Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Yerel Zemin Etkisinin Farklı Yaklaşımlarının Sismik Tehlike Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Sakarya Örneği

Elif TOPLU [1,a], **Osman KIRTEL** [1,b]

[1]*Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye*

[a]***ORCID**: 0000-0001-8019-560X; [b]**ORCID**: 0000-0001-6451-0323*

Makale Bilgileri
Geliş : 14.05.2025
Kabul : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665276

Sorumlu Yazar
Elif TOPLU
eliftoplu@subu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Deprem tehlikesi
Deprem spektrumu
Zemin büyütme faktörü
Deprem

***Atıf şekli:** TOPLU, E., KIRTEL, O., (2026). Yerel Zemin Etkisinin Farklı Yaklaşımlarının Sismik Tehlike Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi: Sakarya Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 605-622.*

ÖZ

Bu çalışmada, Sakarya ili için yerel zemin koşullarının olasılıksal sismik tehlike üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Analizlerde R-CRISIS 2015 yazılımı kullanılmış, sismik kaynak modeli olarak EMME2014, yer hareketi tahmin denklemi olarak ise NGA-West2 modelleri dikkate alınmıştır. İlk aşamada referans zemin koşulu (V_{s30}=760 m/s) için elde edilen sonuçlar TBDY 2018 tasarım spektrumları ile karşılaştırılmış, ardından ampirik zemin büyütme bağıntıları ve sahaya özgü ölçülmüş V_{s30} değerleri kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. Sonuçlar, referans zemin koşulunda hesaplanan spektrumların TBDY 2018 ile genel olarak uyumlu olduğunu, ancak ampirik büyütme yöntemlerinin özellikle kısa periyot bölgesinde farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir. Ölçülmüş V_{s30} değerlerinin kullanıldığı analizlerde, ZE sınıfı zeminlerde 1,0 s spektral ivme değerlerinde referans kaya koşuluna göre yaklaşık üç kata varan artışlar belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, doğrusal olmayan saha terimlerini kullanan güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin yerel zemin etkisini ampirik büyütme yaklaşımlarına göre daha gerçekçi temsil edebildiğini ve sahaya özgü geoteknik verilerin deprem tehlikesi analizlerine dâhil edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Evaluation of the Effects of Different Approaches to Local Site Effects on Seismic Hazard: A Case Study of Sakarya, Türkiye

Article Info
Received : 14.05.2025
Accepted : 11.08.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1665276

Corresponding Author
Elif TOPLU
eliftoplu@subu.edu.tr

Keywords
Earthquake hazard
Earthquake spectrum
Soil amplification factor
Earthquake

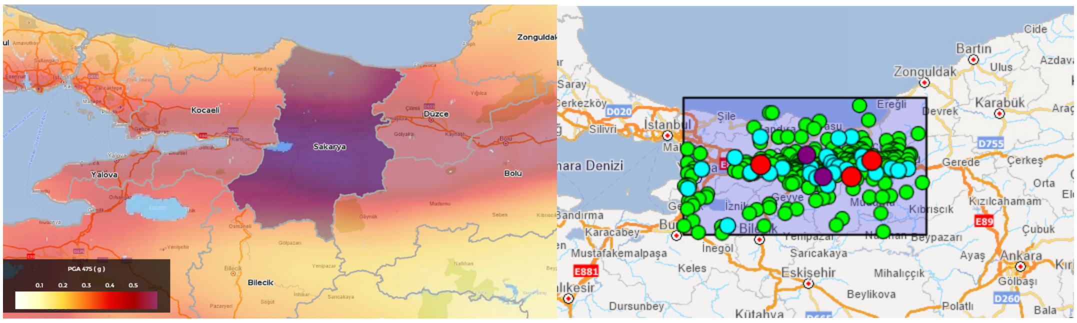
***How to cite:** TOPLU, E., KIRTEL, O., (2026). Evaluation of the Effects of Different Approaches to Local Site Effects on Seismic Hazard: A Case Study of Sakarya, Türkiye. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 605-622.*

ABSTRACT

In this study, the effect of local soil conditions on probabilistic seismic hazard was evaluated for Sakarya province. The R-CRISIS 2015 software was used for the analyses; the EMME2014 model served as the seismic source model, and NGA-West2 models were adopted as ground motion prediction equations. In the initial stage, results obtained for the reference soil condition (Vs30 = 760 m/s) were compared with the TBDY 2018 design spectra; subsequently, the analyses were repeated using empirical soil amplification correlations and site-specific measured Vs30 values. The results indicated that while the spectra calculated for reference soil conditions were generally consistent with TBDY 2018, the empirical amplification methods resulted in distinct spectral shapes, particularly in the short-period range. Analyses involving measured Vs30 values revealed increases of up to approximately three times the reference rock values for spectral accelerations at a period of 1.0 second on ZE-class soils. The comparisons demonstrated that modern ground motion prediction equations incorporating site terms provide a more comprehensive representation than empirical amplification methods alone, highlighting the importance of integrating site-specific geotechnical data into these analyses.

1. GİRİŞ

Sakarya ili, Marmara Bölgesi'nin Çatalca-Kocaeli yöresinde yer almakta olup, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde bulunan, bol alüvyonlu ve tektonik kökenli bir ova yapısına sahiptir. Bu jeolojik özellikleri nedeniyle tarih boyunca birçok depreme maruz kalmış ve ciddi can ve mal kayıpları yaşamıştır [1]. Adapazarı Ovası'nda düşük kayma dalgası hızına sahip kalın alüvyon tabakalarının bulunması, yer hareketinin genliğini ve frekans içeriğini değiştirerek deprem talebinin mekânsal olarak farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Sakarya'da deprem tehlikesinin değerlendirilmesinde yalnızca bölgesel sismik kaynakların değil, yerel zemin özelliklerinin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır [2]. Sakarya ili ve çevresinde 1900–2024 yılları arasında meydana gelen depremlere ilişkin veriler AFAD deprem kataloğundan alınmış ve görsel olarak sunulmuştur. Öte yandan, Türkiye'de Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında, 2018 yılında AFAD tarafından Türkiye Deprem Tehlike Haritaları güncellenmiş ve bu süreçte olasılıksal yöntemler kullanılmaya başlanmıştır [3].



Şekil 1. AFAD deprem kataloğu [3]

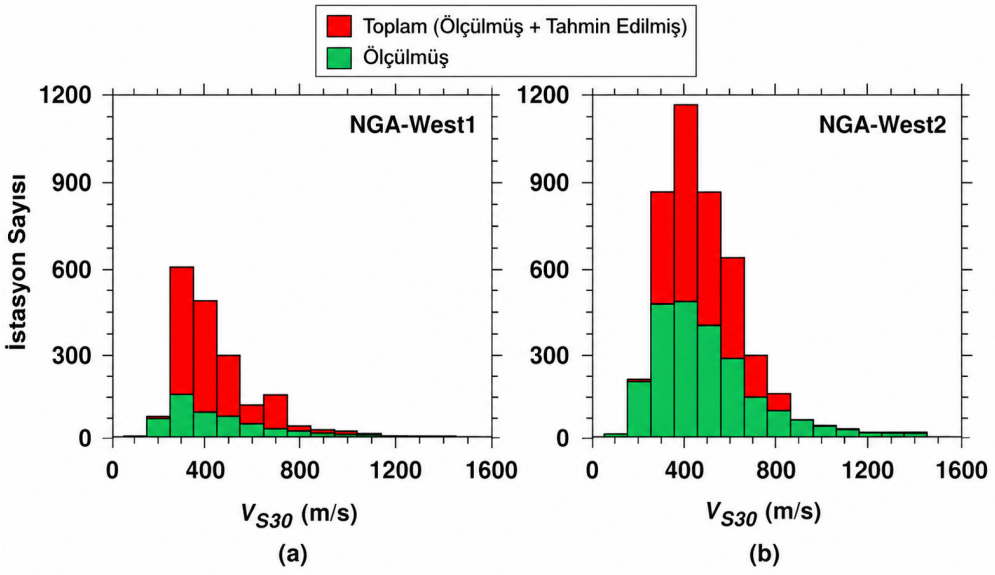
AFAD Türkiye Deprem Haritalarında referans zemin koşulu V_{S30}= 760 m/s kabul edilmekte ve zemin etkileri TBDY 2018 'de yerel zemin etki kat sayıları dikkate alınarak hesaba katılmaktadır. Yerel zemin etkileri ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde zemin sınıfına ve harita spektral ivme düzeyine bağlı olarak verilen yerel zemin etki katsayıları yardımıyla tasarım spektrumuna yansıtılmaktadır [4]. Bu yaklaşım mühendislik uygulamaları için pratik ve standartlaştırılmış bir çerçeve sağlamakla birlikte, aynı zemin sınıfında yer alan sahaların hız profili, tabaka kalınlığı, hakim periyodu ve doğrusal olmayan davranışı bakımından farklı özellikler gösterebilmesi nedeniyle yerel zemin etkisini belirli sınıflar üzerinden temsil etmektedir [5] .

Yerel zemin koşullarının kuvvetli yer hareketi üzerindeki etkisini temsil etmek amacıyla farklı ampirik ve yarı ampirik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Joyner ve Fumal [6], ölçülen kayma dalgası hızları ile kuvvetli yer hareketlerinde gözlenen jeolojik saha etkileri arasında ampirik ilişkiler kurarak kayma dalgası hızına dayalı büyütme tahminlerinin temelini oluşturmuştur. Midorikawa [7], ortalama kayma dalgası hızını kullanarak yüzey zemin hareketi için bağıl büyütme katsayısı önermiş; Borcherdt ve arkadaşları [5] ise jeolojik birimlerin ve sığ tabakalardaki kayma dalgası hızlarının zemin büyütmesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu klasik bağıntılar, ayrıntılı dinamik zemin özelliklerinin bulunmadığı durumlarda zeminin üst kesimlerine ait ortalama kayma dalgası hızından hareketle yaklaşık bir büyütme katsayısı elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bununla birlikte, tek bir bağıl büyütme katsayısının bütün spektral periyotlara uygulanması, zemin davranışının frekansa ve yer hareketi şiddetine bağlı değişimini sınırlı biçimde temsil etmektedir. Yerel zemin büyütmesi yalnızca V_{S30} değerine değil; zemin tabakalarının kalınlığına, tabakalar arasındaki hız kontrastına, mühendislik ana kayasının derinliğine, hakim zemin periyoduna ve giriş yer hareketinin genliğine de bağlıdır [8]. Özellikle yumuşak zeminlerde güçlü yer hareketi altında kayma modülünün azalması ve sönümün artması nedeniyle zemin davranışı doğrusal olmaktan uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle modern yer hareketi tahmin modellerinde saha etkileri, sabit bir büyütme katsayısı yerine periyoda, V_{S30} değerine ve referans kaya hareketinin şiddetine bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan terimlerle ifade edilmektedir [9].

2013 yılında, Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER), NGA-West1 [10] olarak adlandırılan aktif tektonik bölgelerdeki sığ kabuk depremleri için yeni nesil azalım ilişkileri geliştirmek

amacıyla büyük bir araştırma programı başlatmıştır. Proje, dünya çapında kaydedilen kapsamlı bir yer hareketi veri tabanı ve yatay yer hareketi için bir dizi yer hareketi tahmin denklemi elde edilmiş ve 2008 yılında sona ermiştir. Dünya çapında birçok araştırmacı, uygulayıcı ve kuruluş, araştırmadan sismik tasarım kodlarına, sahaya özel deprem tasarımı ve değerlendirmesine ve mali kayıp tahminine kadar geniş bir uygulama yelpazesi için NGA-West1 veri tabanını ve modellerini kullanmaktadır. NGA-West2 [11] projesi, orijinal NGA-West1 programında ele alınmayan bazı önemli yer hareketi sorunlarının giderilmesi ve NGA-West1 veri tabanının genişletilmesi amacıyla 2010 yılında başlamış ve 2014 yılında sona ermiştir. NGA-West2 kapsamında yer hareketinin yatay bileşeni için NGA-West1 yer hareketi tahmin denklemleri güncellenmiş, yer hareketi tahmin denklemleri tarafından tahmin edilen tepki spektrumlarının, referans %5 değeri dışındaki sönümleme değerlerine ölçeklendirmek için sönümleme modelleri geliştirilmiş, NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemleri için epistemik belirsizlikler değerlendirilmiş, deneysel ve simülasyon tabanlı zemin büyütme modelleri için veri tabanı artırılmış [Şekil 2], ve NGA yer hareketi tahmin denklemleri ve standart yönetmeliklerde kullanılan zemin etki katsayıları arasındaki tutarsızlıkların giderilmesi amaçlanmıştır [11].



Şekil 2. (a) NGA-West1 ve (b) NGA-West2 veri tabanlarında V_{s30} dağılımı [11]

Yönetmelikler tarafından önerilen ve dünya çapında deprem yönetmeliklerinde benimsenen saha büyütme faktörlerini kullanmak mühendislik uygulamalarında yaygın bir uygulamadır. Ancak, deprem yönetmeliklerinden elde edilen saha faktörleri, NGA-West modellerinden elde edilen saha amplifikasyonları ile tamamen tutarlı değildir. Bu nedenle, NGA-West1 veya NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinin deprem yönetmeliğindeki zemin etki katsayıları ile kullanılması tamamen uygun değildir. Bu uyumsuzluğun nedeni esas olarak referans zemin hızındaki farklılıklardan ve zeminin doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır [12].

Son yıllarda yapılan çalışmalar da V_{s30}'un yerel zemin koşullarının temsilinde temel parametrelerden biri olmayı sürdürdüğünü, ancak tek başına bütün saha etkilerini açıklamakta yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Mazanec ve arkadaşları [8], yoğun bir sismik gözlem ağı üzerinden V_{s30} ile gözlenen büyütme arasındaki ilişkiyi incelemiş ve V_{s30}'un genel eğilimi yansıtmasına karşın sahaya özgü büyütme farklılıklarının tamamını açıklayamadığını ortaya koymuştur. Darzi ve arkadaşları [13] ise yerel zemin büyütmesini frekansa bağlı olarak değerlendirmiş ve başka bölgelerden aktarılan genel V_{s30} veya jeoloji tabanlı modellerin yerel gözlemlerle aynı mekânsal ve frekanssal davranışı üretmeyebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, saha etkilerinin tek bir sabit katsayı yerine frekans bağımlı ve yerel verilerle desteklenen modellerle ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Türkiye'deki güncel araştırmalar da sahaya özgü kayma dalgası hızı verilerinin bölgesel deprem tehlikesi çalışmalarındaki önemini vurgulamaktadır. İlhan ve arkadaşları [14], 6 Şubat 2023 Türkiye depremlerinden etkilenen bölgede ölçülen V_{s30} verilerine dayalı bir boyutlu hız modeli geliştirerek zemin koşullarının bölgesel yer hareketi modellemelerine aktarılmasını amaçlamıştır. Silahtar ve arkadaşlar [15] tarafından

Sakarya bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada ise V_{s30}, yatay-düşey spektral oran yöntemiyle elde edilen hakim frekans ve büyütme değerleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmada alüvyon alanlarda düşük frekanslı ve yüksek genlikli rezonans özellikleri belirlenmiş; Sakarya'daki yerel zemin davranışının yalnızca ortalama kayma dalgası hızıyla değil, rezonans ve yanal heterojenlik gibi dinamik parametrelerle birlikte incelenmesi gerektiği gösterilmiştir. Adapazarı özelinde gerçekleştirilen önceki çalışmalar da V_{s30}, zemin sınıfları ve gözlenen büyütme arasında önemli ilişkiler bulunduğunu göstermiştir. Özcep ve arkadaşları [16], Adapazarı'nda çok sayıda noktada gerçekleştirilen çok kanallı yüzey dalgası analizleriyle elde edilen kayma dalgası hızlarını saha büyütmesi ve farklı yönetmeliklerde tanımlanan zemin sınıflarıyla karşılaştırmıştır. Bu çalışma, Adapazarı gibi kalın alüvyon tabakalarının bulunduğu havzalarda aynı V_{s30} aralığında dahi saha tepkisinin değişebileceğini ve yerel ölçümlerin kullanılmasının önemini ortaya koyması bakımından mevcut araştırmanın bölgesel temelini desteklemektedir.

Güncel literatürün önemli bir bölümü yeni saha büyütme modellerinin geliştirilmesine, frekans bağımlı büyütme fonksiyonlarının belirlenmesine veya bir ve iki boyutlu doğrusal olmayan saha tepki analizlerine odaklanmaktadır. Buna karşılık mühendislik uygulamalarında, farklı yöntemlerin aynı saha için ne ölçüde farklı deprem talepleri ürettiği de önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Çünkü klasik bağıl büyütme bağıntıları, yönetmelik tabanlı zemin etki katsayıları ve modern yer hareketi tahmin modellerinin saha terimleri; referans zemin tanımı, periyot bağımlılığı, yer hareketi şiddeti ve doğrusal olmayanlık bakımından birbirinden farklı kabullere dayanmaktadır. Sismik kaynak modeli, koordinatlar, aşılma olasılığı ve diğer tehlike bileşenleri birlikte değiştirildiğinde, sonuçlar arasındaki farkın ne kadarının doğrudan zemin etkisinin temsil biçiminden kaynaklandığını belirlemek güçleşmektedir.

Bu çalışmada incelenen Adapazarı-Çark Caddesi, Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi, Adapazarı-Güllük, Erenler ve Serdivan noktaları, Sakarya ilinin yoğun nüfus ve yapılaşmaya sahip kentsel yerleşim alanlarını temsil etmeleri nedeniyle seçilmiştir. Ayrıca bu sahalarda farklı zemin sınıflarını temsil eden sahaya özgü V_{S30} değerlerinin bulunması, zemin etkisinin farklı yöntemlerle karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Böylece saha seçimi yalnızca farklı kayma dalgası hızı değerlerinin elde edilmesine değil, yöntemler arasında oluşabilecek farklılıkların yoğun kent dokusunda tasarım spektrumlarına ve mühendislik taleplerine etkisinin değerlendirilmesine dayanmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, diğer sismik tehlike bileşenleri mümkün olduğunca sabit tutulurken, yerel zemin etkisinin farklı yaklaşımlarla temsil edilmesinin elde edilen tehlike ve tasarım spektrumları üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu kapsamda ilk olarak V_{s30}=760 m/s referans zemin koşulu için ASK14, BSSA14 ve CY14 yer hareketi tahmin modelleri kullanılarak olasılıksal sismik tehlike analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından Midorikawa, Joyner–Fumal ve Borcherdt tarafından önerilen kayma dalgası hızına bağlı klasik bağıl büyütme bağıntılarının etkisi incelenmiştir. Son aşamada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan zemin etki katsayıları ile sahaya özgü V_{s30} değerlerini doğrudan kullanan ASK14 modelinin doğrusal ve doğrusal olmayan saha terimleri karşılaştırılmıştır. Böylece sabit ampirik büyütme, yönetmelik tabanlı periyot bağımlı büyütme ve modern yer hareketi tahmin modeli tabanlı saha etkisi temsillerinin aynı kentsel çalışma alanlarında ürettiği deprem talepleri ortak bir değerlendirme çerçevesinde nicel olarak incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada olasılıksal sismik tehlike analizleri, R-CRISIS 2015 [17] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Prof. Mario Ordaz tarafından geliştirilen bu yazılım, Cornell [18] tarafından önerilen olasılıksal sismik tehlike analizi (PSHA) yaklaşımını esas almakta olup, sismik kaynakların deprem üretme potansiyelini, deprem oluş sıklıklarını ve yer hareketi tahmin denklemlerini birlikte değerlendirerek belirli bir aşılma olasılığına karşılık gelen yer hareketi parametrelerini hesaplamaktadır. Yazılım, günümüzde birçok akademik ve mühendislik uygulamasında ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada sismik kaynak modeli olarak EMME2014 (Earthquake Model of the Middle East) [19] projesi kapsamında geliştirilen kaynak modeli kullanılmıştır. EMME2014, Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu Orta Doğu bölgesi için geliştirilen bölgesel bir sismik tehlike modeli olup, aktif fay kaynakları, alan kaynakları, deprem katalogları ve sismotektonik parametreleri bütünleşik bir yapı içerisinde sunmaktadır. Sakarya ili ve çevresindeki sismik kaynaklar bu model esas alınarak R-CRISIS ortamında tanımlanmış ve olasılıksal tehlike hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Yer hareketinin tahmininde, aktif sığ kabuk depremleri için geliştirilen NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinden Abrahamson ve arkadaşları (ASK14)[20], Boore ve arkadaşları (BSSA14)[21] ve Chiou ve Youngs (CY14)[22] modelleri kullanılmıştır. Analizlerin ilk aşamasında referans kaya koşulu V_{s30}=760 m/s olarak kabul edilmiş ve her bir yer hareketi tahmin denklemi için maksimum yer ivmesi (PGA) ile spektral ivme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında aynı koordinatlar için verilen tasarım spektrumları ile karşılaştırılmış ve yönetmelikle en uyumlu sonuçları veren yer hareketi tahmin denklemi belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen beş nokta, Sakarya ilinde farklı yerel zemin özelliklerini temsil eden ve geoteknik etüt raporlarından ölçülmüş V_{s30} değerlerine ulaşılabilen bölgeler arasından seçilmiştir. Nokta seçiminde farklı zemin sınıflarının temsil edilmesi ve yerel zemin etkisinin farklı zemin koşulları altında değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır.

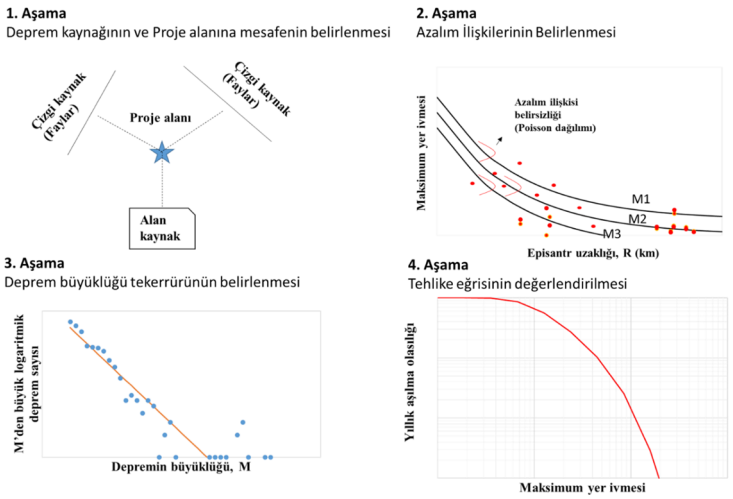
Sakarya ilinin önemli bir bölümünün ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarında yer alması nedeniyle referans kaya koşulunda elde edilen tehlike değerlerinin doğrudan mühendislik tasarımında kullanılmasının yeterli olmayacağı değerlendirilmiştir. Bu nedenle çalışmanın ikinci aşamasında yerel zemin etkisi dikkate alınmıştır. İlk olarak, geoteknik raporlardan elde edilen ölçülmüş V_{s30} değerleri kullanılarak Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ile Borcherdt ve arkadaşları [5] tarafından önerilen ampirik zemin büyütme bağıntıları uygulanmış ve her bir çalışma noktası için bağıl zemin büyütme katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılar kullanılarak referans kaya koşulunda elde edilen spektral ivmeler yüzey zemin koşullarına dönüştürülmüş ve ampirik büyütme yaklaşımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır.

Son aşamada ise, referans zemin koşulunda TBDY 2018 ile en uyumlu sonuçları veren yer hareketi tahmin denklemi seçilerek analizler tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, referans kaya hızı yerine her bir noktaya ait geoteknik raporlardan elde edilen gerçek V_{s30} değerleri doğrudan yer hareketi tahmin denkleminin saha parametresi olarak kullanılmıştır. Böylece yerel zemin etkisi, modern yer hareketi tahmin modelinin doğrusal ve doğrusal olmayan saha terimleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak çalışmada yerel zemin etkisi üç farklı yaklaşımla incelenmiştir: (i) ampirik zemin büyütme bağıntıları, (ii) yer hareketi tahmin denklemlerinde doğrudan kullanılan ölçülmüş V_{s30} değerleri ve (iii) TBDY 2018'de tanımlanan zemin etki katsayıları. Elde edilen maksimum yer ivmesi ve spektral ivme değerleri karşılaştırılarak farklı zemin etkisi temsil yaklaşımlarının deprem tehlikesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

2.1. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi

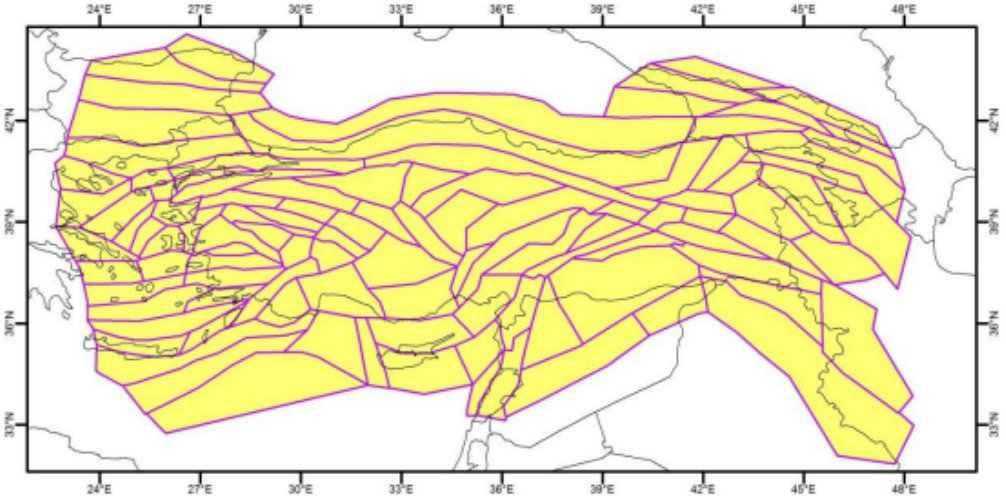
Ülkemizde yapılmış olan birçok olasılıksal sismik tehlike analizi çalışmaları bulunmaktadır [23-30]. Harman ve Küyük [28], Sakarya için olasılıksal sismik tehlike analizi yapmış ancak çalışmalarında zemin etkilerini dikkate almamıştır. Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi, deprem tekerrürünün ve birtakım belirsizliklerin dikkate alınarak hesap edilmesi şeklindedir (Şekil 3).



Şekil 3. Olasılıksal deprem tehlike analizi aşamaları

2.2. Kaynak Modeli

TBDY 2018 deprem haritalarının oluşturulmasında da olasılıksal sismik tehlike analizi yöntemi dikkate alınmıştır. Türkiye için Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında fayların kırılma mekanizmalarına göre alansal deprem kaynakları ve parametreleri belirlenmiştir. Faylarda meydana gelen kırılmalar sonucunda meydana gelen yer değiştirmeler zemin çalışmaları veya GPS çalışmalarıyla belirlenebilmektedir. Türkiye için Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında Türkiye ve çevresi için toplam 105 adet alansal deprem kaynağı belirlenmiştir (Şekil 4) [31].



Şekil 4. Türkiye için alansal kaynak modeli [31]

2.3. Deprem Tekerrürü ve Olasılığının Belirlenmesi

Ulusal Deprem Araştırma Programı kapsamında Türkiye için yürütülen olasılıksal deprem tehlike analizlerinde, diğer modellere kıyasla daha güvenli sonuçlar üretmesi nedeniyle Poisson olasılık modeli tercih edilmiştir [32]. Bu modele göre, her bir sismik olay birbirinden bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, aynı yer ve zamanda iki depremin meydana gelme olasılığının ihmal edilebilir seviyelere düşmesine neden olmaktadır. Böylece artçı ve öncü şoklar analiz dışı bırakılarak, belirsizliklerin azaltılması ve tehlike hesaplarının daha sağlıklı yürütülmesi mümkün hale gelmektedir.

$$P(N>1)=1-e^{\lambda t} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de yer alan λ parametresi, belirli bir büyüklükteki depremin ortalama oluşma oranını temsil etmektedir. Eşitlik 2 ise, Gutenberg ve Richter (1954) tarafından önerilen ve depremlerin büyüklük-frekans ilişkisini logaritmik bir formda ifade eden bağıntıyı içermektedir. Bu ilişki, olasılıksal deprem tehlike analizlerinde yaygın olarak kullanılan temel modellerden biridir.

$$\text{Log } \lambda(M)= a- bM \quad (2)$$

λ(M) = birim zaman içinde magnitüd değeri M'ye eşit ya da M'den büyük ortalama deprem sayısı;
a ve b = ilgili bölge için saptanan regresyon katsayıları;
"a" değerleri, seçilen bölgenin büyüklüğü ve incelenen zaman aralığı ile ilişkilidir. "b" değerleri ise bölgenin tektonik yapısı ile ilişkilidir.

2.4. Azalım İlişkilerinin Seçilmesi

Sakarya ili, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde konumlanmakta olup, bölge aktif tektonik özellikler göstermektedir. Türkiye'nin karmaşık tektonik yapısı göz önünde bulundurulduğunda, aktif sığ kabuk içi, dalma-batma zonu ve dalan levha içi depremler için geliştirilmiş yer hareketi tahmin modelleri (GMPE'ler) en uygun seçenekler arasında yer almaktadır. Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP) kapsamında Türkiye tektoniğine uygun olarak geliştirilen güncel azalım ilişkileri (örneğin, ASK14, BSSA14, CB14 ve

CY14) analizlerde kullanılmak istenmiş; ancak bu modellerin çalışmada kullanılan yazılımda tanımlı olmaması nedeniyle, aynı araştırma grupları tarafından geliştirilen bir önceki versiyon denklemler (AS08, BA08, CB08 ve CY08) tercih edilmiştir (Çizelge 1). Bununla birlikte, bu çalışmada ASK14, BSSA14 ve CY14 modelleri R-CRISIS 2015 yazılımına tanımlanarak Sakarya ili için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmış ve sonuçlar TBDY 2018 ile karşılaştırılmıştır [31].

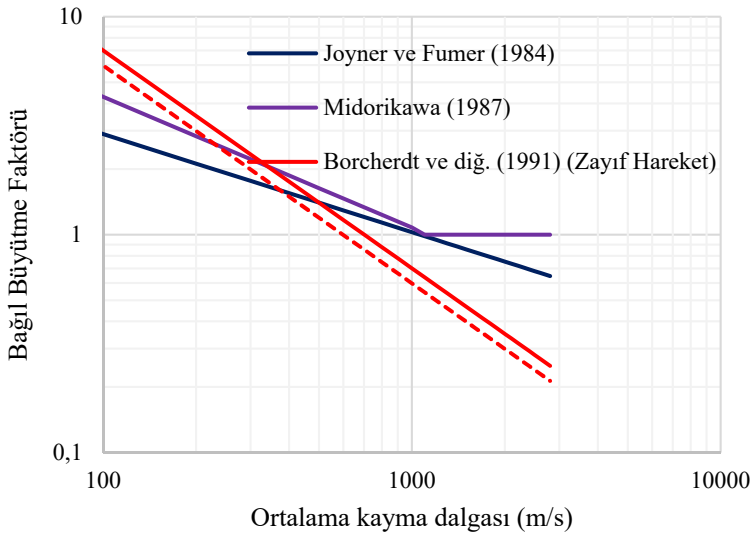
Çizelge 1. Türkiye için önerilen azalım ilişkileri [31]

Tahmin denklemi	Denklemin kısaltması	Ana bölgeler	Kayıt ve deprem sayısı	Mw aralığı	R tipi ve Rmax	Bileşenler	Periyod aralığı	Faylanma şekli	Zemin etkisi
Abrahomson, Silva Kamai	AS08	Batı Amerika ve Tayvan	2754,135	5.0-8.5	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Boore ve Atkinson	BA08	Batı Amerika ve Tayvan	1574,58	5.0-8.0	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Chou ve Youngs	CY08	Batı Amerika ve Tayvan	1950,125	4.0-8.5	Rrup,200	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Abrahomson, Silva ve Kamai	ASK14	Batı Amerika ve Tayvan	15750,326	3.0-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Boore ve arkadaşları	BSSA14	Batı Amerika ve Tayvan	-	3-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}
Chiou ve Youngs	CY14	Batı Amerika ve Tayvan	12444.300	3.5-8.5	Rrup,300	PGA,PGV,PSA GMrotD50	0-10	S,N,R	V_{s30}

**R: mesafe*
**Rmax: Maksimum mesafe*
**Rrup:Fay kırığına en yakın mesafe*
**GM: Yatay bilşenleri geometrik ortalaması*
**RotD50: Konumdan bağımsız ortalma yatay bileşen*
**S: Doğrultu atımlı fay*
**N:Normal fay*
**R:Ters fay*

2.5. Zemin Büyütme Etkisi

Yüzeye yakın tabakalarda Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ve Borcherdt ve arkadaşları [33] gibi araştırmacılar kayma dalgası hızı ile zemin büyütmesi arasında korelasyonlar geliştirmiştir (Şekil 5). Bu korelasyonlar Ortadoğu, Kaliforniya, Japonya ve Şili'de meydana gelmiş depremlerde yapılan gözlemlere göre ileri sürülmüştür.



Şekil 5. Ortalama kayma dalgası hızına bağlı bağıl büyütme faktörü [6,7,33]

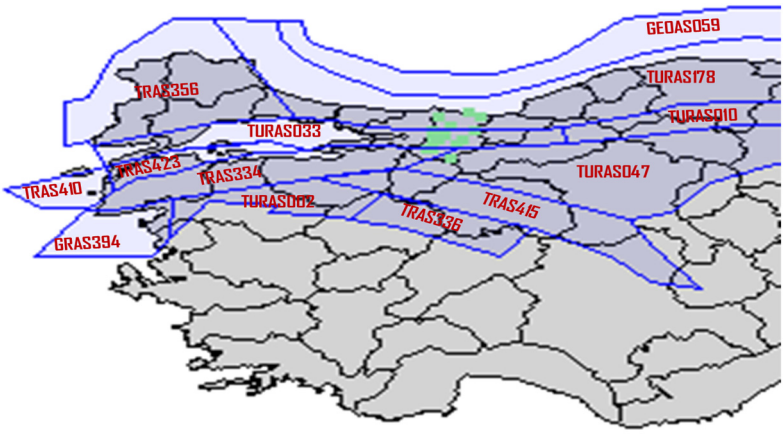
3. SAYISAL ÇALIŞMA

Sismik tehlike analizi yapılan beş farklı noktaya ait koordinatlar ile V_{S30} değerleri, ilgili sahalar için hazırlanmış yayımlanmamış geoteknik etüt raporlarından elde edilmiş olup Çizelge 2'de sunulmuştur. Zemin hâkim periyotları, geoteknik raporlarda yer alan tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı değerleri kullanılarak çeyrek dalga boyu yaklaşımına göre hesaplanmıştır [34]. Bağıl büyütme katsayıları ise zemin hâkim periyotlarına karşılık gelen değerler esas alınarak Şekil 5'te verilen büyütme eğrilerinden belirlenmiştir. Sismik tehlike analizi yapılan 5 farklı noktanın koordinatları ve zemin raporlarından elde edilen V_{s30} hızları, zemin periyodları ve bağıl büyütme kat sayıları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Tehlike analiz yapılan noktaların koordinatları özellikleri ve bağıl büyütme faktörleri

	Vs(30) [m/s]	Zemin sınıfı	Koordinatlar		T_{zemin}	Midorikawa [7]	Joyner ve Fumal [6]	Borcherdt ve arkadaşları [33]
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	40,77	30,39	0,810811	3,39	2,43	4,73
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	40,87	30,31	0,224131	1,57	1,36	1,31
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	40,76	30,39	0,540955	2,66	2,02	3,15
Erenler	130	ZE	40,74	30,4	0,923077	3,66	2,57	5,38
Serdivan	312	ZD	40,74	30,34	0,384615	2,17	1,73	2,24

R-CRISIS 2015 yazılımında analizler 6 farklı aşamadan oluşmaktadır. Çalışılacak bölgenin şekil dosyasının oluşturulması, çalışılacak koordinatların şekil dosyası üzerine atanması, çalışma alanının koordinatlarının belirlenmesi ve gridlere ayrılması, kaynak belirlenmesi, azalım ilişkilerin belirlenmesi ve deprem tehlike parametrelerinin belirlenmesi şeklindedir. Analizlerde Şekil dosyasının hazırlanmasında QGIS [35] yazılımından faydalanılmıştır. Kaynaklar Alan kaynak olarak belirlenmiş ve Gutenber Richter ilişkilerinden faydalanılmıştır. Türkiye için uygun a ve b değerleri UDAP Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi proje raporunda yer almaktadır. Bu çalışma için Kuzeydoğu Anadolu Fayını kapsayan EMME 2014 [36] kaynak modeli hesaba katılmıştır (Şekil 6). Aktif sığ alansal kaynak alt derinlik sınırı da 20 km olarak hesaba katılmıştır [31].



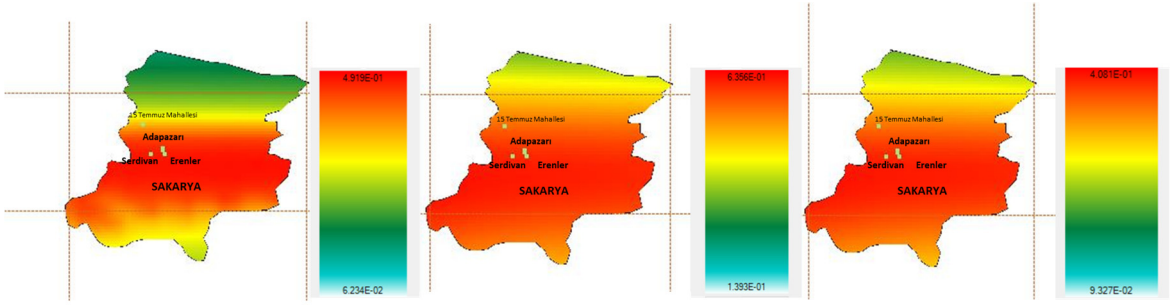
Şekil 6. Analizlerde kullanılan alan kaynak modeli

3.1. Sonuçlar

Analiz sonuçları 3 aşamadan oluşmaktadır. 1. Aşama, Referans zemin koşulunun dikkate alındığı ve 3 farklı yer hareketi tahmin denklemlerinin hesaplara dahil edildiği; 2. Aşama, 1. Aşamanın devamı niteliğinde bağıl büyütme faktörünün etkisinin dahil edildiği hesaplamaları içermektedir. 3. Aşama ise ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) yer hareketi tahmin denklemi için zemin raporlarından elde edilen V_{s30} zemin hızlarının 5 nokta için ayrı ayrı hesap edilmesi şeklindedir.

3.2. Referans Zemin Koşulu İçin Analiz

Analizlerde BSSA14 (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) azalım ilişkilerine göre hesap yapılmıştır. Şekil 7'de Referans zemin koşulu için elde edilmiş olan sismik tehlike haritaları görülmektedir.



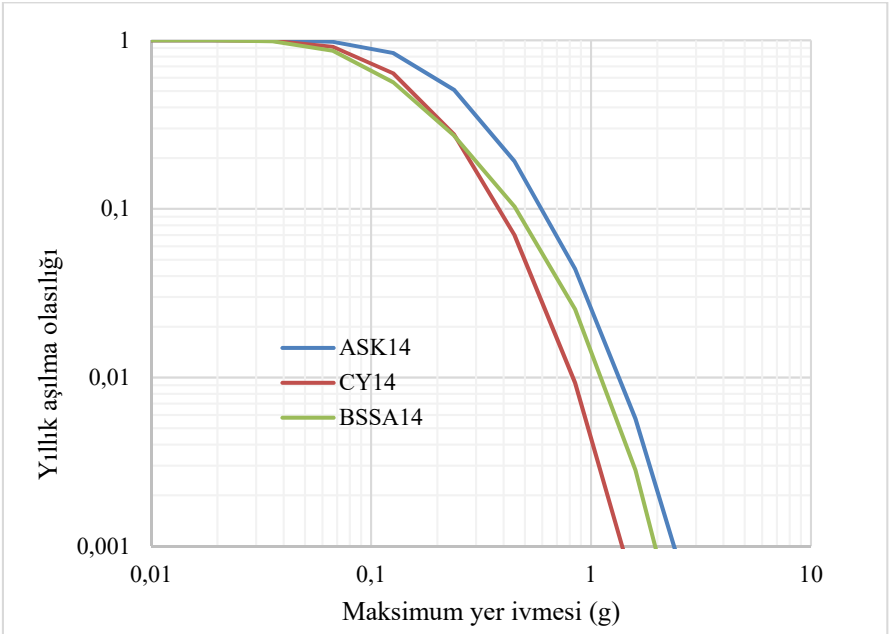
Şekil 7. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 tehlike haritaları

Çizelge 2'de ise Şekil 2'de haritalardan okunmuş maksimum yer ivme değerleri verilmiştir. En yüksek yer ivmesinin ASK14 modelinde oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 2. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 maksimum yer ivmesi

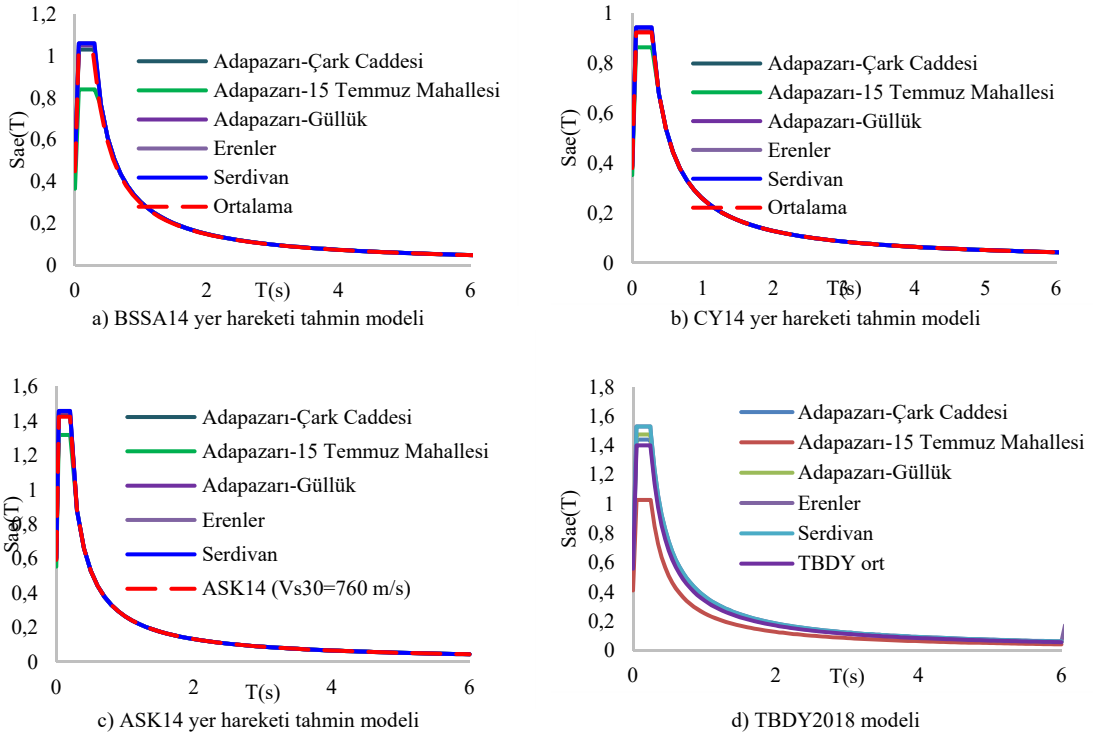
V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA (g) (DD-2)
760	ZB	BSSA14	0,492
760	ZB	ASK14	0,636
760	ZB	CY14	0,408

Deprem tehlike haritası üzerinden Şekil 8'de belirtilen noktalar üzerinde PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri okunabilmekte ve tehlike eğrileri elde edilebilmektedir. Şekil 8'de Tehlike haritaları üzerinde bulunan 5 noktanın (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) için ortalamaları hesap edilmiş ve sismik tehlike eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 8). 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem için (DD-2) grafikten değerler okunabilmektedir.



Şekil 8. Referans V_{s30} zemin koşulu için BSSA14, ASK14, CY14 tehlike eğrileri

Tehlike haritaları üzerinde bulunan 5 nokta için elde edilen her bir PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri TBDY2018'e uyarlanmıştır. (Boore ve arkadaşları [21]), ASK14 (Abrahomson ve arkadaşları [20]) ve CY14 (Chiou ve Youngs [22]) modelleri için referans zemin koşulu dikkate alınarak spektrum eğrileri oluşturulmuş ve ortalamaları hesap edilmiştir (Şekil 9).



a) BSSA14 yer hareketi tahmin modeli

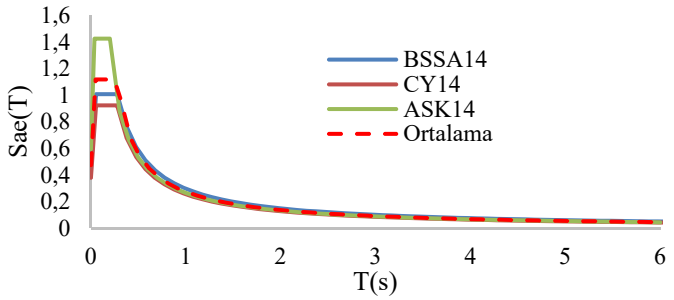
b) CY14 yer hareketi tahmin modeli

c) ASK14 yer hareketi tahmin modeli

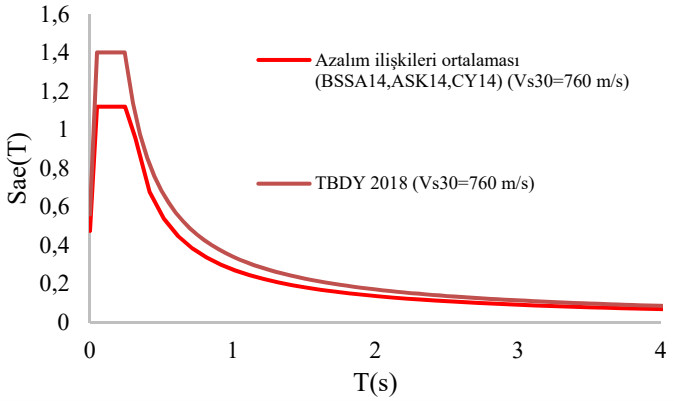
d) TBDY2018 modeli

Şekil 9. Referans V_{s30} zemin koşulu için elde edilmiş spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Referans zemin koşuluna göre Şekil 9'da elde edilmiş olan yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilmiş ortalama spektrum eğrileri Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



a) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması



b) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin TBDY 2018 ile karşılaştırılması

Şekil 10. Referans V_{s30} zemin koşulu için elde edilmiş ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

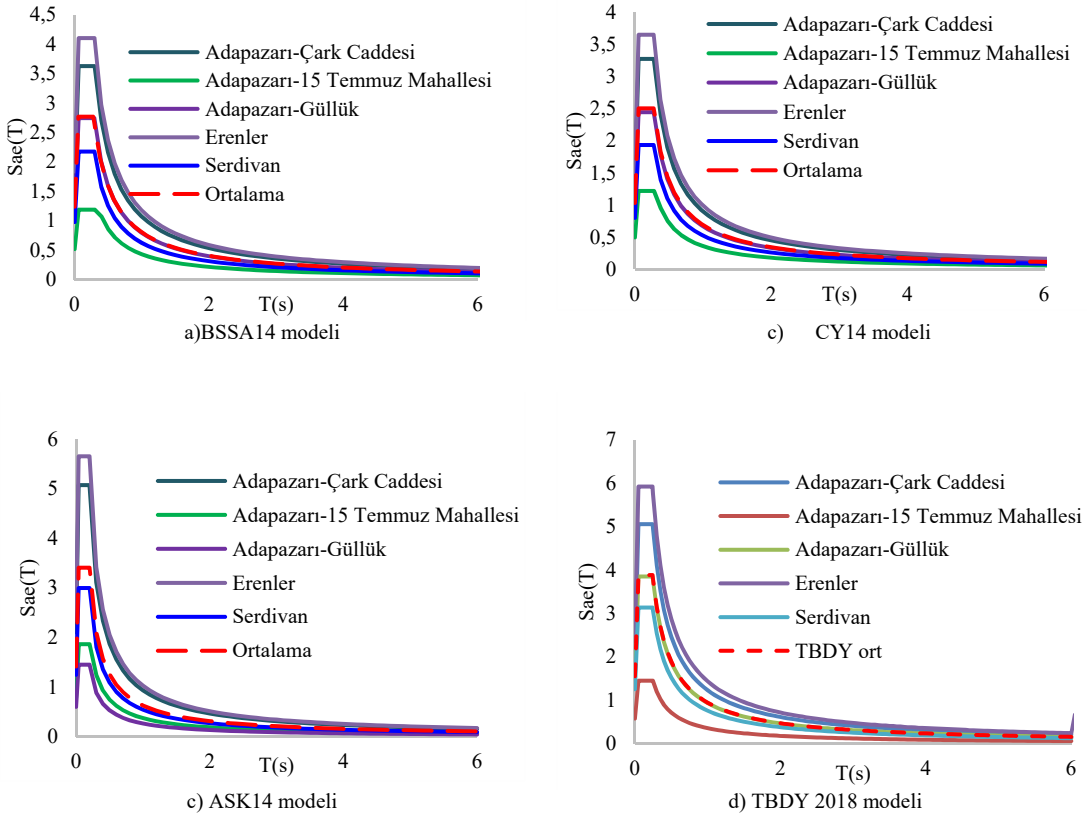
Şekil 10 incelendiğinde, TBDY 2018 tasarım spektrumu ile yer hareketi tahmin denklemlerinin ortalamasından elde edilen spektrum eğrilerinin genel eğilim bakımından birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Her iki eğri de kısa periyot bölgesinde maksimum spektral ivme değerlerine ulaşmakta, periyot arttıkça ise benzer şekilde azalmaktadır. Bu durum, seçilen NGA-West2 yer hareketi tahmin denklemlerinin referans kaya koşulunda Sakarya ili için yönetmelik spektrumunu genel olarak temsil edebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, TBDY 2018 spektrumunun özellikle kısa periyot bölgesinde (yaklaşık 0,2–1,0 s aralığında) yer hareketi tahmin denklemleri ortalamasına göre bir miktar daha yüksek spektral ivme değerleri ürettiği görülmektedir. Bu farklılık, TBDY 2018'in tasarım açısından güvenliği esas alan yaklaşımı ile yer hareketi tahmin denklemlerinin olasılıksal ortalama davranışı temsil etmesinden kaynaklanabilir.

Orta ve uzun periyot bölgelerinde ise iki eğri arasındaki fark belirgin şekilde azalmakta ve spektrumların büyük ölçüde birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu sonuç, referans kaya koşulunda kullanılan yer hareketi tahmin denklemlerinin Sakarya ili için TBDY 2018 ile uyumlu bir tehlike seviyesi sunduğunu göstermektedir.

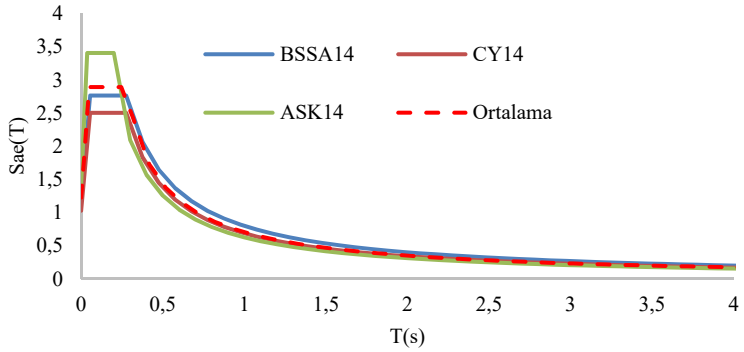
3.3. Bağıl Büyütme Faktörü

Bağıl büyütme faktörü olarak Çizelge 1'de yer alan Midorikawa [7], Joyner ve Fumal [6] ve Borcherdt ve arkadaşları [33] önerdiği bağıl büyütme bağıntılarından elde edilmiş olan kat sayıların ortalaması kullanılmıştır. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan spektrum eğrileri Şekil 11'de verilmiştir.

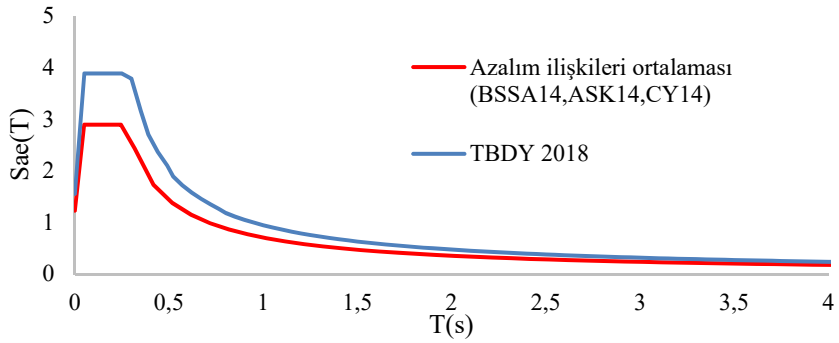


Şekil 11. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 11'de elde edilmiş olan yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilmiş ortalama spektrum eğrileri Şekil 12'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



a) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması



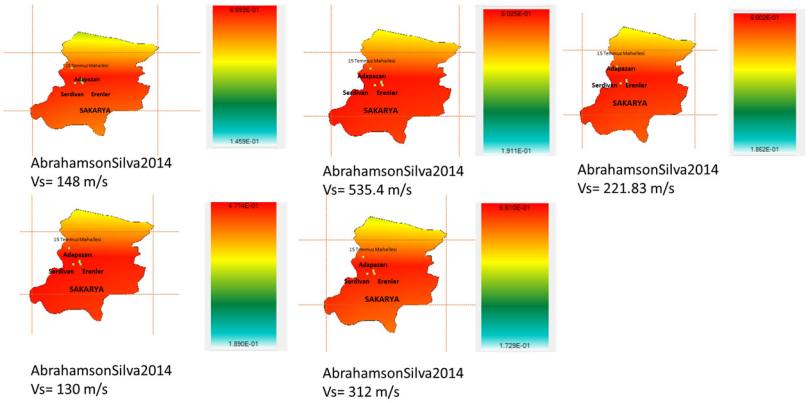
b) Yer hareketi tahmin denklemlerinden elde edilen ortalama spektrum eğrilerinin TBDY 2018 ile karşılaştırılması

Şekil 12. Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış olan ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Ampirik bağıl büyütme yöntemleri ile elde edilen spektrumların özellikle kısa periyot bölgesinde TBDY 2018 spektrumundan sapma göstermesi, yerel zemin etkisinin yalnızca sabit büyütme katsayıları ile temsil edilmesinin bazı durumlarda yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Bu nedenle çalışmanın sonraki aşamasında, doğrusal olmayan saha terimlerini içeren yer hareketi tahmin denklemlerinde sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak analizler tekrarlanmış ve yerel zemin etkisinin daha fiziksel temelli bir yaklaşımla değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

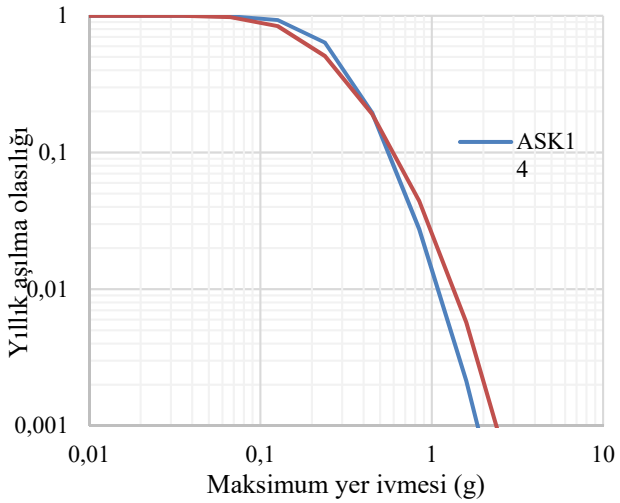
3.4. V_{s30} Hızına Göre Özel Çözüm

Yapılan hesaplamalar sonucunda 5 nokta için TBDY 2018'e en yakın sonuç veren model ASK14 olduğundan 5 farklı nokta için zemin raporundan elde edilen V_{s30} hızları için 5 farklı analiz gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda elde edilen sismik tehlike haritaları Şekil 13'te sunulmuş ve PGA, S(0.2) ve S(1) hızları 5 bölge için Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 13. Ölçülmüş V_{s30} zemin hızının tanımlandığı sismik tehlike haritaları

Ölçülmüş V_{s30} zemin hızının ve referans zemin hızının tanımlandığı analiz sonucunda elde edilen sismik tehlike eğrileri Şekil 14'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Analizler sonucunda Referans zemin koşulunda DD-2 için daha yüksek yer ivmesi meydana gelmektedir.



Şekil 14. ASK14 modeli için tehlike eğrilerinin karşılaştırılması

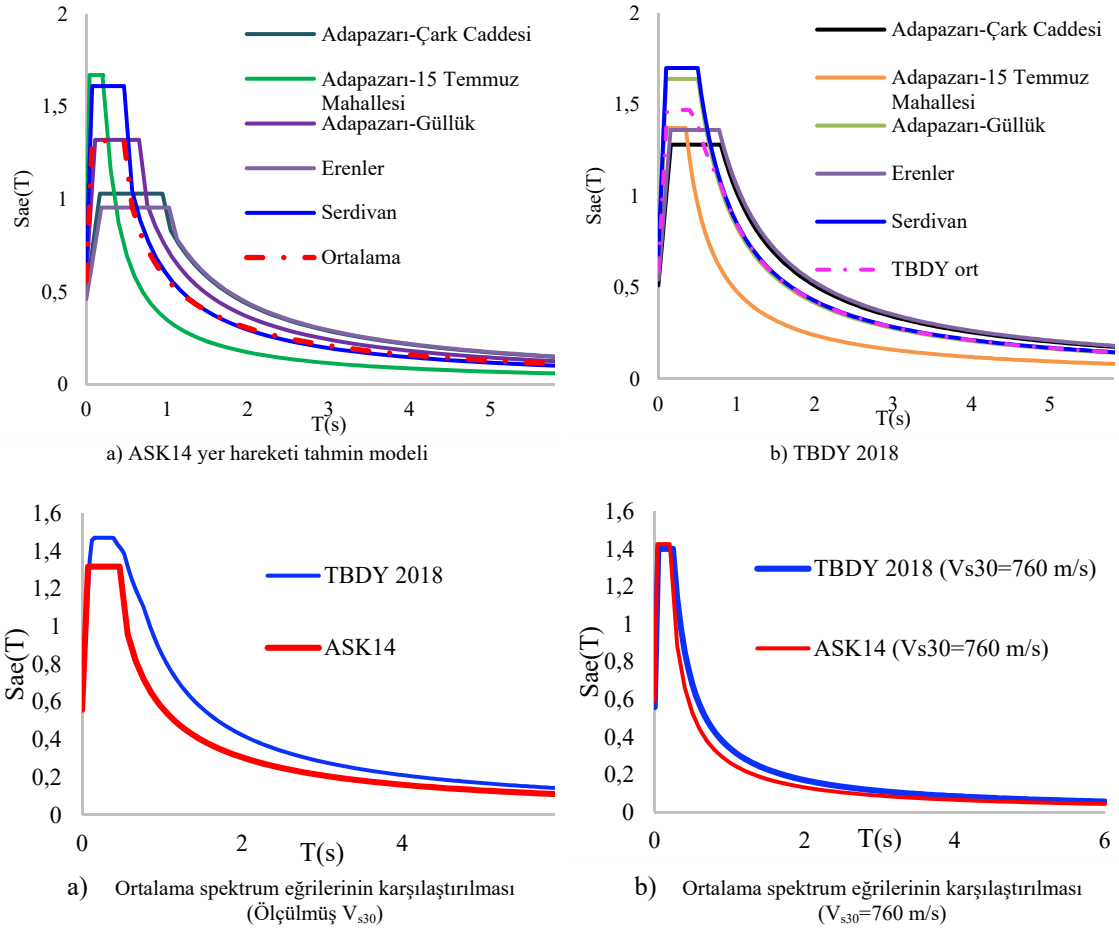
Referans zemin koşulu dikkate alındığında, ASK14 modeli için 5 farklı noktada okunan PGA S(0.2) ve S(1) değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Referans zemin koşulu için ve büyütme faktörlerinin dikkate alındığı PGA S(0.2) ve S(1) değerleri

Referans zemin hızı için sonuçlar						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA (DD-2)	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	760	ZB	ASK14	0,597	1,44	0,265
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	760	ZB	ASK14	0,555	1,32	0,255
Adapazarı-Güllük	760	ZB	ASK14	0,602	1,45	0267
Erenler	760	ZB	ASK14	0,606	1,46	0,268
Serdivan	760	ZB	ASK14	0,607	1,46	0,269
Ölçülmüş yer hızı için sonuçlar						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	ASK14	0,493	1,03	0,868
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	ASK14	0,620	1,67	0,349
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	ASK14	0,584	1,32	0,731
Erenler	130	ZE	ASK14	0,462	0,955	0,881
Serdivan	312	ZD	ASK14	0,637	1,61	0,592
AFAD Deprem Tehlike Haritası Sonuçları						
	V_{s30}[m/s]	Zemin sınıfı	Yer hareketi tahmin denklemi modeli	PGA	S_S(0,2 s)	S_1(1 s)
Adapazarı-Çark Caddesi	148	ZE	TBDY 2018	0,512	1,281	1,019
Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi	535,4	ZC	TBDY 2018	0,549	1,372	0,478
Adapazarı-Güllük	221,83	ZD	TBDY 2018	0,656	1,64	0,831
Erenler	130	ZE	TBDY 2018	0,544	1,361	1,056
Serdivan	312	ZD	TBDY 2018	0,68	1,70	0,853

Referans kaya koşulunda gerçekleştirilen analizlerde çalışma noktaları arasında benzer tehlike düzeyleri elde edilirken, sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin analize dâhil edilmesiyle spektral ivme taleplerinin önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Özellikle ZE sınıfındaki yumuşak zeminlerde PGA değerlerinde sınırlı bir azalma gözlenmesine karşın, 1,0 s spektral ivmeleri referans kaya koşuluna göre yaklaşık üç kata varan artış göstermiştir. Bu durum, doğrusal olmayan saha etkisinin yüksek frekanslı hareketleri sınırlandırırken uzun periyot bileşenlerini büyütmesiyle açıklanabilir. Ayrıca, ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak elde edilen sonuçların TBDY 2018 tasarım spektrumları ile genel olarak benzer eğilim göstermesi, modern yer hareketi tahmin denklemlerinin doğrusal olmayan saha terimlerinin yerel zemin davranışını fiziksel olarak temsil edebildiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sahaya özgü ölçülmüş V S30 verilerinin bulunduğu durumlarda doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin kullanılmasının, yerel zemin etkisinin daha gerçekçi değerlendirilmesine katkı sağlayacağını göstermektedir.

Geoteknik raporlardan elde edilmiş ölçülmüş V_{s30} hızları kullanılarak 5 nokta için elde edilen her bir PGA, S(0.2) ve S(1) değerleri TBDY2018'e uyarlanmış ve AFAD Deprem tehlike haritalarından zemin sınıflarına göre elde edilen verilerle karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 15).



a) ASK14 yer hareketi tahmin modeli

b) TBDY 2018

a) Ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması (Ölçülmüş V_{s30})

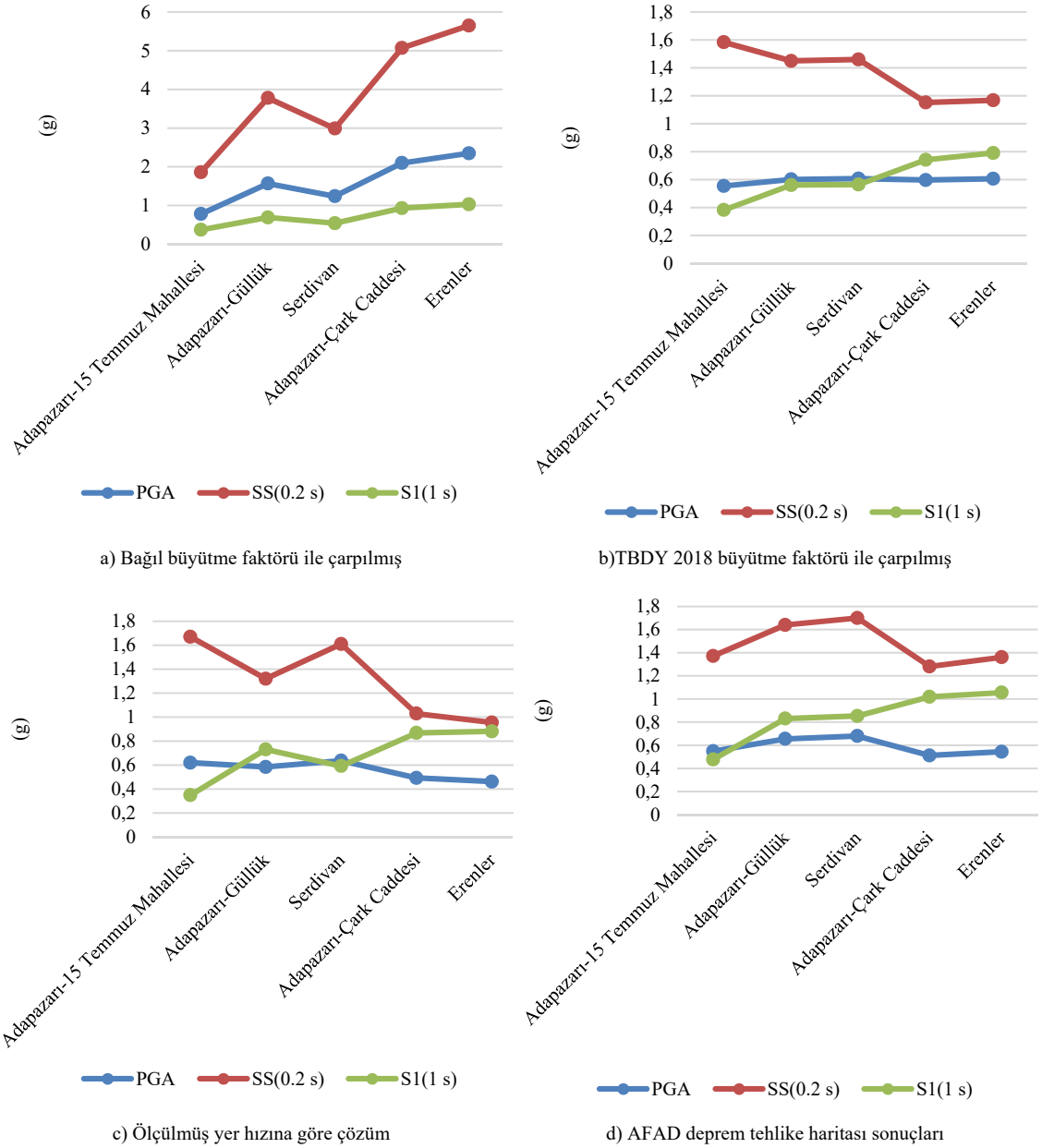
b) Ortalama spektrum eğrilerinin karşılaştırılması (V_{s30}=760 m/s)

Şekil 15. Spektrum eğrilerinin karşılaştırılması

Referans kaya koşulunda elde edilen sonuçlar ile sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler birlikte değerlendirildiğinde, ASK14 modelinin her iki durumda da TBDY 2018 tasarım spektrumunun genel eğilimini başarılı şekilde temsil ettiği görülmektedir. Ölçülmüş VS30 değerlerinin modele tanımlanmasıyla spektral talepler zemin özelliklerine bağlı olarak değişmekle birlikte, elde edilen spektrumların yönetmelik spektrumları ile uyumlu davranış sergilemesi, doğrusal olmayan saha terimlerinin yerel zemin etkisini fiziksel olarak temsil edebildiğini göstermektedir. Bu nedenle, sahaya özgü geoteknik verilerin mevcut olduğu durumlarda doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi

tahmin denklemlerinin kullanılması, yerel zemin etkisinin değerlendirilmesinde daha güvenilir bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

Büyütme faktörlerinin etkisinin bölgeler bazında yüksek zemin sınıfı olandan düşük zemin sınıfına göre görselleştirilmiş grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16a. referans zemin koşulu için CRISIS yazılımında yapılmış olan tehlike analizi sonuçlarının bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış deprem tehlikesi verilerini, Şekil 16b. TBDY2018 zemin büyütme faktörleri ile çarpılmış deprem tehlikesi verilerini, Şekil 16c. zemin yer hızları dikkate alınarak elde edilen deprem tehlikesi verilerini, Şekil16d. ise zemin sınıfları dikkate alınarak AFAD Deprem Tehlike Haritalarından alınan verileri ifade etmektedir.



a) Bağıl büyütme faktörü ile çarpılmış

b)TBDY 2018 büyütme faktörü ile çarpılmış

c) Ölçülmüş yer hızına göre çözüm

d) AFAD deprem tehlike haritası sonuçları

Şekil 16. Büyütme faktörlerinin karşılaştırılması

Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi V_{s30}= 535.4 m/s zemin hızına sahip ve diğer bölgelere oranla daha iyi zemin yapısına sahiptir. Analizi sonuçları incelendiğinde, S1 değerinin de zemin sınıfına bağlı olarak daha düşük olması beklenmektedir. Erenler bölgesi ise V_{s30}= 130 m/s zemin hızına sahip ve diğer bölgelerle karşılaştırıldığında daha zayıf zemin yapısına sahiptir. Analizi sonuçları incelendiğinde, S1 değerinin de

zemin sınıfına bağlı olarak daha yüksek beklenmektedir. Şekil 16'da Adapazarı-15 Temmuz Mahallesi için S1 değerlerinin azaldığı, Erenler bölgesi için ise arttığı görülmektedir.

PGA ve S(0.2) değerleri arasındaki farklılıklar zemin hızlarının birbirine yakın olması ve noktaların fay kaynağına uzaklıklarının farklı olması nedeniyle Şekil 16 b-c-d'de birbirine yakın ancak farklı şekilde seyrettiği görülmüştür. Şekil 16 a'da ise zemin büyütme etkisi her bir periyod için lineer artırıldığından farklılıklar gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, ölçülmüş V_{s30} değerlerinin doğrudan yer hareketi tahmin denklemlerinin doğrusal olmayan saha terimlerinde kullanıldığı analizlerin, yerel zemin etkisinin temsilinde ampirik büyütme bağıntılarına göre daha kapsamlı bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Ampirik bağıntılar zemin büyütmesini sabit veya yarı ampirik katsayılarla ifade ederken, doğrusal olmayan saha modelleri zemin davranışını V_{s30} ile birlikte yer hareketi şiddetine bağlı olarak değerlendirmektedir. Bu yaklaşım, özellikle yumuşak zemin koşullarında gözlenen doğrusal olmayan zemin davranışının daha gerçekçi temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da, sahaya özgü ölçülmüş VS30 değerlerinin kullanıldığı analizlerin yerel zemin etkisini daha tutarlı şekilde yansıttığını göstermiş olup, literatürde önerilen doğrusal olmayan saha modeli yaklaşımını desteklemektedir.

4. TARTIŞMA

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, yerel zemin koşullarının Sakarya ili özelinde deprem tehlikesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Referans kaya koşulu (VS30=760 m/s) esas alınarak gerçekleştirilen analizlerde beş çalışma noktası için PGA değerleri 0,555–0,607 g, S_S değerleri 1,32–1,46 g ve S_1değerleri 0,255–0,269 g aralığında hesaplanmış olup, çalışma noktaları arasında oldukça sınırlı farklılıklar gözlenmiştir. Buna karşın, sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin kullanılmasıyla birlikte özellikle uzun periyot spektral ivmelerinde belirgin değişimler meydana gelmiştir. Örneğin, ZE sınıfındaki Çark Caddesi noktasında S_1 değeri 0,265 g'den 0,868 g'ye, Erenler noktasında ise 0,268 g'den 0,881 g'ye yükselmiş olup, yaklaşık 3,3 katlık bir artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde Güllük ve Serdivan bölgelerinde de S_1 değerleri sırasıyla 0,267 g'den 0,731 g'ye ve 0,269 g'den 0,592 g'ye yükselmiştir. Buna karşılık PGA değerlerinde aynı oranda bir artış gözlenmemiş, hatta ZE sınıfındaki bölgelerde doğrusal olmayan saha davranışının etkisiyle 0,597 g'den 0,493 g'ye ve 0,606 g'den 0,462 g'ye düşüşler meydana gelmiştir. Ölçülmüş V_{S30} değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile TBDY 2018 tasarım spektrumları karşılaştırıldığında, her iki yaklaşımın benzer eğilim sergilediği ancak yönetmelik spektrumlarının genel olarak daha konservatif sonuçlar verdiği görülmektedir. Örneğin, Çark Caddesi için ASK14 modeli ile 0,868 g olarak hesaplanan S_1 değeri, TBDY 2018'de 1,019 g; Güllük bölgesinde 0,731 g ve 0,831 g; Serdivan'da ise 0,592 g ve 0,853 g olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yönetmeliğin güvenli tasarım yaklaşımı doğrultusunda daha yüksek spektral talepler öngördüğünü, ancak genel spektral eğilim bakımından yer hareketi tahmin modeli ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çalışmada ayrıca, bağıl büyütme faktörleri kullanılarak elde edilen spektrumların özellikle kısa periyot bölgesinde TBDY 2018 tasarım spektrumlarının altında kaldığı, buna karşılık sahaya özgü ölçülmüş V_{S30} değerlerinin doğrudan ASK14 modeline tanımlanmasıyla elde edilen spektrumların yönetmelik spektrumlarına daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu durum, doğrusal olmayan saha terimlerini içeren güncel yer hareketi tahmin denklemlerinin yerel zemin davranışını yalnızca sabit büyütme katsayıları kullanan ampirik yaklaşımlara göre daha gerçekçi temsil edebildiğini göstermektedir. Bu bulgu, doğrusal olmayan saha büyütmesinin V_{S30} ve yer hareketi şiddetine bağlı olarak modellenmesinin önemini vurgulayan Seyhan ve Stewart [9], Abrahamson ve arkadaşları [20] ve Kuncar [37] tarafından önerilen yaklaşımlarla da uyumludur.

Elde edilen sonuçlar, Sakarya ilinin özellikle Adapazarı merkezinde kısa mesafelerde dahi önemli zemin farklılıklarının bulunduğunu ve bu farklılıkların deprem taleplerini önemli ölçüde değiştirebildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yoğun yapılaşmanın bulunduğu bölgelerde standart bölgesel tehlike değerlendirmeleri yerine, sahaya özgü ölçülmüş geoteknik veriler kullanılarak gerçekleştirilen olasılıksal deprem tehlike analizlerinin tercih edilmesi, hem mühendislik yapılarının güvenli tasarımı hem de kentsel dönüşüm ve afet risk yönetimi uygulamaları açısından daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Burucu, Ö.N.T. (2019). Serdivan/Sakarya bölgesinin yerbilimleri verilerinin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak yorumlanması. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
2. Koç, D.E. (2018). Sakarya'nın bitki örtüsü özellikleri. (Ed. İkiel, C.), *Sakarya'nın Fiziki, Beşeri ve İktisadi Coğrafya Özellikleri,* Sakarya Üniversitesi Yayınları, Sakarya, 289-315.
3. AFAD, (20259. *AFAD deprem kataloğu.* https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu, Erişim tarihi: 14 Eylül 2025.
4. AFAD, (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmî Gazete, Sayı: 30364 (Mükerrer), Ankara.
5. Borcherdt, R.D. (1994) Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and justification). *Earthquake Spectra, 10*(4), 617-653.
6. Joyner, W.B. & Fumal, T.E. (1984). Use of measured shear-wave velocity for predicting geological site effects on strong motion. *8th World Conf. on Earthq. Eng.,* 777-783
7. Midorikawa, S. (1987). Prediction of isoseismal map in the Kanto plain due to hypothetical earthquake. *Journal of Structural Engineering, 33B*, 43-48.
8. Mazanec, M., Valenta, J. & Málek, J. (2024). Does - V S30 reflect seismic amplification ? Observations from the West Bohemia seismic network. *Natural Hazards, 120*(13), 12181-12202.
9. Boore, D.M., Stewart, J.P., Skarlatoudis, A.A., Seyhan, E., Margaris, B., Theodoulidis, N., Scordilis, E., Kalogeras, I., Klimis, N. & Melis, N.S. (2021). A ground-motion prediction model for shallow crustal earthquakes in greece. *Bulletin of the Seismological Society of America, 111*(2), 857-874.
10. NGA-*West Pacific Earthquake Engineering Research Center.* https://peer.berkeley.edu/nga-west, Erişim tarihi: 29 Aralık 2022.
11. Bozorgnia, Y., Abrahamson, N.A., Atik, L. Al, Ancheta, T.D., Atkinson, G.M., Baker, J.W., Baltay, A., Boore, D.M., Campbell, K.W., Chiou, B.S.J., Darragh, R., Day, S., Donahue, J., Graves, R.W., Gregor, N., Hanks, T., Idriss, I.M., Kamai, R., Kishida, T., Kottke, A., Mahin, S.A., Rezaeian, S., Rowshandel, B., Seyhan, E., Shahi, S., Shantz, T., Silva, W., Spudich, P., Stewart, J.P., Watson-Lamprey, J., Wooddell, K. & Youngs, R. (2014). NGA-West2 research project. *Earthquake Spectra, 30*(3), 973-987.
12. Stewart, J.P. & Seyhan, E. (2013). Semi-empirical nonlinear site amplification and its application in NEHRP site factors. *PEER Repor,* 59.
13. Darzi, A., Halldorsson, B., Cotton, F. & Rahpeyma, S. (2024). Nationwide frequency-dependent seismic site amplification models for Iceland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 183*(May), 108798.
14. Ilhan, O., Muratoğlu, G., Askan, A. & Taciroğlu, E. (2025). An initial velocity model based on V S30 for the region affected by the February 6, 2023 Turkiye earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering, 23*(9), 3569-3587
15. Silahtar, A., Budakoğlu, E., Kafadar, Ö. & Şenkaya, M. (2026). Characterizing soil dynamic parameters through ambient seismic noise in the Sakarya region of the north anatolian fault system. Natural Hazards, 122(9), 1-29.
16. Ozcep, T., Ozcep, F. & Ozel, O. (2013). V S 30, site amplifications and some comparisons: The Adapazari (Turkey) case. *Physics and Chemistry of the Earth, 63*, 92-101.
17. Ordaz, M., Aguılar, A. & Arboleda, J. (2007). CRISIS2007: Program for computing seismic hazard. *Instituto de Ingeniería,* Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico.
18. Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America, 58*(5), 1583-1606.
19. Akkar, S., Kale, Ö., Yakut, A. & Çeken, U. (2018). Ground-motion characterization for the probabilistic seismic hazard assessment in Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering, 16*(8), 3439-3463.
20. Abrahamson, N.A., Silva, W.J. & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1025-1055.
21. Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E. & Atkinson, G.M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1057-1085.
22. Chiou, B.S.J. & Youngs, R.R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra, 30*(3), 1117-1153.
23. Bıçak, Ö. (2018). Olasılıksal sismik tehlike analizi ve sahaya özel deprem spektrumu geliştirilmesi. *Yüksek lisans tezi.* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

24. Hamdache, M., Peláez, J.A., Talbı, A. & Mobarkı, M. (2010). Evaluation of probabilistic seismic hazard in Northern Algeria: A contribution to the Algerian building code. *5ème Symposium International sur la Construction en Zone Sismique (SICZS 2010),* Chlef, Algeria.
25. İnce, Y. (2016). Kahramanmaraş ve çevresinin olasılıksal sismik tehlike analizi. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 47.
26. Ulutaş, H. (2012). Van ili sismik tehlike analizi. *Yüksek lisans tezi.* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
27. Karaca, H. (2017). Güncel veriler ve olasiliksal sismik tehlike analizi kullanarak Eskişehir için sismik tehlike haritasi ve ivme eğrileri elde edilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32*(1), 265-273.
28. Harman, E. ve Küyük, H.S. (2016). Sakarya ili için olasılığa dayalı sismik tehlike analizi. *Sakarya University Journal of Science, 20*(1), 23-31.
29. Zülfikar, A.C., Okuyan Akcan, S., Yeşilyurt, A., Eröz, M. ve Cimilli, T. (2021). Kritik enerji tesislerinin deprem risk değerlendirmesinde farklı hasargörebilirlik fonksiyonlarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36*(4), 1019-1032.
30. Mert, A. (2024). İzmit Körfezindeki limanlarda deprem yakın saha etkilerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39*(4), 1015-1026.
31. Akkar, S., Duman, T., Ergintav, S., Tuba, F., Kartal, R.F. ve Tekin, S. (2014). *Türkiye sismik tehlike haritasi proje dokümanı*.
32. Poisson, S.D. (1838). *Recherches sur la probabilitedes jugements en matieres criminelles et matiere civile.* Bachelier, 415.
33. Borcherdt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T. & Gibbs, J. (1991), Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground shaking in the San Francisco bay region. *California, 4th International Conference on Seismic Zonation, Stanford,* California, USA, 545-552.
34. Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering.* Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653.
35. QGIS Development Team, (2022). *QGIS geographic information system.* https://www.qgis.org, Erişim tarihi: 14 Eylül 2026.
36. WoessneR, J., Danciu, L., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M.B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R.W., Rovida, A.N., Sesetyan, K. & Stucchi, M. (2015). The 2013 European seismic hazard model: Key components and results. *Bulletin of Earthquake Engineering, 13*(12), 3553-3596.
37. Kuncar, F., Bradley, B.A. & De La Torre, C.A. (2026). Validating VS30-based site amplification factors in hybrid broadband ground-motion simulation of small-magnitude earthquakes in New Zealand. *Earthquake Spectra, 42*(1), e70005