Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

HATAY BÖLGESİNDE YEREL ZEMİN ETKİLERİNİN HVSR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF LOCAL SITE EFFECTS IN THE HATAY REGION USING THE HVSR METHOD

Erdal Emirhan ÖVÜNÇ[1], Selçuk TOPRAK[2], Batuhan KÜLSOY[3]

ÖZET

Türkiye'nin güneyinde sismik açıdan en aktif bölgelerden birinde yer alan Hatay ili, geçtiğimiz yıllarda meydana gelen birçok depremden etkilenmiş ve önemli hasarlar yaşamıştır. Zemin büyütmesini de belirleyen yerel zemin koşulları, deprem sırasında oluşan hasarın dağılımında önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, bölgedeki yerel zemin etkilerinin belirlenmesi ve sismik duyarlılığın ortaya konulması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Hatay bölgesinin yerel zemin etkileri deprem kayıtları kullanılarak literatürde yaygın biçimde kullanılan Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) yöntemi ile incelenmiştir. Düşük hakim frekans ve yüksek H/V tepe genliği değerleri genellikle yumuşak zemin koşullarını ve daha derin anakaya seviyelerini işaret etmektedir. Elde edilen hakim frekans ve H/V tepe genliği değerleri kullanılarak literatürde farklı bölgeler ve zemin koşulları için önerilmiş çeşitli ampirik bağıntılar yardımıyla V_{S30} değerleri ve anakaya derinliği tahmin edilmiştir. Ayrıca, farklı ampirik bağıntılardan elde edilen V_{S30} değerleri, mevcut ölçülmüş değerler ile karşılaştırılarak bağıntıların hassasiyeti ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın, Hatay bölgesinde yerel zemin etkilerinin belirlenmesine ve elde edilen sonuçların sismik tehlike değerlendirmeleri ile mikrobölgeleme çalışmalarına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Anakaya Derinliği, Hakim Frekans, Hatay, HVSR, Zemin Büyütmesi*

ABSTRACT

Hatay province, located in one of the most seismically active regions of southern Turkey, has been affected by numerous earthquakes in recent years and has experienced significant damage. Local soil conditions, which also influence soil amplification, are among the important factors affecting the distribution of earthquake-induced damage. Therefore, determining local site effects and assessing seismic susceptibility in the region are of great importance. In this study, local site effects in the Hatay region were investigated using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method, which is widely used in the literature, based on earthquake records. Low predominant frequencies and high H/V peak amplitude values generally indicate soft soil conditions and deeper bedrock levels. Using the obtained predominant frequency and H/V peak amplitude values, VS30 and bedrock depth were estimated through various empirical relationships proposed in the literature for different regions and soil conditions. In addition, VS30 values obtained from different empirical relationships were compared with available measured values to evaluate the accuracy and applicability of these relationships. This study aims to contribute to the identification of local site effects in the Hatay region and to seismic hazard assessments and microzonation studies based on the obtained results.
Keywords: *Bedrock Depth, Hatay, HVSR, Predominant Frequency, Soil Amplification*

[1] Lisansüstü Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, e.ovunc2020@gtu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Profesör Doktor, MARTEST-Marmara Afetlerle Baş Edebilir Yapılar için Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kocaeli, Türkiye, stoprak@gtu.edu.tr
[3] Lisansüstü Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, b.kulsoy2019@gtu.edu.tr

1. GİRİŞ

Hatay bölgesi, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun güney ucu, Ölü Deniz Fay Zonu'nun kuzey ucu ve Kıbrıs–Antakya Transform Fayı'nın kesişim alanında yer almaktadır (Över vd., 2004). Söz konusu fay etkileşimi tarih boyunca tekrarlayan büyük depremlere neden olmuştur. 1822'de Ms 7.0 büyüklüğündeki Halep depremi bölgede on binlerce can kaybına neden olmuş (Ambraseys, 1989), yaklaşık elli yıl sonra 1872'de Amik Havzası altındaki fay kolu üzerinde Ms 7.2 büyüklüğünde ikinci bir yıkıcı deprem meydana gelmiştir (Akyüz vd., 2006). Bölgenin yüksek sismik tehlikesi, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Mw 7.7 Pazarcık ve Mw 7.6 Elbistan depremleri ile 20 Şubat 2023 tarihli Mw 6.4 Yayladağı depremi sırasında bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Şubat 2023 Kahramanmaraş deprem dizisinin, 11 ili kapsayan etki alanında su ve atık su sistemleri, boru hatları, ulaşım ağları, elektrik ve haberleşme altyapılarında yaygın hasara ve hizmet kesintilerine neden olduğu ve bunların başlıca nedenleri arasında sıvılaşma, şev duraysızlığı ve fay kırılmasının yer aldığı belirtilmiştir (Toprak vd., 2026b). Ayrıca, depremler çevre şehirlerdeki temel içme suyu kaynaklarında bulanıklığa neden olarak içme suyu temini ve arıtma süreçlerinde geçici aksamalara yol açmıştır (Toprak vd., 2026a). Bu hasarlara ek olarak, 20 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Mw 6.4 büyüklüğündeki Yayladağı depremi, 6 Şubat depremleri sonrasında bölgede oluşan mevcut yapılardaki yapısal hasarları daha da artırmıştır (Aktan ve Yonar, 2024). Hatay, depremden etkilenen 11 il arasında en yüksek bina göçme oranlarının görüldüğü illerden biri olmuş (Yılmaz vd., 2024) ve Nisan 2023 tarihli hasar tespitlerine göre il genelinde 13.517 bina yıkık olarak kaydedilmiştir (Anadolu Ajansı, 2023). Hatay Havalimanı'ndaki pist hasarı uçuşların geçici olarak durmasına neden olurken, İskenderun kıyısında zemin ve bina oturmaları, denize doğru yanal yayılmalar, kıyı altyapısı hasarları ve taşkınlar gözlenmiştir (Toprak vd., 2026b; Bassal vd., 2024). Amik Ovası, Demirköprü, Arsuz, Kırıkhan ve Dörtyol'da sıvılaşma ve yüzey deformasyonları, Antakya ile Altınözü çevresinde ise şev hareketleri ve heyelanlar raporlanmıştır (Bol vd., 2024; Demir vd., 2025).

Kuvvetli yer hareketi kayıtları, bölgedeki hasarın sadece deprem büyüklüğü ve uzaklığı ile açıklanamayacağını, yerel zemin koşullarının da hasarın mekansal dağılımında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Antakya'da kaydedilen bazı yer hareketlerinin tepki spektrumlarının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan tasarım spektrumlarını aştığı görülmüştür (Alpyürür ve Ulutaş, 2024). Antakya'daki jeolojik, geoteknik ve kuvvetli yer hareketi verilerini birlikte değerlendiren Karray vd. (2024), olumsuz yerel zemin ve basen koşullarının bulunduğu alanlarda, benzer sarsıntı düzeyine maruz kalan daha elverişli zeminlere kıyasla daha yüksek hasar seviyeleri gözlendiğini bildirmiştir.

Türkiye'de yerel zemin koşullarının deprem hasarı üzerindeki etkisi, 2020 Sisam ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde açık biçimde gözlenmiştir. 30 Ekim 2020 Sisam depreminde fay kırığı İzmir'e yaklaşık 65-75 km uzakta olmasına rağmen hasarın İzmir–Bayraklı'da yoğunlaşması, derin ve yumuşak alüvyal zeminlerin hasar dağılımıyla ilişkisini göstermiştir (Çetin vd., 2022). Benzer şekilde, 6 Şubat 2023 depremlerinde Antakya'daki yıkımın yoğunlaştığı kesimlerde düşük kayma dalgası hızına sahip yumuşak ve gevşek alüvyonların bulunması, zemin büyütmesinin bölgedeki deprem hasarını artıran önemli etkenlerden biri olduğunu göstermiştir (Gücek vd., 2023). Bu örnekler, farklı zemin profillerine sahip sahaların aynı deprem sırasında önemli ölçüde farklı frekans içeriği, genlik ve sarsıntı süresine maruz kalabileceğini göstermektedir.

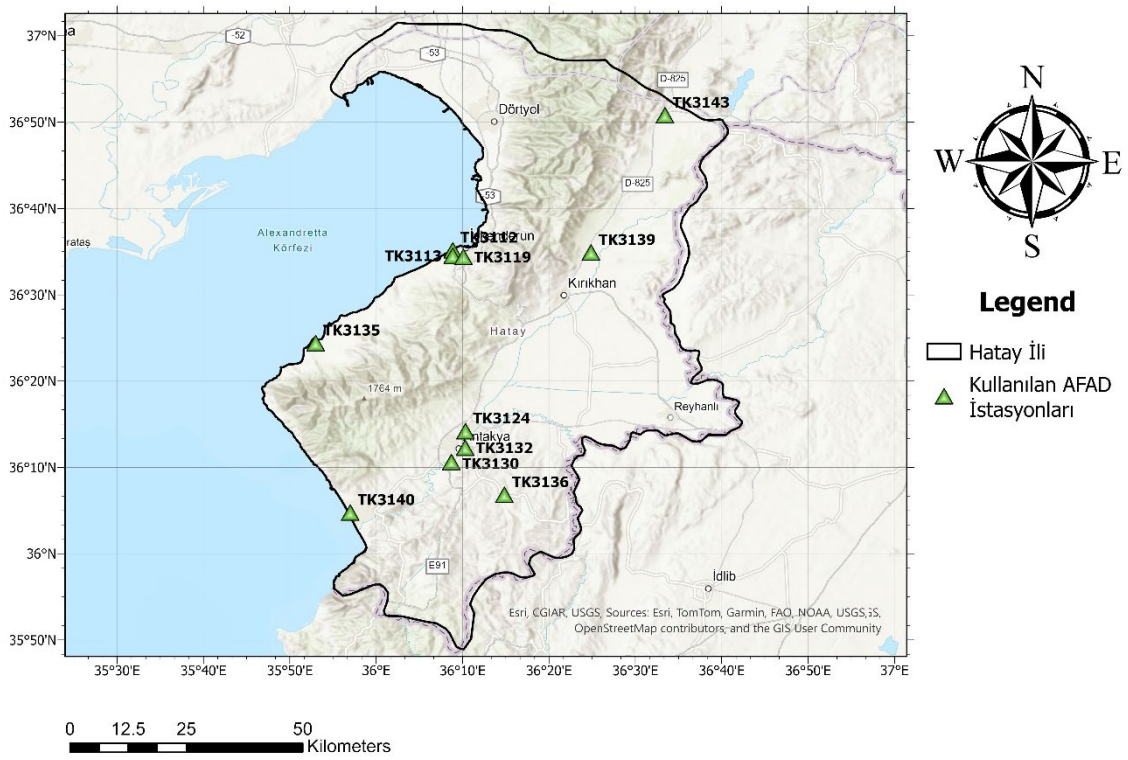
Yerel zemin tepkisinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri, Nakamura (1989) tarafından önerilen yatay/düşey spektral oran (HVSR) yöntemidir. Yöntem, tek bir istasyonda kaydedilen yatay bileşenlerin Fourier genlik spektrumlarının düşey bileşenin spektrumuna oranlanmasına dayanmaktadır. Elde edilen H/V eğrisindeki belirgin tepe frekansı sahanın temel rezonans frekansı (f_0), bu frekanstaki spektral oran ise H/V tepe genliği (A_0), olarak değerlendirilmektedir (Nakamura, 1989).

HVSR yöntemi Türkiye'nin farklı bölgelerinde hem mikrotremor hem de deprem kayıtlarına uygulanmıştır. Eskişehir Havzası'nda 318 tek istasyon mikrotremor ölçümü kullanılarak temel rezonans frekanslarının dağılımı incelenmiş ve havzanın anakaya geometrisi araştırılmıştır (Tün vd., 2016). Doğu Pontidler'de 27 kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilen 103 deprem kaydı Nakamura yöntemiyle değerlendirilerek hakim frekans ve H/V tepe genliği değerleri elde edilmiştir (Bayrak, 2022). Hatay–Samandağ'da ise 3140 numaralı istasyona ait 67 deprem kaydı kullanılarak ortalama HVSR eğrisi ve istasyonun hakim frekansı hesaplanmıştır (Selvaraj ve Kumar, 2024). HVSR analizinden elde edilen f_0 ve bazı bağıntılarda A_0 değerleri, ampirik ilişkiler yardımıyla V_{S30}'un yaklaşık olarak tahmin edilmesinde de kullanılabilmektedir. Literatürde yalnızca f_0'ı veya f_0 ile A_0'ı birlikte kullanan farklı V_{S30} bağıntıları geliştirilmiştir (Ghofrani ve Atkinson, 2014; Hassani ve Atkinson, 2016; Stanko ve Markušić, 2020). Benzer şekilde, HVSR analizinden elde edilen temel rezonans frekansı (f_0), ampirik ilişkiler yardımıyla anakaya derinliğinin (D_b) yaklaşık olarak tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir. Literatürde anakaya derinliğini f_0'a bağlı olarak ifade eden farklı bölgesel bağıntılar geliştirilmiştir (Ibs-von Seht ve Wohlenberg, 1999; Delgado vd., 2000; Parolai vd., 2002; Tün vd., 2016; Büyüksaraç vd., 2023).

Bu çalışmada, Hatay ve yakın çevresindeki farklı yerel zemin koşullarını temsil eden 11 kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilmiş deprem verileri kullanılarak bölgenin dinamik zemin özellikleri araştırılmıştır. Her istasyon için en az beş deprem kaydı seçilmiştir. Veri seti $4.0 \leq Mw \leq 6.4$ büyüklük aralığındaki ve deprem-istasyon uzaklıkları 20–300 km arasında değişen deprem kayıtlarından oluşmaktadır. İstasyonlara ait ortalama HVSR eğrilerinden temel rezonans frekansı (f_0) ve H/V tepe genliği (A_0) belirlenmiş, ardından seçilen ampirik bağıntılar kullanılarak V_{S30} ve anakaya derinliği tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile elde edilen parametrelerin, Hatay'daki yerel zemin davranışının ortaya konulmasına ve gelecekteki sismik mikrobölgeleme çalışmalarına katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

Bu çalışma, Hatay ili sınırları ve yakın çevresinde bulunan 11 AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilen deprem verilerine dayanmaktadır. Analizlerde TK3112, TK3113, TK3119, TK3124, TK3130, TK3132, TK3135, TK3136, TK3139, TK3140 ve TK3143 kodlu istasyonlara ait kayıtlar kullanılmıştır. İstasyonların Hatay ili içerisindeki mekansal dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. İstasyonların kıyı kesimleri, Antakya çevresi, Amik Ovası ve ilin kuzey kesimleri gibi farklı jeolojik ve jeomorfolojik özelliklere sahip alanlarda bulunması, yerel zemin tepkisinin bölgesel olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır.

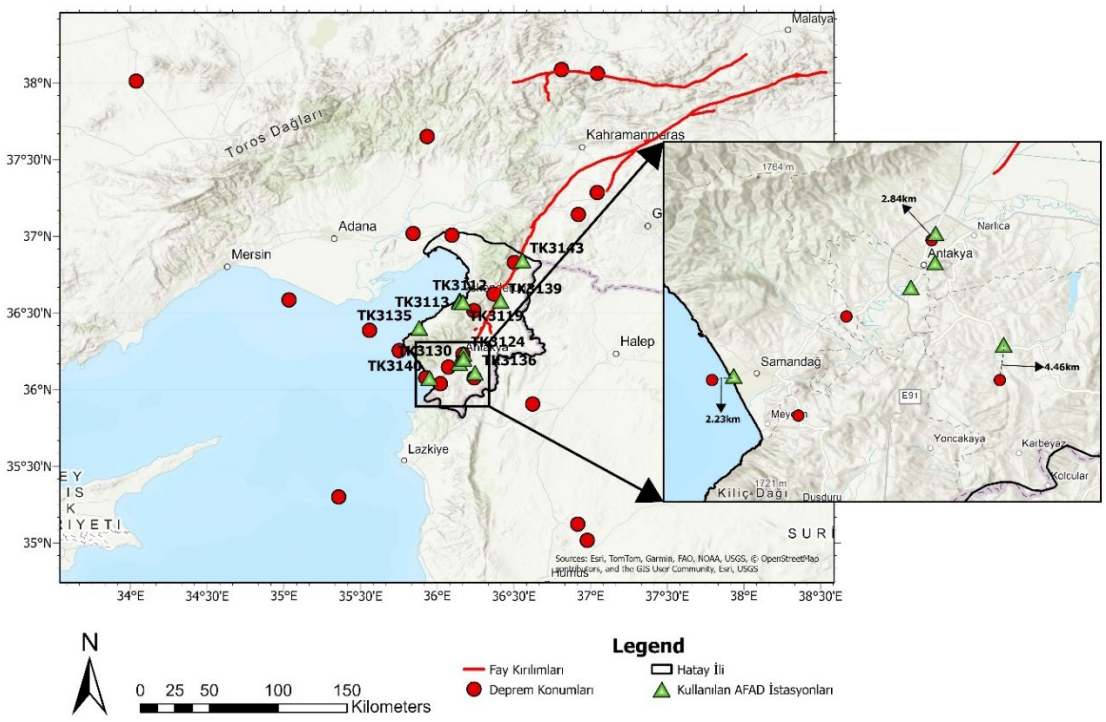


Şekil 1. Çalışmada kullanılan AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonlarının Hatay ili içerisindeki dağılımı

Yakın alan kayıtları, kaynak mekanizması ve yönlülük etkilerinin yanı sıra yüksek PGA–PGV düzeylerinde gelişebilen doğrusal olmayan zemin davranışının HVSR tepe frekansını değiştirebilmesi nedeniyle dikkatle kullanılmalıdır. Düşük büyüklüklü veya çok uzak depremler ise yetersiz sinyal düzeyi ve düşük sinyal/gürültü oranı oluşturabilecekleri için dikkatli biçimde kullanılması gerekmektedir. Benzer şekilde, yüksek büyüklüklü depremler istasyonda güçlü sarsıntı oluşturduğunda zemin rijitliğinin azalmasına ve rezonans frekansının daha düşük değerlere kaymasına neden olabileceğinden veri seçiminde sınırlandırılmalıdır.

Veri seti, büyüklükleri $4.0 \leq Mw \leq 6.4$ arasında değişen depremlere ait üç bileşenli kuvvetli yer hareketi kayıtlarından oluşturulmuştur. Kayıt seçiminde deprem ile kayıt istasyonu arasındaki uzaklığın 20–300 km arasında olması ve üç bileşenin analize uygun nitelikte bulunması esas alınmıştır.

Çalışmada kullanılan istasyonların depremlere göre konumları Şekil 2'de sunulmuştur. Şekil 2'deki büyütülmüş haritada gösterilen 20 km'den kısa deprem-istasyon uzaklıkları olası çok yakın alan etkisini azaltmak amacıyla ilgili istasyonlarda analize dahil edilmemiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan depremlerin dışmerkezleri, yüzey fay kırılımları ve AFAD istasyonlarının bölgesel dağılımı.

3. YÖNTEM

3.1. Deprem Kayıtlarından Yatay/Düşey Spektral Oran (HVSR) Analizi

İlk kez Nakamura (1989) tarafından geliştirilen Yatay/düşey spektral oran yöntemi, yatay yer hareketinin yerel zemin koşullarından düşey bileşene göre daha fazla etkilendiği kabulüne dayanmaktadır ve bu yöntemle hakim frekansın güvenilir bir şekilde belirlenebileceği belirtilmiştir (Lermo ve Chávez-García, 1993). Yöntemin tek istasyon kaydıyla uygulanabilmesi, ayrıca bir referans kaya istasyonuna duyulan gereksinimi ortadan kaldırmakta ve bu şekilde hızlı ve ekonomik bir yaklaşım sağlamaktadır.

Bu çalışmada AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonlarından elde edilen kuzey–güney, doğu–batı ve düşey bileşenli deprem kayıtları kullanılmış ve HVSR analizleri Geopsy yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir deprem kaydından minimum beş adet olmak üzere 15, 20 ve 25 saniyelik pencere seçilmiş ve ardışık pencereler arasında %50 örtüşme uygulanmıştır. Spektral eğrilerdeki küçük ölçekli salınımları azaltmak amacıyla Konno–Ohmachi (b=40) düzgünleştirmesi uygulanmıştır.

Temsili HVSR eğrisindeki belirgin ana tepeye karşılık gelen frekans, istasyonun hakim frekansı f_0, bu frekanstaki spektral oran ise tepe genliği (H/V) A_0 olarak tanımlanmıştır.

3.2. Ortalama Kayma Dalgası Hızının (V_{S30}) Tahmini

Çalışma kapsamında HVSR analizlerinden elde edilen hakim frekans (f_0) ve H/V tepe genliği (A_0) değerleri kullanılarak bütün istasyonlar için V_{S30} tahminleri yapılmıştır. Hesaplamalarda Hassani ve Atkinson (2016), Ghofrani ve Atkinson (2014) ile Stanko ve Markušić (2020) tarafından geliştirilen bağıntılar kullanılmıştır. Bu bağıntılar, HVSR

eğrisinin tepe frekansı ve tepe genliği ile V_{S30} arasındaki istatistiksel ilişkileri esas almaktadır.

Hassani ve Atkinson (2016) tarafından önerilen ve yalnızca hakim frekansı kullanan bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$\log_{10}(V_{s30}) = \begin{cases} \log_{10}(250), & f_0 \leq 2 \text{ Hz} \\ 2.20 + 0.63\log_{10}(f_0), & f_0 > 2 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

Ghofrani ve Atkinson (2014), V_{S30} tahmininde hakim frekansın yanı sıra H/V tepe genliğini de kullanmıştır. Çalışmada değerlendirilen bağıntı şöyledir:

$$\log_{10}(V_{s30}) = 2.80 + 0.16\log_{10}(f_0) - 0.50\log_{10}(A_0), \quad f_0 \geq 1 \text{ Hz} \quad (2)$$

Stanko ve Markušić (2020) tarafından hakim frekansa bağlı olarak önerilen temel bağıntı ise aşağıdaki formdadır:

$$V_{s30} = \begin{cases} 208 \pm 20, & f_0 < 1 \text{ Hz} \\ \exp[5.34 + 0.46\ln(f_0)], & 1 \leq f_0 \leq 10 \text{ Hz} \\ 600 \pm 80, & 10 < f_0 \leq 30 \text{ Hz} \end{cases} \quad (3)$$

Böylece HVSR sonuçlarından yararlanılarak istasyonların kayma dalgası hızına ilişkin yaklaşık değerlendirmeler yapılabilmektedir.

3.3. Anakaya Derinliğinin (D_b) Tahmini

HVSR eğrisinden belirlenen hakim frekans, yüzeydeki düşük hızlı zemin tabakalarının kalınlığı ve anakaya derinliği hakkında bilgi sağlamaktadır. Genel olarak düşük hakim frekanslar daha kalın zemin tabakaları ve daha derin anakaya ile, yüksek hakim frekanslar ise daha sığ anakaya koşullarıyla ilişkilendirilmektedir.

Hakim frekans ile anakaya derinliği arasındaki ampirik güç ilişkisi Ibs-von Seht ve Wohlenberg (1999) tarafından aşağıdaki biçimde ifade edilmiştir:

$$D_b = a\, f_0^b \quad (4)$$

Burada D_b, anakaya derinliğini (m); f_0, HVSR eğrisinden belirlenen hakim frekansı (Hz) göstermektedir. a ve b, ölçülen frekanslar ile bilinen anakaya derinliklerine uygulanan regresyon analizinden elde edilen bölgesel katsayılardır. Farklı araştırmacılar, bu genel bağıntıyı çeşitli bölgelerdeki hakim frekans ve bilinen anakaya derinliği verilerine uygulayarak bölgesel katsayılar geliştirmiştir. Bu kapsamda Parolai vd. (2002) Almanya'nın Köln bölgesi, Delgado vd. (2000) İspanya'daki Bajo Segura Havzası, Tün vd. (2016) Türkiye'deki Eskişehir Havzası ve Büyüksaraç vd. (2023) Antakya bölgesi için hakim frekans ile anakaya derinliği arasındaki ilişkileri incelemiştir. Çalışmada kullanılan bağıntılar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hakim frekanstan anakaya derinliğinin tahmininde kullanılan ampirik bağıntılar

No.	Ampirik Bağıntı	Kaynak
1	$D_b = 108\ f_0^{-1.551}$	Parolai vd. (2002)
2	$D_b = 55.64\ f_0^{-1.268}$	Delgado vd. (2000)
3	$D_b = 136\ f_0^{-1.357}$	Tün vd. (2016)
4	$D_b = 101\ f_0^{-0.988}$	Büyüksaraç vd. (2023)

Bağıntıların farklı jeolojik bölgeler ve veri setleri kullanılarak geliştirilmiş olması nedeniyle hesaplanan derinlikler arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Bu nedenle sonuçlar doğrudan ölçülmüş anakaya derinlikleri olarak değil, hakim frekansa dayalı ampirik tahminler olarak değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. HVSR bulguları ve hakim frekansların değerlendirilmesi

Bu çalışmada, Hatay ve yakın çevresindeki 11 AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait deprem kayıtları HVSR yöntemiyle değerlendirilmiştir. İstasyonların temel rezonans frekansı f_0 ve H/V tepe genliği A_0 belirlenmiştir. Hesaplanan f_0 değerleri 0.39–12.41 Hz, A_0 değerleri ise 2.17–5.63 aralığında değişmektedir. En düşük f_0 değerleri TK3112 (0.39 Hz), TK3140 (0.45 Hz) ve TK3113 (0.60 Hz) istasyonlarında, en yüksek değer ise TK3130'da (12.41 Hz) elde edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen hakim frekans değerleri, sonuçların değerlendirilmesi amacıyla AFAD istasyon dokümanlarında verilen değerler ile Perk ve Özer (2019) ve Laura ve Kumar (2025) tarafından sunulan sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Hesaplanan hakim frekans değerlerinin karşılaştırılması.

İstasyon Kodu	Bu Çalışma	AFAD	Perk ve Özer (2019)	Laura ve Kumar (2025)
	f_0 (Hz)			
TK3112	0.39	5.00	0.70	1.67
TK3113	0.60	1.49	0.60	0.60
TK3119	5.23	5.20	4.10	9.01
TK3124	1.34	1.23	1.40	1.25
TK3130	12.41	12.80	-	-
TK3132	3.35	3.34	0.90	3.23
TK3135	4.51	2.30	0.90	2.38
TK3136	1.16	-	-	1.00
TK3139	2.37	-	-	2.13
TK3140	0.45	-	-	2.04
TK3143	1.34	0.70	-	1.64

Tablo 2'de TK3113, TK3119, TK3124, TK3130, TK3132, TK3136, TK3139 ve TK3143 istasyonlarında hakim frekans değerlerinin önceki çalışmalarla büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmektedir. Buna ek olarak Shiga vd. (2026) tarafından İskenderun'da gerçekleştirilen mikrotremor HVSR ölçümlerinde hakim frekansların 0.3–0.9 Hz arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu aralık, bu çalışmada TK3112 ve TK3113 istasyonları için elde edilen sırasıyla 0.39 ve 0.60 Hz değerleriyle uyumlu olup, TK3112 yakınındaki bir ölçüm noktasında belirlenen 0.34 Hz değeri de TK3112 için elde edilen sonuçla oldukça yakındır. Bununla birlikte, TK3112 için AFAD ve diğer bazı literatür değerleriyle, TK3135 ve TK3140 istasyonlarında ise karşılaştırılan çalışmalar arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların deprem seçimi, kayıt dönemi, pencereleme, çoklu HVSR

tepelerinde ana tepenin seçimi ve güçlü yer hareketi sırasında gelişebilecek doğrusal olmayan zemin davranışı gibi etkenlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir.

4.2. Ortalama Kayma Dalgası Hızına (V_{S30}) ilişkin bulgular

Ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanan V_{S30} değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Ayrıca, hesaplanan sonuçlar AFAD tarafından verilen ölçülmüş V_{S30} değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. HVSR sonuçlarından ampirik bağıntılarla hesaplanan VS30 değerlerinin AFAD tarafından ölçülen VS30 değerleriyle karşılaştırılması.

İstasyon Kodu	f_0 (Hz)	H/V	AFAD	Hassani ve Atkinson (2016)	Ghofrani ve Atkinson (2014)	Stanko ve Markušić (2020)
			V_{S30} (m/s)			
TK3112	0.39	3.44	233	250	-	208
TK3113	0.60	4.46	221	250	-	208
TK3119	5.23	2.18	374	449	557	446
TK3124	1.34	3.01	283	250	381	239
TK3130	12.41	5.04	447	775	421	600
TK3132	3.35	2.37	377	339	497	364
TK3135	4.51	2.17	460	409	545	417
TK3136	1.16	3.14	344	250	365	223
TK3139	2.37	5.63	271	273	305	310
TK3140	0.45	3.08	210	250	-	208
TK3143	1.34	2.30	444	250	436	239

V_{S30} tahminleri AFAD tarafından verilen değerlerle karşılaştırıldığında bağıntıların bazı istasyonlarda ölçüm değerlerine yakın sonuçlar verdiği fakat bazı istasyonlarda ise belirgin sapmalar gösterdiği görülmektedir. Örneğin TK3140 istasyonunda AFAD tarafından verilen 210 m/s değerine karşılık Hassani ve Atkinson (2016) ve Stanko ve Markušić (2020) bağıntıları sırasıyla 250 ve 208 m/s değerlerini vermekte ve oldukça yakın sonuçlar göstermektedir. Benzer şekilde TK3139 istasyonunda AFAD değeri 271 m/s iken ampirik tahminler 273–310 m/s arasında değişmektedir. Buna karşılık TK3130 istasyonunda AFAD değeri 447 m/s olmasına rağmen tahminler 421–775 m/s gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. TK3143 istasyonunda ise Ghofrani ve Atkinson (2014) bağıntısından elde edilen 436 m/s değeri AFAD'ın 444 m/s değerine oldukça yakınken diğer bağıntılar 239–250 m/s düzeyinde kalmaktadır. Bu sonuçlar, hakim frekanstan V_{S30} tahmininde kullanılan ampirik bağıntıların istasyon ve yerel zemin koşullarına bağlı olarak farklı performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

4.3. Anakaya derinliği tahminlerine ilişkin bulgular

Farklı ampirik bağıntılardan elde edilen istasyon bazlı anakaya derinliği tahminleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Farklı ampirik bağıntılar kullanılarak istasyonlar için hesaplanan anakaya derinlikleri.

İstasyon Kodu	f_0 (Hz)	Parolai vd. (2002)	Delgado vd. (2000)	Tün vd. (2016)	Büyüksaraç vd. (2023)
		D_b (metre)			
TK3112	0.39	465.25	183.62	488.05	256.06
TK3113	0.60	238.51	106.34	272.01	167.30
TK3119	5.23	8.30	6.83	14.41	19.70
TK3124	1.34	68.59	38.39	91.42	75.64
TK3130	12.41	2.17	2.28	4.46	8.39
TK3132	3.35	16.56	12.01	26.37	30.59
TK3135	4.51	10.44	8.24	17.61	22.80
TK3136	1.16	85.79	46.10	111.19	87.22
TK3139	2.37	28.33	18.63	42.17	43.06
TK3140	0.45	372.64	153.15	401.91	222.30
TK3143	1.34	68.59	38.39	91.42	75.64

Özellikle düşük hakim frekans değerlerine sahip TK3112, TK3113 ve TK3140 istasyonlarında farklı ampirik bağıntılardan elde edilen anakaya derinliği tahminleri arasında belirgin farklılıklar görülmektedir. Örneğin TK3112 istasyonunda tahmin edilen anakaya derinliği 183.62–488.05 m, TK3140 istasyonunda ise 153.15–401.91 m arasında değişmektedir. Buna karşılık yüksek hakim frekans değerlerine sahip TK3119, TK3130 ve TK3135 istasyonlarında tüm bağıntılar daha sığ anakaya derinlikleri öngörmektedir. Bu durum hakim frekans ile anakaya derinliği arasındaki genel ters ilişkiyi ortaya koymaktadır.

Aynı hakim frekans değeri için kullanılan farklı bağıntılarda önemli farklılıkların oluşabileceği görülmektedir. Parolai vd. (2002), Delgado vd. (2000) ve Tün vd. (2016) bağıntıları farklı jeolojik koşullarda geliştirilmişken, Büyüksaraç vd. (2023) bağıntısının Antakya merkez ve yakın çevresinde geliştirilmiş olması, bu bağıntıyı çalışma bölgesi açısından daha yerel bir referans haline getirmektedir. Bununla birlikte, anakaya derinliği–hakim frekans ilişkilerinin bölgesel jeoloji, tabaka kalınlığı ve hız kontrastlarından etkilenmesi nedeniyle Antakya için geliştirilmiş bu bağıntının Hatay'ın tamamını temsil ettiği kabul edilmemelidir. Bu nedenle hesaplanan anakaya derinlikleri, doğrudan belirlenmiş derinlikler olarak değil istasyonların sığ veya derin zemin yapısına sahip olduğunun değerlendirilmesine ve ayrıntılı jeofizik çalışmaların yönlendirilmesine yönelik ön bilgiler olarak ele alınmalıdır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Hatay ve yakın çevresindeki 11 AFAD kuvvetli yer hareketi istasyonuna ait deprem kayıtları HVSR yöntemi ile değerlendirilmiştir. Hakim frekans değerlerinin 0.39–12.41 Hz, H/V tepe genliği değerlerinin ise 2.17–5.63 arasında değiştiği belirlenmiştir. Düşük hakim frekansların elde edildiği TK3112, TK3113 ve TK3140 istasyonlarında daha yüksek anakaya derinlikleri tahmin edilirken, yüksek hakim frekanslı TK3119, TK3130 ve TK3135 istasyonlarında daha sığ anakaya derinlikleri elde edilmiştir. Özellikle TK3112 için 183.62–488.05 m ve TK3140 için 153.15–401.91 m arasında değişen derinlikler

hesaplanırken, en yüksek hakim frekansa sahip TK3130 için bu değerler 2.17–8.39 m arasında kalmıştır.

V_{S30} tahminlerinde kullanılan ampirik bağıntıların AFAD değerlerine yakınlığı istasyona göre değişmiştir. TK3140, TK3139 ve TK3143 istasyonlarında sırasıyla 208, 273 ve 436 m/s değerleri AFAD sonuçlarına oldukça yakın bulunmuştur. Buna karşılık TK3130 gibi bazı istasyonlarda tahminler arasında daha geniş farklılıklar oluşmuştur. Benzer şekilde, anakaya derinliği tahminlerinde de aynı hakim frekans için kullanılan bağıntıya bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmesi, bu değerlerin doğrudan saha ölçümü yerine yerel zemin koşullarının ön değerlendirilmesinde kullanılmasının daha uygun olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Aktan, S. ve Yonar, F. (2024), "Hatay İli Antakya Merkezde Yarı Kırsal Bölgede 6 ve 20 Şubat 2023 Depremlerinin Etkisi", Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 10, Sayı 2, 99-116.

Akyüz, H.S., Altunel, E., Karabacak, V. ve Yalçıner, C.Ç. (2006), "Historical Earthquake Activity of the Northern Part of the Dead Sea Fault Zone, Southern Turkey", Tectonophysics, Vol 426, 281-293.

Alpyürür, M. ve Ulutaş, H. (2024), "Comparison of Performance Analysis Results with Developed Site-Specific Response Spectra and Turkish Seismic Design Code: A Case Study from the SW Türkiye Region", Buildings, Vol 14, 1233.

Ambraseys, N.N. (1989), "Temporary Seismic Quiescence: SE Turkey", Geophysical Journal International, Vol 96, No 2, 311-331.

Anadolu Ajansı (2023), "Depremlerin Vurduğu Hatay'da En Ağır Yıkım Antakya'da", https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/depremlerin-vurdugu-hatayda-en-agir-yikim-antakyada/2866977 (Erişim Tarihi: 17.08.2026).

Bassal, P., Papageorgiou, E., Moug, D.M., Bray, J.D., Çetin, K.Ö., Şahin, A., Kubatko, E.J., Nepal, S., Toth, C., Kendır, S.B. ve Bikçe, M. (2024), "Liquefaction Ground Deformations and Cascading Coastal Flood Hazard in the 2023 Kahramanmaraş Earthquake Sequence", Earthquake Spectra, Vol 40, No 3, 1845-1869.

Bayrak, E. (2022), "Investigation of Soil Dynamic Properties Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio for Eastern Pontides, Northeast Turkey", Environmental Earth Sciences, Vol 81, 514.

Bol, E., Ozocak, A., Sert, S., Çetin, K.Ö., Arslan, E., Kocaman, K. ve Ayhan, B.U. (2024), "Evaluation of Soil Liquefaction in the City of Hatay Triggered after the February 6, 2023 Kahramanmaras-Türkiye Earthquake Sequence", Engineering Geology, Vol 339, 107648.

Büyüksaraç, A., Bektaş, Ö., Işık, E., Över, S. ve Kaçın, S. (2023), "Investigation of Site Characterization and Vulnerability in Antakya (Turkey) under Basin Effect", Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 16, Sayı 2, 548-570.

Çetin, K.Ö., Altun, S., Askan, A., Akgün, M., Sezer, A., Kıncal, C., Özdağ, Ö.C., İpek, Y., Unutmaz, B., Gülerce, Z., Özacar, A.A., Ilgaç, M., Can, G., Çakır, E., Söylemez, B., El-Sayeed, A., Zarzour, M., Bozyiğit, İ., Tuna, Ç., Köksal, D., Karimzadeh, S., Uzel, B. ve Karaali, E. (2022), "The Site Effects in Izmir Bay of October 30 2020, M7.0 Samos Earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 152, 107051.

Delgado, J., López Casado, C., Giner, J., Estévez, A., Cuenca, A. ve Molina, S. (2000), "Microtremors as a Geophysical Exploration Tool: Applications and Limitations", Pure and Applied Geophysics, Vol 157, 1445-1462.

Demir, A., Celebi, E., Ozturk, H., Ozcan, Z., Ozocak, A., Bol, E., Sert, S., Şahin, F.Z., Arslan, E., Dere Yaman, Z., Utkucu, M. ve Mert, N. (2025), "Destructive Impact of Successive High Magnitude Earthquakes Occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 23, 893-919.

Ghofrani, H. ve Atkinson, G.M. (2014), "Site Condition Evaluation Using Horizontal-to-Vertical Response Spectral Ratios for Earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese Databases", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 67, 30-43.

Gücek, S., Afacan, K.B. ve Zorluer, İ. (2023), "6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 23, Sayı 3, 740-752.

Hassani, B. ve Atkinson, G.M. (2016), "Applicability of the Site Fundamental Frequency as a VS30 Proxy for Central and Eastern North America", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 106, No 2, 653-664.

Ibs-von Seht, M. ve Wohlenberg, J. (1999), "Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 89, No 1, 250-259.

Jenny Laura, R.V.S. ve Kumar, A. (2025), "Identification of Liquefied Regions in Hatay Region, Turkey Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR)", Dynamic Soil Properties and Liquefaction, ICRAGEE 2024, Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 569, Springer, Singapore, 231-242.

Karray, M., Sezer, A., Chiaradonna, A., Karakan, E., Kıncal, C., Lanzo, G. ve Monaco, P. (2024), "Site Effects Observed in Antakya after the Mw 7.7 Pazarcik and Mw 7.6 Elbistan Earthquakes on the 6th February 2023 (Türkiye)", Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol 10, No 44, 1665-1670.

Lermo, J. ve Chávez-García, F.J. (1993), "Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 83, No 5, 1574-1594.

Nakamura, Y. (1989), "A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface", QR of RTRI, Vol 30, No 1, 25-33.

Över, S., Kavak, K.Ş., Bellier, O. ve Özden, S. (2004), "Is the Amik Basin (SE Turkey) a Triple-Junction Area? Analyses of SPOT XS Imagery and Seismicity", International Journal of Remote Sensing, Vol 25, No 19, 3857-3872.

Parolai, S., Bormann, P. ve Milkereit, C. (2002), "New Relationships between Vs, Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the H/V Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany)", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 92, No 6, 2521-2527.

Perk, S. ve Özer, Ç. (2019), "Investigation of Soil Properties based on Accelerometer Stations using Earthquake Recording: The Case Study of Hatay, Turkey", Turkish Journal of Earthquake Research, Vol 1, No 2, 167-179.

Selvaraj, J.L.R.V. ve Kumar, A. (2024), "Seismic Site Classification of Samandag District, Hatay Province, Turkey, based on the HVSR Method and Equivalent Linear Ground Response Analysis", Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol 10, No 24, 908-913.

Shiga, M., Kiyota, T., Tobita, T., Ikeda, T., Toprak, S., Cinicioglu, O., Tonuk, G., Akyol, G., Milev, N.Y., Hachino, Y., Kunisawa, M. ve Ince, M.B. (2026), "Geotechnical Field Measurements and Structural Damage in Iskenderun Following the 2023 Turkey-Kahramanmaras Earthquake Sequence", Geoenvironmental Disasters, Vol 13, 52.

Stanko, D. ve Markušić, S. (2020), "An Empirical Relationship between Resonance Frequency, Bedrock Depth and Vs30 for Croatia based on HVSR Forward Modelling", Natural Hazards, Vol 103, 3715-3743.

Toprak, S., Tunc, S.C., Övünç, E.E., Yağcı, A.L. ve Dal, O. (2026a), "Post-Seismic Turbidity Response in the Goksu Stream after the 2023 Kahramanmaras Earthquakes", Natural Hazards, Vol 122, 99.

Toprak, S., Wham, B.P., Nacaroğlu, E., Sakamoto, M., Tunc, S.C., Davis, C.A., Uckan, E., Dal, O., Ceylan, M., Şentürk, A.E., Kaya, E.Ş. ve İnce, M.B. (2026b), "Assessment of Infrastructure Failures in the 2023 Kahramanmaras Earthquakes", ASCE OPEN: Multidisciplinary Journal of Civil Engineering, Vol 4, No 1, 04026001.

Tün, M., Pekkan, E., Özel, O. ve Guney, Y. (2016), "An Investigation into the Bedrock Depth in the Eskisehir Quaternary Basin (Turkey) using the Microtremor Method", Geophysical Journal International, Vol 207, 589-607.

Yılmaz, Z., Altunışık, A.C., Tacıroğlu, E., Günaydın, M., Okur, F.Y., Sunca, F., Şişman, R., Aslan, B. ve Sezdirmez, T. (2024), "Regional Building Damage Survey Data on the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, Earthquakes", ASCE OPEN: Multidisciplinary Journal of Civil Engineering, Vol 2, No 1, 04024009.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	**Açıklama**
f_0	Hakim (rezonans) frekansı (Hz)
A_0	H/V tepe genliği
V_{S30}	Yüzeyden 30 m derinliğe kadar ortalama kayma dalgası hızı (m/s)
D_b	Anakaya derinliği (m)
a	Anakaya derinliği-hakim frekans bağıntısı katsayısı
b	Anakaya derinliği-hakim frekans bağıntısı üsteli
Mw	Deprem büyüklüğü