Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GÖLBAŞI (ADIYAMAN) İLÇESİNDE DİNAMİK ZEMİN PARAMETRELERİNİN MASW VE REMİ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF DYNAMIC SOIL PARAMETERS IN GÖLBAŞI (ADIYAMAN) USING THE MASW AND REMI METHODS

İhsan YILMAZ[1], M. Emin AYTEKİN[2], Eray BİRİNCİ[3], Eren PAMUK[4], Erhan TEKİN[5], K. Önder ÇETİN[6], Nihat Sinan IŞIK[7], Seyhan FIRAT[8]

ÖZET

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Adıyaman'ın Gölbaşı ilçesinde gözlenen zemin kaynaklı hasarlar, yerel zemin koşullarının deprem davranışı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymuştur. Bu çalışma kapsamında, Adıyaman ili Gölbaşı ilçesindeki zeminlerin dinamik özellikleri aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemleri; Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) ve Kırılma-Mikrotremor (ReMi) yöntemleri kullanılarak kapsamlı ve bütüncül bir yaklaşımla belirlenmiştir. Faklı jeolojik ve jeoteknik birimleri temsil edecek şekilde seçilen ölçüm noktalarında gerçekleştirilen aktif ve pasif kaynaklı sismik ölçümler sonucunda, zemin tabakalarına ait 1B'li kayma dalgası hızı (Vs) profilleri yüksek çözünürlükte elde edilmiş ve bu profiller yardımıyla zemin rijitliği, tabaka kalınlıkları, süreksizlikler, hız değişimleri ve sismik dalga yayılımını kontrol eden temel dinamik parametreler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Aktif kaynakla üretilen yüksek frekanslı verileri kullanan MASW yöntemi ile sığ derinliklerde yüksek çözünürlüklü zemin karakterizasyonu sağlanmışken; ReMi yöntemiyle ise, düşük frekanslı çevresel gürültülerin analizlerde kullanılmasıyla daha derin seviyelere Vs-derinlik kesitleri güvenilir ve yüksek çözünürlükte bir şekilde elde edilmiştir. Bu iki yöntemin birlikte kullanımıyla Gölbaşı ilçesindeki zeminlerin deprem etkisi altındaki davranışı, geniş bir frekans bandında hem yüzeye yakın detayların hem de derin jeolojik birimlerin hassas bir şekilde modellenmesiyle belirlenmiştir. Elde edilen bulguların bölgesel zemin sınıflaması, yerel zemin etkilerinin belirlenmesi ve mühendislik tasarım parametrelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *MASW, ReMi, Kayma dalgası hızı (Vs), Adıyaman-Gölbaşı Zeminlerinin dinamik özellikleri, Yüzey dalgası analizi, Sismik davranış*

ABSTRACT

The ground-related damages observed in the Gölbaşı district of Adıyaman following the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes have clearly demonstrated the decisive role of local soil conditions on seismic response. Within the scope of this study, the dynamic properties of soils in the Gölbaşı district of Adıyaman were determined through a comprehensive and integrated approach using both active and passive surface wave

[1] İnş. Müh. Yüksek lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi F.B.E, ihsnylmz343@gmail.com (Sorumlu Yazar)
[2] İnşaat Müh. Doktora Öğrencisi, Gazi Üniversitesi F.B.E, m.eminaytekin87@gmail.com
[3] İnşaat Müh. Yüksek lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi F.B.E, birincieray01@gmail.com
[4] Doç. Dr., Deprem Teknolojileri Enstitüsü, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, erenpamuk@erzincan.edu.
[5] Dr., Gazi Üniversitesi Müh. Fakültesi, etekin@gazi.edu.tr
[6] Prof. Dr., Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ocetin@metu.edu.tr
[7] Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, nihatsinan@gazi.edu.tr
[8] Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, sfirat@gazi.edu.tr

methods, namely the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) and the Refraction Microtremor (ReMi) methods. Based on active and passive seismic measurements conducted at selected survey points representing different geological and geotechnical units, one-dimensional shear wave velocity (Vs) profiles of soil layers were obtained with high resolution. Utilizing these profiles, key dynamic parameters governing soil stiffness, layer thicknesses, discontinuities, velocity variations, and seismic wave propagation were evaluated in detail. While the MASW method, which employs high-frequency data generated by active sources, provided high-resolution characterization of shallow subsurface conditions, the ReMi method enabled the reliable and high-resolution determination of deeper Vs–depth profiles by utilizing low-frequency ambient noise. Through the combined use of these two methods, the seismic behavior of soils in the Gölbaşı district under earthquake loading was characterized across a wide frequency range, allowing for accurate modeling of both near-surface details and deeper geological formations. The findings are considered to provide significant contributions to regional soil classification, the assessment of local site effects, and the development of engineering design parameters.

Keywords: *MASW, ReMi, Shear wave velocity (Vs), Dynamic properties of Adıyaman–Gölbaşı soils, Surface wave analysis, Seismic behavior*

1. GİRİŞ

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, Adıyaman'ın Gölbaşı ilçesinde hem yapı performansını hem de zemin davranışını önemli ölçüde etkileyen sonuçlar doğurmuştur. Deprem sonrasında bölgede gerçekleştirilen saha incelemelerinde, özellikle Gölbaşı Gölü çevresi ve ilçe merkezinin alüvyal kesimlerinde yaygın sıvılaşma belirtileri ile çeşitli zemin yenilmeleri tespit edilmiştir. Araştırmacılar; yüzeye çıkan kum ve su püskürmelerinin yanı sıra zemin çatlakları, yanal yayılmalar, farklı oturmalar ve yerel zemin deformasyonlarının çok sayıda noktada geliştiğini bildirmiştir (Akar vd., 2024; Moss vd., 2025). Sıvılaşmadan etkilenen kesimlerde yapıların önemli düşey deplasmanlara maruz kaldığı, bazı binalarda belirgin eğilme ve rijit cisim hareketlerinin geliştiği, ileri düzeyde etkilenen yapılarda ise devrilmeye varan temel–zemin etkileşimi problemlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir (Flora vd., 2024)

Gölbaşı'nda gözlenen bu deformasyonların dağılımının, ilçenin yerel jeolojik ve geoteknik özellikleriyle yakından ilişkili olduğu ortaya konulmuştur. İlçe merkezinin önemli bir bölümü, yanal ve düşey yönde değişkenlik gösteren çakıl, kum, silt ve kil seviyelerinden oluşan genç Kuvaterner alüvyonları üzerinde yer almakta; Gölbaşı Gölü çevresinde ise ince daneli ve organik madde içeriği yüksek bataklık çökelleri bulunmaktadır. Bu kesimlerde yeraltı suyu seviyesinin yüzeye yakın olması da deprem sırasında zeminlerin olumsuz davranışını artıran önemli saha koşullarından biri olarak değerlendirilmiştir (Demir vd., 2025). Deprem sonrası araştırmalar, zemin ve temel hasarlarının özellikle Gölbaşı Gölü'ne yakın ve elverişsiz zemin koşullarının hakim olduğu kesimlerde yoğunlaştığını göstermiştir (Çetin vd., 2025).

Gölbaşı'ndaki zemin yenilmelerinin oluşum mekanizmalarına yönelik çalışmalar, gözlenen deformasyonların yalnızca kumlu ve siltli tabakalarda gelişen sıvılaşma ile açıklanamayacağını ortaya koymuştur. Deprem sırasında ince daneli ve killi zeminlerde gelişen çevrimsel yumuşamanın, zeminin dayanım ve rijitliğinde önemli azalmalara yol açarak temel taşıma gücünü ve yapı performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir (Tonyalı vd., 2024). Benzer şekilde, Gölbaşı genelinde gerçekleştirilen değerlendirmelerde de sıvılaşmanın yanı sıra döngüsel yumuşamaya bağlı dayanım kaybının zemin ve temel deformasyonlarının gelişiminde önemli rol oynadığı belirtilmiştir (Çetin vd., 2025). Bu bulgular, Gölbaşı'nda deprem etkisi altındaki zemin davranışının yalnızca sıvılaşma potansiyeli üzerinden değil, farklı zemin türlerinin çevrimsel yükler altındaki dayanım ve

deformasyon özellikleri birlikte dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Gölbaşı Havzası'nda gerçekleştirilen jeofizik çalışmalar, makaslama dalgası hızının hem derinlik boyunca hem de yanal yönde önemli değişkenlik gösterdiğini; özellikle Gölbaşı Gölü çevresindeki kesimlerde daha düşük Vs değerlerinin hâkim olduğunu ortaya koymaktadır (Pamuk vd., 2026). Bu durum, zeminlerin dinamik özelliklerinin yalnızca Vs30 gibi belirli bir derinlik aralığını temsil eden ortalama parametrelerle değil, Vs'nin derinliğe bağlı değişimini ortaya koyan hız profilleri üzerinden değerlendirilmesinin önemine işaret etmektedir. Bu amaçla yüzey dalgası tabanlı jeofizik yöntemler, zeminlerin dinamik karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif kaynaklı Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW), yüzey dalgalarının frekansa bağlı yayılım özelliklerinden yararlanarak tabakaların makaslama dalgası hızlarının ve buna bağlı 1B Vs profillerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Park vd., 1999). Kırılma Mikrotremor (ReMi) yöntemi ise doğal ve çevresel kaynaklı titreşimlerden yararlanması sayesinde daha düşük frekanslı yüzey dalgası bileşenlerinin değerlendirilmesine ve dolayısıyla daha uzun dalga boyları üzerinden daha derin seviyeler hakkında bilgi elde edilmesine imkân vermektedir (Louie. 2001). Aktif ve pasif yüzey dalgası yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi, farklı frekans ve dalga boyu aralıklarından elde edilen bilgilerin bütünleştirilmesini sağlayarak dispersiyon eğrisinin daha geniş bir bantta tanımlanmasına ve Vs–derinlik profilinin daha güvenilir biçimde sınırlandırılmasına katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı Gölbaşı ilçesinde on farklı lokasyonda elde edilen MASW ve ReMi dispersiyon verilerinin birleştirilmesiyle ölçüm derinliği boyunca Vs profillerinin oluşturulması; Vs30, yoğunluk ve Gmax parametrelerinin belirlenmesi olarak ortaya konulmasıdır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve Araştırma Programı

Araştırma programı, jeofizik veriler kullanılarak Gölbaşı havzasındaki depremden etkilenmiş çökellerin mekânsal ve düşey değişkenliğini karakterize etmek üzere tasarlanmıştır. Program; MASW ve ReMi ölçümlerinin gerçekleştirildiği on farklı farklı lokasyonda gerçekleştirilen jeofizik çalışmadan oluşmaktadır. (Şekil 1).

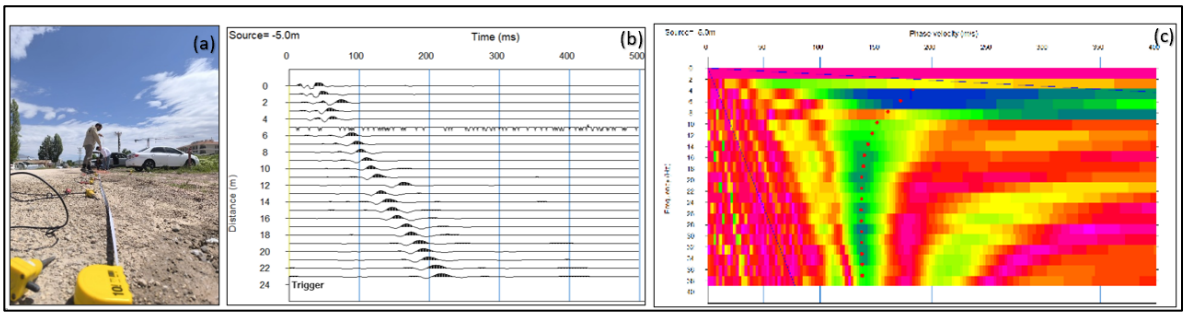


Şekil 1. Gölbaşı'nın konumu ve MASW-ReMi ölçümlerinin gerçekleştirildiği lokasyonlar

2.2. MASW ve ReMi Ölçümleri

MR1-MR10 lokasyonlarında MASW ve ReMi teknikleri kullanılarak yüzey dalgası ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aktif kaynaklı MASW yöntemi, derinliğe bağlı makaslama dalgası hızını (Vs) tahmin etmek için Rayleigh dalgası dispersiyonunu kullanırken (Park vd., 1999), ReMi ortam sismik titreşimlerinden yararlanarak daha derin Vs yapısının elde edilmesine yönelik tamamlayıcı düşük frekans ve uzun dalga boyu bilgisi sağlamaktadır (Louie. 2001).

MASW ölçümlerinde darbe kaynağı ve 4.5 Hz düşey jeofonlarla donatılmış doğrusal çok kanallı bir dizilim kullanılmış; jeofon aralıkları 1–3 m, kaynak ofsetleri ise 4–12 m arasında seçilmiştir. Buna karşılık pasif yüzey dalgası (ReMi) ölçümlerinde, kontrollü bir kaynak olmaksızın ortam gürültüsünü kaydetmek amacıyla 3–5 m jeofon aralıkları kullanılmış ve dispersiyon analizi için her istasyonda en az sekiz adet 30 saniyelik kayıt alınmıştır. Temsili MASW veri toplama ve veri işleme aşamaları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. MR5'te temsili Masw ölçümleri (a) arazi veri toplama düzeni, (b) kaydedilen çok kanallı atış kaydı ve (c) seçilen Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisini içeren dispersiyon spektrumu

2.3. Dispersiyon Analizi ve Vs Profillerinin Elde Edilmesi

Ham sismik kayıtlar başlangıçta farklı dalga alanı dönüşüm teknikleri kullanılarak frekans–faz hızı (f–c) ortamına dönüştürülmüştür: aktif kaynaklı MASW atış kayıtlarına faz kaydırma yöntemi uygulanırken, pasif ReMi ortam gürültüsü kayıtlarında τ–p dönüşümünü takiben Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Daha sonra elde edilen enerji spektrumlarından temel mod Rayleigh dalgası dispersiyon eğilimleri belirlenmiş ve seçilmiştir (Park vd, 1999; Louie, 2001).

Hem yüzeye yakın ayrıntıları hem de daha derin tabakaları çözebilmek amacıyla yüksek frekanslı MASW verileri ile düşük frekanslı ReMi verileri tek bir geniş bant dispersiyon eğrisinde birleştirilmiştir. Ardından, iteratif Levenberg–Marquardt sönümlü en küçük kareler algoritması kullanılarak bir boyutlu (1B) tabakalı yer modeli ters çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu ters çözüm yaklaşımı ile MR1–MR10 lokasyonlarında yüksek çözünürlüklü 1B makaslama dalgası hızı (Vs) profilleri başarıyla elde edilmiştir (Park vd, 1999; Xia vd., 1999).

Üst 30 m'nin ortalama makaslama dalgası hızı (Vs30) TBDY 2018 16.4.2. maddesinde verilen bağıntı esas alınarak hesaplanmıştır:

$$Vs30 = 30/\Sigma(hi/Vsi) \quad (1)$$

Burada hi ve Vsi , toplam kalınlığı 30 m olan profil içerisindeki i'nci tabakanın sırasıyla kalınlığını ve makaslama dalgası hızını göstermektedir.

2.4. Yoğunluğun Vs'den Tahmini

Maksimum kayma modülünün hesaplanabilmesi için gerekli kütle yoğunluğu değerleri, doğrudan yoğunluk ölçümünün bulunmadığı seviyelerde iki farklı literatür yaklaşımı kullanılarak tahmin edilmiştir. Mayne (2001), doygun zeminlerde Vs ve derinliği birlikte dikkate alan aşağıdaki ampirik birim hacim ağırlık bağıntısını önermiştir.

$$\gamma sat\ (kN/m^3) = 8.32\ \log10(Vs) - 1.61\ \log10(z) \quad (2)$$

$$\rho\ (g/cm^3) = \gamma sat / 9.81 \quad (3)$$

Anbazhagan vd. (2016) ise Vs verilerini kullanarak ince daneli ve iri daneli zeminler için ayrı ilişkiler önermiştir. Bu çalışmada söz konusu iki bağıntı, zemin türü kabulünün hesaplanan parametrelere etkisini görmek amacıyla ayrı senaryolar halinde değerlendirilmiştir.

$$\rho ince\ (g/cm^3) = 0.742\ Vs\text{^}0.166 \quad (4)$$

$$\rho iri\ (g/cm^3) = 0.352\ Vs\text{^}0.283 \quad (5)$$

2.5. Maksimum Kayma Modülü (Gmax)

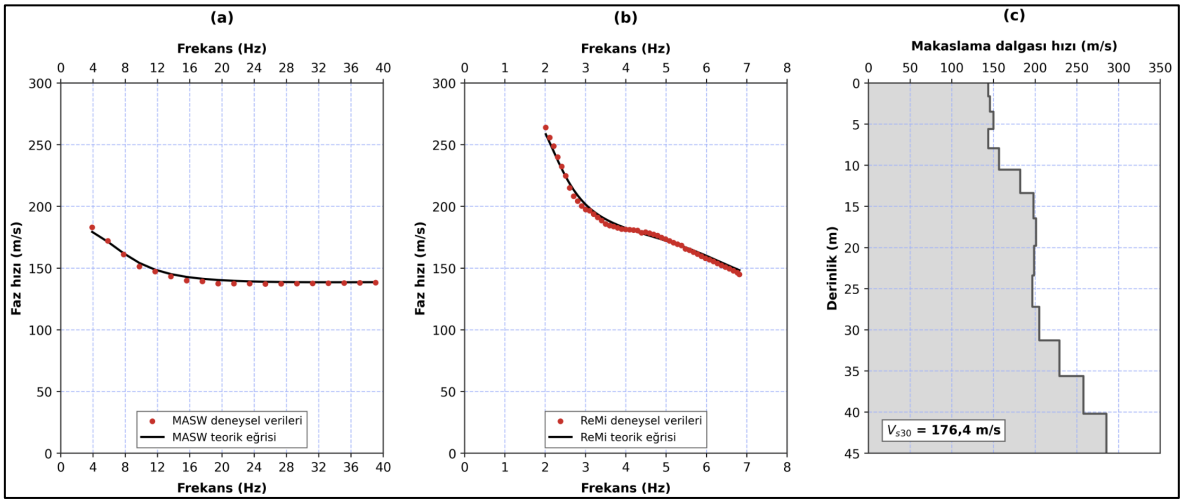
Zeminin çok küçük kayma şekil değiştirme seviyesindeki maksimum kayma modülü elastik dalga yayılım teorisine göre aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$Gmax = \rho\ Vs^2 \quad (6)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. MASW–ReMi Dispersiyon ve Ters Çözüm Sonuçları

MR1-MR10'daki MASW ve ReMi ölçümleri birbirini tamamlayıcı dispersiyon özellikleri göstermiştir. MASW esas olarak yüksek frekanslı tepkiyi sınırlandırırken, ReMi kullanılabilir bilgiyi daha düşük frekanslara ve daha uzun dalga boylarına genişletmiştir. Bu nedenle yöntemlerin birleştirilmesi ters çözüm için daha geniş bir dispersiyon–frekans kapsamı sağlamıştır. MR5'e ait temsili MASW ve ReMi dispersiyon eğrileri ile elde edilen Vs–derinlik profili Şekil 4'te sunulmuştur.



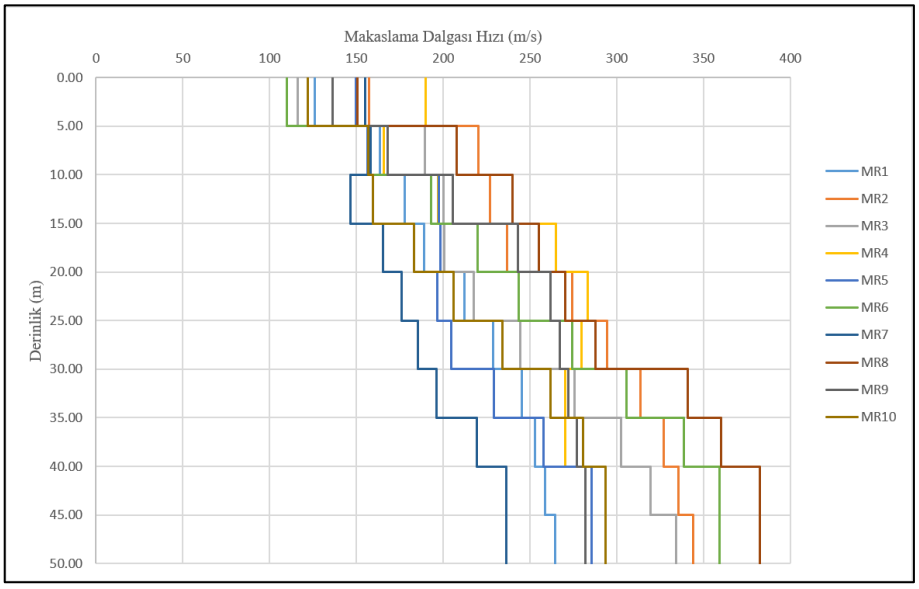
Şekil 4. MR5'te temsili yüzey dalgası analizi: (a) MASW dispersiyon eğrisi, (b) ReMi dispersiyon eğrisi ve (c) birleştirilmiş MASW–ReMi analizinden elde edilen nihai ters çözüm makaslama dalgası hızı (Vs) profili.

On farklı lokasyonda nihai RMS uyumsuzlukları yaklaşık 2.43–4.74 m/s (ortalama 3.28 m/s) arasında değişmiş ve bu değerler yaklaşık %1.16–2.81 (ortalama %1.64) normalize uyumsuzluğa karşılık gelmiştir. MR5'te RMS uyumsuzluğu başlangıç modeli için 14.03 m/s'den (%7.63) nihai çözümde 3.49 m/s'ye (%1.62) düşmüş; bu durum ölçülen ve teorik dispersiyon tepkileri arasında yeterli bir uyum bulunduğunu göstermiştir. Elde edilen profil, sığ bir hız terslenmesini takiben daha büyük derinliklerde Vs'nin genel olarak artması da dâhil olmak üzere belirgin düşey hız kontrastları göstermekte ve Vs30 = 176.4 m/s değerini vermektedir.

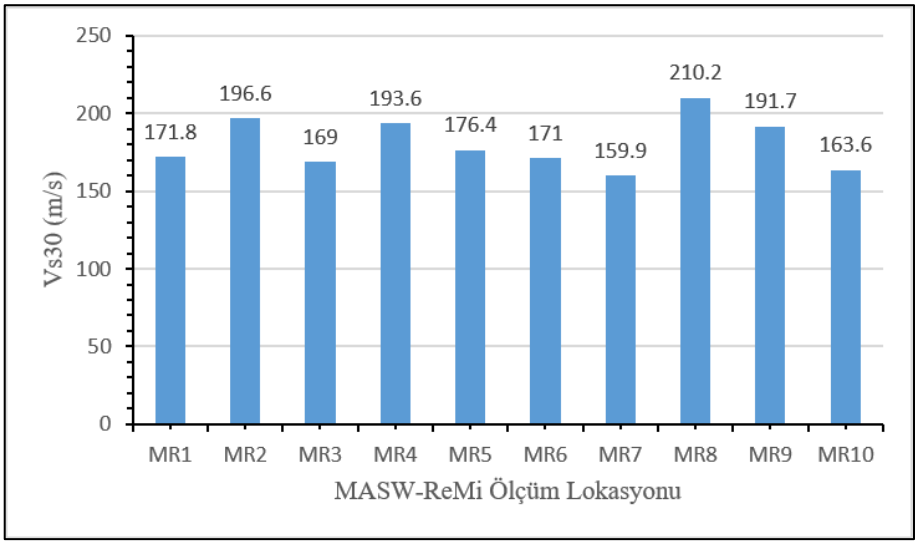
Vs profillerinde gözlenen geniş değişkenlik önemli mekânsal ve derinliğe bağlı değişimleri göstermektedir. MASW–ReMi profilleriyle ortaya konulan düşey rijitlik değişimleri araştırma lokasyonları arasındaki farklılıklarla birlikte Gölbaşı çökellerinin heterojen yapısını vurguladığı düşünülmektedir.

3.2. MASW–ReMi Dispersiyon ve Ters Çözüm Sonuçları

Ters çözümle elde edilen Vs profilleri, MR1–MR10 boyunca sığ düşük hızlı zonlar, hız kontrastları ve yerel hız terslenmeleri de dâhil olmak üzere belirgin yatay ve düşey değişkenlik göstermektedir (Şekil 6). Vs30 değerleri 159.9–210.2 m/s arasında değişmektedir. Değerler MR7'de 159.9 m/s, MR10'da 163.6 m/s, MR3'te 169.0 m/s, MR6'da 171.0 m/s, MR1'de 171.8 m/s, MR5'te 176.4 m/s, MR9'da 191.7 m/s, MR4'te 193.6 m/s, MR2'de 196.6 m/s ve MR8'de 210.2 m/s'dir. Ölçümlere ait Vs değerinin derinlikle profili ve Vs30 değerleri sırasıyla ve Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. MR1–MR10 ölçüm noktalarından elde edilen Vs–derinlik profilleri.

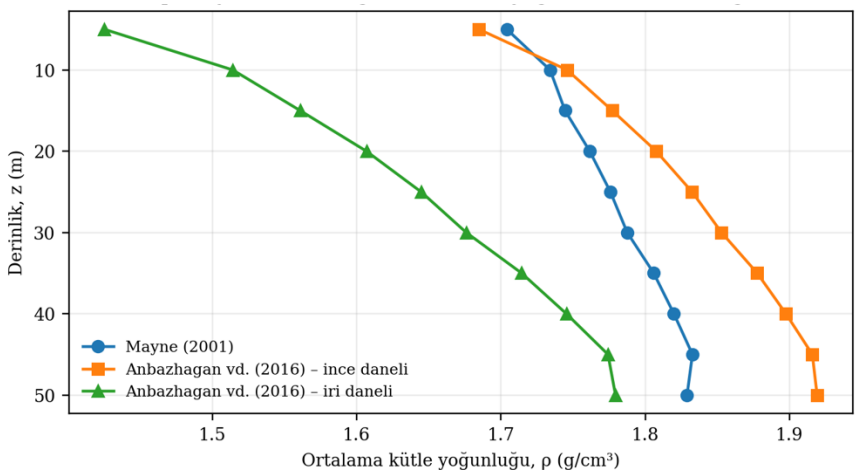


Şekil 6. Ölçüm noktalarına göre Vs30 değerleri

Vs30'un ilk 30 m'yi tek bir eşdeğer parametreyle temsil etmesi nedeniyle, benzer Vs30 değerlerine sahip noktaların daha derin Vs profillerinin farklılaşabileceği ve tek başına Vs30'un tüm düşey rijitlik yapısını yeterine yansıtmayabileceğini göstermektedir

3.3. Yoğunluk Değerlerinin Karşılaştırılması

Üç ampirik yaklaşım kullanılarak hesaplanan yoğunluk profilleri, derinlikle genel bir artış eğilimi göstermekle birlikte mutlak değerler bakımından farklılaşmaktadır. Mayne (2001) yaklaşımında ortalama yoğunluk 5 m seviyesinde yaklaşık 1.70 g/cm³, 30 m'de 1.79 g/cm³ ve 50 m'de yaklaşık 1.83 g/cm³ olarak hesaplanmıştır. Anbazhagan vd. (2016) ince daneli yaklaşımında aynı seviyelerde sırasıyla yaklaşık 1.68, 1.85 ve 1.92 g/cm³; iri daneli yaklaşımında ise yaklaşık 1.43, 1.68 ve 1.78 g/cm³ elde edilmiştir.

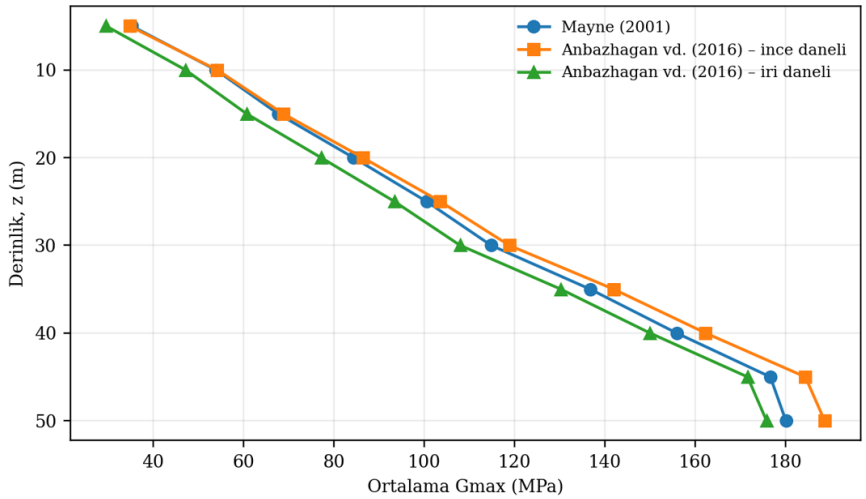


Şekil 7. Farklı ampirik yaklaşımlara göre ortalama yoğunluk–derinlik profilleri.

Mayne (2001) yaklaşımı hem Vs'yi hem de derinliği içerirken Anbazhagan vd. (2016) bağıntıları doğrudan Vs'ye ve zemin tane boyu sınıfına bağlıdır. Bu nedenle özellikle sığ ve düşük hızlı seviyelerde yöntemler arasındaki fark daha belirgin olmaktadır. Çalışma sahasına ait laboratuvar yoğunluk verilerinin nihai aşamada korelasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması, hangi yaklaşımın yerel zeminler için daha temsilî olduğunun değerlendirilmesine imkân sağlayacaktır.

3.4. Maksimum Kayma Modülünün Derinlikle Değişimi

Vs'deki artışın ve yoğunluk değişiminin ortak etkisiyle Gmax değerleri derinlikle belirgin biçimde yükselmektedir. Mayne (2001) yoğunluk yaklaşımına göre ortalama Gmax 5 m'de 35.30 MPa, 10 m'de 53.92 MPa, 20 m'de 84.37 MPa, 30 m'de 114.84 MPa, 40 m'de 155.90 MPa ve 50 m'de 180.08 MPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre ortalama Gmax 5–50 m aralığında yaklaşık %410 artmakta ve yaklaşık 5.1 katına çıkmaktadır. Bu artışın Vs'deki artıştan daha yüksek olması, Gmax'ın Vs'nin karesiyle orantılı olmasının doğrudan sonucudur.



Şekil 8. Farklı yoğunluk yaklaşımlarına göre ortalama Gmax–derinlik profilleri.

3.5. Yöntemin Sınırlılıkları

Yoğunlukların ampirik Vs–yoğunluk korelasyonlarından tahmin edilmiş olması ve yüzey dalgası ters çözümünün tekil olmayan yapısı çalışmanın temel sınırlılıklarıdır. Bu nedenle sonuçlar doğrudan ölçüm yerine Vs tabanlı küçük şekil değiştirme rijitliği tahminleri olarak değerlendirilmelidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Gölbaşı (Adıyaman) ilçesindeki on farklı lokasyonda gerçekleştirilen MASW ve ReMi ölçümleri birlikte değerlendirilerek ölçüm derinliği boyunca bir boyutlu makaslama dalgası hızı (Vs) profilleri elde edilmiş; bu profiller üzerinden Vs30, yoğunluk ve maksimum kayma modülü (Gmax) değerleri belirlenmiştir.

Yüksek frekanslı MASW verileri ile düşük frekanslı ReMi verilerinin birleştirilmesi, dispersiyon eğrilerinin daha geniş bir frekans ve dalga boyu aralığında tanımlanmasını sağlamıştır. Nihai ters çözüm sonuçlarında RMS uyumsuzluk değerlerinin 2,43–4,74 m/s, normalize uyumsuzlukların ise %1,16–2,81 aralığında bulunması, ölçülen ve teorik dispersiyon eğrileri arasında yeterli düzeyde uyum sağlandığını göstermiştir. Böylece MASW ve ReMi yöntemlerinin birlikte kullanılmasının, hem yüzeye yakın hem de daha derin seviyelerdeki Vs yapısının belirlenmesinde tamamlayıcı bir yaklaşım sunduğu ortaya konulmuştur.

Elde edilen Vs profillerinde sığ düşük hızlı zonlar, belirgin hız kontrastları ve yerel hız terslenmeleri tespit edilmiş; araştırma noktaları arasında hem yanal hem de düşey yönde önemli farklılıklar bulunduğu belirlenmiştir. Vs30 değerleri 159,9–210,2 m/s arasında değişmiş; en düşük değer MR7, en yüksek değer ise MR8 lokasyonunda elde edilmiştir. Vs30 değerlerinin görece sınırlı bir aralıkta değişmesine karşın, Vs–derinlik profillerinin daha belirgin farklılıklar göstermesi, benzer Vs30 değerlerine sahip noktaların farklı tabaka ve rijitlik yapılarına sahip olabileceğini ortaya koymuştur. Bu nedenle saha karakterizasyonunda Vs30'un tek başına kullanılmasının yeterli olmayabileceği ve tam Vs–derinlik profillerinin de değerlendirmeye dâhil edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Farklı ampirik yaklaşımlarla hesaplanan yoğunluk değerleri genel olarak derinlikle artmakla birlikte, kullanılan bağıntıya bağlı olarak mutlak değerlerde farklılıklar meydana gelmiştir. Ortalama yoğunluk değerleri 5 m derinlikte 1,43–1,70 g/cm³, 50 m derinlikte ise 1,78–1,92 g/cm³ aralığında hesaplanmıştır. Yöntemler arasındaki farklılığın özellikle sığ ve düşük hızlı seviyelerde belirginleşmesi, yoğunluk tahminlerinde zemin türüne uygun korelasyonun seçilmesinin önemini göstermiştir.

Mayne (2001) yoğunluk yaklaşımına göre ortalama Gmax değeri 5 m derinlikte 35,30 MPa iken 50 m derinlikte 180,08 MPa'a ulaşmıştır. Buna göre ortalama Gmax, 5–50 m aralığında yaklaşık %410 artarak başlangıç değerinin yaklaşık 5,1 katına çıkmıştır. Bu belirgin artış, derinlikle yükselen Vs değerlerinin yanı sıra Gmax'ın Vs'nin karesiyle orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Gölbaşı çökellerinin rijitliğinin genel olarak derinlikle arttığını; ancak yerel düşük hızlı seviyeler ve hız terslenmeleri nedeniyle rijitlik yapısının düzenli ve homojen olmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak birleşik MASW–ReMi yaklaşımı, Gölbaşı havzasındaki zeminlerin düşey ve yanal rijitlik değişimlerinin ortaya konulmasında ve küçük şekil değiştirme seviyesindeki dinamik parametrelerin belirlenmesinde etkili bir yöntem sunmuştur. Elde edilen Vs, Vs30 ve Gmax profilleri; yerel zemin sınıflandırması, saha tepki analizleri ve mühendislik değerlendirmeleri için önemli bir veri altyapısı oluşturmaktadır. Bununla birlikte, yoğunluk değerlerinin ampirik bağıntılardan tahmin edilmesi ve yüzey dalgası ters çözümünün tekil olmayan yapısı dikkate alındığında, elde edilen parametrelerin ayrıntılı saha araştırmaları ile laboratuvar deneylerinden sağlanan verilerin ortak bir jeolojik–geoteknik model çerçevesinde bütünleştirildiği kapsamlı bir zemin karakterizasyonu yaklaşımıyla karşılaştırılması, yerel zemin koşullarına göre kalibre edilmesi ve çapraz doğrulanması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında (Proje No. 125M457) ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (Proje No. PDP-11242) desteklenmektedir. Yazarlar, her iki kurum tarafından sağlanan mali destek için teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Akar ve ark. (2024), "2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Gölbaşı (Adıyaman)'da Neden Olduğu Geoteknik ve Yapısal Hasarlar", Uygulamalı Bilimler, 14(5), 2165. DOI: 10.3390/app14052165

Anbazhagan, P., Uday, A., Moustafa, S. S. R. ve Al-Arifi, N. S. N. (2016). "Correlation of Densities with Shear Wave Velocities and SPT N Values." *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(3), 320–341. DOI: 10.1088/1742-2132/13/3/320

Cetin, K. O., et al. (2025). "Ground Failures and Foundation Performances in Adıyaman–Gölbaşı Following the 6 February 2023 Kahramanmaraş–Türkiye Earthquake Sequence." *Earthquake Spectra*, 41(1), 249–289

Demir vd. (2025), "6 Şubat 2023'te Türkiye'nin Kahramanmaraş Kentinde Meydana Gelen Ardışık Yüksek Büyüklükteki Depremlerin Yıkıcı Etkisi", *Deprem Mühendisliği Bülteni*, 23, 893–919. DOI: 10.1007/s10518-024-01865-5

Flora, A., Bilotta, E., Valtucci, F., Fierro, T., Perez, R., Santucci de Magistris, F., Modoni, G., Spacagna, R., Kelesoglu, M. K., Sargin, S., Altinok, E., Oztoprak, S., Bozbey, I. ve Aysal, N. (2024). "Liquefaction Effects in the City of Gölbaşı: From the Analysis of Predisposing Factors to Damage Survey." *Engineering Geology*, 338, 107633. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107633.

Louie, J. N. (2001). "Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347–364.

Mayne, P. W. (2001). "Stress-Strain-Strength-Flow Parameters from Enhanced In-Situ Tests." *Proceedings of the International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories (In-Situ 2001)*, Bali, Indonesia, 21–24 Mayıs 2001, ss. 27–48.

Moss, R. E. S., Altunel, E., Bassal, P., Bray, J. D., Buckreis, T. E., Cetin, K. O., Clahan, K., Duman, E., Frost, D., Hashash, Y., Koehler, R. D., Kozaci, O., Lozano, J. M., Macedo, J., Moug, D., Nichols, E., Pehlivan, M., Pretell, R., Stewart, J. P., Ulmer, K. J. ve

Yildirim, C. (2025). “Geotechnical and Geological Reconnaissance Observations of the 6 February 2023 Türkiye Earthquakes.” *Earthquake Spectra*, 41(1), 219–248. DOI: 10.1177/87552930241281007.

Pamuk, E., Fırat, S., Büyüksaraç, A., Çetin, K. Ö., Bektaş, Ö., Işık, N. S. ve Sarıtepe, H. E. (2026). “Three Dimensional Shear Wave Velocity (Vs) Structure and Dynamic Soil Properties of Adıyaman-Gölbaşı Basin Using HVSR and SPAC Methods.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 200, 109744.

Park, C. B., Miller, R. D. ve Xia, J. (1999). “Multichannel Analysis of Surface Waves.” *Geophysics*, 64(3), 800–808.

T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. T.C. Resmî Gazete, 18.03.2018.

Tonyalı vd. (2024), “2023 Kahramanmaraş Depremleri Sırasında Kilin Döngüsel Yumuşaması Sonucu Oluşan Temel Arızasının Vaka İncelemesi”, *Mühendislik Jeolojisi*, 332, 107477. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107477

Xia, J., Miller, R. D. ve Park, C. B. (1999). “Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves.” *Geophysics*, 64(3), 691–700.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
Vs	Makaslama dalgası hızı	ρ	Kütle yoğunluğu
Vs30	İlk 30 m eşdeğer makaslama dalgası hızı	γ_{sat}	Doygun birim hacim ağırlık
Gmax	Maksimum kayma modülü	z	Derinlik
hi	i. tabakanın kalınlığı		