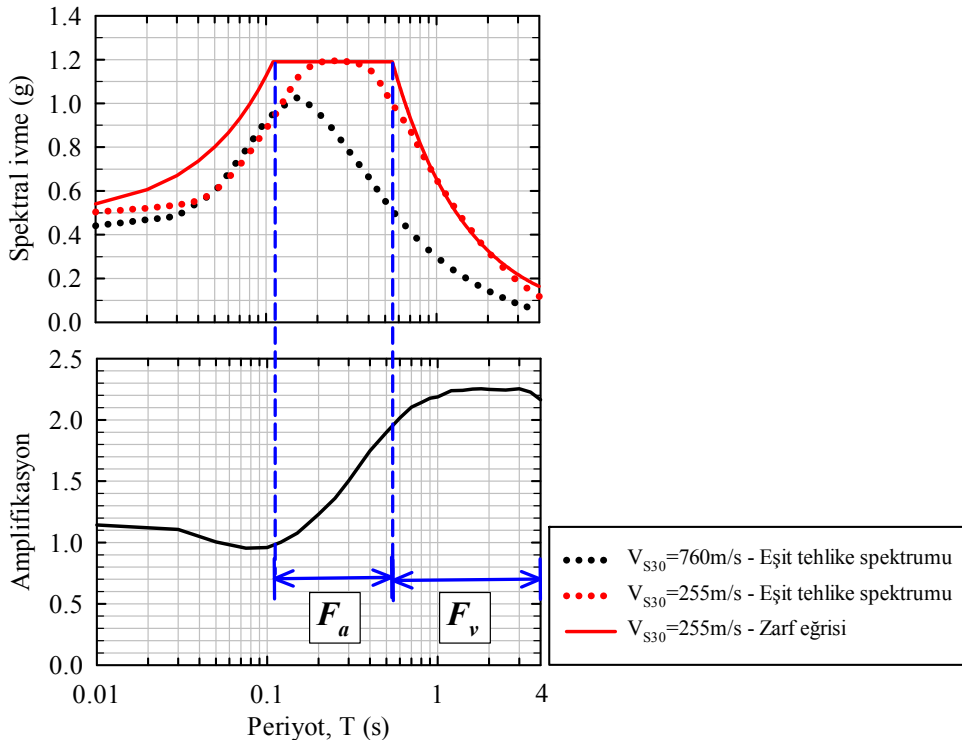


Şekil 6. Proje çalışma bölgesinde baskın M_w değerlerine göre elde edilen T_L değerlerinin kontur haritası.

4. ZEMİN AMPLİFİKASYON KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

Zemin amplifikasyon katsayıları belirlenirken yine olasılıksal sismik tehlike analizi sonuçları üzerinden bir yol izlenmiştir. Yer hareketi tahmin denklemi mantık ağacı uygulamalarında yer alan Kale vd. (2015) ve Akkar vd. (2014) denklemleri ağırlıklı olarak Türk depremlerini içeren bir veri tabanından türetilmiş Avrupa ve Orta Doğu için uyumlu olan Sandıkkaya vd. (2013) doğrusal olmayan zemin modelini kullanmaktadır. Yine mantık ağacında yer alan Chiou ve Youngs (2008) denklemi aktif sığ kabuk içi deprem üreten bölgeler için uygundur ve doğrusal olmayan zemin etkileri spektral tahminlerde dikkate alınmaktadır. Zemin amplifikasyon katsayılarının hesaplanmasında $V_{S30} = 760$ m/s değerine karşılık gelen kaya zemin için elde edilen sonuçlar referans olarak göz önüne alınmıştır. Bir başka deyişle kaya zemin için tasarım spektrumu zemin amplifikasyon katsayıları 1 olarak önerilmektedir. Zemin amplifikasyon katsayıları sert zemin, yumuşak zemin ve çok yumuşak zemin sınıflarını temsil etmek üzere seçilmiş V_{S30} 520 m/s, 255 m/s ve 180 m/s değerleri ve 72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl dönüş periyodu seviyeleri için elde edilmiştir. Zemin amplifikasyon katsayıları kısa periyot ve orta-uzun periyot bölgesi için iki farklı değer olarak rapor edilmiştir. Burada kısa periyot ivmenin sabit olduğu bölge (yani $SA_{0,2}$ bölgesi), orta-uzun periyot ise sabit hızı kapsayan bölge (yani $SA_{1,0}$ bölgesi) olarak dikkate alınmaktadır. Bu bağlamda, zemin amplifikasyon katsayıları hesaplanırken Bölüm 3' te belirlenen tasarım spektrumu sabit ivme bölgesi köşe periyotları da (T_0 ve T_S) dikkate alınmaktadır.

Şekil 7 zemin amplifikasyon katsayılarının hesaplanmasında izlenen yolun şematize edilmiş halini göstermektedir. Bu şeklin üst panelinde proje çalışma bölgesinde seçilen bir sahaya ait kaya zemin ve yumuşak zemin için 475 yıl dönüş periyoduna karşılık elde edilmiş eşit tehlike spektrumlarını ve yumuşak zemin spektrumuna uydurulan tasarım spektrumu zarf eğrisi gösterilmiştir. Alt panelde ise seçilen her bir periyot değerinde yumuşak zemin için hesaplanan spektral değerlerin kaya zemin için hesaplanan spektral değerlere oranından elde edilen zemin amplifikasyonlarının periyoda göre değişimi gösterilmektedir. Burada kısa periyot bölgesini temsil edecek zemin amplifikasyon katsayısı F_a , orta-uzun periyot bölgesini temsil edecek katsayı da F_v ile gösterilmiştir. F_a değeri ilgili zemin türüne göre belirlenmiş T_0 ve T_S değerleri arası için hesaplanan amplifikasyon değerlerinin ortalaması olarak elde edilirken F_v değeri de T_S ile $T=4.0$ s arası için hesaplanan amplifikasyon değerlerinin ortalamasıdır.

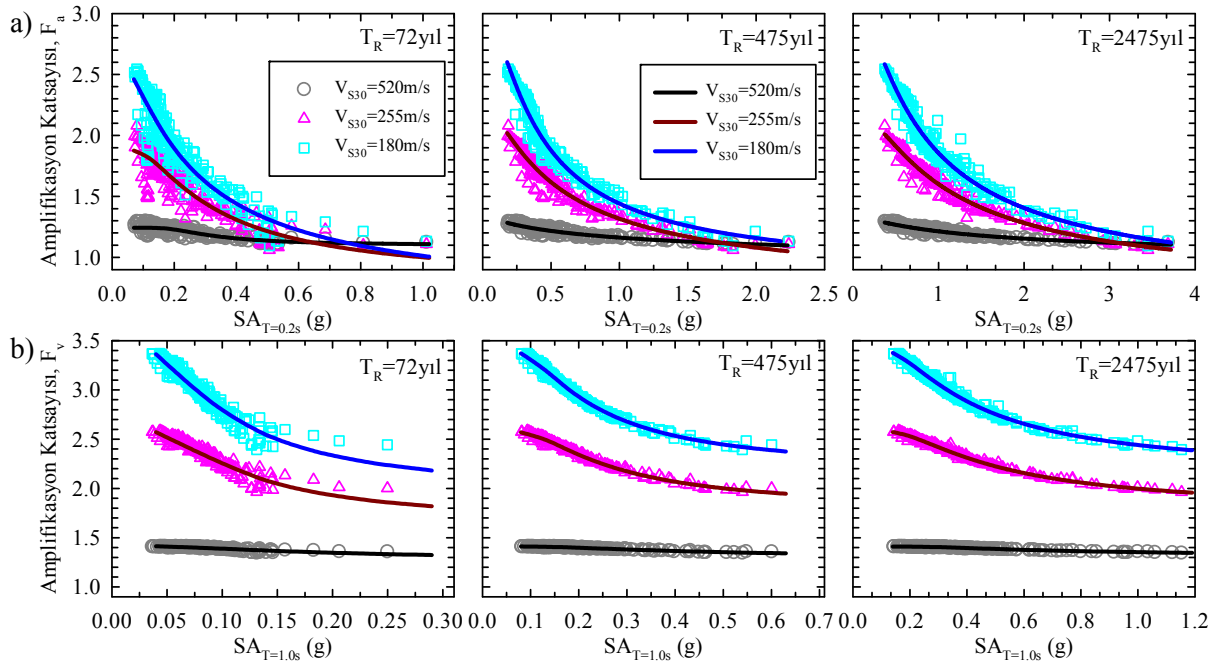


Şekil 7. Sabit ivme ve sabit hız bölgeleri zemin amplifikasyon katsayılarının belirlenmesinde izlenen yol.

Yukarıda anlatılan işlemler çalışma bölgesindeki bütün sahalar için 3 farklı zemin türü ve 3 farklı dönüş periyodu için uygulanarak her gruba ait F_a ve F_v değerleri hesaplanmıştır. Şekil 8.a F_a değerlerinin kaya zemin için hesaplanan $SA_{0.2}$ değerlerine, Şekil 8.b ise F_v değerlerinin yine kaya zemin için hesaplanan $SA_{1.0}$ değerlerine karşılık gelen zemin türleri ve dönüş periyotları cinsinden dağılımlarını ve bu dağılımlara uydurulan trendleri göstermektedir. Bu şekillerde zemin türleri farklı renk skalalarıyla temsil edilmiştir. Buradaki dağılımlara uydurulan ampirik bağıntılarda yine Weibull modelin iyi sonuç verdiği görülmüştür. F_a ve F_v değerlerinin belirlenebilmesi için önerilen ampirik bağıntının genel formu şu şekildedir:

$$F = a - b * \exp(-c * IM^d) \quad (5)$$

Bu denklemde F , F_a veya F_v değerini temsil ederken IM ise kaya zemin için hesaplanan PGA , $SA_{0.2}$ veya $SA_{1.0}$ değerlerine karşılık gelmektedir. a , b , c , ve d denklem katsayıları ise $PGA - F_a$ ve $PGA - F_v$ durumları için Tablo 2 ve $SA_{0.2} - F_a$ ve $SA_{1.0} - F_v$ durumları için de Tablo 3’te listelenen katsayılardır. Bu çalışma kapsamında PGA ile zemin amplifikasyon katsayıları arasında da Şekil 8’ e paralel ilişkiler gözlemlenmiş olmakla birlikte bildirideki sayfa limiti nedeniyle bu şekillere yer verilmemiştir.



Şekil 8. Farklı dönüş periyotları (72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl) ve zemin türleri (sert, yumuşak ve çok yumuşak zemin) için spektral ivme değerlerine karşılık orijinal ve ampirik F_a ve F_v değerlerinin dağılımları.

F_a ve F_v değerlerinin genel davranışları dikkate alındığında zeminlerin V_{S30} değerlerindeki azalmaya bağlı olarak amplifikasyon katsayılarının değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük PGA ve spektral ivme değerlerinden yüksek değerlere doğru gidildikçe amplifikasyon katsayılarında hızlıdan yavaş doğru trend izleyen bir azalım elde edilmiştir. Düşük spektral ordinatlarda V_{S30} değerinin düşmesine bağlı olarak amplifikasyon katsayılarında daha hızlı bir artış söz konusudur. Spektral ordinatların artan değerlerine göre katsayılarıdaki düşüşün en yavaş gözlemlendiği durum sert zemin türünde ortaya çıkmaktadır. F_v değerleri F_a değerlerine göre uzun periyotlardaki zemin amplifikasyonunun daha belirgin olması beklentisine paralel olarak daha büyük değerler vermiştir. F_v değerlerinde V_{S30} değişiminin etkisi F_a değerlerindeki V_{S30} değişiminin etkisine göre çok daha belirgindir. F_a değerlerinde gözlemlenen belirli bir spektral genliğe ulaşıldığında ortaya çıkan yakınsama (yani zemin türünün amplifikasyon değerleri üzerinde etkisinin azalması) F_v dağılımlarında hiçbir şekilde ortaya çıkmamıştır. Sahaların dönüş periyotlarındaki değişim incelediğinde düşük dönüş periyotlarında F_a ve F_v katsayılarının yüksek dönüş periyotlarına göre daha hızlı düştüğü gözlemlenmiştir. Bu gözleme ek olarak bütün durumlar için yapılan karşılaştırmalar amplifikasyon katsayılarının dikkate alınan dönüş periyodunun artmasına bağlı olarak arttığını göstermektedir. Bu artış

düşük V_{S30} değerine sahip zemin türlerinde daha etkili olurken sert zeminlerde daha yavaş değişim ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2. Farklı zemin sınıfları ve dönüş periyotları için PGA değerine göre sabit ivme bölgesi zemin amplifikasyonu (F_a) ve sabit hız bölgesi zemin amplifikasyonu (F_v) denklem katsayıları.

Zemin Sınıfı	T_R (yıl)	F_a				F_v			
		a	b	c	d				
Kaya ($V_{S30}=760\text{m/s}$)	72	1	0	0	0	1	0	0	0
	475	1	0	0	0	1	0	0	0
	2475	1	0	0	0	1	0	0	0
Sert ($V_{S30}=520\text{m/s}$)	72	1.2517	0.2430	0.1411	-1.1427	1.4101	0.1230	0.2328	-1.0275
	475	1.3262	0.4487	0.6555	-0.5149	1.4109	0.1164	0.5364	-1.0481
	2475	1.3212	0.3691	0.6989	-0.6770	1.4111	0.1201	0.9882	-1.0996
Yumuşak ($V_{S30}=255\text{m/s}$)	72	1.8895	1.1360	0.0896	-1.1877	2.5530	0.8316	0.1026	-1.1712
	475	2.1440	1.4537	0.2688	-0.8894	2.5913	0.9722	0.3805	-0.9547
	2475	2.1281	1.4543	0.4584	-0.9496	2.5744	1.0598	0.7782	-0.9494
Çok Yumuşak ($V_{S30}=180\text{m/s}$)	72	2.6036	2.0569	0.1187	-0.9248	3.3796	1.3738	0.1101	-1.0463
	475	2.8253	1.9859	0.1462	-1.0854	3.4204	1.4378	0.2936	-0.9790
	2475	2.9681	2.3214	0.3355	-0.9399	3.4069	1.7167	0.7127	-0.8511

Tablo 3. Farklı zemin sınıfları ve dönüş periyotları için $SA_{0.2}$ değerine göre sabit ivme bölgesi zemin amplifikasyonu (F_a) ve $SA_{1.0}$ değerine göre sabit hız bölgesi zemin amplifikasyonu (F_v) denklem katsayıları

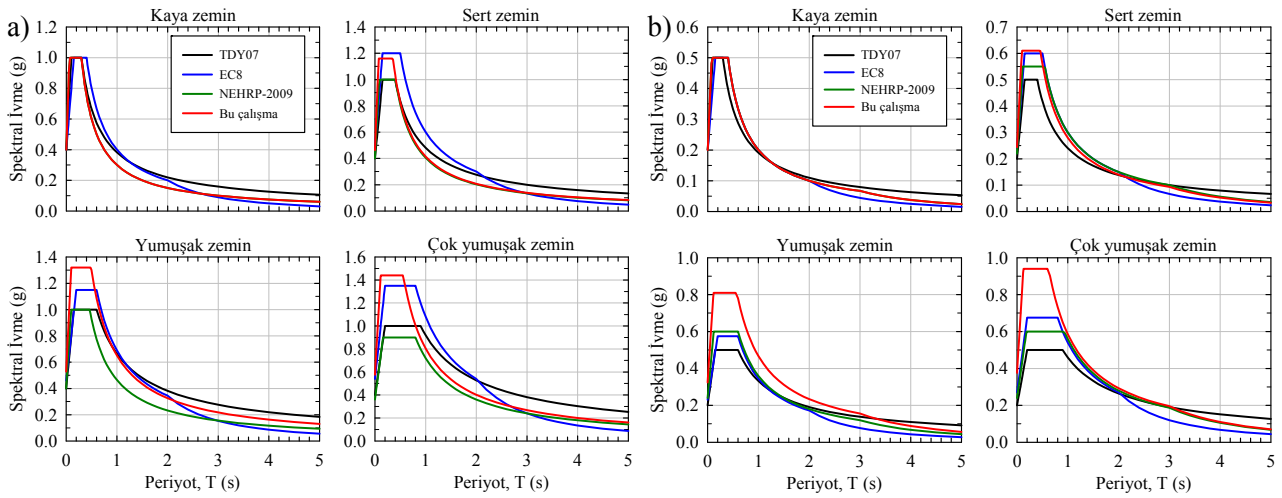
Zemin Sınıfı	T_R (yıl)	F_a				F_v			
		a	b	c	d				
Kaya ($V_{S30}=760\text{m/s}$)	72	1	0	0	0	1	0	0	0
	475	1	0	0	0	1	0	0	0
	2475	1	0	0	0	1	0	0	0
Sert ($V_{S30}=520\text{m/s}$)	72	1.2430	0.1426	0.0634	-2.2272	1.4149	0.1814	0.2103	-0.9592
	475	1.3298	0.4678	1.0270	-0.4715	1.4110	0.1320	0.3749	-1.1293
	2475	1.3238	0.3785	1.2333	-0.6233	1.4101	0.0960	0.5220	-1.3895
Yumuşak ($V_{S30}=255\text{m/s}$)	72	1.8802	1.0851	0.2102	-1.2173	2.5869	0.9477	0.0327	-1.5007
	475	2.1613	1.4848	0.5645	-0.8307	2.5767	0.7950	0.1183	-1.4501
	2475	2.1285	1.4422	1.0043	-0.9134	2.5835	0.8183	0.3346	-1.3006
Çok Yumuşak ($V_{S30}=180\text{m/s}$)	72	2.5749	1.9736	0.2337	-0.9412	3.4137	1.4723	0.0286	-1.4808
	475	2.8646	2.0370	0.3585	-1.0161	3.4021	1.2238	0.0885	-1.4783
	2475	2.9626	2.2910	0.7271	-0.9138	3.4176	1.2705	0.2630	-1.3046

5. MEVCUT YÖNETMELİK TASARIM SPEKTRUMLARI İLE YAPILAN KARŞILAŞTIRMALAR

Bu bölümde bu projede önerilen tasarım spektrumu ile mevcut TDY07, EC8 ve NEHRP-2009 tasarım spektrumları arasında yapılan 2 farklı sismik aktivite seviyesi (yüksek ve orta derece) ve 4 farklı zemin türü için karşılaştırmalar yapılmıştır. Yüksek sismik aktivite seviyesi için $PGA = 0.4 \text{ g}$, $SA_{T=0.2s} = 1.0 \text{ g}$ ve $SA_{T=1.0s} = 0.3 \text{ g}$ (kaya zemin) seçilirken orta sismik aktivite seviyesi $PGA = 0.2 \text{ g}$, $SA_{T=0.2s} = 0.5 \text{ g}$, $SA_{T=1.0s} = 0.2 \text{ g}$ (kaya zemin) değerleri ile temsil edilmiştir. Seçilen zemin türleri ise kaya, sert, yumuşak ve çok yumuşak zemin olarak göz önüne alınmıştır. Bu çalışma ve NEHRP-2009 tasarım spektrumunda değişken olarak tanımlanan T_L değeri yüksek sismik aktivite seviyesinde 8 s kabul edilirken düşük sismik aktivite seviyesi için hesaplarda 3 s olarak dikkate alınmıştır. TDY07’de Z1, Z2, Z3 ve Z4 olarak tanımlanan zemin sınıfları karşılaştırmalarda sırasıyla kaya, sert, yumuşak ve çok yumuşak zemin olarak kabul edilmiştir. NEHRP-2009’da tanımlanan zemin sınıflandırmasına göre kaya zemin olarak B sınıfı ($760 \text{ m/s} < V_{S30} < 1500 \text{ m/s}$) dikkate alınmıştır.

Şekil 9.a ve b sırasıyla yüksek ve orta sismik aktivite seviyeleri için farklı zemin türleri gözetilerek yapılan karşılaştırmaları göstermektedir. Bu çalışmada önerilen ve TDY07, EC8 ve NEHRP-2009’da verilen tasarım spektrumları bu şekillerde farklı renklerle temsil edilmiştir. Bu çalışmada önerilen tasarım spektrumu kaya ve sert zemin türleri için diğer tasarım spektrumlarına benzer trendler gösterirken yumuşak ve çok yumuşak zemin grupları için özellikle kısa periyot bölgesinde diğerlerine göre daha yüksek değerler almıştır. Orta sismik aktivite seviyesi için de benzer benzer gözlemler yapılabilmektedir fakat yumuşak ve çok yumuşak

zemin türlerinde yüksek sismik aktivite seviyesine göre daha belirgin farklar ortaya çıkmıştır. TDY07’ de tanımlanan tasarım spektrumunda zeminin yumuşamasına bağlı olarak kısa periyot bölgesindeki (ivme platosu) spektral değerlerde herhangi bir değişim uygulanmamasına bağlı olarak sert zeminden çok yumuşak zemin türlerine doğru gidildikçe diğer tasarım spektrumlarına göre çok küçük değerler vermektedir. TDY07 tasarım spektrumu gerek bu çalışmada tanımlanan tasarım spektrumu gerekse EC8 ve NEHRP-2009 tasarım spektrumlarına göre uzun periyoda doğru gidildikçe aşırı güvenli sonuçlar vermeye başlamaktadır. Bu etki spektral yer değiştirmeler cinsinden düşünülecek olursa arada oluşacak farklar çok daha ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla yönetmelik tasarım spektrumları arasında genel bir değerlendirme yapılacak olursa genel olarak mevcut tasarım spektrumlarının güvensiz tarafta kaldıklarını söylemek mümkündür. Bununla birlikte bu yorum değerlendirilirken bu çalışmanın kapsadığı bölgenin sınırlarının da göz önüne alınması gerekmektedir.



Şekil 9. Yüksek (a) ve orta (b) sismik aktivite seviyesi için yapılan tasarım spektrumu karşılaştırmaları.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında tasarım spektrumu kontrol periyotları (T_0 , T_S ve T_L) ve referans kaya zemine ($V_{S30} = 760$ m/s) göre zemin amplifikasyon katsayıları Türkiye’ de Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde seçilen bir bölge için yapılan sismik tehlike analizleri ve gerçek ve sentetik kuvvetli yer hareketi ivme kayıtları kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmaya benzer yapılan literatürdeki çalışmalarda gerçek yer hareketi ivme kayıtları kullanılarak veya yer hareketi tahmin modellerinin yardımıyla elastik ivme spektrumu hesaplanmış ve bunlar üzerinde işlem yapılarak tasarım spektrumları elde edilmiştir. Bu noktadan hareketle bu projede yapılan çalışmalarda farklı ve daha güncel bilimsel verilere dayalı bir çalışma ortaya çıkarılmıştır.

Çalışma sonunda T_0 , T_S ve zemin amplifikasyon katsayılarının belirlenebilmesi için iki farklı yaklaşım önerilmiştir. Birinci yaklaşım sadece kaya zemin içi elde edilen PGA değerlerinin mevcut olduğu durumlar için geçerlidir. Burada PGA değerine bağlı olarak önerilen ampirik bağıntılar yardımıyla T_0 , T_S ve zemin amplifikasyon katsayıları hesaplanarak tasarım spektrumu formu çıkarılmaktadır. İkinci yaklaşım ise $T=0.2$ s ve 1.0 s’ deki spektral ivme değerine bağlı olarak elde edilmektedir. T_0 ve T_S değerleri bu iki spektral değerlerin oranından elde edilirken zemin amplifikasyon katsayıları bu iki spektral ivme değerine bağlı olarak önerilen ampirik bağıntılardan hesaplanmakta ve tasarım spektrumu formu oluşturulmaktadır. T_L değerleri iki yaklaşımda da önerilen T_L kontur haritalarına göre belirlenebilmektedir.

Bu proje kapsamında yapılan gözlemler ışığında mevcut Türk Deprem Yönetmeliği’ nde tanımlanan tasarım spektrumunun güncellenmesi gerektiği net bir şekilde ortaya konulmuştur. Güncelleme çalışmalarında zemin etkileri, kontrol periyotlarının tanımlanması ve dönüş periyotlarına göre önerilen değerlerin dikkatlice seçilmesi gerektiği de aşikardır. Bunlara ek olarak yönetmeliklerde tanımlanan tasarım spektrumlarında ivme platosu köşe periyotlarının sadece zemin türüne göre değişmeyip buna ek olarak spektral genliklerdeki

değişimin ve dönüş (tekrar) periyodunun da etkisinin göz ardı edilmemesi önerilmektedir. Tüm bu detaylara ek olarak şu husus unutulmamalıdır ki bu projede yapılan çalışmalar sonucu elde edilen proje çıktıları Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde seçilen bir bölge için yapılan sismik tehlike analizlerine dayanmaktadır. Bu noktadan hareketle çalışmanın tüm Türkiye'yi kapsayacak şekilde genişletilerek yapılması daha güvenilir bilgiler alınmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ilk yazarı TÜBİTAK - BİDEB Yurtiçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı kapsamında desteklenmektedir. Bu çalışma TÜBİTAK - 213M245 kodlu 1002 - Hızlı Destek Programı araştırma projesi kapsamında yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- S. Akkar, Azak, T., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu, M.B., Duman, T., Erdik, M., Ergintav, S., Kadirioglu, F.T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal, R.F., Kekovalı, K., Kılıç, T., Özalp, S., Altuncu Poyraz, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakut, A., Yılmaz, M.T., Yüçemen M.S., Zülfikar, Ö. 2015. "A brief review on seismic hazard maps in Turkey", Bulletin of Earthquake Engineering, *hazırlanıyor*.
- Akkar, S., Sandıkkaya, M.A., Bommer, J.J. 2014. "Empirical Ground-Motion Models for Point- and Extended-Source Crustal Earthquake Scenarios in Europe and the Middle East", Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 359-387.
- Building Seismic Safety Council (BSSC) 2009. "2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions For New Buildings and Other Structures: Part 1, Provisions, Federal Emergency Management Agency (P-750)", Washington, D.C.
- CEN 2004. "Eurocode 8: Design of structures for earthquake Resistance - Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings, EN 1998-1:2004", Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- Chiou, B.S.-J., Youngs, R.R. 2008. "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra", Earthquake Spectra, 24(1), 173-215.
- Crouse, C.B., Leyendecker, E.V., Somerville, P.G., Power, M., Silva, W.J. 2006. "Development of Seismic Ground-Motion Criteria for the ASCE 7 Standard", 8th NCEE, San Francisco-California-USA, Paper no. 533.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, <http://www.deprem.gov.tr>
- Kale, Ö. 2014. "Practical Tools for Ranking and Selection of Ground-Motion Prediction Equations (GMPEs) for Probabilistic Seismic Hazard Assessment and Development of a Regional GMPE", Ph.D. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., Hamzehloo, H. 2015. "A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV and 5%-damped response spectrum: Investigation of possible regional effects", Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2a), 963-980.
- Newmark, N.M. ve Hall, W.J. 1982. "Earthquake spectra and design", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- Sandıkkaya, M.A., Akkar, S., Bard, P.Y. 2013. "A Nonlinear Site Amplification Model for the Next Pan-European Ground-Motion Prediction Equations", Bulletin of the Seismological Society of America, 103(1), 19-32.
- Zhao, J.X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H.K., Somerville, P.G., Fukushima, Y. 2006. "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3), 898-913.